



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Μεθοδολογίες Κυκλικής Οικονομίας: Η Συμβολή τους στην Διαχείριση Αποβλήτων
των Υποδομών Αιολικής Ενέργειας**

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: **Αλέξανδρος Γεώργιος Λαυρέντιος Ιουστινιανός**

Επιβλέπων Καθηγητής: **Μαρία Φλουρή, Μέλος ΕΔΙΠ, ΕΜΠ**

Ημερομηνία: **Ιούνιος 2025**

Περίληψη

Η μετάβαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) σε ένα ενεργειακό σύστημα μηδενικών εκπομπών, σύμφωνα με την «Ατζέντα 2030», βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) με πρωτοπόρο την Αιολική Ενέργεια. Το 2024 το 47% της συνολικής ηλεκτρικής ζήτησης στην ΕΕ καλύφθηκε από τις ΑΠΕ, εκ της οποίας το 39% προήλθε από τις ανεμογεννήτριες. Στόχος της ΕΕ για το 2030 είναι οι ΑΠΕ να καλύπτουν το 43% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης της Ένωσης. Έτσι, τα επόμενα πέντε έτη προβλέπεται αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος κατά 140 GW φτάνοντας στο σύνολο τα 350 GW συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, ενώ παράλληλα το 50% των υφιστάμενων ανεμογεννητριών – ισοδύναμης δυναμικότητας περίπου 105 GW – θα ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους, δημιουργώντας αυξημένο όγκο αποβλήτων. Παρότι οι ανεμογεννήτριες έχουν μηδενικές εκπομπές κατά τη λειτουργία τους, η παραγωγή και η απόσυρσή τους ρυπαίνουν και αυξάνουν την εξάρτηση από χώρες εξαγωγής κρίσιμων πρώτων υλών, εντείνοντας τον κίνδυνο στένωσης εφοδιασμού. Ακόμη, η ανακύκλωση των σύνθετων υλικών, που βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια, και των μόνιμων μαγνητών παραμένει τεχνικά και οικονομικά περιορισμένη.

Λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές προκλήσεις και τον κίνδυνο διατάραξης της εφοδιαστικής αλυσίδας, η παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζει, πώς οι αρχές της Κυκλικής Οικονομίας (R – Strategies και Industrial Symbiosis) με τη βοήθεια της μεθόδου Life Cycle Assessment (LCA) μπορούν να συμβάλουν στην ελάττωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη μείωση του κινδύνου εφοδιαστικής αλυσίδας. Η μέθοδος LCA, αποτελεί ένα πρότυπο εργαλείο περιβαλλοντικής αξιολόγησης προϊόντων και διαδικασιών, ακολουθώντας τις διεθνείς προδιαγραφές των προτύπων ISO 14040 και ISO 14044. Η προσέγγιση αυτή εξετάζει το σύνολο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, από την εξαγωγή των πρώτων υλών και την παραγωγή, μέχρι τη χρήση και το τέλος ζωής του. Εντοπίζει και ποσοτικοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κάθε στάδιο και εξυπηρετεί τη σύγκριση διαφορετικών προϊόντων και διαδικασιών. Η μεθοδολογία αυτή οργανώνεται σε τέσσερα διακριτά και αλληλένδετα στάδια. Αρχικά στον καθορισμό του στόχου και του πεδίου της μελέτης (goal and scope definition), που ορίζει το αντικείμενο και τα συστήματα που θα εξεταστούν, έπειτα στην ανάλυση απογραφής κύκλου ζωής (life cycle inventory analysis - LCI), που καταγράφονται όλες οι εισροές (ενέργεια, πρώτες ύλες) και εκροές (εκπομπές, απόβλητα), στη συνέχεια



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

στην εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (life cycle impact assessment - LCIA), η οποία μεταφράζει τα δεδομένα σε κατηγορίες επιπτώσεων όπως η κλιματική αλλαγή ή η μόλυνση των υδάτων, και τέλος στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων (interpretation phase), που καταλήγει σε συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης. Μέσω αυτής της συστηματικής διαδικασίας, το LCA παρέχει ένα τεκμηριωμένο και ποσοτικό υπόβαθρο για τη λήψη αποφάσεων, τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού προϊόντων όσο και χάραξης πολιτικής, προωθώντας την περιβαλλοντικά υπεύθυνη και βιώσιμη ανάπτυξη.

Αρχικά λοιπόν περιγράφεται η μετάβαση από το γραμμικό μοντέλο «εξαγωγή πρώτων υλών – κατασκευή – χρήση – απόρριψη» στο κυκλικό με βασικό στοιχείο τον αρχικό σχεδιασμό του προϊόντος με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και δίνεται έμφαση στις έννοιες της συντήρησης, επαναχρησιμοποίησης, ανακατασκευής και ανακύκλωσης. Έπειτα, μελετάται ο βασικός κορμός των πολιτικών της ΕΕ που προωθεί τη βιώσιμη ανάπτυξη. Αυτός αποτελείται από το «Circular Economy Action Plan» που στοχεύει στην μετάβαση προς μια κυκλική οικονομία με λιγότερα απόβλητα και καλύτερη αξιοποίηση πόρων, τον κανονισμό «Ecodesign for Sustainable Products» που φέρνει υποχρεωτικά κριτήρια οικολογικού σχεδιασμού για τα περισσότερα προϊόντα και το «Raw Materials Act» που ενισχύει την αυτάρκεια της ΕΕ σε κρίσιμες πρώτες ύλες, μειώνοντας την εξάρτησή της από τρίτες χώρες. Αναλυτική αναφορά γίνεται επίσης στις κρίσιμες πρώτες ύλες, τόσο από περιβαλλοντικής οπτικής όσο και εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ΕΕ δημοσιεύει την λίστα των κρίσιμων πρώτων υλών (Critical Raw Materials List) η οποία περιλαμβάνει τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην οικονομία της Ένωσης και έχουν τη μεγαλύτερη οικονομική σημασία και παρουσιάζουν σημαντικό κίνδυνο εφοδιαστικής αλυσίδας. Πέρα όμως από αυτή τη λίστα, παρουσιάζεται και η πιο εξειδικευμένη λίστα των στρατηγικών πρώτων υλών, που αποτελείται από πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται σε τεχνολογίες στρατηγικής σημασίας όπως στην αμυντική και ενεργειακή βιομηχανία.

Στη συνέχεια εξετάζονται οι βασικές τεχνολογίες ανεμογεννητριών (Direct Drive – Gearbox και Μόνιμου Μαγνήτη – Ξένης Διέγερσης) και αξιολογούνται τα βασικά στοιχεία αυτών που φέρουν σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Πρώτο στοιχείο είναι τα πτερύγια, διότι περιέχουν σύνθετα υλικά που δεν ανακυκλώνονται σε μεγάλη κλίμακα. Ως εκ τούτου, διερευνώνται πιθανές εφαρμογές της κυκλικής οικονομίας όπως επανακατεύθυνση της χρήσης τους σε λειτουργικά αντικείμενα, όπως παγκάκια, σκέπαστρα και παιδικές χαρές, και εντοπίζονται προηγμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης (Industrial Symbiosis), όπως η επεξεργασία τους για την αξιοποίησή τους ως υποκατάστατα πρώτων υλών στην παραγωγή τσιμέντου με μείωση των εκπομπών CO₂ 16-27% και η ενσωμάτωση των υαλοϊνών στο σκυρόδεμα για την ενίσχυσή του. Δεύτερο στοιχείο αποτελούν οι μόνιμοι μαγνήτες NdFeB, καθώς η ανακύκλωσή τους είναι μια δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία, λόγω της ενσωμάτωσης σπάνιων γαιών. Ωστόσο, εντοπίζονται κάποιες καινοτόμες τεχνολογίες ανακύκλωσης, σε πρώιμο στάδιο, που αξιολογούνται (μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων ως 78% και εξοικονόμηση ενέργειας ως 88%). Όμως, επειδή οι μαγνήτες είναι περιβαλλοντικά και στρατηγικά πιο ευαίσθητοι λόγω του κινδύνου εφοδιαστικής αλυσίδας, η εργασία αυτή εστιάζει περισσότερο στην ανακύκλωσή τους και συγκεκριμένα στη συγκριτική LCA μελέτη δύο διαφορετικών τεχνολογιών ανεμογεννητριάς.

Έτσι, στο δεύτερο μέρος, η εργασία βασισμένη σε μία δημοσιευμένη συγκριτική LCA μελέτη διαφορετικών τύπων ανεμογεννητριών, αντιπαραβάλλει μέσω της χρήσης του Life Cycle Assessment τις περιβαλλοντικές



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

επιπτώσεις μίας ανεμογεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator - DDPMSG) με μίας ξένης διέγερσης (Direct Drive Electrically Excited Synchronous Generator - DDEESG ή DDSG). Οι δύο αυτές ανεμογεννήτριες έχουν ισχύ ίση με 3 MW και διάρκεια ζωής 20 έτη κατά την οποία παράγουν 160 GWh. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα από 15 διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων (impact categories) ανά 1 παραγόμενη kWh (functional unit) σε κανονικοποιημένη μορφή (person equivalent). Αυτά δείχνουν ότι η DDPMSG εμφανίζει 22% μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα όταν χρησιμοποιούνται πρωτογενή υλικά, παρά την χρήση μόνιμων μαγνητών, γεγονός που οφείλεται στην πιο ελαφριά κατασκευή της DDPMSG, χάρη στη χρήση μόνιμου μαγνήτη έναντι κυκλώματος ξένης διέγερσης. Επιπρόσθετη ανάλυση ευαισθησίας, που ενσωματώνει ανακυκλωμένα υλικά (90% χάλυβας, 92% αλουμίνιο, 95% χαλκός και 30% μαγνήτης), δείχνει ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μειώνονται κατά 70% για την DDSG και 50% για την DDPMSG, καθιστώντας την πρώτη περιβαλλοντικά φιλικότερη. Μια δεύτερη LCA μελέτη, όμως, που βασίζεται στις καινοτόμες τεχνολογίες ανακύκλωσης μαγνητών και συγκρίνει την παραγωγή μαγνητών από πρωτογενή και ανακυκλωμένα υλικά, δείχνει ότι το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα μπορεί να ελαττωθεί κατά 78%, μειώνοντας έτσι τις επιπτώσεις για την DDPMSG της προηγούμενης περίπτωσης επιπλέον κατά 20%, δηλαδή πετυχαίνοντας 70% λιγότερη επιβάρυνση. Έτσι η DDPMSG καθίσταται και πάλι η φιλικότερη επιλογή με 23% διαφορά από την DDSG.

Τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι οι πρακτικές κυκλικής οικονομίας, ιδίως στην ανακύκλωση μαγνητών NdFeB, μπορούν να μειώσουν ουσιαστικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών, ενισχύοντας παράλληλα την ανθεκτικότητα της ΕΕ στην προμήθεια κρίσιμων πρώτων υλών, επιτρέποντάς της να φτάσει με ασφάλεια στους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης.