



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

UNIVERSITY OF PIRAEUS

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Κατεύθυνση Διαχείρισης Ενέργειας & Περιβάλλοντος

Διπλωματική Εργασία

**Μετάβαση στην Κυκλική Οικονομία:
Το πρόβλημα απόσυρσης των
ανεμογεννητριών**

Σταύρος Γεννίτσαρης

Επιβλέπων: Βασίλειος Δεδούσης, Καθηγητής

Πειραιάς, Ιούνιος 2022

ΔΗΛΩΣΗ

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

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

Μεταπτυχιακός φοιτητής

Σταύρος Γεννίτσαρης

.....

Επιβλέπων καθηγητής

Βασίλειος Δεδούσης

.....

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών της σχολής Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς στην κατεύθυνση της Διαχείρισης Ενέργειας και Περιβάλλοντος υπό την επίβλεψη του καθηγητή Βασίλη Δεδούση. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βασίλη Δεδούση για την παρότρυνση επιλογής του θέματος και την άριστη καθοδήγησή του, αλλά και τη δυνατότητα που μου έδωσε να έρθω σε επαφή με έναν τομέα εξαιρετικά ενδιαφέρον, αλλά σχετικά άγνωστο σε εμένα μέχρι την ενασχόληση με την παρούσα εργασία. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην κα. Αγγελική Σαγάνη για την ενεργή υποστήριξη, την βοήθεια και την υπομονή της και την κα. Στέλλα Σοφιανοπούλου για την υποστήριξη και την διαθεσιμότητα σε θέματα που χρειάστηκα την βοήθεια της.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες σε όλους όσους περάσαμε μαζί τα τελευταία χρόνια και όσους ήταν δίπλα μου το διάστημα εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Σύνοψη

Το παγκόσμιο μερίδιο της αιολικής ενέργειας στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αυξάνεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ να έχει αυξηθεί από τα 7,5 GW το 1997 σε 733 GW το 2020. Σήμερα, 34.000 ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη είναι ήδη 15 ετών ή περισσότερο με το ενδιαφέρον για την περιβαλλοντικά και οικονομικά βέλτιστη διαχείριση των ανεμογεννητριών κατά τη φάση της απόσυρσης τους να αυξάνεται. Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μίας τυπικής εμπορικής ανεμογεννήτριας είναι ο χάλυβας, ο σίδηρος, ο χαλκός, το αλουμίνιο και τα σύνθετα υλικά που βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια, με τη διαχείριση των τελευταίων μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους να είναι το πιο δύσκολο ζήτημα. Στην παρούσα εργασία, γίνεται μία συνδυαστική εφαρμογή των μεθοδολογιών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) και της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων (Data Envelopment Analysis - DEA) με σκοπό την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων τελικής διάθεσης μίας τυπικής ανεμογεννήτριας στην Ελλάδα, λαμβάνοντας υπόψιν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το αντίστοιχο συνολικό κόστος της φάσης απόσυρσης των ανεμογεννητριών. Η χρήση της μεθοδολογίας της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων επιτρέπει τον προσδιορισμό των αποδοτικών και μη αποδοτικών μεθόδων διαχείρισης υλικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους και τον καθορισμό στόχων για τις μη αποδοτικές εναλλακτικές τελικής διάθεσης, προκειμένου να καταστούν αποδοτικές. Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων, αναλύονται οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν για την επίτευξη αυτών των στόχων και προτείνονται συγκεκριμένες στρατηγικές και μέτρα πολιτικής.

Abstract

Global wind energy share in Renewable Energy Sources (RES) is growing rapidly with the total installed capacity have been increased from 7,5GW in 1997 to 733GW in 2020. Today, 34,000 wind turbines in Europe are at least 15 years old and the interest on the optimal management (both environmental and cost effective) of the wind turbines during decommissioning phase is increasing. The main materials found in a commercial wind turbine are steel, iron, copper, aluminum, and composites with the waste treatment of the latest being the most challenging. In this thesis, Life Cycle Assessment (LCA) and Data Envelopment Analysis (DEA) are jointly applied to evaluate different disposal scenarios for the end of life (EoL) phase of a typical wind turbine in Greece, considering the environmental impacts and corresponding costs of the overall phase. The use of DEA methodology is employed to identify the efficient and inefficient waste management methods and define targets for the inefficient EoL alternatives to become efficient. Based on DEA results, the actions that should be taken to achieve such targets are analyzed and specific policy measures and strategies are proposed.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Σύνοψη	3
Abstract.....	4
Κατάλογος εικόνων.....	8
Κατάλογος πινάκων.....	9
1. Εισαγωγή.....	10
1.1. Αιολική Ενέργεια	10
1.2. Μερίδιο αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ	10
1.3. Πολιτικές που προωθούν την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας.....	11
1.4. Η ανάγκη διερεύνησης του ζητήματος διαχείρισης των ανεμογεννητριών μετά το τέλος ζωής τους	11
1.5. Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας	12
1.6. Διάρθρωση της εργασίας.....	13
2. Ανεμογεννήτριες	14
2.1. Ιστορία και ανάπτυξη	14
2.2. Κατηγοριοποίηση.....	14
2.2.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	14
2.2.2. Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.....	16
2.3. Βασικά μέρη τυπικών ανεμογεννητριών	17
2.3.1. Θεμελίωση	18
2.3.2. Πύργος.....	18
2.3.3. Κιβώτιο ταχυτήτων	19
2.3.4. Γεννήτρια.....	19
2.3.5. Συστήματα ελέγχου, πέδησης και εκτροπής.....	20
2.3.6. Πτερύγια.....	20
2.4. Υλικά για την κατασκευή τυπικών ανεμογεννητριών	22
2.4.1. Μέταλλα	23
2.4.2. Σπάνιες γαίες.....	23
2.4.3. Πολυμερή υλικά.....	24
3. Μέθοδοι διαχείρισης υλικών ανεμογεννητριών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους.....	25
3.1. Σκυρόδεμα	25
3.1.1. Παραγωγή τσιμέντου από πλήρως ανακυκλωμένο σκυρόδεμα	25

3.1.2.	Ανακύκλωση σκυροδέματος και επαναχρησιμοποίηση ως αδρανές υλικό.....	26
3.1.3.	Απόθεση σκυροδέματος σε χώρους υγειονομικής ταφής	27
3.2.	Μέταλλα	27
3.2.1.	Ανακύκλωση χάλυβα	27
3.2.2.	Ανακύκλωση χαλκού	27
3.2.3.	Ανακύκλωση αλουμινίου	28
3.2.4.	Απόθεση μετάλλων σε χώρους υγειονομικής ταφής	28
3.3.	Σύνθετα υλικά	28
3.3.1.	Αποτέφρωση σύνθετων υλικών	28
3.3.2.	Συνεπεξεργασία σύνθετων υλικών σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών.....	29
3.3.3.	Ανακύκλωση σύνθετων υλικών	30
3.3.4.	Επαναχρησιμοποίηση.....	31
3.3.5.	Απόθεση σύνθετων υλικών σε χώρους υγειονομικής ταφής.....	34
4.	Συνοπτική θεωρητική παρουσίαση μεθοδολογιών.....	36
4.1.	Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA)	36
4.2.	Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων (Data Envelopment Analysis – DEA).....	37
4.3.	Συνδυαστική εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων (LCA + DEA methodology)	38
5.	Αξιολόγηση σεναρίων διάθεσης ανεμογεννητριών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους στην Ελλάδα με τη μεθοδολογία LCA + DEA	40
5.1.	Σενάρια διαχείρισης υλικών τυπικής ανεμογεννήτριας μετά το τέλος ζωής της.....	40
5.2.	Τοποθεσίες χώρου υγειονομικής ταφής και εγκαταστάσεων ανακύκλωσης.....	41
5.3.	Σκοπός και πεδίο εφαρμογής της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	42
5.4.	Συλλογή και καταγραφή δεδομένων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας LCA + DEA.....	43
5.4.1.	Βασικά χαρακτηριστικά και ποσότητες υλικών ανεμογεννήτριας	43
5.4.2.	Δεδομένα σχετικά με την μοντελοποίηση μεθόδων διαχείρισης υλικών μετά το τέλος ζωής τους	44
5.4.3.	Δεδομένα σχετικά με το κόστος των μεθόδων διαχείρισης υλικών μετά το τέλος ζωής τους.....	45
5.5.	Επιλογή βασικών παραμέτρων μοντέλου DEA.....	46
5.5.1.	Επιλογή μοντέλου DEA	46

5.5.2.	Επιλογή μεταβλητών εισόδου και εξόδου.....	47
5.5.3.	Διαχείριση ανεπιθύμητων μεταβλητών εξόδου σε μοντέλα DEA.....	49
6.	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	51
6.1.	Παρουσίαση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA).....	51
6.1.1.	Δείκτης επίπτωσης στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος (Ozone layer depletion)	51
6.1.2.	Δείκτης επίπτωσης στην χρήση εκτάσεων γης (Land occupation).....	52
6.1.3.	Δείκτης επίπτωσης στην υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming).....	53
6.1.4.	Δείκτης επίπτωσης στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας (non-renewable energy)	54
6.1.5.	Δείκτης επίπτωσης στην εξόρυξη ορυκτών πόρων (mineral extraction).....	55
6.2.	Πίνακας δεδομένων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας DEA	56
6.3.	Παρουσίαση αποτελεσμάτων Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων (DEA).....	58
6.4.	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	61
7.	Συμπεράσματα.....	63
	Βιβλιογραφία	65

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Αιολικό πάρκο στην τοποθεσία Aruba.....	15
Εικόνα 2. Ανεμογεννήτριες (α) με ένα πτερύγιο, (β) δύο πτερύγια και (γ) πολλαπλά πτερύγια.....	16
Εικόνα 3. Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα τύπου (Α) Darrius και (Β) Savonius.....	17
Εικόνα 4. Βασικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.....	18
Εικόνα 5. Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών ως προς το ύψος και την απόδοση ...	21
Εικόνα 6. Τομές διαφορετικών σχεδιαστικών προσεγγίσεων πτερυγίων ανεμογεννητριών.....	22
Εικόνα 7. Τα υλικά που συνθέτουν τα βασικά εξαρτήματα μίας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.....	23
Εικόνα 8. Αδρανή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.....	26
Εικόνα 9. Παιδική χαρά στο Ρότερνταμ που σχεδιάστηκε από το ολλανδικό αρχιτεκτονικό γραφείο Superuse επαναχρησιμοποιώντας πτερύγια παροπλισμένων ανεμογεννητριών.....	32
Εικόνα 10. Δημόσιος χώρος για καθήμενους στην πλατεία Willemsplein στο Ρότερνταμ επαναχρησιμοποιώντας πτερύγια παροπλισμένων ανεμογεννητριών.....	33
Εικόνα 11. Χώρος στάθμευσης ποδηλάτων στην πόλη Aalborg της Δανίας, επαναχρησιμοποιώντας πτερύγια παροπλισμένων ανεμογεννητριών.....	33
Εικόνα 12. Σχεδιαστική πρόταση για κατασκευή πεζογέφυρας, επαναχρησιμοποιώντας πτερύγια παροπλισμένων ανεμογεννητριών.....	34
Εικόνα 13. Πτερύγιο ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε ως παγκάκι στον «Μύλο των Ξωτικών» στα Τρίκαλα.....	34
Εικόνα 14. Δείκτης επίπτωσης στην ελλάτωση της τρύπας του όζοντος όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης.....	52
Εικόνα 15. Δείκτης επίπτωσης στην χρήση εκτάσεων γης όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης.....	53
Εικόνα 16. Δείκτης επίπτωσης στην υπερθέρμανση του πλανήτη όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης.....	54
Εικόνα 17. Δείκτης επίπτωσης στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης.....	55
Εικόνα 18. Δείκτης επίπτωσης στην εξόρυξη ορυκτών πόρων όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης.....	56
Εικόνα 19. Βαθμός αποδοτικότητας για κάθε σενάριο τελικής διάθεσης που αξιολογήθηκε.....	59
Εικόνα 20. Συνολικό κόστος διαδικασιών για το αρχικό και το αντίστοιχο εικονικό DMU και ο απαιτούμενος στόχος μείωσης του συνολικού κόστους διαδικασιών για κάθε σενάριο τελικής διάθεσης.....	60
Εικόνα 21. Συνολικές μεταφορικές ανάγκες για το αρχικό και το αντίστοιχο εικονικό DMU και ο απαιτούμενος στόχος μείωσης των συνολικών μεταφορικών αναγκών για κάθε σενάριο τελικής διάθεσης.....	60

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Σενάρια διαχείρισης βασικών υλικών τυπικής ανεμογεννήτριας μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους.....	41
Πίνακας 2. Αποστάσεις μεταξύ των βασικών τοποθεσιών για την διάθεση των υλικών τυπικής ανεμογεννήτριας.....	42
Πίνακας 3. Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας για την οποία γίνεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας LCA + DEA.....	43
Πίνακας 4. Ποσότητες βασικών υλικών ανεμογεννήτριας Vestas V52.....	44
Πίνακας 5. Βασικές παραδοχές σχετικά με τις μεθόδους ανακύκλωσης σύνθετων υλικών.....	45
Πίνακας 6. Κόστος διαδικασιών τελικής διάθεσης για τα βασικά υλικά μίας ανεμογεννήτριας.....	45
Πίνακας 7. Αρχικός πίνακας δεδομένων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας DEA.	57
Πίνακας 8. Πίνακας μετασηματισμένων δεδομένων για τον οποίον εφαρμόζεται η μεθοδολογία DEA.....	58

1. Εισαγωγή

1.1. Αιολική Ενέργεια

Οι άνεμοι δημιουργούνται εξαιτίας των θερμοκρασιακών διαφορών που εμφανίζονται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας λόγω γεωγραφικού πλάτους δηλαδή ανάμεσα στον ισημερινό και τους πόλους (Ampeliotis, 2015), της ανομοιογένειας του ανάγλυφου της γης και της περιστροφής του ίδιου του πλανήτη (Ali Mehdi, Ostachowicz and Luczak, 2016).

Η παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολική ενέργεια αφορά την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου χρησιμοποιώντας συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας, τις ανεμογεννήτριες. Αρχικά, ο άνεμος έρχεται σε επαφή με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών προκαλώντας την περιστροφή του άξονα στον οποίον είναι στερεωμένα. Έτσι, η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση του άξονα που είναι συνδεδεμένος με μία γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια (Ali Mehdi, Ostachowicz and Luczak, 2016).

Η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί από τον αέρα σε μία ανεμογεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος της και το μήκος των πτερυγίων καθώς το μεγαλύτερο μήκος πτερυγίων συνεπάγεται και μεγαλύτερη επιφάνεια σάρωσης αέρα (*Wind energy*, no date). Η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από μία ανεμογεννήτρια είναι ανάλογη του μήκους των πτερυγίων, του κύβου της ταχύτητας του ανέμου και της πυκνότητας του ανέμου. Η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και την πίεση του (Γνωρίστε την Αιολική Ενέργεια – ΕΛΕΤΑΕΝ, no date).

1.2. Μεριδίο αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ

Η αιολική ενέργεια μαζί με την ηλιακή αποτελούν τις πιο ταχέως αναπτυσσόμενες τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (International Renewable Energy Agency – IRENA) για το 2020, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ αυξήθηκε κατά 261 GW (+10.3%). Όπως και τα προηγούμενα χρόνια, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο στη συνολική αύξηση (91%) με 127 GW (+22%) και 111 GW (+18%), αντίστοιχα.

Ειδικότερα για την αιολική ενέργεια, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έχει αυξηθεί κατά περίπου 100 φορές από τα 7,5GW το 1997 σε 733GW το 2020.

Η πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας σχεδόν διπλασιάστηκε το 2020 σε σχέση με το 2019 (+111 GW σε σύγκριση με τα +58 GW της προηγούμενης χρονιάς). Από τη συνολική πρόσθετη ισχύ, τα 72.4 GW εγκαταστάθηκαν στην Κίνα, τα 14.2 GW στις ΗΠΑ ενώ δέκα ακόμα χώρες αύξησαν την συνολική αιολική ισχύ τους περισσότερο από 1 GW (International Renewable Energy Agency, 2021). Η

πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς χειρσαίων αιολικών μέχρι το 2026 υπολογίζεται πως θα είναι κατά 25% υψηλότερη σε σχέση με τον μέσο όρο της περιόδου 2015-2020 (International Energy Agency, 2021).

Όσον αφορά το μερίδιο της αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή, σχεδόν διπλασιάστηκε μεταξύ 2009 (6,8%) και 2014 (13,2%), ενώ το 2019 αποτελούσε το 20% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (*Technologies*, no date).

1.3. Πολιτικές που προωθούν την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας

Η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) για την βιώσιμη ανάπτυξη και την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 περιλαμβάνει την αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στο 32% έως το 2030, με την αιολική ενέργεια να αναμένεται να διαδραματίσει βασικό ρόλο σε αυτή την αύξηση (European Commission, 2019). Στο REPowerEU, το πρόσφατο σχέδιο της Ε.Ε. για την μείωση της εξάρτησης από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα και την ταχύτερη προώθηση της πράσινης μετάβασης, τίθενται ακόμα πιο φιλόδοξοι στόχοι και προτείνεται η αύξηση του στόχου για το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 45%, μέχρι το 2030 (European Commission, 2022).

Στην Ελλάδα, το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) της Ελληνικής Κυβέρνησης θέτει φιλόδοξους στόχους για αύξηση του μεριδίου ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στο 35% και για αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας από 3,6 GW σε 7 GW, μεταξύ 2020-2030 (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2019).

1.4. Η ανάγκη διερεύνησης του ζητήματος διαχείρισης των ανεμογεννητριών μετά το τέλος ζωής τους

Σύμφωνα με την οργάνωση Wind Europe (Wind Europe, 2020), 34.000 ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη είναι ήδη ηλικίας 15 ετών ή και περισσότερο, αντιπροσωπεύοντας 36 GW εγκατεστημένης ισχύος στη στεριά. Από τα 36 GW, περίπου 9 GW είναι ηλικίας 20-24 ετών και περίπου 1 GW είναι 25 ετών ή περισσότερο. Οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί για να έχουν διάρκεια ζωής περίπου 20-25 χρόνια (Dolan and Heath, 2012; Nijssen and Brøndsted, 2013; Wind Europe, 2020). Επιπλέον, η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών έχει δημιουργήσει την δυνατότητα για την αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από εν λειτουργία πάρκα, αντικαθιστώντας τα παλιότερα μοντέλα ανεμογεννητριών με νεότερα και πιο αποδοτικά (repowering) (Breeze, 2016c). Λαμβάνοντας υπόψιν τα προαναφερόμενα δεδομένα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο ετήσιος αριθμός και η μάζα υλικών των προς απόσυρση ανεμογεννητριών θα αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα λίγα χρόνια. Συνεπώς, αυξάνεται η σημασία της διερεύνησης του ζητήματος της βέλτιστης διαχείρισης των ανεμογεννητριών μετά το τέλος της ζωής τους, με στόχο τη μεγιστοποίηση των περιβαλλοντικών ωφελειών της αιολικής ενέργειας, ακολουθώντας τις αρχές της βιωσιμότητας και της κυκλικότητας.

1.5. Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται η Ανάλυση Κύκλου Ζωής για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σεναρίων διαχείρισης των υλικών μίας τυπικής ανεμογεννήτριας μετά το τέλος του κύκλου ζωής της. Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετές μελέτες που εφαρμόζουν τη μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στην αιολική βιομηχανία και στις ανεμογεννήτριες. Παρόλο που η φάση της απόσυρσης περιλαμβάνεται στην πλειονότητα των μελετών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής ανεμογεννητριών, οι επιμέρους πτυχές που σχετίζονται με το τέλος του κύκλου ζωής τους, εξακολουθούν να είναι ασαφείς, ασυνεπείς ή αδιαφανείς (Arvesen and Hertwich, 2012). Μία ανασκόπηση 44 μελετών σχετιζόμενων με την αιολική ενέργεια, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η φάση της απόσυρσης, είτε διερευνάται εν μέρει, καθώς οι περισσότερες από τις αναλύσεις κύκλου ζωής δεν εξετάζουν τις δυνατότητες ανακύκλωσης των διαφόρων υλικών ή ακόμη και παραλείπουν την φάση της διαχείρισης μετά το τέλος του κύκλου ζωής και, με αποτέλεσμα, οι σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις να μην λαμβάνονται πλήρως υπόψιν (Mello, Ferreira Dias and Robaina, 2022).

Στη βιβλιογραφία, υπάρχει ένα κενό όσον αφορά τη σύγκριση και αξιολόγηση των εναλλακτικών διαχείρισης ανεμογεννητριών μετά το τέλος ζωής τους. Σε μία πρόσφατη ερευνητική μελέτη αξιολογείται η σχετική βιωσιμότητα εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών μετά την απόσυρση τους, δίνοντας έμφαση στις διαστάσεις της οικονομικής, κοινωνικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η μελέτη αυτή, καταλήγει στην κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών με αυξανόμενη σειρά βιωσιμότητας ως εξής: απόθεση σε ΧΥΤΑ, αποτέφρωση με ανάκτηση θερμότητας, συνεπεξεργασία, επαναχρησιμοποίηση για κατασκευή επίπλων και επαναχρησιμοποίηση ως δομικά στοιχεία γεφυρών (Deeney *et al.*, 2021).

Μία άλλη μελέτη είχε ως στόχο τον προσδιορισμό της μεθόδου διάθεσης με τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις για τα πτερύγια των προς απόσυρση ανεμογεννητριών στην Ιρλανδία. Στην συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για την σύγκριση τριών σεναρίων: συνεπεξεργασία σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών στην Γερμανία, συνεπεξεργασία σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών στην Ιρλανδία και υγειονομική ταφή σε ΧΥΤΑ στην Ιρλανδία. Η συγκεκριμένη μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα πως η συνεπεξεργασία στην Ιρλανδία έχει τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λόγω της υποκατάστασης υλικού στην διαδικασία παραγωγής τσιμέντου και των μειωμένων μεταφορικών αναγκών (Nagle *et al.*, 2020).

Σκοπός των προαναφερόμενων μελετών είναι η αξιολόγηση της απόδοσης διαφορετικών εναλλακτικών διαχείρισης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών μετά την απόσυρση του σε σχέση με ορισμένες οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις. Οι συγκεκριμένες μελέτες επικεντρώνονται μόνο στη σύγκριση των εναλλακτικών διαχείρισης μετά το τέλος του κύκλου ζωής των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, ενώ είναι απαραίτητο να διερευνηθούν οι εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης με μία πιο ολιστική προσέγγιση, που θα

συμπεριλαμβάνει τις μεθόδους τελικής διάθεσης για το σκυρόδεμα της θεμελίωσης, τα κύρια μέταλλα που βρίσκονται σε μία ανεμογεννήτρια, καθώς και τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων. Η πρωτοτυπία αυτής της εργασίας έγκειται στην κοινή χρήση των μεθοδολογιών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων (LCA + DEA methodology) για τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων που αναφέρονται σε διαφορετικούς συνδυασμούς εναλλακτικών διαχείρισης μετά το τέλος ζωής των κύριων υλικών μίας τυπικής ανεμογεννήτριας, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όσο και τα αντίστοιχα κόστη κάθε εναλλακτικού σεναρίου. Η μεθοδολογία LCA + DEA εφαρμόζεται για μια τυπική ανεμογεννήτρια στην Ελλάδα, με σκοπό τον προσδιορισμό των αποδοτικών και των μη αποδοτικών μεθόδων διαχείρισης υλικών μετά το τέλος ζωής τους, τον καθορισμό συγκεκριμένων στόχων για τις μη αποδοτικές εναλλακτικές προκειμένου να γίνουν αποδοτικές, την ανάλυση των ενεργειών που πρέπει να γίνουν για την επίτευξη αυτών των στόχων και τη διατύπωση συγκεκριμένων προτάσεων και μέτρων στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, χάραξης πολιτικής και στρατηγικού σχεδιασμού.

1.6. Διάρθρωση της εργασίας

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μία συνοπτική περιγραφή των δεδομένων που ισχύουν για την αολική ενέργεια στην Ελλάδα, την Ευρώπη και τον κόσμο, ενώ τεκμηριώνεται η ανάγκη εξέτασης του θέματος της εργασίας αλλά και η συνεισφορά της. Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και τα υλικά από τα οποία αποτελείται, ενώ οι εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης των υλικών αυτών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους, περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3. Μία συνοπτική θεωρητική παρουσίαση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς της εργασίας γίνεται στο Κεφάλαιο 4. Η περιγραφή της μελέτης περίπτωσης, η διαδικασία συλλογής και καταγραφής των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή των μεθόδων και οι επιλογή των παραμέτρων τους παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μεθόδων, γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και διατυπώνονται συγκεκριμένες προτάσεις μέτρων πολιτικής. Τέλος στο Κεφάλαιο 7, αναλύονται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας.

2. Ανεμογεννήτριες

2.1. Ιστορία και ανάπτυξη

Οι προσπάθειες για τον σχεδιασμό συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό ξεκίνησαν μετά και την εφεύρεση της ηλεκτρικής γεννήτριας. Οι πρώτες προσπάθειες αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας πραγματοποιήθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο και τις ΗΠΑ, το 1887 και το 1888, αντίστοιχα. Ωστόσο, τα σύγχρονα συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας, όπως τα γνωρίζουμε σήμερα, με την μορφή των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, αναπτύχθηκαν στην Δανία όπου κατασκευάστηκε η πρώτη τέτοια ανεμογεννήτρια, το 1891. Στην ίδια χώρα, τέθηκε σε λειτουργία και η πρώτη ανεμογεννήτρια, το 1897 (*Wind energy*, no date; Mathew and Philip, 2012). Για πολλές δεκαετίες, η χρήση των ορυκτών καυσίμων για την κάλυψη των διαφόρων ενεργειακών αναγκών απέτρεψε την ανάπτυξη των τεχνολογιών που σχετίζονται με την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Όμως, η πετρελαϊκή κρίση του 1973, αποτέλεσε την κρίσιμη καμπή για την ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, καθώς αναγνωρίστηκε η αξία της ενεργειακής αυτονομίας. Παράλληλα, το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης (κυρίως της οικονομικής) δραστηριότητας, έδωσαν σημαντική, επιπρόσθετη ώθηση στην ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών (Mathew and Philip, 2012).

Το μέγεθος των ανεμογεννητριών, δηλαδή η διάμετρος της φτερωτής τους συνεπώς και η εγκατεστημένη ισχύς τους έχει αυξηθεί εντυπωσιακά τις τελευταίες δεκαετίες. Η τυπική ανεμογεννήτρια στις αρχές της δεκαετίας του 1980 είχε διάμετρο φτερωτής 15 m και εγκατεστημένη ισχύ 50 kW (Katsaprakakis and Christakis, 2012) ενώ στις μέρες μας, οι εμπορικά διαθέσιμες ανεμογεννήτριες έχουν φτάσει τα 164 m διάμετρο φτερωτής και έχουν ονομαστική ισχύ 8 MW (Serrano-González and Lacal-Aránegui, 2016).

2.2. Κατηγοριοποίηση

Με κριτήριο τον άξονα περιστροφής της φτερωτής τους, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε οριζόντιου άξονα και σε κάθετου άξονα.

2.2.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονα περιστροφής τους οριζόντιο ως προς το έδαφος και σχεδόν παράλληλο με την ροή του ανέμου (Mathew and Philip, 2012). Ο ρότορας και η ηλεκτρική γεννήτρια βρίσκονται στην κορυφή του πύργου. Τα πτερύγια αναγκάζονται να περιστραφούν λόγω της ροής του αέρα. Ο άξονας της φτερωτής συνδέεται με τη γεννήτρια και ως αποτέλεσμα της περιστροφής του ρότορα παράγεται ηλεκτρική ενέργεια (Dincer and Ezzat, 2018a).



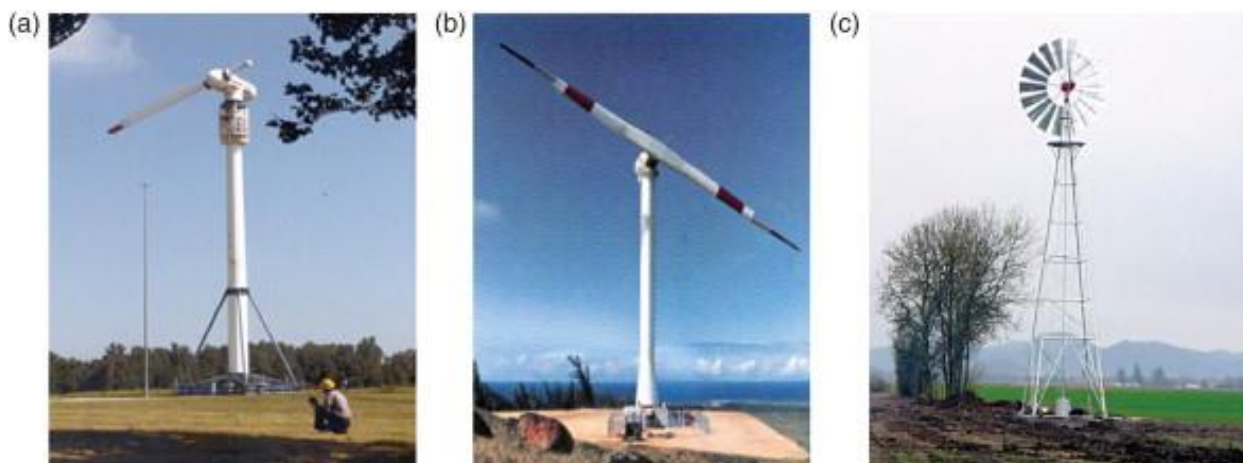
Εικόνα 1. Αιολικό πάρκο στην τοποθεσία Aruba.

Φωτογραφία από Rabih Shasha, Πηγή: <https://unsplash.com>, Ανακτήθηκε στις 17/01/2022, Άδεια χρήσης: Free to use under the Unsplash License

Αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας, σχεδιάζεται συνήθως με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι τα πτερύγια είναι στραμμένα προς τον άνεμο για αυτό και χρησιμοποιούνται αισθητήρες ανέμου και σερβοκινητήρας. Επιπλέον, οι υψηλές ταχύτητες ανέμου μπορεί να είναι επικίνδυνες για τον συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννήτριας για αυτό και εξοπλίζονται με μηχανισμό πέδησης για τη μείωση της ταχύτητας του άξονα της φτερωτής (Dincer and Ezzat, 2018a).

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του τύπου προκύπτουν από το ύψος των πύργων που απαιτούνται για την στήριξη τους καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από την επιφάνεια της γης εξασφαλίζοντας υψηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Vardar and Eker, 2006). Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών αυτών είναι ότι χρειάζονται μηχανισμό πέδησης για να επιβραδύνουν τα πτερύγια σε περίπτωση ισχυρών ανέμων ενώ απαιτείται και η εγκατάσταση συμπληρωματικού μηχανισμού που θα επιτρέπει στα πτερύγια να περιστρέφονται προς την κατεύθυνση του ανέμου. Παράλληλα, εξαιτίας του ύψους τους, προκαλούν οπτική όχληση και αισθητική αλλοίωση του τοπίου, μειώνοντας ευρύτερα την κοινωνική αποδοχή της αιολικής ενέργειας και προκαλώντας κοινωνικές αντιδράσεις. Επιπλέον, η εγκατάσταση μίας τέτοιας ανεμογεννήτριας απαιτεί τεράστιες κατασκευές για την θεμελίωση και την στήριξη της ενώ η συντήρησή της είναι δύσκολη (Dincer and Ezzat, 2018a)

Ο αριθμός των πτερυγίων της φτερωτής στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία χρησιμοποιούνται και τις ανεμολογικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να διακριθούν σε ανεμογεννήτριες, με ένα πτερύγιο, δύο πτερύγια, τρία πτερύγια ή πολλαπλά πτερύγια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2 (Mathew and Philip, 2012).



Εικόνα 2. Ανεμογεννήτριες (α) με ένα πτερύγιο, (β) δύο πτερύγια και (γ) πολλαπλά πτερύγια. Πηγή: (Mathew and Philip, 2012), Ανακτήθηκε 18/01/2022

2.2.2. Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

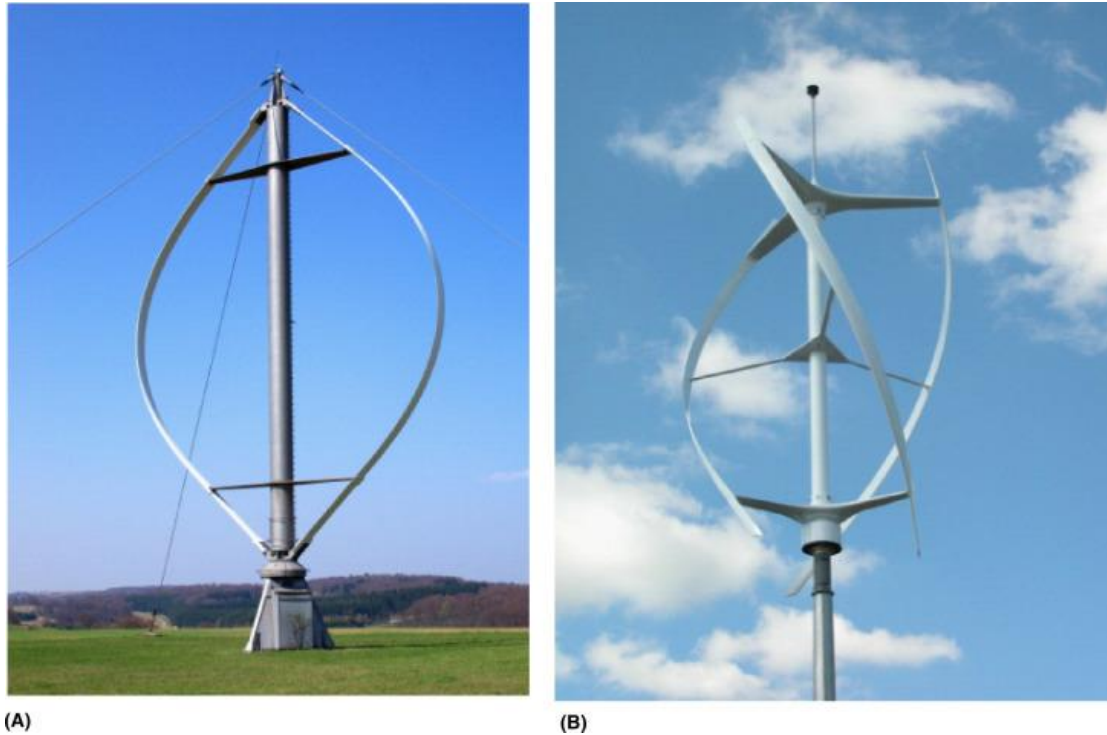
Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο που ενσωματώνουν τον άξονα του κινητήρα ο οποίος είναι τοποθετημένος εγκάρσια ως προς τον άνεμο. Ο σχεδιασμός αυτός, τους επιτρέπει να μην χρειάζεται να στρέφονται προς την κατεύθυνση του ανέμου, σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με αποτέλεσμα να μην απαιτούνται μηχανισμοί ανίχνευσης της κατεύθυνσης του ανέμου και προσανατολισμού της φτερωτής (Adefarati and Bansal, 2019). Το χαρακτηριστικό αυτό, τις καθιστά ιδανικές για τοποθεσίες όπου η κατεύθυνση του ανέμου παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα.

Παράλληλα, σε αυτόν τον τύπο ανεμογεννήτριας, τα κύρια εξαρτήματα του στροβίλου βρίσκονται στη βάση. Η διάταξη αυτή, κάνει πολύ πιο εύκολη την εκτέλεση εργασιών συντήρησης του στροβίλου καθώς τα κύρια εξαρτήματα, όπως η ηλεκτρική γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων, βρίσκονται πολύ κοντά στο έδαφος, μειώνοντας τα αντίστοιχα κόστη συντήρησης. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα αρχίζουν να προτιμώνται τα τελευταία χρόνια για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, καθώς μπορούν να τοποθετηθούν πολύ πιο κοντά στο έδαφος και είναι ιδανικές για τοποθέτηση σε ταράτσες και οροφές (Adefarati and Bansal, 2019).

Από την άλλη πλευρά, η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει μόνο την αξιοποίηση ανέμου σε χαμηλότερα ύψη όπου η ταχύτητα του είναι και χαμηλότερη, με αποτέλεσμα η διαθέσιμη αιολική ενέργεια να είναι μικρότερη. Επιπλέον, η ροή αέρα κοντά στο έδαφος και σε άλλα αντικείμενα είναι πιθανόν να δημιουργήσει τυρβώδη ροή, η οποία

με την σειρά της μπορεί να προκαλέσει φθορές που θα αυξήσουν τις ανάγκες για συντήρηση ή θα μειώσουν τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας (Adefarati and Bansal, 2019).

Οι δύο επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα φαίνονται στην Εικόνα 3.

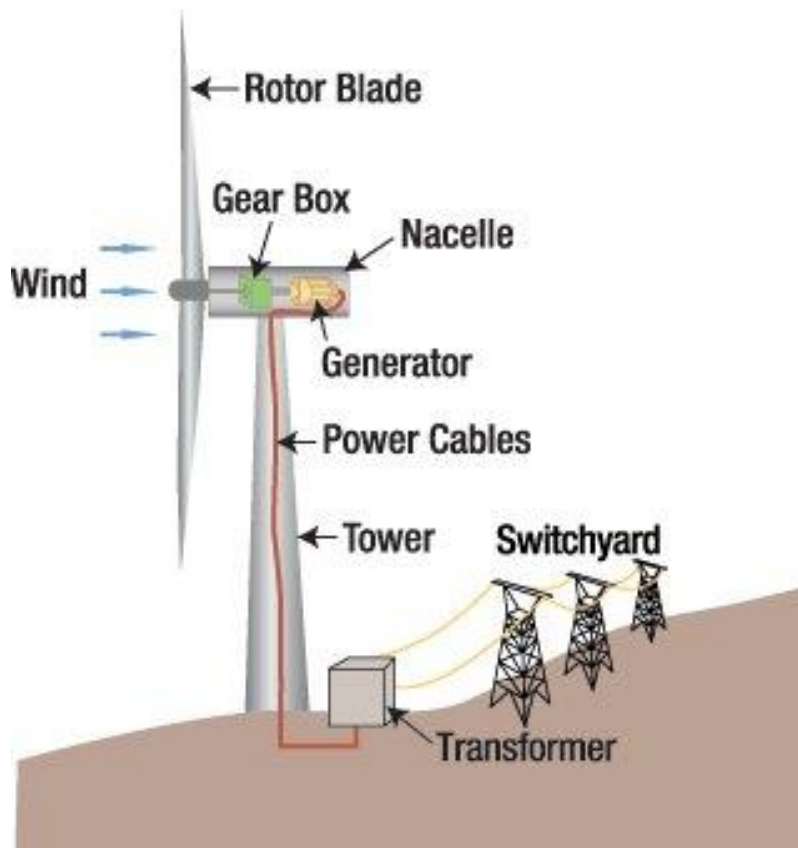


Εικόνα 3. Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα τύπου (A) Darrius και (B) Savonius. Ανακτήθηκε 18/01/2022, από (Dincer and Ezzat, 2018b)

Όπως καταδείχθηκε και από τα προηγούμενα, υπάρχουν διαφορετικά ήδη ανεμογεννητριών τόσο ως προς τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής, σε σχέση με εκείνη του ανέμου, αλλά και ως προς τον αριθμό των πτερυγίων και τη σχεδίαση της φτερωτής. Ωστόσο, ο πιο διαδεδομένος τύπος ανεμογεννήτριας για ηλεκτροπαραγωγή είναι οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με φτερωτή τριών πτερυγίων (Junginger *et al.*, 2019).

2.3. Βασικά μέρη τυπικών ανεμογεννητριών

Τα βασικά μέρη μίας τυπικής εγκατάστασης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι η θεμελίωση, ο πύργος, η γεννήτρια, τα πτερύγια της φτερωτής, το κιβώτιο ταχυτήτων τα καλώδια και τα συστήματα ελέγχου, πέδησης και εκτροπής. Στην Εικόνα 4, παρουσιάζεται μία σχηματική απεικόνιση των βασικών μερών μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.



Εικόνα 4. Βασικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Ανακτήθηκε 19/01/2022, Πηγή: (Garraín et al., 2013)

2.3.1. Θεμελίωση

Ο βασικός σκοπός της θεμελίωσης είναι η στήριξη του πύργου και των υπόλοιπων εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας. Ο σχεδιασμός της θεμελίωσης εξαρτάται από τη θέση της ανεμογεννήτριας, τις γεωτεχνικές συνθήκες και τις δομικές απαιτήσεις του έργου. Βασικό υλικό των δομών θεμελίωσης για ανεμογεννήτριες είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα ονομαστικής ισχύος 1 MW έχει διάμετρο περίπου 15 m και βάθος 1,5 - 3,5 m. (Benrndt, 2004). Το σκυρόδεμα και ο χάλυβας αποτελούν περίπου το 96,5% και το 3,5% της θεμελίωσης, αντίστοιχα (Schreiber, Marx and Zapp, 2019).

2.3.2. Πύργος

Οι πύργοι χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών στο κατάλληλο ύψος. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, η απόδοση της αιολικής ενέργειας αυξάνεται με το ύψος της ανεμογεννήτριας. Βασικός ρόλος του πύργου είναι η εκμετάλλευση αυτής της ιδιότητας με την αύξηση του ύψους στο οποίο τελικά θα λειτουργεί ο ρότορας. Το τελικό ύψος του πύργου προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν την

απόδοση στο συγκεκριμένο ύψος και το κόστος κατασκευής του. Κατασκευάζονται κυρίως από χάλυβα ή σκυρόδεμα (Beig and Muyeen, 2016).

2.3.3. Κιβώτιο ταχυτήτων

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα έχει την πλήμνη του ρότορα στο ένα άκρο, ο οποίος συνδέεται με τον κύριο άξονα. Στο άλλο άκρο του άξονα υπάρχει η γεννήτρια που μετατρέπει τη μηχανική περιστροφική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες, υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων μεταξύ της πλήμνης του ρότορα και της γεννήτριας για να μετατρέπεται η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα σε αυτή που απαιτείται για τη λειτουργία της γεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής μιας μεγάλης ανεμογεννήτριας είναι πιθανό να είναι 20 rpm ή μικρότερη. Μια συμβατική διπολική γεννήτρια με συχνότητα 50 Hz περιστρέφεται στις 3000 rpm ενώ μια τετραπολική γεννήτρια στις 1500 rpm. Συνεπώς, το κιβώτιο ταχυτήτων είναι απαραίτητο σε μία συμβατική ανεμογεννήτρια προκειμένου να αυξήσει τη ταχύτητα κατά 75 έως και 150 φορές (Breeze, 2016a).

Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ο αδύναμος κρίκος στο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Ο άξονας μιας ανεμογεννήτριας υπόκειται σε ισχυρά καμπτικά φορτία, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν αστοχία του κιβωτίου ταχυτήτων. Αυτή είναι και η αιτία που το κιβώτιο ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας απαιτεί συχνή και υψηλού κόστους συντήρηση. Συγκεκριμένα, παρόλο που μία ανεμογεννήτρια έχει χρόνο ζωής 20-25 χρόνια, το κιβώτιο ταχυτήτων είναι πιθανό να απαιτεί επισκευή και σημαντικές εργασίες συντήρησης κάθε 5 χρόνια (Breeze, 2016a).

2.3.4. Γεννήτρια

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η γεννήτρια της ανεμογεννήτριας είναι εκείνο το σύστημα που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Συνεπώς, είναι ένα από τα δύο ζωτικής σημασίας στοιχεία μετατροπής ενέργειας, που μαζί με τον ρότορα της ανεμογεννήτριας, μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στις εμπορικές εφαρμογές, οι βασικές επιλογές που υπάρχουν για τη γεννήτρια είναι δύο: η σύγχρονη και η ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια. Ωστόσο, στις περισσότερες ανεμογεννήτριες, επιλέγεται η επαγωγική γεννήτρια επειδή μια σύγχρονη γεννήτρια πρέπει να περιστρέφεται με αυστηρά ελεγχόμενη σταθερή ταχύτητα προκειμένου να διατηρείται σταθερή η συχνότητα της δημιουργούμενης διαφοράς δυναμικού (*Wind Turbine Parts and Functions / Electrical Academia*, no date).

2.3.5. Συστήματα ελέγχου, πέδησης και εκτροπής

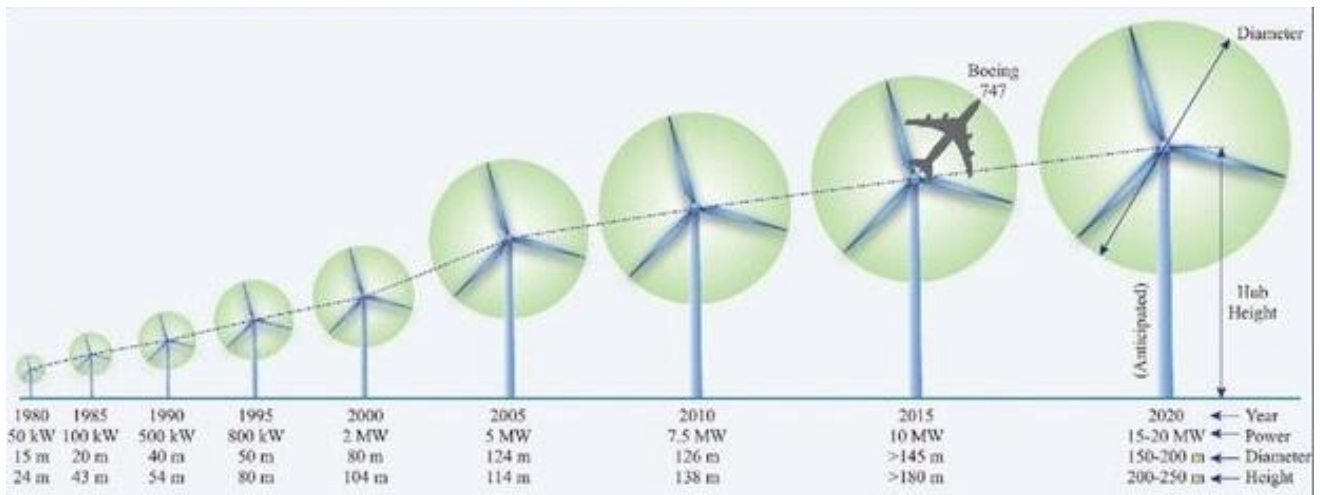
Το γεγονός ότι η αιολική ενέργεια παρουσιάζει στοχαστικά χαρακτηριστικά καθιστά πολύπλοκο τον έλεγχο μίας ανεμογεννήτριας. Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αλλάζει συνεχώς με αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας να ακολουθεί αναλόγως τη διακύμανση του ανέμου ανά πάσα στιγμή.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με συστήματα ελέγχου, προκειμένου να ρυθμίζεται η γωνία κλίσης των πτερυγίων τους έτσι ώστε η ισχύς εξόδου από την γεννήτρια να μεγιστοποιείται ανά πάσα στιγμή χωρίς να υπερφορτώνεται η γεννήτρια και οι μηχανικές δομές των πτερυγίων, του πύργου ή του κεντρικού άξονα (*Wind Turbine Parts and Functions* / *Electrical Academia*, no date).

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για να λειτουργούν εντός περιορισμένου φάσματος ταχυτήτων ανέμου. Η λειτουργία τους ξεκινά περίπου σε ταχύτητα 3 m/s ενώ όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει τα 12 - 15 m/s, αποδίδουν την ονομαστική τους ισχύ. Σε περίπτωση, όμως, που η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει αυτές τις τιμές, είναι αναγκαία η ύπαρξη κάποιου μηχανισμού για την μείωση της συνολικής ποσότητας αιολικής ενέργειας που προσλαμβάνεται προκειμένου να διατηρηθεί η ηλεκτροπαραγωγή στα επίπεδα της ονομαστικής ισχύος. Τέλος, αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει τα 25 m/s, που ονομάζεται και ταχύτητα αποκοπής, η ανεμογεννήτρια κινδυνεύει με αστοχία. Σε αυτή την περίπτωση, χρειάζεται να υπάρχουν μηχανισμοί που θα θέσουν την ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας (Breeze, 2016a).

2.3.6. Πτερύγια

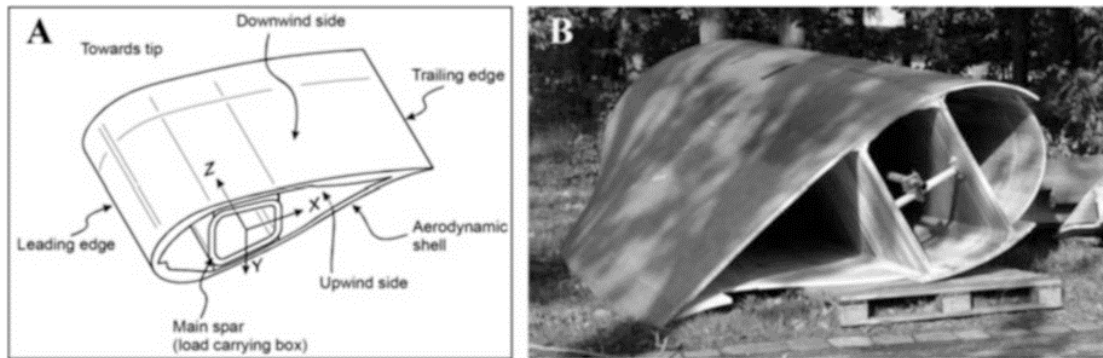
Ο ρότορας της ανεμογεννήτριας είναι το εξάρτημα εκείνο που προσλαμβάνει την ενέργεια του ανέμου με συνέπεια ο σχεδιασμός του να είναι κρίσιμος για την απόδοση της ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το μήκος των πτερυγίων μίας ανεμογεννήτριας για συγκεκριμένη ονομαστική ισχύ εξαρτάται από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας, από τον σχεδιασμό των πτερυγίων της και από την τοποθεσία όπου πρόκειται αυτή να εγκατασταθεί. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, το μέγεθος των εμπορικά διαθέσιμων ανεμογεννητριών έχει αυξηθεί σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, τάση που αναμένεται να συνεχιστεί (Breeze, 2016a).



Εικόνα 5. Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών ως προς το ύψος και την απόδοση.
 Ανακτήθηκε: 30/05/2022, Πηγή: (VertueLab, no date)

Τα πτερύγια μίας ανεμογεννήτριας πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να προσλαμβάνουν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια από τον άνεμο, αλλά ταυτόχρονα να είναι αρκετά ανθεκτικά ώστε να αντέχουν όλα τα φορτία που ασκούνται πάνω τους καθώς περιστρέφονται με τον άνεμο (Breeze, 2016a). Συνεπώς, τα πτερύγια είναι το στοιχείο εκείνο που παρουσιάζει τα πιο δύσκολα σχεδιαστικά και μηχανολογικά προβλήματα καθώς αποτελεί ένα σύνθετο, ανισότροπο στοιχείο μίας ευρύτερης αεροδυναμικής δομής που υπόκειται σε συνεχείς δυναμικές φορτίσεις συνδυασμένης και ανομοιόμορφης φύσης για μεγάλες χρονικές περιόδους (McGugan, 2016).

Στην Εικόνα 6Α, φαίνεται η τομή ενός τυπικού πτερυγίου που αποτελείται από μία δικτυωτή δομή στην οποία είναι συνδεδεμένα δύο αεροδυναμικά κελύφη, ένα στην πλευρά υποπίεσης (στην κατάντι διεύθυνση του ανέμου) και ένα στην πλευρά (υπερ)πίεσης (ανάντι της διεύθυνσης του ανέμου). Τα δύο αυτά αεροδυναμικά κελύφη τα οποία συγκολλούνται μεταξύ των στο μπροστινό και στο πίσω άκρο και περιβάλλουν την υποστηρικτική δικτυωτή δομή. Σε άλλες σχεδιαστικές προσεγγίσεις, η δικτυωτή δομή είναι ενσωματωμένη στο αεροδυναμικό προφίλ και τα δύο κελύφη στηρίζονται από έναν ή περισσότερους δομικούς ιστούς διάτμησης, όπως φαίνεται σε τομή στην Εικόνα 6Β (Beauson and Brøndsted, 2016).



Εικόνα 6. Τομές διαφορετικών σχεδιαστικών προσεγγίσεων πτερυγίων ανεμογεννητριών. Ανακτήθηκε 21/01/2022, Πηγή: (Beauson and Brøndsted, 2016)

Οι πολύπλοκες απαιτήσεις λειτουργίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, απαιτούν την χρήση υλικών που παρουσιάζουν μεγάλη δυσκαμψία, χαμηλή πυκνότητα και μεγάλη αντοχή σε κόπωση. Τέτοια υλικά είναι τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μήτρες ρητίνης (συνήθως από θερμοσκληρυνόμενο πολυεστέρα ή εποξειδικά) ενισχυμένες με άκαμπτες ίνες (συνήθως από γυαλί, μερικές δε φορές από άνθρακα) (McGugan, 2016).

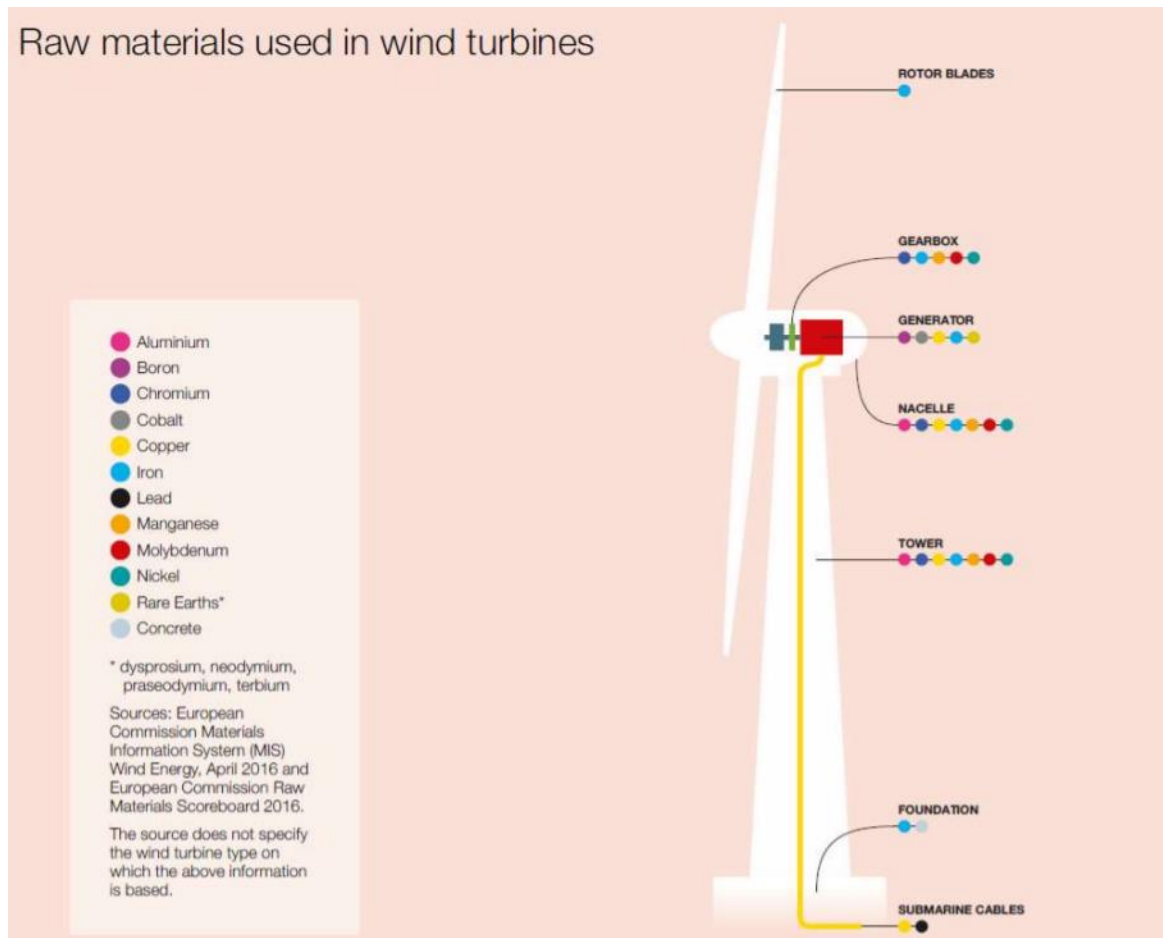
Οι ίνες άνθρακα είναι περίπου δύο φορές πιο ανθεκτικές από τις ίνες γυαλιού και παρουσιάζουν τριπλάσια δυσκαμψία. Αντίθετα, οι ίνες άνθρακα είναι σημαντικά πιο ακριβές. Συνεπώς, χρησιμοποιούνται μόνο για την κατασκευή πολύ μεγάλων πτερυγίων και σε κρίσιμα εξαρτήματα του πτερυγίου όπου είναι απαραίτητες οι ιδιότητές τους (Breeze, 2016b).

2.4. Υλικά για την κατασκευή τυπικών ανεμογεννητριών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα βασικά εξαρτήματα μίας ανεμογεννήτριας ομαδοποιούνται σε κύρια συστήματα, όπως ο πύργος, η άτρακτος και ο ρότορας. Ο ρότορας αποτελείται από τα πτερύγια, την πλήμνη και τα συστήματα ελέγχου και ρύθμισης της κλίσης των πτερυγίων. Η άτρακτος περιέχει πολλά από τα ηλεκτρονικά και μηχανικά εξαρτήματα, όπως ο κύριος άξονας κίνησης, το κιβώτιο ταχυτήτων, η ηλεκτρογεννήτρια και τα συστήματα ελέγχου, πέδησης και εκτροπής. Τα παραπάνω εξαρτήματα είναι τοποθετημένα στην κορυφή του πύργου ο οποίος υποστηρίζεται από τη θεμελίωση (S. Carrara *et al.*, 2020).

Η θεμελίωση αποτελεί το 75% της συνολικής μάζας μίας ανεμογεννήτριας, με τον πύργο να ακολουθεί. Σε μία ανεμογεννήτρια, εξαιρώντας τη θεμελίωση, ο πύργος αποτελεί περίπου το 60% της μάζας, ενώ η άτρακτος και ο ρότορας συνιστούν το καθένα από περίπου το 20% της συνολικής μάζας (S. Carrara *et al.*, 2020).

Για την κατασκευή των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται κυρίως χάλυβας (71-79% της συνολικής μάζας), πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, ρητίνες ή πλαστικά (11-16%), σίδηρος (5-17%), χαλκός (1%) και αλουμίνιο (0-2%) (Moné *et al.*, 2017). Στην Εικόνα 7, παρουσιάζονται τα υλικά που συνθέτουν τα βασικά εξαρτήματα μίας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζώντιου άξονα.



Εικόνα 7. Τα υλικά που συνθέτουν τα βασικά εξαρτήματα μίας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Ανακτήθηκε 30/05/2022, Πηγή: (S Carrara et al., 2020)

2.4.1. Μέταλλα

Ο χάλυβας χρησιμοποιείται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων, όπως ο πύργος, το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια, οι πλάκες, οι μετατροπείς και τμήματα του ρότορα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται στην θεμελίωση όπου κυρίαρχο υλικό είναι το σκυρόδεμα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται για την κατασκευή ανθεκτικών αλλά ελαφρύτερων εξαρτημάτων, όπως ο πύργος και η άτρακτος, καθώς και στις καλωδιώσεις. Ο χαλκός αξιοποιείται κυρίως σε τμήματα του στάτορα και του ρότορα της ηλεκτρογεννήτριας, στα πηνία, στις καλωδιώσεις υψηλής τάσης και στις γειώσεις (S Carrara et al., 2020).

2.4.2. Σπάνιες γαίες

Στην πλειοψηφία των σύγχρονων ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται σπάνιες γαίες και βόριο για τους μόνιμους μαγνήτες των ηλεκτρογεννητριών. Μόνιμοι μαγνήτες ονομάζονται εκείνοι που διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες για πολύ μεγάλο

χρονικό διάστημα. Συνήθως, περιέχουν κυρίως νεοδύμιο και μικροποσότητες δυσπροσίου. Κατά μέσο όρο, ένας μόνιμος μαγνήτης περιέχει 28,5% νεοδύμιο, 4,4% δυσπρόσιο, 1% βόριο και 66% σίδηρο (S Carrara *et al.*, 2020).

2.4.3. Πολυμερή υλικά

Τα πολυμερή και τα σύνθετα υλικά (κατά βάση ρητίνες ενισχυμένες με ίνες γυαλιού ή άνθρακα) χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή των πτερυγίων, σε εξαρτήματα της ατράκτου και σε επικαλύψεις μερών του πύργου. Επιπλέον, αξιοποιούνται σε συνδυασμό με το αλουμίνιο, τον χαλκό και τον σίδηρο για τις εγκαταστάσεις των καλωδιώσεων (S Carrara *et al.*, 2020).

3. Μέθοδοι διαχείρισης υλικών ανεμογεννητριών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους

Όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα κεφάλαια, τα βασικά υλικά που καλούμαστε να διαχειριστούμε μετά το τέλος ζωής μίας ανεμογεννήτριας είναι το σκυρόδεμα της θεμελίωσης, τα μέταλλα που βρίσκονται στην θεμελίωση και στο κύριο μέρος της ανεμογεννήτριας (χαλκός, αλουμίνιο, χάλυβας) και τα σύνθετα υλικά που βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Στις ενότητες που ακολουθούν, περιγράφονται οι βασικές μέθοδοι διαχείρισης των υλικών αυτών μετά το τέλος ζωής των ανεμογεννητριών.

3.1. Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα αποτελεί περίπου το 75% της συνολικής μάζας υλικών προς διαχείριση κατά τη διαδικασία απόσυρσης μίας ανεμογεννήτριας. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές διαχείρισης που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία αλλά οι πιο διαδεδομένες και τεχνολογικά ώριμες είναι η απόρριψη σε χώρο υγειονομικής ταφής, η πλήρης ανακύκλωση και η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του υλικού με την μορφή χαλικιών.

3.1.1. Παραγωγή τσιμέντου από πλήρως ανακυκλωμένο σκυρόδεμα

Σε περίπτωση που επιλεγεί να ανακυκλωθεί το σκυρόδεμα πλήρως, όλα τα απόβλητα σκυροδέματος ανακυκλώνονται κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου. Λόγω της παρουσίας μη ανθρακικού CaO , κυρίως από το τσιμέντο, αναμένεται χαμηλότερη εκπομπή CO_2 κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη πλήρως ανακυκλωμένο σκυρόδεμα αντί για παραδοσιακό ακατέργαστο τσιμέντο. Κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου με πλήρως ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, παρατηρείται απώλεια βάρους 30 % w/w μεταξύ 600 και 900 °C και η οποία θεωρείται ότι αφορά το CO_2 . Συγκεκριμένα, οι εκπομπές CO_2 από την παραγωγή τσιμέντου με πλήρως ανακυκλωμένο σκυρόδεμα υπολογίζεται πως είναι 0,46 g/g κλίνκερ, το οποίο είναι πράγματι περίπου 15% χαμηλότερο από τα 0,54 g/g κλίνκερ στην περίπτωση της παραδοσιακής διαδικασίας παραγωγής. Η διαφορά ανάμεσα στην απώλεια μάζας και την μείωση των εκπομπών CO_2 οφείλεται στο γεγονός ότι στην πράξη, μέρος της πρώτης ύλης θα είναι τελικά ανθρακούχα με αποτέλεσμα να προκύπτουν υψηλότερες εκπομπές CO_2 (De Schepper *et al.*, 2014).

3.1.2. Ανακύκλωση σκυροδέματος και επαναχρησιμοποίηση ως αδρανές υλικό

Μετά την αφαίρεση του σκυροδέματος της θεμελίωσης από το σημείο εγκατάστασης, τη συλλογή του χρησιμοποιημένου σκυροδέματος και τον μηχανικό τεμαχισμό του, δημιουργείται ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (βλ. Εικόνα 8) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό σε άλλες κατασκευές. Η χρήση αυτή ξεκίνησε στο τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, όταν προέκυψε η ανάγκη για μεγάλης έκτασης κατεδαφίσεις κτιρίων και δρόμων και δημιουργήθηκε το πρόβλημα διαχείρισης και απόθεσης των υλικών κατεδάφισης προκειμένου να ανοικοδομηθεί η Ευρώπη. Μετά την ανοικοδόμηση, η χρήση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος μειώθηκε σημαντικά. Στη δεκαετία του 1970, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής άρχισαν να αυξάνουν την χρήση του σε μη δομικές χρήσεις, όπως είναι τα υλικά πλήρωσης, οι κατασκευές υποστύλωσης, οι θεμελιώσεις και τα υλικά βάσης. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις εστιάζουν στις δυνατότητες χρήσης του ανακυκλωμένου σκυροδέματος ως υποκατάστατο των φυσικών αδρανών υλικών στο δομικό σκυρόδεμα (McNeil and Kang, 2013).



Εικόνα 8. Αδρανή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.
Πηγή: (McNeil and Kang, 2013), Ανακτήθηκε: 30/05/2022

Τα αδρανή υλικά ανακυκλωμένου σκυροδέματος που παράγονται από απόβλητα σκυροδέματος υπολογίζεται ότι κοστίζουν λιγότερο από τα φυσικά αδρανή. Παράλληλα, ανακύκλωση του σκυροδέματος αποτελεί μία λύση διαχείρισης που συμβάλει στη μείωση της χρήσης εξορυχθέντων αδρανών, της χρήσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που προκύπτουν από την διαδικασία της εξόρυξης. Η χρήση αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα επιτρέπει την ασφαλή

τελική χρήση χρησιμοποιημένου σκυροδέματος και προωθεί την ανακύκλωση αντί της απόρριψης σε χώρους υγειονομικής ταφής. Επιπλέον, μειώνει την παραγωγή φυσικών αδρανών, και συμβάλει στη διατήρηση των αποθεμάτων στα υφιστάμενα κοιτάσματα (Ohemeng and Ekolu, 2020).

3.1.3. Απόθεση σκυροδέματος σε χώρους υγειονομικής ταφής

Η απόρριψη του χρησιμοποιημένου σκυροδέματος σε ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής αποτελούσε για πολλές δεκαετίες την κυρίαρχη επιλογή. Εξαιτίας της μεγαλύτερης ευαισθητοποίησης σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ταφής απορριμμάτων καθώς και του ραγδαία αυξανόμενου όγκου δομικών υλικών που χρειάζεται να διαχειριστούν ως απόβλητα κάθε χρόνο, η λύση της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης προτιμάται σε σχέση με την ταφή. Στην κατεύθυνση αυτή, η αναθεωρημένη οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για τα απόβλητα περιλαμβάνει έναν φιλόδοξο στόχο για 70 % ανάκτηση των αποβλήτων που προέρχονται από δραστηριότητες κατασκευών και κατεδαφίσεις (Agrim *et al.*, 2017). Στα πλαίσια αυτά, πολλά κράτη-μέλη της ΕΕ αυξάνουν το κόστος απόρριψης του χρησιμοποιημένου σκυροδέματος σε χώρους ταφής επιβάλλοντας υψηλά τέλη προκειμένου να καταστήσουν οικονομικά ανταγωνιστικές τις λύσεις ανακύκλωσης του.

3.2. Μέταλλα

3.2.1. Ανακύκλωση χάλυβα

Η ανακύκλωση χάλυβα είναι μια πολύ ώριμη διαδικασία με αποτέλεσμα στα περισσότερα ανεπτυγμένα μέρη του κόσμου να έχουμε ένα πολύ καλά ανεπτυγμένο σύστημα συλλεκτών σκραπ, εταιρειών επεξεργασίας σκραπ και χαλυβουργιών που το αξιοποιούν. Τα προϊόντα χάλυβα ανακυκλώνονται συνήθως στην χαλυβουργία είτε σε φούρνους ηλεκτρικού τόξου, είτε στη βασική κάμινο οξυγόνου (BOF), όπου υπάρχει σημαντική ανάγκη για ψύξη για την αποφυγή πολύ υψηλών θερμοκρασιών ως αποτέλεσμα εξώθερμων αντιδράσεων (Björkman and Samuelsson, 2014).

3.2.2. Ανακύκλωση χαλκού

Στις μέρες μας, ο ανακυκλωμένος χαλκός αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής προμήθειας πρώτης ύλης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και παραγωγής προϊόντων χαλκού. Οι πηγές χαλκού προς ανακύκλωση περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία πρώτων υλών, που κυμαίνονται από σκραπ χαλκού χαμηλής ποιότητας, που περιέχει μικρό ποσοστό χαλκού έως πολύ υψηλής ποιότητας ή και καθαρό χαλκό που περιέχουν σχεδόν 100% χαλκό. Αν και τα ποσοστά ανακύκλωσης του χαλκού είναι πολύ υψηλά, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις στην διαδικασία, όπως είναι η έλλειψη καθαρού και

υψηλής ποιότητας σκραπ και η αυξημένη ποσότητα προϊόντων που περιέχουν μείγμα υλικών με χαμηλές συγκεντρώσεις χαλκού (Samuelsson and Björkman, 2014). Ανάλογα με την ποιότητα του σκραπ και την τεχνική ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται, η χρήση σκραπ για την παραγωγή ανακυκλωμένου χαλκού απαιτεί μόνο το 30 - 40% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή καθαρού χαλκού από μετάλλευμα (Karlan and Ness, 1987).

3.2.3. Ανακύκλωση αλουμινίου

Η ανακύκλωση είναι ένα κρίσιμο συστατικό της βιομηχανίας αλουμινίου εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους παραγωγής και των μειωμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή αλουμινίου. Το αλουμίνιο, όπως κάθε μέταλλο, μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να χάσει τις ιδιότητες του. Βασικό κίνητρο για την ανακύκλωση αλουμινίου είναι η υψηλή αξία του σκραπ του και τα οφέλη λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας και φυσικών πόρων. Η ανακύκλωση αλουμινίου απαιτεί περίπου 95% λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή αλουμινίου, αποφεύγοντας τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Είναι αξιοσημείωτο πως η βιομηχανία ανακύκλωσης αλουμινίου είναι οικονομικά βιώσιμη χωρίς να απαιτείται κάποια επιδότηση (van Schaik and Reuter, 2014).

3.2.4. Απόθεση μετάλλων σε χώρους υγειονομικής ταφής

Όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους, τα μέταλλα είναι υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν επανειλημμένα χωρίς να χάσουν τις ιδιότητες τους. Η βιομηχανία ανακύκλωσης μετάλλων είναι τεχνολογικά ώριμη και οικονομικά βιώσιμη με αποτέλεσμα η ανακύκλωση των μετάλλων να είναι σχεδόν πάντα η προτιμητέα διαδικασία διαχείρισης τους μετά την απόσυρση τους. Η επιλογή αυτή ενισχύεται από την πολύ σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και πρώτων υλών που επιτυγχάνεται με τη δευτερογενή ανάκτηση μετάλλων σε σχέση με την πρωτογενή παραγωγή τους από μεταλλεύματα. Συνεπώς, η απόθεση μετάλλων σε χώρους υγειονομικής ταφής αφορά κυρίως υπολείμματα των διαδικασιών ανακύκλωσης ή σκραπ πολύ κακής ποιότητας που δεν είναι οικονομικά αποδοτικό ή τεχνικά εφικτό να ανακτηθούν.

3.3. Σύνθετα υλικά

3.3.1. Αποτέφρωση σύνθετων υλικών

Η αποτέφρωση των σύνθετων υλικών μίας ανεμογεννήτριας ως μέθοδος για την τελική τους διάθεση είναι μία εναλλακτική με σημαντικά μειονεκτήματα. Τα μέρη των ανεμογεννητριών που αποτελούνται από σύνθετα υλικά, ιδιαίτερα τα πτερύγια,

αποτελούνται σε ποσοστό πάνω από 70% από ίνες γυαλιού οι οποίες δεν είναι εύφλεκτες με αποτέλεσμα να δυσχεραίνουν την διαδικασία (Beauson and Brøndsted, 2016). Παράλληλα, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών έχουν θερμογόνο δύναμη 11000-14000 KJ/kg, που είναι σχετικά χαμηλή συγκρινόμενη με άλλες πηγές θερμότητας (Rahnama, 2011). Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων στάχτης μετά την αποτέφρωση, η οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές ή να απορριφθεί σε χώρο απόθεσης (Andersen, 2015).

3.3.2. Συνεπεξεργασία σύνθετων υλικών σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών

Η συνεπεξεργασία των πτερυγίων των ανεμογεννητριών σε κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών είναι μία μέθοδος όπου τα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές γυάλινες ίνες καίγονται σε κλίβανο παραγωγής τσιμέντου. Οι ίνες γυαλιού είναι ιδανική πρώτη ύλη για την παραγωγή τσιμέντου, η ανόργανη σύσταση τους είναι σύμφωνη με τη βέλτιστη (για την παραγωγή τσιμέντου) αναλογία μεταξύ οξειδίου του ασβεστίου, πυριτίου και οξειδίου του αργιλίου (European Composites Industry Association, 2013). Κατά την διαδικασία, τα υλικά της μήτρας καίγονται για παραγωγή ενέργειας μαζί με άλλα καύσιμα και τροφοδοτούν με θερμότητα τους κλιβάνους (Μαυροκωστίδου, 2019). Με τον τρόπο αυτό, τροποποιείται το μίγμα καυσίμου της διεργασίας με συνέπεια την μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της συνολικής διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου (WindEurope, 2020). Οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού αξιοποιούνται ως συστατικό στο μίγμα για την παραγωγή τσιμέντου. Πριν την συνεπεξεργασία σύνθετων υλικών, προηγείται ο τεμαχισμός τους και η μίξη τους με άλλα απόβλητα (Nagle *et al.*, 2020). Σημαντικό πλεονέκτημα της εναλλακτικής αυτής είναι η σχετικά απλές διαδικασίες μεταφοράς που απαιτούνται, καθώς τα πτερύγια της ανεμογεννητριας μπορούν να τεμαχιστούν κοντά στο σημείο αποσυναρμολόγησης διευκολύνοντας έτσι τη μεταφορά στην εγκατάσταση επεξεργασίας (WindEurope, 2020).

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει χαρακτηριστεί ως πολλά υποσχόμενη, κυρίως λόγω της αποτελεσματικότητας της από άποψη κόστους – οφέλους, ενώ χαρακτηρίζεται ως η καλύτερη μέθοδος ανακύκλωσης σύνθετων υλικών από την ένωση ευρωπαϊκών βιομηχανιών σύνθετων υλικών (European Composites Industry Association, 2013), ενώ χαρακτηρίζεται ως η κύρια μέθοδος ανακύκλωσης αυτή την στιγμή για πτερύγια ανεμογεννητριών, τόσο από την ευρωπαϊκή ένωση εταιριών αιολικής ενέργειας (WindEurope, 2020), όσο και από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, no date). Παρόλα αυτά, κατά την διαδικασία αυτή, οι ίνες γυαλιού δεν ανακυκλώνονται, καθώς αντικαθιστούν πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμέντου. Συνεπώς, χάνεται το μεγαλύτερο μέρος της αξίας των υλικών, καθώς δεν ανακτώνται και επομένως δεν χρησιμοποιούνται σε άλλες εφαρμογές σύνθετων υλικών.

3.3.3. Ανακύκλωση σύνθετων υλικών

3.3.3.1. Ανακύκλωση με μηχανική λείανση (mechanical grinding)

Η μηχανική λείανση των σύνθετων υλικών έχει ως αποτέλεσμα την διαδοχική μείωση του μεγέθους των υλικών σε μερικά εκατοστά (Liu, Meng and Barlow, 2022). Στη συνέχεια, τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές, όπως ως ενισχυτικό σκυροδέματος ή πληρωτικό σε ρητίνες, ανακυκλωμένα ελαστικά, πλαστικά προϊόντα ξύλου, άσφαλτο και θερμομονωτικά πάνελ (Ortegon, Nies and Sutherland, 2013; Andersen, 2015).

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως δεν αξιοποιεί τις αρχικές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών καθώς από αυτήν προκύπτουν υλικά χαμηλότερης ποιότητας, με μειωμένες ιδιότητες αλλά και αξία. (Beauson and Brøndsted, 2016)

3.3.3.2. Ανακύκλωση με πυρόλυση (pyrolysis)

Η διαδικασία της πυρόλυσης αφορά την αποσύνθεση οργανικών μορίων σε μικρότερα μόρια σε ατμόσφαιρα με απουσία οξυγόνου και με θερμοκρασία επεξεργασίας που κυμαίνεται από 300-1000 °C, η οποία εξαρτάται από το σύστημα θέρμανσης που χρησιμοποιείται και την παρουσία καταλυτών στην διεργασία (Beauson and Brøndsted, 2016). Το πολυμερές διασπάται και παράγει ένα έλαιο, ένα αέριο και ένα προϊόν άνθρακα, αφήνοντας ένα στερεό υπόλειμμα. Με την διεργασία αυτή, επιτυγχάνεται η ανάκτηση των ινών, η ποιότητα των οποίων επηρεάζεται σημαντικά όσο υψηλότερες είναι οι θερμοκρασίες. Το βασικό πλεονέκτημά της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι δυνητικά όλα τα υποπροϊόντα της μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, η ανακύκλωση με πυρόλυση σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα είναι οικονομικά πιο βιώσιμη συγκριτικά με εκείνων που είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού λόγω της σημαντικά υψηλότερης τιμής του προϊόντος (Kalkanis *et al.*, 2019).

3.3.3.3. Ανακύκλωση ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed)

Η διαδικασία ανακύκλωσης ρευστοποιημένης κλίνης χρησιμοποιείται για την καύση της μήτρας της ρητίνης με σκοπό την ανάκτηση των ενισχυτικών ινών των σύνθετων υλικών. Κατά την διεργασία, το σύνθετο υλικό διασπάται σε σφαιρίδια μικρού μεγέθους (20-30 mm) και στη συνέχεια εισέρχεται στον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης ο οποίος φτάνει σε θερμοκρασίες 450 - 550 °C ανάλογα με το σύνθετο υλικό που ανακυκλώνεται (Kalkanis *et al.*, 2019). Το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των ανακτημένων ινών κατά δύο ή τρεις φορές (Beauson and Brøndsted, 2016). Έχει υπολογιστεί ότι για να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα μίας μονάδας ανακύκλωσης ρευστοποιημένης κλίνης για σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού, θα πρέπει να έχει ικανότητα επεξεργασίας άνω των 10.000 τόνων/έτος. Προφανώς, το όριο αυτό μειώνεται όταν εξετάζεται η ανακύκλωση

σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα λόγω της σημαντικής διαφοράς στην αξία του προϊόντος.

3.3.3.4. Ανακύκλωση με χρήση παλμών υψηλής τάσης (high voltage pulse fragmentation)

Η διεργασία κατακερματισμού σύνθετων υλικών με ίνες γυαλιού με χρήση παλμών υψηλής τάσης είναι μια ηλεκτρομηχανική διαδικασία που διαχωρίζει αποτελεσματικά τις μήτρες από τις ίνες με τη χρήση ηλεκτρισμού. Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούνται μηχανήματα τα οποία παράγουν ηλεκτρικούς παλμούς υψηλής τάσης με πολύ μεγάλη συχνότητα εντός ενός διηλεκτρικού υγρού, που συνήθως είναι νερό (Μαυροκοωστίδου, 2019). Βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι πως με αυτήν μπορούν να ανακτηθούν μόνο ίνες μικρότερου μήκους, ενώ για να διασφαλιστεί η υψηλή ποιότητα των ανακτωμένων ινών απαιτούνται υψηλές καταναλώσεις ενέργειας. Ωστόσο, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ανακύκλωσης, η ποιότητα των ινών που ανακτώνται από την διαδικασία είναι υψηλότερη, ενώ οι ίνες είναι μεγαλύτερου μήκους και με λιγότερες προσμίξεις (WindEurope, 2020).

3.3.3.5. Χημική ανακύκλωση (Σολβόλυση)

Κατά τη χημική ανακύκλωση, συντελείται ο χημικός αποπολυμερισμός και η αφαίρεσης της μήτρας του σύνθετου υλικού με τη χρήση χημικών αντιδραστηρίων διαχωρισμού με σκοπό την ανάκτηση των ενισχυτικών ινών. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χημικής ανακύκλωσης είναι ότι με αυτήν μπορούν να ανακτηθούν τόσο οι ενισχυτικές ίνες όσο και οι μήτρες των σύνθετων υλικών ενώ η διεργασία είναι εφαρμόσιμη σε διάφορα είδη ινών (Kalkanis *et al.*, 2019). Η πιο προηγμένη μέθοδος χημικής ανακύκλωσης είναι αυτή στην οποία χρησιμοποιούνται υπερκρίσιμα ρευστά. Τα υπερκρίσιμα ρευστά είναι ρευστά σε θερμοκρασία και πίεση ακριβώς πάνω από το κρίσιμο σημείο, όπου το ρευστό βρίσκεται σε μία κατάσταση που παρουσιάζει συνδυασμένα χαρακτηριστικά υγρού όπως η πυκνότητα, η ισχύς διάσπασης και η διαχυτικότητα και αερίου, όπως το ιξώδες (Beauson and Brøndsted, 2016). Σημαντικό πλεονέκτημα της χημικής ανακύκλωσης είναι πως οι ενισχυτικές ίνες που ανακτώνται με αυτή την διαδικασία παρουσιάζουν μικρή απώλεια των αρχικών μηχανικών ιδιοτήτων τους (Beauson and Brøndsted, 2016; Kalkanis *et al.*, 2019).

3.3.4. Επαναχρησιμοποίηση

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών ή μεγάλα τμήματα τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους αρχιτεκτονικούς ή δομικούς σκοπούς. Η συγκεκριμένη επιλογή έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς αξιοποιεί τα υψηλής ποιότητας και δομικής ικανότητας υλικά των πτερυγίων. Επιπλέον, παρατείνει την διάρκεια ζωής των υλικών χωρίς να απαιτείται σημαντική επεξεργασία μετά την

απόσυρση τους. Από την άλλη πλευρά, ο αριθμός των πιθανών εφαρμογών περιορίζεται από την πολυπλοκότητα της δομής των σύνθετων αυτών υλικών με αποτέλεσμα η συστηματική εφαρμογή της εναλλακτικής αυτής να είναι δύσκολη (Beauson and Brøndsted, 2016).

Το ολλανδικό αρχιτεκτονικό γραφείο Superuse σχεδίασε μία παιδική χαρά στο Ρότερνταμ, χρησιμοποιώντας πέντε πτερύγια παροπλισμένων ανεμογεννητριών (*Blade Made Playgrounds - Superuse Studios*, no date). Μία διαφορετική εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης πτερυγίων ανεμογεννητριών αποτελεί ο δημόσιος χώρος για καθημένους με το όνομα ReWind που βρίσκεται στην πλατεία Willemsplein στο Ρότερνταμ (*Blade Made | RE-USE.EU*, no date).

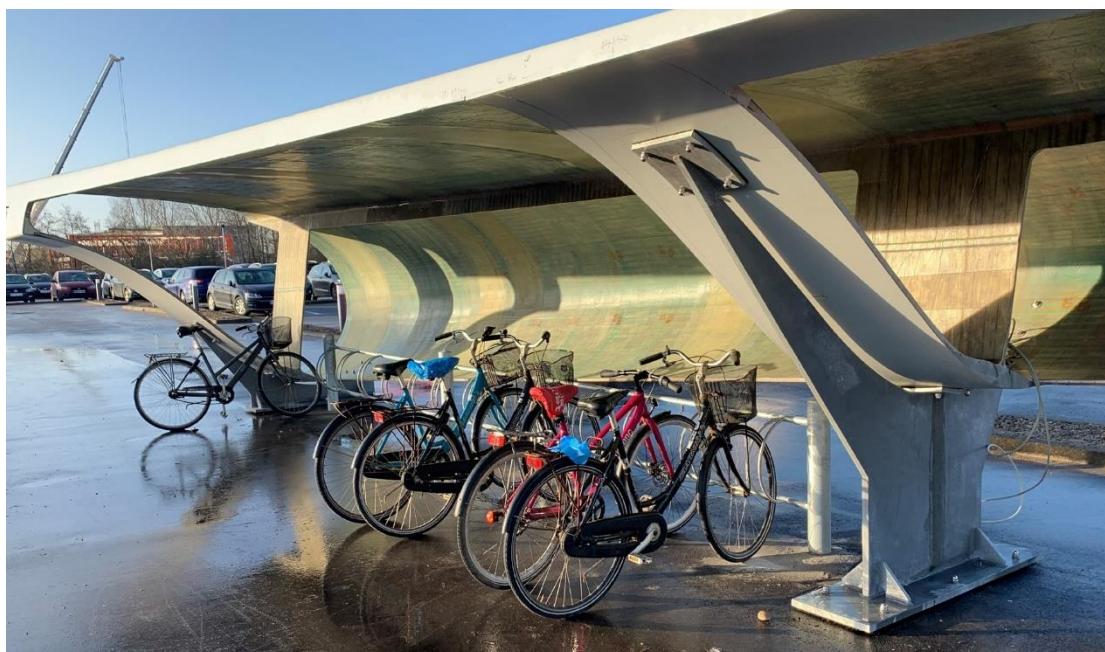


Εικόνα 9. Παιδική χαρά στο Ρότερνταμ που σχεδιάστηκε από το ολλανδικό αρχιτεκτονικό γραφείο Superuse επαναχρησιμοποιώντας πτερύγια παροπλισμένων ανεμογεννητριών. Πηγή: (*Blade Made | RE-USE.EU*, no date), Ανακτήθηκε: 30/05/2022

Στην Εικόνα 11, φαίνεται μία εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης πτερυγίων ως χώρος στάθμευσης και προστασίας ποδηλάτων, ενώ στην Εικόνα 12, φαίνεται μία σχεδιαστική πρόταση για κατασκευή μίας πεζογέφυρας (WindEurope, 2020). Πρόσφατα στην Ελλάδα, πτερύγια ανεμογεννητριών μετά το τέλος ζωής τους που προέρχονταν από αιολικό πάρκο της ΔΕΗ Ανανεώσιμες στη Χίο τοποθετήθηκαν στον «Μύλο των Ξωτικών» στα Τρίκαλα (βλ. Εικόνα 13). Συγκεκριμένα ένα πτερύγιο της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιήθηκε ως παγκάκι όπου μπορούν να ξεκουράζονται οι επισκέπτες και άλλα δύο πτερύγια στηρίχθηκαν σε σκυρόδεμα και αποτέλεσαν μέρος της διακόσμησης του «Μύλου των Ξωτικών» (*Πτερύγια ανεμογεννήτριας έγιναν παγκάκι και διακόσμηση τον «Μύλο των Ξωτικών» | Green Agenda*, no date).



Εικόνα 10. Δημόσιος χώρος για καθήμενους στην πλατεία Willemsplein στο Ρότερνταμ επαναχρησιμοποιώντας πετύργια παροπλισμένων ανεμογεννητριών.
Πηγή: (Blade Made | RE-USE.EU, no date), Ανακτήθηκε: 30/05/2022



Εικόνα 11. Χώρος στάθμευσης ποδηλάτων στην πόλη Aalborg της Δανίας, επαναχρησιμοποιώντας πετύργια παροπλισμένων ανεμογεννητριών.
Πηγή: (WindEurope, 2020), Ανακτήθηκε: 30/05/2022



Εικόνα 12. Σχεδιαστική πρόταση για κατασκευή πεζογέφυρας, επαναχρησιμοποιώντας περύγια παροπλισμένων ανεμογεννητριών.

Πηγή: (WindEurope, 2020), Ανακτήθηκε: 30/05/2022



Εικόνα 13. Περύγιο ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε ως παγκάκι στον «Μύλο των Ξωτικών» στα Τρίκαλα. Πηγή: (Περύγια ανεμογεννήτριας έγιναν παγκάκια και διακόσμησαν τον «Μύλο των Ξωτικών» | Green Agenda, no date), Ανακτήθηκε: 30/05/2022

3.3.5. Απόθεση σύνθετων υλικών σε χώρους υγειονομικής ταφής

Η απόρριψη των σύνθετων υλικών σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι η λιγότερο προτιμητέα μέθοδος διαχείρισης τέτοιων υλικών μετά το τέλος ζωής τους, καθώς δεν συνοδεύεται από ανάκτηση υλικού ή ενέργειας. Στις μέρες μας, υπάρχουν σχετικά λίγες ρυθμιστικές απαιτήσεις για τον τομέα διαχείρισης των αποβλήτων σύνθετων υλικών. Παρόλα αυτά, υπάρχει σαφής κατεύθυνση προς την κυκλικότητα των υλικών σε

ευρωπαϊκό επίπεδο, όπως προκύπτει και από το σχέδιο δράσης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία. Σε εθνικό επίπεδο, ήδη τέσσερις χώρες έχουν σαφή νομοθετικό πλαίσιο για την διάθεση σύνθετων υλικών μετά το τέλος ζωής τους: Γερμανία, Αυστρία, Ολλανδία και Φινλανδία. Αυτές οι χώρες απαγορεύουν τελείως την υγειονομική ταφή των σύνθετων υλικών, ενώ άλλες χώρες αυξάνουν συνεχώς τα τέλη ταφής για αυτά τα υλικά, με σκοπό να καταστεί η εναλλακτική της υγειονομικής ταφής οικονομικά μη συμφέρουσα (WindEurope, 2020).

4. Συνοπτική θεωρητική παρουσίαση μεθοδολογιών

4.1. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA)

Η μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής αναπτύχθηκε με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή και κατανάλωση προϊόντων. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής συμπεριλαμβάνει όλες τις πλευρές που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η κατανάλωση υλικών και ενέργειας και οι συνέπειες σε διάφορα μέρη του οικοσυστήματος, σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, υπηρεσίας ή διαδικασίας από την εξόρυξη των πρώτων υλών, την παραγωγή, την χρήση έως και την διαχείριση μετά το τέλος του κύκλου ζωής.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής μπορεί να αξιοποιηθεί για (ISO, 2006):

- τον προσδιορισμό δυνατοτήτων βελτίωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των προϊόντων σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής τους
- την πληροφόρηση των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων στην βιομηχανία, τους κρατικούς οργανισμούς ή τις μη-κυβερνητικές οργανώσεις, για τον ορθότερο στρατηγικό σχεδιασμό, τον καθορισμό προτεραιοτήτων, τον σχεδιασμό ή και επανασχεδιασμό διαδικασιών
- την επιλογή κατάλληλων δεικτών μέτρησης της περιβαλλοντικής επίδοσης
- την προώθηση των προϊόντων, αξιοποιώντας τις οικολογικές και περιβαλλοντικές σημάνσεις
-

Στο ISO 14044 (ISO, 2006), προσδιορίζονται λεπτομερώς οι κατευθύνσεις για την ορθή εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, η οποία διενεργείται σε τέσσερις φάσεις.

Αρχικά, καθορίζεται ο σκοπός και το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου (goal and scope definition), όπου προσδιορίζονται οι αρχικές παραδοχές, ο στόχος της ανάλυσης, η λειτουργική μονάδα, τα όρια εφαρμογής της μεθόδου και τα επίπεδα ανάλυσης, ανάλογα το αντικείμενο της μελέτης και την χρήση των αποτελεσμάτων της.

Στην συνέχεια γίνεται η συγκέντρωση των δεδομένων (Life Cycle Inventory). Στο στάδιο αυτό γίνεται η αναλυτική συλλογή και καταγραφή των δεδομένων εισόδου και εξόδου που είναι απαραίτητα για την επίτευξη των στόχων της ανάλυσης, ανάλογα με τα όρια του υπό μελέτη συστήματος.

Στο επόμενο στάδιο, γίνεται η ανάλυση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Analysis - LCIA). Σε αυτή την φάση, αναλύονται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον καθώς και οι κάθε είδους επιδράσεις σε αυτό, ενώ προσδιορίζεται η βαρύτητα ως προς την επίδραση στο περιβάλλον των διαφορετικών φάσεων του κύκλου ζωής του προϊόντος.

Το τελικό στάδιο αφορά την ερμηνεία (interpretation) των αποτελεσμάτων, όπου γίνεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων, η ερμηνεία τους και προσδιορίζονται λύσεις και

προτάσεις για την βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης του αξιολογούμενου συστήματος, σύμφωνα με τους στόχους που έχουν καθοριστεί στην αρχική φάση.

4.2. Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων (Data Envelopment Analysis – DEA)

Η Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων (ΠΑΔ) είναι μια μη παραμετρική τεχνική βασισμένη σε μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού για την αξιολόγηση της σχετικής απόδοσης ενός συνόλου μονάδων, που ονομάζονται Μονάδες Απόφασης (Decision Making Units – DMUs), οι οποίες είναι συγκρίσιμες, ομοιογενείς και καταναλώνουν τις ίδιες πολλαπλές εισροές (inputs) και παράγουν τις ίδιες πολλαπλές εκροές (outputs) (Vásquez-Ibarra *et al.*, 2020).

Ως αποδοτικότητα (efficiency) μίας μονάδας ορίζεται η δυνατότητα της να μετασχηματίζει με αποτελεσματικό τρόπο, με συνήθως μη προσδιορισμένο μηχανισμό παραγωγής, τις εισροές που καταναλώνονται στην διαδικασία, σε παραγόμενες εκροές.

Σημαντική διαφορά της μεθοδολογίας DEA με τις κλασσικές οικονομετρικές μεθόδους είναι ότι μηχανισμός μετατροπής των εισροών σε εκροές δεν προσδιορίζεται ακριβώς και δεν μας είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας.

Η εκτίμηση της αποδοτικότητας με παραδοσιακές οικονομετρικές μεθόδους προϋποθέτει τον υπολογισμό αναλυτικών θεωρητικών συναρτήσεων παραγωγής που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ εισροών και εκροών και στη συνέχεια την εφαρμογή τους στα πραγματικά δεδομένα. Η DEA ουσιαστικά εφαρμόζεται απευθείας στα πραγματικά δεδομένα, καθώς η αποδοτικότητα των μονάδων προσδιορίζεται με έναν δείκτη αποδοτικότητας, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των συνολικών εκροών προς τις συνολικές εισροές:

$$\text{Αποδοτικότητα} = \frac{\text{Συνολικές εκροές}}{\text{Συνολικές εισροές}} \quad (1)$$

Η Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων υπολογίζει ποιες μονάδες είναι αποδοτικές (efficient) και ποιες μη αποδοτικές (inefficient). Επιπλέον, για κάθε μη αποδοτική μονάδα προσδιορίζεται ένα σύνολο αποδοτικών μονάδων που χρησιμοποιούνται ως σύνολο αναφοράς για αυτήν. Με βάση το σύνολο αναφοράς, καθορίζεται με ποιον τρόπο μία μη αποδοτική μονάδα μπορεί να γίνει αποδοτική, ποιες πτυχές δηλαδή της μονάδας αυτής πρέπει να τροποποιηθούν και ποιο είναι το μέγεθος αυτών των αλλαγών ώστε να γίνει και αυτή αποδοτική. Ας σημειωθεί ότι η τεχνική της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ευρύτατου φάσματος διαφορετικών ειδών συστημάτων συμπεριλαμβανομένων των ενεργειακών (Sofianopoulou *et al.*, 2009; Dedoussis *et al.*, 2010) και των βιομηχανικών συστημάτων (Sofianopoulou, 2006).

Κατά την εφαρμογή της DEA, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κάποιες βασικές παράμετροι που σχετίζονται με την μεθοδολογία, όπως είναι η επιλογή των μεταβλητών εισόδου και εξόδου (inputs and outputs), η επιλογή του μοντέλου (model selection), ο προσανατολισμός (orientation) του μοντέλου και οι αποδόσεις κλίμακας (returns to scale).

Η επιλογή των μεταβλητών εισόδου και εξόδου γίνεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να περιλαμβάνονται όσες τον δυνατόν περισσότερες πτυχές της αξιολογούμενης διαδικασίας (Vásquez-Ibarra *et al.*, 2020). Συνήθως, ως μεταβλητές εισόδου επιλέγονται εκείνες που αντιπροσωπεύουν τους πόρους που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν και ως μεταβλητές εξόδου επιλέγονται εκείνες που αντιπροσωπεύουν τις παραγόμενες εκροές της διαδικασίας που πρέπει να μεγιστοποιηθούν. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου αυτός ο κανόνας δεν ισχύει, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των ρύπων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τα οποία αποτελούν παράγωγα μίας διαδικασίας που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Οι μεταβλητές αυτές συναντώνται στην βιβλιογραφία ως ανεπιθύμητες μεταβλητές εξόδου και απαιτούν ειδική μεταχείριση για την συμπερίληψη του στα μοντέλα (Scheel, 2001).

Ο προσανατολισμός ενός μοντέλου Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο επιδιώκεται να γίνει η μονάδα απόφασης αποδοτική. Υπάρχουν τριών ειδών μοντέλα ως προς τον προσανατολισμό: τα μοντέλα με προσανατολισμό στις εισροές, με προσανατολισμό στις εκροές και χωρίς προσανατολισμό. Τα μοντέλα με προσανατολισμό στις εισροές επικεντρώνονται στην μείωση των εισροών, διατηρώντας το επίπεδο των εκροών. Τα μοντέλα με προσανατολισμό στις εκροές επικεντρώνονται στην αύξηση των εκροών, διατηρώντας το επίπεδο των εισροών. Τα μοντέλα χωρίς προσανατολισμό επικεντρώνονται στην ταυτόχρονη μείωση των εισροών και την αύξηση των εκροών (Zhu, 2014).

Οι αποδόσεις κλίμακας αφορούν την ποσοτική μεταβολή των εκροών εξαιτίας μίας μεταβολής στην ποσότητα των εισροών. Οι αποδόσεις κλίμακας μπορεί να είναι είτε σταθερές (Constant Return to Scale - CRS), είτε μεταβλητές (Variable Returns to Scale - VRS). Συγκεκριμένα, έχουμε σταθερές απόδοσης κλίμακας, όταν μία μεταβολή στις εισροές προκαλέσει μία ανάλογη μεταβολή στις εκροές, ενώ έχουμε μεταβλητές αποδόσεις κλίμακας όταν μια μεταβολή στις εισροές έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη ή μεγαλύτερη μεταβολή στις εκροές (Vásquez-Ibarra *et al.*, 2020).

4.3. Συνδυαστική εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων (LCA + DEA methodology)

Η συνδυαστική χρήση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων, γνωστή και ως μεθοδολογία LCA+DEA, έχει αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία ως μία μεθοδολογία κατάλληλη για την αξιολόγηση της συνολικής οικολογικής απόδοσης διαφορετικών μονάδων (Vásquez-Ibarra *et al.*, 2021). Η κοινή χρήση των μεθόδων LCA και DEA έχει προκύψει λόγω των συμπληρωματικών τους

χαρακτηριστικών. Ενώ, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής συλλέγει τα δεδομένα και αξιολογεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων απόφασης, η Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων αξιοποιεί αυτά τα αποτελέσματα για να προσδιορίσει την οικολογική τους αποδοτικότητα, να εντοπίσει τις βέλτιστες πρακτικές και να καθορίσει στόχους βελτίωσης για τις μη αποδοτικές μονάδες απόφασης.

5. Αξιολόγηση σεναρίων διάθεσης ανεμογεννητριών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους στην Ελλάδα με τη μεθοδολογία LCA + DEA

Σκοπός της εργασίας είναι η σύγκριση και αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων διάθεσης για ανεμογεννήτριες μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Τα σεναρία αυτά αναφέρονται σε διαφορετικούς συνδυασμούς μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων για τα βασικά υλικά μιας τυπικής ανεμογεννήτριας, δηλαδή το σκυρόδεμα, τα μέταλλα (χάλυβας, σίδηρος, χαλκός) και τα σύνθετα υλικά που βρίσκονται, κυρίως, στα πτερύγια. Η προσέγγισή που ακολουθείται βασίζεται στην έννοια της βιωσιμότητας (Purvis, Mao and Robinson, 2019), προσδιορίζοντας και συνυπολογίζοντας τόσο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαφόρων σεναρίων, όσο και το κόστος που σχετίζεται με τις αντίστοιχες διαδικασίες διαχείρισης των προς απόσυρση υλικών.

Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των σεναρίων διάθεσης μετά την απόσυρση των ανεμογεννητριών επιλέγεται η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, που αποτελεί ένα καθιερωμένο και ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο για την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών ρύπων και των ευρύτερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων προϊόντων, διαδικασιών και υπηρεσιών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους (Pehnt, 2006).

Όπως αναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία, γίνεται μία ολοκληρωμένη αξιολόγηση της περιβαλλοντικής και οικονομικής απόδοσης σεναρίων απόσυρσης ανεμογεννητριών, εφαρμόζοντας συνδυαστικά τις μεθοδολογίες της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων λόγω των συμπληρωματικών χαρακτηριστικών τους. Η Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων χρησιμοποιείται ευρέως σε ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα τα τελευταία χρόνια (Zhou, Ang and Poh, 2008) και έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απόδοσης σε πολλές μελέτες στον ενεργειακό τομέα (Korhonen and Luptacik, 2004; Duan, Guo and Xie, 2016; Mahmoudi *et al.*, 2019; Lam *et al.*, 2020; Zeng *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022), καθώς και στον τομέα των απορριμμάτων (Chen *et al.*, 2010; Albores, Petridis and Dey, 2016; Struk and Matulová, 2016; Sarra, Mazzocchitti and Rapposelli, 2017; Gastaldi *et al.*, 2020; Li, Wang and Lee, 2020). Συγκεκριμένα, στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων, εφαρμόστηκε η κοινή χρήση των μεθοδολογιών LCA και DEA για τον προσδιορισμό της οικολογικής απόδοσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων στην Ισπανία (Lorenzo-Toja *et al.*, 2015, 2018) και για την συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογικών επιλογών για τη διαχείριση απορριμμάτων τροφίμων (Limleamthong *et al.*, 2016).

5.1. Σεναρία διαχείρισης υλικών τυπικής ανεμογεννήτριας μετά το τέλος ζωής της

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής πραγματοποιείται για 11 διαφορετικά σεναρία, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει έναν διαφορετικό συνδυασμό εναλλακτικών μεθόδων

διαχείρισης μετά το τέλος ζωής τους για τα κύρια υλικά μίας τυπικής ανεμογεννήτριας. Για κάθε υλικό, αξιολογούνται ορισμένες από τις εμπορικά διαθέσιμες αλλά και τεχνολογικά λιγότερο ώριμες εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης. Ο χάλυβας, ο σίδηρος και ο χαλκός θεωρείται πως μετά το τέλος ζωής τους μπορούν να απορριφθούν σε κάποιον χώρο υγειονομικής ταφής ή να ανακυκλωθούν. Όσον αφορά το σκυρόδεμα που βρίσκεται στην θεμελίωση της ανεμογεννήτριας, μπορεί να απορριφθεί σε ΧΥΤΑ ή να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό σε άλλες κατασκευές. Όσον αφορά τα σύνθετα υλικά που συναντώνται κυρίως στα πτερύγια των ανεμογεννητριών, οι διαθέσιμες εναλλακτικές διαχείρισης μετά το τέλος ζωής παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.3.3. Από αυτές τις μεθόδους, επιλέχθηκαν για αξιολόγηση στην παρούσα μελέτη η απόρριψη σε χώρο υγειονομικής ταφής (disposal), η επαναχρησιμοποίηση (reuse), η μηχανική λείανση (mechanical grinding), η πυρόλυση (pyrolysis) και η πυρόλυση με μικροκύματα (microwave pyrolysis). Οι παραπάνω εναλλακτικές διαχείρισης επιλέχθηκαν επειδή αντιπροσωπεύουν διαφορετικά επίπεδα στην ιεραρχία μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε. για τα απόβλητα (European Council, 2008), καθώς και διαφορετικούς βαθμούς τεχνολογικής ωριμότητας. Τα σενάρια που προέκυψαν από τους συνδυασμούς που αναφέρονται παραπάνω και αξιολογούνται στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Σενάρια διαχείρισης βασικών υλικών τυπικής ανεμογεννήτριας μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους

Σενάριο	Μέθοδος διαχείρισης μετάλλων	Μέθοδος διαχείρισης σκυροδέματος	Μέθοδος διαχείρισης σύνθετων υλικών ανεμογεννητριών
1	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	Απόθεση σε ΧΥΤΑ
2	Ανακύκλωση	Ανακύκλωση	Απόθεση σε ΧΥΤΑ
3	Ανακύκλωση	Ανακύκλωση	Επαναχρησιμοποίηση
4	Ανακύκλωση	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	Απόθεση σε ΧΥΤΑ
5	Ανακύκλωση	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	Επαναχρησιμοποίηση
6	Ανακύκλωση	Ανακύκλωση	Ανακύκλωση με πυρόλυση
7	Ανακύκλωση	Ανακύκλωση	Ανακύκλωση με πυρόλυση με μικροκύματα
8	Ανακύκλωση	Ανακύκλωση	Ανακύκλωση με μηχανική λείανση
9	Ανακύκλωση	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	Ανακύκλωση με πυρόλυση
10	Ανακύκλωση	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	Ανακύκλωση με πυρόλυση με μικροκύματα
11	Ανακύκλωση	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	Ανακύκλωση με μηχανική λείανση

5.2. Τοποθεσίες χώρου υγειονομικής ταφής και εγκαταστάσεων ανακύκλωσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην παρούσα μελέτη, περιλαμβάνονται όλες οι μεταφορές που πραγματοποιούνται μέχρι την τελική διάθεση των υλικών. Οι κύριες τοποθεσίες, ανάμεσα στις οποίες πραγματοποιούνται αυτές οι μεταφορές είναι:

- η τοποθεσία του αιολικού πάρκου από το οποίο πρόκειται να αποσυρθούν οι ανεμογεννήτριες, που στην παρούσα μελέτη θεωρείται πως βρίσκεται κοντά στο Ξηρολίβαδο Ημαθίας στην Βόρεια Ελλάδα (συντεταγμένες: 40.454058, 22.098944),
- ο χώρος υγειονομικής ταφής, που είναι ο ΧΥΤΑ Μαυροράχης στην Βόρεια Ελλάδα (συντεταγμένες: 41.085136, 23.076919),
- η κύρια εγκατάσταση ανακύκλωσης, στην οποία γίνεται η ανακύκλωση των μετάλλων και του σκυροδέματος, η ανακύκλωση σύνθετων υλικών με μηχανική λείανση, αλλά και η προετοιμασία τους πριν την μεταφορά σε εξειδικευμένη εγκατάσταση για ανακύκλωση με μεθοδολογίες πυρόλυσης και βρίσκεται στον Νομό Καβάλας (συντεταγμένες: 40.990967, 24.367011) και
- η εξειδικευμένη εγκατάσταση ανακύκλωσης σύνθετων υλικών με πυρόλυση και πυρόλυση με μικροκύματα, που θεωρείται ότι βρίσκεται στη Βόρεια Ιταλία (συντεταγμένες: 46.007366, 9.572627).

Οι αποστάσεις μεταξύ των παραπάνω τοποθεσιών παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Αποστάσεις μεταξύ των βασικών τοποθεσιών για την διάθεση των υλικών τυπικής ανεμογεννήτριας

Διαδρομή	Απόσταση (km)
αιολικό πάρκο – ΧΥΤΑ	120
αιολικό πάρκο – κύρια εγκατάσταση ανακύκλωσης	250
κύρια εγκατάσταση ανακύκλωσης – ΧΥΤΑ	160
κύρια εγκατάσταση ανακύκλωσης – εγκατάσταση ανακύκλωσης στην Ιταλία	1750

5.3. Σκοπός και πεδίο εφαρμογής της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής διεξάγεται για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφορετικών συνδυασμών τεχνολογικά ώριμων και λιγότερο ώριμων εναλλακτικών λύσεων διαχείρισης για τα κύρια υλικά μίας τυπικής ανεμογεννήτριας μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους.

Η μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής (LCIA) που επιλέχθηκε για την εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής είναι η Impact 2002+, η οποία ομαδοποιεί τα αποτελέσματα σε δεκατέσσερις αρχικές κατηγορίες και σε τέσσερις τελικές κατηγορίες, οι οποίες είναι: η ανθρώπινη υγεία, η ποιότητα οικοσυστήματος, η κλιματική αλλαγή και η κατανάλωση πόρων (Olivier *et al.*, 2003). Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε επειδή καλύπτει μια ποικιλία περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σύγκριση με άλλες μεθόδους εκτίμησης επιπτώσεων. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής διεξήχθη με την χρήση του εξειδικευμένου εμπορικού λογισμικού SimaPro 7.

Σύμφωνα με το ISO 14044 (ISO, 2006), πρέπει να καθοριστεί η λειτουργική μονάδα, η οποία παρέχει μία βάση αναφοράς με την οποία σχετίζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι του εξεταζόμενου συστήματος. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, ως λειτουργική μονάδα ορίζεται η διάθεση μετά το τέλος του κύκλου ζωής μίας ανεμογεννήτριας Vestas V52 στην Ελλάδα. Η Vestas V52 επιλέγεται ως αντιπροσωπευτικό μοντέλο των ανεμογεννητριών που αναμένεται να αποσυρθούν τα επόμενα χρόνια, στην Ελλάδα. Σύμφωνα με την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) (Hellenic Wind Energy Association, 2022), η εταιρία Vestas είναι ο κατασκευαστής ανεμογεννητριών με το υψηλότερο μερίδιο (44,6%) στην ελληνική αγορά. Επιπρόσθετα, η διάμετρος της φτερωτής του μοντέλου V52 είναι 52 μέτρα (Vestas Wind Systems, 2005) που είναι σχετικά κοντά στη μέση διάμετρο των ανεμογεννητριών που εγκαταστάθηκαν στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1998-2004. Θεωρώντας διάρκεια ζωής 20-25 ετών για τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα, οι ανεμογεννήτριες, που τέθηκαν σε λειτουργία αυτό το διάστημα αναμένεται να αποσυρθούν τα επόμενα χρόνια. Επιπλέον, η ανεμογεννήτρια Vestas V52 είναι ένα από τα μοντέλα ανεμογεννητριών για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα αναλυτικά δεδομένα.

Τα όρια του συστήματος στο οποίο εφαρμόζεται η Ανάλυση Κύκλου Ζωής περιλαμβάνουν την ανεμογεννήτρια και την θεμελίωση της, ενώ εξαιρούνται από την ανάλυση οι υποσταθμοί, οι μετασχηματιστές και οι βοηθητικοί χώροι του αιολικού πάρκου. Για τον σκοπό της παρούσας μελέτης, η διαδικασία της απόσυρσης της ανεμογεννήτριας αναλύεται αφού όλα τα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας έχουν αφαιρεθεί από τον χώρο εγκατάστασης, έχουν διαχωριστεί και έχουν τεμαχιστεί κατάλληλα, έτσι ώστε να είναι έτοιμα για μεταφορά στον χώρο υγειονομικής ταφής ή στις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης. Συνεπώς, όλες οι επιπτώσεις από τις απαιτούμενες μεταφορές και τις διαδικασίες για την τελική διάθεση των βασικών υλικών της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος.

5.4. Συλλογή και καταγραφή δεδομένων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας LCA + DEA

5.4.1. Βασικά χαρακτηριστικά και ποσότητες υλικών ανεμογεννήτριας

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής εφαρμόζεται για την απόσυρση μίας ανεμογεννήτριας Vestas V52 με ύψος πλήμνης 50 m στην Ελλάδα. Τα βασικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας για την οποία γίνεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας LCA + DEA

Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας	
Κατασκευαστής	Vestas
Μοντέλο	V52
Ονομαστική ισχύς (kW)	850

Διάμετρος φτερωτής (m)	52
Αριθμός πτερυγίων	3
Ύψος πλήμνης (m)	50

Τα δεδομένα σχετικά με την ποσότητα των βασικών υλικών της ίδιας της ανεμογεννήτριας αντλήθηκαν από την εργασία του Andersen που, μεταξύ άλλων, συνέλεξε δεδομένα για τους πιο διαδεδομένους τύπους ανεμογεννητριών στη Σουηδία από διάφορες μελέτες που εφαρμόζουν Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Andersen, 2015). Η θεμελίωση αποτελείται κυρίως από σκυρόδεμα και χάλυβα. Η ποσότητα των υλικών για το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας υπολογίζεται αναλογικά, για ύψος πλήμνης 50 m, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για το μοντέλο Vestas V110 με ύψος πλήμνης 80 m, για το οποίο βρέθηκαν αναλυτικά δεδομένα (Vestas, 2015). Ακολουθώντας τις παραπάνω παραδοχές, στον Πίνακα 4, δίνονται συγκεντρωτικά οι συνολικές ποσότητες για καθένα από τα βασικά υλικά μίας της ανεμογεννήτριας, για την οποία γίνεται αξιολόγηση της διαδικασίας απόσυρσης σε αυτή την εργασία.

Πίνακας 4. Ποσότητες βασικών υλικών ανεμογεννήτριας Vestas V52

Τμήμα εγκατάστασης ανεμογεννήτριας	Ποσότητα χάλυβα (ton)	Ποσότητα σιδήρου (ton)	Ποσότητα χαλκού (ton)	Ποσότητα σύνθετων υλικών (ton)	Ποσότητα σκυροδέματος (ton)
Ανεμογεννήτρια	76	11	1,2	1,2	8
Θεμελίωση	30,7	-	0	0,025	0,025
Συνολική ποσότητα	106,7	11	1,2	1,225	8,025

5.4.2. Δεδομένα σχετικά με την μοντελοποίηση μεθόδων διαχείρισης υλικών μετά το τέλος ζωής τους

Όσον αφορά τις μεθόδους διαχείρισης των υλικών μετά το τέλος ζωής τους, η απόρριψη σε χώρους υγειονομικής ταφής όλων των υλικών και η ανακύκλωση των μετάλλων και του σκυροδέματος προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας προεπιχρησιμοποιούμενες διαδικασίες που διατίθενται στις βιβλιοθήκες του λογισμικού SimaPro. Σχετικά με την ανακύκλωση των μετάλλων και του σκυροδέματος, γίνεται η παραδοχή πως τα ποσοστά ανακυκλωσιμότητας είναι 95% και 80%, αντίστοιχα.

Όσον αφορά τις μεθόδους ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών, αυτές μοντελοποιούνται θεωρώντας ενεργειακή κατανάλωση: 0,27 MJ/kg για την διαδικασία της μηχανικής λείανσης, 30 MJ/kg για την ανακύκλωση με πυρόλυση και 10 MJ/kg για την ανακύκλωση με πυρόλυση με μικροκύματα. Οι θετικές επιπτώσεις των διαδικασιών ανακύκλωσης αυτών μοντελοποιούνται ως ανάκτηση ενέργειας, όπου για την πυρόλυση και την πυρόλυση με μικροκύματα θεωρείται ότι είναι ίση με τη μέση ενεργειακή κατανάλωση για την παραγωγή ινών γυαλιού, η οποία κυμαίνεται μεταξύ

12-32 MJ/kg, δηλαδή η μέση τιμή είναι 22,5 MJ/kg (Vo Dong, Azzaro-Pantel and Cadene, 2018). Τα στοιχεία αυτά, φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακας 5.

Πίνακας 5. Βασικές παραδοχές σχετικά με τις μεθόδους ανακύκλωσης σύνθετων υλικών

Μέθοδος ανακύκλωσης	Κατανάλωση ενέργειας (MJ/kg)	Ανάκτηση ενέργειας (MJ/kg)
Μηχανική λείανση	0,27	-
Πυρόλυση	30	22,5
Πυρόλυση με μικροκύματα	10	22,5

5.4.3. Δεδομένα σχετικά με το κόστος των μεθόδων διαχείρισης υλικών μετά το τέλος ζωής τους

Κατά τη διαδικασία συλλογής των δεδομένων σχετικά με το κόστος των μεθόδων διαχείρισης υλικών μετά το τέλος ζωής τους, έγιναν ορισμένες παραδοχές. Αρχικά, το κόστος απόρριψης μετάλλων σε ΧΥΤΑ θεωρήθηκε ότι είναι αντίστοιχο με το κόστος απόρριψης σκυροδέματος. Επιπλέον, το μέσο τέλος ταφής για τους ΧΥΤΑ που είναι χωροθετημένοι στην ευρύτερη περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας, όπου βρίσκεται και ο ΧΥΤΑ Μαυροράχης είναι 35 €/ton. Τέλος, η ανακύκλωση σκυροδέματος στην παρούσα μελέτη αναφέρεται στη διαδικασία ανακύκλωσης του σκυροδέματος και αξιοποίησης του ως αδρανές σε άλλες δομικές κατασκευές. Τα δεδομένα, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους κάθε σεναρίου διαχείρισης υλικών μετά το τέλος ζωής τους καταγράφονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6. Τα δεδομένα αυτά έχουν συλλεχθεί από διάφορες πηγές, οι οποίες φαίνονται στην τελευταία στήλη του πίνακα. Προκειμένου να εκφραστούν όλες οι τιμές σε μία νομισματική μονάδα, το κόστος έχει εκφραστεί σε ευρώ (€), χρησιμοποιώντας την ισοτιμία δολαρίου – ευρώ, όπου 1\$ = 0,90878116 €.

Πίνακας 6. Κόστος διαδικασιών τελικής διάθεσης για τα βασικά υλικά μίας ανεμογεννήτριας

Υλικό	Διαδικασία τελικής διάθεσης	Κόστος (€/ton)	Πηγή
Αλουμίνιο	Ανακύκλωση	45,5	(Cost to Recycle Metal / Desert Metal, no date)
Χαλκός	Ανακύκλωση	45,5	(Cost to Recycle Metal / Desert Metal, no date)
Χάλυβας	Ανακύκλωση	181,8	(Cost to Recycle Metal / Desert Metal, no date)
Σίδηρο	Ανακύκλωση	181,8	(Cost to Recycle Metal / Desert Metal, no date)
Αλουμίνιο	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	35,0	(Καραγιαννίδης, no date)

Χαλκός	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	35,0	(Καραγιαννίδης, no date)
Χάλυβας	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	35,0	(Καραγιαννίδης, no date)
Σίδηρο	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	35,0	(Καραγιαννίδης, no date)
Σύνθετα υλικά	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	88,2	(Hoefler, 2015)
Σύνθετα υλικά	Ανακύκλωση με μηχανική λείανση	85,6	(Liu, Meng and Barlow, 2022)
Σύνθετα υλικά	Ανακύκλωση με πυρόλυση	255,6	(Liu, Meng and Barlow, 2022)
Σύνθετα υλικά	Ανακύκλωση με πυρόλυση με μικροκύματα	182,6	(Liu, Meng and Barlow, 2022)
Σκυρόδεμα	Απόθεση σε ΧΥΤΑ	35,0	(Καραγιαννίδης, no date)
Σκυρόδεμα	Ανακύκλωση	30,5	(Ohemeng and Ekolu, 2020)

5.5. Επιλογή βασικών παραμέτρων μοντέλου DEA

5.5.1. Επιλογή μοντέλου DEA

Η μεθοδολογία DEA αξιοποιεί τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ομοιογενών μονάδων αποφάσεων, που είναι γνωστές ως DMUs. Η αποδοτικότητα κάθε DMU ορίζεται ως ο λόγος του σταθμισμένου άθροισματος των εκροών προς το σταθμισμένο άθροισμα των εισροών. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, εφαρμόζεται ένα από τα πιο βασικά μοντέλα DEA, που είναι γνωστό ως μοντέλο CCR (Charnes, Cooper and Rhodes, 1978). Θεωρώντας ότι το πλήθος των DMUs είναι n και για συγκεκριμένα αριθμητικά δεδομένα για τις m εισροές και τις s εκροές για όλα τα DMUs, το πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού που επιλύεται για τον υπολογισμό των τιμών του βάρους των εισροών (v_i) ($i = 1, \dots, m$) και του βάρους των εκροών (u_r) ($r = 1, \dots, s$) είναι το ακόλουθο (Cooper, Seiford and Tone, 1999):

$$\max z = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj_0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0}} \quad (2)$$

subject to

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (3)$$

$$u_r \geq 0, \quad (r = 1, \dots, s) \quad (4)$$

$$v_i \geq 0, \quad (i = 1, \dots, m) \quad (5)$$

Όπου, οι μεταβλητές x_{ij} και y_{ij} αντιστοιχούν στις μεταβλητές εισροών και εκροών για το j DMU, αντίστοιχα. Ο δείκτης j_0 αναφέρεται στην μονάδα απόφασης που

αξιολογείται. Με την αντικειμενική συνάρτηση (2) επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του λόγου των εκροών ως προς τις εισροές της DMU που αξιολογείται, υπολογίζοντας τα κατάλληλα βάρη v_i και u_r . Με το σύνολο των περιορισμών (2), διασφαλίζεται ότι ο δείκτης εκροών προς εισροές δεν υπερβαίνει την τιμή 1 για κάθε DMU. Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0,0 και 1,0. Όταν η αντικειμενική συνάρτηση έχει τιμή 1,0, η αξιολογούμενη DMU θεωρείται αποδοτική. Το παραπάνω πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού, γραμμικοποιείται και με την επίλυση του ισοδύναμου προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού υπολογίζονται οι τιμές της αποδοτικότητας για όλες τις μονάδες απόφασης.

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται ένα μοντέλο με μεταβλητές αποδόσεις κλίμακας (VRS), θεωρώντας πως όλες οι μονάδες απόφασης που θα αξιολογηθούν αναφέρονται στην διαδικασία διαχείρισης μίας ανεμογεννήτριας Vestas V52 μετά το τέλος του κύκλου ζωής της. Στην βιβλιογραφία, αναφέρεται πως η χρήση μοντέλων με μεταβλητές αποδόσεις κλίμακας έχει συχνά ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό περισσότερων DMUs ως αποδοτικών σε σύγκριση με τα αποτελέσματα όταν γίνεται χρήση μοντέλων με σταθερές αποδόσεις κλίμακας (CRS). Αυτό συμβαίνει καθώς τα μοντέλα CRS έχουν λιγότερο αυστηρούς περιορισμούς με αποτέλεσμα να προκύπτουν και χαμηλότερες τιμές αποτελεσματικότητας για τα DMUs που αξιολογούνται. Επιπλέον, ο περιορισμός κυρτότητας που περιλαμβάνεται στα μοντέλα VRS διασφαλίζει ότι κάθε DMU συγκρίνεται μόνο με άλλες DMUs αντίστοιχου μεγέθους (Laso *et al.*, 2018). Δεδομένων αυτών, λόγω των χαρακτηριστικών του προβλήματος αλλά και επειδή τα μοντέλα VRS λειτουργούν καλύτερα με μετασχηματισμένα δεδομένα στην περίπτωση ανεπιθύμητων εκροών (βλ. ενότητα 5.5.3), επιλέγεται η χρήση μοντέλου VRS στην παρούσα εργασία.

Όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως, τα μοντέλα DEA, άρα και το μοντέλο CCR με μεταβλητές αποδόσεις κλίμακας μπορεί να εφαρμοστεί είτε με προσανατολισμό στις εισροές, είτε με προσανατολισμό στις εκροές. Τα μοντέλα DEA με προσανατολισμό στις εισροές προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν τις εισροές, ενώ τα μοντέλα DEA με προσανατολισμό στις εκροές προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν τις μεταβλητές εξόδου (Bajec and Tuljak-Suban, 2019). Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε ένα μοντέλο DEA με προσανατολισμό στις εισροές (input-oriented), επιδιώκοντας την μείωση του συνολικού κόστους που σχετίζεται με τις εναλλακτικές διαχείρισης των υλικών μετά το τέλος ζωής τους, καθώς ένας από τους στόχους που έχουν τεθεί είναι η διατύπωση προτάσεων πολιτικής που θα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας των σεναρίων τελικής διάθεσης, παρεμβαίνοντας στις παραμέτρους που καθορίζουν το κόστος των διαφόρων διαδικασιών.

5.5.2. Επιλογή μεταβλητών εισόδου και εξόδου

Στην παρούσα εργασία, η DEA διεξάγεται χρησιμοποιώντας ρεαλιστικά δεδομένα για τις επιλεγμένες παραμέτρους εισόδου και εξόδου για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης των υλικών μιας τυπικής ανεμογεννήτριας στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν δύο μεταβλητές εισόδου (εισροές) και τρεις μεταβλητές εξόδου (εκροές). Οι Charles, Aparicio και Zhu (2019) αναφέρουν ορισμένους εμπειρικούς κανόνες που

συνδέουν τον αριθμό των DMUs με τον αριθμό των εισροών και των εκροών του μοντέλου DEA. Στην βιβλιογραφία, μεταξύ άλλων μέτρων, προτείνεται πως ο αριθμός των DMUs θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τριπλάσιος του αριθμού του αθροίσματος των εισροών και των εκροών ή τουλάχιστον διπλάσιος του γινόμενου του αριθμού των εισροών και των εκροών. Ένας άλλος, αρκετά διαδεδομένος εμπειρικός κανόνας είναι

$$n \geq \max(m \times s, 3(m + s)) \quad (6)$$

όπου n είναι ο αριθμός των DMUs, m είναι ο αριθμός των εισροών και s είναι ο αριθμός των εκροών. Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία DEA εφαρμόζεται με έντεκα DMUs, δύο μεταβλητές εισόδου και τρεις μεταβλητές εξόδου, που σημαίνει ότι υπάρχει σχετική απόκλιση από τους γενικούς εμπειρικούς κανόνες, καθώς θεωρήθηκε πως θα έπρεπε να αποφευχθεί η αξιολόγηση μη ρεαλιστικών ή επαναλαμβανόμενων σεναρίων. Παράλληλα, δεν προκρίθηκε ως λύση ο περιορισμός των εισροών ή των εκροών, προκειμένου να αποφευχθεί η απώλεια μεταβλητών που συνεισφέρουν σημαντικά δεδομένα στο μοντέλο. Στην προαναφερθείσα μελέτη (Charles, Aparicio and Zhu, 2019), τονίζεται εν τούτοις ότι, στη βιβλιογραφία, υπάρχουν πολλές μελέτες που έχουν ως σκοπό την μέτρηση της απόδοσης μονάδων που δεν πληρούν πιστά αυτούς τους εμπειρικούς κανόνες, αλλά, παρόλα αυτά, εφαρμόζουν μεθοδολογίες DEA. Για κάθε DMU, επιλέγονται οι ακόλουθες εισροές και εκροές:

Μεταβλητές εισροών:

- Συνολικό κόστος (total cost) διαδικασιών τελικής διάθεσης, εκφρασμένο σε ευρώ (€), που αντικατοπτρίζει το άθροισμα του κόστους των διεργασιών που σχετίζονται με τις εναλλακτικές διαχείρισης των υλικών μίας τυπικής ανεμογεννήτριας μετά το τέλος ζωής τους.
- Μεταφορικές ανάγκες (transportation needs) για την τελική διάθεση, εκφρασμένες σε τόνοχιλιόμετρα (tkm), που αντικατοπτρίζουν τις συνολικές μεταφορικές ανάγκες του σεναρίου τελικής διάθεσης που αξιολογείται, με τα δεδομένα να προκύπτουν από τις αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση SimaPro.

Μεταβλητές εκροών:

- Χρήση γης (land occupation), εκφρασμένη σε τετραγωνικά μέτρα (m^2), που αναφέρεται στη χρήση εκτάσεων γης για την υλοποίηση εναλλακτικών σεναρίων τελικής διάθεσης των υλικών που αξιολογούνται, όπου η τιμή της μεταβλητής προκύπτει από το λογισμικό SimaPro.
- Υπερθέρμανση του πλανήτη (global warming), εκφρασμένη σε κιλά ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ($kg CO_2 eq$), που αναφέρεται στο συνολικό αποτύπωμα άνθρακα του σεναρίου τελικής διάθεσης που αξιολογείται, όπου η τιμή της μεταβλητής προκύπτει από το λογισμικό SimaPro.

- Μη ανανεώσιμη ενέργεια (non – renewable energy), εκφρασμένη σε Megajoules (MJ), που αναφέρεται στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας του σεναρίου τελικής διάθεσης που αξιολογείται, όπου η τιμή της μεταβλητής προκύπτει από το λογισμικό SimaPro.

5.5.3. Διαχείριση ανεπιθύμητων μεταβλητών εξόδου σε μοντέλα DEA

Το μοντέλο DEA, που περιεγράφηκε στην υπο-ενότητα 5.5.1 και εφαρμόζεται για τους σκοπούς της εργασίας, ακολουθεί τις παραδοχές των κλασικών μοντέλων DEA, ότι δηλαδή επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση των εισροών και μεγιστοποίηση των εκροών. Ωστόσο, στην παρούσα προσέγγισή, οι εκροές προκύπτουν ως αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για κάθε σενάριο και αναφέρονται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε σεναρίου τελικής διάθεσης, συνεπώς οι τιμές των εκροών επιδιώκεται να ελαχιστοποιηθούν. Παράλληλα, όπως φαίνεται στο επόμενο κεφάλαιο, οι τιμές των εκροών για τις οποίες θέλουμε να εφαρμοστεί η DEA έχουν ανάμεικτα πρόσημα. Επομένως, οι τιμές των μεταβλητών εξόδου πρέπει να μετασχηματιστούν με κατάλληλο τρόπο ώστε όλες οι προκύπτουσες τιμές να είναι θετικές, αλλά και η μεγιστοποίηση των μετασχηματισμένων τιμών των εκροών, να αντιστοιχεί σε ελαχιστοποίηση των αρχικών ανεπιθύμητων εκροών (Scheel, 2001). Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, εφαρμόζεται ως συνάρτηση μετασχηματισμού των τιμών των εκροών, η ακόλουθη φθίνουσα μονότονη συνάρτηση (Iqbal Ali and Seiford, 1990):

$$F_i^j(U) = -u_i^j + \beta_i \quad (7)$$

$$\beta_i = \max (u_i^1, \dots, u_i^d) + \varepsilon_i, (i=1,2, s) \quad (8)$$

Όπου, το σύμβολο U αντιπροσωπεύει τον πίνακα δεδομένων των ανεπιθύμητων εκροών, με κάθε γραμμή του πίνακα να αντιστοιχεί σε μία DMU και κάθε στήλη να αντιστοιχεί μία ανεπιθύμητη μεταβλητή εξόδου, η μεταβλητή u_i^j αναφέρεται στην τιμή της ανεπιθύμητης εκροής i του j DMU, s είναι ο αριθμός των ανεπιθύμητων μεταβλητών εξόδου, d είναι αριθμός των DMUs που αξιολογούνται και ε_i ένας αρκετά μεγάλος αριθμός, έτσι ώστε η τιμή της μεταβλητής β_i να είναι διαφορετική από την τιμή της μεταβλητής u_i^j .

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DEA Frontier (*Data Envelopment Analysis: Dr. Joe Zhu's Research on DEA*, no date). Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου λογισμικού, περιλαμβάνουν εκτός από τις τιμές αποδοτικότητας κάθε DMU και τα μη αρνητικά βαθμωτά σημεία αναφοράς (benchmark scalars) λ_j , τα οποία υπολογίζονται για κάθε μη αποδοτική DMU και ικανοποιούν την ακόλουθη συνθήκη (Zhu, 2014):

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (9)$$

Οι τιμές λ_j χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών - στόχων για κάθε μη αποδοτικό DMU του αρχικού συνόλου δεδομένων, δηλαδή των δεδομένων πριν την εφαρμογή του μετασχηματισμού (7) και (8), προκειμένου να καταστούν αποδοτικά. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μετατροπή των αποτελεσμάτων της DEA που εφαρμόζεται στο μετασχηματισμένο σύνολο δεδομένων σε τιμές - στόχους που θα αντιστοιχούν στα αρχικά δεδομένα, έτσι ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα για ποσοτικές συγκρίσεις και περαιτέρω επεξεργασία.

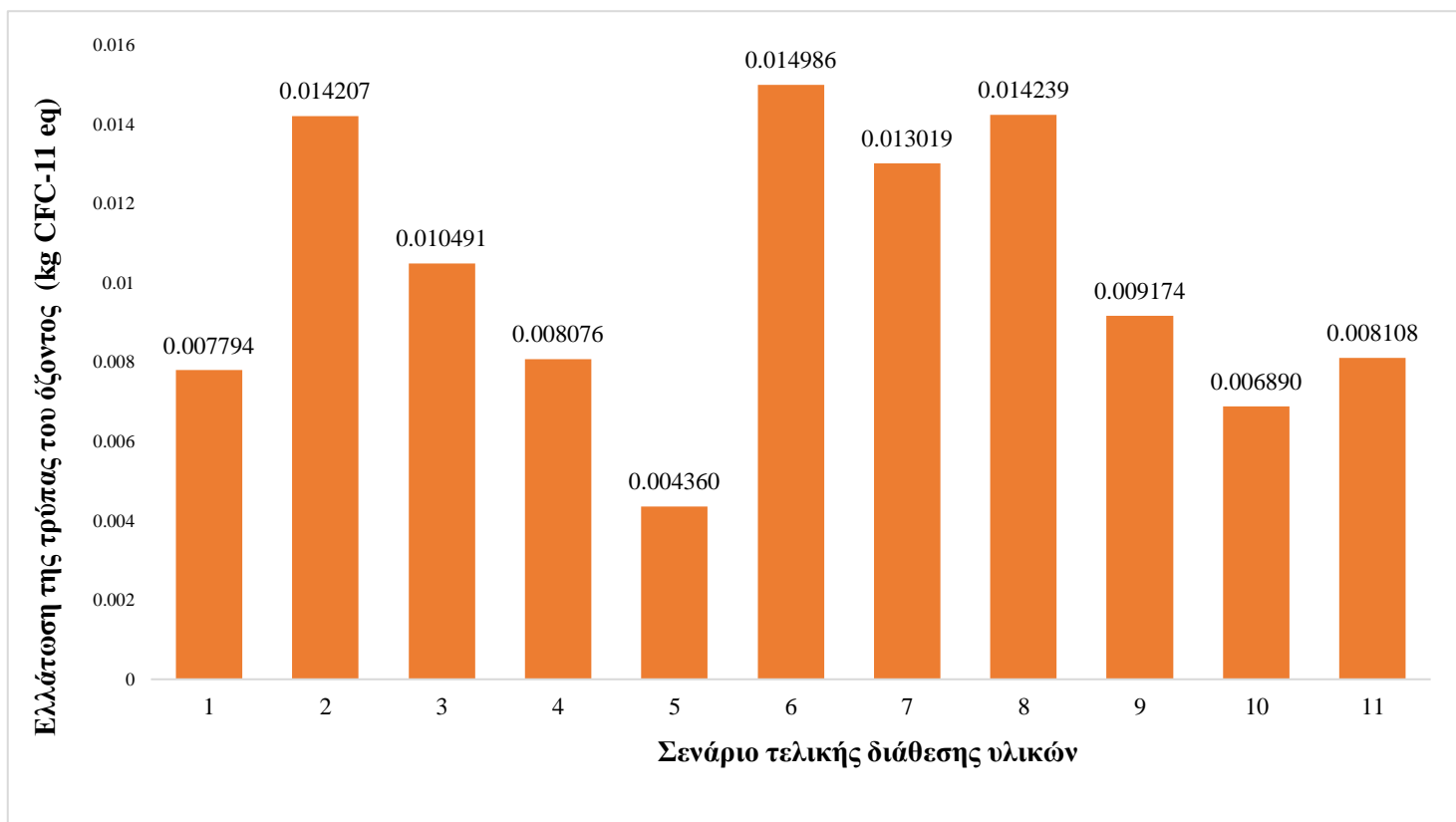
6. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

6.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)

Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής με την μέθοδο Impact 2002+ για διάφορα σενάρια τελικής διάθεσης των υλικών μίας ανεμογεννήτριας Vestas V52 προκύπτουν 14 κατηγορίες επιπτώσεων. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται επιλεγμένες κατηγορίες από το σύνολο των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής: ελάττωση της τρύπας του όζοντος, χρήση γης, υπερθέρμανση του πλανήτη, κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας και εξόρυξη ορυκτών πόρων. Οι αρνητικές τιμές των αποτελεσμάτων αναφέρονται σε θετικές (ευεργετικές) επιδράσεις στο περιβάλλον, συνεπώς όσο πιο αρνητική είναι η τιμή ενός αποτελέσματος, τόσο πιο ωφέλιμο είναι.

6.1.1. Δείκτης επίπτωσης στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος (Ozone layer depletion)

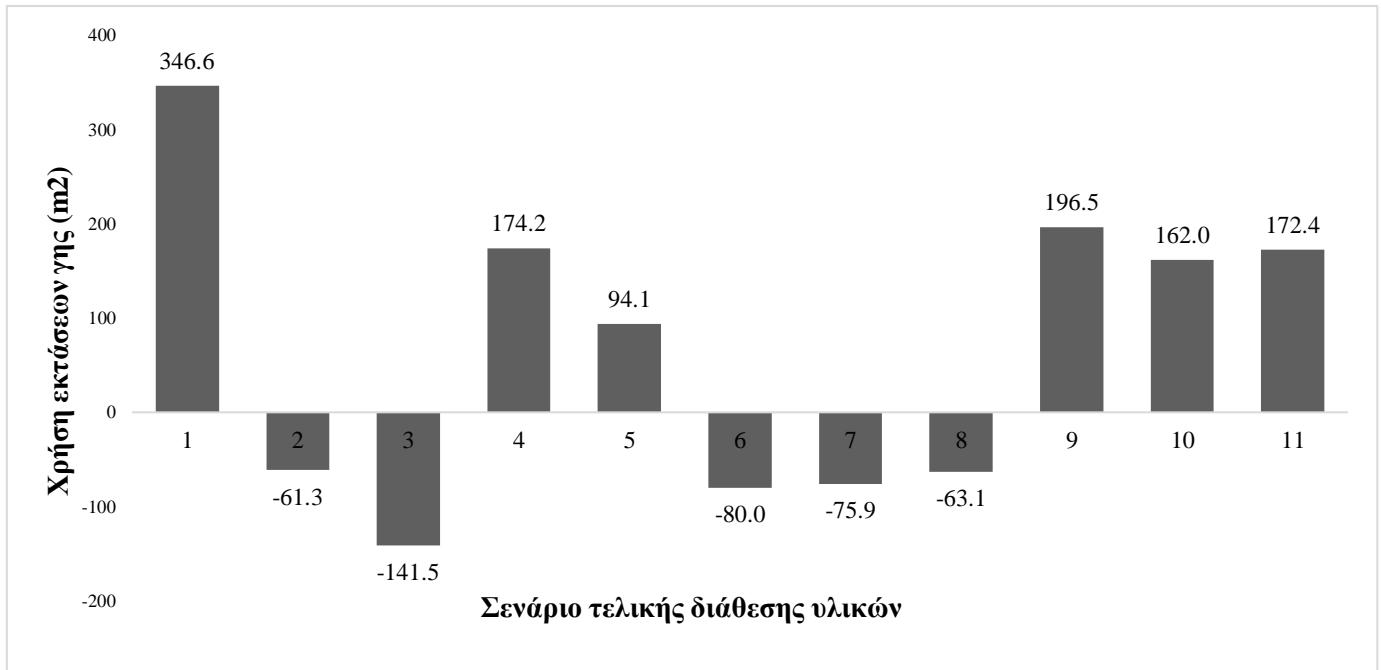
Από την σύγκριση του δείκτη επιπτώσεων στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος για τα έντεκα σενάρια προκύπτει πως δεν υπάρχει κανένα ωφέλιμο σενάριο. Το σενάριο με τις μικρότερες επιπτώσεις είναι το σενάριο 5, με το αμέσως καλύτερο να είναι το σενάριο 10, το οποίο είναι πιο επιβλαβές κατά περίπου 60% σε σύγκριση με το σενάριο 5. Στο σενάριο 5, τα σύνθετα υλικά επαναχρησιμοποιούνται, ενώ το σκυρόδεμα απορρίπτεται σε ΧΥΤΑ. Στο σενάριο 3, όπου επίσης τα σύνθετα υλικά επαναχρησιμοποιούνται, ενώ το σκυρόδεμα ανακυκλώνεται, η επίπτωση στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος είναι 2,5 φορές μεγαλύτερη. Αυτό παρατηρείται λόγω των αυξημένων αναγκών για μεταφορές κατά την διαδικασία ανακύκλωσης του σκυροδέματος. Στο σενάριο 10, που είναι το δεύτερο καλύτερο, τα σύνθετα υλικά ανακυκλώνονται με πυρόλυση με μικροκύματα, ενώ το σκυρόδεμα απορρίπτεται σε ΧΥΤΑ. Ωστόσο, τα πιο επιζήμια σενάρια είναι τα σενάρια 6, 8 και 2, τα οποία έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι το σκυρόδεμα ανακυκλώνεται. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι οι αυξημένες ανάγκες για μεταφορές κατά την διαδικασία ανακύκλωσης του σκυροδέματος, συμβάλλουν σημαντικά στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος. Τα σενάρια 6 και 9, 7 και 10, και 8 και 11, αντιπροσωπεύουν ανά δύο, ίδια μέθοδο τελικής διάθεσης των σύνθετων υλικών, ενώ στα σενάρια 6,7 και 8 το σκυρόδεμα ανακυκλώνεται και στα σενάρια 9, 10 και 11 το σκυρόδεμα απορρίπτεται σε ΧΥΤΑ. Συγκρίνοντας αυτά τα ζεύγη σεναρίων, παρατηρείται ότι στην περίπτωση της ανακύκλωσης του σκυροδέματος οι επιπτώσεις στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος είναι αυξημένες κατά περίπου 65 – 90%. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι κυρίως η μέθοδος διαχείρισης του σκυροδέματος μετά το τέλος ζωής της ανεμογεννήτριας και δευτερευόντως η εναλλακτική τελικής διάθεσης των σύνθετων υλικών έχουν αξιοσημείωτη συμβολή στον δείκτη επίπτωσης στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος.



Εικόνα 14. Δείκτης επίπτωσης στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης

6.1.2. Δείκτης επίπτωσης στην χρήση εκτάσεων γης (Land occupation)

Συγκρίνοντας τον δείκτη επιπτώσεων της χρήσης γης για τα έντεκα σενάρια που αξιολογήθηκαν, προκύπτει πως τα αποτελεσματικά σενάρια είναι εκείνα όπου γίνεται ανακύκλωση του σκυροδέματος της θεμελίωσης. Το πιο ωφέλιμο είναι το σενάριο 3, ακολουθούμενο από τα σενάρια 6, 7, 8 και 2. Από την άλλη πλευρά, τα σενάρια όπου το σκυρόδεμα απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι εκείνα με την μεγαλύτερη επίδραση στο δείκτη χρήσης γης. Είναι προφανές ότι το σενάριο 1 είναι το πιο επιβλαβές, καθώς όλα τα υλικά της ανεμογεννήτριας μετά το τέλος του κύκλου ζωής της απορρίπτονται σε ΧΥΤΑ. Συγκρίνοντας τα σενάρια 1 και 4, παρατηρείται πως η επιλογή ανακύκλωσης των μετάλλων αντί της απόρριψής τους σε ΧΥΤΑ μειώνει τον δείκτη επιπτώσεων στην χρήση γης κατά περίπου 50%. Επιπλέον, από την σύγκριση των σεναρίων 1 και 5 προκύπτει ότι η επιλογή της ανακύκλωσης των μετάλλων και η επαναχρησιμοποίηση των σύνθετων υλικών αντί της απόρριψής των υλικών σε ΧΥΤΑ μειώνει τον δείκτη επιπτώσεων στην χρήση γης σχεδόν κατά 73%. Συνεπώς, φαίνεται πως η επιλογή των εναλλακτικών της ανακύκλωσης ή της επαναχρησιμοποίησης των υλικών αντί της απόρριψής σε χώρους υγειονομικής ταφής έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του δείκτη επιπτώσεων στην χρήση εκτάσεων γης.

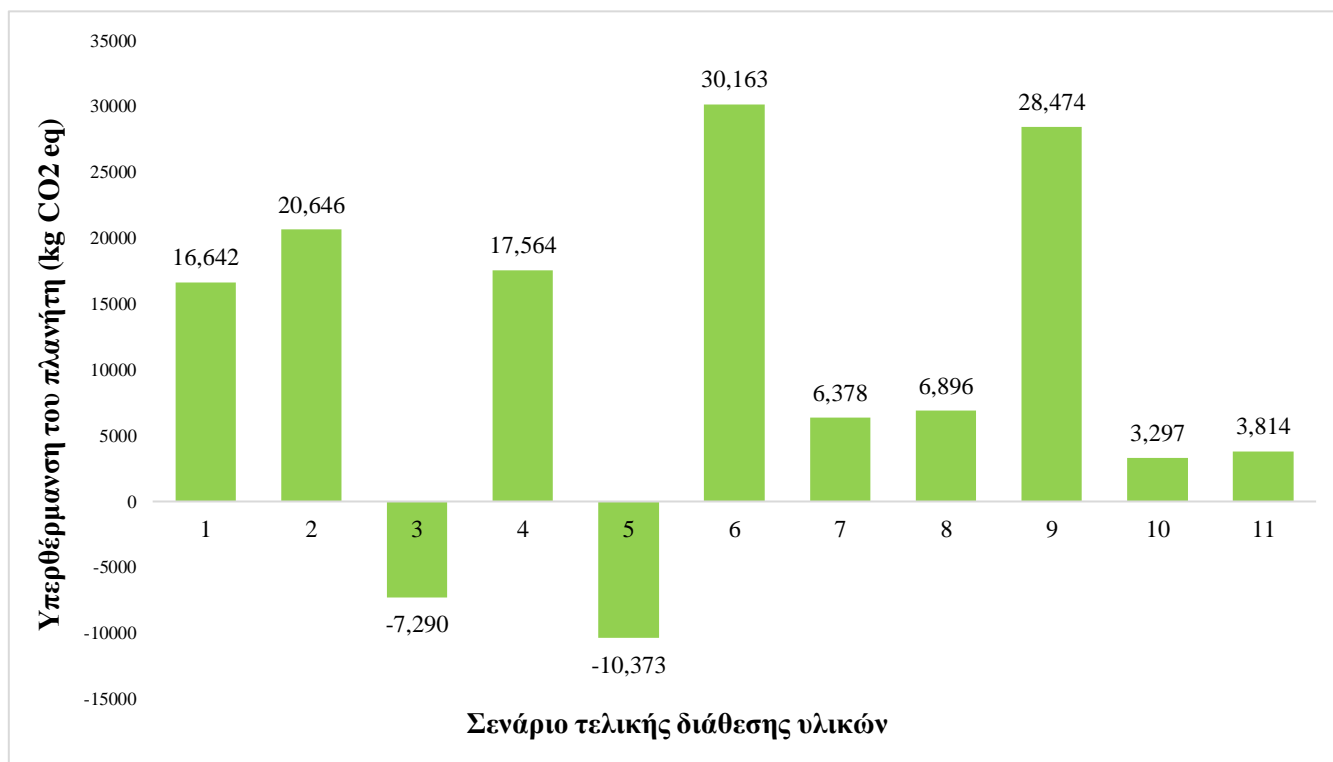


Εικόνα 15. Δείκτης επίπτωσης στην χρήση εκτάσεων γης όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης

6.1.3. Δείκτης επίπτωσης στην υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming)

Από την σύγκριση του δείκτη επιπτώσεων στην υπερθέρμανση του πλανήτη για τα έντεκα σενάρια που αξιολογήθηκαν, προκύπτει ότι τα σενάρια 3 και 5 είναι τα μόνα έχουν θετική επίπτωση ως προς τον συγκεκριμένο δείκτη. Τα κοινά χαρακτηριστικά των δύο σεναρίων είναι πως τα μέταλλα ανακυκλώνονται, ενώ τα σύνθετα υλικά που βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας επαναχρησιμοποιούνται. Συγκρίνοντας τα δύο αυτά σενάρια, παρατηρείται πως το σενάριο τελικής διάθεσης 5 είναι περισσότερο ωφέλιμο κατά περίπου 30% σε σύγκριση με το σενάριο τελικής διάθεσης 3. Στο σενάριο 5, το σκυρόδεμα απορρίπτεται στον χώρο υγειονομικής ταφής, ενώ στο σενάριο 3, αξιολογείται η ανακύκλωση του σκυροδέματος ως λύση διαχείρισης μετά το τέλος ζωής του υλικού. Συνεπώς, φαίνεται πως οι αυξημένες ανάγκες μεταφορών που συνεπάγεται η εναλλακτική της ανακύκλωσης του σκυροδέματος έχουν σημαντική επίδραση στον δείκτη επίπτωσης στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Εξετάζοντας τα σενάρια 6 και 9, τα οποία είναι τα σενάρια με την μεγαλύτερη επίπτωση στον δείκτη, παρατηρείται ότι σε αυτά, τα σύνθετα υλικά ανακυκλώνονται με την τεχνολογία ανακύκλωσης με πυρόλυση. Η ανακύκλωση με πυρόλυση είναι μία πολύ ενεργοβόρα μέθοδος ανακύκλωσης, ενώ συνοδεύεται από αυξημένες ανάγκες μεταφοράς λόγω της τοποθεσίας της εξειδικευμένης εγκατάστασης ανακύκλωσης. Ακολουθούν τα σενάρια 2, 4 και 1, στα οποία τα σύνθετα υλικά απορρίπτονται σε χώρο υγειονομικής ταφής, ενώ το σκυρόδεμα ανακυκλώνεται στο σενάριο 2 και απορρίπτεται σε ΧΥΤΑ στα σενάρια 1 και 4. Συγκρίνοντας τα σενάρια αυτά μεταξύ τους, παρατηρείται ότι το σενάριο 2 είναι εκείνο με τις μεγαλύτερες επιπτώσεις λόγω των μεγάλων αναγκών μεταφοράς που συνοδεύουν την ανακύκλωση του σκυροδέματος. Συμπερασματικά, προκύπτει πως η επιλογή της μεθόδου τελικής διάθεσης των σύνθετων υλικών και οι ανάγκες μεταφοράς που συνεπάγεται κάθε

εναλλακτική τελικής διάθεσης για τα διάφορα υλικά έχουν σημαντική συμβολή στον δείκτη επίπτωσης στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

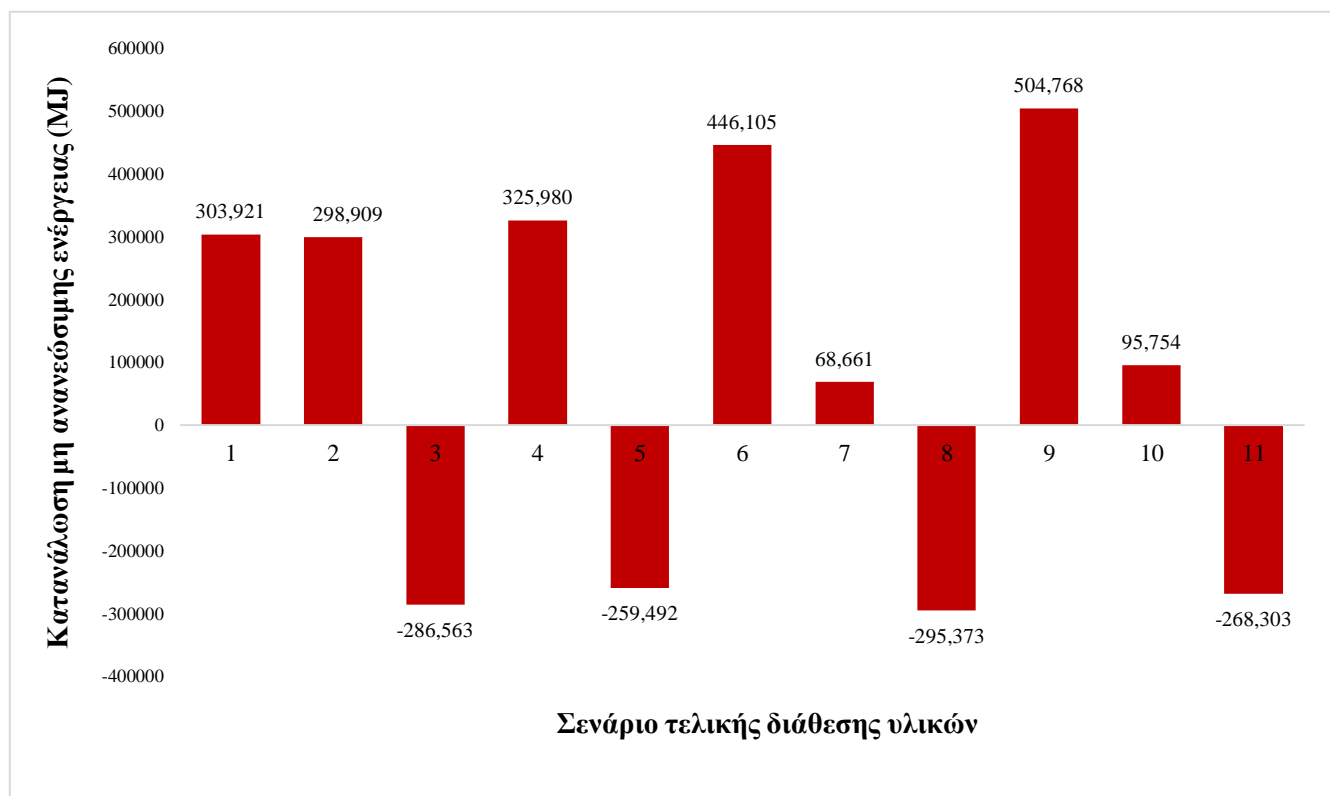


Εικόνα 16. Δείκτης επίπτωσης στην υπερθέρμανση του πλανήτη όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης

6.1.4. Δείκτης επίπτωσης στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας (non-renewable energy)

Εξετάζοντας τον δείκτη επίπτωσης στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας για τα έντεκα σενάρια που αξιολογήθηκαν, παρατηρείται ότι τα σενάρια 9 και 6, όπου για την τελική διάθεση των σύνθετων υλικών επιλέγεται η μέθοδος ανακύκλωσης με πυρόλυση είναι εκείνα με την μεγαλύτερη επίπτωση στον δείκτη. Προφανώς, αυτό παρατηρείται επειδή η διαδικασία ανακύκλωσης με πυρόλυση είναι μια πολύ ενεργοβόρα διεργασία. Ως προς τις επιπτώσεις στον δείκτη κατανάλωσης μη ανανεώσιμης ενέργειας, ακολουθούν τα σενάρια 4, 1 και 2, στα οποία τα σύνθετα υλικά απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Από την άλλη πλευρά, τα σενάρια 8, 11, 3 και 5, στα οποία ως μέθοδος τελικής διάθεσης των σύνθετων υλικών αξιολογείται η ανακύκλωση με μηχανική λείανση ή η επαναχρησιμοποίηση τους είναι εκείνα που έχουν θετική επίπτωση στον δείκτη. Εξετάζοντας τις ομάδες σεναρίων 9 και 6, 4 και 2, 3 και 5, αλλά και 8 και 10, παρατηρείται ότι η διαφορά σε αυτά τα ζεύγη σεναρίων είναι ότι το σκυρόδεμα ανακυκλώνεται αντί να απορριφθεί σε ΧΥΤΑ. Συγκρίνοντάς τα, ανά δύο, προκύπτει πως στα σενάρια που ως τελική λύση διάθεσης επιλέγεται η

ανακύκλωση του σκυροδέματος αντί της απόθεσης σε χώρο υγειονομικής ταφής, η τιμή του δείκτη επίπτωσης στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας είναι μειωμένη κατά 10%, κατά μέσο όρο. Συνεπώς, φαίνεται πως κυρίως η επιλογή της μεθόδου τελικής διάθεσης των σύνθετων υλικών και δευτερευόντως η εναλλακτική της τελικής διάθεσης του σκυροδέματος έχουν σημαντική συμβολή στον δείκτη επίπτωσης στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας.

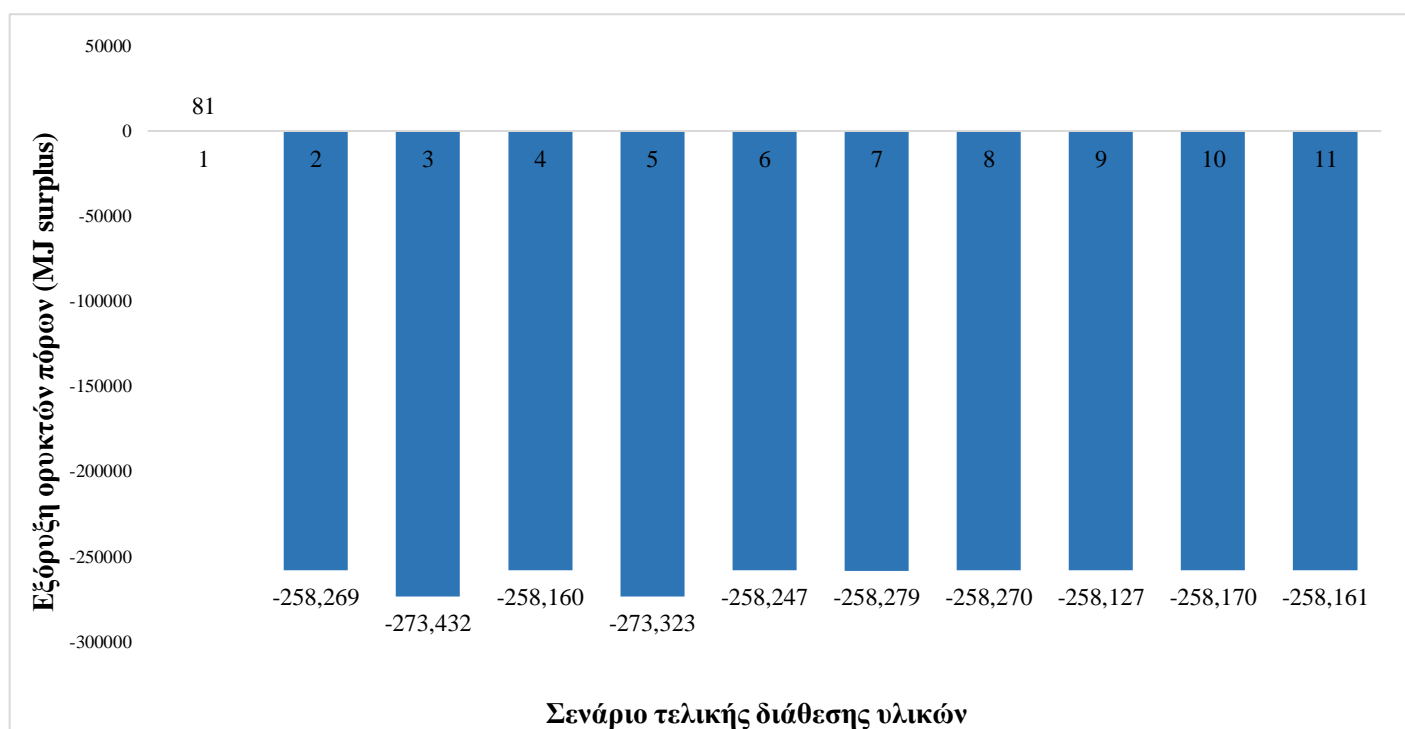


Εικόνα 17. Δείκτης επίπτωσης στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης

6.1.5. Δείκτης επίπτωσης στην εξόρυξη ορυκτών πόρων (mineral extraction)

Από την σύγκριση του δείκτη επιπτώσεων στην εξόρυξη ορυκτών πόρων για τα έντεκα σενάρια προκύπτει πως σχεδόν όλα τα σενάρια έχουν θετικές επιπτώσεις στον δείκτη με μόνο το σενάριο 1 να έχει οριακά αρνητική επίπτωση. Το σενάριο 1, που είναι το μόνο επιβλαβές αναφέρεται στην απόρριψη όλων των υλικών, περιλαμβανομένων των μετάλλων σε ΧΥΤΑ, συνεπώς δεν υπάρχει καμία ανάκτηση ή επαναχρησιμοποίηση υλικών ή ενέργειας. Τα σενάρια με τις μεγαλύτερες θετικές επιπτώσεις είναι τα σενάρια 5 και 3. Στα σενάρια αυτά, τα σύνθετα υλικά επαναχρησιμοποιούνται, ενώ το σκυροδέμα απορρίπτεται σε ΧΥΤΑ στο σενάριο 5 και ανακυκλώνεται στο σενάριο 3. Παρατηρείται πως η διαφορά αυτή στην επιλογή μεθόδου τελικής διάθεσης του σκυροδέματος δεν έχει σημαντική επίπτωση στον δείκτη. Τα υπόλοιπα σενάρια έχουν κι αυτά θετική επίπτωση στον δείκτη, η οποία όμως είναι κατά 5-6% μικρότερη συγκριτικά με την επίπτωση που έχουν τα σενάρια 3 και 5. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι κύριο ρόλο στην διαμόρφωση του δείκτη επίπτωσης στην εξόρυξη ορυκτών πόρων

έχει η επιλογή τελικής διάθεσης των μετάλλων, ενώ επίπτωση έχει και η επιλογή της επαναχρησιμοποίησης των συνθέτων υλικών, αντί για οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Μεταξύ των άλλων μεθόδων τελικής διάθεσης για τα σύνθετα υλικά και το σκυρόδεμα δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση του δείκτη επίπτωσης στην εξόρυξη ορυκτών πόρων.



Εικόνα 18. Δείκτης επίπτωσης στην εξόρυξη ορυκτών πόρων όπως υπολογίστηκε από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης

6.2. Πίνακας δεδομένων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας DEA

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι εισροές για κάθε DMU που αξιολογείται είναι το κόστος των διαδικασιών τελικής διάθεσης κάθε σεναρίου και οι αντίστοιχες ανάγκες μεταφορών για αυτές τις διαδικασίες. Οι εκροές είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε σεναρίου τελικής διάθεσης των υλικών. Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν πέντε δείκτες επιπτώσεων όπως προέκυψαν από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για κάθε σενάριο. Από αυτούς, στην εφαρμογή της DEA συμπεριλαμβάνονται οι τρεις και συγκεκριμένα οι δείκτες επιπτώσεων στην υπερθέρμανση του πλανήτη, στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας και στην χρήση εκτάσεων γης. Οι δείκτες επιπτώσεων στην ελάττωση της τρύπας του όζοντος και στην εξόρυξη ορυκτών πόρων δεν περιλαμβάνονται επειδή σε αυτούς τους δείκτες οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων είναι μικρές αλλά και προκειμένου να είναι όσο το

δυνατόν μικρότερη η απόκλιση από τους εμπειρικούς κανόνες που περιγράφονται στην ενότητα 5.5.2, χωρίς ταυτόχρονα να υπάρξει απώλεια σημαντικής πληροφορίας.

Στον Πίνακα 7, παρουσιάζεται ο αρχικός πίνακας δεδομένων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας DEA.

Πίνακας 7. Αρχικός πίνακας δεδομένων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας DEA

DMU	Μεταβλητές εισροών		Μεταβλητές εκροών		
	Συνολικό κόστος (€)	Μεταφορικές ανάγκες (tkm)	Χρήση γης (m ²)	Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO ₂ eq)	Κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ)
1	24.893,12	83.886,00	346,63	16.641,61	303.920,60
2	39.323,19	192.949,05	-61,35	20.646,48	298.909,20
3	38.615,77	193.992,30	-141,46	-7.289,90	-286.563,00
4	41.383,18	100.463,25	174,21	17.563,73	325.979,60
5	40.675,76	101.506,50	94,11	-10.372,60	-259.492,00
6	40.666,56	208.036,05	-79,96	30.163,29	446.105,30
7	40.080,93	208.036,05	-75,87	6.378,42	68.660,94
8	39.302,77	208.036,05	-63,14	6.896,29	-295.373,00
9	42.726,54	115.550,25	196,51	28.474,23	504.768,20
10	42.140,92	115.550,25	162,04	3.297,31	95.754,27
11	41.362,76	115.550,25	172,42	3.813,55	-268.303,00

Εξαιτίας της ύπαρξης αρνητικών τιμών στον πίνακα δεδομένων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, αλλά και της ειδικής μεταχείρισης που απαιτείται για τις ανεπιθύμητες μεταβλητές εξόδου (όπως αναλύεται στην ενότητα 5.5.3), πριν την εφαρμογή της μεθόδου τα δεδομένα μετασχηματίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις (7) και (8). Η μεθοδολογία DEA εφαρμόζεται για τον νέο πίνακα δεδομένων με τις αρχικές τιμές εισροών και με τις τιμές εκροών που προκύπτουν από αυτόν τον μετασχηματισμό. Στον Πίνακα 8, φαίνεται ο τελικός πίνακας δεδομένων για τον οποίο εφαρμόζεται η μεθοδολογία.

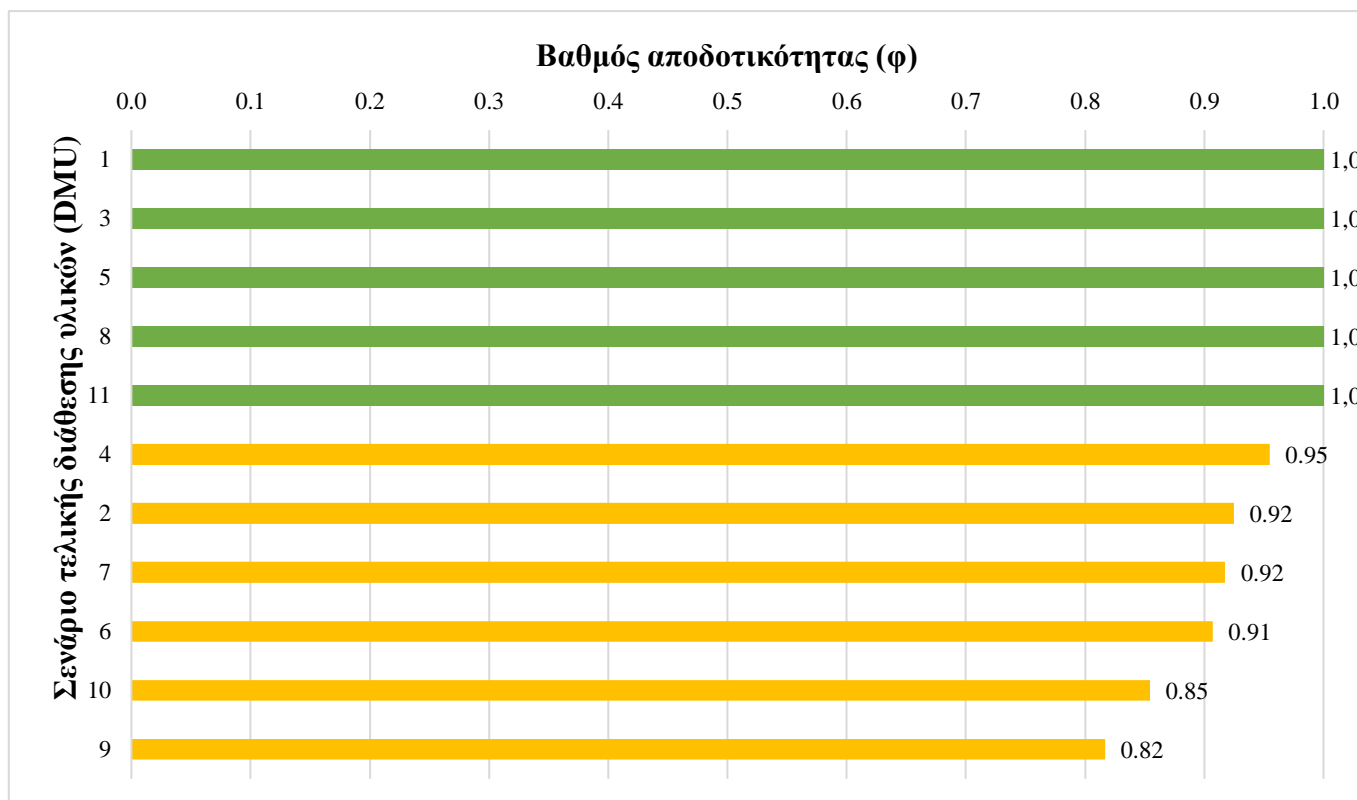
Πίνακας 8. Πίνακας μετασηματισμένων δεδομένων για τον οποίον εφαρμόζεται η μεθοδολογία DEA

DMU	Μεταβλητές εισροών		Μεταβλητές εκροών		
	Συνολικό κόστος (€)	Μεταφορικές ανάγκες (tkm)	Χρήση γης (m ²)	Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO ₂ eq)	Κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ)
1	24.893,12	83.886,00	3,37	13.558,39	201.079,40
2	39.323,19	192.949,05	411,35	9.553,52	206.090,80
3	38.615,77	193.992,30	491,46	37.489,90	791.563,00
4	41.383,18	100.463,25	175,79	12.636,27	179.020,40
5	40.675,76	101.506,50	255,89	40.572,60	764.492,00
6	40.666,56	208.036,05	429,96	36,71	58.894,70
7	40.080,93	208.036,05	425,87	23.821,58	436.339,06
8	39.302,77	208.036,05	413,14	23.303,71	800.373,00
9	42.726,54	115.550,25	153,49	1.725,77	231,80
10	42.140,92	115.550,25	187,96	26.902,69	409.245,73
11	41.362,76	115.550,25	177,58	26.386,45	773.303,00

6.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων (DEA)

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής προκύπτει ότι τα συμπεράσματα είναι αρκετά διαφορετικά για κάθε δείκτη επιπτώσεων για τα διαφορετικά σενάρια τελικής διάθεσης που αξιολογήθηκαν. Συνεπώς, εφαρμόζεται η μεθοδολογία DEA με στόχο τον εντοπισμό των αποδοτικών και των μη αποδοτικών μεθόδων διαχείρισης των υλικών μετά το τέλος ζωής τους, τον καθορισμό στόχων και την πρόταση μέτρων για τις μη αποδοτικές εναλλακτικές προκειμένου να γίνουν αποδοτικές. Σε αυτό το υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της DEA.

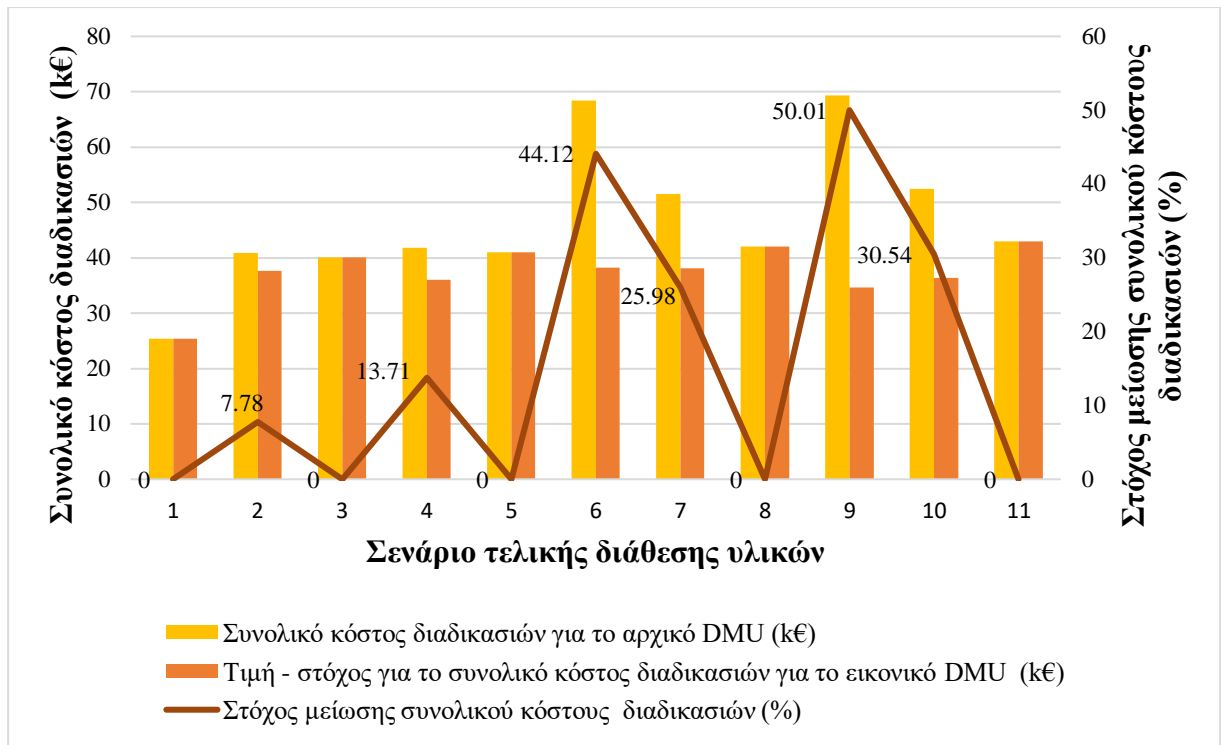
Στην Εικόνα 19, παρουσιάζεται ο βαθμός αποδοτικότητας ϕ για κάθε DMU, που αναφέρεται στο αντίστοιχο σενάριο τελικής διάθεσης που αξιολογείται. Ένα σενάριο τελικής διάθεσης υλικών θεωρείται αποδοτικό όταν ο βαθμός αποδοτικότητας $\phi = 1$, ενώ αν ο βαθμός αποδοτικότητας $\phi < 1$, το σενάριο χαρακτηρίζεται μη αποδοτικό. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της DEA, ένας σημαντικός αριθμός σεναρίων τελικής διάθεσης χαρακτηρίζεται αποδοτικός και συγκεκριμένα τα σενάρια 1, 3, 5, 8 και 11. Ο βαθμός αποδοτικότητας των μη αποδοτικών σεναρίων κυμαίνεται από 0,82 έως 0,95.



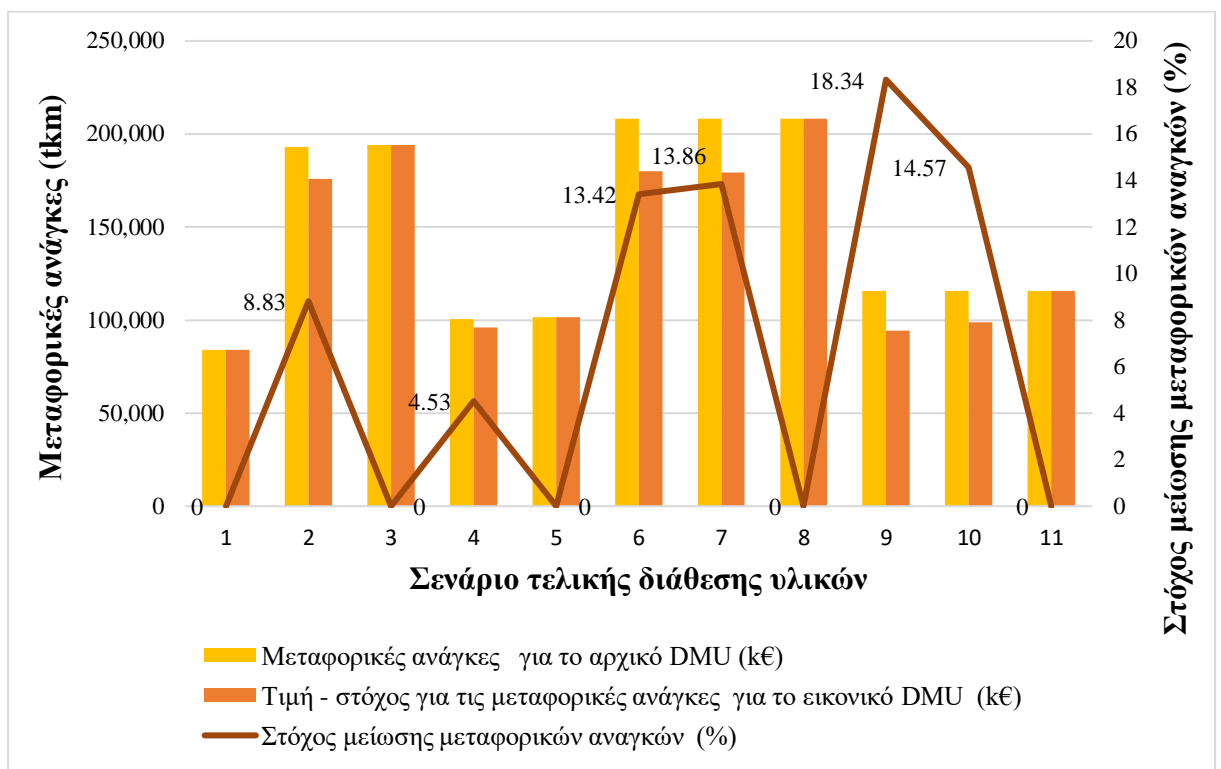
Εικόνα 19. Βαθμός αποδοτικότητας για κάθε σενάριο τελικής διάθεσης που αξιολογήθηκε

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε ένα μοντέλο DEA με προσανατολισμό στις εισροές (input-oriented) και μεταβλητές αποδόσεις κλίμακας (VRS), ελαχιστοποιώντας τα κόστη των διεργασιών τελικής διάθεσης των υλικών και τις αντίστοιχες μεταφορικές ανάγκες και διατηρώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σταθερές. Στις εικόνες Εικόνα 20 Εικόνα 21 παρουσιάζονται συγκριτικά οι αρχικές τιμές για κάθε DMU που αξιολογείται, η τιμή - στόχος που υπολογίστηκε από την εφαρμογή της DEA για κάθε εικονικό DMU και ο αντίστοιχος στόχος μείωσης για τις μεταβλητές εισόδου που σχετίζονται με το συνολικό κόστος των σεναρίων τελικής διάθεσης και τις μεταφορικές ανάγκες κάθε σεναρίου, αντίστοιχα.

Ο στόχος μείωσης για τις εισροές αναφέρεται στην μείωση που θα χρειαζόταν να γίνει στις εισροές, έτσι ώστε οι μη αποδοτικές DMUs να λειτουργούν υπό τις συνθήκες εκείνες που υπολογίζονται από την εφαρμογή της μεθοδολογίας DEA προκειμένου να γίνουν αποδοτικές. Παρατηρείται πως οι μειώσεις που απαιτούνται για το συνολικό κόστος των διαφόρων σεναρίων τελικής διάθεσης κυμαίνονται από 7,78% έως 50,01%. Οι μεγαλύτεροι στόχοι μείωσης αντιστοιχούν στα περισσότερα μη αποδοτικά σεναρία, τα οποία, κατά φθίνουσα σειρά απαιτούμενων μειώσεων στο συνολικό κόστος, είναι τα σεναρία τελικής διάθεσης 9, 10, 6, 7, 4 και 2. Αντίστοιχα, οι στόχοι μείωσης για τις μεταφορικές ανάγκες των αξιολογούμενων σεναρίων κυμαίνονται από 4,53% έως 18,34%. Οι μεγαλύτεροι στόχοι μείωσης αντιστοιχούν στα περισσότερα μη αποδοτικά σεναρία, τα οποία, κατά φθίνουσα σειρά των απαιτούμενων μειώσεων στις συνολικές μεταφορικές ανάγκες, είναι τα σεναρία τελικής διάθεσης 9, 10, 7, 6, 4 και 2.



Εικόνα 20. Συνολικό κόστος διαδικασιών για το αρχικό και το αντίστοιχο εικονικό DMU και ο απαιτούμενος στόχος μείωσης του συνολικού κόστους διαδικασιών για κάθε σενάριο τελικής διάθεσης



Εικόνα 21. Συνολικές μεταφορικές ανάγκες για το αρχικό και το αντίστοιχο εικονικό DMU και ο απαιτούμενος στόχος μείωσης των συνολικών μεταφορικών αναγκών για κάθε σενάριο τελικής διάθεσης

6.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα εφαρμογής της DEA προκύπτει πως υπάρχουν σενάρια που έχουν σημαντική επίδραση σε μεμονωμένους δείκτες επιπτώσεων που υπολογίζονται από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής, αλλά αν συνυπολογισθούν τα συνολικά κόστη και οι μεταφορικές ανάγκες που σχετίζονται με τα σενάρια τελικής διάθεσης των υλικών, τα σενάρια αυτά χαρακτηρίζονται αποδοτικά. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα σενάρια 1, 3, 5, 8 και 11 είναι αυτά που χαρακτηρίζονται αποδοτικά σύμφωνα με τα αποτελέσματα της DEA. Όσον αφορά τις μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της DEA, το συνολικό κόστος των διαδικασιών τελικής διάθεσης κυμαίνεται από 24,89 κ€ έως 42,36 κ€, ενώ οι αντίστοιχες μεταφορικές ανάγκες για κάθε σενάριο κυμαίνονται από 83.886 tkm έως 208.036 tkm. Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται πως οι μεταβλητές εξόδου, δηλαδή οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σεναρίων τελικής διάθεσης των υλικών παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική αποδοτικότητα των σεναρίων.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα φαίνεται πως η επιλογή της μεθόδου διαχείρισης των σύνθετων υλικών έχει αξιοσημείωτη επίδραση στην αποδοτικότητα του σεναρίου, ενώ η μέθοδος τελικής διάθεσης του σκυροδέματος είναι επίσης σημαντική αλλά δευτερεύουσα για την διαμόρφωση της αποδοτικότητας. Συγκεκριμένα, τα σενάρια όπου τα σύνθετα υλικά της ανεμογεννήτριας επαναχρησιμοποιούνται ή ανακυκλώνονται με μηχανική λείανση είναι εκείνα που χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά. Το σενάριο 1, όπου όλα τα υλικά απορρίπτονται σε ΧΥΤΑ, χαρακτηρίζεται επίσης αποδοτικό λόγω των συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια τελικής διάθεσης σημαντικά χαμηλότερων μεταφορικών αναγκών και συνολικού κόστους διαδικασιών. Επιπρόσθετα, τα σενάρια όπου τα σύνθετα υλικά ανακυκλώνονται χρησιμοποιώντας ενεργοβόρες μεθόδους ανακύκλωσης, όπως η πυρόλυση και η πυρόλυση με μικροκύματα, ή απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι εκείνα που χαρακτηρίζονται από την εφαρμογή της DEA ως μη αποδοτικά.

Παρόλο που το σενάριο 1 χαρακτηρίζεται από την εφαρμογή της μεθοδολογίας LCA + DEA αποδοτικό, η απόρριψη σύνθετων υλικών σε ΧΥΤΑ θεωρείται μη βιώσιμη μέθοδος τελικής διάθεσης για αυτά τα υλικά (Deeney *et al.*, 2021). Παράλληλα, αναμένεται πως στο άμεσο μέλλον η απόθεση σύνθετων υλικών σε ΧΥΤΑ δεν θα είναι καν μία από τις διαθέσιμες εναλλακτικές λόγω κανονιστικών και νομικών περιορισμών. Στην Ευρώπη, η Γερμανία, η Αυστρία, η Ολλανδία και η Φινλανδία έχουν ήδη απαγορεύσει την απόρριψη σύνθετων υλικών σε ΧΥΤΑ (WindEurope, 2020). Η βέλτιστη, δηλαδή η πιο βιώσιμη, μέθοδος διαχείρισης των σύνθετων υλικών μετά το τέλος ζωής τους είναι η επαναχρησιμοποίηση ή η χρήση για άλλους σκοπούς, αλλά οι χαμηλές τιμές παραγωγής νέων ινών γυαλιού λειτουργούν ως αντικίνητρο προς αυτή την κατεύθυνση (Liu, Meng and Barlow, 2022). Όσον αφορά τις μεθόδους ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών, η μόνη εναλλακτική που χαρακτηρίζεται ως αποδοτική από την εφαρμογή της DEA είναι η ανακύκλωση με μηχανική λείανση. Παρόλο που η επιλογή αυτή είναι η τεχνολογικά και εμπορικά πιο ώριμη μέθοδος ανακύκλωσης για σύνθετα υλικά, η ποιότητα του ανακυκλωμένου υλικού που προκύπτει είναι πολύ χαμηλή λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άλλα υλικά, ενώ περίπου το 40% του υλικού καταλήγει ως απόβλητο που παράγεται κατά τις

διαδικασίες της ελάττωσης του μεγέθους του υλικού, του κοσκινίσματος και της επεξεργασίας (WindEurope, 2020). Οι λύσεις, που με τα δεδομένα που ισχύουν χαρακτηρίζονται ως αποδοτικές έχουν αρκετά μειονεκτήματα. Συνεπώς, χρειάζεται να σχεδιαστούν πολιτικές και να ληφθούν μέτρα για την βελτίωση της αποδοτικότητας των σεναρίων εκείνων που χαρακτηρίζονται μη αποδοτικά.

Υπάρχουν πολλές στρατηγικές που μπορούν να ακολουθηθούν, ειδικά όσον αφορά την αύξηση της αποδοτικότητας πιο βιώσιμων μεθόδων σε σύγκριση με την εναλλακτική απόρριψης σε χώρους υγειονομικής ταφής. Μία ευρέως διαδεδομένη πολιτική είναι η σημαντική αύξηση των τελών απόρριψης σε ΧΥΤΑ για τα σύνθετα υλικά, με σκοπό η επιλογή αυτή να καταστεί λιγότερο ανταγωνιστική σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Ωστόσο, είναι πολύ πιο σημαντικό να βελτιωθεί η απόδοση των τεχνολογικά λιγότερο ώριμων μεθόδων ανακύκλωσης σύνθετων υλικών, οι οποίες απαιτούν μεγάλες καταναλώσεις ενέργειας. Μεσοπρόθεσμα, αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την επένδυση σημαντικών οικονομικών και επιστημονικών πόρων στην έρευνα για την αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας προκειμένου να μειωθεί το συνολικό κόστος ανακύκλωσης με αυτές τις μεθόδους (Liu, Meng and Barlow, 2022). Βραχυπρόθεσμα, η οικονομική επιδότηση των πιο ακριβών μεθόδων θα τις καθιστούσε ανταγωνιστικές. Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής της DEA στα δεδομένα ανακύκλωσης, φαίνεται ότι η επιδότηση του συνολικού κόστους ανακύκλωσης της πυρόλυσης κατά 44% - 50% και του συνολικού κόστους της πυρόλυσης με μικροκύματα κατά 26% - 30% θα τις καθιστούσε ανταγωνιστικές.

Όσον αφορά τις μεταφορικές ανάγκες, είναι επιθυμητή η υιοθέτηση πολιτικών και μέτρων που θα είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση των απαιτούμενων αποστάσεων για τα διάφορα σενάρια διαχείρισης των υλικών μετά το τέλος ζωής τους. Αν επικεντρωθούμε στα μη αποδοτικά σενάρια τελικής διάθεσης όπου τα σύνθετα υλικά ανακυκλώνονται, φαίνεται πως τα σενάρια όπου χρησιμοποιούνται η πυρόλυση και η πυρόλυση με μικροκύματα για την ανακύκλωση αυτών των υλικών μπορούν να βελτιωθούν. Στην παρούσα εργασία, θεωρείται πως η εφαρμογή αυτών των μεθόδων μπορεί να γίνει μόνο σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις ανακύκλωσης που βρίσκονται στην Ιταλία. Αναλύοντας τα αποτελέσματα της DEA, προκύπτει ότι η μείωση των συνολικών μεταφορικών αναγκών των συγκεκριμένων σεναρίων κατά 13% - 18,5% θα καθιστούσε αυτές τις εναλλακτικές τελικής διάθεσης αποδοτικές. Συνεπώς, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής θα πρέπει να εξετάσουν τη δυνατότητα λειτουργίας τέτοιων εξειδικευμένων εγκαταστάσεων ανακύκλωσης σύνθετων υλικών στην Ελλάδα. Η στρατηγική αυτή θα μπορούσε να είναι πιο ρεαλιστική και οικονομικά βιώσιμη εάν ακολουθηθεί μια προσέγγιση συνέργειας μεταξύ διαφορετικών βιομηχανικών τομέων. Εκτός από την βιομηχανία της αιολικής ενέργειας, σύνθετα υλικά προς διαχείριση μετά το τέλος ζωής τους παράγονται από αρκετούς άλλους τομείς όπως οι κατασκευές, η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία. Η οικονομική σκοπιμότητα αυτής της πρότασης και οι σχετικές ροές υλικών, οι αλυσίδες μεταφορών και αξίας αποτελούν θέματα που θα μπορούσαν να εξεταστούν για μελλοντική έρευνα.

7. Συμπεράσματα

Τα επόμενα χρόνια, αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά ο ετήσιος αριθμός αλλά και η μάζα υλικών των ανεμογεννητριών που θα φτάσουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Συνεπώς, δημιουργείται η ανάγκη διερεύνησης του ζητήματος της βέλτιστης διαχείρισης των ανεμογεννητριών μετά το τέλος της ζωής τους, με στόχο την μεγιστοποίηση των περιβαλλοντικών ωφελειών της αιολικής ενέργειας, ακολουθώντας τις αρχές της βιωσιμότητας και της κυκλικότητας. Στην βιβλιογραφία, υπάρχουν κάποιες μελέτες που ασχολούνται με αυτό το θέμα, οι οποίες επικεντρώνονται μόνο στη σύγκριση των εναλλακτικών διαχείρισης μετά το τέλος του κύκλου ζωής των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να διερευνηθούν οι εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης με μία πιο ολιστική προσέγγιση, που θα αξιολογεί τις μεθόδους τελικής διάθεσης για το σκυρόδεμα της θεμελίωσης, τα κύρια μέταλλα που βρίσκονται σε μία ανεμογεννήτρια, καθώς και τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων.

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκε η συνδυαστική μεθοδολογία LCA + DEA για την σύγκριση και αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων τελικής διάθεσης των κύριων υλικών μίας τυπικής ανεμογεννήτριας στην Ελλάδα, δηλαδή του σκυροδέματος, των μετάλλων και των σύνθετων υλικών που βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια. Η μεθοδολογία LCA χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όλης της φάσης απόσυρσης μετά το τέλος του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η εναλλακτική τελικής διαχείρισης των σύνθετων υλικών είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας, ενώ η ανακύκλωση του σκυροδέματος αντί για την απόρριψη και οι μεταφορικές ανάγκες που προκύπτουν από την επιλογή αυτής της μεθόδου έχουν επίσης αξιοσημείωτη συμβολή στους επιμέρους δείκτες επιπτώσεων, αλλά είναι δευτερεύουσας σημασίας.

Η εφαρμογή της DEA χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής επιτρέπει τον προσδιορισμό των αποτελεσματικών και των μη αποτελεσματικών σεναρίων τελικής διάθεσης και την διατύπωση συγκεκριμένων μέτρων πολιτικής για την βελτίωση των μη αποδοτικών. Μετά την συμπερίληψη των παραμέτρων που σχετίζονται με το συνολικό κόστος των διαδικασιών και τις σχετικές μεταφορικές ανάγκες στον πίνακα δεδομένων για τον οποίο εφαρμόζεται η DEA, η εναλλακτική τελικής διάθεσης των σύνθετων υλικών παραμένει ο πιο καθοριστικός παράγοντας, ενώ η επίδραση της μεθόδου τελικής διάθεσης του σκυροδέματος είναι σημαντική, αλλά δευτερεύουσας σημασίας. Συγκεκριμένα, τα σενάρια εκείνα στα οποία τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων των ανεμογεννητριών επαναχρησιμοποιούνται ή ανακυκλώνονται με τη μέθοδο της μηχανικής λείανσης είναι εκείνα που χαρακτηρίζονται αποδοτικά, ενώ η επιλογή της ανακύκλωσης με πυρόλυση ή πυρόλυση με μικροκύματα τα καθιστά μη αποδοτικά.

Συνεπώς, απαιτείται να επιταχυνθεί η διαδικασία τεχνολογικής ωρίμανσης των πιο ενεργοβόρων μεθόδων ανακύκλωσης σύνθετων υλικών προκειμένου να καταστούν ανταγωνιστικές. Όσον αφορά τα άμεσα μέτρα πολιτικής, από τα αποτελέσματα της DEA προκύπτει ότι η επιδότηση του συνολικού κόστους της ανακύκλωσης με πυρόλυση κατά 44% - 50% και του συνολικού κόστους της ανακύκλωσης με πυρόλυση με μικροκύματα κατά 26% - 30% θα καθιστούσε αυτές τις μεθόδους αποδοτικές και

ανταγωνιστικές σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Όσον αφορά τις συνολικές μεταφορικές ανάγκες των σεναρίων όπου η ανακύκλωση των σύνθετων υλικών γίνεται με πυρόλυση ή με πυρόλυση με μικροκύματα, η μείωση τους κατά 13% - 18,5% θα τα καθιστούσε αποδοτικά. Κατά συνέπεια, η χρησιμότητα και η οικονομική βιωσιμότητα της λειτουργίας εξειδικευμένων εγκαταστάσεων ανακύκλωσης σύνθετων υλικών στην Ελλάδα θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Βιβλιογραφία

Adefarati, T. and Bansal, R. C. (2019) ‘Energizing Renewable Energy Systems and Distribution Generation’, in *Pathways to a Smarter Power System*, pp. 29–65. doi: 10.1016/B978-0-08-102592-5.00002-8.

Albores, P., Petridis, K. and Dey, P. K. (2016) ‘Analysing Efficiency of Waste to Energy Systems: Using Data Envelopment Analysis in Municipal Solid Waste Management’, *Procedia Environmental Sciences*, 35, pp. 265–278. doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.007.

Ali Mehdi, R., Ostachowicz, W. and Luczak, M. (2016) ‘Introduction’, in Wiesław Ostachowicz, Malcolm McGugan, Jens-Uwe Schröder-Hinrichs, M. L. (ed.) *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*, pp. 1–12.

Ampeliotis, K. (2015) ‘Electricity generation in Greece’, in Ampeliotis, K. and Sdrali, D. (eds) *HOUSEHOLD TECHNOLOGY [Undergraduate textbook]*. Athens: Kallipos, Open Academic Editions. Available at: <http://hdl.handle.net/11419/3013>.

Andersen, N. (2015) *Wind turbine end-of-life: Characterisation of waste material*. University of Gävle.

Arm, M., Wik, O., Engelsen, C., Erlandsson, M., Hjelm, O. and Wahlström, M. (2017) ‘How Does the European Recovery Target for Construction & Demolition Waste Affect Resource Management?’, *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), pp. 1491–1504. doi: 10.1007/s12649-016-9661-7.

Arvesen, A. and Hertwich, E. G. (2012) ‘Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), pp. 5994–6006. doi: 10.1016/j.rser.2012.06.023.

Bajec, P. and Tuljak-Suban, D. (2019) ‘An integrated analytic hierarchy process-Slack based measure-data envelopment analysis model for evaluating the efficiency of logistics service providers considering undesirable performance criteria’, *Sustainability*, 11(8). doi: 10.3390/su11082330.

Beauson, J. and Brøndsted, P. (2016) ‘Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective’, in Wiesław Ostachowicz, Malcolm McGugan, Jens-Uwe Schröder-Hinrichs, M. L. (ed.) *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*, pp. 421–432. doi: 10.1007/978-3-319-39095-6.

Beig, A. R. and Muyeen, S. M. (2016) ‘Wind energy’, in Muhammad, H. R. (ed.) *Electric Renewable Energy Systems*. Academic Press, pp. 60–77. doi: 10.1016/B978-0-12-804448-3.00004-9.

Benrtdt, M. L. (2004) *Sustainable Concrete for Wind Turbine Foundations*, BNL-72488-2004-IR. New York. Available at: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/15008841-7hGEUv/native/>.

Björkman, B. and Samuelsson, C. (2014) ‘Recycling of Steel’, in Worrell, E. and Reuter, M. A. (eds) *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier, pp. 65–83. doi: 10.1016/B978-0-12-396459-5.00006-4.

- Blade Made / RE-USE.EU* (no date). Available at: <https://re-use.eu/blade-made/> (Accessed: 30 May 2022).
- Blade Made Playgrounds - Superuse Studios* (no date). Available at: <https://www.superuse-studios.com/projectplus/blade-made/> (Accessed: 30 May 2022).
- Breeze, P. (2016a) 'Drive Trains, Gearboxes, and Generators', in Breeze, P. (ed.) *Wind Power Generation*. Academic Press, pp. 41–48. doi: 10.1016/B978-0-12-804038-6.00005-0.
- Breeze, P. (2016b) 'Rotors and Blades', in Breeze, P. (ed.) *Wind Power Generation*. Academic Press, pp. 29–40. doi: 10.1016/B978-0-12-804038-6.00004-9.
- Breeze, P. (2016c) 'Wind Farms, Electrical Optimization, and Repowering', in *Wind Power Generation*, pp. 59–65. doi: 10.1016/b978-0-12-804038-6.00007-4.
- Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B. and Pavel, C (2020) 'Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system.', *EUR 30095 EN*. Available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119941> (Accessed: 9 June 2022).
- Charles, V., Aparicio, J. and Zhu, J. (2019) 'The curse of dimensionality of decision-making units: A simple approach to increase the discriminatory power of data envelopment analysis', *European Journal of Operational Research*, 279(3), pp. 929–940. doi: 10.1016/j.ejor.2019.06.025.
- Charnes, A., Cooper, W. W. and Rhodes, E. (1978) 'Measuring the efficiency of decision-making units', *European Journal of Operational Research*, 2(6), pp. 429–444. doi: 10.1016/0377-2217(79)90229-7.
- Chen, H. W., Chang, N. B., Chen, J. C. and Tsai, S. J. (2010) 'Environmental performance evaluation of large-scale municipal solid waste incinerators using data envelopment analysis', *Waste Management*, 30(7), pp. 1371–1381. doi: 10.1016/j.wasman.2010.02.002.
- Cooper, W., Seiford, L. and Tone, K. (1999) *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, Kluwer Academic Publishers, New York. doi: 10.1057/palgrave.jors.2601257.
- Cost to Recycle Metal / Desert Metal* (no date). Available at: <http://recycletucson.com/cost-recycle-metal/> (Accessed: 19 March 2022).
- Data Envelopment Analysis: Dr. Joe Zhu's Research on DEA* (no date). Available at: <http://www.deafrontier.net/index.html> (Accessed: 4 May 2022).
- Dedoussis, V., Konstas, C., Kassimis, A. and Sofianopoulou, S. (2010) 'Efficiency evaluation of hydroelectric power plants using data envelopment analysis', *Journal of Applied Operational Research*, 2(2), pp. 94–99. Available at: <https://core.ac.uk/reader/161818320>.
- Deeney, P., Nagle, A.J, Gough, F., Lemmertz, H., Delaney, E. L., McKinley, J. M, Graham, C., Leahy, P. G., Dunphy N. P. and Mullally G. (2021) 'End-of-Life alternatives for wind turbine blades : Sustainability Indices based on the UN sustainable development goals', *Resources, Conservation & Recycling*, 171(January), p. 105642.

doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105642.

Dincer, I. and Ezzat, M. F. (2018a) '3.4. Renewable Energy Production', in *Comprehensive Energy Systems*. Elsevier Inc., pp. 126–207. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00310-2.

Dincer, I. and Ezzat, M. F. (2018b) '3.4 Renewable Energy Production', in Dincer, I. (ed.) *Comprehensive Energy Systems*. Elsevier, pp. 126–207. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00310-2.

Dolan, S. L. and Heath, G. A. (2012) 'Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Utility-Scale Wind Power: Systematic Review and Harmonization', *Journal of Industrial Ecology*, 16(SUPPL.1). doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00464.x.

Duan, N., Guo, J. P. and Xie, B. C. (2016) 'Is there a difference between the energy and CO₂ emission performance for China's thermal power industry? A bootstrapped directional distance function approach', *Applied Energy*, 162, pp. 1552–1563. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.066.

European Commission (2019) 'Going climate-neutral by 2050: A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy', *European Commission*, pp. 1–20.

European Commission (2022) *REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition*. Brussels. Available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131.

European Composites Industry Association (2013) *Composites recycling made easy*. Brussels. doi: 10.1038/365008e0.

European Council (2008) 'Directive 2008/98/CE of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.', *Official Journal of European Union*, L312, pp. 1–59. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML>.

Garraín, D., De La Rúa C. and Lechòn, Y. (2013) *Background analysis of the quality of the energy data to be considered for the European Reference Life Cycle Database (ELCD)*, EUR 26431. Luxembourg. doi: 10.2788/5377.

Gastaldi, M., Lombardi, G.V., Rapposelli, A. and Romano, G. (2020) 'The Efficiency of Waste Sector in Italy: An Application by Data Envelopment Analysis', *Environmental and Climate Technologies*, 24(3), pp. 225–238. doi: 10.2478/rtuect-2020-0099.

Hellenic Ministry of Environment and Energy (2019) 'National Energy and Climate Plan', (December). Available at: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/el_final_necp_main_en_0.pdf.

Hellenic Wind Energy Association (2022) *HWEA Wind Energy Statistics*. Available at: <https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2022/01/2022-01-28-HWEA-Statistics-Greece-s2-2021-f.pdf>.

Hoefler, M. (2015) *Wind Turbine Blade Recycling: An Economic Decision Framework*. doi: 10.13140/RG.2.2.28393.90723.

International Energy Agency (2021) *Renewables 2021 Analysis and forecast to 2026*,

International Energy Agency (IEA) Publications International. Available at: www.iea.org/t&c/%0Ahttps://webstore.iea.org/download/direct/4329.

International Renewable Energy Agency (2021) *Renewable capacity statistics 2021*. IRENA. Available at: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>.

Iqbal Ali, A. and Seiford, L. M. (1990) 'Translation invariance in data envelopment analysis', *Operations Research Letters*, 9(6), pp. 403–405. doi: 10.1016/0167-6377(90)90061-9.

ISO (2006) *ISO 14040 - environmental management - life cycle assessment - principles and framework*. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en> (Accessed: 8 June 2022).

Junginger, M. and Louwen, A. (2019) 'Onshore wind energy', in *Technological Learning in the Transition to a Low-Carbon Energy System: Conceptual Issues, Empirical Findings, and Use, in Energy Modeling*. Elsevier, pp. 87–102. doi: 10.1016/B978-0-12-818762-3.00006-6.

Kalkanis, K., Psomopoulos, C.S., Kaminaris, S., Ioannidis, G. and Pachos, P. (2019) 'Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods', *Energy Procedia*, 157(2018), pp. 1136–1143. doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.281.

Kaplan, R. S. and Ness, H. (1987) 'Recycling of metals', *Conservation & Recycling*, 10(1), pp. 1–13. doi: 10.1016/0361-3658(87)90002-6.

Katsaprakakis, D. A. . and Christakis, D. G. (2012) '2.07 Wind Parks Design, Including Representative Case Studies', in Sayigh, A. (ed.) *Comprehensive Renewable Energy*. Second. Malapuram, Kerala, India: Elsevier Ltd., pp. 169–225.

Korhonen, P. J. and Luptacik, M. (2004) 'Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis', *European Journal of Operational Research*, 154(2), pp. 437–446. doi: 10.1016/S0377-2217(03)00180-2.

Lam, C. M., Hsu, S. C., Alvarado, V. and Li, W. M. (2020) 'Integrated life-cycle data envelopment analysis for techno-environmental performance evaluation on sludge-to-energy systems', *Applied Energy*, 266(March), p. 114867. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114867.

Laso, J., Hoehn, D., Margallo, M., García-Herrero, I., Batlle-Bayer, L., Bala, A., Fullana-i-Palmer, P., Vázquez-Rowe, I., Irabien, A. and Aldaco, R. 'Assessing energy and environmental efficiency of the Spanish agri-food system using the LCA/DEA methodology', *Energies*, 11(12). doi: 10.3390/en11123395.

Li, D., Wang, M. Q. and Lee, C. (2020) 'The waste treatment and recycling efficiency of industrial waste processing based on two-stage data envelopment analysis DEA with undesirable inputs', *Journal of Cleaner Production*, 242, p. 118279. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118279.

Cristobal, J. G., Limleamthong, P., Manfredi S. and Guillén-Gosálbez G. (2016) 'Methodology for combined use of data envelopment analysis and life cycle assessment applied to food waste management', 135, pp. 158–168. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.085.

Liu, P., Meng, F. and Barlow, C. Y. (2022) 'Wind turbine blade end-of-life options: An

- economic comparison', *Resources, Conservation and Recycling*, 180(December 2021), p. 106202. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106202.
- Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Chenel, S., Marín-Navarro, D., Moreira, M.T. and Feijoo, G. (2015) 'Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA+DEA method', *Water Research*, 68, pp. 651–666. doi: 10.1016/j.watres.2014.10.040.
- Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Marín-Navarro, D., Crujeiras, R. M., Moreira, M. T. and Feijoo G. (2018) 'Dynamic environmental efficiency assessment for wastewater treatment plants', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), pp. 357–367. doi: 10.1007/s11367-017-1316-9.
- Mahmoudi, R., Emrouznejad, A., Khosroshahi, H., Khashei, M. and Rajabi, P. (2019) 'Performance evaluation of thermal power plants considering CO2 emission: A multistage PCA, clustering, game theory and data envelopment analysis', *Journal of Cleaner Production*, 223, pp. 641–650. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.047.
- Mathew, S. and Philip, G. S. (2012) '2.05 - Wind turbines. Evolution, basic principles, and classifications', in Sayigh, A. (ed.) *Comprehensive Renewable Energy*. Second. Malapuram, Kerala, India: Elsevier Ltd., pp. 104–123. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00205-5.
- McGugan, Malcolm (2016) 'Design of wind turbine blades', in Ostachowicz, W. et al. (eds) *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*. Springer International Publishing, pp. 13–24. doi: 10.1007/978-3-319-39095-6_2/FIGURES/6.
- McNeil, K. and Kang, T. H. K. (2013) 'Recycled Concrete Aggregates: A Review', *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), pp. 61–69. doi: 10.1007/s40069-013-0032-5.
- Mello, G., Ferreira Dias, M. and Robaina, M. (2022) 'Evaluation of the environmental impacts related to the wind farms end-of-life', *Energy Reports*, 8, pp. 35–40. doi: 10.1016/j.egy.2022.01.024.
- Moné, C., Hand, M., Bolinger, M., Rand, J., Heimiller, D. and Ho, J. (2017) *2015 Cost of Wind Energy Review*. doi: 10.2172/1366436.
- Nagle, A. J., Bank, L.C., Delaney, E and Leahy, P.G. (2020) 'A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades', *Journal of Cleaner Production*, 277, p. 123321. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123321.
- Nijssen, R. P. L. and Brøndsted, P. (2013) *Fatigue as a design driver for composite wind turbine blades*, *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*. doi: 10.1533/9780857097286.2.175.
- Ohemeng, E. A. and Ekolu, S. O. (2020) 'Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study', *Case Studies in Construction Materials*, 13, p. e00450. doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00450.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. and Rosenbaum, R. (2003) 'IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment

- Methodology', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(324). doi: <https://doi.org/10.1007/BF02978505>.
- Ortegon, K., Nies, L. F. and Sutherland, J. W. (2013) 'Preparing for end of service life of wind turbines', *Journal of Cleaner Production*, 39, pp. 191–199. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.08.022.
- Pehnt, M. (2006) 'Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies', *Renewable Energy*, 31(1), pp. 55–71. doi: 10.1016/j.renene.2005.03.002.
- Purvis, B., Mao, Y. and Robinson, D. (2019) 'Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins', *Sustainability Science*, 14(3), pp. 681–695. doi: 10.1007/s11625-018-0627-5.
- Rahnama, B. (2011) *Reduction of Environmental Impact Effect of Disposing Wind Turbine Blades*. Gotland University. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:691565/FULLTEXT01.pdf>.
- Samuelsson, C. and Björkman, B. (2014) 'Copper Recycling', in Worrell, E. and Reuter, M. A. (eds) *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier, pp. 85–94. doi: 10.1016/B978-0-12-396459-5.00007-6.
- Sarra, A., Mazzocchitti, M. and Rapposelli, A. (2017) 'Evaluating joint environmental and cost performance in municipal waste management systems through data envelopment analysis: Scale effects and policy implications', *Ecological Indicators*, 73, pp. 756–771. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.10.035.
- van Schaik, A. and Reuter, M. A. (2014) 'Material-Centric (Aluminum and Copper) and Product-Centric (Cars, WEEE, TV, Lamps, Batteries, Catalysts) Recycling and DfR Rules', in Worrell, E. and Reuter, M. A. (eds) *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier Inc., pp. 307–378. doi: 10.1016/B978-0-12-396459-5.00022-2.
- Scheel, H. (2001) 'Undesirable outputs in efficiency valuations', *European Journal of Operational Research*, 132(2), pp. 400–410. doi: 10.1016/S0377-2217(00)00160-0.
- Schepper, D. M., Van den Heede, P., Van Driessche, I. and Belie D.N. (2014) 'Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete', *Materials*, 7(8), pp. 6010–6027. doi: 10.3390/ma7086010.
- Schreiber, A., Marx, J. and Zapp, P. (2019) 'Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types', *Journal of Cleaner Production*, 233, pp. 561–572. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.058.
- Serrano-González, J. and Lacal-Arántegui, R. (2016) 'Technological evolution of onshore wind turbines—a market-based analysis', *Wind Energy*, 19(12), pp. 2171–2187. doi: 10.1002/WE.1974.
- Sofianopoulou, S. (2006) 'Manufacturing cells efficiency evaluation using data envelopment analysis', *Journal of Manufacturing Technology Management*, 17(2), pp. 224–238. doi: 10.1108/17410380610642287.
- Sofianopoulou, S., Dedoussis, V., Konstas, C. and Kassimis, A. (2009) 'Efficiency evaluation of natural gas power plants using data envelopment analysis', *IEEM 2009 -*

IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2, pp. 315–319. doi: 10.1109/IEEM.2009.5373352.

Struk, M. and Matulová, M. (2016) ‘The Application of Two-Stage Data Envelopment Analysis on Municipal Solid Waste Management in the Czech Republic’, *Quantitative Methods in Economics*, (November 2016), pp. 349–355. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/310510515>.

Technologies (no date). Available at: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies> (Accessed: 8 June 2022).

Vardar, A. and Eker, B. (2006) ‘Principle of rotor design for horizontal axis wind turbines’, *Journal of Applied Sciences*, 6(7), pp. 1527–1533. doi: 10.3923/JAS.2006.1527.1533.

Vásquez-Ibarra, L., Rebolledo-Leiva, R., Angulo-Meza, L., Gonzalez-Araya, M.C. and Iriarte, A. T. (2020) ‘The joint use of life cycle assessment and data envelopment analysis methodologies for eco-efficiency assessment: A critical review, taxonomy and future research’, *Science of the Total Environment*, 738, p. 139538. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139538.

Vásquez-Ibarra, L., Iriarte, A. T., Rebolledo-Leiva, R., Gonzalez-Araya, M.C. and Angulo-Meza, L. (2021) ‘Integration of life cycle assessment and data envelopment analysis using a free disposable hull approach to evaluate farms’ eco-efficiency’, *ICORES 2021 - Proceedings of the 10th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, (Icores), pp. 185–191. doi: 10.5220/0010240201850191.

VertueLab (no date) *A Brief History of Wind Power and How an Innovative Tower Foundation Cuts Concrete Use and CO2 Emissions*. Available at: <https://vertuelab.org/blog/history-of-wind> (Accessed: 30 May 2022).

Vestas (2015) ‘Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V110-2 MW Wind Plant’, *Vestas Wind Systems A/S*, (December), p. 129. Available at: https://www.vestas.com/~/_media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v903mw_version_1_1.ashx.

Vestas Wind Systems (2005) ‘V52-850 kW The turbine that goes anywhere’, *Rel. Tec. Vestas*, p. 6. Available at: http://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_1242006/html/EIA_Report/Annex A3.3.pdf%5Cn.

Vo Dong, P. A., Azzaro-Pantel, C. and Cadene, A. L. (2018) ‘Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management’, *Resources, Conservation and Recycling*, 133, pp. 63–75. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.024.

Wind energy (no date). Available at: <https://www.irena.org/wind> (Accessed: 8 June 2022).

Wind Europe (2020) ‘Decommissioning of Onshore Wind Turbines’, *Wind Europe*, pp. 1–53. Available at: <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/decommissioning-of-onshore-wind-turbines/>.

Wind Turbine Parts and Functions | Electrical Academia (no date). Available at:

<https://electricalacademia.com/renewable-energy/wind-turbine-parts-functions/>
(Accessed: 30 May 2022).

WindEurope (2020) *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*, Wind Europe.

Zeng, Y., Guo, W., Wang, H. and Zhang, F. (2020) ‘A two-stage evaluation and optimization method for renewable energy development based on data envelopment analysis’, *Applied Energy*, 262(January), p. 114363. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114363.

Zhang, R., Wei, Q., Li, A. and Ren, L. (2022) ‘Measuring efficiency and technology inequality of China’s electricity generation and transmission system: A new approach of network Data Envelopment Analysis prospect cross-efficiency models’, *Energy*, 246, p. 123274. doi: 10.1016/j.energy.2022.123274.

Zhou, P., Ang, B. W. and Poh, K. L. (2008) ‘A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies’, *European Journal of Operational Research*, 189(1), pp. 1–18. doi: 10.1016/j.ejor.2007.04.042.

Zhu, J. (2014) *Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking. Data Envelopment Analysis with Spreadsheets*. 3rd edn, *International Series in Operations Research & Management Science*. 3rd edn. Springer Cham. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06647-9>.

Γνωρίστε την Αιολική Ενέργεια – ΕΛΕΤΑΕΝ (no date). Available at: <https://eletaen.gr/gnoriste-tin-aioliki-energeia/> (Accessed: 8 June 2022).

Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (no date) *Δελτίο Τύπου: Ανακόκλωση ανεμογεννητριών – Η αιολική ενέργεια υπηρετεί την κυκλική οικονομία – ΕΛΕΤΑΕΝ*. Available at: <https://eletaen.gr/dt-anakiklosi-anemogennitriion/> (Accessed: 30 May 2022).

Καραγιαννίδης, Α. (no date) *Τιμολογιακή πολιτική διαχείρισης ΑΣΑ: Οικονομικά εργαλεία για την μείωση των ανταποδοτικών τελών μείωση των ανταποδοτικών τελών*. Available at: http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/EKDHLVSEIS/EKDHLWSEIS_2010_2013/DIAXEIRHSH_STEREWN_APOBLHTWN_HELECO/T ab1/karagiannidis.pdf (Accessed: 9 June 2022).

Μαυροκωστίδου, Κ. (2019) *Ανακόκλωση υλικών που χρησιμοποιούνται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Πτερύγια ανεμογεννήτριας έγιναν παγκάκι και διακόσμησαν τον «Μύλο των Ξωτικών» | *Green Agenda* (no date). Available at: <https://greenagenda.gr/περύγια-ανεμογεννήτριας-έγιναν-παγκ/> (Accessed: 30 May 2022).