

ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΖΟΚΑΣ

**Προσδιορισμός και αξιολόγηση  
λύσεων κυκλικής οικονομίας για τα  
πτερύγια ανεμογεννητριών στο τέλος  
του κύκλου ζωής τους στην Ελλάδα**



**Τομέας: Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας  
Επιβλέπων: Ρεντιζέλας Αθανάσιος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ**

**Αθήνα 2023**



**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**IOANNIS TZOKAS**

**Identifying and assessing circular economy solutions for the End-of-life Wind Turbine blades in Greece**



**Section: Industrial Management & Operational Research**

**Supervisor: Rentizelas Athanasios , Assistant Professor NTUA**

**Athens 2023**



**SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING**

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

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

Ιωάννης Τζόκας

**Περιεχόμενα**

Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
Ευχαριστίες .....	7
Περιεχόμενα Εικόνων .....	8
Περιεχόμενα Πινάκων .....	10
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων .....	11
Περιεχόμενα Σχημάτων.....	12
Συνομογραφίες / Ονοματολογία.....	13
Θεωρητικό μέρος .....	14
1 Εισαγωγή .....	15
2 Σύνθετα Υλικά.....	17
2.1 Εισαγωγή .....	17
2.2 Ιστορική Εξέλιξη Σύνθετων Υλικών.....	17
2.3 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών .....	18
3 Ανεμογεννήτριες .....	19
3.1 Αιολική Ενέργεια .....	19
3.2 Ιστορική εξέλιξη των ανεμογεννητριών .....	19
3.3 Τύποι Ανεμογεννητριών .....	24
3.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα .....	25
3.3.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα .....	28
3.4 Γενικά στοιχεία ανεμογεννητριών .....	28
4 Πτερύγια Ανεμογεννητριών .....	30
4.1 Τεχνολογίες παραγωγής πτερυγίων.....	30
4.2 Δομή πτερυγίων .....	33
4.3 Σύνθετα υλικά για πτερύγια ανεμογεννητριών .....	34
4.3.1 Ίνες.....	35
4.3.2 Μήτρα.....	37

4.3.3	Προτιμώμενο υλικό κατασκευής.....	39
5	Θέματα τέλους κύκλου ζωής ανεμογεννητριών.....	40
5.1	Γήρανση Αιολικών πάρκων.....	40
5.2	Απόβλητα συνθετικών υλικών.....	42
6	Εφαρμογή της ιεραρχίας των αποβλήτων στην αιολική βιομηχανία.....	43
6.1	Πρόληψη.....	43
6.2	Επαναχρησιμοποίηση υλικών – Επέκταση διάρκειας ζωής (LE).....	44
6.3	Αλλαγή χρήσης.....	45
6.4	Ανακύκλωση.....	49
6.5	Ανάκτηση.....	51
6.6	Απόθεση.....	51
7	Ανακύκλωση και ανάκτηση σύνθετων υλικών.....	53
7.1	Αρχική επεξεργασία υλικών.....	53
7.2	Μέθοδοι βιομηχανικής κλίμακας.....	54
7.2.1	Μηχανική Ανακύκλωση.....	54
7.2.2	Αποτέφρωση - Συνεπεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου.....	59
7.2.3	Πυρόλυση.....	62
7.3	Μέθοδοι σε ερευνητικό στάδιο.....	67
7.3.1	Αεριοποίηση / ρευστοποιημένη κλίνη.....	67
7.3.2	Πυρόλυση μικροκυμάτων.....	69
7.3.3	Θερμική επεξεργασία και στη συνέχεια ενίσχυση.....	73
7.3.4	Χημική επεξεργασία.....	73
7.3.5	Κατακερματισμός υψηλής τάσης.....	77
	Ερευνητικό μέρος.....	80
8	Εκτίμηση εγκατεστημένης ισχύος – αποβλήτων.....	81
8.1	Ευρωπαϊκή Ένωση.....	81
8.2	Ελλάδα.....	83
8.2.1	Πρόγνωση εγκατεστημένης ισχύος.....	83

8.2.2	Εκτίμηση αποβλήτων έως το 2050.....	87
9	Οικονομική ανάλυση μεθόδων Ανακύκλωσης .....	91
9.1	Κοστολόγηση μεθόδων Ανακύκλωσης.....	91
9.1.1	Υγειονομική ταφή.....	94
9.1.2	Μηχανική Ανακύκλωση.....	94
9.1.3	Αποτέφρωση - Συν-επεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου .....	95
9.1.4	Θερμικές μέθοδοι ανακύκλωσης .....	95
9.1.5	Χημική Ανακύκλωση.....	96
9.1.6	Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF) .....	96
9.2	Σύνοψη κόστους.....	97
9.3	Όφελος ανακύκλωσης.....	99
9.3.1	Μηχανική Ανακύκλωση.....	101
9.3.2	Αποτέφρωση - Συν-επεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου .....	101
9.3.3	Διαδικασία Ρευστοποιημένης κλίνης.....	102
9.3.4	Πυρόλυση.....	102
9.3.5	Υποβοηθούμενη από μικροκύματα πυρόλυση (MAP).....	102
9.3.6	Χημική ανακύκλωση.....	102
9.3.7	Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF) .....	102
9.4	Σύνοψη Κέρδους/Ζημίας Μεθόδων Ανακύκλωσης .....	103
9.5	Συμπεράσματα .....	108
10	Περιβαλλοντικά Οφέλη / Επιπτώσεις .....	110
10.1	Λογική υπολογισμού και υποθέσεις .....	110
10.2	Οφέλη ανακύκλωσης .....	113
10.3	Ανάπτυξη μοντέλου περιβαλλοντικού αντίκτυπου .....	114
10.4	Συμπεράσματα .....	117
11	Συμπεράσματα .....	119
12	Περιορισμοί και μελλοντική έρευνα .....	121
13	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	122

## Περίληψη

Οι εναλλακτικές πηγές παραγωγής ενέργειας αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι έρευνας στη σύγχρονη εποχή και όπως όλα δείχνουν είναι αυτές που θα μας διευκολύνουν στις δύσκολες εποχές της ενεργειακής και οικονομικής κρίσης που βρίσκεται στον ορίζοντα.

Μία εναλλακτική πηγή ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια, η οποία παράγεται με τη βοήθεια ανεμογεννητριών σε μονάδες με αιολικά πάρκα. Όμως για να είναι βιώσιμη η διαδικασία παραγωγής ενέργειας και για να μην επιβαρύνει και αυτή το περιβάλλον, χρειάζεται να γίνει γύρω από αυτή τη διεργασία μία ανάλυση κύκλου ζωής και να εκτιμηθεί αν είναι συμφέρουσα σαν λύση. Μέσα σε αυτή την ανάλυση ένα σημαντικό κομμάτι είναι η ανακύκλωση των εξαρτημάτων που απαιτούνται για την παραγωγική διαδικασία της αιολικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό οργανώθηκε η εργασία αυτή, η οποία μελετάει σε βάθος τη δυνατότητα ανακύκλωσης του μεγαλύτερου μέρους της ανεμογεννήτριας, των πτερυγίων της.

Η συγκεκριμένη εργασία, λοιπόν, εφόσον κάνει μία εισαγωγή στα βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών με έμφαση πάντα στα πτερύγιά της, ώστε ο αναγνώστης να έχει τη θεωρητική βάση για αυτό που πρόκειται να αναλυθεί, εισέρχεται σε πιο τεχνικά κομμάτια που είναι οι εκτιμήσεις των μελλοντικών εγκαταστάσεων μονάδων αιολικής ενέργειας σε Ελλάδα και Ευρώπη, καθώς και η διαχείριση αποβλήτων στη διαδικασία παραγωγής αιολικής ενέργειας, κομμάτια σημαντικά για να κατανοήσει ο αναγνώστης το μέγεθος του προβλήματος που μπορεί να προκληθεί αν δεν γίνει συστηματική μελέτη για τον κύκλο ζωής των ανεμογεννητριών και τις δυνατότητες που υπάρχουν για την ανακύκλωση των εξαρτημάτων τους μετά το τέλος ζωής τους. Στη συνέχεια γίνεται μία ορθολογική ανάλυση γύρω από τις πιθανές μεθόδους ανακύκλωσης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Αφού παρουσιαστούν οι πιθανές μέθοδοι, γίνεται μελέτη ως προς το κόστος και τα περιβαλλοντικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την ανακύκλωση των πτερυγίων με 7 διαφορετικούς τρόπους έναντι της χρήσης της υγειονομικής ταφής, που είναι η μέθοδος με τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Με βάση την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε η πιο συμφέρουσα λύση ανακύκλωσης πτερυγίων αυτή τη στιγμή είναι η μηχανική ανακύκλωση. Ωστόσο η χημική ανακύκλωση φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματική λύση για το μέλλον αν βρεθεί τρόπος να μειωθούν τα λειτουργικά κόστη της ή/και να αυξηθεί η τιμή πώλησης του ανακυκλώματος στην αγορά.

*Λέξεις Κλειδιά : Απόβλητα πτερυγίων ανεμογεννητριών, Σύνθετα υλικά, Κυκλική οικονομία, Περιβαλλοντική και οικονομική ανάλυση, Ελλάδα*

## *Abstract*

Alternative sources of energy production are a large part of research in the modern era and, as everything shows, they are the ones that will facilitate us in the difficult times of the energy and economic crisis that is on the horizon.

An alternative source of energy is wind energy, which is produced with the help of wind turbines in wind farm units. But in order for the energy production process to be sustainable and not to burden the environment, a life cycle analysis needs to be done around this process and to assess whether it is advantageous as a solution. Within this analysis an important part is the recycling of the material components required for the production process of wind energy. For this purpose, this work was organized, which studies in depth the possibility of recycling the largest part of the wind turbine, its blades.

This particular paper, therefore, since it makes an introduction to the basic characteristics of wind turbines with an emphasis always on its blades, so that the reader has the theoretical basis for what is to be analyzed, enters into more technical parts which are the estimates of future installations of units of wind energy in Greece and Europe, as well as waste management in the wind energy production process, important parts for the reader to understand the magnitude of the problem that can be caused if a systematic study is not done on the life cycle of wind turbines and the possibilities that exist for the recycling of their components after their end of life. Then a rational analysis is made around the possible methods of recycling the wind turbine blades. After presenting the possible methods, a study is made as to the costs and environmental benefits that can be obtained from recycling the blades in 7 different ways versus using landfill, which is the method with the greatest impact on the environment. Based on the analysis carried out, the most advantageous solution for blade recycling at the moment is mechanical recycling. However, chemical recycling seems to be more efficient solution for the future if a way can be found to reduce its operating costs and/or increase the selling price of the recycled material on the market.

*Keywords : Wind turbine blades waste, Composite materials, Circular economy, Environmental and economic analysis, Greece*



## *Ευχαριστίες*

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ρεντιζέλα Αθανάσιο επιστημονικό υπεύθυνο και επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω, καθώς επίσης και για την πολύτιμη συμπαράσταση, την επιστημονική καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου παρείχε, κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας.

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Η πρώτη ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα (Gipe & Möllerström, 2022).....	20
Εικόνα 2: Η πρώτη ανεμογεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Βόρεια Αμερική (Gipe & Möllerström, 2022). .....	21
Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση των πρώτων αιολικών ηλεκτρογεννητριών (Gipe & Möllerström, 2022). .....	21
Εικόνα 4: Η πρώτη ανεμογεννήτρια κλίμακας Μεγαβάτ (Gipe & Möllerström, 2022). .....	23
Εικόνα 5: Η πρώτη ανεμογεννήτρια που ήταν συνδεδεμένη στο εθνικό δίκτυο του Ηνωμένο Βασίλειο (Gipe & Möllerström, 2022).....	24
Εικόνα 6: Παρουσίαση τμημάτων που αποτελούν την οριζόντια ανεμογεννήτρια .....	26
Εικόνα 7: Τα μέρη της ατράκτου (Ανεμογεννήτρια - Βικιπαίδεια, n.d.) .....	26
Εικόνα 8: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα (Ανεμογεννήτρια - Βικιπαίδεια, n.d.).....	27
Εικόνα 9: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα (Ανεμογεννήτρια - Βικιπαίδεια, n.d.) .....	28
Εικόνα 10: Διαδικασία κατασκευής καλουπιών με χρήση υγρής εποξειδικής ρητίνης (Wet Lay-up/Hand Lay-up Manufacturing Process for Composites   MasterBond.Com, n.d.) .....	30
Εικόνα 11: Διαδικασία RTM (Dai & Fan, 2014). .....	32
Εικόνα 12: Διαδικασία VARTM (What Is Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)?, n.d.) .....	32
Εικόνα 13: Τμήμα της βάσης πτερυγίου Α/Γ (Justine Beauson & Brøndsted, 2016). .....	33
Εικόνα 14: Απεικόνιση διατομής πτερυγίου Α/Γ α) με κιβώτιο μεταφοράς φορτίου Β) με δομικούς συνδέσμους. (Justine Beauson & Brøndsted, 2016) .....	34
Εικόνα 15: Ανατροφοδότηση αιολικού πάρκου στην Ισπανία (WindEurope, 2020).....	41
Εικόνα 16: Παραδείγματα εφαρμογών πτερυγίων (André et al., 2020; WindEurope, 2020). 46	
Εικόνα 17: Εικονικές κτιριακές κατασκευές (Bank et al., 2018).....	46
Εικόνα 18: Σχεδιασμός πεζογέφυρας κατασκευασμένης από παροπλισμένα πτερύγια ανεμογεννητριών (André et al., 2020) .....	47
Εικόνα 19: Σχεδιασμός για κατασκευή γεφυρών από παροπλισμένα πτερύγια ανεμογεννητριών (André et al., 2020). .....	48
Εικόνα 20: Τραπεζάκι πικνίκ από επαναχρησιμοποιούμενα πτερύγια ανεμογεννητριών (Joustra et al., 2021).....	49
Εικόνα 21: Εργαλείο στήριξης καπό αυτοκινήτου (WindEurope, 2020).....	49
Εικόνα 22: α) αριστερά - Μοντέρνα αστικά έπιπλα, β) δεξιά - Έπιπλα μπάνιου (WindEurope, 2020).....	50
Εικόνα 23: α) αριστερά - Προκατασκευασμένα μπλοκ από σκυρόδεμα τύπου LEGO, β) δεξιά - Προκατασκευασμένα φρεάτια (Malumbres, 2017). .....	50
Εικόνα 24: Προστατευτικά κιγκλιδώματα από σκυρόδεμα (Malumbres, 2017).....	50
Εικόνα 25: Φράγματα μόνωσης θορύβου στο Θίστιντ (Noise Barrier in Thisted 2019 - Miljøskærm, n.d.) .....	51
Εικόνα 26: Τεμαχισμένο σύνθετο υλικό (Justine Beauson et al., 2016). .....	55
Εικόνα 27: Εικόνες των παραγόμενων κλασμάτων SC (Α) λεπτόκοκκα, (Β) χονδρόκοκκα, (Γ) συσσωματώματα (Justine Beauson et al., 2016). .....	55
Εικόνα 28: Εικόνες οπτικής μικροσκοπίας που δείχνουν τη μικροδομή των σύνθετων υλικών με τα τρία κλάσματα SC: (Α) όπως παραλήφθηκαν, (Β) λεπτό και (Γ) χονδρό. Οι διατομές είναι σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του πάχους των σύνθετων υλικών (Justine Beauson et al., 2016).....	56

Εικόνα 29: Κυλινδρικά κομμάτια gfrp με διάμετρο 6 mm και μήκος 100 mm (Yazdanbakhsh et al., 2018).....	61
Εικόνα 30: Οι μεγεθυμένες προβολές των αποτυχημένων κομματιών δείχνουν ότι οι ίνες ευθυγραμμίζονται εγκάρσια (Yazdanbakhsh et al., 2018).....	62
Εικόνα 31: Στερεά προϊόντα πυρόλυσης (Cunliffe & Williams, 2003). ....	64
Εικόνα 32: Ανακτημένες ίνες μετά το διαχωρισμό (Cunliffe & Williams, 2003).....	64
Εικόνα 33: Ίνες που ανακτώνται από HVF μετά από (a) 500 παλμούς, (b) 1000 παλμούς, (c) 1500 παλμούς, (d) 2000 παλμούς και (e) μηχανική ανακύκλωση (οι κύκλοι δείχνουν μερικώς επεξεργασμένο υλικό) (Mativenga et al., 2016). ....	78
Εικόνα 34: (a) παρθένες ίνες, (b) ίνες σε 500 παλμούς, (c) ίνες σε 2000 παλμούς και (d) ίνες από μηχανική επεξεργασία (Mativenga et al., 2016). ....	78

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Δεδομένα πρόγνωσης της εγκατεστημένης ισχύς.....	85
Πίνακας 2: Αποτελέσματα πρόγνωσης εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα ανά έτος από το 2020 έως το 2050. ....	86
Πίνακας 3: Εξίσωση της διαμέτρου του ρότορα σε σχέση με το βάρος των αποβλήτων για τις ήδη εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες (Lichtenegger et al., 2020). ....	87
Πίνακας 4: Εξίσωση της Συνολικής Εγκατεστημένης Ισχύς σε σχέση με το βάρος (Lichtenegger et al., 2020).....	87
Πίνακας 5: Βάρος Αποβλήτων σε τόνους ανά νομό και έτος έως το 2040 .....	88
Πίνακας 6: Πρόγνωση για απόβλητα ανεμογεννητριών σε τόνους, για τα έτη από 2022 έως και 2050.....	89
Πίνακας 7: Ισοτιμία των νομισμάτων ανά έτος (Historical Exchange Rates from 1953 with Graph and Charts, n.d.-a; Historical Exchange Rates from 1953 with Graph and Charts, n.d.-b).....	91
Πίνακας 8: Ο μέσος όρος του Producer prices in industry των Κρατών της Ευρώπης ανά έτος (Statistics   Eurostat, n.d.).....	92
Πίνακας 9: Κοστολόγηση πρώτων υλών .....	92
Πίνακας 10: Τεχνικά χαρακτηριστικά πρώτων υλών .....	92
Πίνακας 11: Κοστολόγηση ανθρωπίνου δυναμικού .....	93
Πίνακας 12: Σενάριο 1 (Rentizelas et al., 2021). ....	93
Πίνακας 13: Σενάριο 2 (Rentizelas et al., 2021). ....	93
Πίνακας 14: Κοστολόγηση της μηχανικής ανακύκλωσης των πτερυγίων (Rentizelas et al., 2021).....	94
Πίνακας 15: Κοστολόγηση διαδικασίας ρευστοποιημένης κλίνης για συνολική δυναμικότητα 6000 τόνων (Pickering et al., 2000). ....	95
Πίνακας 16: Κοστολόγηση μεθόδου HVF και αναθεώρηση των κοστών στα δεδομένα της Ελλάδας (Final Report Summary - SELFRAG CFRP, n.d.).....	96
Πίνακας 17: Σύνοψη κοστολόγησης παραγωγικής διαδικασίας μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων.....	97
Πίνακας 18: Σύνοψη κοστολόγησης επένδυσης μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων. ....	98
Πίνακας 19: Σύνοψη κοστολόγησης λειτουργικών κοστών μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων.....	98
Πίνακας 20: Κοστολόγηση υλικών πτερυγίων. ....	100
Πίνακας 21: Ποσοστά απόδοσης μεθόδων ανακύκλωσης. ....	100
Πίνακας 22: Σύγκριση αντοχής σε εφελκυσμό που διατηρείται κατά τη χρήση ανακυκλωμένων ινών γυαλιού έναντι παρθένων ινών γυαλιού.....	101
Πίνακας 23: Δυνατότητες ανάκτησης πρώτων υλών για παραγωγή πτερυγίων, ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων. ....	101
Πίνακας 24: Σύνοψη κοστών σε ευρώ και αποτέλεσμα κέρδους ή/και ζημίας σε ευρώ ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων. ....	103
Πίνακας 25: Ενεργειακές απαιτήσεις ανά μέθοδο ανακύκλωσης.....	112
Πίνακας 26: Ενεργειακά στοιχεία για τα υλικά του πτερυγίου Sinoma 45.2A (Liu et al., 2019). ....	115
Πίνακας 27: Περιβαλλοντικός αντίκτυπος σε GigaJoule (GJ) από τα στάδια ενός κατασκευής, λειτουργίας & συντήρησης, και μεταφοράς ενός πτερυγίου GF (Liu et al., 2019).....	115
Πίνακας 28: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων. ....	116

Πίνακας 29 : Συγκεντρωτικά δεδομένα των μεθόδων ανακύκλωσης των πτερυγίων ..... 120

### Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Αναλογίες μαζών των τμημάτων της ανεμογεννήτριας (Justine Beauson & Brøndsted, 2016).....	29
Διάγραμμα 2: Ηλικία αιολικών πάρκων στην Ευρώπη (WindEurope, 2020).....	41
Διάγραμμα 3: Παραγωγή αποβλήτων σύνθετων υλικών (WindEurope, 2020).....	42
Διάγραμμα 4: Ακαθάριστες ετήσιες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών στην Ευρώπη (WindEurope, 2020). .....	82
Διάγραμμα 5: Πρόβλεψη υλικών αποβλήτων πτερυγίων από ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη έως το 2050 (Lichtenegger et al., 2020). .....	82
Διάγραμμα 6: Συνολική δυναμικότητα (MW) ανά έτος (Hwea & Energy, 2020) .....	83
Διάγραμμα 7: Εγκατεστημένη ισχύς (MW) ανά περιφέρεια ελλαδικού χώρου (Hwea & Energy, 2020).....	84
Διάγραμμα 8: Πρόγνωση εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα. ....	85
Διάγραμμα 9: Αποτελέσματα πρόγνωσης των αποβλήτων των ανεμογεννητριών σε τόνους για τα έτη 2022 – 2050. ....	90
Διάγραμμα 10: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τα λειτουργικά κόστη ανά μέθοδο ανακύκλωσης (χωρίς τη μέθοδο HVF). .....	104
Διάγραμμα 11: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τα λειτουργικά κόστη ανά μέθοδο ανακύκλωσης. ....	105
Διάγραμμα 12: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τη τιμή ανακύκλωσης των πτερυγίων ανά μέθοδο ανακύκλωσης (χωρίς τη μέθοδο HVF). .....	105
Διάγραμμα 13: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τη τιμή ανακύκλωσης των πτερυγίων ανά μέθοδο ανακύκλωσης. ....	106
Διάγραμμα 14: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τη δυναμικότητα ανά μέθοδο ανακύκλωσης (χωρίς τη μέθοδο HVF).....	107
Διάγραμμα 15: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τη δυναμικότητα ανά μέθοδο ανακύκλωσης .....	107
Διάγραμμα 16: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων. ....	116

## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: Ιεραρχική πυραμίδα για τα απόβλητα των ανεμογεννητριών. ....	43
Σχήμα 2: Ανάκτηση υλικών μέσω της διαδικασίας μηχανικής ανακύκλωσης (P. Liu, 2017)..	55
Σχήμα 3: Αντιδραστήρας σταθερής κλίνης για πυρόλυση σύνθετου υλικού (Cunliffe & Williams, 2003).....	63
Σχήμα 4: Σχηματικό διάγραμμα του αντιδραστήρα που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα πυρόλυσης (Torres et al., 2009). ....	66
Σχήμα 5: Διεργασία ρευστοποιημένης κλίνης (Pickering et al., 2000). ....	68
Σχήμα 6: Κατασκευή σύνθετων υλικών από ορθοφθαλική ρητίνη με ανακυκλωμένο και παρθένο υαλοβάμβακα (De Moraes et al., 2019). ....	71
Σχήμα 7: Σύστημα μικροκυμάτων στο Instituto Mauá de Tecnologia (De Moraes et al., 2019). ....	72
Σχήμα 8: Προϊόντα από πτερύγια ανεμογεννητριών μέσω της σολβόλυσης με υποκρίσιμο νερό (Mattsson et al., 2020). ....	76
Σχήμα 9: Χωροταξική χωρητικότητα σε MW (Hwea & Energy, 2020) ....	84
Σχήμα 10: Σχηματική λογική ροή για τον υπολογισμό των καθαρών επιπτώσεων της κάθε μεθόδου ανακύκλωσης (Liu et al., 2019). ....	110

## Συνομογραφίες / Ονοματολογία

Συνομογραφία	Αγγλική ορολογία	Ελληνική ορολογία
	Benchmark	Σημείο αναφοράς
CF	Carbon fibre	Ανθρακόνημα
CFRP	Carbon fiber reinforced polymers	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
	Chemical-Solvolyis	Σολβόλυση
EoL	End of life	Τέλος διάρκειας ζωής
	EoL impact	Αντίκτυπος στο τέλος της διάρκειας ζωής του πτερυγίου
	Fluidized bed	Ρευστοποιημένη κλίνη
GFRP	Glass fiber reinforced polymers	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού
GF	Glass fibre	Υαλόνημα
HVF	High voltage fragmentation	Θρυμματισμός υψηλής τάσης
	Incineration	Αποτέφρωση
	Landfill	Υγειονομική ταφή
LCA	Life cycle assessment	Εκτίμηση κύκλου ζωής
LE	Life extension	Επέκταση διάρκειας ζωής
	Lifetime impact	Αντίκτυπος χρήσης από όλη τη διάρκεια ζωής του πτερυγίου
	Mechanical	Μηχανική Επεξεργασία
MAP	Microwave assisted pyrolysis	Πυρόλυση μέσω μικροκυμάτων
	Net impact	Καθαρός αντίκτυπος
O&M	Operation and maintenance	Λειτουργία & Συντήρηση
	Pyrolysis	Πυρόλυση
	Recycling benefit	Οφέλη ανακύκλωσης
WT	Wind turbine	Α/Γ Ανεμογεννήτρια
WTB	Wind Turbine Blade	Πτερύγιο Ανεμογεννήτριας

Θεωρητικό μέρος



## 1 Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια είναι μια καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που έχει γνωρίσει ταχεία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Ενώ οι ανεμογεννήτριες έχουν ελάχιστη ρύπανση και εκπομπές κατά τη λειτουργία τους, η κατασκευή και ο παροπλισμός τους μπορεί να επιφέρει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό αποτελεί ένα μείζον ζήτημα καθώς πολλές ανεμογεννήτριες φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Η συντριπτική πλειοψηφία του βάρους ενός στροβίλου (94%) αποτελείται από μέταλλα όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και ο χαλκός, τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν (Schleisner, 2000). Αυτή τη στιγμή το 85-90% του βάρους μια ανεμογεννήτριας (Α/Γ) μπορεί να ανακυκλωθεί (WindEurope, 2020). Αν και έχουν καθιερωθεί πρακτικές ανακύκλωσης για τα περισσότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι πιο δύσκολο να ανακυκλωθούν λόγω των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τους. Η WindEurope εκτιμά ότι έως το 2023, 2 GW αιολικής ενέργειας θα μπορούσαν να παροπλιστούν στην Ευρώπη. Αυτό θα απαιτούσε την ανακύκλωση περίπου 4.700 στροβίλων ή 14.000 πτερυγίων (40.000 – 60.000 τόνους υλικού) (Paulsen & Enevoldsen, 2021). Η ανακύκλωση αυτών των πτερυγίων αποτελεί κορυφαία προτεραιότητα για την αιολική βιομηχανία και απαιτεί συγκεκριμένη διαχείριση και τεχνολογία για την αποσυναρμολόγηση, τη συλλογή, τη μεταφορά και τη διαχείριση των απορριμμάτων. Οπότε, η επιλογή ενός τρόπου διαχείρισης των πτερυγίων μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους (EOL) κρίνεται απαραίτητος, καθώς μπορεί να συντελέσει στη μείωση του όγκου των απορριμμάτων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψιν τους όγκους των πτερυγίων που θα παροπλιστούν στα επόμενα χρόνια.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία γίνεται μια προσπάθεια για την αξιολόγηση των λύσεων για την κυκλική οικονομία των πτερυγίων των ανεμογεννητριών στο τέλος της ζωής τους στην Ελλάδα. Εφόσον κάνει μία εισαγωγή στα βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών, εισέρχεται σε πιο τεχνικά κομμάτια που είναι οι εκτιμήσεις των μελλοντικών εγκαταστάσεων μονάδων αιολικής ενέργειας σε Ελλάδα και Ευρώπη, καθώς και η διαχείριση των αποβλήτων των πτερυγίων, κομμάτια σημαντικά για την κατανόηση του μεγέθους του προβλήματος που μπορεί να προκληθεί αν δεν γίνει συστηματική μελέτη για τον κύκλο ζωής των ανεμογεννητριών και τις δυνατότητες που υπάρχουν για την ανακύκλωση των εξαρτημάτων τους μετά το τέλος ζωής τους.

Εν συνεχεία, γίνεται μία ορθολογική ανάλυση γύρω από τις πιθανές μεθόδους ανακύκλωσης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών χρησιμοποιώντας βιβλιογραφικά

δεδομένα. Αφού παρουσιαστούν οι πιθανές μέθοδοι, γίνεται μια πρόγνωση για την εγκατεστημένη ισχύ στην Ελλάδα και υπολογίζονται τα απόβλητα που θα υπάρχουν ανά έτος στην Ελλάδα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια μελέτη ως προς το κόστος και τα περιβαλλοντικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την ανακύκλωση των πτερυγίων βασιζόμενοι σε υπάρχουσες έρευνες και προσαρμόζοντας αυτές στα δεδομένα της Ελλάδας. Συνυπολογίζοντας τα παραπάνω, η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η πιο συμφέρουσα μέθοδος ανακύκλωσης αυτή τη στιγμή είναι η μηχανική ανακύκλωση, ενώ η χημική ανακύκλωση μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη στο μέλλον αν βρεθεί τρόπος να μειωθούν τα λειτουργικά κόστη της ή εάν αυξηθεί η τιμή του ανακυκλωμένου πτερυγίου στην αγορά ή το κόστος των πρώτων υλών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που πραγματοποιήθηκε βασίζεται στην ενέργεια και όχι σε άλλες πτυχές όπως οι εκπομπές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν σε δεδομένα και μονάδες ενέργειας.

## 2 Σύνθετα Υλικά

### 2.1 Εισαγωγή

Σύνθετο υλικό, ονομάζεται ένα υλικό το οποίο συνήθως αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά τα οποία συνδυάζονται ώστε το τελικό υλικό να έχει μοναδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, τις οποίες κανένα από τα επιμέρους συστατικά δεν έχει. Όπως αναφέρθηκε τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από τη συνύπαρξη τουλάχιστον δύο μακροσκοπικά διακριτών συστατικών, εκ των οποίων:

- Το ένα προσδίδει στο σύνθετο υλικό τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες και ονομάζεται συστατικό ενίσχυσης
- Το δεύτερο συστατικό, το οποίο είναι χαμηλής πυκνότητας και καλείται μήτρα, με τη συμμετοχή του οποίου εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Το συστατικό ενίσχυσης ενός σύνθετου υλικού μπορεί να έχει τη μορφή ινών, σωματιδίων ή νιφάδων, ενώ το υλικό μήτρας είναι συνήθως συνεχές. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθετου υλικού που χρησιμοποιείται στις κατασκευές, όπου ενισχύεται με χαλύβδινες ράβδους. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το Fiberglass, όπου μια πολυεστερική ρητίνη ενισχύεται με ίνες γυαλιού. Το συγκεκριμένο σύνθετο υλικό χρησιμοποιείται στην κατασκευή θαλάσσιων σκαφών, αεροσκαφών και πτερυγίων ανεμογεννητριών..

### 2.2 Ιστορική Εξέλιξη Σύνθετων Υλικών

Η χρήση των σύνθετων υλικών ξεκινά από τα βάθη των αιώνων (2000 π.Χ.) καθώς αρχαιολογικά ευρήματα αποδεικνύουν ότι στην Αίγυπτο και στην Μεσοποταμία εφαρμόζονταν η τεχνική ενίσχυσης των τούβλων λάσπης με πλέγμα από άχυρα. Τα άχυρα επίσης χρησιμοποιούνταν ως συστατικά ενίσχυσης στην αγγειοπλαστική και στην κεραμοποιεία. Στη ρωμαϊκή εποχή, η οδοποιία βασιζόταν στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών.

Η σύγχρονη βιομηχανία σύνθετων υλικών έχει αναπτυχθεί με βάση την εξέλιξη που έχει υπάρξει στον τομέα της τεχνολογίας των πρώτων υλών. Οι πρώτες ίνες γυαλιού δημιουργήθηκαν το 1930 ταυτόχρονα με τις πολυεστερικές ρητίνες, με αποτέλεσμα τη δημιουργία και την εμπορική χρήση του πρώτου σύνθετου υλικού πολυμερούς μήτρας ενισχυμένου με ίνες γυαλιού, όπου πρωτοχρησιμοποιήθηκε στην ναυπηγική βιομηχανία το

1940. Έκτοτε, η εφαρμογή του εξαπλώθηκε ραγδαία και σε άλλους κλάδους της βιομηχανίας όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων.

Το επόμενο στάδιο στην εξέλιξη των σύνθετων υλικών θα χαρακτηριστεί από την ανάπτυξη σύνθετων υλικών υψηλότερης αντοχής, με την χρησιμοποίηση ινών άνθρακα, βορίου και αραμιδίου. Την δεκαετία του 1960 ξεκίνησε η ανάπτυξη ινών γυαλιού υψηλής αντοχής και των ινών βορίου υψηλής δυσκαμψίας, ενώ οι ίνες άνθρακα διατέθηκαν για πρώτη φορά στην αγορά το 1964, αν και μόνο σε μικρές ποσότητες. Το 1971, οι ίνες αραμιδίου έγιναν διαθέσιμες στην αγορά και γρήγορα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε ελαστικά αυτοκινήτων, και στην αεροδιαστημική και ναυπηγική βιομηχανία. (Buragohain, 2017).

### 2.3 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών

Ανάλογα με το είδος των υλικών που χρησιμοποιούνται, οι μήτρες διακρίνονται σε :

- Οργανικές μήτρες
- Μεταλλικές μήτρες
- Κεραμικές μήτρες
- Μήτρες άνθρακα

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε:

**A) Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών:** μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών σε μονοδιευθυντικά και σε πολυδιευθυντικά. Τα πολυκατευθυντικά σύνθετα μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν σύμφωνα με το σχέδιο των ινών. Στα σύνθετα υλικά τυχαίας κατεύθυνσης, οι ίνες προσανατολίζονται σε τυχαίες κατευθύνσεις. Στα σύνθετα υλικά ύφανσης, οι ίνες είναι συνυφασμένες. Σε τρι-ορθογώνια σύνθετα υλικά, οι ίνες είναι διατεταγμένες σε ένα τριγωνικό σχέδιο.

**B) Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων:** σε αυτά τα σωματίδια είναι συνήθως σφαιρικού σχήματος και με βάση το μέγεθος τους μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

ι) στα σύνθετα με ενίσχυση μεγάλου μεγέθους σωματιδίων τα οποία έχουν διάμετρο λίγων μm και βρίσκονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25% με την κατά όγκο συγκέντρωσή τους να είναι της τάξεως του 60-90%

ιι) στα σύνθετα με ενίσχυση μικρών σωματιδίων τα οποία βρίσκονται σε διασπορά σε συγκεντρώσεις μικρότερες του 15%.

**Γ) Στρωματικά σύνθετα υλικά:** αυτά περιέχουν μια μεγάλη ποικιλία συνδυασμού υλικών, τα οποία είναι διατεταγμένα σε διαδοχικές στρώσεις για να συνθέσουν το τελικό προϊόν. Στα

στρωματικά σύνθετα υλικά περιλαμβάνονται τα υλικά με επιστρώματα μικρού και μεγάλου πάχους, τα διμεταλλικά υλικά, τα πολυστρωματικά υλικά και τα υλικά sandwich (O’Leary et al., 2019) (Buragohain, 2017).

## 3 Ανεμογεννήτριες

### 3.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που προέρχεται από τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας. Στόχος των ανθρώπων είναι να χρησιμοποιήσουν την αιολική ενέργεια για να τροφοδοτήσουν άλλες μορφές ενέργειας, όπως για παράδειγμα ανεμόμυλοι που χρησιμοποιήθηκαν για την άλεση σιτηρών. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο αντλητικός ανεμόμυλος, ο οποίος μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε δυναμική καθώς μεταφέρει το νερό σε υψηλό υψόμετρο. Η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι μια τεχνολογία που έχει τραβήξει τη μεγαλύτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια και επιτυγχάνεται με τη χρήση ανεμογεννητριών. Η αιολική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που είναι ήπια και ανανεώσιμη και είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους ενέργειας καθώς:

α) Κατά τη μετατροπή της δεν παράγονται επιβλαβή για το περιβάλλον προϊόντα, όπως αέρια του θερμοκηπίου ή τοξικά αέρια.

β) Η παραγωγή της βασίζεται σε συνεχή μετεωρολογικά φαινόμενα.

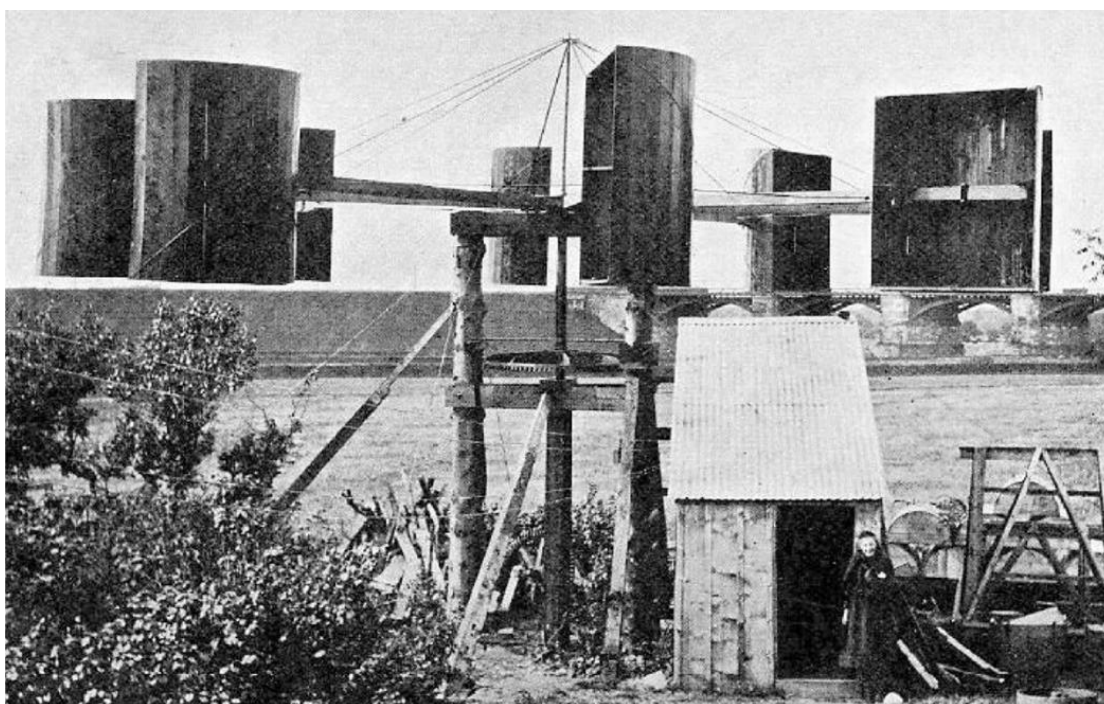
γ) Κατά τη χρήση της απαιτείται ειδική κατασκευή, αφού η φορά του ανέμου δεν είναι πάντα η ίδια.

Η ετήσια αιολική ενέργεια που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει το μερίδιο της πρωτογενούς παραγωγής κάθε χώρας, μετρούμενη σε watt ή τόνους ισοδύναμου πετρελαίου. Η ικανότητα της αιολικής ενέργειας να παράγει ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα χαρακτηριστικό κάθε γεωγραφικής περιοχής, το οποίο δίνεται με τον όρο αιολικό δυναμικό και εκφράζεται ως η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Το αιολικό δυναμικό εκτιμάται με τη μέτρηση και την καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου.

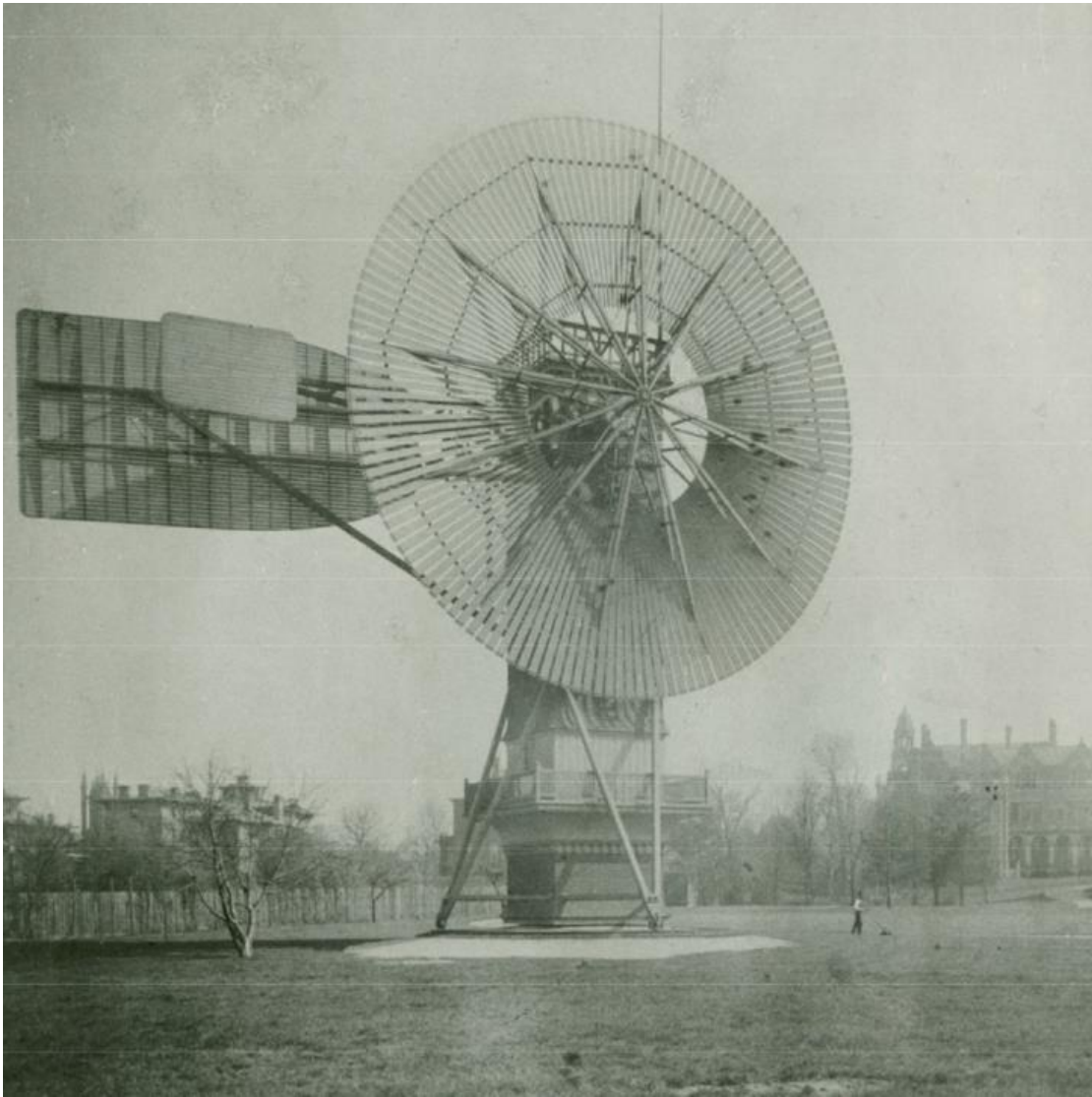
### 3.2 Ιστορική εξέλιξη των ανεμογεννητριών

Η πρώτη ανεμογεννήτρια παραγωγής ρεύματος ήταν μία μηχανή φόρτισης μπαταριών που εφευρέθηκε τον Ιούλιο του 1887 από τον Σκωτσέζο ακαδημαϊκό Τζέιμς Μπλιθ στο Μέρικιρκ της Σκωτίας. Κατασκεύασε έναν συμβατικό ευρωπαϊκό ανεμόμυλο με τέσσερα πτερύγια χρησιμοποιώντας υφασμάτινα πανιά. Ο Μπλιθ όχι μόνο κατασκεύασε την πρώτη

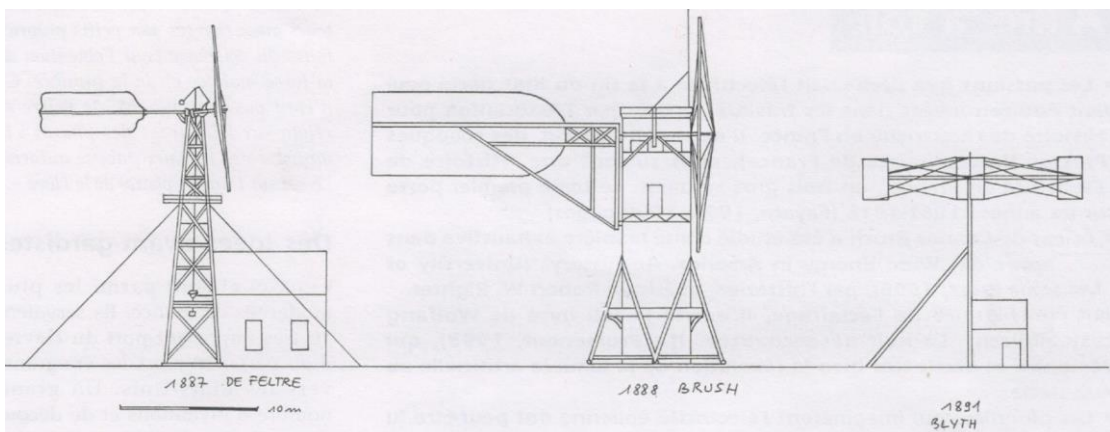
ανεμογεννήτρια που παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά κατασκεύασε και την πρώτη ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα το 1891 (Εικόνα 1). Ο Γάλλος ευγενής Charles de Gouyon, ο δούκας de Feltre και οι συνεργάτες τους συνέδεσαν έναν ανεμόμυλο με δύο δυναμό για τη φόρτιση μπαταριών. Στη συνέχεια τροποποίησαν το σχέδιό τους για να τροφοδοτήσουν ένα φάρο για λογαριασμό της γαλλικής κυβέρνησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή ήταν η πρώτη φορά όπου μια ανεμογεννήτρια χρησιμοποιείται για πώληση παραγόμενης ενέργειας. Ο Αμερικανός βιομήχανος Τσαλρς Φ. Μπρας ανέπτυξε την πρώτη ανεμογεννήτρια στη Βόρεια Αμερική για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο κτήμα του στο Κλίβελαντ το 1888 (Εικόνα 2) (Gipe & Möllerström, 2022).



Εικόνα 1: Η πρώτη ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα (Gipe & Möllerström, 2022).



Εικόνα 2: Η πρώτη ανεμογεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Βόρεια Αμερική (Gipe & Möllerström, 2022).



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση των πρώτων αιολικών ηλεκτρογεννητριών (Gipe & Möllerström, 2022).

Στη Δανία, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιούνταν συνήθως για μηχανικές εργασίες όπως η άντληση νερού και στα ελαιοτριβεία ξεκινώντας από τις αρχές του 1900. Μέχρι το 1908, υπήρχαν 72 ανεμογεννήτριες στη χώρα, με εύρος ισχύος από 5 έως 25 κιλοβάτ. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, 100.000 ανεμόμυλοι κατασκευάζονταν κάθε χρόνο κατά τη διάρκεια του Α' Παγκοσμίου Πολέμου, κυρίως για την άντληση νερού.

Από τη δεκαετία του 1930, οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε αγροκτήματα, ειδικά στις ΗΠΑ, όπου δεν έχει ακόμη κατασκευαστεί δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Εκείνη την εποχή, οι τιμές του χάλυβα ήταν χαμηλές και ως εκ τούτου πολλές ανεμογεννήτριες βασίζονταν σε χαλύβδινο σκελετό.

Στη Γιάλτα, το Ινστιτούτο Αιολικής Ενέργειας της Μόσχας εγκατέστησε μια ανεμογεννήτρια 100 kW με τρία πτερύγια και διάμετρο 30 μέτρων. Ξεκινώντας τη λειτουργία της το 1931 συνδεόταν με ένα τοπικό δίκτυο διανομής 6.3 KV. Θεωρείται η μεγαλύτερη επιστημονική επίτευξη στον τομέα εκείνη την εποχή και αποτέλεσε πρόδρομο των σύγχρονων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα. Παρέμεινε σε λειτουργία μέχρι την καταστροφή της κατά τη διάρκεια του Β' παγκοσμίου πολέμου το 1942.

Το φθινόπωρο του 1941, η πρώτη ανεμογεννήτρια κλίμακας Μεγαβάτ λειτούργησε στο Βερμόντ (εικόνα 4). Δούλεψε μόνο για 1.100 ώρες πριν υποστεί σοβαρή βλάβη. Δεν επισκευάστηκε ποτέ, λόγω έλλειψης υλικών κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν ξανακατασκευάστηκε ανεμογεννήτρια αυτού του μεγέθους στα επόμενα τριάντα χρόνια.





*Εικόνα 4: Η πρώτη ανεμογεννήτρια κλίμακας Μεγαβάτ (Gipe & Möllerström, 2022).*

Η σκωτσέζικη κατασκευαστική εταιρεία John Brown Engineering εγκατέστησε μια πειραματική ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων στα νησιά Όρκνεϊ το 1955 (Εικόνα 5). Λειτουργούσε μόνο κατά διαστήματα συνδεδεμένη με το δίκτυο ντίζελ του νησιού πριν αποσυρθεί.



Εικόνα 5: Η πρώτη ανεμογεννήτρια που ήταν συνδεδεμένη στο εθνικό δίκτυο του Ηνωμένο Βασίλειο (Gipe & Möllerström, 2022).

Η σύγχρονη βιομηχανία αιολικής ενέργειας ξεκίνησε το 1979 με την παραγωγή ανεμογεννητριών από τους Δανούς κατασκευαστές Kuriant, Vestas, Nordtank και Bonus. Αυτές οι ανεμογεννήτριες ήταν αρκετά μικρές σε σύγκριση με τα σημερινά δεδομένα, με ισχύ 20-30 kW η κάθε μία (Gipe & Möllerström, 2022; *Windmills and Their Technology since the Middle Ages – Brewminate: A Bold Blend of News and Ideas*, n.d.).

### 3.3 Τύποι Ανεμογεννητριών

Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής τους, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: αυτές με οριζόντιο άξονα περιστροφής και αυτές με κάθετο άξονα. Ο πρώτος τύπος περιλαμβάνει τον μεγαλύτερο αριθμό ανεμογεννητριών, αλλά αυτός ο τύπος είναι ο παλαιότερος (*Wind Energy Basics*, n.d.). Τα πτερύγια που έχουν μπορεί να είναι ή να μην είναι αποσπώμενα (*Bladeless Wind Turbine Could Be 2X as Efficient as Conventional Designs*, n.d.) (*The Future of Wind Turbines? No Blades | WIRED*, n.d.). Οι

ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι ο πιο ενεργειακά αποδοτικός και ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος ανεμογεννητριών (M. Saad, 2014).

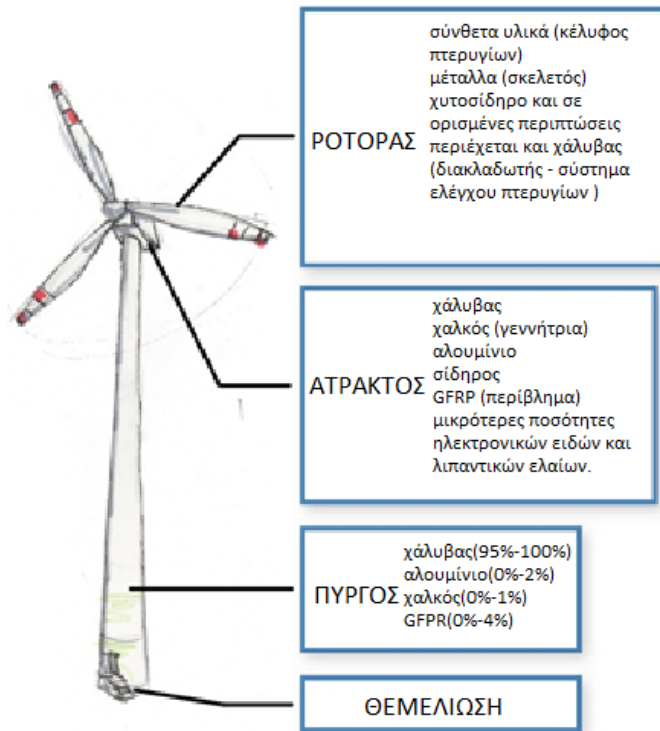
### 3.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα για τη θεμελίωσή τους έχουν σπλισμένο σκυρόδεμα και αποτελούνται από (Εικόνα 6) : (Ανεμογεννήτρια - Βικιπαίδεια, n.d.)

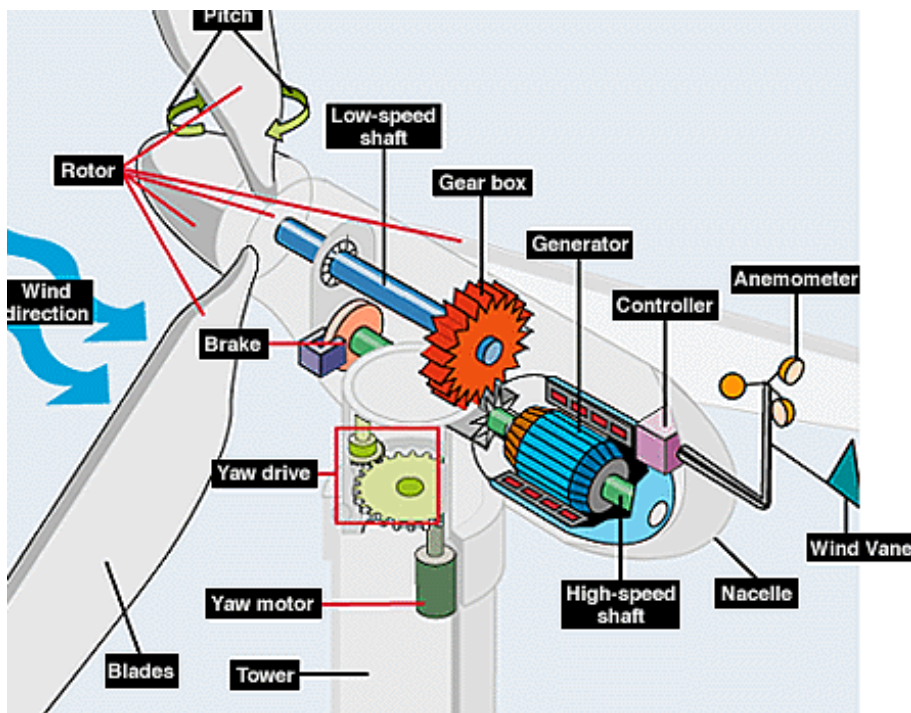
- Το ρότορα που αντιστοιχεί στο 1/5 του κόστους της διάταξης και αποτελείται από τα πτερύγια με τα οποία γίνεται η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε περιστροφική κινητική ενέργεια.
- Την άτρακτο στην οποία βρίσκονται: η γεννήτρια (Goudarzi & Zhu, 2013), τα συστήματα ελέγχου και το κιβώτιο ταχυτήτων (*Hansen W4 Series*, n.d.) αν αυτό περιέχεται στη διάταξη (Εικόνα 7). Το κόστος της ατράκτου αντιστοιχεί στο 34% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας.
- Ο πύργος υποστήριξης, όπου βρίσκεται και ο μηχανισμός εκτροπής των στροφών (*“Wind Turbine Design Cost and Scaling Model”, Technical Report NREL/TP-500-40566, December, 2006, Page 35, 36, n.d.*).

Για μια συνηθισμένη ανεμογεννήτρια ισχύουν τα εξής:

- Η ισχύς της είναι 1,5MW
- Το ύψος της φτάνει τα 80m
- Η μάζα του ρότορα είναι περίπου 22tn
- Η άτρακτος ζυγίζει 52tn
- Ο πύργος περιέχει 26tn χαλύβδινου υλικού και 190m<sup>3</sup> σπλισμένο σκυρόδεμα
- Η διάμετρος του πύργου στη βάση είναι 15m ενώ το πάχος του τοιχώματος είναι 2,4m.



Εικόνα 6: Παρουσίαση τμημάτων που αποτελούν την οριζόντια ανεμογεννήτρια



Εικόνα 7: Τα μέρη της ατράκτου (Ανεμογεννήτρια - Βικιπαίδεια, n.d.)

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ο άξονας, ο ρότορας και η ηλεκτρική γεννήτρια βρίσκονται στην κορυφή του πύργου (Εικόνα 8). Ο προσανατολισμός αυτών των στοιχείων πρέπει να είναι προς την κατεύθυνση του ανέμου, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση

ανεμοδείκτη σε μικρές ανεμογεννήτριες και αισθητήρων και βοηθητικών κινητήρων σε μεγαλύτερες. Εάν η ταχύτητα του ανέμου είναι χαμηλή και τα πτερύγια περιστρέφονται αργά, χρησιμοποιείται ένα κιβώτιο ταχυτήτων για να αυξηθεί η συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων σε ένα επίπεδο που είναι επιθυμητό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Wagner, 2019). Ορισμένοι τύποι ανεμογεννητριών μπορούν να παράγουν ισχύ μόνο από την ταχύτητα του ρότορα. Αν και οι περισσότερες ανεμογεννήτριες παράγουν ισχύ με μεταβλητή ταχύτητα, υπάρχουν ορισμένοι τύποι που λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα.



Εικόνα 8: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα (Ανεμογεννήτρια - Βικιπαίδεια, n.d.).

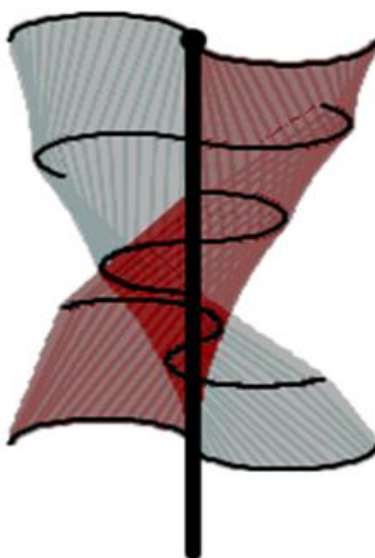
Η περιστροφή οποιουδήποτε στερεού αντικειμένου δημιουργεί στροβιλισμούς του αέρα πίσω από αυτό. Αυτό ισχύει και για τις ανεμογεννήτριες, στις οποίες τα μεταλλικά μέρη μπορεί να καταπονηθούν από τον άνεμο. Για να αποφευχθεί αυτό, οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στην αντίθετη κατεύθυνση από τον πύργο στήριξης.

Τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας τοποθετούνται σε απόσταση από τον πύργο στήριξης και μερικές φορές έχουν μια ελαφρά κλίση προς τα εμπρός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πτερύγια μπορεί μερικές φορές να λυγίζουν σε ισχυρούς ανέμους, μειώνοντας την αντίσταση του αέρα πάνω τους. Τα αιολικά πάρκα που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιούν ανεμογεννήτριες που έχουν τρία πτερύγια. Αυτή η διαμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή διακύμανση της ροπής, η οποία οδηγεί σε αυξημένη αξιοπιστία. Τα

πτερύγια των στροβίλων είναι λευκά, έτσι ώστε να είναι ορατά στα αεροσκάφη και έχουν μήκος 20-80μ. Το μέγεθος και το ύψος των ανεμογεννητριών αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Σε περιπτώσεις ισχυρών ανέμων, είναι πιθανό να προκληθούν ζημιές. Για την αποφυγή τους, οι ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με σύστημα ασφαλείας που σταματά τον ρότορα.

### 3.3.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Εικόνα 9) έχουν τον ρότορα προσανατολισμένο κάθετα στο έδαφος. Σε ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου, η γεννήτρια δεν πρέπει να έχει την ίδια κατεύθυνση με τον άνεμο, επομένως είναι πιο αποδοτικές σε περιοχές με μεταβλητούς ανέμους. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι τόσο η γεννήτρια όσο και το κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκονται κοντά στο έδαφος, διευκολύνοντας έτσι τις διαδικασίες συντήρησης. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των διατάξεων είναι ότι έχουν κατά μέσο όρο μικρή παραγωγή ενέργειας (*Vertical Axis Wind Turbines: Great In 1890, Also-Rans In 2014 - CleanTechnica, n.d.*).



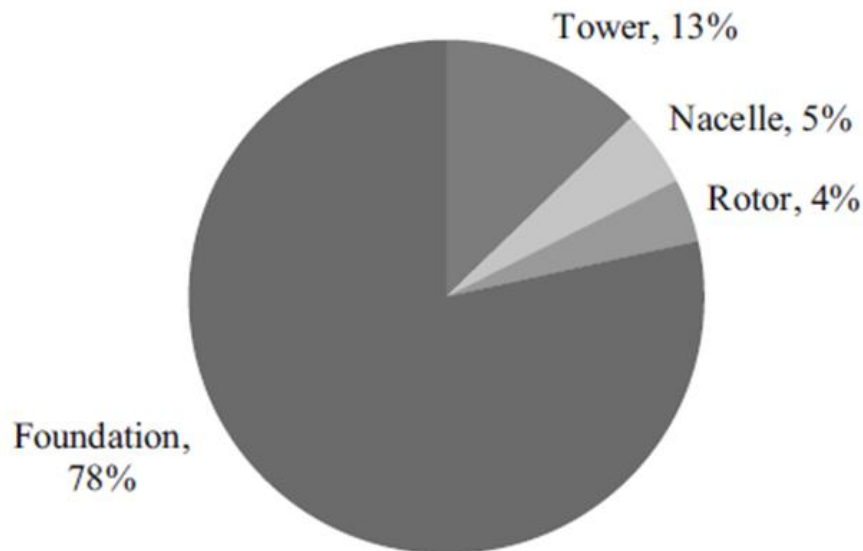
Εικόνα 9: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα (Ανεμογεννήτρια - Βικιπαίδεια, n.d.).

Κατηγορίες της ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα είναι: Ανεμογεννήτρια Darrieus, Γυρόμυλος, Ανεμογεννήτρια savonius, Πλωτές ανεμογεννήτριες.

## 3.4 Γενικά στοιχεία ανεμογεννητριών

Η διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών είναι περίπου 20 χρόνια και σε αυτό το διάστημα πρέπει να γίνονται έλεγχοι, επισκευές και αντικαταστάσεις των στροβίλων και των εξαρτημάτων τους, ενώ είναι σίγουρο πως τα πτερύγια θα υποστούν ζημιές από τα καιρικά

φαινόμενα και τις τυχόν προσκρούσεις. Τα ανωτέρω συμπεριλαμβανομένων των πιθανών φθορών στις τουρμπίνες είναι τα αίτια παροπλισμού ενός αιολικού πάρκου. Φυσικά και μπορεί αντί να παροπλιστεί, απλά να τροφοδοτηθεί με νέες τουρμπίνες. Όπως προαναφέρθηκε μια ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει το ρότορα (rotor), το περίβλημα της γεννήτριας (nacelle), τον πύργο στήριξης (tower) και τη θεμελίωση (foundation). Στο διάγραμμα 1 φαίνονται το ποσοστό των μαζών των παραπάνω διατάξεων σε μια Α/Γ Vestas V82 (Justine Beauson & Brøndsted, 2016).



Διάγραμμα 1: Αναλογίες μαζών των τμημάτων της ανεμογεννήτριας (Justine Beauson & Brøndsted, 2016)

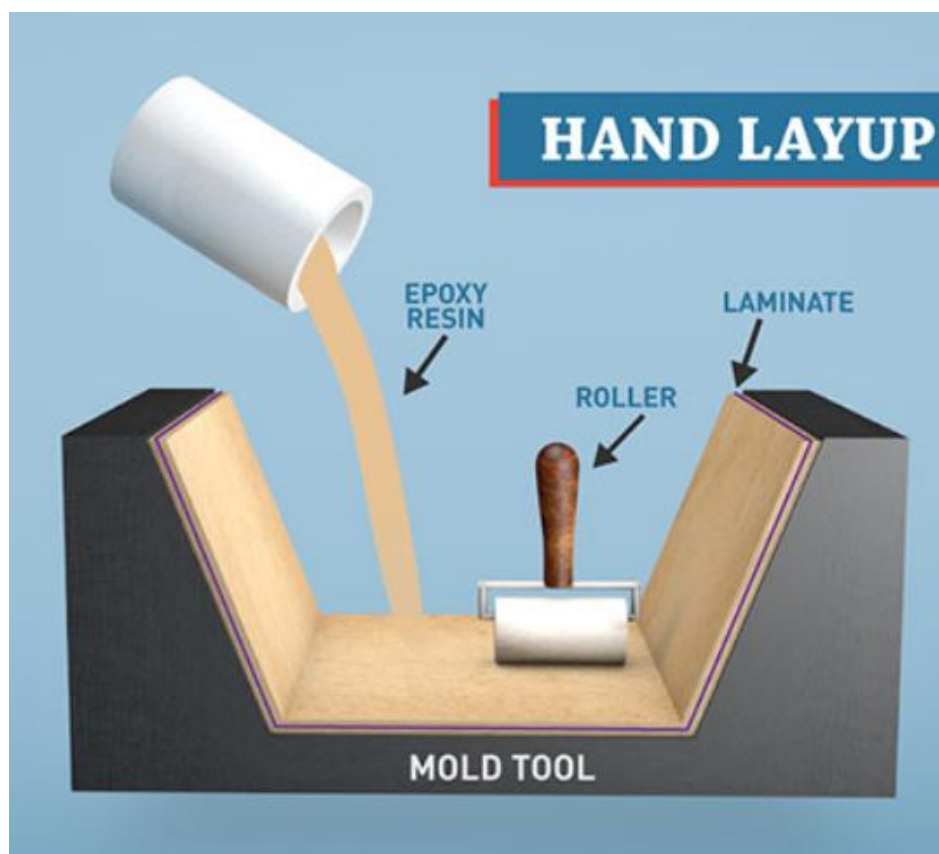
Μετά το τέλος της ζωής μιας ανεμογεννήτριας η θεμελίωση μπορεί να παραμείνει στο ίδιο σημείο ή να απομακρυνθεί και να αναπλαστεί η τοποθεσία. Το περιβαλλοντικό κόστος της παραμονής της στην αρχική τοποθεσία μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να είναι μικρότερο, σε σύγκριση με αυτό από τις δραστηριότητες απομάκρυνσής της (εκσκαφή, θραύση, επεξεργασία και μεταφορά) (Welstead, J., Hirst, R., Keogh, D., Robb G. and Bainsfair, 2013).

Μέταλλα όπως χάλυβας, αλουμίνιο και χαλκός αποτελούν το 94% του βάρους της τουρμπίνας, χωρίς τη θεμελίωση, και είναι υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν (Schleisner, 2000). Το υπόλοιπο 6% αντιστοιχεί σε πλαστικά, ελαστικά (καουτσούκ), πολυμερή ενισχυμένα με ίνες κ.α. Αυτά τα υλικά βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια του ρότορα και δεν προβλέπονται τρόποι ανακύκλωσης επί του παρόντος.

## 4 Πτερύγια Ανεμογεννητριών

### 4.1 Τεχνολογίες παραγωγής πτερυγίων

Η πρώτη τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των πτερυγίων ήταν μια διαδικασία τοποθέτησης ινών γυαλιού σε ανοιχτά καλούπια με τη χρήση πινέλων και ρολών (Wet Lay-up/Hand Lay-up Manufacturing Process for Composites | MasterBond.Com, *n.d.*). Τα κελύφη που φτιάχνονταν συγκολλούνταν μεταξύ τους με τα δοκάρια (spars). Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την παραγωγή πτερυγίων μικρού και μεσαίου μεγέθους (από 35 έως και 55 m). Για την παραγωγή μεγαλύτερων πτερυγίων χρησιμοποιήθηκε η ίδια διαδικασία με χρήση μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε ρητίνη αλλά και ο ιστός διάτμησης εισήχθη και συγκολλήθηκε μεταξύ δύο πλευρών. Ενώ σαν διαδικασία είναι αρκετά απλή το κύριο μειονέκτημα της είναι το υψηλό εργατικό κόστος και η σχετικά χαμηλή ποιότητα του τελικού προϊόντος (Mishnaevsky et al., 2017).



Εικόνα 10: Διαδικασία κατασκευής καλούπιών με χρήση υγρής εποξειδικής ρητίνης (Wet Lay-up/Hand Lay-up Manufacturing Process for Composites | MasterBond.Com, *n.d.*).

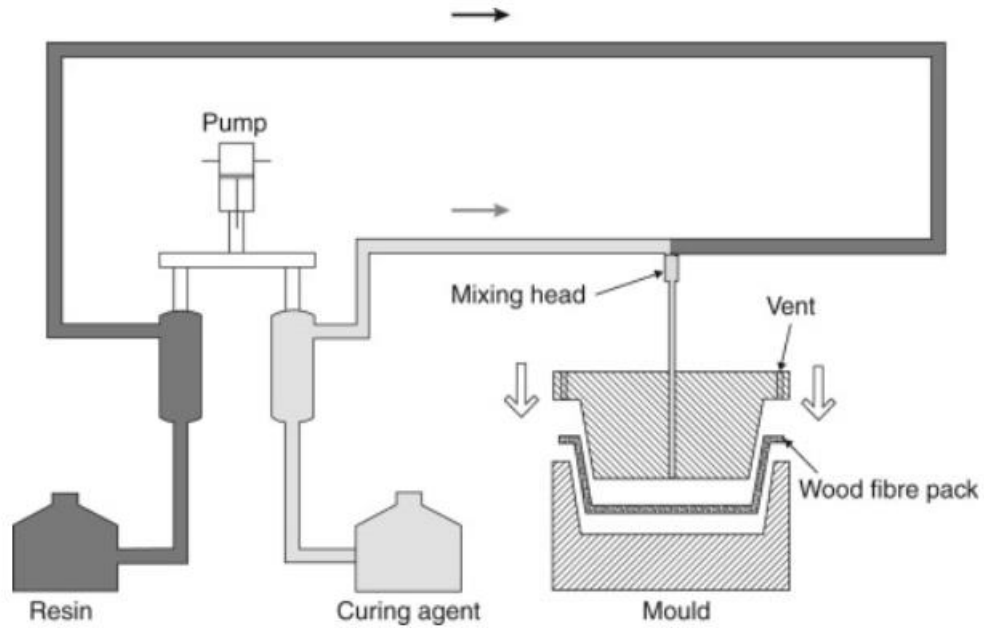
Η εισαγωγή των τεχνολογιών έγχυσης κενού και προεμπτισμού επέτρεψε τη βελτίωση της ποιότητας της παραγωγής. Η τεχνολογία prepreg, προσαρμοσμένη στη βιομηχανία



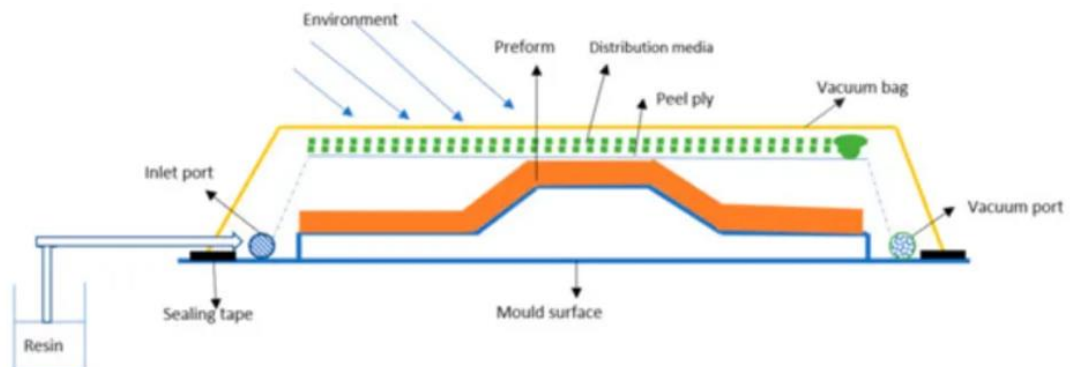
αεροσκαφών, βασίζεται στη χρήση «προεμποτισμένων» σύνθετων ινών, οι οποίες περιέχουν ήδη μια ποσότητα υλικού μήτρας που τις συνδέει μεταξύ τους. Το Prepreg (που χρησιμοποιείται ευρέως, για παράδειγμα, από τη δανική εταιρεία παραγωγής ανεμογεννητριών Vestas) επιτρέπει τον βιομηχανικό εμποτισμό των ινών και στη συνέχεια τον σχηματισμό των εμποτισμένων ινών σε πολύπλοκα σχήματα (Mishnaevsky et al., 2017).

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την παραγωγή των πτερυγίων, ιδιαίτερα των μακρύτερων, είναι η τεχνολογία έγχυσης ρητίνης. Στην τεχνολογία έγχυσης ρητίνης, οι ίνες τοποθετούνται σε κλειστό και σφραγισμένο καλούπι και η ρητίνη εγχέεται στην κοιλότητα του καλουπιού υπό πίεση. Αφού η ρητίνη γεμίσει όλο τον όγκο μεταξύ των ινών, το συστατικό σκληραίνεται με θερμότητα (Mishnaevsky et al., 2017).

Οι τεχνολογίες έγχυσης ρητίνης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τη χύτευση με μεταφορά ρητίνης (RTM) και τη χύτευση με μεταφορά ρητίνης υπό κενό (VARTM). Η RTM (Εικόνα 11) είναι μια διαδικασία κατά την οποία, ένα πρόπλασμα ινών τοποθετείται σε ένα θηλυκό καλούπι και μετά το αρσενικό καλούπι κλείνει αφήνοντας ένα κενό που επιτρέπει την έγχυση της ρητίνης και τον εμποτισμό των ινών (Marques, 2011). Η μέθοδος VARTM (Εικόνα 12) περιλαμβάνει πρωτίστως την τοποθέτηση των ινών σε ένα πρόπλασμα με την επιθυμητή διαμόρφωση. Μια σακούλα κενού εφαρμόζεται πάνω από το πρόπλασμα, και στη συνέχεια, η ρητίνη υπό πίεση εγχέεται στην κοιλότητα με τη βοήθεια κενού. Το VARTM είναι επωφελές για εξαρτήματα μεγάλου μεγέθους και παρέχει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή υλικών. Παρόλα αυτά κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας τα κενά είναι πολύ συνηθισμένα ελαττώματα (*What Is Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)?*, n.d.). Στη πρώτη περίπτωση η έγχυση ρητίνης γίνεται υπό πίεση υψηλότερη από την ατμοσφαιρική ενώ στη δεύτερη η ρητίνη εγχέεται υπό κενό ή πίεση χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική (Mishnaevsky et al., 2017).



Εικόνα 11: Διαδικασία RTM (Dai & Fan, 2014).



Εικόνα 12: Διαδικασία VARTM (What Is Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)?, n.d.).

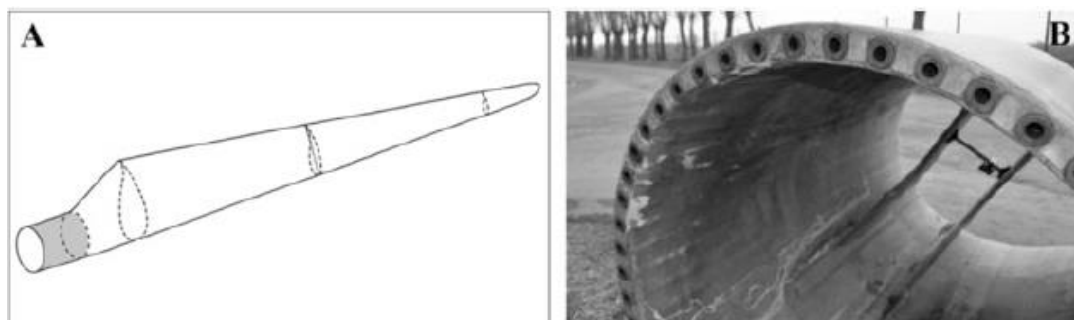
Μια παραλλαγή του VARTM που ονομάζεται SCRIMP™ (δηλαδή διαδικασία Έγχυσης Σύνθετης Ρητίνης Seemann) αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και είναι αρκετά αποτελεσματική για την παραγωγή μεγάλων και παχύρρευστων εξαρτημάτων. Επί του παρόντος, η χύτευση ρητίνης με τη βοήθεια κενού (VARTM) είναι η πιο κοινή μέθοδος κατασκευής για την κατασκευή πτερυγίων.

Η διαδικασία έγχυσης είναι συνήθως φθηνότερη από τη διαδικασία προεμποτισμού. Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά prepreg έχουν πιο σταθερές, καλύτερες και λιγότερο μεταβλητές μηχανικές ιδιότητες από τα σύνθετα που παράγονται με έγχυση ρητίνης. Αυτή η τεχνολογία είναι σχετικά φιλική προς το περιβάλλον και καθιστά δυνατή την επίτευξη μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε όγκο σε ίνες και τον έλεγχο των ιδιοτήτων των υλικών. Επιπλέον, η

τεχνολογία prepreg επιτρέπει υψηλότερο επίπεδο αυτοματισμού και καλύτερη επιλογή ρητινών.

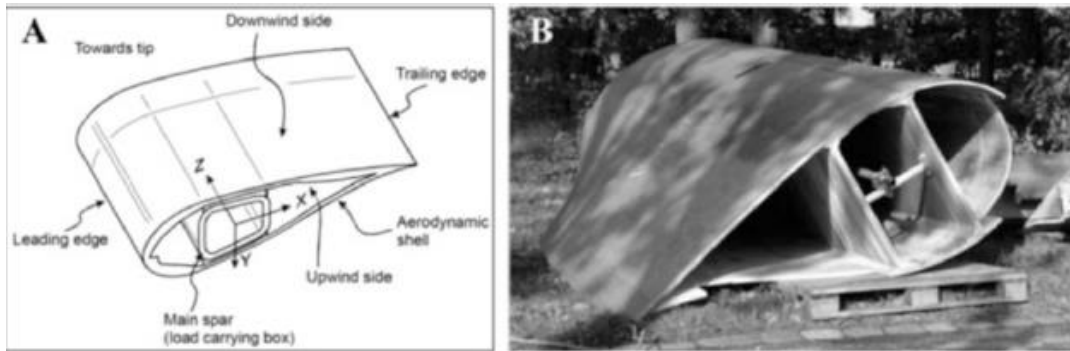
## 4.2 Δομή πτερυγίων

Το εξωτερικό σχήμα των πτερυγίων βασίζεται στην αεροδυναμική, αλλά το εσωτερικό καθορίζεται από την προσοχή στην αντοχή. Κάθε πτερύγιο αποτελείται από δυο μέρη: το τμήμα της βάσης και το αεροδυναμικό τμήμα. Το τμήμα της βάσης είναι το σημείο που το πτερύγιο συνδέεται με την τουρμπίνα (Εικόνα 13Α) και έχει κυλινδρικό σχήμα (Εικόνα 13Β). Το σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται για αυτό το μέρος είναι ένα παχύ πολυστρωματικό σύνθετο από υαλονήματα. Μεταλλικές βίδες τύπου T-bolt χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση/στήριξη του πτερυγίου στο κεντρικό τμήμα (Justine Beauson & Brøndsted, 2016).



Εικόνα 13: Τμήμα της βάσης πτερυγίου Α/Γ (Justine Beauson & Brøndsted, 2016).

Επί του παρόντος υπάρχουν δύο βασικές περιπτώσεις σχεδιασμού στο εσωτερικό μέρος των πτερυγίων. Οι δύο αυτές περιπτώσεις διαφέρουν στο σχεδιασμό της εσωτερικής κατασκευής καθώς και στο τρόπο συγκόλλησής τους. Στη μία περίπτωση όλο το μήκος της διατομής των πτερυγίων αποτελείται από ένα ενιαίο μέρος, ενώ στην άλλη από δύο. Στην πρώτη περίπτωση το εσωτερικό του πτερυγίου αποτελείται από ένα κλειστό κουτί κολλημένο σε δύο αεροδυναμικά κελύφη, ένα στην κάτω πλευρά και ένα στην πάνω πλευρά (Εικόνα 14Α). Στη δεύτερη περίπτωση η κατασκευή αποτελείται από δύο ενισχυμένες σε διάτμηση επιφάνειες, επίσης κολλημένες στις επιφάνειες του κελύφους (Εικόνα 14Β) (Justine Beauson & Brøndsted, 2016; Grujicic et al., 2010).



Εικόνα 14: Απεικόνιση διατομής πτερυγίου Α/Γ α) με κιβώτιο μεταφοράς φορτίου β) με δομικούς συνδέσμους. (Justine Beauson & Brøndsted, 2016)

Ένα κοινό μέγεθος τουρμπίνας το 1990 είχε ισχύ 600 kW και μήκος πτερυγίων 18 μέτρα, ενώ το 2015, μια από τις μεγαλύτερες τουρμπίνες που παράχθηκε είχε ισχύ 7 MW με πτερύγια μήκους 85 μέτρων περίπου. Είναι εμφανές ότι ο σχεδιασμός των πτερυγίων βελτιώθηκε με τα χρόνια. Για να διασφαλιστεί η διάρκεια ζωής των 20 ετών, τα πρώτα πτερύγια που κατασκευάστηκαν παρουσίαζαν συντηρητική σχεδίαση και χρησιμοποιούνταν μεγαλύτερες ποσότητες υλικών συγκριτικά με τα πτερύγια που κατασκευάζονται σήμερα τα οποία προφανώς είναι ελαφρύτερα (M. F. Jensen & Branner, 2013).

Συνοψίζοντας, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών έχουν πολύπλοκη δομή και τα διάφορα μέρη τους αποτελούνται από διαφορετικά υλικά ανάλογα με τον κατασκευαστή και το έτος παραγωγής. Μετά την απόσυρση τα πτερύγια ανάλογα με το σχεδιασμό τους και τον τρόπο κατασκευής τους θα παρουσιάζουν διαφορετικό επίπεδο φθοράς. Η ανακύκλωσή τους είναι μια δύσκολη διαδικασία και γι' αυτό αποτελεί μια πρόκληση. Σε επόμενα κεφάλαια θα εξεταστούν λύσεις κυκλικής οικονομίας για τα πτερύγια Α/Γ στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

### 4.3 Σύνθετα υλικά για πτερύγια ανεμογεννητριών

Το κέλυφος των πτερυγίων αποτελείται από τρία συστατικά: ίνες, που είναι το ενισχυτικό στοιχείο, η μήτρα και ο πυρήνας. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται μπορούν να αποτελούνται από διαφορετικά υλικά με διαφορετικές ιδιότητες. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ενισχυτικών ινών είναι:

- ίνες γυαλιού (GFRP, Glass Fiber Reinforced Polymer) και άνθρακα (CFRP, Carbon fiber reinforced polymer),
- αραμίδια και ίνες βασάλτη,
- υβριδικά σύνθετα υλικά,
- φυσικές ίνες.

Οι μήτρες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων ποικίλλουν επίσης. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι είναι:

- εποξικοί,
- θερμοσκληρυνόμενα,
- θερμοπλαστικά,
- νανομηχανικά πολυμερή και σύνθετα υλικά,
- πολυεστέρες,
- βινυλεστέρες,
- πολυουρεθανικοί.

Επιπλέον ο πυρήνας του πτερυγίου μπορεί να αποτελείται από διάφορα υλικά όπως:

- ξύλο balsa,
- αφρός πολυβινυλοχλωρίδιου (PVC),
- αφρός πολυτερεφθαλικού αιθυλενίου (PET).

(Justine Beauson et al., 2014; Mishnaevsky et al., 2017; WindEurope, 2020)

### 4.3.1 Ίνες

#### 4.3.1.1 Ίνες γυαλιού

Η ακαμψία των σύνθετων υλικών καθορίζεται από την ακαμψία των ινών και την περιεκτικότητά τους σε όγκο. Συνήθως, οι ίνες γυαλιού E (δηλαδή, το βοριοπυριτικό γυαλί που ονομάζεται "ηλεκτρικό γυαλί" ή "E-glass" για την υψηλή ηλεκτρική αντίστασή του) χρησιμοποιούνται ως κύρια ενίσχυση στα σύνθετα υλικά. Έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες για την ανάπτυξη ινών, οι οποίες είναι ισχυρότερες από τις συνηθισμένες ίνες γυαλιού E. Οι ίνες υψηλής αντοχής (οι οποίες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σπάνια στην πράξη, αλλά αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη πηγή βελτίωσης των σύνθετων υλικών) περιλαμβάνουν ίνες γυαλιού με τροποποιημένες συνθέσεις (S-glass, R-glass, κ.λπ.), ίνες άνθρακα, βασάλτη και ίνες αραμιδίου (Mishnaevsky et al., 2017).

Το γυαλί S αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960, εμφανίζει 40% υψηλότερες αντοχές σε εφελκυσμό και κάμψη και 10-20% υψηλότερη αντοχή σε θλίψη σε σύγκριση με το E-glass. Το S-glass είναι πολύ πιο ακριβό από το E-glass. Το γυαλί S2 αναπτύχθηκε το 1968 ως εμπορική έκδοση του S-glass. Έχει την ίδια σύσταση δηλαδή (μαγνήσιο, αλουμίνιο και πυριτικό άλας), αλλά οι κύριες διαφορές τους είναι στο μέγεθος των ινών και στη διαδικασία πιστοποίησης. Η τιμή του S2-glass είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του E-glass. Οι ίνες R-Glass, που εισήχθησαν το 1968, παράγονται με αλουμινοπυριτικό γυαλί ασβεστίου με λιγότερο πυρίτιο και προστιθέμενα οξειδία (Fecko, 2006; Haberkern & Kg, 2006; Mishnaevsky et al., 2017)

#### 4.3.1.2 Ίνες Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα θεωρούνται μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στις ίνες γυαλιού. Παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ακαμψία και χαμηλότερη πυκνότητα από τις ίνες γυαλιού, επιτρέποντας έτσι λεπτότερα, πιο άκαμπτα και ελαφρύτερα πτερύγια. Ωστόσο, έχουν σχετικά χαμηλή ανοχή στη φθορά, αντοχή σε θλίψη και τελική καταπόνηση και είναι πολύ πιο ακριβές από τις ίνες γυαλιού (E-glass). Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ανθρακονήματα είναι ευαίσθητα στην κακή ευθυγράμμιση των ινών. Ακόμη και μικρές λανθασμένες ευθυγραμμίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της αντοχής σε θλίψη και κόπωση (*Carbon Fiber vs. Fiberglass - Infogram*, n.d.; “Wind Turbine Blades: Glass vs. Carbon Fiber,” n.d.; Mishnaevsky et al., 2017).

#### 4.3.1.3 Ίνες αραμιδίου και βασάλτη

Οι ίνες αραμιδίου (αρωματικού πολυαμιδίου) επιδεικνύουν υψηλή μηχανική αντοχή, είναι σκληρές και ανθεκτικές στη φθορά, αλλά έχουν χαμηλή αντοχή σε θλίψη, χαμηλή πρόσφυση σε πολυμερείς ρητίνες, απορροφούν υγρασία και αποδομούνται λόγω της υπεριώδους ακτινοβολίας (Haberkern & Kg, 2006).

Οι ίνες βασάλτη παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες, είναι 30% ισχυρότερες, 15–20% πιο άκαμπτες και 8–10% ελαφρύτερες από το E-glass και φθηνότερες από τις ίνες άνθρακα (Mishnaevsky et al., 2017). Έρευνες όπου ίνες βασάλτη χρησιμοποιήθηκαν ως υβρίδια με ίνες άνθρακα έδειξαν πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την εφαρμογή τους σε μικρές ανεμογεννήτριες. Σύμφωνα με αυτές συνιστάται η μερική υποκατάσταση (έως 20–30%) με ίνες βασάλτη αντί των ινών άνθρακα που είναι αρκετά ακριβές. Παρόλα αυτά, τα δεδομένα σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητές τους καθώς και τη μεταβολή των ιδιοτήτων αυτών υπό τις αναμενόμενες συνθήκες λειτουργίας είναι εξαιρετικά περιορισμένα, γεγονός που καθυστερεί την εφαρμογή τους (Chikhradze et al., 2015).

#### 4.3.1.4 Υβριδικά σύνθετα

Οι υβριδικές ενισχύσεις (E-glass/carbon, E-glass/aramid, κ.λπ.) αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση. Σύμφωνα με τους Ong και Tsai η πλήρης αντικατάσταση θα οδηγούσε σε 80% εξοικονόμηση βάρους και αύξηση του κόστους κατά 150%, ενώ μια μερική (30%) αντικατάσταση θα οδηγούσε σε αύξηση μόνο κατά 90% του κόστους και μείωση βάρους 50% για 8m τουρμπίνα (Ong & Tsai, 2000). Το μακρύτερο πτερύγιο στον κόσμο αυτή τη στιγμή έχει μήκος 88,4m και είναι κατασκευασμένο από υβριδικά σύνθετα υλικά άνθρακα/γυαλιού (Mishnaevsky et al., 2017; *Turbines of the Year: Rotor Blades | Windpower Monthly*, n.d.).

Η ενσωμάτωση ινών γυαλιού σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ανθρακονήματα επιτρέπει τη βελτίωση των ιδιοτήτων πρόσκρουσης και της τάσης εφελκυσμού έως την αστοχία των

ινών άνθρακα. Ωστόσο η υβριδική αντοχή μπορεί υπό ορισμένες συνθήκες να είναι χαμηλότερη από την αντοχή τόσο του καθαρού γυαλιού όσο και των σύνθετων υλικών καθαρού άνθρακα (Durai Prabhakaran et al., 2013). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τα υβριδικά σύνθετα υλικά είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αιολική ενέργεια, όμως απαιτούνται πρόσθετες έρευνες για τη βέλτιστη σύνθεση των υλικών (Mishnaevsky et al., 2017).

#### 4.3.1.5 Φυσικές ίνες.

Μια πολύ ενδιαφέρουσα επιλογή αποτελούν οι φυσικές ίνες (λινάρι, σιζάλ, κάνναβη, κ.λπ.). Όπως είναι λογικό αποτελούν μια πολύ καλή λύση καθώς υπάρχουν σε αφθονία, είναι φυσικά και έχουν πολύ χαμηλό κόστος. Ωστόσο οι διαφορές τους, η υψηλή πρόσληψη υγρασίας και η χαμηλή θερμική τους σταθερότητα τα καθιστούν ακόμα μη αξιόπιστα (Ganesh et al., 2016). Ένα πολλά υποσχόμενο υλικό αποτελεί το μπαμπού λόγω της υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητάς του καθώς και της ευρείας διαθεσιμότητάς του. Οι δοκιμές που έγιναν σε ένα νέο εποξειδικό φύλλο μπαμπού-λεύκας έδειξαν ότι αυτό το υλικό έχει υψηλή αντοχή και ακαμψία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πτερύγια αντί για κοινά σύνθετα υλικά (Holmes et al., 2009; Mishnaevsky et al., 2017).

#### 4.3.2 Μήτρα

Τυπικά, τα θερμοσκληρυνόμενα (εποξικά, πολυεστέρες, βινυλεστέρες) ή (πιο σπάνια) θερμοπλαστικά χρησιμοποιούνται ως μήτρες σε σύνθετα υλικά πτερυγίων.

##### 4.3.2.1 Θερμοσκληρυνόμενα

Τα σύνθετα υλικά με βάση τα θερμοσκληρυνόμενα αντιπροσωπεύουν περίπου το 80% της αγοράς ενισχυμένων πολυμερών (Nijssen & TU Delft, 2006). Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες χρησιμοποιούνται συνήθως σε σύνθετα υλικά που το ζητούμενο είναι οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή που έχουν ήδη σκληρύνει είναι τόσο σκληρά όσο το γυαλί. Τα πλεονεκτήματα των θερμοσκληρυνόμενων υλικών είναι η δυνατότητα σκλήρυνσης σε θερμοκρασία δωματίου ή σε χαμηλή θερμοκρασία και το χαμηλότερο ιξώδες (το οποίο διευκολύνει την έγχυση και, συνεπώς, επιτρέπει υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας). Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν πολυεστερικές ρητίνες για πτερύγια. Με την ανάπτυξη μεγάλων και πολύ μεγάλων ανεμογεννητριών, οι εποξειδικές ρητίνες αντικατέστησαν τον πολυεστέρα και πλέον χρησιμοποιούνται συχνότερα (Mishnaevsky et al., 2017).

#### 4.3.2.2 *Θερμοπλαστικά.*

Τα θερμοσκληρυνόμενα και τα θερμοπλαστικά είναι δύο διαφορετικές κατηγορίες πολυμερών, τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με τη συμπεριφορά τους παρουσία θερμότητας. Το θερμοπλαστικό είναι μια κατηγορία πολυμερούς, η οποία μπορεί εύκολα να λιώσει ή να μαλακώσει με την παροχή θερμότητας για την ανακύκλωση του υλικού. Ωστόσο, η αναγκαιότητα υψηλών θερμοκρασιών επεξεργασίας οδηγεί σε υψηλότερο κόστος ενέργειας και μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες των ινών. Επίσης, εξαιτίας του υψηλού ιξώδους τους η κατασκευή μεγάλων (πάνω από 2 m) και παχύρρευστων (πάνω από 5 mm) εξαρτημάτων είναι αρκετά δύσκολη. Τα θερμοπλαστικά έχουν θερμοκρασίες τήξης χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες αποσύνθεσής τους και, επομένως, μπορούν να αναδιαμορφωθούν κατά την τήξη (Mishnaevsky et al., 2017). Παρόλο που η αντοχή στη θραύση των θερμοπλαστικών είναι υψηλότερη από αυτή των θερμοσκληρυνόμενων, η αντοχή στη κόπωση των θερμοπλαστικών δεν είναι γενικά τόσο καλή όσο στα θερμοσκληρυνόμενα, τόσο με ίνες άνθρακα όσο και με ίνες γυαλιού (Nijssen & TU Delft, 2006).

#### 4.3.2.3 *Νανοτεχνικά πολυμερή και σύνθετα υλικά.*

Προσθήκες μικρής ποσότητας νανοενίσχυσης στην πολυμερή μήτρα των σύνθετων υλικών μπορούν να επιτρέψουν την αύξηση της αντοχής στην κόπωση, της αντοχής στη διάτμηση ή στη θλίψη (P. C. Ma & Zhang, 2014; Zhou et al., 2016). Επίσης αποδείχτηκε ότι η ενσωμάτωση μικρής ποσότητας νανοσωλήνων άνθρακα/CNT μπορεί να αυξήσει τη διάρκεια ζωής ενός πτερυγίου έως και 150% (Mishnaevsky et al., 2017). Ο Merugula και οι συνεργάτες του απέδειξαν πειραματικά για πτερύγια ανεμογεννητριών 2 MW και 5 MW ότι η προσθήκη 1-5 % κατά βάρος νανοϊνών άνθρακα (CNF) στις διεπαφές εποξειδικών σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων (τάση εφελκυσμού, μέτρο ελαστικότητας) που επιτρέπει 20% μείωση του βάρους των πτερυγίων, με αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής τους (Merugula et al., 2012). Επιπλέον, το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύουσα ενίσχυση και μπορεί να οδηγήσει στη κατασκευή ισχυρότερων και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής πτερυγίων (Yavari et al., 2010). Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι βελτιώσεις από τη χρήση νανοτροποποιημένων πολυμερών ως μήτρα (π.χ. για βελτιωμένη αντοχή ή σκληρότητα) συνοδεύονται από εγγενώς χαμηλότερες τιμές ιδιοτήτων σε άλλους τομείς (π.χ. θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου) που περιορίζουν τη δυνατότητα επεξεργασίας ή την εφαρμογή των νανοτροποποιημένων πολυμερών (Khare & Khare, 2013).



#### 4.3.3 Προτιμώμενο υλικό κατασκευής

Τα πτερύγια που χρησιμοποιούνται στις εμπορικές ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται ως επί το πλείστον από ίνες γυαλιού, αναμειγμένες με μικρότερες ποσότητες ακριβότερων αλλά ισχυρότερων ινών άνθρακα (Rosa GARCÍA SÁNCHEZ, 2014). Ο συνδυασμός ινών και πολυμερών, επίσης γνωστός ως σύνθετα πολυμερή ενισχυμένου με ίνες γυαλιού (GFRP), αντιπροσωπεύει την πλειονότητα της σύνθεσης του υλικού των πτερυγίων (60-70% ενισχυτικές ίνες και 30-40% ρητίνη κατά βάρος).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως προκύπτει ότι τα σύνθετα GFRP προτιμώνται για τους εξής λόγους :

- Το GFRP συνδυάζει ιδιότητες υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό με χαμηλή πυκνότητα (λόγος υψηλής αντοχής προς βάρος), ώστε να αντέχει στις απαιτήσεις μηχανικού φορτίου και να βελτιστοποιεί την αεροδυναμική απόδοση.
- Το GFRP παρέχει αντοχή στην κόπωση, τη διάβρωση, την ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα σημαντική για τη μεγάλη διάρκεια ζωής των πτερυγίων.
- Το GFRP επιτρέπει την οικονομικά αποδοτική κατασκευή μακρύτερων και ελαφρύτερων δομών λεπίδων.
- Το GFPR μπορεί εύκολα να τοποθετηθεί με πρόσθετα εξαρτήματα (προστατευτικά αστραπής, προστασία αιχμής και συστήματα θέρμανσης) για βελτίωση της απόδοσης.

Παρ' όλα αυτά, όταν τα θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα GFRP σκληραίνονται, τα πολυμερή συνδέονται σταυρωτά και υφίστανται μια μη αναστρέψιμη διαδικασία που καθιστά δύσκολη την ανακύκλωση τους (J. P. Jensen & Skelton, 2018).

## 5 Θέματα τέλους κύκλου ζωής ανεμογεννητριών

### 5.1 Γήρανση Αιολικών πάρκων

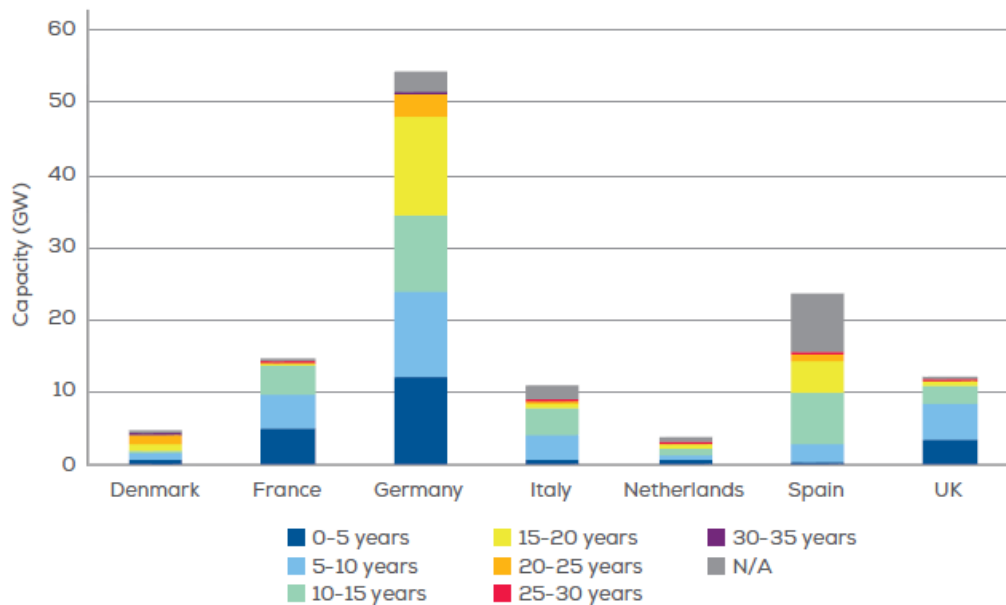
Στο πρόσφατο συνέδριο της WindEurope, End-of-Life Issues and Strategies Seminar (EoLIS 2020), συζητήθηκε το θέμα των ανεμογεννητριών που φτάνουν στο τέλος της χρήσης τους. Εμπειρογνώμονες από όλους τους τομείς της βιομηχανίας ανέπτυξαν τις τελευταίες τάσεις και εξελίξεις: στην αναβάθμιση (repowering) των αιολικών πάρκων (αντικατάσταση των παλαιότερων σταθμών με νεότερων με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ ή απόδοση), στην παράταση της διάρκειας ζωής τους, στον παροπλισμό και στην ανακύκλωση των ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, η WindEurope παρουσίασε ένα νέο βιβλίο βιομηχανικών οδηγιών για την αποσυναρμολόγηση και τον παροπλισμό των χερσαίων ανεμογεννητριών. Σε αυτό αναφέρεται ότι στην Ευρώπη, αυτή τη στιγμή υπάρχουν 34.000 ανεμογεννήτριες άνω των 15 ετών, ενώ η συνολική τους ισχύς ανέρχεται στα 36 GW. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των ανεμογεννητριών βρίσκεται στη Γερμανία, ενώ αρκετές υπάρχουν στην Ισπανία, στη Γαλλία και στην Ιταλία. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ανεμογεννήτριες που παράγουν 9 από τα 36 GW είναι μεταξύ 20-24 ετών και αυτές που παράγουν το υπόλοιπο 1 GW είναι άνω των 25 ετών, με τη μέση διάρκεια ζωής μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας να είναι 20-25 χρόνια.

Μέχρι σήμερα στην Ευρώπη η ανατροφοδότηση εφαρμόζεται με επιτυχία, αλλά εξακολουθεί να γίνεται σε ένα μικρό ποσοστό των πάρκων. Σύμφωνα με την WindEurope αυτό είναι κάτι που θα αλλάξει τα επόμενα χρόνια, καθώς προτείνεται να εφαρμοστεί αυτή η διαδικασία σε πάρκα συνολικής παραγωγής ισχύος μεγαλύτερης από 20 GW.

Πέρα από την ανατροφοδότηση, η επέκταση της διάρκειας ζωής των αιολικών πάρκων αποτελεί επίσης μια ενδιαφέρουσα προοπτική για τους αρμόδιους φορείς. Η WindEurope υποστηρίζει ότι η έρευνα για την μείωση του ρυθμού γήρανσης των αιολικών πάρκων, η οποία έχει ήδη ξεκινήσει, θα είναι ένας σημαντικός τομέας έρευνας την επόμενη δεκαετία. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, περίπου το 50% των σημερινών αιολικών πάρκων της Ευρώπης θα μπορούν να λειτουργούν για 5-10 χρόνια περισσότερο από τη διάρκεια ζωής του αρχικού σχεδιασμού τους. Εάν η επέκταση της διάρκειας ζωής δεν αποτελέσει ιδανική επιλογή, οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να παροπλιστούν. Ακόμα θα πρέπει να σημειωθεί ότι το Έγγραφο Οδηγιών παρέχει μια λεπτομερή επισκόπηση των κανόνων και των κανονισμών που διέπουν τον παροπλισμό των ανεμογεννητριών σε όλη την Ευρώπη.



Εικόνα 15: Ανατροφοδότηση αιολικού πάρκου στην Ισπανία (WindEurope, 2020).



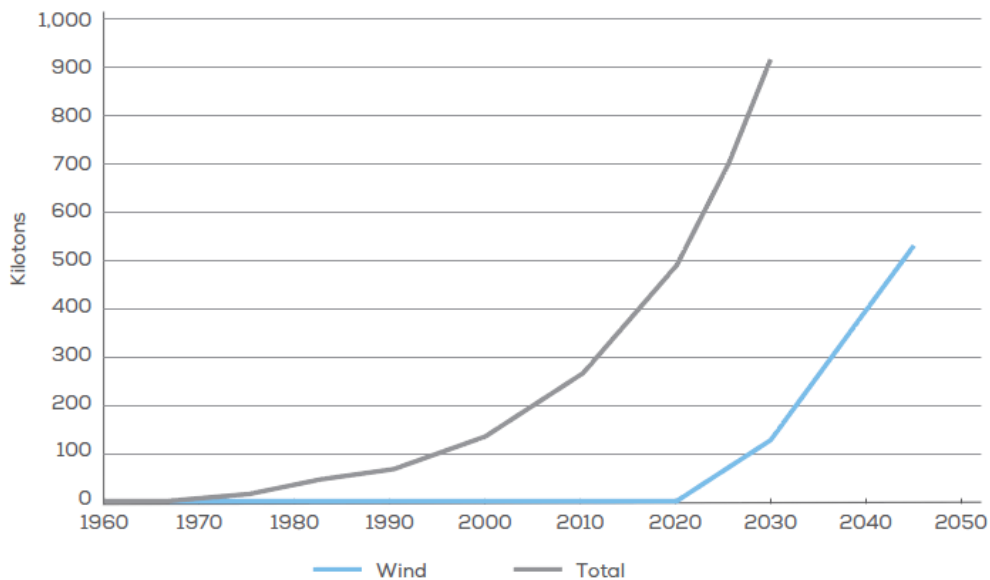
Διάγραμμα 2: Ηλικία αιολικών πάρκων στην Ευρώπη (WindEurope, 2020).

Σύμφωνα με τη WindEurope η πλειοψηφία μιας αποσυναρμολογημένης ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένων των πύργων, των θεμελίων, των γεννητριών και των κιβωτίων ταχυτήτων, μπορεί να ανακυκλωθεί. Τα πρωτογενή υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας και ο χυτοσίδηρος, ανακυκλώνονται εύκολα και υπάρχει ενεργή αγορά για αυτά τα υλικά στην Ευρώπη. Το πιο περίπλοκο ζήτημα είναι η ανακύκλωση των σύνθετων υλικών που είναι κατασκευασμένα τα πτερύγια των ανεμογεννητριών (WindEurope, 2020).

## 5.2 Απόβλητα συνθετικών υλικών

Η WindEurope εκτιμά ότι 2 GW ισχύς από αιολική ενέργεια θα μπορούσε να ανατροφοδοτηθεί και άλλα 2 GW ισχύς θα μπορούσαν να τεθούν εκτός λειτουργίας έως το 2023 στην Ευρώπη (Paulsen & Enevoldsen, 2021). Αυτό μεταφράζεται περίπου σε 4.700 τουρμπίνες (ή 14.000 πτερύγια που ισοδυναμούν με 40.000 έως 60.000 τόνους υλικών) που θα παροπλιστούν και θα πρέπει να αξιοποιηθούν με βιώσιμο τρόπο. Η ανακύκλωση αυτών των πτερυγίων αποτελεί κορυφαία προτεραιότητα για την αιολική βιομηχανία και χρειάζεται συγκεκριμένη διοικητική μέριμνα και τεχνολογία έτσι ώστε να γίνει η αποσυναρμολόγηση, η συλλογή, η μεταφορά, η διαχείριση των αποβλήτων και η είσοδος των υλικών τους στη διαδικασία αξιοποίησης.

Έρευνες έχουν δείξει ότι οι ποσότητες αποβλήτων σύνθετων υλικών από την αιολική βιομηχανία αναμένεται να αυξάνονται (Διάγραμμα 3). Ωστόσο, η αιολική βιομηχανία παράγει πολύ λιγότερα απόβλητα σύνθετων υλικών σε σύγκριση με άλλες βιομηχανικές διαδικασίες όπως ο τομέας κατασκευής κτιρίων, των ηλεκτρικών συστημάτων, των μεταφορών, της ναυπηγικής βιομηχανίας και της αεροναυπηγικής. Με βάση τις εκτιμήσεις της EuCIA από την αιολική βιομηχανία αναμένονται 66.000 τόνοι αποβλήτων θερμοσκληρυνόμενων σύνθετων υλικών έως το 2025. Αυτό αποτελεί μόνο το 10% του συνολικού εκτιμώμενου όγκου αποβλήτων.



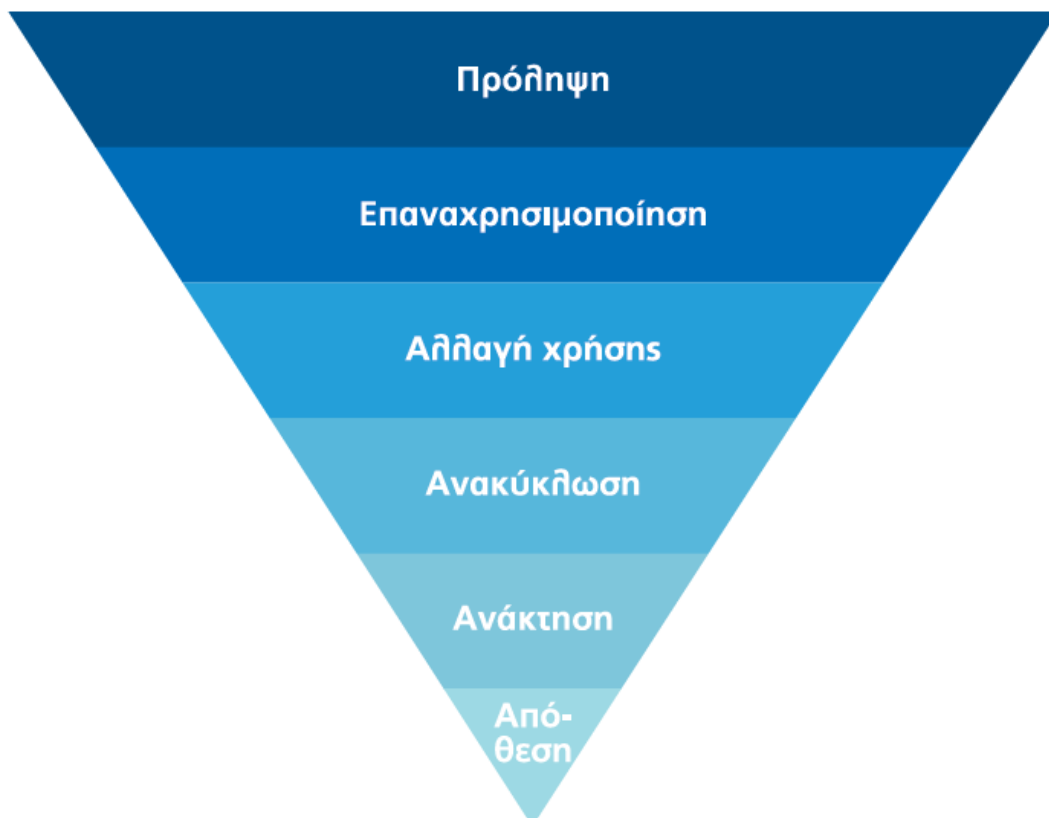
Διάγραμμα 3: Παραγωγή αποβλήτων σύνθετων υλικών (WindEurope, 2020).

Η ανακύκλωση συνθετικών υλικών αποτελεί μια τεράστια πρόκληση η οποία δεν αφορά μόνο την αιολική βιομηχανία. Όλοι οι τομείς που χρησιμοποιούν σύνθετα υλικά πρέπει να συνεργαστούν για να βρουν οικονομικά αποδοτικές λύσεις για τον παραγόμενο όγκο σύνθετων αποβλήτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι όγκοι των απορριμμάτων των

πτερυγίων είναι τόσο μικροί, που είναι οικονομικά ασύμφορη η δημιουργία μιας επιχείρησης ανακύκλωσης που θα βασίζεται κυρίως σε αυτά τα απόβλητα (WindEurope, 2020).

## 6 Εφαρμογή της ιεραρχίας των αποβλήτων στην αιολική βιομηχανία

Η ευρωπαϊκή οδηγία-πλαίσιο για τα απόβλητα (2008/98/ΕΚ) ορίζει τις βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων. Τονίζει την ανάγκη για αυξημένη ανακύκλωση και υπογραμμίζει τη μειωμένη διαθεσιμότητα των χώρων υγειονομικής ταφής. Καθιερώνει επίσης την ιεραρχία των αποβλήτων που παρουσιάζεται στο Σχήμα που ακολουθεί (WindEurope, 2020).



Σχήμα 1: Ιεραρχική πυραμίδα για τα απόβλητα των ανεμογεννητριών.

### 6.1 Πρόληψη

Η αιολική βιομηχανία δεσμεύεται για τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων σύμφωνα με την ιεραρχία των αποβλήτων. Το πρώτο βήμα είναι η πρόληψη των αποβλήτων από πτερύγια μέσω των προσπαθειών μείωσης και υποκατάστασης κατά το σχεδιασμό. Για παράδειγμα:

- Μείωση της μάζας με αποτέλεσμα λιγότερα υλικά προς ανακύκλωση
- Μείωση των σύνθετων υλικών και αντικατάστασή τους με άλλα ανακυκλώσιμα υλικά κατά τον σχεδιασμό των πτερυγίων
- Μείωση του ποσοστού αστοχίας και παράταση της διάρκειας ζωής του σχεδιασμού.

Οι δοκιμές και η πιστοποίηση παίζουν καθοριστικό ρόλο εδώ. Οι αστοχίες πτερυγίων που παρατηρούνται στο πεδίο δεν προκαλούνται πάντα στη φάση των δοκιμών, καθώς τα προηγούμενα πρότυπα δεν είναι ενημερωμένα για μεγάλα πτερύγια (> 50m). Τα πιο πρόσφατα πρότυπα δοκιμών και πιστοποίησης, όπως το DNVGL-ST-0376 και το επερχόμενο IEC 61400-5, ανοίγουν δυνατότητες για καλύτερο σχεδιασμό και για εύκολη αναβάθμιση της υπάρχουσας πτερύγωσης σε νέες εκδόσεις, π.χ. τμηματοποιημένα / μοναδιαία πτερύγια. Ωστόσο, αυτά δεν αποτελούν ακόμη πρότυπο σχεδιασμό (WindEurope, 2020).

## 6.2 Επαναχρησιμοποίηση υλικών – Επέκταση διάρκειας ζωής (LE)

Η πρώτη και απλούστερη λύση για το τέλος του κύκλου ζωής των πτερυγίων των ανεμογεννητριών είναι η επαναχρησιμοποίησή τους μετά τον παροπλισμό τους. Με αυτόν τον τρόπο, παρατείνεται η διάρκεια ζωής τους. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών μπορεί να εξακολουθούν να έχουν υψηλή υπολειμματική ικανότητα, μετά το πέρας των 20 ετών. Απαιτείται τακτική συντήρηση και επισκευή για να επιτευχθεί η σχεδιασμένη διάρκεια ζωής των πτερυγίων. Για την παράταση της διάρκειας ζωής, πρέπει να διεξάγεται μια "αξιολόγηση της εναπομένουσας ωφέλιμης διάρκειας ζωής" (δηλαδή μια ανάλυση φορτίου κόπωσης με χρήση δεδομένων SCADA ή τύπων δεδομένων), σε συνδυασμό με επιτόπιες επιθεωρήσεις και επανεξέταση των ενεργειών συντήρησης που έχουν πραγματοποιηθεί. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ενέργειες επισκευής και ενίσχυσης ορισμένων περιοχών. Για παράδειγμα, η DNV-GL έχει αναπτύξει ένα πρότυπο για την επέκταση της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών (DNVGL-ST-0262) και η International Electrotechnical Commission (IEC) αναπτύσσει επί του παρόντος ένα πρότυπο για τη διαχείριση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής και την παράταση ζωής των αιολικών εγκαταστάσεων (IEC TS 61400-28) (WindEurope, 2020). Παράλληλα, ο Sayer και οι συνεργάτες του διερεύνησαν την επίδραση της διάρκειας ζωής στα πτερύγια ανεμογεννητριών με βάση τη σύγκριση της απόδοσης των πτερυγίων μετά από 20 χρόνια χρήσης, με την μελέτη να αναφέρει ότι δεν υπήρχαν σημαντικές βλάβες με οπτική επιθεώρηση και ότι δεν υπήρχε σημαντική απώλεια στην ακαμψία του πτερυγίου. Επομένως, η επαναχρησιμοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών και ανεμογεννητριών είναι τεχνικά δυνατή. Στην Ευρώπη και στη Βόρεια Αμερική, ορισμένες εταιρείες όπως η Green-Ener-Tech, η Repowering Solutions, η Enerpower, η Windturbines i.e. και η Blue Planet Wind έχουν δημιουργήσει επιχειρήσεις που πωλούν ανακατασκευασμένες ανεμογεννήτριες (Sayer et al.,

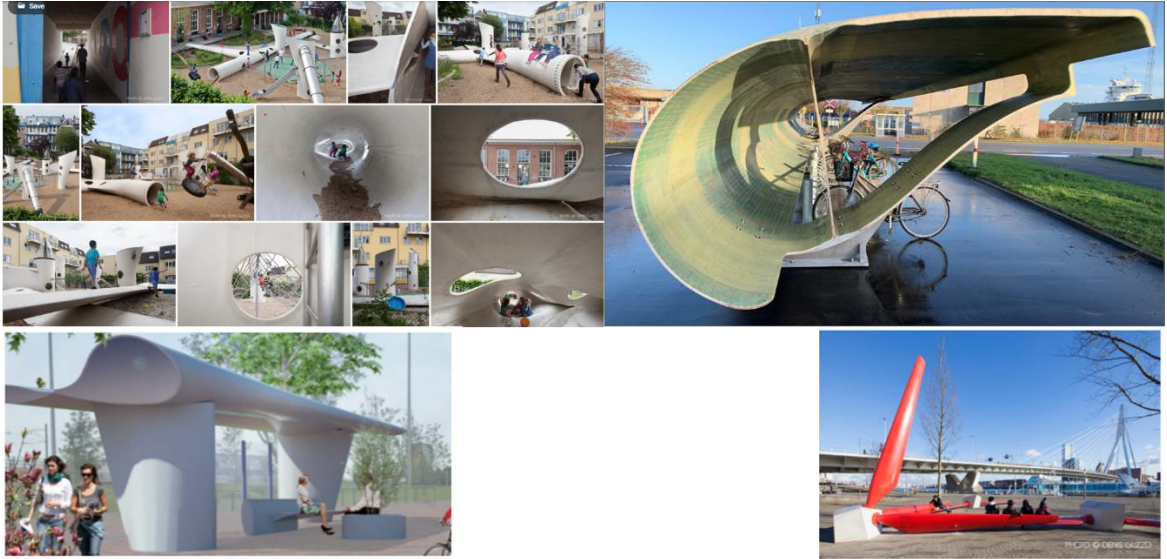
2013). Τα πλεονεκτήματα είναι, μεταξύ άλλων, η πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα δοκιμασμένων ανεμογεννητριών μικρού και μεσαίου μεγέθους, ο σύντομος χρόνος παράδοσης και το χαμηλό κόστος, περίπου το μισό της τιμής ανά MW (Justine Beauson & Brøndsted, 2016).

Οι τυποποιημένες διαδικασίες ανακαίνισης μπορεί να περιλαμβάνουν οπτική επιθεώρηση, επιθεώρηση με υπερήχους και μετρήσεις της φυσικής συχνότητας των πτερυγίων. Τα πτερύγια μπορούν επίσης να επισκευαστούν, να βαφτούν εκ νέου, να ζυγιστούν και να ζυγοσταθμιστούν (J. Beauson et al., 2013). Η ανακαίνιση φαίνεται τεχνικά προσιτή για πτερύγια με μάλλον μικρό μέγεθος. Οι εταιρείες που αναφέρθηκαν προηγουμένως χειρίζονται ανεμογεννήτριες της τάξης των 10 kW έως 1 MW. Για πτερύγια μήκους άνω των 50 μέτρων, τα οποία παράγονται συνήθως στις μέρες μας, η βιωσιμότητα αυτής της λύσης μπορεί να αμφισβητηθεί, λόγω των δυσκολιών μεταφοράς (Justine Beauson & Brøndsted, 2016).

### 6.3 Αλλαγή χρήσης

Η αλλαγή χρήσης είναι το επόμενο βήμα στην ιεραρχία των αποβλήτων. Αυτό σημαίνει την επαναχρησιμοποίηση ενός υπάρχοντος τμήματος του πτερυγίου για μια διαφορετική εφαρμογή, συνήθως χαμηλότερης αξίας από την αρχική.

Παραδείγματα περιστασιακών εφαρμογών (Εικόνα 16) έχουν προταθεί από την ολλανδική εταιρεία Superuse Studios. Πρότείνει τη χρήση πτερυγίων στην αρχιτεκτονική, ως στέγαστρα λεωφορείων – ποδηλάτων, παγκάκια πόλης ή παιδικές χαρές (Mishnaevsky, 2021). Η παιδική χαρά Wikado στο Ρότερνταμ αποτελεί ένα από τα δημοφιλέστερα παραδείγματα επαναχρησιμοποίησης πτερυγίων σε δευτερεύουσα εφαρμογή (André et al., 2020; Justine Beauson & Brøndsted, 2016; Joustra et al., 2021; Mishnaevsky, 2021; WindEurope, 2020) καθώς και παγκάκια σε δημόσιο χώρο. Τα πτερύγια θεωρούνται γενικά ασφαλή για χρήση σε μια τέτοια διαφορετική εφαρμογή (J. P. Jensen & Skelton, 2018). Απαιτούνται όμως προφυλάξεις, π.χ. επιφανειακές επεξεργασίες, για να αποφευχθεί η έκθεση των χρηστών σε αιχμηρές ίνες γυαλιού και η υποβάθμιση της ρητίνης από την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία και την υγρασία (Medici et al., 2020).



Εικόνα 16: Παραδείγματα εφαρμογών πτερυγίων (André et al., 2020; WindEurope, 2020).

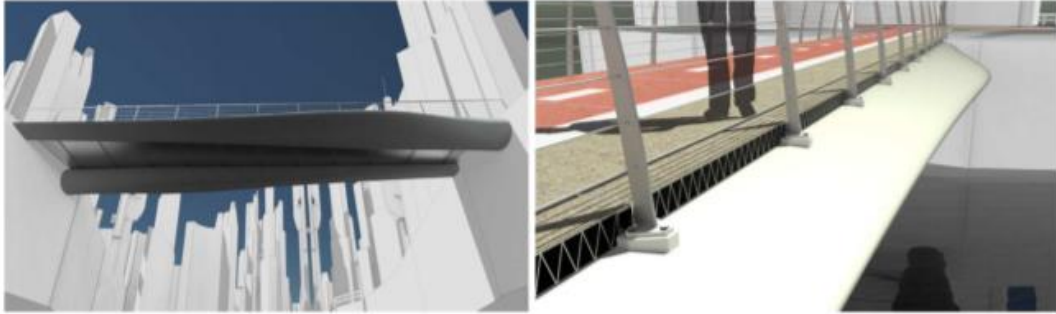
Επιπλέον, σύμφωνα με το Bank και τους συνεργάτες του, μεγάλου μεγέθους κομμάτια FRP μπορούν να διασωθούν από τα πτερύγια του στροβίλου και μπορούν ενδεχομένως να είναι χρήσιμα σε έργα υποδομής όπου υπάρχουν σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες (νερό και υψηλή υγρασία). Η οικοδόμηση ή η εκ των υστέρων τοποθέτηση μιας οικονομικά προσιτής οικιστικής κοινότητας με σωζόμενα εξαρτήματα πτερυγίων ανέμου μπορεί να μοιάζει με κάτι σαν αυτό που απεικονίζεται στο Εικόνα 17 (Bank et al., 2018).



Εικόνα 17: Εικονικές κτιριακές κατασκευές (Bank et al., 2018).

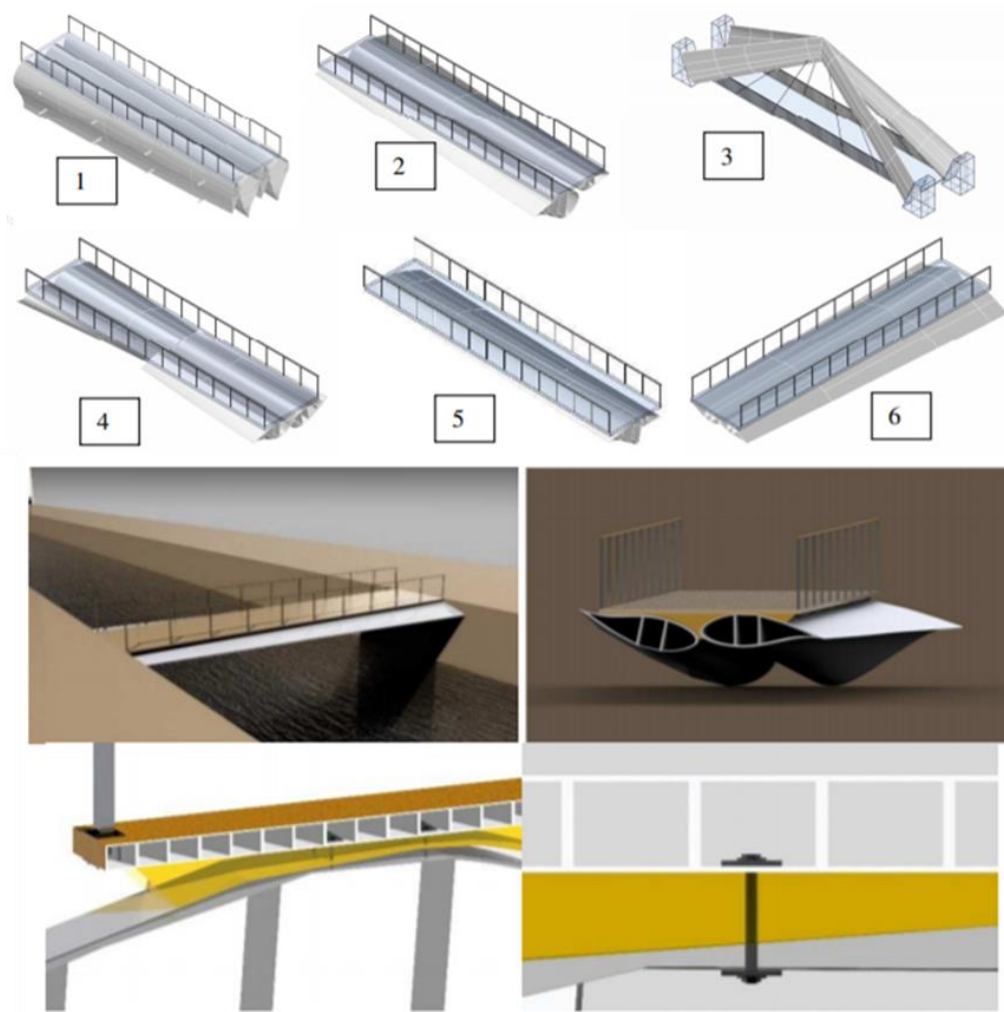


Συγκεκριμένα δομικά μέρη των πτερυγίων μπορούν επίσης να επαναχρησιμοποιηθούν για κατασκευές όπως στο Aalborg της Δανίας (Εικόνα 18), όπου δύο παροπλισμένα πτερύγια σχεδιάζεται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μιας πεζογέφυρας. Αυτή θα μπορούσε να είναι η πρώτη πεζογέφυρα αυτού του τύπου στον κόσμο. Και στα δύο έργα συμμετέχουν ενεργά βιομηχανικοί εταίροι, γεγονός που δείχνει το σαφές βιομηχανικό ενδιαφέρον για την εξεύρεση λύσης στη διαχείριση των πτερυγίων EoL (André et al., 2020).



*Εικόνα 18: Σχεδιασμός πεζογέφυρας κατασκευασμένης από παροπλισμένα πτερύγια ανεμογεννητριών (André et al., 2020)*

Ο André και οι συνεργάτες του στο άρθρο τους αναφέρουν τα προκαταρκτικά αποτελέσματα μιας έρευνας σχετικά με τη μελέτη σχεδιασμού μιας πεζογέφυρας κατασκευασμένης από παροπλισμένα πτερύγια ανεμογεννητριών (Εικόνα 19). Η κατασκευή γεφυρών από παροπλισμένα πτερύγια ανεμογεννητριών θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη λύση. Σύμφωνα με τον συγγραφέα ωστόσο, πρέπει να διεξαχθούν λεπτομερείς υπολογισμοί και περαιτέρω έρευνες σχετικά με την εναπομένουσα ικανότητα των πτερυγίων προκειμένου να επικυρωθεί η ιδέα. (André et al., 2020).



Εικόνα 19: Σχεδιασμός για κατασκευή γεφυρών από παροπλισμένα περύγια ανεμογεννητριών (André et al., 2020).

Ο Joustra και οι συνεργάτες του επαναχρησιμοποίησαν τμήματα περυγίων για ένα τραπέζι πικνίκ (Εικόνα 20). Το τραπέζι αποτελείται από μια επιφάνεια τραπεζιού και δύο καθίσματα, τοποθετημένα σε δύο πλαίσια. Χρησιμοποιήθηκαν τμήματα πλάτους 0,3 m για τα καθίσματα και τμήματα πλάτους 0,8 m για την επιφάνεια του τραπεζιού. Τα περύγια των ανεμογεννητριών έχουν το μειονέκτημα ότι δεν έχουν σταθερή καμπυλότητα και για αυτό το λόγο κάνει την χρησιμοποίησή τους ιδιαίτερα δύσκολη. Όπως φαίνεται και από την εικόνα για την συγκεκριμένη κατασκευή χρησιμοποιούνται κομμάτια διαφορετικής καμπυλότητας πράγμα που κάνει τη συγκεκριμένη κατασκευή ιδιαίτερα ελπιδοφόρα (Joustra et al., 2021).



Εικόνα 20: Τραπεζάκι πικνίκ από επαναχρησιμοποιούμενα πτερύγια ανεμογεννητριών (Joustra et al., 2021).

Ωστόσο, μέχρι σήμερα οι νέες χρήσεις των πτερυγίων περιλαμβάνουν έργα εντυπωσιασμού. Το σχήμα των πτερυγίων (διαφορετικό μήκος και καμπυλότητα), οι ποσότητες που υπάρχουν καθώς δεν είναι σταθερές και η μεταφορά τους είναι μερικοί από τους λόγους που καθιστούν προς το παρόν αυτές τις επιλογές αρκετά δύσκολο να αποτελέσουν λύσεις βιομηχανικής κλίμακας.

#### 6.4 Ανακύκλωση

Μετά την επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η ανάκτηση είναι οι επόμενες διαθέσιμες επιλογές. Με την ανακύκλωση το παροπλισμένο πτερύγιο μετατρέπεται σε νέο προϊόν ή υλικό με την ίδια ή διαφορετική λειτουργική χρήση. Η ανακύκλωση απαιτεί ενέργεια και πόρους προκειμένου να επιτευχθεί η μετατροπή των αποβλήτων από τα πτερύγια σε κάτι νέο. Υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός εταιρειών που προσφέρουν υπηρεσίες ανακύκλωσης σύνθετων υλικών. Μερικά παραδείγματα προϊόντων που βασίζονται σε ανακυκλωμένα σύνθετα υλικά πτερυγίων είναι τα εξής:

α) Το έργο FiberUse αποσκοπεί στη διερεύνηση τρόπων ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης σύνθετων υλικών από ίνες γυαλιού και άνθρακα (GFRP και CFRP), προκειμένου να μειωθούν τα απόβλητα και να καταστεί δυνατή η χρήση των υλικών αυτών σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας. Παραδείγματα επαναχρησιμοποίησης των σύνθετων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία (Εικόνα 21) και στην παραγωγή δομικών υλικών και επίπλων (Εικόνα 22) παρουσιάζονται στη συνέχεια (N/A, 2021).



Εικόνα 21: Εργαλείο στήριξης καπό αυτοκινήτου (WindEurope, 2020).



Εικόνα 22: α) αριστερά - Μοντέρνα αστικά έπιπλα, β) δεξιά - Έπιπλα μπάνιου (WindEurope, 2020).

β) Η κοινοπραξία BRIO έχει κατασκευάσει προϊόντα σε βιομηχανική κλίμακα, χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένες ίνες για την ενίσχυση του σκυροδέματος (Εικόνα 23). Τα προϊόντα έχουν δοκιμαστεί και αποδειχθεί ότι είναι ισχυρότερα από το τυπικό προϊόν. Τα φράγματα ασφαλείας από ανακυκλωμένες ίνες έχουν τοποθετηθεί σε δημόσιο αυτοκινητόδρομο κοντά στο Lumbreras (Εικόνα 24) (Malumbres, 2017).



Εικόνα 23: α) αριστερά - Προκατασκευασμένα μπλοκ από σκυρόδεμα τύπου LEGO, β) δεξιά - Προκατασκευασμένα φρεάτια (Malumbres, 2017).



Εικόνα 24: Προστατευτικά κιγκλιδώματα από σκυρόδεμα (Malumbres, 2017).

γ) Τα ηχομονωτικά φράγματα της Miljoskarm είναι κατασκευασμένα με ηχοαπορροφητικό υλικό από ανακυκλωμένο υαλοβάμβακα, Αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά φράγματα μόνωσης θορύβου από αλουμίνιο και πετροβάμβακα με ανακυκλωμένα υλικά (*Products - Miljøskærm*, n.d.). Σχεδίασε και κατασκεύασε ένα φράγμα μόνωσης θορύβου (εικόνα 25) αποτελούμενο από ανακυκλωμένο υαλοβάμβακα από πτερύγια ανεμογεννητριών για να μειώσει τον θόρυβο της κυκλοφορίας για την εταιρία Tican Fresh Meat στο Θίστιντ (*Noise Barrier in Thisted 2019 - Miljøskærm*, n.d.).



Εικόνα 25: Φράγματα μόνωσης θορύβου στο Θίστιντ (*Noise Barrier in Thisted 2019 - Miljøskærm*, n.d.).

## 6.5 Ανάκτηση

Η ανάκτηση περιλαμβάνει τη μετατροπή των αποβλήτων σε καύσιμο ή θερμική ενέργεια, αφού πρώτα γίνει ο διαχωρισμός των επιμέρους συστατικών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν.

## 6.6 Απόθεση

Εάν δεν είναι δυνατή η χρήση των πτερυγίων με έναν από τους προαναφερόμενους τρόπους, εναποθέτονται σε κατάλληλα σημεία. Επί του παρόντος, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) (Cousins et al., 2019). Το κόστος απόθεσης ποικίλλει ανάλογα με τη χώρα. Τέλος, ορισμένες χώρες, όπως η Γερμανία, η Ολλανδία και η Φινλανδία, έχουν θεσπίσει αυστηρότερους νόμους σχετικά με τη

διάθεση αυτών των απορριμμάτων, οι οποίοι σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνουν μέχρι την απαγόρευση της υγειονομικής ταφής και της αποτέφρωσης σύνθετων υλικών (Rentizelas et al., 2021). Η επόμενη ενότητα περιγράφει τις υπάρχουσες τεχνολογίες για την ανακύκλωση και την ανάκτηση σύνθετων υλικών, δίνοντας έμφαση στο GFRP.

## 7 Ανακύκλωση και ανάκτηση σύνθετων υλικών

Η έλλειψη διαθέσιμων και υιοθετημένων τεχνολογιών που θα επέτρεπαν την εξαγωγή υψηλότερης αξίας από τα σύνθετα υλικά (π.χ. ρητίνες και ίνες) αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την ανακύκλωσή τους. Τέτοιες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τη χημική και θερμική ανακύκλωση, οι οποίες βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Επί του παρόντος, χρησιμοποιούνται λιγότερο αποτελεσματικές τεχνολογίες, όπως η μηχανική επεξεργασία και η ανάκτηση ενέργειας, ενώ η υγειονομική ταφή εξακολουθεί να αποτελεί επιλογή για μεγάλο ποσοστό απορριμμάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν όλες διαθέσιμες μέθοδοι ανακύκλωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτή τη στιγμή για την ανακύκλωση των σύνθετων υλικών, δίνοντας έμφαση στο GFRP από το οποίο αποτελείται κατά μεγάλο ποσοστό ένα «κλασικό» πτερύγιο. Θα συζητηθούν επίσης μέθοδοι που βρίσκονται ακόμη σε εργαστηριακό στάδιο, οι οποίες ενδέχεται να εφαρμοστούν στο μέλλον υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις.

### 7.1 Αρχική επεξεργασία υλικών

Η ανακύκλωση μιας ανεμογεννήτριας αποτελεί μια σύνθετη ανακύκλωση ιδιαίτερα των τμημάτων που αποτελούνται από σύνθετα υλικά όπως το πτερύγιο. Αρχικά τα πτερύγια χρειάζεται να αποσυναρμολογηθούν από την ανεμογεννήτρια και να τμηματοποιηθούν, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η μεταφορά τους στο κατάλληλο μέρος για την επεξεργασία τους. Ανάλογα με το μέγεθος του πτερυγίου, την τελική του χρήση και τις περιβαλλοντικές συνθήκες χρησιμοποιούνται και οι κατάλληλοι τρόποι κοπής. Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι είναι οι εξής :

**Υδροκοπή:** Αυτή η μέθοδος πραγματοποιείται με την χρήση νερού πολύ υψηλής πίεσης. Δίνει τη δυνατότητα κοπής πολλών και διαφορετικών υλικών, ακόμα και των μετάλλων. Ως διαδικασία δεν παράγει σκόνη και θόρυβο και μπορεί να χαρακτηριστεί φιλική προς το περιβάλλον. Ωστόσο, αλλά η κατανάλωση νερού είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους που θα αναφερθούν.

**Συρματοκοπή:** Κατά την διαδικασία αυτή ένα υδρόψυκτο αδαμαντοφόρο χαλύβδινο σύρμα τυλίγεται πέριξ του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας. Το σύρμα μπορεί να κόψει όλα τα μεγέθη των πτερυγίων καθώς και διαφορετικά υλικά από τα πτερύγια, συμπεριλαμβανομένου του ξύλου ακόμη και των μετάλλων. Επίσης, και αυτή ως διαδικασία μπορεί να χαρακτηριστεί φιλική προς το περιβάλλον καθώς δεν παράγει σκόνη και θόρυβο, αλλά και το νερό που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία αυτή μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, οι κοπές είναι ομαλές, όμως η λεπίδα κατά τη διάρκεια

της κοπής πρέπει να είναι καλά στερεωμένη για να μην «κλωτσάει» και σαν μέθοδος είναι χρονοβόρα.

**Δισκοπρίονο:** Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται διαφορετικά μεγέθη (έως και δύο μέτρα διάμετρος λεπίδας) και τύποι δισκοπρίονων (χειροκίνητα, υδραυλικά). Μπορεί να κόψει οποιοδήποτε μέγεθος, αλλά για να επιτευχθεί χρειάζεται να πραγματοποιηθούν αρκετές τομές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερων εκπομπών και σκόνης, που μπορεί όμως να περιοριστεί με κατάλληλα συστήματα. Ακόμα μπορεί να πραγματοποιήσει ανεξάρτητες κοπές προς όλες τις κατευθύνσεις παρέχοντας το δικαίωμα εξαγωγής συγκεκριμένων υλικών (π.χ. ξύλο μπάλα).

**Υδραυλικός κόφτης:** Αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο κοπής των πτερυγίων. Ωστόσο, κατά την κοπή το υλικό συνθλίβεται και εκπέμπονται σκόνη και ίνες, για αυτό το λόγο απαιτείται νερό για τον έλεγχο της σκόνης. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας η περιοχή πρέπει να απολυμανθεί. Επιπλέον, κατά τη μεταφορά του, κομμένα πτερύγια μπορεί να εκπέμπουν σκόνες και ίνες γεγονός που απαιτεί να στοιβάζονται κατάλληλα (WindEurope, 2017).

Η επιλογή της κάθε μεθόδου κοπής πρέπει να αξιολογείται ως προς τις περιβαλλοντικές συνθήκες (εργασία σε υψηλό υψόμετρο, αέρας, βροχή), την ασφάλεια της εργασίας (εξοπλισμός ατομικής προστασίας) και την προστασία του περιβάλλοντος (περιορισμός εκπομπών σκόνης και ινών). Επειτά, τα σύνθετα υλικά διαχωρίζονται από τα μέταλλα και μεταφέρονται σε κατάλληλες υποδομές για την αξιοποίησή τους. Οι πιο κοινές μέθοδοι ανακύκλωσής τους παρουσιάζονται στη συνέχεια.

## 7.2 Μέθοδοι βιομηχανικής κλίμακας

### 7.2.1 Μηχανική Ανακύκλωση

Η άλεση των σύνθετων υλικών έχει διερευνηθεί εκτενώς και θεωρείται ώριμη τεχνολογία για την ανάκτηση των πρώτων υλών (Cousins et al., 2019; Shuaib & Mativenga, 2016). Οι τεχνικές μηχανικής ανακύκλωσης έχουν διερευνηθεί τόσο για σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού όσο και για ανθρακονήματα (Σχήμα 2). Ωστόσο, έχει διεξαχθεί εκτενέστερη έρευνα σε υλικά από ίνες γυαλιού. Η πιο κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μείωση του μεγέθους των υπολειμμάτων είναι μέσω διαδικασίας θραύσης (Εικόνα 26). Αυτό συνήθως περιλαμβάνει τη χρήση ενός μύλου με χαμηλή ταχύτητα κοπής ή θραύσης για να σπάσει το υλικό σε κομμάτια μεγέθους της τάξης των 50-100 mm. Αυτό διευκολύνει την αφαίρεση μεταλλικών στοιχείων ενώ ταυτόχρονα μειώνει τον όγκο των απορριμμάτων που μεταφέρονται. Η κύρια φάση για τη μείωση του όγκου περιλαμβάνει την άλεση σε μύλο θραύσης ή υψηλής ταχύτητας, όπου το υλικό αλέθεται σε λεπτότερο προϊόν που κυμαίνεται



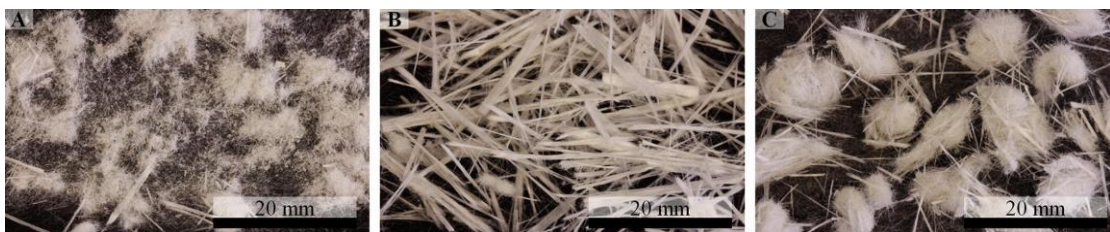
συνήθως από 10 mm έως σωματίδια μικρότερα από 50 μm. Οι μηχανικά ανακτημένες ίνες διατηρούν ορισμένα θραύσματα ρητίνης στην επιφάνεια. Στην συνέχεια το υλικό αυτό ταξινομείται με χρήση κόσκινου σε κλάσματα διαφορετικού μεγέθους (Εικόνα 27) (Pickering, 2006). Τα προκύπτοντα ανακυκλώματα είναι μείγματα πολυμερών, ινών και πληρωτικών. Συνήθως, τα λεπτότερα κλάσματα είναι σκόνες και περιέχουν υψηλότερη αναλογία πληρωτικού και πολυμερούς από το αρχικό σύνθετο (Εικόνα 28). Τα χονδροειδή κλάσματα τείνουν να έχουν ινώδη φύση (υψηλότερη περιεκτικότητα σε ίνες) (Pickering, 2006). Οι απομονωμένες ίνες θα μπορούσαν να αλεστούν περαιτέρω για την παραγωγή θερμικών και ακουστικών μονωτικών αφρών (Kyaw Oo D'Amore et al., 2017).



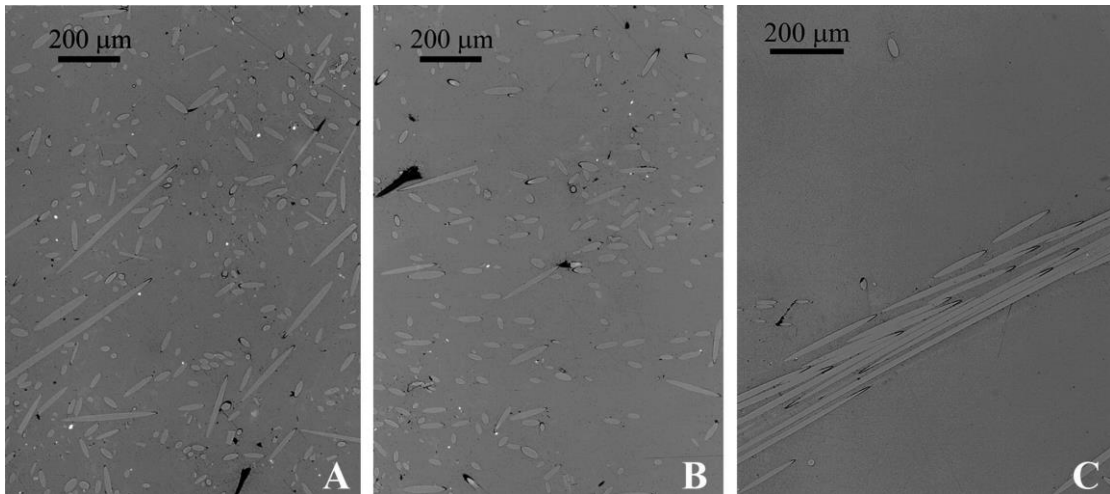
Σχήμα 2: Ανάκτηση υλικών μέσω της διαδικασίας μηχανικής ανακύκλωσης (P. Liu, 2017).



Εικόνα 26: Τεμαχισμένο σύνθετο υλικό (Justine Beauson et al., 2016).



Εικόνα 27: Εικόνες των παραγόμενων κλασμάτων SC (Α) λεπτόκοκκα, (Β) χονδρόκοκκα, (Γ) συσσωματώματα (Justine Beauson et al., 2016).



Εικόνα 28: Εικόνες οπτικής μικροσκοπίας που δείχνουν τη μικροδομή των σύνθετων υλικών με τα τρία κλάσματα SC: (A) όπως παραλήφθηκαν, (B) λεπτό και (Γ) χονδρό. Οι διατομές είναι σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του πάχους των σύνθετων υλικών (Justine Beauson et al., 2016).

Μια άλλη χρήση για το ανακυκλωμένο υλικό είναι το sheet molding compound (SMC) ή το bulk molding compound (BMC), τα οποία βασίζονται σε ασυνεχείς ίνες ως ενίσχυση (Cousins et al., 2019; Palmer et al., 2010; Pickering, 2006). Το SMC είναι ένα υψηλής αντοχής θερμοσκληρυνόμενο υλικό χύτευσης ενισχυμένο με γυαλί (μεταξύ 10% και 60%), το οποίο συνήθως μορφοποιείται με συμπίεση. Συνδυάζει μακρές ίνες γυαλιού (περίπου 12,5 έως 25 mm) και ακόρεστες τροποποιημένες ρητίνες πολυεστέρα/φαινολικές/βινυλίου και ακρυλικές για την παραγωγή μιας ένωσης χύτευσης υψηλής αντοχής (high strength moulding compound). Το Bulk Molding Compound (BMC) είναι ένα μείγμα θερμοσκληρυνόμενης πλαστικής ρητίνης από διάφορα αδρανή πληρωτικά, ενίσχυση ιών (μεταξύ 10% και 30%), καταλύτες, σταθεροποιητές και χρωστικές ουσίες που σχηματίζουν ένα παχύρρευστο, "στόκο" τύπου έγχυσης (viscous, 'puttylike' injection molding compound). Το Bulk Molding Compound (BMC) είναι ιδιαίτερα γεμισμένο και ενισχυμένο με κοντές ίνες (περίπου 0,8 έως 12,5 mm) (Sheet Molding Compound, Bulk Molding Compound, n.d.).

Μια σειρά εφαρμογών έχει διερευνηθεί για ανακυκλώσιμα προϊόντα. Αυτά με τη μορφή λεπτών σκονών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο του πληρωτικού ανθρακικού ασβεστίου σε νέα SMC ή BMC. Σε επίπεδα φόρτωσης περίπου 10% οι μειώσεις στις μηχανικές ιδιότητες που παρατηρούνται είναι υποφερτές. Ωστόσο, υψηλότερες αναλογίες δημιουργούν προβλήματα επεξεργασίας, καθώς το ανακυκλώσιμο απορροφά περισσότερη ρητίνη και έτσι αυξάνει το ιξώδες της ένωσης χύτευσης και παρατηρούνται, επίσης, πιο σημαντικές μειώσεις στις μηχανικές ιδιότητες (Oliveux et al., 2015; Pickering, 2006). Ένα πλεονέκτημα του ανακυκλωμένου υλικού είναι ότι έχει γενικά χαμηλότερη πυκνότητα από το ανθρακικό ασβέστιο. Αυτό συμβαίνει επειδή το ανακυκλωμένο υλικό περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό πολυμερούς χαμηλής πυκνότητας. Επομένως, ένα

συστατικό SMC που περιέχει 10% ανακυκλωμένο υλικό μπορεί να είναι 5% ελαφρύτερο από ένα συστατικό που χρησιμοποιεί μόνο ανθρακικό ασβέστιο. (Oliveux et al., 2015; Pickering, 2006). Η χρήση των πιο χονδροειδών ανακυκλωμάτων, τα οποία περιέχουν σημαντικές ποσότητες ανέπαφων ινών, καθιστούν τη διαδικασία πιο δύσκολη και ακόμη και με μέτριες προσθήκες παρατηρούνται σημαντικές μειώσεις στις μηχανικές ιδιότητες (Pickering, 2006).

Επιπλέον η επίδραση του μήκους των ινών έχει διερευνηθεί και έχει βρεθεί ότι, σε ένα (BMC), το ινώδες ανακυκλώσιμο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για να αντικαταστήσει μερικώς τις κοντές ίνες γυαλιού, υπό την προϋπόθεση ότι στο υπόλοιπο οι παρθένες ίνες αντικαθίστανται με μακρύτερες ίνες (Oliveux et al., 2015; Pickering, 2006). Οι μακρύτερες παρθένες ίνες θα δώσουν σε κάθε περίπτωση υψηλότερες αντοχές και αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιστάθμιση των επιβλαβών επιπτώσεων του ανακυκλώματος (Pickering, 2006). Ακόμα, ο Palmer και οι συνεργάτες του έδειξαν ότι ο μεγαλύτερος χρόνος ανάμιξης επέτρεψε τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων σε σύγκριση με τον κανονικό χρόνο ανάμιξης και, επιπλέον, επιτεύχθηκαν ιδιότητες συγκρίσιμες με το κανονικό υλικό (Palmer et al., 2010). Αυτό εξηγείται από τη βελτιωμένη διεπιφάνεια μεταξύ του ανακυκλωμένου υλικού και της νέας ρητίνης.

Ορισμένες εταιρείες ασχολούνται με τη συλλογή και επεξεργασία των σύνθετων αποβλήτων, έφεραν μηχανική άλεση σε βιομηχανική κλίμακα. Τη δεκαετία του 1970 ο Wolfgang Unger ανέπτυξε την ιδιόκτητη τεχνολογία του Seawolf στη Φλόριντα των ΗΠΑ για να αλέθει απορρίμματα υαλοβάμβακα και να τα χρησιμοποιεί για την αντικατάσταση σάπιων πρυμναίων σκαφών ή να τα ενσωματώνει χρησιμοποιώντας εξοπλισμό ψεκασμού για την κατασκευή μπανιέρας και άλλων προϊόντων. Η εταιρεία του Unger ονομάζεται πλέον Eco-Wolf. Η Eco-Wolf συνεργάστηκε με την Global Fiberglass Solutions, η οποία επιδιώκει να κατασκευάσει και να διαχειριστεί εγκαταστάσεις συλλογής και ανακύκλωσης υαλοβάμβακα σε όλες τις ΗΠΑ, έχοντας αναπτύξει εφαρμογές όπως οι σιδηροδρομικοί στρωτήρες (Job, 2013).

Η ERCOM Composite Recycling GmbH ιδρύθηκε στη Γερμανία το 1990 για την ανακύκλωση αποβλήτων παραγωγής αυτοκινήτων, με τεμαχισμό και άλεση εξαρτημάτων σε σκόνη, για να χρησιμοποιηθούν σε νέα σύνθετα υλικά (SMC) σε ποσοστό έως και 20% (Marsh, 2001). Αυτή η προσέγγιση της άλεσης του GRP σε λεπτή σκόνη για χρήση ως πληρωτικό υλικό έχει καθιερωθεί σε διάφορες βιομηχανίες, αλλά όπως και με τη μέθοδο των κλιβάνων τσιμέντου, μειώνει την αξία του υλικού σε εκείνη του ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο μπορεί να αγοραστεί σε πολύ χαμηλό κόστος. Επιπλέον, απαιτείται σημαντική ποσότητα ενέργειας για τη λείανση του υλικού (Job, 2013).

Η Filon Products κατασκευάζει κρεμαστά φωτιστικά και έχει επενδύσει σε μηχανήματα για την άλεση των εσωτερικών της αποβλήτων GRP και τα ενσωματώνει σε μια σειρά προϊόντων, όπως φύλλα στέγης, υδροροές και επίπεδα φύλλα για σήμανση (Job, 2013).

Η Hambleside Danelaw (HD) έχει συμμετάσχει σε δοκιμές σε πολυάριθμα προϊόντα. Αρχικά συνεργάστηκαν με το Πανεπιστήμιο του Dundee χρησιμοποιώντας το ανακυκλωμένο υλικό σε αφρώδες σκυρόδεμα, το οποίο είχε κάποια πλεονεκτήματα, αλλά το μείγμα ήταν λιγότερο ρευστό και λειτουργικό. Το 2007-2008 στο Ηνωμένο Βασίλειο πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές μέσω του προγράμματος BeAware (Built Environment Action on Waste Awareness and Resource Efficiency) για την ενσωμάτωση αποβλήτων GRP σε προκατασκευασμένα προϊόντα από σκυρόδεμα και καουτσούκ. Καταδείχθηκαν βελτιώσεις στις ιδιότητες, αλλά και πάλι τα αποτελέσματα δεν εμπορευματοποιήθηκαν.

Ωστόσο, η HD διαπίστωσε ότι υπάρχει μεγαλύτερη αξία στο διαχωρισμό των υαλοϊνών από τη σκόνη ρητίνης για επαναχρησιμοποίηση ως ενίσχυση. Εκτός από τα προϊόντα πολυεστέρα ενισχυμένου με ίνες γυαλιού, κατασκευάζουν οικοδομικά προϊόντα από χυτευμένο με έγχυση πολυπροπυλένιο (PP) και άλλα πολυμερή. Η προσθήκη των κοντών ινών γυαλιού στο PP αυξάνει την αντοχή και τη δυσκαμψία, καθώς και τη μείωση της περιεκτικότητας σε PP και, συνεπώς, του κόστους των προϊόντων που μορφοποιούνται με έγχυση (Job, 2013).

Παρόμοιο έργο έχει γίνει από την Mixt Composites Recyclables (M-C-R) στη Γαλλία, θυγατρική της Plastic Omnium Auto Exterieur. Η M-C-R κατασκευάζει μείγματα χύτευσης και παίρνει πίσω τα απόβλητα της διαδικασίας από τους πελάτες της, τα οποία αλέθονται και επανενσωματώνονται σε νέα μείγματα για εξαρτήματα αυτοκινήτων. Η M-C-R εξάγει, επίσης, μακρύτερες ίνες από λιγότερο λεπτόκοκκο ανακυκλωμένο υλικό και το πουλάει ως υποκατάστατο των ινών PP σε τσιμεντοκονίες δαπέδων, όπου οι ίνες περιορίζουν τη ρηγμάτωση κατά την πρώιμη πήξη του τσιμέντου. Αυτό έχει επικυρωθεί σε δοκιμές από το CERIB (Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton) (Job, 2013).

Η Reprocover κατασκευάζει καπάκια φρεατίων, θαλάμους βαλβίδων και άλλα κατασκευαστικά προϊόντα χρησιμοποιώντας θερμοσκληρυνόμενα βιομηχανικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένου του GRP από την εταιρεία 3B Fibreglass. Κατασκεύασαν, επίσης, ράγες τρένων με εξαιρετικές ιδιότητες απορρόφησης κραδασμών (Job, 2013).

### 7.2.2 Αποτέφρωση - Συνεπεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου

#### Αποτέφρωση και συναποτέφρωση

Μια άλλη προσέγγιση είναι η αποτέφρωση των πτερυγίων για ανάκτηση ενέργειας, η οποία έχει πολλά μειονεκτήματα (Lichtenegger et al., 2020). Η αποτέφρωση των αποβλήτων FRP με ανάκτηση ενέργειας θεωρείται διαδικασία ανακύκλωσης σε ορισμένους ακαδημαϊκούς κύκλους, αλλά αυτό το χαρακτηριστικό εξακολουθεί να είναι αμφιλεγόμενο. Για παράδειγμα, στον ορισμό της "ανακύκλωσης" που θεσπίστηκε από την οδηγία-πλαίσιο για τα απόβλητα, η ανάκτηση ενέργειας και η επανεπεξεργασία των αποβλήτων σε δεύτερα προϊόντα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα αποκλείονται ως διεργασίες ανακύκλωσης.

Η αποτέφρωση περιλαμβάνει την καύση των σύνθετων υλικών και την εξαγωγή ενέργειας από τα καύσιμα πολυμερή. Επειδή υπάρχουν εγκαταστάσεις αποτέφρωσης, αυτό μπορεί να γίνει με χαμηλότερο κόστος (Murray et al., 2019). Ωστόσο, η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκύπτει από την αποτέφρωση είναι ένα μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας. Το υλικό του πτερυγίου μπορεί να αποτεφρωθεί για ανάκτηση ενέργειας. Αυτή η λύση χρησιμοποιείται επί του παρόντος στη Δανία. Ωστόσο, έχει πολλά μειονεκτήματα. Δομικό σύνθετο υλικό, όπως αυτό που χρησιμοποιείται στα πτερύγια ανεμογεννητριών, περιέχει έως 70% κ.β. ίνες γυαλιού. Η ανάκτηση ενέργειας θα είναι δύσκολη, καθώς οι ίνες γυαλιού δεν είναι εύφλεκτες και θα εμποδίσουν την αποτέφρωση (Duflou et al., 2012).

Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία, υπάρχουν όρια στην ποσότητα των εκπομπών που μπορούν να απελευθερωθούν στον αέρα, το νερό και το έδαφος και τα υπολείμματα από τη διαδικασία αποτέφρωσης πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ως προς την ποσότητα και το πόσο επιβλαβή είναι (Οδηγία 2000/76/Εκ, 2000). Τα οφέλη από την ανάκτηση ενέργειας από την αποτέφρωση απορριμμάτων είναι επίσης συζητήσιμα. Η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί εξαρτάται από την οργανική περιεκτικότητα των αποβλήτων και για τυπικά σύνθετα υλικά κατασκευασμένα από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GFRP) και πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP), αυτό αντιπροσωπεύει μόνο 30-40% κατά βάρος. Ωστόσο, στα αποτεφρωτήρια, συνήθως, χρεώνουν περισσότερο για την αποδοχή απορριμμάτων FRP προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του συστήματος αποτέφρωσης (M. C.S. Ribeiro et al., 2017).

Έχει επίσης αναφερθεί ότι η παρουσία ινών γυαλιού στα καυσαέρια θα μπορούσε να διαταράξει το σύστημα καθαρισμού αερίων (Justine Beauson & Brøndsted, 2016). Η καύση πλαστικών αποβλήτων περιορίζει τον όγκο των οικιακών αποβλήτων που μπορούν να υποστούν επεξεργασία, πράγμα που σημαίνει ότι μεγαλύτερες ποσότητες οικιακών

αποβλήτων (των οποίων υπάρχει απεριόριστη προσφορά) πρέπει να οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής (Congou et al., 2006). Επί του παρόντος, η αποτέφρωση, με μερική ανάκτηση ενέργειας, ως πρώτη εναλλακτική λύση έναντι της υγειονομικής ταφής, θεωρείται όλο και λιγότερο ως οικονομικά αποδοτική τελική οδός για τα απόβλητα σύνθετων υλικών (M. C.S. Ribeiro et al., 2017).

#### **Συναποτέφρωση σε κλιβάνους τσιμέντου**

Η συναποτέφρωση σε κλιβάνους τσιμέντου αποτελεί μια πρόσφατη εναλλακτική λύση για τα απόβλητα GFRP και θεωρείται ως μια ελαφρώς καλύτερη και οικονομικά αποδοτική επιλογή, καθώς αυτό προσφέρει τόσο ανάκτηση ενέργειας όσο και πρώτων υλών. Το GRP περιέχει συνήθως Ε-γυαλί, το οποίο είναι συνήθως αλουμινο-βοριοπυριτικό, μαζί με μια οργανική ρητίνη και συχνά ανθρακικό ασβέστιο ως πληρωτικό υλικό. Όταν τροφοδοτείται σε κλίβανο τσιμέντου, η οργανική ρητίνη καίγεται παρέχοντας ενέργεια και τα ανόργανα συστατικά παρέχουν πρώτη ύλη για το κλίνκερ τσιμέντου, δηλαδή διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) και οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Στη συνέχεια το κλίνκερ αλέθεται για να σχηματιστεί τσιμέντο. Αυτό σημαίνει ότι στο τέλος δεν μένει κανένα υπόλειμμα (Job, 2013; M. C.S. Ribeiro et al., 2017).

Επίσης, η συνολική ποσότητα αντικατάστασης καυσίμου σε κλιβάνους τσιμέντου από απόβλητα GFRP είναι περιορισμένη λόγω της παρουσίας βορίου που συνήθως βρίσκεται στον οπλισμό ινών Ε-γυαλιού. Περισσότερο από 0,2% οξείδιο του βορίου στο τσιμέντο αυξάνει τον χρόνο πήξης και μειώνει την πρώιμη αντοχή. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι δεν θα μπορούσε να αντικατασταθεί περισσότερο από το 10% περίπου της εισροής καυσίμου σε έναν κλίβανο τσιμέντου από απόβλητα GFRP (Pickering, 2006). Άλλα μειονεκτήματα της συναποτέφρωσης σε κλιβάνους τσιμέντου βασίζονται στις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν τα απόβλητα GFRP: Τα θραύσματα των σύνθετων αποβλήτων πρέπει να είναι μικρότερα από ένα καθορισμένο μέγεθος (20 mm × 20 mm), να περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις τοξικών υλικών και βαρέων μετάλλων, να μη περιέχουν κανένα ξένο υλικό (όπως μεταλλικά ένθετα), να έχουν συγκεκριμένη θερμογόνο δύναμη (υψηλότερη από 5000 kcal / kg) και δεν πρέπει να παράγουν σκόνη, όπως κονιορτοποιημένες ίνες γυαλιού (Maria Cristina Santos Ribeiro et al., 2016).

Η διαδικασία που εφάρμοσε η Zagonis ξεκίνησε με την κοπή των πτερυγίων επί τόπου σε κομμάτια μήκους 10-12 m. Στο χώρο του εργοστασίου, τα τμήματα αυτά μειώθηκαν περαιτέρω σε κομμάτια μήκους περίπου 1 m. Αυτά τα μικρότερα τμήματα μετατράπηκαν στη συνέχεια σε τεμαχισμένο σύνθετο υλικό με μια σειρά από στάδια θραύσης και τεμαχισμού. Το υλικό που προέκυψε είχε μέγεθος 5 cm και αναμίχθηκε με άλλα υγρά απόβλητα (Justine

Beauson & Brøndsted, 2016). Τέλος, το μείγμα αυτό στάλθηκε στο εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου Holcim, το οποίο το χρησιμοποίησε ως υποκατάστατο καυσίμου, για τη μείωση της τέφρας άνθρακα και ως πρώτη ύλη για την αντικατάσταση του ανθρακικού ασβεστίου (Job, 2013). Από το 2012, η χρήση αποβλήτων σύνθετων υλικών στην παραγωγή τσιμέντου θεωρείται βιώσιμη λύση ανακύκλωσης από την Ευρωπαϊκή Ένωση (European Commission Directorate General Environment 2012, European Composites Industry Association 2013).

Επί του παρόντος, η συναποτέφρωση σε κλιβάνους τσιμέντου είναι εμπορικά ενεργή στη Γερμανία, μέσω της οδού που είναι γνωστή ως ComproCycle, και υποστηρίζεται από την EuCIA (M. C.S. Ribeiro et al., 2017). Στη Γερμανία, όπου η υγειονομική ταφή είναι σχεδόν απαγορευμένη από τους εθνικούς κανονισμούς, οι όγκοι των αποβλήτων GFRP είναι αρκετοί για να δικαιολογήσουν μια τέτοια διαδικασία (Job, 2013).

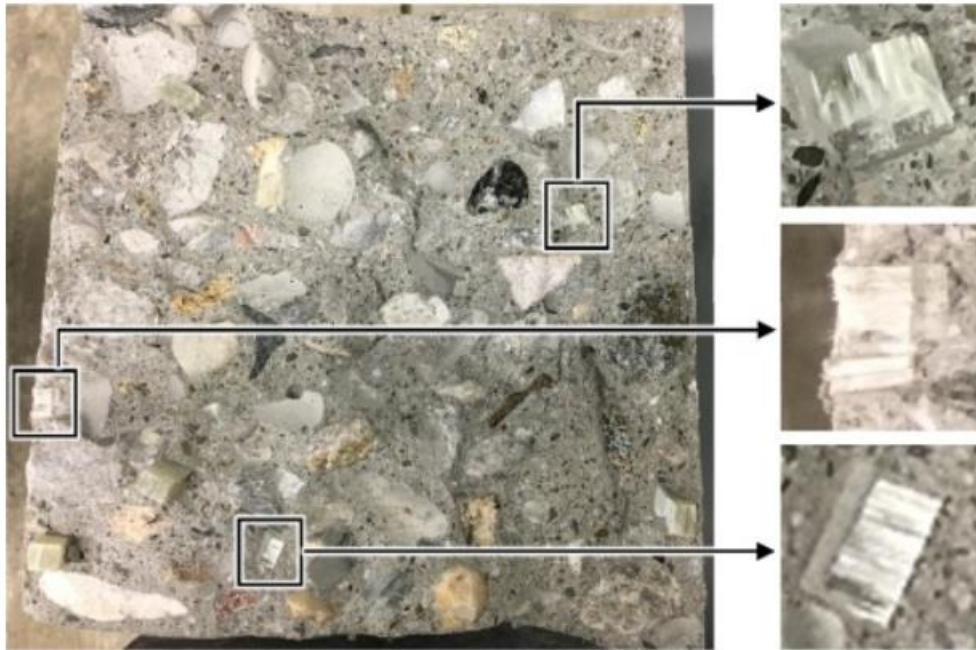
Ο Yazdanbakhsh και οι συνεργάτες του έκαναν δοκιμές χρησιμοποιώντας κυλινδρικά κομμάτια (Εικόνα 29) συγκεκριμένων διαστάσεων από πτερύγια GFRP. Παρατηρήθηκε ότι αύξησαν σημαντικά τη σκληρότητα του σκυροδέματος παρά το γεγονός ότι οι ίνες ήταν εγκάρσια τοποθετημένες στα κομμάτια αυτά. Εάν τα πτερύγια μπορούν να κοπούν σε κομμάτια που αποτελούνται κυρίως από διαμήκεις ευθυγραμμισμένες ίνες, αναμένεται ότι η βελτίωση της ανθεκτικότητας θα είναι πιο σημαντική και ότι η αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος θα αυξηθεί (Yazdanbakhsh et al., 2018).



Εικόνα 29: Κυλινδρικά κομμάτια gfrp με διάμετρο 6 mm και μήκος 100 mm (Yazdanbakhsh et al., 2018).

Αν και οι ίνες γυαλιού είναι ενσωματωμένες και προστατευμένες από ρητίνη, θα πρέπει να διεξαχθεί μια ολοκληρωμένη μελέτη για την ανθεκτικότητα και τη μακροπρόθεσμη απόδοση του σκυροδέματος. Ωστόσο, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μια βασική μελέτη για την ανάπτυξη μοντέλων που μπορούν να προσδιορίσουν τις βελτιστοποιημένες διαστάσεις

των κομματιών με βάση τις ιδιότητες του υλικού και τη δομική τους εφαρμογή στο σκυρόδεμα (Εικόνα 30) (Yazdanbakhsh et al., 2018).



Εικόνα 30: Οι μεγεθυμένες προβολές των αποτυχημένων κομματιών δείχνουν ότι οι ίνες ευθυγραμμίζονται εγκάρσια (Yazdanbakhsh et al., 2018).

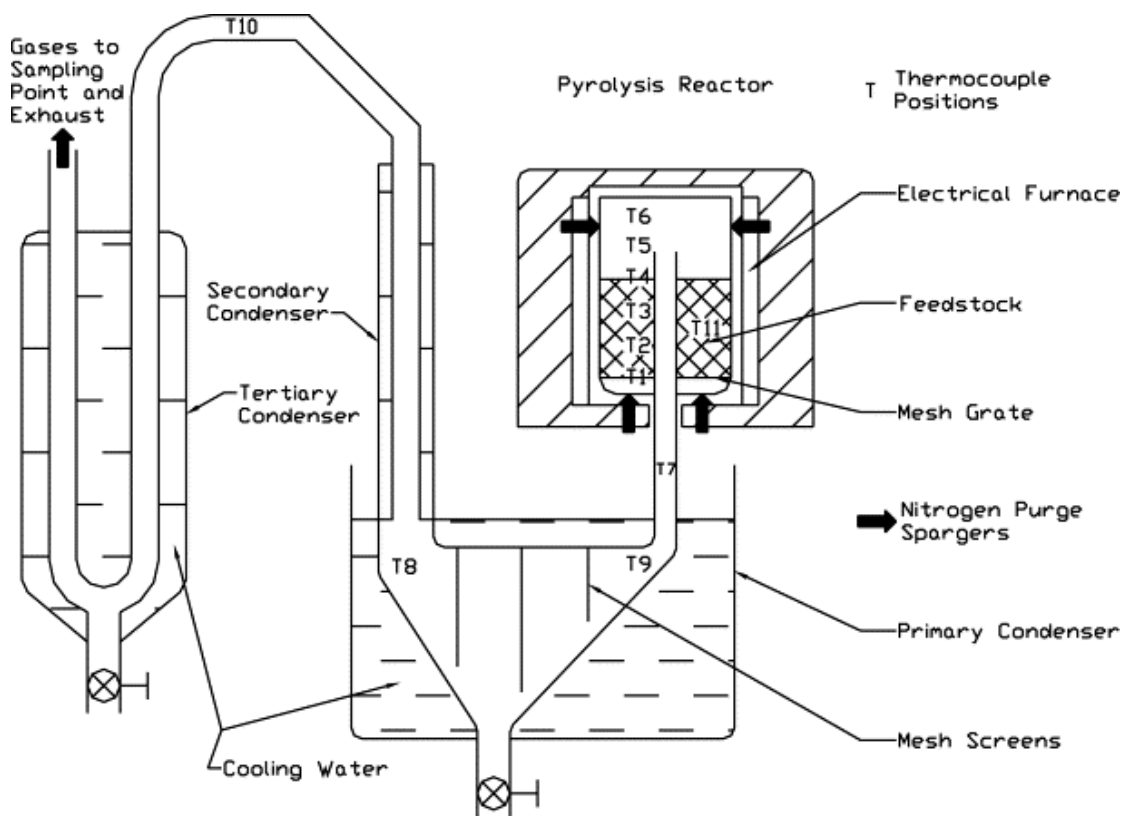
### 7.2.3 Πυρόλυση

Η πιο μελετημένη θερμική διαδικασία είναι η πυρόλυση που πραγματοποιείται απουσία ή παρουσία οξυγόνου, και ακόμη πιο πρόσφατα παρουσία ατμού (Oliveux et al., 2015). Για να είναι σε θέση να πραγματοποιηθεί, απαιτείται μια μηχανική συρρίκνωση του υλικού πριν από τη διαδικασία της πυρόλυσης (J. P. Jensen & Skelton, 2018). Η πυρόλυση επιτρέπει την ανάκτηση ινών είτε από θερμοσκληρυνόμενα είτε από θερμοπλαστικά πολυμερή σύνθετα. Διαφορετικά υλικά μήτρας απαιτούν διαφορετικές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, απαιτούνται χαμηλές θερμοκρασίες για πολυεστερικές μήτρες, ενώ υψηλές θερμοκρασίες απαιτούνται για εποξικές ή θερμοπλαστικές μήτρες. Η πυρόλυση μπορεί να είναι επιζήμια για τη μηχανική απόδοση των ανακτηθέντων γυάλινων ινών, επειδή η διαδικασία πραγματοποιείται, συνήθως, σε θερμοκρασίες άνω των 450 ° C (Cousins et al., 2019; Oliveux et al., 2015). Η πυρόλυση επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση όλων των συστατικών αποβλήτων και οδηγεί σε ανάκτηση πολύτιμου υλικού και ενέργειας. Η διαδικασία πυρόλυσης παράγει αέρια, έλαια και στερεά προϊόντα, όπως ίνες, υλικά πλήρωσης εάν υπάρχουν και τέφρα. Η κατεργασία μετά την πυρόλυση είναι υποχρεωτική για τον καθαρισμό της επιφάνειας των ινών πριν από τον επανασυνδυασμό της ανακτημένης ίνας με θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοπλαστικά σύνθετα για τη σύνθεση νέου σύνθετου (Feih et al., 2011; Naqvi et al., 2018). Έχει αποδειχθεί ότι τα σύνθετα υλικά κατασκευασμένα με ίνες



γυαλιού που ανακτώνται από πυρόλυση υφίστανται σοβαρή υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων σε σύγκριση με τα σύνθετα υλικά κατασκευασμένα με παρθένα υλικά (Cunliffe & Williams, 2003). Ένα πλεονέκτημα της πυρόλυσης είναι ότι το έλαιο που ανακτάται από τη διαδικασία μπορεί δυνητικά να χρησιμοποιηθεί για να διατηρήσει την αντίδραση έτσι ώστε να μην απαιτείται εξωτερική ενέργεια (Torres et al., 2000). Μια πολύ σημαντική παράμετρος για τον επιτυχή αποπολυμερισμό είναι ο έλεγχος θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το χρόνο που αφιερώνεται για τη διαδικασία (Cousins et al., 2019).

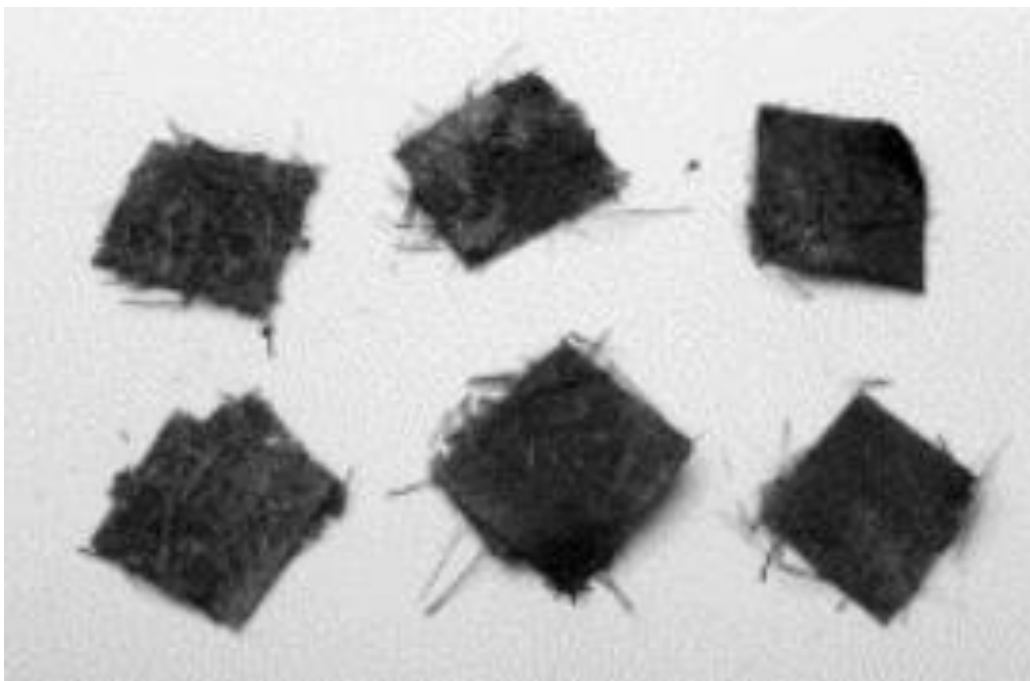
Ο Cunliffe και οι συνεργάτες του πυρόλυσαν το σύνθετο υλικό σε αντιδραστήρα σταθερής κλίνης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Στη μονάδα πυρόλυσης τοποθετούνταν παρτίδες αποβλήτων (1,5 kg) και ο αντιδραστήρας καθαριζόταν συνεχώς με άζωτο. Το δείγμα θερμάνθηκε σε τελική θερμοκρασία πυρόλυσης 450 °C για 90 λεπτά και διεξήχθησαν συνολικά τρεις διαδρομές (Cunliffe & Williams, 2003).



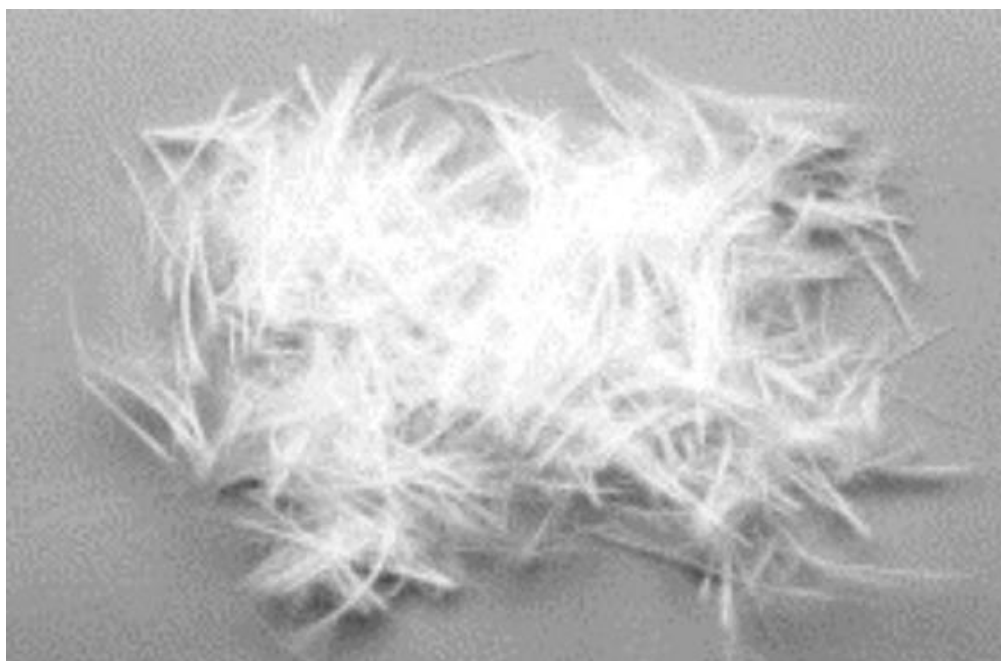
Σχήμα 3: Αντιδραστήρας σταθερής κλίνης για πυρόλυση σύνθετου υλικού (Cunliffe & Williams, 2003)

Η ελάχιστη θερμοκρασία πυρόλυσης που βρέθηκε απαραίτητη για τη διάσπαση του πολυμερούς ήταν αυτή των 400 °C. Ωστόσο, αυτή η θερμοκρασία οδήγησε σε 50% υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών. Συλλέχθηκε επίσης ένα στερεό συμπυκνωμένο προϊόν που έμοιαζε με κερί (Εικόνα 31) και αποτελούσε πάνω από το 15 % κατά βάρος των παραγόμενων προϊόντων. Οι ίνες ανακτήθηκαν από το στερεό υπόλειμμα πυρόλυσης με την τοποθέτηση των υπολειμμάτων πυρόλυσης σε κλίβανο στους 450 °C έως

όπου ο άνθρακας καεί πλήρως. Η ίνα (Εικόνα 32) στη συνέχεια βουρτσίστηκε απαλά πάνω από ένα δοκιμαστικό κόσκινο για τον διαχωρισμό τους από το πληρωτικό υλικό και την τέφρα. Το ανακτηθέν έλαιο αποτελούσε το 40 % κατά βάρος των προϊόντων και είχε ιδιότητες καυσίμου παρόμοιες με το μαζούτ. Τα αέρια αποτελούσαν το 6 % κατά βάρος των παράγωγων προϊόντων πυρόλυσης.



Εικόνα 31: Στερεά προϊόντα πυρόλυσης (Cunliffe & Williams, 2003).



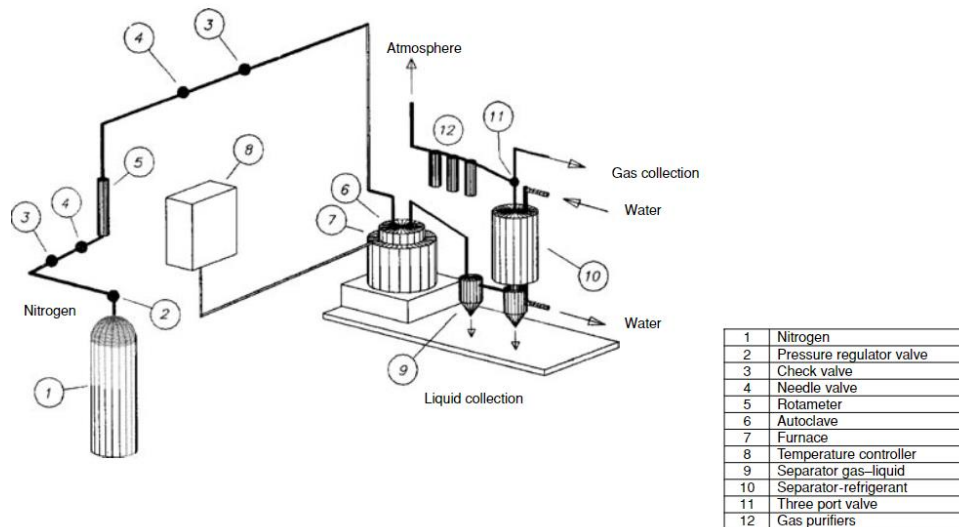
Εικόνα 32: Ανακτημένες ίνες μετά το διαχωρισμό (Cunliffe & Williams, 2003).

Σύμφωνα με το Πανεπιστήμιο του Leeds του Ηνωμένου Βασιλείου, οι ανακτημένες ίνες γυαλιού από την πυρόλυση απορριμμάτων GRP θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν έως και

20% κατά βάρος παρθένες ίνες γυαλιού σε DMC. Τα έλαια και τα αέρια που παράγονται από την πυρόλυση θα μπορούσαν καταρχάς να ανακτηθούν για χρήση ως καύσιμο και χημική πρώτη ύλη (Job, 2013).

Η δανική εταιρεία ReFiber ήταν γνωστή για αυτή τη μέθοδο. Η διαδικασία που ακολούθησε ήταν η εξής: έκοψε το πτερύγιο σε μεγάλα κομμάτια (μεγέθους κοντέινερ) και στη συνέχεια τα τεμάχισε σε μικρά κομμάτια. Έπειτα τροφοδοτούνταν συνεχώς σε περιστρεφόμενο φούρνο με θερμοκρασία 500 ° C απουσία οξυγόνου. Το αέριο ρητίνης που παράγεται χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή τη θέρμανση των φούρνων, ενώ σε ένα δεύτερο περιστρεφόμενο φούρνο, οι ίνες γυαλιού «καθαρίζονται» παρουσία ατμοσφαιρικού αέρα. Τα πιθανά μέταλλα αφαιρούνται για ανακύκλωση με τη χρήση μαγνητών και η σκόνη αφαιρείται για τον καθαρισμό των γυάλινων ινών (Jonas Pagh Jensen, 2019). Έπειτα, οι ανακτημένες ίνες συνδέονταν με πολυπροπυλένιο σε πλάκες μόνωσης, αλλά αυτό δεν προωθήθηκε στην αγορά. Ο φούρνος πυρόλυσης της ReFiber χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για την ανακύκλωση ινών άνθρακα για τη γαλλική εταιρεία ανακύκλωσης κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων Apply Carbon (Job, 2013).

Ακόμα, δοκιμές πυρόλυσης πραγματοποιήθηκαν σε ατμόσφαιρα αζώτου, σε θερμοκρασίες 300, 400, 500, 600 και 700°C, με τη χρήση ενός αυτόκαυστου από ανοξείδωτο χάλυβα 3,5 dm<sup>3</sup>, χωρίς ανάδευση. Καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας οι ατμοί που εξέρχονται από τον αντιδραστήρα ρέουν σε μια σειρά ψυχόμενων διαχωριστών αερίου-υγρού (συσκευές που χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό ενός μίγματος αερίου-υγρού στις φάσεις των συστατικών του (Stewart & Arnold, 2008)), όπου τα υγρά συμπυκνώνονται και συλλέγονται. Τα μη συμπυκνωμένα προϊόντα είτε εκτονώνονται στην ατμόσφαιρα αφού εκπλυθούν είτε συλλέγονται στο σύνολό τους σε σακούλες Tedlar (σακούλες δειγματοληψίας αερίων (Ajhar et al., 2010)), για να ελεγχθούν με αέρια χρωματογραφία. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα του αυτόκαυστου που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα πυρόλυσης (Torres et al., 2009).



Σχήμα 4: Σχηματικό διάγραμμα του αντιδραστήρα που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα πυρόλυσης (Torres et al., 2009).

Με βάση τα ευρήματα του Torres και των συνεργατών του: Ελήφθησαν στερεά κατάλοιπα 75 % κατά βάρος, που αποτελούνται από 65 % κατά βάρος πούδρα (κυρίως ανθρακικό ασβέστιο) και 35 % κατά βάρος υαλοβάμβακα. Ακόμα η βέλτιστη θερμοκρασία για αυτή τη διαδικασία πυρόλυσης βρέθηκε στους 500 °C. Επίσης το πυρολυμένο SMC μπορεί να ανακυκλωθεί σε χαμηλές αναλογίες (6% κατά βάρος) σε BMC, προσδίδοντας στο τελευταίο καλύτερες ιδιότητες από μια ισοδύναμη ποσότητα παρθένου πληρωτικού υλικού και παρόμοιες ιδιότητες με μια ισοδύναμη αναλογία παρθένων ινών (γυαλιού) και πληρωτικού υλικού. Ποσότητες πυρολυμένου SMC μεγαλύτερες από 6% κατά βάρος, δίνουν χειρότερες μηχανικές ιδιότητες από μια ισοδύναμη ποσότητα απλού παρθένου πληρωτικού υλικού. Όμως, αυτό δεν οφείλεται μόνο στο γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν ανακυκλωμένες πυρολυμένες ίνες, αλλά και στο γεγονός ότι οι ίνες αυτές είναι ασυνήθιστα μακριές για BMC, με αποτέλεσμα να είναι πιο δύσκολο να διασκορπιστούν και να υγρανθούν σε σχέση με τις κοντές ίνες. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται μεγαλύτεροι χρόνοι ανάμιξης, οδηγώντας σε υποβάθμιση των ινών (Torres et al., 2009).

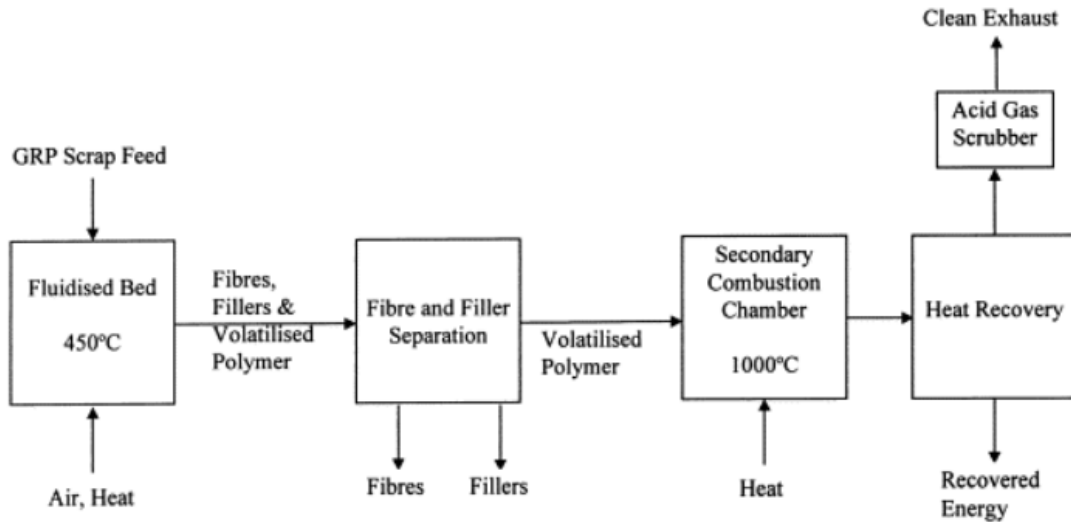
Η ανακύκλωση των CFRP είναι πιο οικονομικά εφικτή λόγω της υψηλής τιμής των ινών άνθρακα (Kalkanis et al., 2019). Αυτή η μέθοδος έχει αναπτυχθεί περισσότερο και έχει φτάσει σε εμπορική εκμετάλλευση σε βιομηχανική κλίμακα. Οι ίνες άνθρακα είναι λιγότερο ευαίσθητες στη θερμοκρασία, αλλά μπορούν να μολυνθούν από μια ουσία που μοιάζει με άνθρακα που παραμένει από την αποικοδόμηση της ρητίνης. Στους 1300 °C, αυτή η ουσία αφαιρείται εντελώς και οι ίνες είναι απόλυτα καθαρές, αλλά η αντοχή τους μειώνεται σημαντικά (Oliveux et al., 2015).

## 7.3 Μέθοδοι σε ερευνητικό στάδιο

### 7.3.1 Αεριοποίηση / ρευστοποιημένη κλίνη

Η διεργασία ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνει τη θερμική αποσύνθεση της πολυμερικής μήτρας, ακολουθούμενη από απελευθέρωση και συλλογή διακριτών ινών γυαλιού και σωματιδίων πληρωτικού υλικού. Απαιτείται οξυγόνο για την ελαχιστοποίηση του σχηματισμού άνθρακα. Ενδεχομένως, η ρευστοποιημένη κλίνη είναι μια βολική μέθοδος για την ταχεία θέρμανση του υλικού τροφοδοσίας σε ρεύμα αέρα και παρέχει την απαραίτητη τριβή για την απελευθέρωση των μονοϊνών από τη φάση ενίσχυσης. Ο αέρας ρευστοποίησης είναι επαρκής για να εκτονωθούν οι απελευθερωμένες ίνες και τα πληρωτικά υλικά, αλλά διατηρεί το μη αποικοδομημένο υλικό. Οι οργανικές προσμίξεις, όπως τα ορυκτέλαια και τα χρώματα επένδυσης, εξατμίζονται μαζί με την πολυμερική μήτρα, ενώ τα ανόργανα στερεά, όπως τα μεταλλικά ένθετα, βυθίζονται στη ρευστοποιημένη κλίνη και μπορούν να απομακρυνθούν σε μια διαδικασία επαναδιαμόρφωσης της κλίνης. Ο διαχωρισμός των ινών υψηλής αξίας από τα σχετικά χαμηλής αξίας πληρωτικά υλικά μπορεί να γίνει εύκολα, ενώ το καθένα από αυτά υπάρχει ως διακριτά αιωρούμενα σωματίδια.

Χρησιμοποιήθηκε ένας διαχωριστής για την απομάκρυνση των μακριών ινών από το ρεύμα αερίου ρευστοποίησης και επιτρέπει τη διέλευση των πληρωτικών και των κοντών ινών. Οι κοντές ίνες απομακρύνονταν στη συνέχεια μέσω ενός κυκλώνα. Καθώς η ρευστοποιημένη κλίνη λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία (συνήθως 450°C), δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρης καύση των οργανικών συστατικών της τροφοδοσίας. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε ένας δευτερεύων θάλαμος καύσης που λειτουργεί σε θερμοκρασία της τάξης των 1000°C. Αυτό θα παρήγαγε ένα καθαρό καυσαέριο, με την επιφύλαξη της απομάκρυνσης των όξινων αερίων που προκύπτουν από την επεξεργασία των αλογονωμένων ρητινών στην τροφοδοσία των απορριμμάτων, και θα επέτρεπε την ανάκτηση ενέργειας. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η διαδικασία. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας της κλίνης (η οποία είναι απαραίτητη για την πλήρη καύση της πολυμερικής φάσης), η σύνθετη τροφοδοσία πρέπει να τεμαχιστεί σε θραύσματα 10 mm ή μικρότερα. Τα μεγαλύτερα τεμάχια απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους παραμονής, οι οποίοι εμποδίζουν την απόδοση και είναι πιθανό να αυξήσουν την υποβάθμιση της αντοχής του προϊόντος ινών (Pickering et al., 2000).



Σχήμα 5: Διεργασία ρευστοποιημένης κλίνης (Pickering et al., 2000).

Καθιερώθηκαν σταθερές συνθήκες επεξεργασίας που επέτρεψαν την ικανοποιητική ανάκτηση ινών, πληρωτικών υλικών και ενέργειας από σύνθετα υλικά μεταβιομηχανικών απορριμμάτων διαφόρων τύπων με ελάχιστα υπολείμματα προς διάθεση. Η αποτελεσματικότητα της συλλογής ινών ποικίλλει ανάλογα με το υλικό τροφοδοσίας, αλλά με μικρή προσπάθεια επιτυγχάνεται απόδοση περίπου 50% σε μέσο μήκος ινών 5 mm. Είναι πιθανόν ότι η τιμή αυτή θα μπορούσε να βελτιωθεί σημαντικά για μη γεμισμένες τροφοδοσίες ή με τροποποίηση του σταδίου κοπής. Χαρακτηρίστηκαν οι ιδιότητες των ινών και καταγράφηκε μείωση της αντοχής κατά 50% σε τυπικές θερμοκρασίες διεργασίας. Ωστόσο, το μέτρο ελαστικότητας των ινών δεν επηρεάστηκε σχετικά. Η υποκατάσταση έως και 50% της περιεκτικότητας σε παρθένες ίνες σε DMC φαίνεται ότι είναι εφικτή με μικρή απώλεια επιδόσεων. Οι ανακτημένες ίνες μπορούν να μετατραπούν με επιτυχία σε πέπλο χρησιμοποιώντας τις συνήθεις διαδικασίες, αλλά η αντικατάσταση των παρθένων ινών με ανακτημένες ίνες οδηγεί σε μείωση της αντοχής (Pickering et al., 2000).

Στο Πανεπιστήμιο του Νότινγχαμ ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη μιας διαδικασίας ρευστοποιημένης κλίνης για την ανάκτηση ενισχυμένου υάλου και ανθρακονήματος υψηλής ποιότητας από θραύσματα γυαλιού και σύνθετα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Οι μετρήσεις μηχανικής ιδιότητας δείχνουν ότι οι ίνες γυαλιού υποφέρουν συνήθως σε μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό κατά 50%, αλλά διατηρούν την ίδια ακαμψία με την παρθένα ίνα, όταν υποβάλλονται σε επεξεργασία στους 450 °C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα μείωση 90% της αντοχής στους 650 °C (Pickering, 2006).

Στο έργο GENVIND, που πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Νότινγχαμ τα σύνθετα κλάσματα θερμάνθηκαν στους 450-550 ° C σε ένα στρώμα πυριτικής άμμου, το οποίο

ρευστοποιείται όταν θερμαίνεται από μια ροή ζεστού οξυγόνου. Το στρώμα μπορεί να οξειδωθεί και έτσι να αποσυντεθεί η πολυμερική μήτρα. Στη συνέχεια, οι ίνες και άλλο υλικό πλήρωσης εισάγονται στη ροή του αέρα, και στο τέλος της διαδικασίας οι αναγεννημένες ίνες μπορούν να διαχωριστούν χρησιμοποιώντας έναν κυκλώνα (J. P. Jensen & Skelton, 2018).

Σύμφωνα με την έρευνα του Καλκάνη και της ομάδας του, το υλικό EOL διασπάται σε σφαιρίδια μικρού μεγέθους (20-30 mm) και έπειτα εισέρχεται στην κλίνη ρευστού αντιδραστήρα που φτάνει σε θερμοκρασίες έως 550 °C ανάλογα με το ανακυκλωμένο σύνθετο. Οι ιδιότητες των ανακυκλωμένων ινών, όπως η φυσική μορφή, το μήκος των ινών, οι μηχανικές ιδιότητες δείχνουν σημαντική υποβάθμιση. Μια βιώσιμη μονάδα ανακύκλωσης πρέπει να διαθέτει ικανότητα επεξεργασίας άνω των 10.000 τόνων / έτος κατά την εξέταση των ινών γυαλιού. Αυτό το όριο φυσικά μειώνεται όταν εξετάζουμε την ανακύκλωση ινών άνθρακα λόγω της διαφοράς στην αξία του προϊόντος (Kalkanis et al., 2019).

Το ενδιαφέρον αυτής της διαδικασίας είναι ότι μπορεί να επεξεργαστεί μικτά και μολυσμένα υλικά (πχ βαμμένες επιφάνειες). Η διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης δεν επιτρέπει την ανάκτηση προϊόντων από τη ρητίνη εκτός από αέρια, ενώ η πυρόλυση μπορεί να επιτρέψει την ανάκτηση ελαίου που περιέχει πιθανά πολύτιμα προϊόντα (Oliveux et al., 2015).

Με τη μέθοδο ρευστοποιημένης κλίνης, μπορούν να ανακτηθούν καθαρές ίνες, αλλά είναι δύσκολο να ληφθούν συνεχείς ίνες και οι μηχανικές ιδιότητες των ανακτημένων ινών είναι σχετικά χαμηλές (Chen et al., 2019). Οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν χαμηλότερη υποβάθμιση της αντοχής κατά περίπου 25% όταν υποβάλλονται σε επεξεργασία στους 550 °C (Chen et al., 2019; Oliveux et al., 2015).

Δυσνητικά, η ρευστοποιημένη κλίνη είναι μια βολική μέθοδος γρήγορης θέρμανσης του υλικού τροφοδοσίας σε ρεύμα αέρα και παρέχει την τριβή που είναι απαραίτητη για την απελευθέρωση μόνο νημάτων από τη φάση ενίσχυσης (J. P. Jensen & Skelton, 2018). Η εγγενής αξία των ινών οφείλεται στο υψηλό κόστος τους ως παρθένο υλικό, αλλά τα υπερβολικά επίπεδα εργασίας που σχετίζονται με την ανάκαμψη και το ενδεχομένως υψηλό επίπεδο ενέργειας που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό αποδυναμώνουν την επιχειρηματική υπόθεση για δραστηριότητες ανακύκλωσης χρησιμοποιώντας διαδικασία καύσης χαμηλής θερμοκρασίας ρευστοποιημένης κλίνης (Naqvi et al., 2018).

### 7.3.2 Πυρόλυση μικροκυμάτων

Η θέρμανση με μικροκύματα είναι εντελώς διαφορετική από τη συμβατική, μέσω της μεταφοράς θερμότητας. Αυτός ο τύπος θέρμανσης ονομάζεται επίσης διηλεκτρικός, με δύο διαφορετικούς μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός μετατροπής της ηλεκτρομαγνητικής

ενέργειας σε θερμότητα είναι η περιστροφή διπόλων, κατά την οποία τα πολικά μόρια αλληλεπιδρούν με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο των μικροκυμάτων και περιστρέφονται προσπαθώντας να ευθυγραμμιστούν προς αυτό. Μετά την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου, η ενέργεια που απορροφάται από το μόριο απελευθερώνεται ως θερμότητα. Ο άλλος μηχανισμός θέρμανσης με μικροκύματα ονομάζεται ιοντική αγωγιμότητα. Ο μηχανισμός αγωγής των ιόντων είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο μηχανισμό. Χρησιμοποιείται όταν το διάλυμα που θερμαίνεται περιέχει ιόντα. Τα ιόντα θα μετακινηθούν λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκρούσεων μεταξύ των μορίων και η κινητική ενέργεια των ιόντων θα μετατραπεί σε θερμότητα (Aoudia et al., 2017; De Moraes et al., 2019).

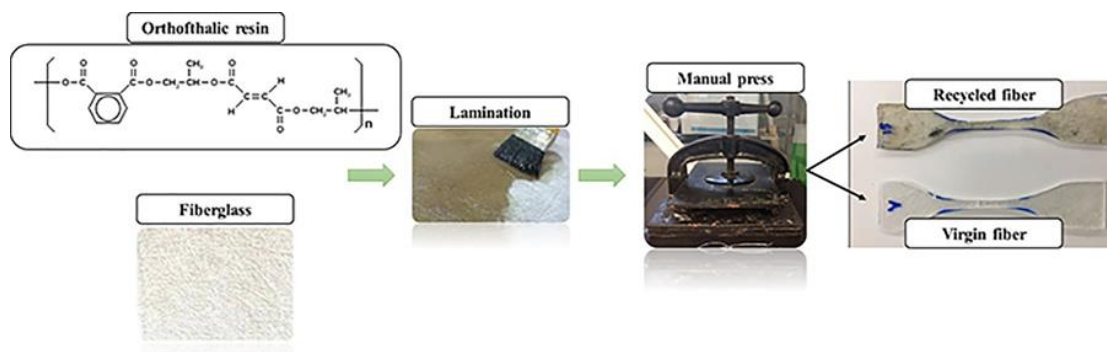
Η θέρμανση με ακτινοβολία μικροκυμάτων έχει το πλεονέκτημα ότι το μεγαλύτερο μέρος του υλικού θερμαίνεται παντού. Το γυαλί τύπου S είναι διαφανές στα μικροκύματα. Με τη χρήση μικροκυμάτων, τα υλικά δεν θερμαίνονται με μεταφορά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχετικά μέτριες θερμοκρασίες, κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα καθώς οι ίνες γυαλιού δεν θα υποβαθμιστούν θερμικά (Åkesson et al., 2012; Chen et al., 2019).

Ο Åkesson και οι συνεργάτες του πραγματοποίησαν μια διαδικασία πυρόλυσης σε θερμοκρασίες 300°C-600°C, σε περιβάλλον αζώτου. Αρχικά το πτερύγιο κόπηκε σε μικρού μεγέθους κομμάτια (7-30 mm). Ο αντιδραστήρας, που χρησιμοποιήθηκε, είχε χωρητικότητα 10 λίτρων και ήταν διαφανής στα μικροκύματα. Στον αντιδραστήρα τοποθετήθηκαν 3 κιλά σύνθετου υλικού και η διαδικασία διήρκεσε 90 λεπτά. Στο τέλος της διαδικασίας, το 70% της αρχικής μάζας των ινών ανακτήθηκε. Οι ίνες που πυρολύθηκαν στους 300°C ήταν σχεδόν ανεπηρέαστες μετά από 90 λεπτά επεξεργασίας και είναι σαφές ότι η θερμοκρασία αυτή ήταν πολύ χαμηλή. Μετά την πυρόλυση στους 360°C η αντοχή μειώθηκε κατά 25% περίπου σε σύγκριση με τις παρθένες ίνες. Η αύξηση της θερμοκρασίας στους 440°C δεν επέφερε σημαντική διαφορά. Οι ίνες που ανακτήθηκαν από την πυρόλυση στους 600°C δεν αναλύθηκαν καθώς ήταν πολύ εύθραυστες και ως επί το πλείστον ήταν καταστραμμένες. Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν σύνθετα υλικά που αποτελούνται τόσο από παρθένες ίνες όσο και από ανακυκλωμένες ίνες. Οι μηχανικές δοκιμές σε αυτά τα σύνθετα έδειξαν ότι είναι δυνατόν να παραχθούν σύνθετα υλικά 25% κ.β. χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένες ίνες και ότι αυτά τα σύνθετα έχουν σχετικά καλές μηχανικές ιδιότητες (Åkesson et al., 2012).

Στο Ινστιτούτο Maua of Technology κατασκευάστηκε ένα σύνθετο πάνελ από υαλοβάμβακα (1,0 m × 1,5 m) όπου περιείχε 65% ορθοφθαλική ρητίνη (τύπος ακόρεστων πολυεστερικών ρητινών που χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή σύνθετων εξαρτημάτων) και 35% υαλοβάμβακα, χρησιμοποιώντας καταλύτη MEKP (υπεροξείδιο της

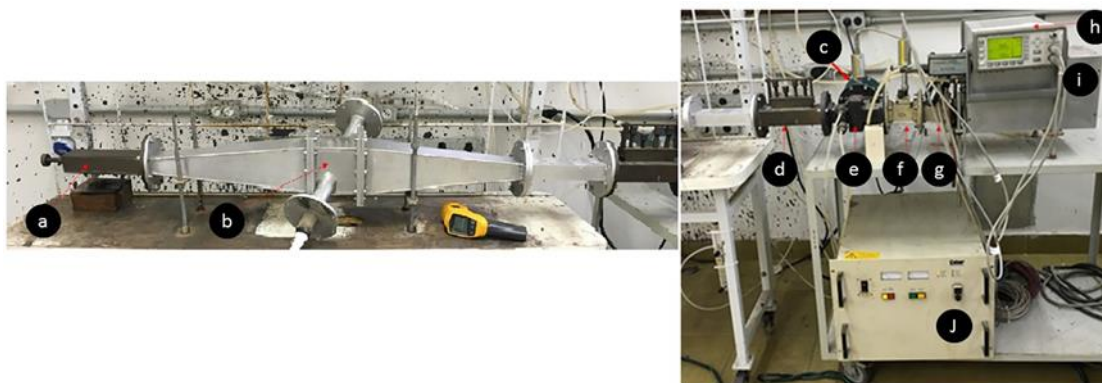


μεθυλαιθυλοκετόνης. Είναι ένας διαυγής σκληρυντής/καταλύτης για τη σκλήρυνση σε θερμοκρασία δωματίου ακόρεστων πολυεστερικών και βινυλεστερικών ρητινών (*Methyl-Ethyl-Ketone-Peroxide - an Overview | ScienceDirect Topics, n.d.*). Κατασκευάστηκαν σύνθετα πάνελ τόσο με τη χρήση παρθένων ινών όσο και με τη χρήση θερμικά ανακυκλωμένων ινών με τη βοήθεια μια χειροκίνητης πρέσας (Σχήμα 6).



Σχήμα 6: Κατασκευή σύνθετων υλικών από ορθοφθαλική ρητίνη με ανακυκλωμένο και παρθένο υαλοβάμβακα (De Moraes et al., 2019).

Η ανάκτηση των ινών έγινε μέσω ενός συστήματος μικροκυμάτων 2,5 GHz. Το σύστημα αυτό (Σχήμα 7) περιείχε μια πηγή υψηλής τάσης (j) η οποία τροφοδοτούσε τη γεννήτρια μικροκυμάτων (i), συνδεδεμένη με έναν κυματοδηγό (g) και κατευθυντικό ζεύκτη (ηλεκτρονικό εξάρτημα επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που αφορούν μετρήσεις, παρακολούθηση ισχύος κ.λπ. (Agrawal, 2020)) (f) για τη μέτρηση της ακτινοβολούμενης ισχύος. Η ισχύς αυτή μετράται με μετρητή ισχύος (h). Για την προστασία του μαγνητρονίου (συσκευή που χρησιμοποιεί την αλληλεπίδραση ενός ρεύματος ηλεκτρονίων, καθοδηγούμενου από ένα μαγνητικό πεδίο, με κοιλότητες μέσα σε ένα μπλοκ χαλκού για την παραγωγή μικροκυματικής ακτινοβολίας (*What Is a Magnetron? (With Pictures), n.d.*)) από την ανακλώμενη ισχύ χρησιμοποιείται κυκλοφορητής (e). Αυτή η ανακλώμενη ισχύς μετράται από έναν άλλο κατευθυντικό ζεύκτη και απορροφάται από το νερό μέσω του διαχυτικού φορτίου (c). Η κύρια λειτουργία του προσαρμογέα σύνθετης αντίστασης (d) είναι να μειώνει την πραγματική ισχύ που αποστέλλεται στην κυλινδρική κοιλότητα (b), η οποία έχει ένα κινητό και ένα κοντό άκρο (a) (De Moraes et al., 2019).



Σχήμα 7: Σύστημα μικροκυμάτων στο Instituto Mauá de Tecnologia (De Moraes et al., 2019).

Στην έρευνα που διεξήγαγαν, ο υαλοβάμβακας δεν παρουσίασε επαρκή μηχανική αντοχή για να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή νέων συνθέτων υλικών υψηλής ποιότητας. Έτσι χρειάζεται να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες για τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των συνθηκών επεξεργασίας, ώστε να προκύψει ίνα ποιότητας συγκρίσιμης με την παρθένα ίνα. Ωστόσο, επειδή η ανακυκλωμένη ίνα διαχωρίζεται πλήρως από την οργανική μήτρα και η ίνα ανακτήθηκε με χαμηλό κόστος, μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί για μεγάλο αριθμό εφαρμογών όπου άλλες ιδιότητες του γυαλιού είναι πολύ επιθυμητές. Το χαμηλό κόστος οφείλεται στο γεγονός ότι η εφαρμογή μικροκυμάτων παρήγαγε θέρμανση μόνο στην περιοχή του θαλάμου πυρόλυσης και όχι απευθείας θέρμανση της δομής του αντιδραστήρα, γεγονός που παρέχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Ακόμα, οι καπνοί που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως δευτερογενές καύσιμο, εφόσον βέβαια ελεγχθεί μελλοντικά η θερμογόνο δύναμη τους (De Moraes et al., 2019).

Η πυρόλυση μικροκυμάτων είναι μια εύκολα ελεγχόμενη, ευέλικτη και αποτελεσματική τεχνική για την ανάκτηση της ίνας άνθρακα από σύνθετα υλικά CFRP και η ανακυκλωμένη ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως ενίσχυση σε νέα πολυμερή. Ο Jiang και οι συνεργάτες του ενίσχυσαν το πολυπροπυλένιο (PP), το οποίο αποτελεί μη πολικό πολυμερές, και το νάιλον (πολικό πολυμερές) χρησιμοποιώντας τις ανακυκλωμένες ίνες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανακυκλωμένη ίνα είχε καλύτερες επιδόσεις στο πολυπροπυλένιο, ενώ η παρθένα ίνα στο νάιλον. Αυτό θεωρήθηκε ότι οφείλεται στη διαφορετική τραχύτητα της επιφάνειας της ίνας και στα διαφορετικά χαρακτηριστικά επιφανειακής σύνδεσης των δύο ινών. Ως μια πρόσφατα αναπτυγμένη τεχνολογία, η πυρόλυση μικροκυμάτων έχει τα πλεονεκτήματα της καθαρής και περιβαλλοντικής προστασίας και είναι μια εύκολη στον έλεγχο, αποτελεσματική τεχνολογία για την ανάκτηση του CF από το CFRP (Chen et al., 2019; Jiang et al., 2015).

### 7.3.3 Θερμική επεξεργασία και στη συνέχεια ενίσχυση

Η απώλεια της αντοχής των ινών γυαλιού κατά τη θερμική ανακύκλωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία ανακύκλωσης και κυμαίνεται από 50 έως 90% της αρχικής αντοχής των ινών, καθιστώντας τις ακατάλληλες για την επαναχρησιμοποίησή τους σε νέα σύνθετα. Η ζημιά στην επιφάνεια των ινών γυαλιού, όπως η δημιουργία ελαττωμάτων και η ανάπτυξη τους, κατά τη διάρκεια της θερμικής ανακύκλωσης οδηγούν στην υποβάθμιση της αντοχής τους. Η αφαίρεση αυτού του κατεστραμμένου στρώματος με υδροφθορικό οξύ μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αντοχή εφελκυσμού των θερμικά ανακυκλωμένων ινών γυαλιού (Pender & Yang, 2020).

Η ReCoVeR ακόμα ερευνά τη δυνατότητα αναγέννησης της αντοχής των ανακυκλωμένων γυάλινων ινών για την επαναχρησιμοποίησή τους σε νέα σύνθετα αντί των παρθένων ινών. Σύμφωνα με τις δοκιμές που έκανε περισσότερο από το 50% της απώλειας αντοχής των ινών μπορεί να ανακτηθεί με μια σύντομη επεξεργασία τους χρησιμοποιώντας θερμό αλκαλικό διάλυμα. Ακόμα, τα σύνθετα που δημιουργήθηκαν με τις αναγεννημένες ίνες παρουσίασαν 70-90 % καλύτερες ιδιότητες σε σύγκριση με σύνθετα υλικά βασισμένα σε θερμικά ανακυκλωμένες ίνες που δεν είχαν λάβει περαιτέρω επεξεργασία (Thomason et al., 2020). Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι το 75% της αντοχής των θερμικά ανακυκλωμένων ινών γυαλιού θα μπορούσε να ανακτηθεί με επεξεργασία με θερμό διάλυμα NaOH (υδροξείδιο του νατρίου) (Pender & Yang, 2020; Thomason et al., 2016).

Για να υιοθετήσει η βιομηχανία αυτή την τεχνολογία, είναι σημαντικό να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ της προστιθέμενης αξίας μέσω επεξεργασίας για την αναγέννηση των μηχανικών ιδιοτήτων και του πρόσθετου κόστους επεξεργασίας που αυτή συνεπάγεται (Pender & Yang, 2020).

### 7.3.4 Χημική επεξεργασία

Η χημική ανακύκλωση περιλαμβάνει τη διαδικασία χημικού αποπολυμερισμού ή αφαίρεσης της μήτρας με τη χρήση χημικών αντιδραστηρίων διαλυτοποίησης για την ανάκτηση ινών. Η χημική διαδικασία ανακύκλωσης μπορεί να ανακτήσει τόσο ίνες όσο και μήτρες. Η διαδικασία εφαρμόζεται σε διάφορα είδη ινών. Οι ανακτημένες ίνες σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζουν μικρή απώλεια μηχανικής ιδιότητας. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ενώσεις μήτρας (Kalkanis et al., 2019).

#### **Solvolysis (Σολβόλυση)**

Η σολβόλυση είναι μία χημική διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται διαλύτες για τη διάσπαση των δεσμών της μήτρας κάτω από συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση. Αυτή

η μέθοδος έχει πολλές δυνατότητες λόγω του ευρέος φάσματος διαλυτών (νερό, αλκοόλες, οξέα), θερμοκρασιών και πιέσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Απαιτεί συνήθως αυξημένες θερμοκρασίες και πιέσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να επιφέρουν σημαντικές δαπάνες ενέργειας σε βιομηχανική κλίμακα. Επιπλέον, αυτές οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τις μηχανικές ιδιότητες των ανακτημένων ινών (Chen et al., 2019; Cunliffe & Williams, 2003). Προς το παρόν, μόνο οι ίνες άνθρακα μπορούν να ανακυκλωθούν μέσω αυτής της διαδικασίας. Σε σχέση με τη μηχανική επεξεργασία, η ποιότητα των ινών είναι υψηλότερη, καθώς οι ίνες είναι πιο καθαρές και μακριές. Βέβαια, παρόλο που οι ίνες θεωρούνται μακριές σε σχέση με τη μηχανική επεξεργασία δεν παύουν να είναι σχετικά κοντές για την επαναχρησιμοποίησή τους σε κάποιες εφαρμογές.

#### **Σολβόλυση κάτω από κρίσιμες θερμοκρασίες και πιέσεις**

Για τη σολβόλυση υπό αυτές τις συνθήκες (που σημαίνει  $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$  και / ή  $<1\text{ bar}$ ) χρησιμοποιούνται αντιδραστικοί διαλύτες όπως νιτρικό οξύ, αμμωνία ή γλυκόλη, για χημική αποσύνθεση της πολυμερικής μήτρας. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας χημικής αποσύνθεσης είναι οι καθαρές ίνες χωρίς ρητίνη, ένα ανόργανο υπόλοιπο και το οργανικό υλικό αποσύνθεσης, το οποίο εξαρτάται από τον διαλύτη (π.χ. δεσμοί που δημιουργούνται από αντιδράσεις με μονομερή της ρητίνης) (J. P. Jensen & Skelton, 2018).

#### **Solvolysis σε περίπου ή εξαιρετικά κρίσιμες θερμοκρασίες και πιέσεις**

Όταν η θερμοκρασία και η πίεση φτάσουν σε κρίσιμο σημείο, οι ιδιότητες των διαλυτών αλλάζουν, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένες ιδιότητες διαλύσεως και επομένως καλύτερη αποσύνθεση του GFRP. Σε θερμοκρασία και πίεση ακριβώς πάνω από το κρίσιμο σημείο, το ρευστό παρουσιάζει μια υπερκρίσιμη κατάσταση, έχοντας συνδυασμένα χαρακτηριστικά: πυκνότητα, διαλυτότητα και διάχυση σαν υγρό, και ιξώδες σαν αέριο. Σε κοντινές και εξαιρετικά κρίσιμες συνθήκες το νερό ή η αιθανόλη είναι ο πιο κοινός διαλύτης. Η κρίσιμη θερμοκρασία και η πίεση εξαρτάται από το διαλύτη (J. P. Jensen & Skelton, 2018). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό λόγω της υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας τους να προκαλεί επιζήμιες χημικές αντιδράσεις με τις ίνες γυαλιού, μειώνοντας την αντοχή τους. Οι ανακτώμενες ίνες γυαλιού παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες με τη χρήση οργανικών διαλυτών (π.χ. αλκοόλες και ακετόνη), αφού έχουν χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση από το νερό και η διάχυση του διαλύτη στο σύνθετο υλικό είναι αυξημένη λόγω της αλλαγής της υδροφοβικότητας των υπο/υπερκρίσιμων μέσων (Karuprappan Gopalraj & Kärki, 2020; Piñero-Hernanz et al., 2008; Sokoli et al., 2017; Yang et al., 2014). Παρόλα αυτά η υπερκρίσιμη κατάσταση απαιτεί πιο αυστηρές απαιτήσεις και τα περισσότερα υπερκρίσιμα ρευστά απαιτούν υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση, υψηλές

απαιτήσεις για εξοπλισμό αντίδρασης, υψηλό κόστος και χαμηλό συντελεστή ασφαλείας. Επιπλέον, βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο (Cunliffe & Williams, 2003).

Ο Oliveux και η ομάδα του χρησιμοποίησαν τη διαδικασία της υδρόλυσης για την ανακύκλωση σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού. Στις δοκιμές που έκαναν παρατηρήθηκε ότι η πιο βασική παράμετρος στη μείωση της αντοχής των ινών ήταν η θερμοκρασία και όχι ο χρόνος που υποβάλλονταν σε αυτή τη διαδικασία. Αυτό γίνεται αντιληπτό αν σκεφτεί κανείς ότι μια επεξεργασία για δύο ώρες στους 275°C οδήγησε σε μείωση 35% της αντοχής, ενώ σε μόλις πέντε λεπτά σε θερμοκρασία 350°C παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής κατά 65%. Επίσης, οι ίνες που ανακτήθηκαν διαχωρίστηκαν πλήρως από τη ρητίνη, αλλά ήταν μολυσμένες από μια υπολειμματική οργανική ουσία. Για να αποφευχθεί αυτό δοκιμάστηκε μια δεύτερη υδρόλυση για να γίνει έκπλυση των ινών, αλλά δεν ήταν αποτελεσματική. Επιπλέον, κατά τη διαδικασία αυτή χρειάζεται να γίνεται ψύξη τους συστήματος πράγμα που ανεβάζει παραπάνω το κόστος (Oliveux et al., 2012).

Ο Sokoli και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν τη διαδικασία της χημικής ανακύκλωσης και δοκίμασαν την ανακύκλωση του διαλύτη (ακετόνη) που χρησιμοποίησαν, για να μπορέσουν να μειώσουν το κόστος της διαδικασίας. Διαπιστώθηκε ότι ήταν δυνατή η χρήση τους ίδιου διαλύτη για οκτώ συνεχόμενες φορές (διαφορετικές παρτίδες σύνθετου υλικού προς ανακύκλωση) και ακόμα παρατηρήθηκε ότι κάθε φορά που ο διαλύτης επαναχρησιμοποιούταν η ρητίνη παρουσίαζε και καλύτερη αποδόμηση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί η κατανάλωση του διαλύτη κατά 88% με αποτέλεσμα η χημική ανακύκλωση να γίνει πιο οικονομική και πράσινη (Sokoli et al., 2017).

Τα έντονα διασυνδεδεμένα δίκτυα μήτρας εμποδίζουν τη διάχυση των μορίων του διαλύτη και επομένως είναι πιο δύσκολο να αποικοδομηθούν με χημική ανακύκλωση. Για το λόγο αυτό ο Wang και η ομάδα του έκαναν μια προεπεξεργασία με διαλύτη (οξικό οξύ/υπεροξειδίο του υδρογόνου) για να μειωθεί ο χρόνος αντίδρασης μέσω της αυξημένης διάχυσης του διαλύτη στη σύνθετη δομή (Wang et al., 2015). Επίσης, ο χρόνος επεξεργασίας εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, δηλαδή ένα αλεσμένο δείγμα χρειάζεται λιγότερο χρόνο από ότι τα μεγαλύτερα κομμάτια (Y. Ma et al., 2017; Y. Ma & Nutt, 2018).

Αυτές οι τεχνικές ανακύκλωσης προορίζονται να επιτρέψουν την επαναχρησιμοποίηση ανακυκλωμένων ινών γυαλιού σε νέο σύνθετο πολυμερές. Ωστόσο, πρέπει να γίνεται έκπλυση στις ανακτώμενες ίνες γυαλιού με οργανικό διαλύτη (ακετόνη) και να αλλάζουν μέγεθος πριν χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικό σε δευτερογενή προϊόντα (Oliveux et al., 2012; Recycling & Composites, 2012). Παρόλα αυτά η μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό των ινών, οι υποβαθμισμένες επιφανειακές ιδιότητες (απώλεια του παράγοντα

σύζευξης σιλανίου) και το κόστος αυτών των ινών, τις καθιστά ακριβότερες από τις παρθένες ίνες (Justine Beauson & Brøndsted, 2016).

Ο Mattsson και οι συνεργάτες του προσπάθησαν να ανακυκλώσουν μικτά απόβλητα (θερμοσκληρυνόμενα, θερμοπλαστικά και άλλα υλικά όπως ξύλο balsa) από δύο κομμάτια πτερυγίων με τη μέθοδο της χημικής ανακύκλωσης. Οι αντιδράσεις πραγματοποιήθηκαν σε σφραγισμένα δοχεία υψηλής πίεσης με όγκο 7 mL, συνδεδεμένα με βαλβίδα ασφαλείας. Δείγματα (0,3-0,5 g) θερμαίνονταν με 5 mL υγρού σε σφραγισμένα δοχεία πίεσης (κλειστό δοχείο σχεδιασμένο να συγκρατεί αέρια ή υγρά σε πίεση σημαντικά υψηλότερη ή χαμηλότερη από την πίεση περιβάλλοντος) σε θερμοκρασίες μεταξύ 230-370 °C σε σωληνωτό κλίβανο (ηλεκτρική συσκευή θέρμανσης που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή συνθέσεων και καθαρισμών ανόργανων ενώσεων και περιστασιακά στην οργανική σύνθεση). Μετά την αντίδραση, τα δοχεία πίεσης ψύχονταν με νερό σε θερμοκρασία δωματίου και το διαλυτό μέρος απομακρυνόταν με νερό, ακετόνη ή αλκοόλη και το στερεό υλικό διαχωριζόταν από τα υγρά με διήθηση. Οι καλύτερες συνθήκες αντίδρασης επιτεύχθηκαν σε μια διαδικασία όταν το υλικό θερμάνθηκε σε θερμοκρασία 270°C σε αιθυλενογλυκόλη για 16 ώρες και στη συνέχεια στους 330 °C σε νερό με 1-προπανόλη (20%) και υδροξείδιο του καλίου (10%) για 3 ώρες και απέδωσαν 75% απομάκρυνση της ρητίνης. Το ανακύκλωμα από το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας αποδίδει ένα υλικό που μπορεί εύκολα να κοπεί σε μικρότερα τεμάχια. Αυτό θα μπορούσε να αποφέρει μείωση του χρόνου και του κόστους για τον τεμαχισμό ή την άλεση των GFRP. Η σολβόλυση των GFRP με υποκρίσιμο νερό παράγει ίνες γυαλιού και προϊόντα αποικοδόμησης της ρητίνης, όπως μονομερή, ολιγομερή και πολυμερή, τα οποία διαχωρίζονται στην λιπαρή ή την υδατική φάση ανάλογα με την πολικότητά τους (Σχήμα 8) (Mattsson et al., 2020).



Σχήμα 8: Προϊόντα από πτερύγια ανεμογεννητριών μέσω της σολβόλυσης με υποκρίσιμο νερό (Mattsson et al., 2020).

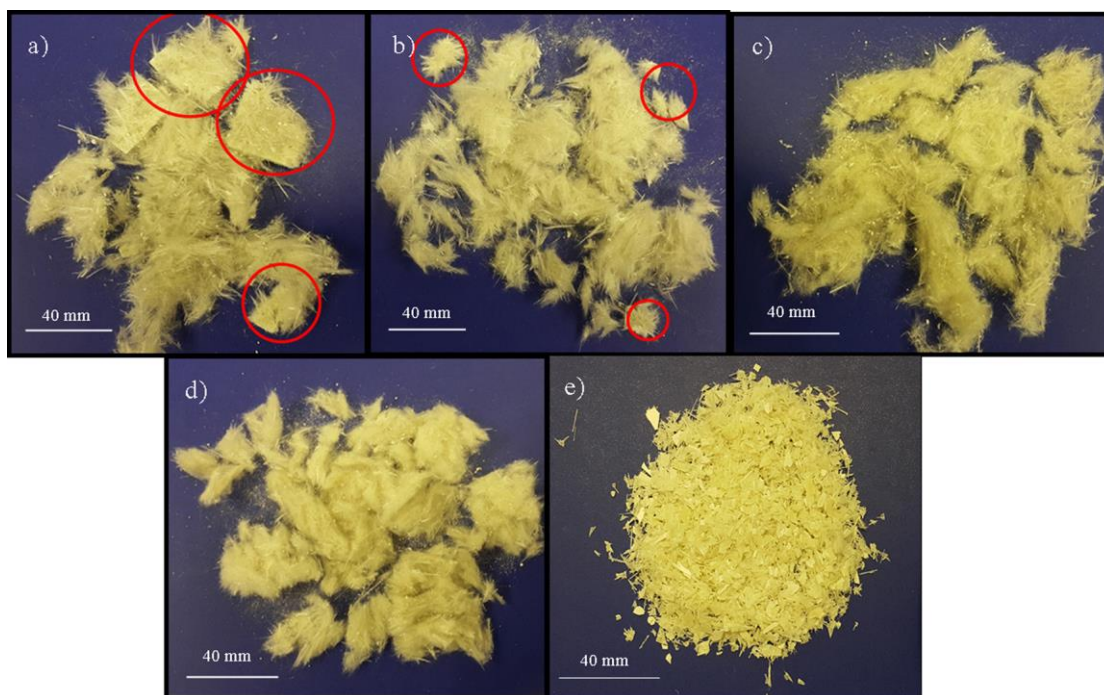
Η ανάλυση των παραγόμενων προϊόντων της λιπαρής φάσης από τα πτερύγια (GFRP και foam core) έδειξε την απομάκρυνση των σκληρυντών που περιέχουν άζωτο στο εποξειδικό υλικό και τη μείωση της περιεκτικότητας σε χλώριο από τον αφρό (pvc foam core). Η παραγωγή ελαίου από την χημική ανακύκλωση με χαμηλά επίπεδα αζώτου και χλωρίου του επιτρέπει να επαναχρησιμοποιηθεί σε σημαντικά τελικά προϊόντα, όπως ρητίνες, χημικά ή καύσιμα. Επομένως, η χημική ανακύκλωση μπορεί να λειτουργήσει ως μέθοδος

ανακύκλωσης για τον καθαρισμό μικτών αποβλήτων, όπως τα GFRP από πτερύγια ανεμογεννητριών.

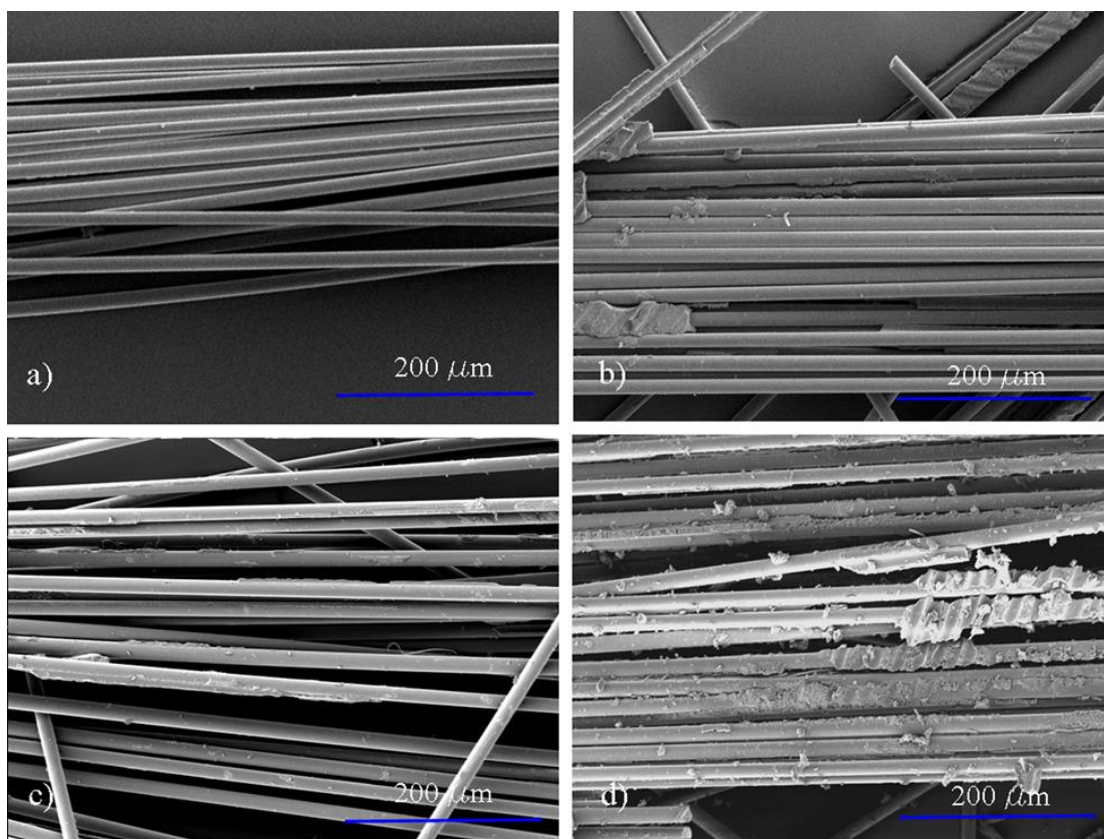
### 7.3.5 Κατακερματισμός υψηλής τάσης

Αυτή η μέθοδος εμφανίστηκε πρώτη για την εξόρυξη πετρωμάτων στις αρχές του 1960. Στόχος της ήταν να ανακτήσει κρυστάλλους και άλλα ορυκτά υψηλής αξίας μέσω της διάσπασης των πετρωμάτων όπως για παράδειγμα η εξόρυξη χρυσού. Σαν διαδικασία χρησιμοποιεί επαναλαμβανόμενους παλμικούς ηλεκτρικούς παλμούς υψηλής τάσης εντός ενός διηλεκτρικού υγρού. Ειδικά για την περίπτωση των σύνθετων υλικών, το σύνθετο υλικό συγκρατείται στο διάκενο μεταξύ δύο ηλεκτροδίων στο οποίο εφαρμόζεται υψηλή τάση (900-200kV) με περίοδο παλμού μικρότερη των 500ns. Έτσι δημιουργείται ένα έντονο κρουστικό κύμα με υψηλή θερμοκρασία (μεγαλύτερη των 104K) και πίεση (109-1010Pa) και προκαλεί μηχανική καταπόνηση η οποία ξεπερνά την εφελκυστική αντοχή του υλικού με αποτέλεσμα να το αποσυνθέτει (Mativenga et al., 2016).

Ο Mativenga και η ομάδα του χρησιμοποίησαν δείγματα GFRP διαστάσεων 40 mm × 25 mm με πάχος 9 mm και βάρος περίπου 20 g. Το δείγμα ήταν βυθισμένο σε νερό και βρισκόταν στο κέντρο του θαλάμου επεξεργασίας. Οι τελικές δοκιμές διεξήχθησαν με εφαρμοζόμενη τάση 160 kV, διάκενο ηλεκτροδίου 10 mm και συχνότητα παλμών 1 Hz. Ως βασική μεταβλητή για τον έλεγχο της συνολικής εισερχόμενης ενέργειας επιλέχθηκε ο αριθμός των παλμών (500, 1000, 1500, 2000). Υψηλότερος αριθμός παλμών οδήγησε σε καλύτερη διάσπαση του υλικού κάτι που είναι λογικό. Τα υλικά που ανακτήθηκαν με χαμηλό αριθμό παλμών (500 και 1000) δεν είχαν διασπαστεί πλήρως όπως φαίνεται στην εικόνα. Τα ανακυκλώσιμα από τη μηχανική ανακύκλωση ήταν κοντές ίνες με τη μορφή νιφάδων. Επίσης, το υλικό που ανακυκλώθηκε με τη HVF είχε ως επί το πλείστον λεία και καθαρή επιφάνεια με ελάχιστη εναπομένουσα ρητίνη (Εικόνες 33,34). Για το μηχανικά ανακυκλωμένο υλικό παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ποσότητα εναπομένουσας ρητίνης. Οι δοκιμές καύσης της ρητίνης έδειξαν τα ίδια αποτελέσματα (Mativenga et al., 2016).



Εικόνα 33: Ίνες που ανακτώνται από HVF μετά από (a) 500 παλμούς, (b) 1000 παλμούς, (c) 1500 παλμούς, (d) 2000 παλμούς και (e) μηχανική ανακύκλωση (οι κύκλοι δείχνουν μερικώς επεξεργασμένο υλικό) (Mativenga et al., 2016).



Εικόνα 34: (a) παρθένες ίνες, (b) ίνες σε 500 παλμούς, (c) ίνες σε 2000 παλμούς και (d) ίνες από μηχανική επεξεργασία (Mativenga et al., 2016).



Παρόλα αυτά με αυτή τη μέθοδο μπορούν να ανακτηθούν μόνο ίνες μικρότερου μήκους, ενώ για να διασφαλιστεί η υψηλή ποιότητα των ανακτωμένων ινών απαιτούνται υψηλές καταναλώσεις ενέργειας, αν σκεφτεί κανείς ότι στις δοκιμές του Mativenga και της ομάδας του είχε 2,6 φορές μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τη μηχανική ανακύκλωση (Mativenga et al., 2016). Ωστόσο, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ανακύκλωσης, η ποιότητα των ινών που ανακτώνται από την διαδικασία είναι υψηλότερη και οι ίνες έχουν μεγαλύτερο μήκος και λιγότερες προσμίξεις (WindEurope, 2020).

Ερευνητικό μέρος

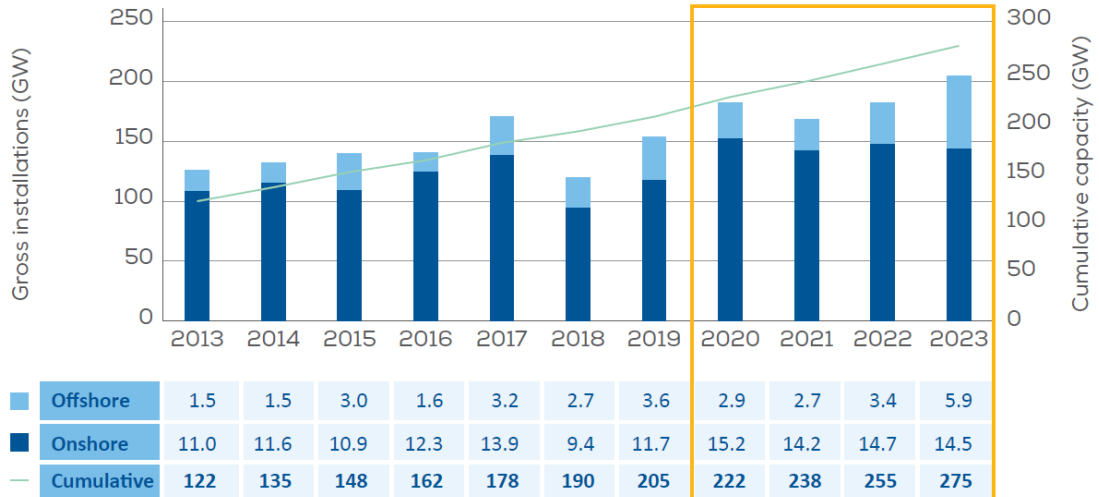
## 8 Εκτίμηση εγκατεστημένης ισχύος – αποβλήτων

### 8.1 Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα τελευταία χρόνια, συνέβησαν μερικά σημαντικά γεγονότα που αύξησαν σημαντικά την κοινωνικοτεχνική πίεση για την ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων ανακύκλωσης σύνθετων υλικών, και συγκεκριμένα ήταν:

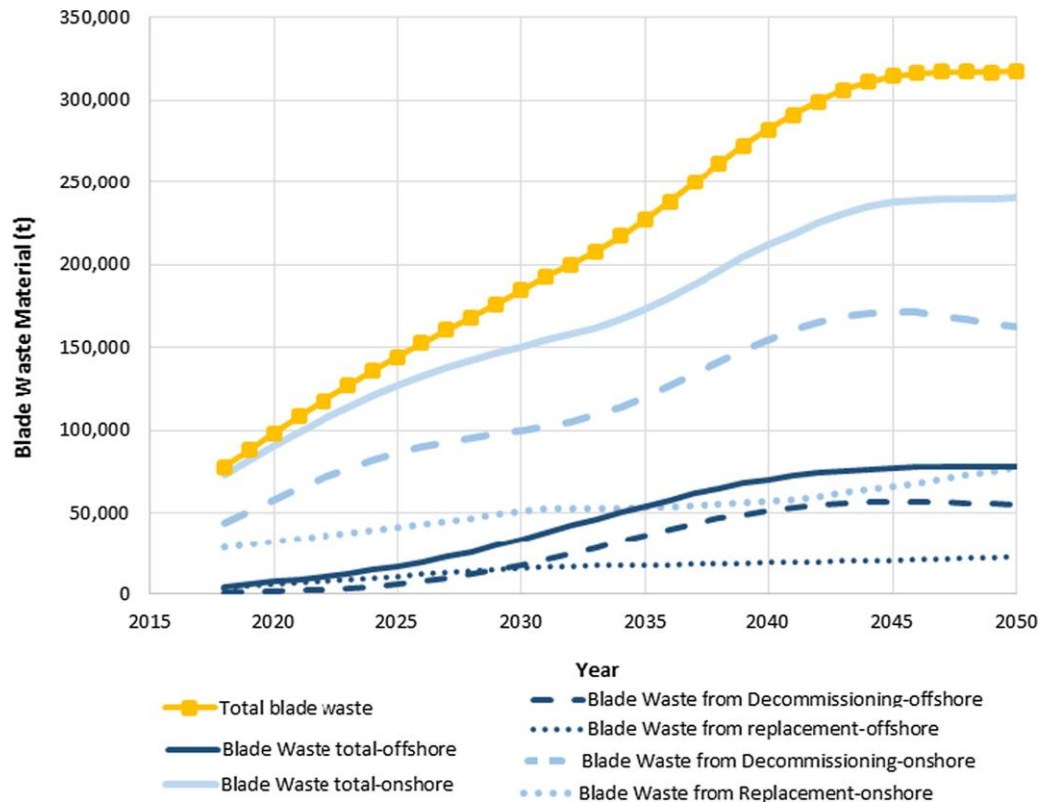
- [1] Η απαγόρευση της υγειονομικής ταφής σύνθετων υλικών στη Γερμανία το 2009 (WindEurope, 2020)
- [2] Οι τουρμπίνες από το πρώτο μεγάλο κύμα της αιολικής ενέργειας της δεκαετίας του 1990, οι οποίες φτάνουν σήμερα στο τέλος του προσδόκιμου ζωής τους. Το 2019 και το 2020 ανακατασκευάστηκαν ανεμογεννήτριες ισχύος περίπου δύο gigawatt και η απόρριψή τους με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο αποτελεί αυξανόμενο πρόβλημα (*What Happens to All the Old Wind Turbines?* - BBC News, n.d.). Η αυξημένη χρήση των CFRPs και GFRPs στη βιομηχανία σε συνδυασμό με τους περιορισμούς και τις απαγορεύσεις διάθεσης σε χώρους υγειονομικής ταφής οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών τεχνολογιών ανακύκλωσης για σύνθετα υλικά (Y. Liu et al., 2017). Είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι αυτή η κοινωνικοτεχνική πίεση θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια, καθώς και άλλες χώρες της ΕΕ πρόκειται να ακολουθήσουν τη Γερμανία απαγορεύοντας τις επιλογές υγειονομικής ταφής (WindEurope, 2020), από την ανάπτυξη των αγορών σύνθετων υλικών, την αύξηση των ρυθμών παραγωγής σύνθετων υλικών και των εγκαταστάσεων σύνθετων κατασκευών (βλ. Διάγραμμα 4) και από τον ολοένα αυξανόμενο αριθμό παροπλισμένων ανεμογεννητριών που περιμένουν να αποτεφρωθούν ή να ανακυκλωθούν. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα βέβαιο, καθώς η ένταση του παροπλισμού θα ακολουθεί τον ιστορικά αυξανόμενο ανά έτος αριθμό των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών (WindEurope, 2020).

Επομένως, οι παράγοντες που οδηγούν στην ανάπτυξη των πλέον βιώσιμων τεχνολογιών ανακύκλωσης σύνθετων υλικών είναι αναμφίβολα ζωτικής σημασίας για την επιβίωση και τη βιωσιμότητα της βιομηχανίας σύνθετων υλικών στο σύνολό της, και αναμένεται ότι η τάση αυτή θα γίνεται όλο και πιο εμφανής κατά την τρέχουσα δεκαετία του 2020 (Krauklis et al., 2021).



Διάγραμμα 4: Ακαθάριστες ετήσιες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών στην Ευρώπη (WindEurope, 2020).

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5 προβλέπεται ότι το 2050 το σύνολο των αποβλήτων περυσίων θα φτάσει τους 325.000 τόνους, με το 76% να προέρχεται από την ξηρά και το 24% από την υπεράκτια. Παρόλο που τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αντιπροσωπεύουν μικρότερο ποσοστό από τα χερσαία, δεν πρόκειται για ασήμαντη ποσότητα υλικού και, ως εκ τούτου, δεν θα πρέπει να αγνοηθεί σε καμία πρόβλεψη (Lichtenegger et al., 2020).



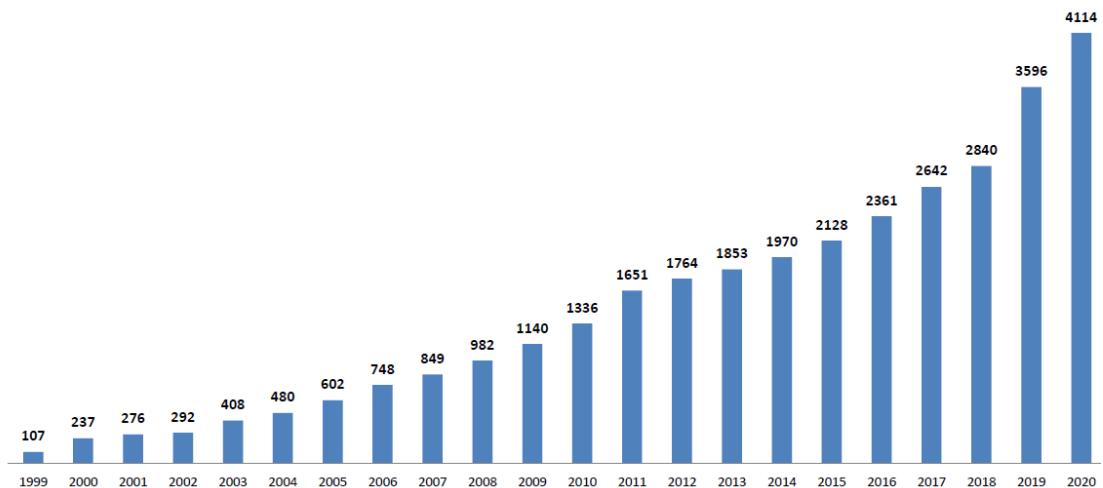
Διάγραμμα 5: Πρόβλεψη υλικών αποβλήτων περυσίων από ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη έως το 2050 (Lichtenegger et al., 2020).

Τα ευρήματα της έρευνας του Lichtenegger και της ομάδας του έδειξαν επίσης ότι η Γερμανία θα έχει την πλειονότητα των αποβλήτων πετυγίων από χερσαίες ανεμογεννήτριες, ενώ το Ηνωμένο Βασίλειο θα έχει τη μεγαλύτερη δυναμικότητα και τα περισσότερα απόβλητα πετυγίων από υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Η Δανία, η οποία υπήρξε πρωτοπόρος στην αιολική ενέργεια, θα παρουσιάσει σύντομα κορεσμό, ενώ η Γαλλία αναμένεται να έχει σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας. Επομένως, πρέπει άμεσα να βρεθούν βιώσιμες λύσεις για εκμετάλλευση των αποβλήτων των ανεμογεννητριών ειδικά μετά το τέλος ζωής τους, καθώς όπως παρουσιάζεται και στις προβλέψεις οι ανεμογεννήτριες παράγουν μεγάλο όγκο αποβλήτων, ενώ παράλληλα συνεχίζουν να αποτελούν μία λύση παραγωγής ενέργειας για πολλές χώρες και συνεπώς ο όγκος των αποβλήτων συνεχώς θα αυξάνεται όσο περνάει ο καιρός (Lichtenegger et al., 2020).

## 8.2 Ελλάδα

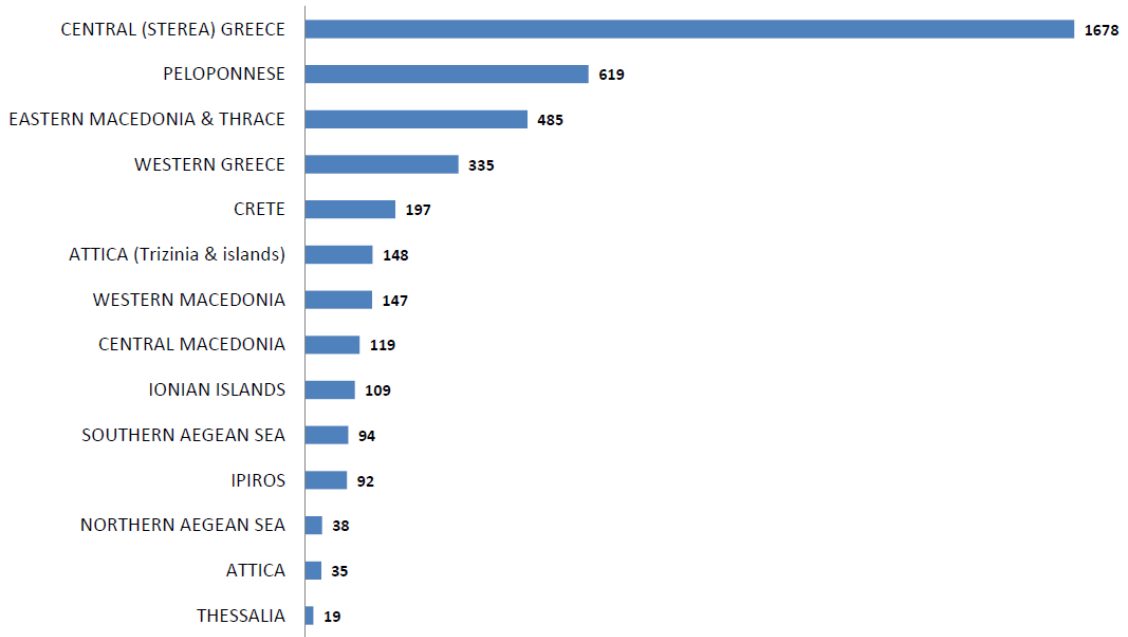
### 8.2.1 Πρόγνωση εγκατεστημένης ισχύος

Δεδομένου ότι η εργασία πραγματοποιείται στην Ελλάδα, είναι σημαντικό να γίνει αναφορά σε τρέχοντα και προγνωστικά δεδομένα για την αιολική ενέργεια στην Ελλάδα. Το Διάγραμμα 6 δείχνει την εγκατεστημένη ισχύ της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα ανά έτος.



Διάγραμμα 6: Συνολική δυναμικότητα (MW) ανά έτος (Hwea & Energy, 2020)

Στο Διάγραμμα 7 και στο Σχήμα 9 απεικονίζεται η εγκατεστημένη ισχύς ανά περιφέρεια (Hwea & Energy, 2020) που είναι αρκετά κοντά με τα δεδομένα που επεξεργαστήκαμε από το χάρτη της ΡΑΕ (RAE GeoPortal, n.d.) καθώς υπολογίσαμε 4145,495 MW εγκατεστημένης ισχύος μέχρι τον Μάρτιο του 2021 όπου αντλήθηκαν τα δεδομένα.



Διάγραμμα 7: Εγκατεστημένη ισχύς (MW) ανά περιφέρεια ελληνικού χώρου (Hwea & Energy, 2020)



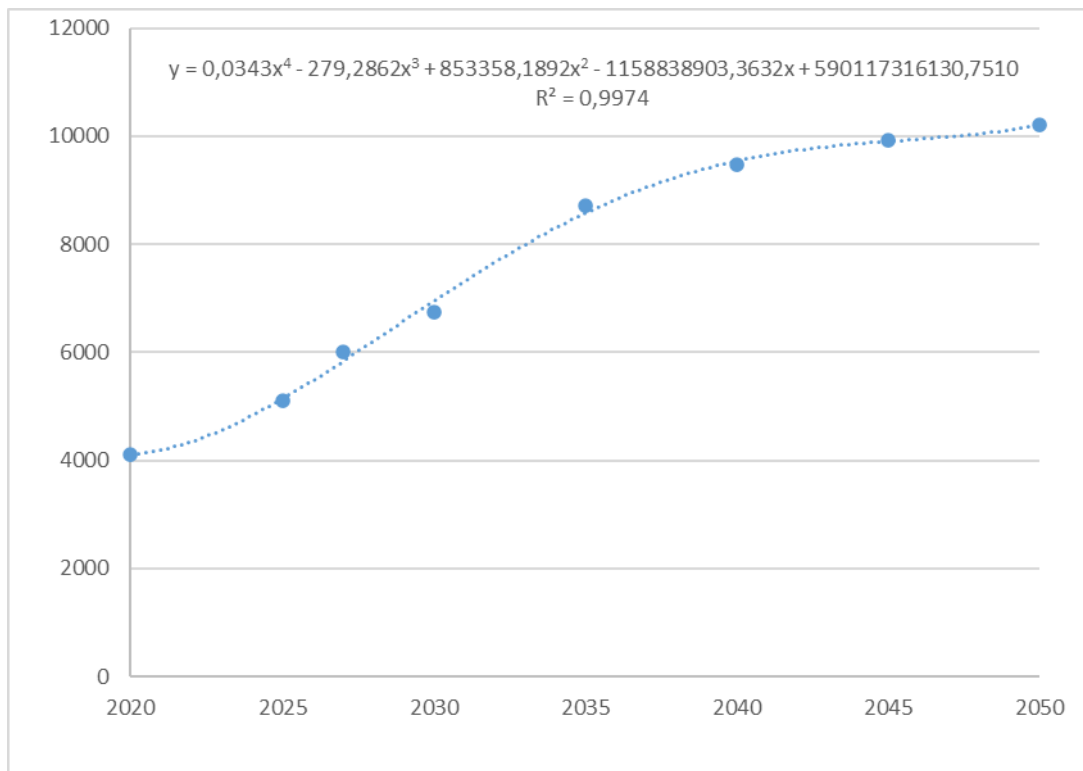
Σχήμα 9: Χωροταξική χωρητικότητα σε MW (Hwea & Energy, 2020)

Για την εκτίμηση της πρόγνωσης της εγκατεστημένης ισχύς αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα της έρευνας της HWEA Wind Energy Statistics και τα δεδομένα πρόγνωσης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 (Hwea & Energy, 2020).

Πίνακας 1: Δεδομένα πρόγνωσης της εγκατεστημένης ισχύς

ΕΤΟΣ - ΠΟΓΝΩΣΗ /ΠΗΓΗ	(Υπουργείο Περιβάλλοντος Και Ενέργειας, 2019)	(Wind Europe, 2021)	(Offshore Wind Is Coming to Greece / WindEurope, n.d.)	(WWF & NOA, 2017) (LPO SCENARIO)	(WWF & NOA, 2017) (RES SCENARIO)
2025	5200	5000			
2027	6000				
2030	7000		7000	6922	6022
2035				9222	8222
2040				10222	8722
2045				10622	9222
2050				10622	9822

Χρησιμοποιώντας το μέσο όρο από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα δημιουργήθηκε μια τεταρτοβάθμια εξίσωση για τον υπολογισμό της πρόγνωσης εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα μέχρι το 2050. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 8 ο συντελεστής προσδιορισμού "R τετράγωνο" είναι αρκετά υψηλός (99,74%), οπότε και υιοθετήθηκε αυτή η εξίσωση για τον ετήσιο υπολογισμό της πρόγνωσης της εγκατεστημένης ισχύος (Πίνακας 2).



Διάγραμμα 8: Πρόγνωση εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα πρόγνωσης εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα ανά έτος από το 2020 έως το 2050.

<b>ΕΤΟΣ</b>	<b>ΠΡΟΓΝΩΣΗ</b>
2020	4134
2021	4206
2022	4359
2023	4578
2024	4850
2025	5163
2026	5506
2027	5868
2028	6240
2029	6614
2030	6983
2031	7341
2032	7681
2033	8001
2034	8296
2035	8564
2036	8804
2037	9015
2038	9199
2039	9355
2040	9488
2041	9601
2042	9698
2043	9784
2044	9867
2045	9953
2046	10051
2047	10171
2048	10322
2049	10517
2050	10768



### 8.2.2 Εκτίμηση αποβλήτων έως το 2050

Η εκτίμηση των αποβλήτων έγινε θεωρώντας μια μέση διάρκεια ζωής των πτερυγίων 20 έτη. Από το χάρτη της ΡΑΕ χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που παρέχει σχετικά με τις αιολικά πάρκα που έχουν άδεια λειτουργίας (RAE GeoPortal, n.d.) έγιναν οι εξής επιλογές:

1. Όσες ανεμογεννήτριες ήταν εγκατεστημένες για πάνω από 20 έτη θεωρείται ότι θα αφαιρεθούν το επόμενο έτος (2022).
2. Για όσες ανεμογεννήτριες είναι γνωστό το βάρος από τον κατασκευαστή χρησιμοποιήθηκε αυτή η τιμή.
3. Για τον υπολογισμό του βάρους των αποβλήτων (για όσες δεν δίνεται) χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της διαμέτρου σε σχέση με το βάρος των αποβλήτων για τις ήδη εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες (Πίνακας 3) καθώς έχει την καλύτερη προσέγγιση σε σχέση με τα μοντέλα στα οποία είναι γνωστό το βάρος των πτερυγίων. Σύμφωνα με τις υποθέσεις 1 έως 3 δημιουργήθηκε ο πίνακας 5 που μας δείχνει το αναμενόμενο βάρος αποβλήτων (τόνους) ανά νομό και έτος.
4. Για αυτές που πρόκειται να εγκατασταθούν από το 2021 – 2029 χρησιμοποιείται ο τύπος της Συνολικής Εγκατεστημένης Ισχύος σε σχέση με το βάρος (Πίνακας 4), όπου η πρόγνωση της εγκατεστημένης ισχύος υπολογίστηκε προηγουμένως. Οι εξισώσεις αντλήθηκαν από το άρθρο του Lichtenegger και των συνεργατών του και παρουσιάζονται στους Πίνακες 3 και 4.

Πίνακας 3: Εξίσωση της διαμέτρου του ρότορα σε σχέση με το βάρος των αποβλήτων για τις ήδη εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες (Lichtenegger et al., 2020).

y	Βάρος πτερυγίου
x	Διάμετρος ρότορα
$y=a*x^b$	
a	0,001493691
b	1,91309572

Πίνακας 4: Εξίσωση της Συνολικής Εγκατεστημένης Ισχύος σε σχέση με το βάρος (Lichtenegger et al., 2020).

y	Βάρος πτερυγίου
x	Ονομαστική ισχύς
$y=a*x$	
a	0,012417445

Διπλωματική εργασία – Ιωάννης Τζόκας

Ο πίνακας 5 υπολογίστηκε από τα δεδομένα του χάρτη της ΡΑΕ για τα αιολικά πάρκα που διαθέτουν άδεια λειτουργίας. Αυτά τα δεδομένα περιέχουν αναλυτικά στοιχεία των ανεμογεννητριών που απαρτίζουν τα αιολικά πάρκα όπως τον αριθμό τους, το έτος τοποθέτησης τους, την περιοχή τοποθέτησης τους (ακόμα και σε επίπεδο δημοτικής κοινότητας), την εταιρεία κατασκευής του ρότορα, τη διάμετρο του ρότορα, το ύψος του πυλώνα και την ισχύς τους. Έτσι χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Lichtenegger και της ομάδας του, όπου παρέχονται πληροφορίες σχετικά με το βάρος των πτερυγίων για διαφορετικού τύπου ρότορες. Όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για το πραγματικό βάρος, χρησιμοποιήθηκε αυτό. Διαφορετικά, χρησιμοποιήθηκε η προαναφερθείσα εξίσωση που υπολογίζει το βάρος του πτερυγίου από τη διάμετρο του ρότορα.

Πίνακας 5: Βάρος Αποβλήτων σε τόνους ανά νομό και έτος έως το 2040

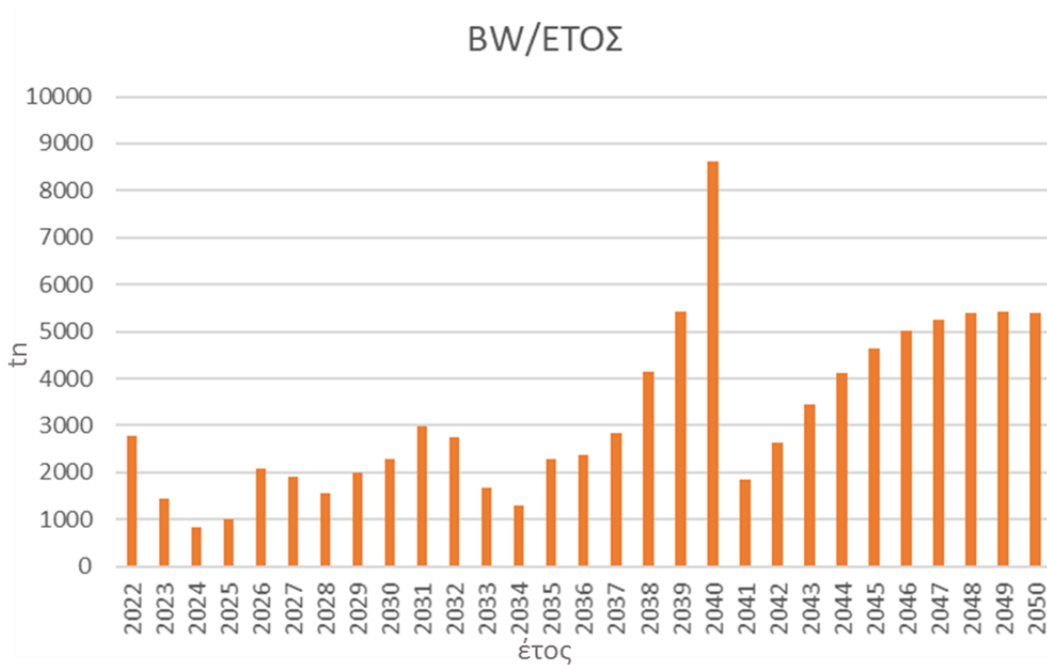
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	ΣΥΝΟΛΙΚΑ
ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ	4,80							253,50		196,39		171,91				39,60		1488,46	1091,39	3246,053
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	1,54		17,16																	18,70321
ΑΝΔΡΟΥ								15,60												15,59612
ΑΡΓΟΛΙΔΑΣ					435,60	277,20			308,81	330,60	349,34			196,39	25,79	410,32		98,20		2432,247
ΑΡΚΑΔΙΑΣ						405,50	99,00	277,20				96,71		158,40		37,30	372,06		251,86	1698,039
ΑΧΑΪΑΣ			18,80		352,41				268,65									88,82		728,6772
ΒΟΙΩΤΙΑΣ		18,73	24,98			104,99	396,00		687,00	458,62	1106,15	158,40	12,49	100,50	390,60	603,38	1115,57	81,11	941,50	6199,997
ΔΡΑΜΑΣ										221,10										221,1
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ									41,40		12,49			217,80						271,688
ΕΒΡΟΥ		111,74	31,22		97,50		370,50			299,77			196,39	245,65		30,03			311,94	1694,739
ΕΥΒΟΙΑΣ	1873,12	311,12		40,98		196,59		37,46						180,19	955,95	102,96	484,06	456,69	2209,84	6848,961
ΗΜΑΘΙΑΣ										130,20							698,98			829,176
ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	53,78			60,17		146,12	101,58	37,46							60,17					459,273
ΘΗΡΑΣ				1,80		6,24														8,044021
ΙΚΑΡΙΑΣ			5,20					8,60												13,79856
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ																	29,50	1352,03		1381,529
ΚΑΛΥΜΝΟΥ	43,71						10,41													54,11468
ΚΑΡΠΑΘΟΥ - ΗΡΩΙΚΗΣ ΝΗΣΟΥ ΚΑΣΟΥ	6,24	4,91						8,60												19,74555
ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ																			204,32	204,3163
ΚΕΑΣ - ΚΥΘΝΟΥ								4,96												4,957252
ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ				125,37				496,29		93,66							22,12			737,4487
ΚΙΛΚΙΣ								100,50												100,5
ΚΟΖΑΝΗΣ											223,20						154,35		1027,54	1405,089
ΚΟΡΙΝΘΙΑΣ												283,64								283,6447
ΚΩ	43,71					37,46				31,22										112,3924
ΛΑΚΩΝΙΑΣ						171,84			249,26	77,36							249,76	93,46	374,31	1215,991
ΛΑΡΙΣΑΣ																17,76				17,76429
ΛΑΣΙΘΙΟΥ	327,00	77,36	68,72	25,79		101,52		137,44	42,98			29,50	12,49							822,7919
ΛΕΣΒΟΥ		78,05						22,08			18,73									118,8591
ΛΗΜΝΟΥ											12,49					6,24				18,73206
ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ					190,66															190,6607
ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ	11,42											68,76						169,99		250,1748
ΜΗΛΟΥ					8,60		8,60													17,19059
ΜΥΚΟΝΟΥ	3,20							6,24		17,19										26,62982
ΝΑΞΟΥ			12,49						77,36											89,84569
ΝΗΣΩΝ											184,90	143,81		184,90		814,02				1327,627
ΞΑΝΘΗΣ																		216,23		216,2285
ΠΑΡΟΥ											24,98									24,97608
ΡΕΘΥΜΝΟΥ										120,26	49,95	18,73								188,9402
ΡΟΔΟΠΗΣ		493,56	288,81	373,04	156,00												358,71	361,48	744,14	2775,746
ΡΟΔΟΥ					142,96			81,17				37,46	140,37							401,9604
ΣΑΜΟΥ	30,19					15,61							12,49							58,29257
ΣΕΡΡΩΝ					171,91										295,91	99,00				566,82
ΣΥΡΟΥ	28,34	2,28																		30,61738
ΤΗΝΟΥ	3,20																			3,195212
ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ					21,18				82,18	100,50										203,8617
ΦΛΩΡΙΝΑΣ													292,24							292,24
ΦΩΚΙΔΑΣ									311,92	245,49				337,03			381,34	681,17		1956,957
ΧΑΝΙΩΝ					94,55		93,66		43,71	25,79										257,7011
ΧΙΟΥ	18,43	15,65						8,60		7,37										50,04324
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	2448,67	1113,39	467,37	627,15	1671,36	1456,83	1085,98	1489,45	1764,61	2447,73	2169,98	1065,13	672,71	1633,35	1728,41	2160,62	3462,98	4721,11	7926,83	40113,68

Από την επικοινωνία με τη βιομηχανία και με δεδομένα της βιβλιογραφίας (P. Liu & Barlow, 2017) υπολογίστηκε ένα ετήσιο ποσοστό αποβλήτων λόγω αστοχιών περίπου 0,6 %. Επίσης χρησιμοποιώντας την εξίσωση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς και την πρόγνωση της που πραγματοποιήθηκε στη προηγούμενη ενότητα υπολογίζονται τα απόβλητα για τα έτη 2041-2050. Συνοψίζοντας όλα τα δεδομένα και τα απόβλητα λόγω αστοχιών δημιουργήθηκε ο ακόλουθος πίνακας (Πίνακας 6) για τα απόβλητα των ανεμογεννητριών (BW) καθώς και το Διάγραμμα 6 με τα αντίστοιχα δεδομένα. Όπως γίνεται αντιληπτό δεν δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού για τα έτη 2041-2050 των αποβλήτων σε επίπεδο νομών για αυτό το λόγο υπολογίζεται ένα συνολικό ετήσιο βάρος αποβλήτων.

Πίνακας 6: Πρόγνωση για απόβλητα ανεμογεννητριών σε τόνους, για τα έτη από 2022 έως και 2050.

ΕΤΟΣ	ΠΡΟΓΝΩΣΗ BW (t)
2022	2773,435208
2023	1454,476369
2024	828,7271386
2025	1011,820451
2026	2081,552734
2027	1894,000099
2028	1550,887007
2029	1982,242986
2030	2284,898592
2031	2994,654649
2032	2742,280214
2033	1661,232788
2034	1290,7892
2035	2271,408624
2036	2384,349085
2037	2832,297813
2038	4148,319599
2039	5418,133826
2040	8633,759172
2041	1858,919799
2042	2620,676484
2043	3448,882494
2044	4113,512777
2045	4627,283113
2046	5003,03383
2047	5253,660245
2048	5392,091494
2049	5431,408568
2050	5384,704982

Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 6 υπολογίζεται ένας μέσος όρος αποβλήτων ανά έτος περίπου 3220 [t/έτος] με την ελάχιστη τιμή να είναι το έτος 2024 (828,7 [t]) και τη μέγιστη το έτος 2040 (8633 [t]).



Διάγραμμα 9: Αποτελέσματα πρόγνωσης των αποβλήτων των ανεμογεννητριών σε τόνους για τα έτη 2022 – 2050.

## 9 Οικονομική ανάλυση μεθόδων Ανακύκλωσης

### 9.1 Κοστολόγηση μεθόδων Ανακύκλωσης

Προκειμένου να γίνει η κοστολόγηση των μεθόδων ανακύκλωσης έγιναν οι εξής υποθέσεις:

1. θα χρησιμοποιηθεί ετήσιος ρυθμός αποβλήτων 3000 τόνων, που σύμφωνα με το Διάγραμμα 9 είναι η πιο λογική τιμή,
2. μία μέση απόσταση μεταφοράς 200 km και
3. θα μεταφέρονται απευθείας στη βιομηχανία ανακύκλωσης ανάλογα με τη μέθοδο που εξετάζεται ανά περίπτωση.

Στα δεδομένα που αντλούνται από επιστημονικά άρθρα, αναθεωρούνται με νεότερα δεδομένα τα οποία είναι διαθέσιμα για την Ελλάδα (π.χ. εργατικό κόστος, κόστος ενέργειας κ.λπ.) διαφορετικά όταν δίνονται δεδομένα που δεν αναλύονται από που προκύπτουν (π.χ. ένα σταθερό κόστος αναλωσίμων) γίνεται η μετατροπή τους χρησιμοποιώντας την ισοτιμία των νομισμάτων για το έτος για το οποίο υπάρχουν τα στοιχεία (Πίνακας 7) και το Producer prices in industry της Ευρώπης (Πίνακας 8).

Πίνακας 7: Ισοτιμία των νομισμάτων ανά έτος (Historical Exchange Rates from 1953 with Graph and Charts, n.d.-a; Historical Exchange Rates from 1953 with Graph and Charts, n.d.-b)

1997-01-01 / 2021-05-21			
ΕΤΟΣ	ΕΥΡΩ/ΔΟΛΑΡΙΟ	ΕΥΡΩ/ΛΥΡΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΡΓΑΣΙΜΩΝ ΗΜΕΡΩΝ
2021	1,204545	0,870468	98
2020	1,142196	0,889704	257
2019	1,119475	0,877771	255
2018	1,180955	0,884706	255
2017	1,129686	0,876679	255
2016	1,106903	0,819483	257
2015	1,109513	0,72585	256
2014	1,328501	0,80612	255
2013	1,328118	0,849255	255
2012	1,284789	0,810871	256
2011	1,39193	0,867893	257
2010	1,325695	0,857826	258
2009	1,394759	0,890916	256
2008	1,470755	0,796285	256
2007	1,370478	0,684337	255
2006	1,255623	0,681729	255
2005	1,244114	0,683785	257

Διπλωματική εργασία – Ιωάννης Τζόκας

2004	1,243943	0,678671	259
2003	1,131148	0,691993	255
2002	0,945574	0,628828	255
2001	0,895571	0,621815	255
2000	0,923612	0,609478	255
1999	1,065929	0,658772	261
1998	1,114781	0,672623	261
1997	1,131451	0,690665	261

Πίνακας 8: Ο μέσος όρος του *Producer prices in industry* των Κρατών της Ευρώπης ανά έτος (Statistics / Eurostat, n.d.)

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

Πίνακας 9: Κοστολόγηση πρώτων υλών

Πρώτες ύλες	Κόστος	Μονάδες	Βιβλιογραφία
νερό	0,98	€/μ <sup>3</sup>	(Τιμολογιο & Χρηση, 2016)
ηλεκτρική ενέργεια (χωρίς φόρους)	0,081	€/kwh	( <i>Electricity Price Statistics - Statistics Explained</i> , n.d.)
ηλεκτρική ενέργεια	0,1064	€/kwh	
φυσικό αέριο	0,0213	(EUR per kWh)	( <i>Natural Gas Price Statistics - Statistics Explained</i> , n.d.)
Μέση τιμή πετρελαίου	1,18	€/l	(• <i>Diesel Prices in Greece 2021</i>   Statista, n.d.)

Πίνακας 10: Τεχνικά χαρακτηριστικά πρώτων υλών

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

Πίνακας 11: Κοστολόγηση ανθρωπίνου δυναμικού

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

Αρχικά έχουμε δύο σενάρια κοπής και μεταφοράς. Στο πρώτο σενάριο, τα πτερύγια κόβονται σε κομμάτια μήκους 6-7 μέτρων στο αιολικό πάρκο, η οποία είναι η τρέχουσα πρακτική μεταφοράς των πτερυγίων αιολικής ενέργειας EoL για υγειονομική ταφή. Στο δεύτερο σενάριο τα πτερύγια κόβονται σε μέγεθος 1-2 m και στη συνέχεια προ-τεμαχίζονται στο αιολικό πάρκο σε μέγεθος 20-40 mm, χρησιμοποιώντας κινητούς τεμαχιστές (Rentizelas et al., 2021). Για να υπολογιστούν τα κόστη στα δύο σενάρια χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τους Πίνακες 9 και 11.

Πίνακας 12: Σενάριο 1 (Rentizelas et al., 2021).

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

Πίνακας 13: Σενάριο 2 (Rentizelas et al., 2021).

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

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

### 9.1.1 Υγειονομική ταφή

Το τέλος ταφής ξεκινά από την τιμή των δεκαπέντε ευρώ ανά τόνο αποβλήτων και αυξάνεται κατά πέντε ευρώ ετησίως έως την τιμή των τριάντα πέντε ευρώ ανά τόνο, όπου και διαρκεί σταθερό για τα υπόλοιπα χρόνια. Οπότε θεωρούμε την περίπτωση των 35 €. Για το Ηνωμένο Βασίλειο είναι περίπου 20 £ με 50 £ για τη διαδικασία της υγειονομικής ταφής, 5 £ για λειτουργία και 10 £ προς κέρδος (P. Liu, 2017). Για το σενάριο της υγειονομικής ταφής επιλέγουμε απόσταση 50 km.

### 9.1.2 Μηχανική Ανακύκλωση

Τα δεδομένα του Πίνακα 14 αντλήθηκαν από το άρθρο (Rentizelas et al., 2021) και προσαρμόστηκαν σύμφωνα με τα δεδομένα κόστους που υπάρχουν στην Ελλάδα και για τη δυναμικότητα των 3000 τόνων αποβλήτων ανά έτος, που υιοθετήθηκε προηγουμένως. Στην ενότητα 9.2 παρουσιάζεται η λογική υπολογισμού του κόστους επένδυσης για την δυναμικότητα των 3000 τόνων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους της μηχανικής ανακύκλωσης.

Πίνακας 14: Κοστολόγηση της μηχανικής ανακύκλωσης των πτερυγίων (Rentizelas et al., 2021).

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



### 9.1.3 Αποτέφρωση - Συν-επεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου

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

### 9.1.4 Θερμικές μέθοδοι ανακύκλωσης

Πίνακας 15: Κοστολόγηση διαδικασίας ρευστοποιημένης κλίνης για συνολική δυναμικότητα 6000 τόνων (Pickering et al., 2000).

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

Τα δεδομένα του Πίνακα 15 αντλήθηκαν από το εξής άρθρο (Pickering et al., 2000) και προσαρμόστηκαν στα δεδομένα της Ελλάδας. Επίσης, το μεθάνιο αντικαταστάθηκε με το φυσικό αέριο στους υπολογισμούς, επειδή αυτή τη στιγμή αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στη βιομηχανία και είναι και οικονομικότερο. Για την Πυρόλυση και για την Πυρόλυση Μικροκυμάτων, εφόσον δεν έχουμε διαθέσιμα δεδομένα από άρθρα για τον υπολογισμό του ετήσιου λειτουργικού τους κόστους, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής υποθέσεις :

- Καθώς οι διεργασίες πυρόλυσης και ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνουν και οι δύο θερμική επεξεργασία, έχουν παρόμοιες θερμοκρασίες επεξεργασίας. Ωστόσο, ο εξοπλισμός που απαιτείται για την πυρόλυση είναι απλούστερος, γεγονός που υποδηλώνει ότι το κόστος ανακύκλωσης της πυρόλυσης είναι 10% χαμηλότερο από τη διαδικασία της ρευστοποιημένης κλίνης (P. Liu, 2017). Επομένως, το κόστος ανακύκλωσης της πυρόλυσης θα είναι 1.569.253 €.
- Το κύριο πλεονέκτημα της πυρόλυσης με τη βοήθεια μικροκυμάτων (MAP) είναι ότι εξοικονομεί ενέργεια. Οι διαφορετικές μέθοδοι θέρμανσης οδηγούν σε

εξοικονόμηση ενέργειας για το MAP και επίσης σε κόστος ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας MAP είναι περίπου το ένα τέταρτο της συμβατικής πυρόλυσης και το ενεργειακό κόστος θεωρείται ότι περιλαμβάνει το πενήντα τοις εκατό του κόστους ανακύκλωσης (P. Liu, 2017). Επομένως, το κόστος ανακύκλωσης είναι  $(50\% \cdot 1/4 + 50\%) \cdot 1.569.253 = 980.783 \text{ €}$ .

#### 9.1.5 Χημική Ανακύκλωση

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν δεδομένα στη βιβλιογραφία σχετικά με το κόστος ανακύκλωσης GFRP χρησιμοποιώντας τη μέθοδο χημικής ανακύκλωσης και οποιαδήποτε άρθρα προσπάθησαν να κάνουν μια εκτίμηση έχουν χρησιμοποιήσει δεδομένα του Knight και της ομάδας του. Έτσι και στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα γίνει χρήση του ετήσιου κόστους λειτουργίας που δίνεται σε εκείνη τη διατριβή (2.270.000\$/έτος) για δυναμικότητα 1315 τόνους ανά έτος (Knight, 2013). Τέλος, με της απαραίτητες αναγωγές, υπολογίζεται ένα ετήσιο λειτουργικό κόστος 1.271 €/τόνο.

#### 9.1.6 Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF)

Εφόσον από τη βιβλιογραφία δεν έχουμε δεδομένα για την κοστολόγηση του GFRP με τη μέθοδο του HVF, θα γίνει χρήση των δεδομένων που υπάρχουν (CFRP). Η πιο αποτελεσματική διάταξη επίδειξης πέτυχε απόδοση 5,65 kg/h χρησιμοποιώντας 1,2 kWh/kg. Μια μονάδα παραγωγής SELFRAG που χρησιμοποιεί μια γεννήτρια στα 20 Hz έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την απόδοση στα 22,56 kg/h περίπου δηλαδή 198 τόνους ανά έτος, κάτι που θα επηρεάσει σημαντικά τα οικονομικά μειώνοντας τα λειτουργικά έξοδα (OPEX), αλλά αυξάνοντας το κόστος επένδυσης (CAPEX). Το CAPEX θα αυξηθεί στα €2.045.000 ενώ το OPEX θα μειωθεί στα €6,12/kg (*Final Report Summary - SELFRAG CFRP*, n.d.). Στη συνέχεια, ακολουθεί ο Πίνακας 16 με την κοστολόγηση της μεθόδου HVF, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, και την αναθεώρηση των τιμών στα δεδομένα της Ελλάδας.

Πίνακας 16: Κοστολόγηση μεθόδου HVF και αναθεώρηση των κοστών στα δεδομένα της Ελλάδας (*Final Report Summary - SELFRAG CFRP*, n.d.).

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

<b>Ηλεκτρική ενέργεια (1,2 kWh/kg)</b>	0,12	€/kg	0,02
<b>Απώλειες νερού</b>	0,12	€/kg	0,02
<b>Total OPEX</b>	6,12	€/kg	5,85

## 9.2 Σύνοψη κόστους

Για όλες τις μεθόδους ανακύκλωσης εκτός από τη μηχανική ανακύκλωση που έχει υπολογιστεί, θα προστεθεί ένα κόστος επένδυσης για τεμαχιστή και ένα ετήσιο κόστος προκοπής στο εργοστάσιο που θα το υποθέσουμε περίπου στο ¼ του κόστους τεμαχισμού στο αιολικό πάρκο. Το κόστος επένδυσης για τον τεμαχιστή δίνεται από το άρθρο (Vo Dong et al., 2018) 200.000,00 € για 4000 t/έτος, το οποίο προσαρμόστηκε για τα δικά μας δεδομένα (3000 t/έτος). Έτσι καταλήγουμε σε κόστος επένδυσης 196.424,25 € και σε κόστος κοπής 3,04 €/t.

Ο Πίνακας 17 παρέχει μια σύνοψη του εκτιμώμενου κόστους των διαφόρων μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων, εκφρασμένο σε μονάδες ευρώ. Το κόστος έχει αναθεωρηθεί ώστε να αντικατοπτρίζει τις τρέχουσες τιμές, προκειμένου να διευκολυνθούν οι συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων μεθόδων.

Πίνακας 17: Σύνοψη κοστολόγησης παραγωγικής διαδικασίας μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων

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

Για να γίνει η εκτίμηση του κόστους της εγκατάστασης, εφόσον τα δεδομένα που υπάρχουν αναφέρονται σε διαφορετικές δυναμικότητες από την περίπτωση που εξετάζεται, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του κόστους προς τη δυναμικότητα. Σύμφωνα με αυτή, ο λόγος του κόστους των δύο εγκαταστάσεων ισούται με το λόγο των δυναμικότητων τους υψωμένο σε ένα κατάλληλο εκθέτη (συντελεστής κλίμακας για την εξετάζουσα τεχνολογία)

(*The Cost-to-Capacity Method and Scale Factors - EnvValuation*, n.d.). Έτσι υπολογίζεται στο πίνακα 18 το κόστος επένδυσης της κάθε μεθόδου.

Πίνακας 18: Σύνοψη κοστολόγησης επένδυσης μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων.

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

Ο Πίνακας 19 συνοψίζει την κοστολόγηση του λειτουργικού κόστους ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων, σε ευρώ ανά τόνο. Αυτό καθιστά τις μεθόδους εύκολα συγκρίσιμες. Θεωρείται ότι τα λειτουργικά κόστη θα είναι τα ίδια με αυτά που αντιστοιχούν σε διαφορετικές δυναμικότητες.

Πίνακας 19: Σύνοψη κοστολόγησης λειτουργικών κοστών μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων.

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

### 9.3 Όφελος ανακύκλωσης

Οι βασικές παραδοχές που έγιναν σχετικά με την τιμή ανακύκλωσης είναι οι εξής (P. Liu, 2017):

#### 1. Για την υλική αξία

- Η αξία των ανακυκλωμένων ινών θεωρείται ότι είναι ανάλογη με την αντοχή σε εφελκυσμό
- Όλες οι επιλογές EoL απαιτούν τη μείωση του μεγέθους του πτερυγίου κατά τη διάρκεια ή πριν από τις διαδικασίες ανακύκλωσης. Όλο το ανακυκλωμένο υλικό έχει κοπεί ή τεμαχιστεί. Επομένως, όλες οι ανακυκλωμένες ίνες είναι κοντές ίνες, και έτσι η τιμή ανακυκλωμένων ινών υπολογίζεται με βάση τις παρθένες κοντές ίνες.
- Η τιμή του ανακυκλωμένου πληρωτικού είναι ίδια με εκείνη του παρθένου πληρωτικού.
- Η τιμή της ανακυκλωμένης ρητίνης είναι 50% της τιμής της παρθένας ρητίνης.

#### 2. Για τη διαδικασία ανακύκλωσης

- Η πρώτη ύλη ανακύκλωσης για αυτή τη μελέτη περιλαμβάνει τα σύνθετα απόβλητα από τα πτερύγια BW. Οποιοδήποτε άλλο υλικό έχει αφαιρεθεί κατά την προεπεξεργασία. Υποτίθεται ότι το σύνθετο περιέχει 60% ίνες και 40% ρητίνη κατά βάρος.
- Η συνολική τιμή ανακύκλωσης = παραγωγή ενέργειας από τη διεργασία \* κόστος ηλεκτρικής ενέργειας + ((ποσοστό απόδοσης ινών \* απόδοση ινών \* κόστος παρθένων ινών + ποσοστό απόδοσης πληρωτικών \* κόστος πληρωτικών) \* κλάσμα βάρους ινών σε πρώτη ύλη (60%) + (ποσοστό απόδοσης ρητίνης \* απόδοση ρητίνης \* κόστος παρθένας ρητίνης) \* κλάσμα βάρους ρητίνης (40%)) \* (100% - συνολική απώλεια διεργασίας (5%)) (τύπος 1)
- Τα ποσοστά απόδοσης και η απόδοση των ανακυκλωμένων υλικών εξαρτώνται από την τεχνολογία ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται.

Πίνακας 20: Κοστολόγηση υλικών πτερυγίων.

Υλικό	Κόστος		Πηγή	€/kg
Κοντές παρθένες ίνες γυαλιού	0,75	€/kg	(Palmer, 2009)	0,87
	1,23	\$/kg	(Pickering et al., 2000)	1,24
	1,3	\$/kg	CPIC 2015 (P. Liu, 2017)	<b>1,197</b>
Μακριές παρθένες ίνες γυαλιού	1,61	\$/kg	CPIC 2015 (P. Liu, 2017)	<b>1,483</b>
Υλικό πλήρωσης ινών γυαλιού	0,08	€/kg	(Palmer, 2009)	<b>0,093</b>
	0,2	€/kg	(Li et al., 2016)	<b>0,255</b>
Εποξεική ρητίνη	5,57	\$/kg	CRRC 2016 (P. Liu, 2017)	<b>5,258</b>
Σύνολο				<b>10,983</b>

Στον Πίνακα 20 παρουσιάζονται τα κόστη για τα υλικά των πτερυγίων όπως είναι στη βιβλιογραφία και γίνεται η αναγωγή τους σε μονάδες ευρώ, καθώς όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε αυτές τις νομισματικές μονάδες. Στον Πίνακα 21 παρουσιάζονται τα ποσοστά κατά βάρος του τελικού ινώδους ανακυκλώματος, με ένα σταθερό ποσοστό απωλειών των διεργασιών ίσο με 5%, ανάλογα με τη μέθοδο ανακύκλωσης που θα επιλεγεί στην κάθε περίπτωση. Ωστόσο, εκτός από τη μηχανική ανακύκλωση που το πληρωτικό είναι σε μορφή σκόνης, στις υπόλοιπες μεθόδους το ανακύκλωμα αποτελείται εκτός από ίνες και από πληρωτικό υλικό.

Πίνακας 21: Ποσοστά απόδοσης μεθόδων ανακύκλωσης.

Επιλογές EoL	Ποσοστό απόδοσης ινώδους ανακυκλώματος	Συνολικό ποσοστό απωλειών	Πηγή
Μηχανική	58%	5%	(Palmer, 2009)
Διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης	44%		(Pickering et al., 2000)
Πυρόλυση και MAP	70%		(Cunliffe & Williams, 2003)
Χημική	100%		(Keith et al., 2016)
HVF	60%		(Final Report Summary - SELFRAG CFRP, n.d.)

Ο Πίνακας 22 παρουσιάζει την αντοχή σε εφελκυσμό των ανακυκλωμένων ινών εάν χρησιμοποιούνταν πλήρως αντί των παρθένων ινών γυαλιού σε ένα νέο σύνθετο. Στη

συνέχεια ο Πίνακας 23 παραθέτει τις δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας, πληρωτικού υλικού, ινών και ρητίνης ανάλογα με τη μέθοδο ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται.

Πίνακας 22: Σύγκριση αντοχής σε εφελκυσμό που διατηρείται κατά τη χρήση ανακυκλωμένων ινών γυαλιού έναντι παρθένων ινών γυαλιού.

Επιλογές EoL	Διατηρούμενη αντοχή σε εφελκυσμό των ανακυκλωμένων ινών σε σύγκριση με τις παρθένες ίνες γυαλιού	
Μηχανική	78%	(Palmer, 2009)
Διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης	50%	(Pickering et al., 2000)
Πυρόλυση και MAP	52%	(Cunliffe & Williams, 2003)
Χημική	58%	(Kao et al., 2012; Oliveux et al., 2012)
HVF	88%	(Rouholamin et al., 2014)

Πίνακας 23: Δυνατότητες ανάκτησης πρώτων υλών για παραγωγή πτερυγίων, ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων.

Δυνατότητα ανάκτησης ανά μέθοδο	Ενέργεια	Πληρωτικό	Ίνες	Ρητίνες
Χυτά				
Αποτέφρωση	ναι			
Μηχανική		ναι	ναι	
Διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης		ναι	ναι	
Πυρόλυση		ναι	ναι	
MAP		ναι	ναι	
Χημική		ναι	ναι	ναι
HVF		ναι	ναι	

### 9.3.1 Μηχανική Ανακύκλωση

Στη διαδικασία της μηχανικής ανακύκλωσης η αναλογία του τελικού προϊόντος είναι 58% ίνες και 42% σκόνη (πληρωτικό) κατά βάρος (Palmer, 2009). Έτσι χρησιμοποιώντας τον τύπο 1 και τους παραπάνω πίνακες καταλήγουμε σε όφελος ανακύκλωσης 369,80 [€/τόνο].

### 9.3.2 Αποτέφρωση - Συν-επεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου

Σύμφωνα με στοιχεία που κοινοποίησε η ReFibre, υπολογίζεται ότι μπορούν να εξοικονομηθούν 4,16 kWh/kg ανακυκλωμένου υλικού σε έναν κλίβανο τσιμέντου (Fonte & Xydīs, 2021). Με βάση την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας 0,1064 €/kwh, έχουμε όφελος ανακύκλωσης 442,62 €/t.

### 9.3.3 Διαδικασία Ρευστοποιημένης κλίνης

Στη διαδικασία της ρευστοποιημένης κλίνης το ποσοστό απόδοσης του πληρωτικού υλικού αναφέρεται σε 7,6% (Pickering et al., 2000). Έτσι χρησιμοποιώντας τον τύπο 1 και τους παραπάνω πίνακες καταλήγουμε σε όφελος ανακύκλωσης 161,19 [€/τόνο].

### 9.3.4 Πυρόλυση

Δεν υπάρχει διαθέσιμη έρευνα σχετικά με την αναλογία ινών και πληρωτικού στο στερεό υπόλειμμα που προκύπτει από τη μέθοδο της πυρόλυσης. Έτσι, θεωρείται ότι το στερεό υπόλειμμα αποτελείται από 80% ίνες και 20% πληρωτικό κατά βάρος (P. Liu, 2017). Οπότε το ποσοστό απόδοσης των ινών είναι 56% ( $70\% \cdot 80\%$ ) και το ποσοστό απόδοσης του πληρωτικού υλικού είναι 14% ( $70\% \cdot 20\%$ ). Έτσι χρησιμοποιώντας τον τύπο 1 και τους παραπάνω πίνακες καταλήγουμε σε όφελος ανακύκλωσης 219,08 [€/τόνο].

### 9.3.5 Υποβοηθούμενη από μικροκύματα πυρόλυση (MAP)

Γίνεται η υπόθεση ότι η αντοχή εφελκυσμού των ινών που ανακτώνται μέσω του MAP θα είναι ίδια με εκείνες που ανακτώνται μέσω της πυρόλυσης, καθώς οι μηχανισμοί είναι παρόμοιοι. Επιπλέον, θεωρείται ότι η απόδοση ανακύκλωσης των ινών θα είναι επίσης η ίδια. Έτσι καταλήγουμε σε ένα κοινό όφελος ανακύκλωσης 219,08 [€/τόνο].

### 9.3.6 Χημική ανακύκλωση

Η χημική ανακύκλωση μπορεί να ανακυκλώσει όχι μόνο τις ίνες και το υλικό πλήρωσης, αλλά και τις ρητίνες, το οποίο είναι το κύριο πλεονέκτημα της σε σχέση με άλλες μεθόδους ανακύκλωσης. Σύμφωνα με το Keith και τους συνεργάτες, του όλο το στερεό ανακύκλωμα θεωρείται ότι είναι ινώδες προϊόν και το ποσοστό απόδοσης του είναι σχεδόν 100% (Keith et al., 2016). Όμως, η ρητίνη που ανακτάται από αυτή την διεργασία αποικοδομείται (Dang et al., 2005; Yang et al., 2012). Ωστόσο, η απόδοση και το ποσοστό απόδοσης της ανακτημένης ρητίνης δεν έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, εκτιμάται ότι η απόδοση της ρητίνης είναι 50% της απόδοσης της νέας ρητίνης (P. Liu, 2017). Έτσι χρησιμοποιώντας τον τύπο 1 και τους παραπάνω πίνακες καταλήγουμε σε όφελος ανακύκλωσης για το ινώδες προϊόν 395,82 [€/τόνο] και για τη ρητίνη 999,11 [€/τόνο]. Οπότε το συνολικό όφελος είναι 1394,93 [€/τόνο].

### 9.3.7 Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF)

Η αντοχή σε εφελκυσμό των ανακυκλωμένων ινών γυαλιού HVF έχει αναφερθεί ότι είναι το 88% της αντοχής των παρθένων ινών γυαλιού (Rouholamin et al., 2014). Ωστόσο δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για το ποσοστό απόδοσης των ινών και των πληρωτικών στο ανακύκλωμα. Το ποσοστό απόδοσης των ινών θεωρείται ότι είναι 90% στο τελικό προϊόν και αντίστοιχα 10% του πληρωτικού (P. Liu, 2017). Άρα, το ποσοστό απόδοσης των ινών είναι



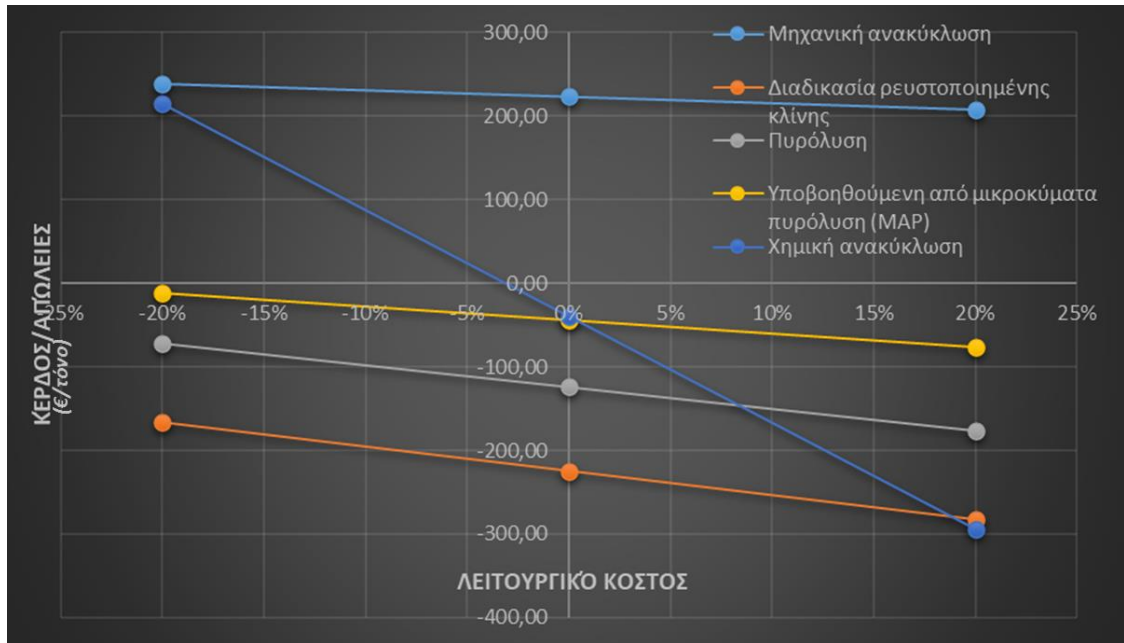
79,2% (88%\*90%) και το ποσοστό απόδοσης του πληρωτικού υλικού είναι 8,8% (88%\*10%). Έτσι χρησιμοποιώντας τον τύπο 1 και τους παραπάνω πίνακες καταλήγουμε σε όφελος ανακύκλωσης 555,04 [€/τόνο].

## 9.4 Σύνοψη Κέρδους/Ζημίας Μεθόδων Ανακύκλωσης

Πίνακας 24: Σύνοψη κοστών σε ευρώ και αποτέλεσμα κέρδους ή/και ζημίας σε ευρώ ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων.

Μέθοδος ανακύκλωσης	Κόστος επένδυσης (€/τόνο)	Λειτουργικό κόστος (€/τόνο)	Κοπή (€/τόνο)	Μεταφορά (€/τόνο)	Προ Κοπή (€/τόνο)	Συνολικά (€/τόνο)	Τιμή Ανακύκλωσης (€/τόνο)	Κέρδος/Απώλειες (€/τόνο)
Μηχανική ανακύκλωση	14,85	78,13	43,90	9,60	-	146,48	369,80	223,32
Διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης	38,38	290,60	43,90	9,60	3,04	385,52	161,19	-224,33
Πυρόλυση	24,68	261,54	43,90	9,60	3,04	342,76	219,08	-123,68
Υποβοηθούμενη από μικροκύματα πυρόλυση (MAP)	42,64	163,46	43,90	9,60	3,04	262,64	219,08	-43,56
Χημική ανακύκλωση	106,94	1271,02	43,90	9,60	3,04	1434,50	1394,93	-39,57
Κατακερματισμός παλμών υψηλής τάσης (HVF)	131,88	5850,46	43,90	9,60	3,04	6038,88	555,04	-5483,84

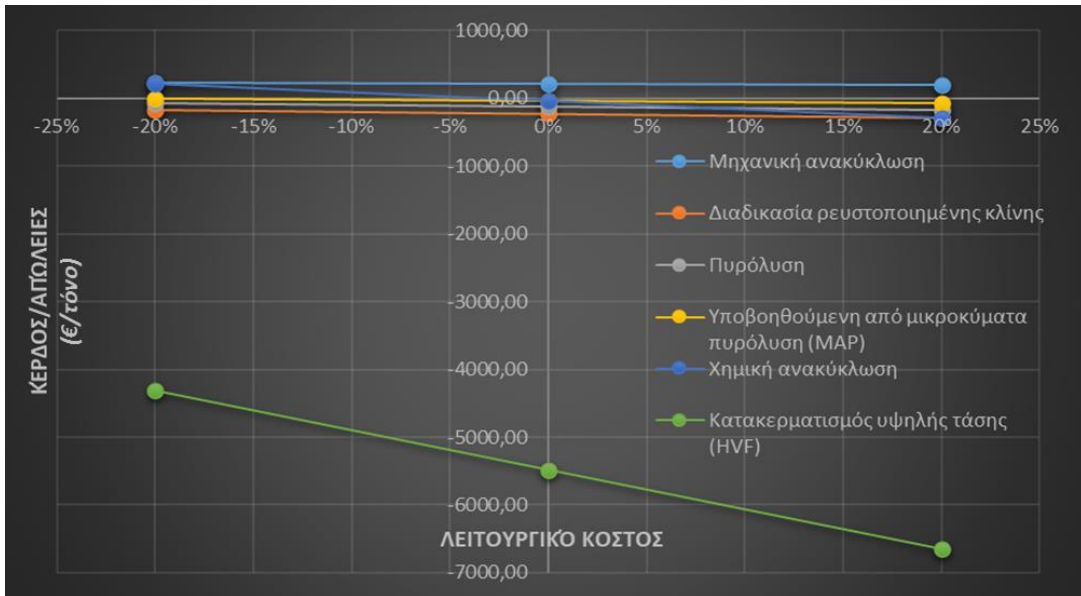
Ακολουθεί μια ανάλυση ευαισθησίας όπου στη πρώτη περίπτωση γίνεται έλεγχος στο πιθανό κέρδος ή ζημία ανά μέθοδο σε σχέση με την αυξομείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους κατά +/- 20%. Στη συνέχεια, γίνεται με βάση τη πιθανή τιμή πώλησης του ανακυκλώματος και τέλος με τη δυναμικότητα. Σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις φτιάχτηκαν δύο διαγράμματα (ένα χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το HVF και ένα που να περιλαμβάνεται) καθώς λόγω του υψηλού κόστους του HVF δεν θα είχαμε καλό οπτικό αποτέλεσμα.



Διάγραμμα 10: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τα λειτουργικά κόστη ανά μέθοδο ανακύκλωσης (χωρίς τη μέθοδο HVF).

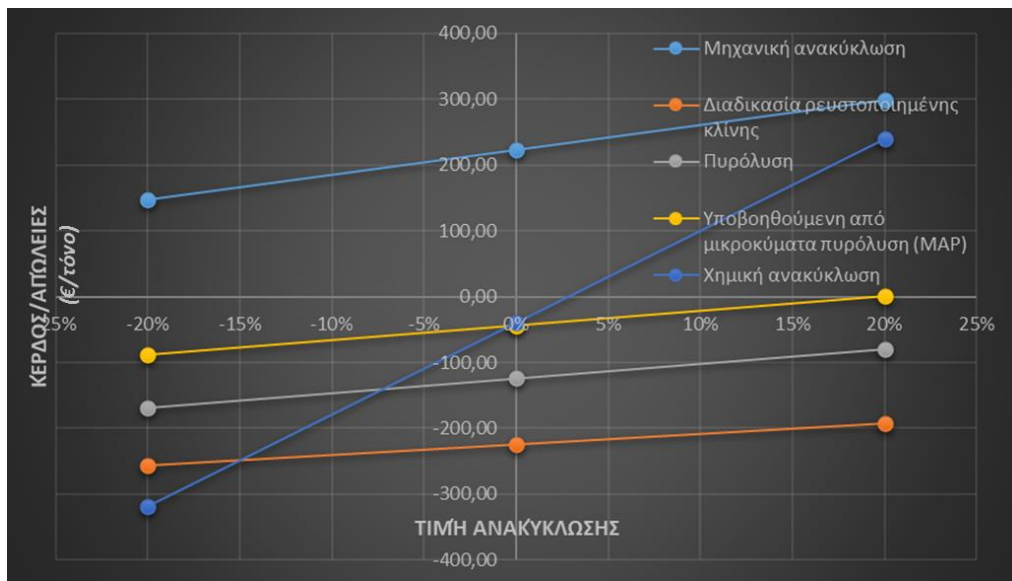
Σύμφωνα με το Διάγραμμα 10 παρατηρούνται τα παρακάτω:

- Για τη μέθοδο της μηχανικής ανακύκλωσης το καθαρό κέρδος είναι σχετικά σταθερό και θετικό, ανεξάρτητα από τα λειτουργικά κόστη, οπότε είναι μία μέθοδος με την οποία πάντα θα υπάρχει κέρδος.
- Για τη μέθοδο της χημικής ανακύκλωσης το καθαρό κέρδος έχει πολύ μεγάλο εύρος, και στο μεγαλύτερο εύρος του είναι αρνητικό, ανάλογα με τα λειτουργικά κόστη, οπότε είναι μία διαδικασία με υψηλό ρίσκο ζημίας για υψηλά λειτουργικά κόστη.
- Για τις μεθόδους MAP, ρευστοποιημένης κλίνης και πυρόλυσης το καθαρό κέρδος είναι μόνιμα αρνητικό, οπότε είναι μία ζημιογόνα μέθοδος.



Διάγραμμα 11: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τα λειτουργικά κόστη ανά μέθοδο ανακύκλωσης.

Στο Διάγραμμα 11 έχει προστεθεί η μέθοδος HVF, η οποία όπως φαίνεται είναι μόνιμα σε αρνητικό καθαρό κέρδος οπότε είναι μία ζημιογόνα μέθοδος, από άποψη λειτουργικών κοστών.

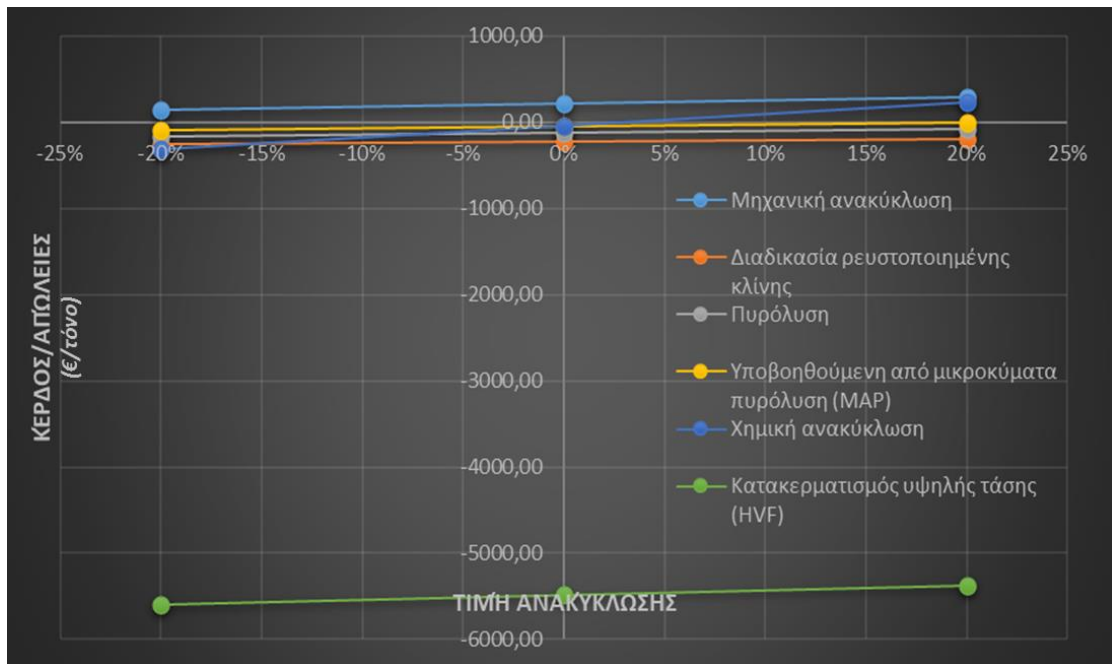


Διάγραμμα 12: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τη τιμή ανακύκλωσης των πτερυγίων ανά μέθοδο ανακύκλωσης (χωρίς τη μέθοδο HVF).

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 12 παρατηρούνται τα παρακάτω:

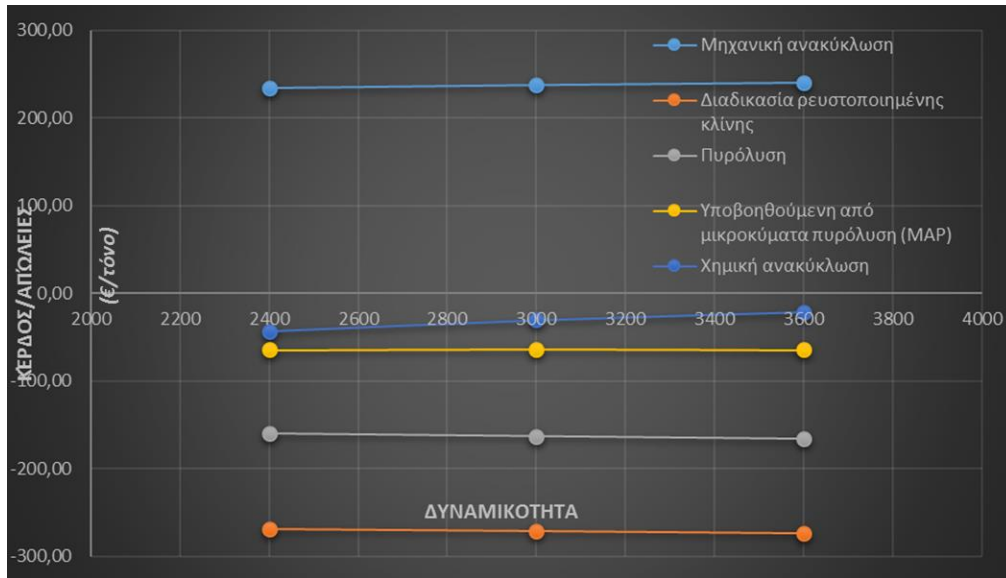
- Για τη μέθοδο της μηχανικής ανακύκλωσης το καθαρό κέρδος είναι σχετικά σταθερό και θετικό, ανεξάρτητα από την τιμή της ανακύκλωσης, οπότε είναι μία μέθοδος με την οποία πάντα θα υπάρχει κέρδος.

- Για τη μέθοδο της χημικής ανακύκλωσης το καθαρό κέρδος έχει πολύ μεγάλο εύρος, και στο μεγαλύτερο εύρος του είναι αρνητικό. Ωστόσο, αν αυξηθεί το κόστος των πρώτων υλών μπορεί να είναι ελπιδοφόρα.
- Για τις μεθόδους MAP, ρευστοποιημένης κλίνης και πυρόλυσης το καθαρό κέρδος είναι μόνιμα αρνητικό, οπότε είναι μία ζημιογόνα μέθοδος.



Διάγραμμα 13: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τη τιμή ανακύκλωσης των περυγιών ανά μέθοδο ανακύκλωσης.

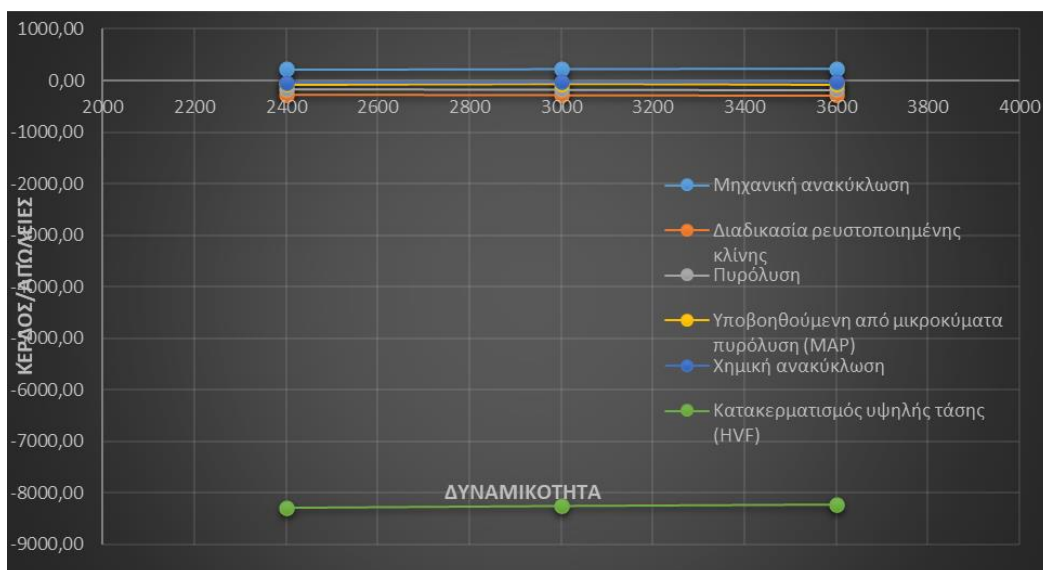
Στο Διάγραμμα 13 έχει προστεθεί η μέθοδος HVF , η οποία όπως φαίνεται είναι μόνιμα σε αρνητικό καθαρό κέρδος οπότε είναι μία ζημιογόνα μέθοδος, από άποψη τιμής ανακύκλωσης.



Διάγραμμα 14: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τη δυναμικότητα ανά μέθοδο ανακύκλωσης (χωρίς τη μέθοδο HvF)

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 14 παρατηρούνται τα παρακάτω:

- Για τη μέθοδο της μηχανικής ανακύκλωσης το καθαρό κέρδος είναι σχετικά σταθερό και θετικό, ανεξάρτητα από τη δυναμικότητα, οπότε είναι μία μέθοδος με την οποία πάντα θα υπάρχει κέρδος.
- Για τη μέθοδο της χημικής ανακύκλωσης το καθαρό κέρδος είναι μόνιμα αρνητικό, οπότε είναι μία ζημιογόνα μέθοδος.
- Για τις μεθόδους MAP, ρευστοποιημένης κλίτης και πυρόλυσης το καθαρό κέρδος είναι μόνιμα αρνητικό, οπότε είναι μία ζημιογόνα μέθοδος.



Διάγραμμα 15: Καθαρό κέρδος ή/και ζημία σε συνάρτηση με τη δυναμικότητα ανά μέθοδο ανακύκλωσης

Στο Διάγραμμα 15 έχει προστεθεί η μέθοδος HVF, η οποία όπως φαίνεται είναι μόνιμα σε αρνητικό καθαρό κέρδος οπότε είναι μία ζημιογόνα μέθοδος, από άποψη δυναμικότητας.

## 9.5 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την ανάλυση κόστους που έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα κόστη των υλικών, επεξεργασίας και ανακύκλωσής των πτερυγίων υπάρχει δυνατότητα για εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων για κάθε μέθοδο ανακύκλωσης.

1. Η μηχανική ανακύκλωση είναι μια μέθοδος που είναι οικονομικά επωφελής ανεξάρτητα από το ύψος του λειτουργικού κόστους, την αξία ανακύκλωσης των υλικών που ανακυκλώνονται ή την δυναμικότητα της διαδικασίας ανακύκλωσης μέσα σε κάποια λογικά πλαίσια που εξετάστηκαν.
2. Οι θερμικές μέθοδοι ανακύκλωσης πτερυγίων όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, έχουν σταθερά αρνητικά αποτελέσματα κέρδους ανεξάρτητα από το εύρος του λειτουργικού κόστους, την τιμή του ανακυκλωμένου υλικού και την ποσότητα των αποβλήτων. Αυτό τις καθιστά οικονομικά ασύμφωρες. Παρόλα αυτά η πυρόλυση μικροκυμάτων δεν έχει τόσο μεγάλες απώλειες όσο οι υπόλοιπες και βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.
3. Η κερδοφορία της χημικής ανακύκλωσης εξαρτάται από το λειτουργικό κόστος και την τιμή του ανακυκλωμένου προϊόντος. Εάν το λειτουργικό κόστος είναι χαμηλό, το περιθώριο κέρδους είναι παρόμοιο με αυτό της μηχανικής ανακύκλωσης. Ωστόσο, καθώς το λειτουργικό κόστος αυξάνεται, το περιθώριο κέρδους μειώνεται. Ομοίως, εάν η τιμή του ανακυκλωμένου προϊόντος είναι υψηλή, το περιθώριο κέρδους είναι παρόμοιο με αυτό της μηχανικής ανακύκλωσης. Ωστόσο, όσο μειώνεται η τιμή, μειώνεται και το περιθώριο κέρδους. Επομένως, η χημική ανακύκλωση είναι προς το παρόν μια ριψοκίνδυνη μέθοδος, αφού βρίσκεται ακόμα σε στάδιο έρευνας και δεν φαίνεται να έχει σίγουρα κέρδη.
4. Η μέθοδος της HVF για την ανακύκλωση πτερυγίων φαίνεται από τα διαγράμματα να έχει πολύ πιο υψηλά κόστη και απώλειες σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, ανεξάρτητα από το εύρος του λειτουργικού κόστους, την τιμή του ανακυκλωμένου υλικού και την ποσότητα των αποβλήτων. Αυτό την καθιστά μια πολύ οικονομικά ασύμφωρη μέθοδο ανακύκλωσης.
5. Πρέπει να αναφερθεί ότι η συναποτέφρωση στη βιομηχανία τσιμέντου με βάση τις τιμές που υπολογίστηκαν και το κόστος διάθεσης τους που αναφέρεται στη βιβλιογραφία αποφέρει κάποιο όφελος για τις τσιμεντοβιομηχανίες και στην εξοικονόμηση ενέργειας και στη βελτίωση των παραγόμενων προϊόντων τους. Ωστόσο δεν αποτελεί μέθοδο ανακύκλωσης και δεν μπορούσε να εξετασθεί στην ανάλυση ευαισθησίας.

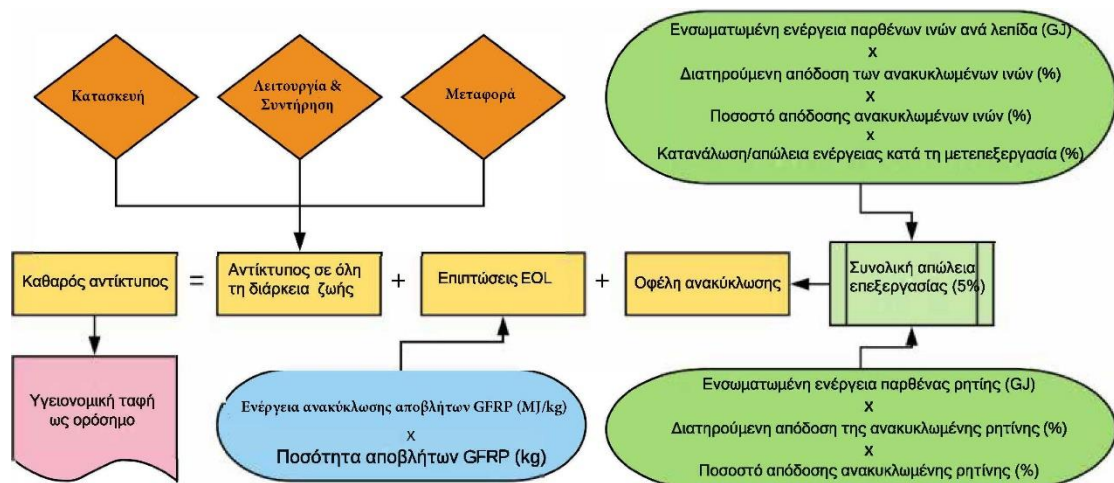
Ως εκ τούτου, η μηχανική ανακύκλωση είναι η πιο οικονομικά βέλτιστη μέθοδος επί του παρόντος, ενώ η χημική ανακύκλωση δείχνει περισσότερες υποσχέσεις για το μέλλον εάν αυξηθούν οι τιμές των πρώτων υλών ή εάν η διαδικασία μπορεί να βελτιωθεί, αφού βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Ωστόσο, για να γίνουν αποδεκτές πρέπει να φανούν αξιόπιστες και από άποψη περιβαλλοντικών οφελών.

## 10 Περιβαλλοντικά Οφέλη / Επιπτώσεις

### 10.1 Λογική υπολογισμού και υποθέσεις

Η περιβαλλοντική ανάλυση βασίστηκε στο άρθρο του P.Liu και των συνεργατών του. Οι επιπτώσεις κατά τη διάρκεια της ζωής ενός πτερυγίου είναι το άθροισμα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τα στάδια κατασκευής, μεταφοράς και λειτουργίας και συντήρησης του. Ο συνολικός αντίκτυπος στη διάρκεια ζωής, περιλαμβάνει, επίσης τον αντίκτυπο στο τέλος του κύκλου ζωής (EoL). Με τον όρο «όφελος ανακύκλωσης» μιας επιλογής EoL θεωρείται η ισοδύναμη περιβαλλοντική επίπτωση της κατασκευής του ανακυκλώματος ή της ενέργειας που ανακτάται μέσω των διεργασιών EoL. Μια αρνητική περιβαλλοντική επίπτωση είναι επιθυμητή, καθώς σημαίνει ότι η ενέργεια ανακτάται από τη διαδικασία (Liu et al., 2019).

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της σύνθεσης του υλικού των πτερυγίων στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, επιλέχθηκε ένα μοντέλο πτερυγίου κατασκευασμένο από GF. Οι ενέργειες επεξεργασίας EoL που συλλέγονται από τη βιβλιογραφία στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται με τη μάζα του πτερυγίου για να δώσουν την ενεργειακή ζήτηση για την ανακύκλωση ενός πτερυγίου. Περιλαμβάνονται τα ποσοστά απόδοσης ανακύκλωσης για να αποτυπωθούν τα οφέλη της ανακύκλωσης. Τέλος, ο καθαρός αντίκτυπος για κάθε επιλογή EoL συγκρίνεται χρησιμοποιώντας τον αντίκτυπο από την υγειονομική ταφή ως σημείο αναφοράς και στη συνέχεια συζητείται η «καλύτερη» επιλογή EoL από την άποψη της περιβαλλοντικής απόδοσης. Η λογική ροή φαίνεται στο Σχήμα 10 που ακολουθεί.



Σχήμα 10: Σχηματική λογική ροή για τον υπολογισμό των καθαρών επιπτώσεων της κάθε μεθόδου ανακύκλωσης (Liu et al., 2019).

Σε αυτό το μοντέλο, θεωρείται ότι τα οφέλη της ανακύκλωσης είναι ανάλογα με την αντοχή εφελκυσμού του ανακυκλωμένου υλικού. Αυτό συμβαίνει επειδή η αντοχή σε



εφελκυσμό είναι μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των υλικών πτερυγίων. Οι διαδικασίες EoL που συζητούνται είναι η υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση, η μηχανική ανακύκλωση, η ανακύκλωση ρευστοποιημένης κλίνης, η πυρόλυση, η πυρόλυση υποβοηθούμενη από μικροκύματα (MAP), η χημική ανακύκλωση και η ανακύκλωση με χρήση παλμών υψηλής τάσης (HVF). Το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας δεν εξετάζει την ενέργεια μεταφοράς, επομένως, αυτή η μελέτη περιλαμβάνει μόνο τη μείωση του μεγέθους και την ενέργεια διεργασίας για ανακύκλωση, ενώ αποκλείει την ενέργεια μεταφοράς. Η ενέργεια μεταφοράς είναι ήσσονος σημασίας σε σύγκριση με τις άλλες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην ανακύκλωση, καθώς η μελέτη προϋποθέτει την ίδια μέση απόσταση μεταφοράς για όλες τις μεθόδους.

- Η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την υγειονομική ταφή των απορριμμάτων CFRP είναι 0,257 MJ/kg, η οποία περιλαμβάνει 0,09 MJ/kg για τον τεμαχισμό και 0,167 MJ/kg για εργασίες υγειονομικής ταφής (Li et al., 2016). Η ίδια ποσότητα ενέργειας θεωρείται ότι απαιτείται για την υγειονομική ταφή GFRP.
- Η αποτέφρωση στερεών αποβλήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια μονάδα συμπαραγωγής. Η καύση οργανικής ρητίνης από τα απόβλητα παρέχει ενέργεια περίπου 12 MJ/kg αποβλήτων, ενώ τα ανόργανα συστατικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου (Job, 2013).
- Η μηχανική ανακύκλωση των σύνθετων απορριμμάτων περιλαμβάνει την κοπή των αποσυναρμολογημένων πτερυγίων σε κομμάτια, στη συνέχεια τον τεμαχισμό και την άλεση των απορριμμάτων σε τμήματα σκόνης και ινών μεγέθους δεκάδων χιλιοστών. Η ενέργεια που απαιτείται για αυτή τη διαδικασία είναι 0,27 MJ/kg, για ρυθμό τροφοδοσίας είναι 150 kg/hr (Howarth et al., 2014), η οποία υιοθετείται καθώς ο ρυθμός τροφοδοσίας που εξετάζεται είναι μεγαλύτερος.
- Η ενεργειακή ζήτηση της διεργασίας ρευστοποιημένης κλίνης για τα απόβλητα GFRP υπό βέλτιστες συνθήκες έχει προσδιοριστεί ότι είναι 22,2 MJ/kg, παρέχοντας απόδοση προϊόντος ινών 44%(P. Liu et al., 2019; Meng et al., 2017; Pickering et al., 2000, 2015).
- Η ενεργειακή ζήτηση της πυρόλυσης είναι περίπου 30 MJ/kg (Witik et al., 2013). Το ποσοστό απόδοσης στερεού προϊόντος αναφέρεται σε 70,7% (Cunliffe & Williams, 2003). Με βάση αυτό, η ενεργειακή ζήτηση της πυρόλυσης είναι 21,21 MJ/kg αποβλήτων FRP.

- Η διαδικασία MAP περιλαμβάνει τη χρήση μικροκυμάτων για τη θέρμανση του υλικού από το εσωτερικό, το οποίο είναι πιο ενεργειακά αποδοτικό από τη συμβατική πυρόλυση. Η κατανάλωση ενέργειας για αυτή τη διαδικασία αναφέρεται στα 10 MJ/kg (Suzuki & Takahashi, 2005).
- Η διαδικασία χημικής ανακύκλωσης περιλαμβάνει την αφαίρεση της πολυμερούς μήτρας των σύνθετων υλικών μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Πολλές έρευνες εξέτασαν την κατανάλωση ενέργειας της χημικής ανακύκλωσης. Για παράδειγμα, μια μελέτη διαπίστωσε ότι η ανακύκλωση αποβλήτων CFRP απαιτεί 19,2 MJ/kg (Keith et al., 2016), ενώ μια άλλη μελέτη διαπίστωσε ότι η ανακύκλωση αποβλήτων GFRP απαιτεί 101 MJ/kg (La Rosa et al., 2016). Η μελέτη που διαπίστωσε ότι η ανακύκλωση αποβλήτων CFRP απαιτεί 19,2 MJ/kg προέρχεται από τον Keith και τους συνεργάτες του, και είναι ο αριθμός που υιοθετήθηκε, καθώς προέρχεται από ένα καλά χαρακτηρισμένο πείραμα που προήλθε από πραγματικές μετρήσεις και όχι από εκτίμηση από μοντελοποιημένα δεδομένα. Εφόσον δεν υπάρχουν δεδομένα για την ανακύκλωση του GFRP, θεωρείται ότι θα έχει ίδια κατανάλωση ενέργειας με το CFRP.
- Τα αποτελέσματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την ανακύκλωση αποβλήτων μέσω κατακερματισμού παλμών υψηλής τάσης (HVF) ποικίλουν. Η ζήτηση ενέργειας για ένα βέλτιστα διαμορφωμένο σύστημα αναφέρεται σε 16,2 MJ/kg (*Final Report Summary - SELFRAG CFRP*, n.d.; P. Liu et al., 2019). Άλλη έρευνα διαπίστωσε ότι η αύξηση του αριθμού των παλμών που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία σύνθετων απορριμμάτων από 500 σε 2000 είχε ως αποτέλεσμα μια μικρή μείωση των υπολειμμάτων ρητίνης αλλά σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας, από 17,1 σε 60 MJ/kg. (Mativenga et al., 2016). Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η τιμή των 16,2 MJ/kg. Στον Πίνακα 25 γίνεται σύνοψη με ποσοτικά δεδομένα για τις ενεργειακές απαιτήσεις κάθε μεθόδου.

Πίνακας 25: Ενεργειακές απαιτήσεις ανά μέθοδο ανακύκλωσης.

Μέθοδοι Ανακύκλωσης	Ενεργειακή Απαιτηση (MJ/kg)
Υγειονομική ταφή	0,257
Αποτέφρωση	-12
Μηχανική Ανακύκλωση	0,27
Ρευστοποιημένη κλίνη	22,2
Πυρόλυση	21,21
Πυρόλυση Μικροκυμάτων	10

Χημική Ανακύκλωση	19,2
Κατακερματισμός υψηλής τάσης	16,2

## 10.2 Οφέλη ανακύκλωσης

Τα προϊόντα από την ανακύκλωση συνθετικών υλικών περιλαμβάνουν: ενέργεια, ίνες, συστατικά πλήρωσης και ρητίνες. Το κεντρικό ανακυκλώσιμο προϊόν ποικίλλει ανάλογα τη διαδικασία ανακύκλωσης. Τα οφέλη της ανακύκλωσης των παραγώγων σύνθετων υλικών είναι ανάλογα της αντοχής εφελκυσμού των προϊόντων σε σύγκριση με την αντοχή των καινούργιων υλικών όπως προαναφέρθηκε. Η αντοχή εφελκυσμού των ανακυκλωμένων ινών παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι ότι τα μήκη των ανακυκλωμένων ινών ποικίλλουν και έχουν διαφορετικές ποσότητες υπολειμμάτων ρητίνης. Κατά συνέπεια, οι ανακυκλωμένες ίνες δεν είναι τόσο καθαρές και ομοιογενείς όπως οι καινούργιες και συνεπώς απαιτούν μετεπεξεργασία. Τα δεδομένα είναι περιορισμένα για να δούμε πόση ενέργεια απαιτείται για τη μετεπεξεργασία και συνεπώς και το πραγματικό όφελος.

Εκτός από τα οφέλη από την ανακύκλωση των ινών, πρέπει να καθοριστούν και τα οφέλη από την ανακύκλωση της ρητίνης και των συστατικών πλήρωσης. Από μελέτες της βιβλιογραφίας έχει προσδιοριστεί ότι η ρητίνη από το συνθετικό υλικό μπορούν να ανακυκλωθούν, μέσω χημικών διεργασιών, και να επαναχρησιμοποιηθούν, αλλά δεν έχει προσδιορισθεί ο βαθμός απόδοσης της ανακυκλωμένης ρητίνης. Εδώ υποθέτουμε ότι η τιμή της ανακυκλωμένης ρητίνης είναι 50% μικρότερη της καινούργιας ρητίνης. Τα συστατικά πλήρωσης που ανακτώνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο του  $\text{CaCO}_3$ . Παρόλα αυτά, τα συστατικά πλήρωσης λόγω της μικρής τιμής τους έχουν αποκλειστεί από τους υπολογισμούς των ωφελειών.

Τα συνολικά οφέλη ανακύκλωσης υπολογίζονται συνδυάζοντας τα οφέλη ανακύκλωσης από τη μονάδα επεξεργασίας συνυπολογίζοντας το βαθμό απόδοσης της ανακύκλωσης. Ο βαθμός απόδοσης του ινώδους υλικού παρουσιάστηκε και αυτός στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όλες οι διαδικασίες ανακύκλωσης απορριμμάτων πτερυγίων χρειάζονται τουλάχιστον ένα, αλλά συχνά περισσότερα στάδια μείωσης μεγέθους. Συνήθως, κάποια υλικά χάνονται κατά τη διάρκεια της μείωσης του όγκου τους. Υποθέτουμε ότι χάνεται από όλες τις διαδικασίες ανακύκλωσης το 5% όλων των υλικών (ίνες και ρητίνη) και αυτό χρειάζεται για τον υπολογισμό των τελικών βαθμών απόδοσης για καθεμία διαδικασία ανακύκλωσης (P. Liu et al., 2019).

### 10.3 Ανάπτυξη μοντέλου περιβαλλοντικού αντίκτυπου

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της αξιολόγησης, κρίνεται απαραίτητη η περιγραφή κάποιων βασικών ορισμών.

- Lifetime impact: Ο αντίκτυπος χρήσης από όλη τη διάρκεια ζωής του πτερυγίου και είναι το άθροισμα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πτερυγίων σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους, και περιλαμβάνει το στάδιο της κατασκευής, της μεταφοράς, της λειτουργίας και της συντήρησης.
- EoL impact: Ο αντίκτυπος των διαδικασιών που γίνονται στο τέλος της διάρκειας ζωής του πτερυγίου.
- Recycling benefits: Το όφελος ανακύκλωσης του πτερυγίου στο τέλος διάρκειας ζωής (EoL) και ορίζεται ως η ισοδύναμη περιβαλλοντική επίπτωση της κατασκευής του ανακυκλώσιμου υλικού ή της ενέργειας που ανακτάται μέσω διαδικασιών (EoL).
- Net impact: Ο καθαρός αντίκτυπος που υπολογίζεται από το άθροισμα του οφέλους ανακύκλωσης μιας επιλογής EoL και του αντίκτυπου της διάρκειας ζωής.

$$\text{Net impact} = \text{Lifetime impact} + \text{EoL impact} + \text{Recycling benefit}$$

Το μοντέλο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατασκευάζεται και υπολογίζεται ως εξής (P. Liu et al., 2019):

- Καθαρός αντίκτυπος πτερυγίου A/Γ = Αντίκτυπος διάρκειας ζωής + αντίκτυπος στο τέλος διάρκειας ζωής + Οφέλη ανακύκλωσης.
- Αντίκτυπος διάρκειας ζωής = αντίκτυπος κατασκευής (υλικά και επεξεργασία από τη λίστα υλικών) + επιπτώσεις από τις μεταφορές ( από τις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας προς το εργοστάσιο ανακύκλωσης) + αντίκτυπος λειτουργίας & συντήρησης O&M (υλικά + μεταφορά εργαζομένων)
- Αντίκτυπος στο τέλος διάρκειας ζωής = ενέργεια μονάδας επεξεργασίας ανακύκλωσης (MJ / kg) \* η ποσότητα των επεξεργασμένων αποβλήτων (kg)
- Οφέλη ανακύκλωσης = - ((Ενσωματωμένη ενέργεια από καινούργιες ίνες \* απόδοση ανακυκλωμένων ινών \* βαθμός απόδοσης ινών \* (100% - ενέργεια μετεπεξεργασίας) + (ενσωματωμένη ενέργεια καινούργιας ρητίνης \* απόδοση ανακυκλωμένης ρητίνης \* βαθμός απόδοσης ρητίνης)) \* (100% - απώλειες επεξεργασίας)
- Η απόδοση των ανακυκλωμένων ινών ορίζεται ως ο λόγος της αντοχής σε εφελκυσμό ανακυκλωμένης ίνας με αυτή της καινούργιας ίνας.

Για τους υπολογισμούς του καθαρού αντίκτυπου ενός πτερυγίου Α/Γ χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας υλικών του πτερυγίου Sinoma 45.2A (Πίνακας 26). Επίσης συμπεριλήφθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης και μεταφοράς του πτερυγίου (Πίνακας 27).

Πίνακας 26: Ενεργειακά στοιχεία για τα υλικά του πτερυγίου Sinoma 45.2A (Liu et al., 2019).

In MJ	GF blade	
	Energy	%
CF UD	0	
GF UD	125528	40,4%
GF Bi/Triaxial fabric	160373	
Resin	255090	
Curing Agent	76534	54,8%
Structural Adhesives	38914	
Structural Adhesives Curing Agent	17490	
Steel	3350	0,5%
Copper	1859	0,3%
Aluminium	500	0,1%
Balsa	2538	0,4%
PVC	12606	1,8%
Paint	7635	1,1%
Putty	5507	0,8%
Spray Adhesives	393	0,1%
<b>Total Material Energy</b>	<b>708316</b>	<b>100%</b>
<b>Total Consumable Energy</b>	<b>40308</b>	
<b>Total Processing Energy</b>	<b>86065</b>	
<b>Total Energy in MJ</b>	<b>834689</b>	
<b>Total Energy in GJ</b>	<b>834,69</b>	
<b>Total Energy Compared to GF blade</b>		<b>100%</b>

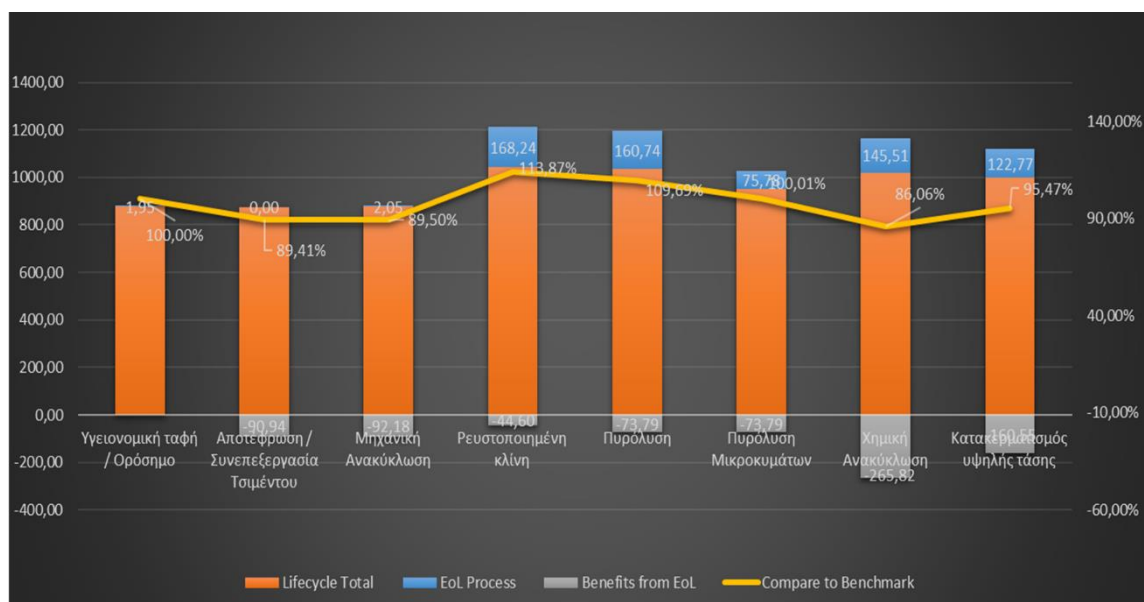
Πίνακας 27: Περιβαλλοντικός αντίκτυπος σε GigaJoule (GJ) από τα στάδια ενός κατασκευής, λειτουργίας & συντήρησης, και μεταφοράς ενός πτερυγίου GF (Liu et al., 2019).

Στάδιο	Πτερύγιο
Κατασκευή	834.69
Λειτουργία & Συντήρηση	20.7
Μεταφορά	20.0
Σύνολο	875.39

Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που αναφέρεται καταλήγουμε στον Πίνακα 28, όπου παρουσιάζεται η ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων για κάθε μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων και το αντίστοιχο Διάγραμμα 16, όπου παρουσιάζονται τα ίδια στοιχεία με τον Πίνακα 28 σε μορφή διαγράμματος για καλύτερη απεικόνιση.

Πίνακας 28: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων.

	Υγειονομική ταφή / Ορόσημο	Αποτέφρωση / Συνεπεξεργασία Τσιμέντου	Μηχανική Ανακύκλωση	Ρευστοποιημένη κλίνη	Πυρόλυση	Πυρόλυση Μικροκυμάτων	Χημική Ανακύκλωση	Κατακερματισμός παλμών υψηλής τάσης
Without EoL	875,39	875,39	875,39	875,39	875,39	875,39	875,39	875,39
EoL Process	1,95	0,00	2,05	168,24	160,74	75,78	145,51	122,77
Lifecycle Total	877,34	875,39	877,44	1043,63	1036,13	951,17	1020,89	998,16
Benefits from EoL	0,00	-90,94	-92,18	-44,60	-73,79	-73,79	-265,82	-160,55
Benefits from EoL %	0,00%	-10,39%	-10,51%	-4,27%	-7,12%	-7,76%	-26,04%	-16,08%
Net Impact GF	877,3	784,4	785,3	999,0	962,3	877,4	755,1	837,6
Compare to Benchmark (%)	100,00%	89,41%	89,50%	113,87%	109,69%	100,01%	86,06%	95,47%



Διάγραμμα 16: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά μέθοδο ανακύκλωσης πτερυγίων.

## 10.4 Συμπεράσματα

Στο Διάγραμμα 16, οι πορτοκαλί ράβδοι αντιπροσωπεύουν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής που περιλαμβάνει τις επιπτώσεις της κατασκευής, της λειτουργίας και της διαχείρισης και της μεταφοράς. Οι μπλε ράβδοι αντιπροσωπεύουν τον αντίκτυπο των διεργασιών EoL. Οι γκριζες ράβδοι παρουσιάζουν τα οφέλη της ανακύκλωσης.

Χρησιμοποιούμε θετικές τιμές για να παρουσιάσουμε την κατανάλωση ενέργειας. Δεδομένου ότι το όφελος από την ανακύκλωση αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη ενέργεια που ανακτάται, έχει αρνητική τιμή. Προσθέτοντας τον αντίκτυπο της διάρκειας ζωής στον αντίκτυπο της διεργασίας EoL και το όφελος ανακύκλωσης, προκύπτει ο καθαρός περιβαλλοντικός αντίκτυπος. Στη συνέχεια, οι καθαρές επιπτώσεις κάθε διεργασίας EoL συγκρίνονται με την επιλογή "χωρίς επεξεργασία", την υγειονομική ταφή, ως σημείο αναφοράς, η οποία απεικονίζεται με τη κίτρινη γραμμή.

Οι υψηλότερες επιπτώσεις διαπιστώνονται για τις διεργασίες ρευστοποιημένης κλίνης και πυρόλυσης λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας ανακύκλωσης και της χαμηλής αξίας ανακυκλώματος. Η πυρόλυση μικροκυμάτων φαίνεται να έχει περίπου ίδιες επιπτώσεις με αυτή της υγειονομικής ταφής. Οι καθαρές επιπτώσεις της μηχανικής ανακύκλωσης, της αποτέφρωσης, της χημικής ανακύκλωσης, της HVF είναι μεταξύ 86% και 95% των καθαρών επιπτώσεων της υγειονομικής ταφής, παρέχοντας έτσι μόνο οριακή μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το συμπέρασμα από την ανάλυση αυτή είναι επομένως ότι υπάρχει μια μικρή δυνατότητα μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις εν λόγω διεργασίες EoL.

Όπως γίνεται κατανοητό και από το Διάγραμμα 16, κάθε μέθοδος ανακύκλωσης έχει ένα περιβαλλοντικό όφελος σχετικά με την κατάληξη των πτερυγίων σε υγειονομική ταφή. Όπως επίσης είναι φανερό, η χημική ανακύκλωση επιφέρει το μέγιστο περιβαλλοντικό όφελος, και η μέθοδος HVF ακολουθεί με όφελος το μισό από αυτό της χημικής ανακύκλωσης. Η μηχανική ανακύκλωση, η οποία αναδείχθηκε η βέλτιστη μέθοδος από οικονομικής πλευράς ακολουθεί των δύο παραπάνω με ένα σημαντικό όφελος, το οποίο δεν διαφέρει όμως κατά πολύ από τις υπόλοιπες μεθόδους. Ωστόσο, το σημαντικότερο είναι ο καθαρός περιβαλλοντικός της κάθε μεθόδου ανακύκλωσης, όπου η χημική ανακύκλωση εξακολουθεί να είναι καλύτερη και στη συνέχεια ακολουθεί η μηχανική ανακύκλωση μαζί με την αποτέφρωση.

Συγκεκριμένα:

1. Χημική ανακύκλωση – 120,31 MJ/kg περιβαλλοντικό όφελος

2. Μέθοδος αποτέφρωσης - 90,94 MJ/kg περιβαλλοντικό όφελος
3. Μηχανική ανακύκλωση - 90,14 MJ/kg περιβαλλοντικό όφελος
4. HVF - 37,78 MJ/kg περιβαλλοντικό όφελος
5. MAP 2 MJ/kg περιβαλλοντικό όφελος
6. Πυρόλυση 86,95 MJ/kg περιβαλλοντικό όφελος
7. Ρευστοποιημένη κλίση 123,64 MJ/kg περιβαλλοντικό όφελος

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων γίνεται με βάση την ενέργεια και όχι άλλων πτυχών όπως για παράδειγμα οι εκπομπές. Αυτό συμβαίνει γιατί όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν σε δεδομένα και μονάδες ενέργειας, ενώ παράλληλα με αυτό τον τρόπο είναι εύκολο να συγκριθεί το περιβαλλοντικό όφελος, εφόσον μία αιολική μονάδα με ανεμογεννήτριες παράγει ενέργεια.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται μία ανάλυση των μεθόδων ανακύκλωσης όπου λαμβάνονται υπόψη τόσο τα κόστη όσο και τα περιβαλλοντικά οφέλη των παραπάνω μεθόδων ανακύκλωσης.



## 11 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη μελέτη, εξετάστηκαν οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις διαφόρων επιλογών στο τέλος του κύκλου ζωής (EoL) για τη διαχείριση των αποβλήτων από τα πτερυγία των ανεμογεννητριών, προκειμένου να καθοριστεί η «βέλτιστη» λύση τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική άποψη. Γενικά, τα οφέλη της ανακύκλωσης βρέθηκαν να είναι χαμηλά και ο καθαρός περιβαλλοντικός αντίκτυπος από τις επιλογές EoL βρέθηκε υψηλότερος ή ίσος με αυτόν της απλής υγειονομικής ταφής στις θερμικές μεθόδους, ενώ στις υπόλοιπες υπάρχει κάποιο περιβαλλοντικό όφελος, αλλά όχι πολύ υψηλό. Ακόμη, οι περισσότερες επιλογές EoL προκαλούν οικονομικές απώλειες. Επίσης βρέθηκε ότι η μηχανική ανακύκλωση αποφέρει μικρά κέρδη, ενώ η χημική ανακύκλωση μπορεί να αποφέρει σημαντικά κέρδη εάν βελτιωθεί η διαδικασία της, αν και αυτή τη στιγμή έχει υψηλό κόστος.

Όμως, εάν τα απόβλητα των πτερυγίων πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία για λόγους όπως η συμμόρφωση με τη νομοθεσία, τότε οι επιλογές αναλύονται με βάση το επίπεδο τεχνολογικής τους ετοιμότητας. Για τις συμβατικές επιλογές, η αποτέφρωση είναι γενικά προτιμότερη από την υγειονομική ταφή λόγω του γεγονότος ότι παράγει ενέργεια. Αν και η ποσότητα της ενέργειας που ανακτάται είναι μικρή, κάποια ενέργεια ανακτάται μέσω της αποτέφρωσης, γεγονός που την καθιστά καλύτερη σε σχέση με την υγειονομική ταφή. Σχετικά με τις επιλογές ανακύκλωσης που είναι ήδη διαθέσιμες ή σχεδόν έτοιμες, μόνο η μηχανική ανακύκλωση μπορεί να μειώσει τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να αποφέρει κέρδη. Άλλες διεργασίες, όπως η ρευστοποιημένη κλίνη και η πυρόλυση έχουν στην πραγματικότητα μεγαλύτερες καθαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την υγειονομική ταφή, επομένως δεν αποτελούν ευνοϊκές επιλογές. Επιπλέον οι επιλογές εργαστηριακής κλίμακας μπορεί να έχουν ελαφρώς καλύτερη απόδοση στο μέλλον από τις ώριμες τεχνολογίες. Συγκεκριμένα, η χημική ανακύκλωση παραμένει η πιο αποτελεσματική επιλογή, καθώς ανακτά τόσο ίνες όσο ρητίνη. Δεδομένου ότι η αξία της ρητίνης είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή των ινών γυαλιού, η χημική ανακύκλωση τείνει επίσης να είναι πιο οικονομικά βιώσιμη.

Ουσιαστικά, αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει βέλτιστη επιλογή ανακύκλωσης. Μια λύση είναι η παράταση ζωής των πτερυγίων και στη συνέχεια η συγκέντρωση τους, έως ότου ωριμάσουν οι τεχνολογίες ανακύκλωσής του. Εάν πρόκειται να ανακυκλωθούν, η μηχανική ανακύκλωση είναι αυτή τη στιγμή η «καλύτερη» επιλογή, ενώ η χημική ανακύκλωση είναι πιθανό να είναι η «καλύτερη» επιλογή στο μέλλον. Επιπρόσθετα, η αποτέφρωση είναι μια αξιόπιστη συμβατική επιλογή για την ανάκτηση ενέργειας και τη μείωση των αποβλήτων που

διαφορετικά θα κατέληγαν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για πτερύγια που περιέχουν ανθρακονήματα, λόγω του πολύ υψηλού κόστους των ανθρακονημάτων, η χημική ανακύκλωση θα έχει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα καθώς το ανακύκλωμα της περιέχει σχεδόν μόνο ίνες, αλλά και η HVF θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, γιατί οι ανακτημένες ίνες έχουν υψηλή διατήρηση της αντοχής τους σε εφελκυσμό. Τέλος, παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες επιγραμματικά τα συγκεντρωτικά στοιχεία της κάθε μεθόδου ανακύκλωσης των πτερυγίων (Πίνακας 29).

Πίνακας 29 : Συγκεντρωτικά δεδομένα των μεθόδων ανακύκλωσης των πτερυγίων

Μέθοδος	Κατάσταση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αποτέφρωση	Διαθέσιμη σε βιομηχανική κλίμακα	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Εξαιρετικά ταχεία και αποτελεσματική.</li> <li>❖ Δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων</li> <li>❖ Ελαφρώς αυξανόμενη ενεργειακή απόδοση της τσιμεντοβιομηχανίας</li> <li>❖ Δεν υπάρχουν κατάλοιπα στάχτης</li> <li>❖ Βελτιωμένες ιδιότητες του παραγόμενου υλικού</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Μειώνει την αξία των ινών σε εκείνη του ανθρακικού ασβεστίου</li> <li>❖ Δεν αποτελεί ουσιαστικά μέθοδο ανακύκλωσης</li> </ul>
Μηχανική	Διαθέσιμη σε βιομηχανική κλίμακα	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Αποτελεσματική</li> <li>❖ Μικρό κόστος επένδυσης</li> <li>❖ Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας</li> <li>❖ Άμεσα εφαρμόσιμη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Περιορισμένες εφαρμογές λόγω του μήκους των ινών</li> </ul>
Πυρόλυση	Διαθέσιμη σε βιομηχανική κλίμακα	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Διαθέσιμη σε εμπορική κλίμακα</li> <li>❖ Αποδεκτό ποσοστό απόδοσης ανακυκλωμένων ινών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Υψηλή κατανάλωση ενέργειας</li> <li>❖ Υποβάθμιση της αντοχής των ινών</li> </ul>
Ρευστοποιημένη Κλίνη	Για εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Μπορεί να διαχειριστεί μικτά απόβλητα</li> <li>❖ Διαθέσιμη τα επόμενα χρόνια</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Υψηλή κατανάλωση ενέργειας</li> <li>❖ Υποβάθμιση της αντοχής των ινών</li> </ul>
MAP	Εργαστηριακή Κλίμακα	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Η βέλτιστη ενεργειακά Θερμική επεξεργασία</li> <li>❖ Αποδεκτό ποσοστό απόδοσης ανακυκλωμένων ινών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Υποβάθμιση της αντοχής των ινών</li> <li>❖ Δεν είναι εμπορικά εφαρμόσιμη προς το παρόν</li> </ul>
HVF	Εργαστηριακή Κλίμακα	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Πολύ καλή διατήρηση αντοχής των ανακυκλωμένων ινών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Απαγορευτικό κόστος για τις ίνες γυαλιού</li> <li>❖ Δεν είναι εμπορικά εφαρμόσιμη προς το παρόν</li> </ul>
Χημική	Εργαστηριακή Κλίμακα	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Υψηλό ποσοστό απόδοσης ανακυκλωμένων ινών</li> <li>❖ Αποδεκτή διατήρηση αντοχής των ανακυκλωμένων ινών</li> <li>❖ Ανάκτηση ρητίνης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Υψηλό κόστος</li> <li>❖ Δεν είναι εμπορικά εφαρμόσιμη προς το παρόν</li> </ul>

## 12 Περιορισμοί και μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει κάποιους περιορισμούς και υποθέσεις, μερικοί από τους οποίους και τις οποίες σημειώθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Ένας πολύ βασικός περιορισμός αποτελεί η πρόσβαση και η διαθεσιμότητα των δεδομένων, ο οποίος περιορίζει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, οι προγνώσεις της εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα που ήταν διαθέσιμες για να γίνει η πρόγνωση ανά έτος, ήταν περιορισμένες και ως προς τον αριθμό τους και ως προς τα έτη, με αποτέλεσμα στην τελευταία δεκαετία που εξετάζεται στα πλαίσια της διπλωματικής η πρόβλεψη των αποβλήτων να μην είναι τόσο ακριβής και δεν δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί σε επίπεδο νομών όπως έγινε για τα προηγούμενα έτη. Επίσης, μπορεί να υπάρχουν και άλλοι πιθανοί παράγοντες που επηρεάζουν το απόθεμα αποβλήτων, όπως κάποια νομοθεσία ή η δημιουργία και αντικατάσταση των πτερυγίων με πιο σύγχρονα.

Ένας άλλος σημαντικός περιορισμός της παρούσας εργασίας είναι η έλλειψη δεδομένων και πληροφοριών από προηγούμενες έρευνες σχετικά με μια πιο λεπτομερή κοστολόγηση των μεθόδων ανακύκλωσης και με τις εκπομπές που παράγει η κάθε μέθοδος για να γίνει ακριβέστερα η σύγκριση των μεθόδων ανακύκλωσης ως προς τον παράγοντα περιβάλλον. Επιπρόσθετα, δεν ήταν δυνατό να βρεθούν άλλες πληροφορίες και κριτήρια που θα βοηθούσαν στη δημιουργία και στη χρήση ενός μοντέλου πολυκριτηριακής ανάλυσης. Το μόνο κριτήριο που ήταν διαθέσιμο ήταν το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας της κάθε μεθόδου (TRL) που χρησιμοποιήθηκε ποιοτικά στη προηγούμενη ενότητα ως προς το στάδιο που βρίσκεται η κάθε μέθοδος.

Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο, η ακρίβειά της μπορεί να βελτιωθεί. Οι περιορισμοί που εντοπίστηκαν αφήνουν μεγάλες δυνατότητες για μελλοντική εργασία. Ο αναγνώστης θα πρέπει να θεωρεί τα αποτελέσματα περισσότερο ως συγκρίσεις παρά να εστιάζει στους αριθμούς. Όταν γίνουν διαθέσιμα ακριβέστερα δεδομένα, όπως η ενέργεια επεξεργασίας της ανακύκλωσης σε εφαρμογές βιομηχανικής κλίμακας, η ακριβής τιμή πώλησης του ανακυκλώματος και το κόστος ανακύκλωσης, το μοντέλο περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οικονομικών ωφελειών θα μπορούσε εύκολα να ενημερωθεί και να οδηγήσει στη θέσπιση μιας «βέλτιστης» μεθόδου ανακύκλωσης των πτερυγίων ή ακόμα και περισσότερων από μια.

## 13 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- *Diesel prices in Greece 2021 | Statista*. (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from <https://www.statista.com/statistics/603711/diesel-fuel-prices-greece/>
- Agrawal, G. P. (2020). Chapter 2 - Directional couplers. *Applications of Nonlinear Fiber Optics, Third Edition, 0*, 1–547. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01162-7>
- Ajhar, M., Wens, B., Stollenwerk, K. H., Spalding, G., Yüce, S., & Melin, T. (2010). Suitability of Tedlar® gas sampling bags for siloxane quantification in landfill gas. *Talanta*, *82*(1), 92–98. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2010.04.001>
- Åkesson, D., Foltynowicz, Z., Christéen, J., & Skrifvars, M. (2012). Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *31*(17), 1136–1142. <https://doi.org/10.1177/0731684412453512>
- André, A., Kullberg, J., Nygren, D., Mattsson, C., Nedev, G., & Haghani, R. (2020). Re-use of wind turbine blade for construction and infrastructure applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *942*(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012015>
- Aoudia, K., Azem, S., Aït Hocine, N., Gratton, M., Pettarin, V., & Seghar, S. (2017). Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. *Waste Management*, *60*, 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051>
- Appleton, T. J., Colder, R. I., Kingman, S. W., Lowndes, I. S., & Read, A. G. (2005). Microwave technology for energy-efficient processing of waste. *Applied Energy*, *81*(1), 85–113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.07.002>
- Bank, L. C., Arias, F. R., Yazdanbakhsh, A., Gentry, T. R., Al-Haddad, T., Chen, J. F., & Morrow, R. (2018). Concepts for reusing composite materials from decommissioned wind turbine blades in affordable housing. *Recycling*, *3*(1). <https://doi.org/10.3390/recycling3010003>
- Beauson, J., Ilsted Bech, J., & Brøndsted, P. (2013). Composite recycling: Characterizing end of life wind turbine blade material. *ICCM International Conferences on Composite Materials, 2013-July*, 886–893.
- Beauson, Justine, & Brøndsted, P. (2016). Wind turbine blades: An end of life perspective. *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology, Schleisner 2000*, 421–432. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39095-6\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39095-6_23)
- Beauson, Justine, Lilholt, H., & Brøndsted, P. (2014). Recycling solid residues recovered from glass fibre-reinforced composites - A review applied to wind turbine blade materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *33*(16), 1542–1556. <https://doi.org/10.1177/0731684414537131>
- Bladeless Wind Turbine Could Be 2X as Efficient as Conventional Designs*. (n.d.). Retrieved October 3, 2022, from <https://www.treehugger.com/new-bladeless-wind-turbine-claimed-be-twice-efficient-conventional-designs-4858723>
- Buragohain, M. K. (2017). Composite structures: Design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing. *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*, 1–732. <https://doi.org/10.1201/9781315268057/COMPOSITE-STRUCTURES-MANOJ-KUMAR-BURAGOHAIN>
- Carbon fiber vs. fiberglass - Infogram*. (n.d.). Retrieved December 17, 2022, from <https://infogram.com/carbon-fiber-vs-fiberglass>
- Chen, J., Wang, J., & Ni, A. (2019). Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *38*(12), 567–577. <https://doi.org/10.1177/0731684419833470>
- Chikhradze, N. M., Marquis, F. D. S., & Abashidze, G. S. (2015). Hybrid fiber and nanopowder

- reinforced composites for wind turbine blades. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(1), 60–67. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2015.01.002>
- Conroy, A., Halliwell, S., & Reynolds, T. (2006). Composite recycling in the construction industry. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1216–1222. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.031>
- Cousins, D. S., Suzuki, Y., Murray, R. E., Samaniuk, J. R., & Stebner, A. P. (2019). Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1252–1263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.286>
- Cunliffe, A. M., & Williams, P. T. (2003). Characterisation of products from the recycling of glass fibre reinforced polyester waste by pyrolysis. *Fuel*, 82(18), 2223–2230. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00129-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00129-7)
- Dai, D., & Fan, M. (2014). Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications. *Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Applications*, 3–65. <https://doi.org/10.1533/9780857099228.1.3>
- De Moraes, V. T., Jermolovicus, L. A., Tenório, J. A. S., Lebrão, S. M. G., & Lebrãoa, G. W. (2019). Microwave-assisted recycling process to recover fiber from fiberglass polyester composites. *Materials Research*, 22(1), 1–8. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0389>
- Duflou, J. R., Deng, Y., Van Acker, K., & Dewulf, W. (2012). Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study. *MRS Bulletin*, 37(4), 374–382. <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.33>
- Durai Prabhakaran, R. T., Andersen, T. L., Markussen, C. M., Madsen, B., & Lilholt, H. (2013). Tensile and compression properties of hybrid composites - A comparative study. *ICCM International Conferences on Composite Materials, 2013-July*, 1029–1035.
- Electricity price statistics - Statistics Explained*. (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics#Electricity\\_prices\\_for\\_non-household\\_consumers](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers)
- Fecko, D. (2006). High strength glass reinforcements still being discovered. *Reinforced Plastics*, 50(4), 40–44. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(06\)70976-6](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(06)70976-6)
- Feih, S., Boiocchi, E., Mathys, G., Mathys, Z., Gibson, A. G., & Mouritz, A. P. (2011). Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres. *Composites Part B: Engineering*, 42(3), 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.12.020>
- Final Report Summary - SELFRAG CFRP*. (n.d.). Retrieved June 10, 2021, from <https://cordis.europa.eu/project/id/323454/reporting>
- 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(October 2020), 112269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112269>
- Ganesh, M., Kalagi, R., Rajashekar Patil, D., & Narayan Nayak, M. (2016). Natural Fiber Reinforced Polymer Composite Materials for Wind Turbine Blade Applications. *International Journal of Scientific Development and Research*, 1(9), 28–37. [www.ijedr.org](http://www.ijedr.org)
- Gipe, P., & Möllerström, E. (2022). An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s. *Wind Engineering*, 46(6), 1973–2004. <https://doi.org/10.1177/0309524X221117825>
- Goudarzi, N., & Zhu, W. D. (2013). A Review on the Development of the Wind Turbine Generators across the World. *International Journal of Dynamics and Control*, 1(2), 192–202. <https://doi.org/10.1007/s40435-013-0016-y>
- Grujicic, M., Arakere, G., Subramanian, E., Sellappan, V., Vallejo, A., & Ozen, M. (2010).

- Structural-response analysis, fatigue-life prediction, and material selection for 1 MW horizontal-axis wind-turbine blades. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(6), 790–801. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9558-8>
- Haber Kern, H., & Kg, C. (2006). *Tailor-made reinforcements*. *April*, 28–33.
- Hansen W4 series. (n.d.). Hansentransmissions.com. Retrieved August 19, 2022, from [http://www.hansentransmissions.com/en/hansen\\_w4.html](http://www.hansentransmissions.com/en/hansen_w4.html)
- Historical exchange rates from 1953 with graph and charts. (n.d.-a). Retrieved June 8, 2021, from <https://fxtop.com/en/historical-exchange-rates.php?A=1&C1=EUR&C2=GBP&YA=1&DD1=01&MM1=01&YYYY1=1997&B=1&P=&I=1&DD2=21&MM2=05&YYYY2=2021&btnOK=Go%21>
- Historical exchange rates from 1953 with graph and charts. (n.d.-b). Retrieved June 8, 2021, from <https://fxtop.com/en/historical-exchange-rates.php?A=1&C1=EUR&C2=USD&YA=1&DD1=01&MM1=01&YYYY1=1997&B=1&P=&I=1&DD2=21&MM2=05&YYYY2=2021&btnOK=Go%21>
- Holmes, J. W., Brøndsted, P., Sørensen, B. F., Jiang, Z., Sun, Z., & Chen, X. (2009). Development of a Bamboo-Based Composite as a Sustainable Green Material for Wind Turbine Blades. *Http://Dx.Doi.Org/10.1260/030952409789141053*, 33(2), 197–210. <https://doi.org/10.1260/030952409789141053>
- Hourly labour costs - Statistics Explained. (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Hourly\\_labour\\_costs](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Hourly_labour_costs)
- Howarth, J., Mareddy, S. S. R., & Mativenga, P. T. (2014). Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite. *Journal of Cleaner Production*, 81, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.023>
- Hwea, T., & Energy, W. (2020). *HWEA Wind Energy Statistics – 2020 Total capacity to the grid ( MW ) per year HWEA Wind Energy Statistics – 2020 Capacity ( MW ) per region*.
- Jensen, J. P., & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97(October 2017), 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>
- Jensen, Jonas Pagh. (2019). Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. *Wind Energy*, 22(2), 316–326. <https://doi.org/10.1002/we.2287>
- Jensen, M. F., & Branner, K. (2013). Introduction to wind turbine blade design. *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, 3–28. <https://doi.org/10.1533/9780857097286.1.3>
- Jiang, L., Ulven, C. A., Gutschmidt, D., Anderson, M., Balo, S., Lee, M., & Vigness, J. (2015). Recycling carbon fiber composites using microwave irradiation: Reinforcement study of the recycled fiber in new composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(41), 42658. <https://doi.org/10.1002/APP.42658>
- Job, S. (2013). Recycling glass fibre reinforced composites - History and progress. *Reinforced Plastics*, 57(5), 19–23. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(13\)70151-6](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(13)70151-6)
- Joustra, J., Flipsen, B., & Balkenende, R. (2021). Structural reuse of high end composite products: A design case study on wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, 167(December 2020), 105393. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105393>
- 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(2018), 1136–1143. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.281>
- Kao, C. C., Ghita, O. R., Hallam, K. R., Heard, P. J., & Evans, K. E. (2012). Mechanical studies of single glass fibres recycled from hydrolysis process using sub-critical water. *Composites*

- Part A: *Applied Science and Manufacturing*, 43(3), 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.011>
- Karuppannan Gopalraj, S., & Kärki, T. (2020). A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. *SN Applied Sciences*, 2(3), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>
- Keith, M. J., Oliveux, G., & Leeke, G. A. (2016). Optimisation of solvolysis for recycling carbon fibre reinforced composites. *ECCM 2016 - Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials, July*.
- Khare, K. S., & Khare, R. (2013). Effect of carbon nanotube dispersion on glass transition in cross-linked epoxy-carbon nanotube nanocomposites: Role of interfacial interactions. *Journal of Physical Chemistry B*, 117(24), 7444–7454. <https://doi.org/10.1021/jp401614p>
- Knight, C. C. (2013). *Recycling High-Performance Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Using Sub-Critical and Supercritical Water*. 83–90. [http://purl.flvc.org/fsu/fd/FSU\\_migr\\_etd-7450](http://purl.flvc.org/fsu/fd/FSU_migr_etd-7450)
- Krauklis, A. E., Karl, C. W., Gagani, A. I., & Jørgensen, J. K. (2021). Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. *Journal of Composites Science*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>
- Kyaw Oo D’Amore, G., Caniato, M., Travan, A., Turco, G., Marsich, L., Ferluga, A., & Schmid, C. (2017). Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1306–1315. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214>
- La Rosa, A. D., Banatao, D. R., Pastine, S. J., Latteri, A., & Cicala, G. (2016). Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment. *Composites Part B: Engineering*, 104, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.015>
- Li, X., Bai, R., & McKechnie, J. (2016). Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes. *Journal of Cleaner Production*, 127(2016), 451–460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.139>
- Lichtenegger, G., Rentizelas, A. A., Trivyza, N., & Siegl, S. (2020). Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. *Waste Management*, 106, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.018>
- Liu, P. (2017). *REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF WIND TURBINE BLADES*. November.
- Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, 62, 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.043>
- Liu, Y., Farnsworth, M., & Tiwari, A. (2017). A review of optimisation techniques used in the composite recycling area: State-of-the-art and steps towards a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1775–1781. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.038>
- M. Saad, M. M. (2014). Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines. *IOSR Journal of Engineering*, 4(8), 27–30. <https://doi.org/10.9790/3021-04822730>
- Ma, P. C., & Zhang, Y. (2014). Perspectives of carbon nanotubes/polymer nanocomposites for wind blade materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.008>

- Ma, Y., Kim, D., & Nutt, S. R. (2017). Chemical treatment for dissolution of amine-cured epoxies at atmospheric pressure. *Polymer Degradation and Stability*, *146*(April), 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.10.014>
- Ma, Y., & Nutt, S. (2018). Chemical treatment for recycling of amine/epoxy composites at atmospheric pressure. *Polymer Degradation and Stability*, *153*, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.011>
- Malumbres, L. (2017). *Wind Turbine Blades Decommissioning and Recycling*. 8. <http://www.lifebrio.eu/es/>
- Marques, A. T. (2011). Fibrous materials reinforced composites production techniques. *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*, 191–215. <https://doi.org/10.1533/9780857095583.3.191>
- Marsh, G. (2001). Facing up to the recycling challenge. *Reinforced Plastics*, *45*(6), 22–26. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(01\)80204-6](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(01)80204-6)
- Mativenga, P. T., Shuaib, N. A., Howarth, J., Pestalozzi, F., & Woidasky, J. (2016). High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, *65*(1), 45–48. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.107>
- Mattsson, C., André, A., Juntikka, M., Tr nkle, T., & Sott, R. (2020). Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *942*(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012013>
- Medici, P., van den Dobbelen, A., & Peck, D. (2020). Safety and health concerns for the users of a playground, built with reused rotor blades from a dismantled wind turbine. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(9), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su12093626>
- Meng, F., McKechnie, J., Turner, T. A., & Pickering, S. J. (2017). Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *100*, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.05.008>
- Merugula, L., Khanna, V., & Bakshi, B. R. (2012). Reinforced wind turbine blades - An environmental life cycle evaluation. *Environmental Science and Technology*, *46*(17), 9785–9792. <https://doi.org/10.1021/es301343p>
- Methyl-Ethyl-Ketone-Peroxide - an overview | ScienceDirect Topics*. (n.d.). Retrieved December 27, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methyl-ethyl-ketone-peroxide>
- Mishnaevsky, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. *Materials*, *14*(5), 1–26. <https://doi.org/10.3390/ma14051124>
- Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*, *10*(11), 1–24. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
- Murray, R. E., Jenne, S., Snowberg, D., Berry, D., & Cousins, D. (2019). Techno-economic analysis of a megawatt-scale thermoplastic resin wind turbine blade. *Renewable Energy*, *131*, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.032>
- N/A. (2021). FiberEUse, Large scale demonstration of new circular economy value-chains based on the reuse of end-of-life fibre reinforced composites. <https://cordis.europa.eu/project/id/730323>, 2020, 1–7. <https://doi.org/10.3030/730323>
- Naqvi, S. R., Prabhakara, H. M., Bramer, E. A., Dierkes, W., Akkerman, R., & Brem, G. (2018). A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, *136*(November 2017), 118–129.



- <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.013>
- Natural gas price statistics - Statistics Explained.* (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Natural\\_gas\\_price\\_statistics#Natural\\_gas\\_prices\\_for\\_non-household\\_consumers](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Natural_gas_price_statistics#Natural_gas_prices_for_non-household_consumers)
- Nijssen, R. P. L., & TU Delft, F. of A. E. D. and P. of C. S. G. (2006). *Fatigue life prediction and strength degradation of wind turbine reactor blade composites.* (Issue October).
- Noise Barrier in Thisted 2019 - Miljøskærm.* (n.d.). Retrieved January 3, 2023, from <https://miljoskarm.dk/en/noise-barrier-in-thisted-2019/>
- O’Leary, K., Pakrashi, V., & Kelliher, D. (2019). Optimization of composite material tower for offshore wind turbine structures. *Renewable Energy*, 140, 928–942. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.101>
- Offshore wind is coming to Greece | WindEurope.* (n.d.). Retrieved June 11, 2021, from <https://windeurope.org/newsroom/news/offshore-wind-is-coming-to-greece/>
- Oliveux, G., Bailleul, J. L., & Salle, E. L. G. La. (2012). Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1809–1818. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.06.008>
- Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61–99. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
- Ong, C., & Tsai, S. W. (2000). *The Use of Carbon Fibers in Wind Turbine Blade Design: A SERI-8 Blade Example SAND2000-0478.*
- Palmer, J. (2009). *Mechanical recycling of automotive composites for use as reinforcement in thermoset composites.* <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10036/72313>
- Palmer, J., Savage, L., Ghita, O. R., & Evans, K. E. (2010). Sheet moulding compound (SMC) from carbon fibre recyclate. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(9), 1232–1237. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.05.005>
- Paulsen, E. B., & Enevoldsen, P. (2021). A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades. *Energies*, 14(14), 1–13. <https://doi.org/10.3390/en14144247>
- Pender, K., & Yang, L. (2020). Regenerating performance of glass fibre recycled from wind turbine blade. *Composites Part B: Engineering*, 198(June), 108230. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108230>
- Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials-current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1206–1215. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>
- Pickering, S. J., Kelly, R. M., Kennerley, J. R., Rudd, C. D., & Fenwick, N. J. (2000). A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites. *Composites Science and Technology*, 60(4), 509–523. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00154-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00154-2)
- Pickering, S. J., Turner, T. A., Meng, F., Morris, C. N., Heil, J. P., Wong, K. H., & Melendi, S. (2015). Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites. *CAMX 2015 - Composites and Advanced Materials Expo*, 2384–2394.
- Piñero-Hernanz, R., García-Serna, J., Dodds, C., Hyde, J., Poliakov, M., Cocero, M. J., Kingman, S., Pickering, S., & Lester, E. (2008). Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions. *Journal of Supercritical Fluids*, 46(1), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.02.008>
- Products - Miljøskærm.* (n.d.). Retrieved January 3, 2023, from <https://miljoskarm.dk/en/products/#barriers>

- RAE GeoPortal. (n.d.). Retrieved June 11, 2021, from <https://geo.rae.gr/>
- Rentizelas, A., Trivyza, N., Oswald, S., & Siegl, S. (2021). Reverse supply network design for circular economy pathways of wind turbine blades in Europe. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1870016>
- Ribeiro, M. C.S., Fiúza, A., & Ferreira, A. J. M. (2017). Recycling and reuse of fiber reinforced polymer wastes in concrete composite materials. *Handbook of Composites from Renewable Materials*, 1–8, 155–173. <https://doi.org/10.1002/9781119441632.ch46>
- Ribeiro, Maria Cristina Santos, Fiúza, A., Ferreira, A., Dinis, M. de L., Castro, A. C. M., Meixedo, J. P., & Alvim, M. R. (2016). Recycling approach towards sustainability advance of composite materials' industry. *Recycling*, 1(1), 178–193. <https://doi.org/10.3390/recycling1010178>
- Rosa GARCÍA SÁNCHEZ, A. Pehlken L. (2014). *ON THE SUSTAINABILITY OF WIND ENERGY REGARDING MATERIAL USAGE*.
- Rouholamin, D., Shyng, Y. T., Savage, L., & Ghita, O. (2014). A comparative study into mechanical performance of glass fibres recovered through mechanical grinding and high voltage pulse power fragmentation. *16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014, June, 22–26*.
- Sayer, F., Bürkner, F., Buchholz, B., Strobel, M., Van Wingerde, A. M., Busmann, H. G., & Seifert, H. (2013). Influence of a wind turbine service life on the mechanical properties of the material and the blade. *Wind Energy*, 16(2), 163–174. <https://doi.org/10.1002/we.536>
- Schleisner, L. (2000). Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. *Renewable Energy*, 20(3), 279–288. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00123-8)
- Sheet Molding Compound, Bulk Molding Compound*. (n.d.). Retrieved December 21, 2022, from <https://www.idicomposites.com/smc-bmc-overview.php>
- Shuaib, N. A., & Mativenga, P. T. (2016). Effect of Process Parameters on Mechanical Recycling of Glass Fibre Thermoset Composites. *Procedia CIRP*, 48, 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.206>
- Sokoli, H. U., Simonsen, M. E., & Sjøgaard, E. G. (2017). Investigation of degradation products produced by recycling the solvent during chemical degradation of fiber-reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(17), 1286–1296. <https://doi.org/10.1177/0731684417707060>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.021>
- Statistics | Eurostat*. (n.d.). Retrieved January 4, 2023, from [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/STS\\_INPP\\_A\\_\\_custom\\_4378865/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/STS_INPP_A__custom_4378865/default/table?lang=en)
- Stewart, M., & Arnold, K. (2008). Gas-liquid and liquid-liquid separators. *Gas-Liquid and Liquid-Liquid Separators*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8979-3.X0001-3>
- Suzuki, T., & Takahashi, J. (2005). Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars. *Ninth Japan International SAMPE Symposium JISSE-9*, 14–19. <http://j-t.o.oo7.jp/publications/051129/S1-02.pdf>
- The Cost-to-Capacity Method and Scale Factors - evcValuation*. (n.d.). Retrieved January 16, 2023, from <https://evcvaluation.com/the-cost-to-capacity-method-and-scale-factors/>
- The Future of Wind Turbines? No Blades | WIRED*. (n.d.). Retrieved August 19, 2022, from <https://www.wired.com/2015/05/future-wind-turbines-no-blades/>
- Thomason, J. L., Yang, L., & Pender, K. (2020). Upgrading and reuse of glass fibre recycled from end-of-life composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,

- 942(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012002>
- Torres, A., De Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Chomón, M. J., & Kondra, G. (2009). Recycling of the solid residue obtained from the pyrolysis of fiberglass polyester sheet molding compound. *Advances in Polymer Technology*, 28(2), 141–149. <https://doi.org/10.1002/adv.20150>
- Torres, A., De Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Legarreta, J. A., Cabrero, M. A., González, A., Chomón, M. J., & Gondra, K. (2000). Recycling by pyrolysis of thermoset composites: characteristics of the liquid and gaseous fuels obtained. *Fuel*, 79(8), 897–902. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00220-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00220-3)
- Tribe, M. A., & Alpine, R. L. W. (1986). Scale economies and the “0.6 rule.” *Engineering Costs and Production Economics*, 10(1), 271–278. [https://doi.org/10.1016/0167-188X\(86\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0167-188X(86)90053-4)
- Turbines of the year: Rotor blades | Windpower Monthly*. (n.d.). Retrieved December 20, 2022, from <https://www.windpowermonthly.com/article/1419306/turbines-year-rotor-blades>
- Vertical Axis Wind Turbines: Great In 1890, Also-rans In 2014 - CleanTechnica*. (n.d.). Retrieved August 19, 2022, from <https://cleantechnica.com/2014/04/07/vertical-axis-wind-turbines-great-1890-also-rans-2014/>
- Vo Dong, P. A., Azzaro-Pantel, C., & Cadene, A. L. (2018). Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 133(August 2017), 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.024>
- Wagner, H. J. (2019). Introduction to wind energy systems. *EPJ Web of Conferences*, 189. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900005>
- Wang, Y., Cui, X., Yang, Q., Deng, T., Wang, Y., Yang, Y., Jia, S., Qin, Z., & Hou, X. (2015). Chemical recycling of unsaturated polyester resin and its composites via selective cleavage of the ester bond. *Green Chemistry*, 17(9), 4527–4532. <https://doi.org/10.1039/c5gc01048a>
- Welstead, J., Hirst, R., Keogh, D., Robb G. and Bainsfair, R. (2013). *Research and guidance on restoration and decommissioning of onshore wind farms*. 5, 104. [http://www.snh.org.uk/pdfs/publications/commissioned\\_reports/591.pdf](http://www.snh.org.uk/pdfs/publications/commissioned_reports/591.pdf)
- Wet Lay-up/Hand Lay-up Manufacturing Process for Composites | MasterBond.com*. (n.d.). Retrieved December 16, 2022, from <https://www.masterbond.com/industries/wet-lay-uphand-lay-manufacturing-process-composites>
- What happens to all the old wind turbines? - BBC News*. (n.d.). Retrieved June 12, 2021, from <https://www.bbc.com/news/business-51325101>
- What is a Magnetron? (with pictures)*. (n.d.). Retrieved December 27, 2022, from <https://www.allthescience.org/what-is-a-magnetron.htm>
- What is Vacuum-assisted Resin Transfer Molding (VARTM)?* (n.d.). Retrieved December 16, 2022, from <https://www.addcomposites.com/post/vacuum-assisted-resin-transfer-molding>
- Wind Energy Basics*. (n.d.). American Wind Energy Association. Retrieved August 19, 2022, from [http://www.awea.org/faq/wwt\\_basics.html](http://www.awea.org/faq/wwt_basics.html)
- Wind Europe*. (2021). 36. [https://proceedings.windeurope.org/biplatform/rails/active\\_storage/disk/eyJfcMfPbHMiOmsibWVzc2FnZSI6IkJBaDdDRG9JYTJWNVNTSWhNamhwZE4k5uTXpjMnczTW1sMmJHNWthSE0yTTNRd1ltWXpiZ1k2QmtWVU9oQmthWE53YjNOcGRhbHZia2tpQVk1cGJteHBibVU3SUdacGJHVnVZVzFsUFNKWGFxNWtSWFZ](https://proceedings.windeurope.org/biplatform/rails/active_storage/disk/eyJfcMfPbHMiOmsibWVzc2FnZSI6IkJBaDdDRG9JYTJWNVNTSWhNamhwZE4k5uTXpjMnczTW1sMmJHNWthSE0yTTNRd1ltWXpiZ1k2QmtWVU9oQmthWE53YjNOcGRhbHZia2tpQVk1cGJteHBibVU3SUdacGJHVnVZVzFsUFNKWGFxNWtSWFZ)
- Wind turbine blades: Glass vs. carbon fiber. (n.d.). *Www.Compositesworld.Com*. Retrieved

- August 19, 2022, from <http://www.compositesworld.com/articles/wind-turbine-blades-glass-vs-carbon-fiber>
- “Wind Turbine Design Cost and Scaling Model”, *Technical Report NREL/TP-500-40566*, December, 2006, page 35, 36. (n.d.). Retrieved August 19, 2022, from <http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40566.pdf>
- WindEurope. (2017). *Discussion paper on managing composite blade waste*.
- WindEurope. (2020). Accelerating Wind Turbine Blade Circularity. *Thematic Reports, May*, 11–13. <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/accelerating-wind-turbine-blade-circularity/>
- Windmills and Their Technology since the Middle Ages – Brewminate: A Bold Blend of News and Ideas*. (n.d.). Retrieved December 19, 2022, from <https://brewminate.com/windmills-and-their-technology-since-the-middle-ages/>
- Witik, R. A., Teuscher, R., Michaud, V., Ludwig, C., & Månson, J. A. E. (2013). Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 49, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.02.009>
- WWF, & NOA. (2017). *Long Term Plan for the Greek Energy System. October*, 138.
- Yang, P., Zhou, Q., Li, X. Y., Yang, K. K., & Wang, Y. Z. (2014). Chemical recycling of fiber-reinforced epoxy resin using a polyethylene glycol/NaOH system. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(22), 2106–2114. <https://doi.org/10.1177/0731684414555745>
- Yavari, F., Rafiee, M. A., Rafiee, J., Yu, Z. Z., & Koratkar, N. (2010). Dramatic increase in fatigue life in hierarchical graphene composites. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2(10), 2738–2743. [https://doi.org/10.1021/AM100728R/SUPPL\\_FILE/AM100728R\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/AM100728R/SUPPL_FILE/AM100728R_SI_001.PDF)
- Yazdanbakhsh, A., Bank, L. C., Rieder, K. A., Tian, Y., & Chen, C. (2018). Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, 128(July 2017), 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.005>
- Zhou, H. W., Mishnaevsky, L., Yi, H. Y., Liu, Y. Q., Hu, X., Warriar, A., & Dai, G. M. (2016). Carbon fiber/carbon nanotube reinforced hierarchical composites: Effect of CNT distribution on shearing strength. *Composites Part B: Engineering*, 88, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.035>
- Ανεμογεννήτρια - Βικιπαίδεια. (n.d.). Retrieved August 19, 2022, from <https://el.wikipedia.org/wiki/Ανεμογεννήτρια>
- Μεθάνιο - Βικιπαίδεια. (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from <https://el.wikipedia.org/wiki/Μεθάνιο#Καύση>
- Οδηγία 2000/76/Εκ. (2000). 5.
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΤΕΛΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ (Παράρτημα IV της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ) | Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from <http://www.opengov.gr/minenv/?p=6789>
- Τιμολογιο, Γ., & Χρηση, Ο. (2016). *Τιμολογιο ευδαπ α.ε.* 4389.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2019). 12, 335. <https://doi.org/10.12681/mnimon.424>