



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

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αναβάθμιση Χερσαίων Αιολικών Πάρκων: Συγκριτική Ανάλυση Ευρωπαϊκών Πρωτοπόρων με χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: ***Γεώργιος Παπαδόπουλος***

Επιβλέπων Καθηγητής: ***Ιωάννης Ψαρράς, Καθηγητής, ΕΜΠ***

Ημερομηνία: ***Οκτώβριος 2025***

Περίληψη

Η ενεργειακή μετάβαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης προς μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία έως το 2050 στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην αιολική ενέργεια, η οποία έχει εξελιχθεί σε έναν από τους πλέον ώριμους και οικονομικά ανταγωνιστικούς πυλώνες του ευρωπαϊκού ενεργειακού μείγματος. Παρά την αδιάλειπτη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τις τελευταίες δύο δεκαετίες, ένας αυξανόμενος αριθμός αιολικών πάρκων, ιδίως εκείνων που εγκαταστάθηκαν τη δεκαετία του 1990 και στις αρχές του 2000, προσεγγίζει πλέον το τέλος της τεχνικής τους διάρκειας ζωής. Το γεγονός αυτό δημιουργεί μια σημαντική πρόκληση: πώς μπορεί να διατηρηθεί ή να ενισχυθεί η παραγωγική ικανότητα του ευρωπαϊκού αιολικού στόλου, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζεται η οικονομική βιωσιμότητα, η κοινωνική αποδοχή και η περιβαλλοντική ισορροπία των επενδύσεων.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η ανανέωση (repowering) των αιολικών πάρκων, δηλαδή η αντικατάσταση παλαιών ανεμογεννητριών με νέες, υψηλότερης ισχύος και απόδοσης, στην ίδια ή σε παρόμοια τοποθεσία, αναδεικνύεται ως μία από τις πιο υποσχόμενες στρατηγικές διαχείρισης του τέλους ζωής των υφιστάμενων έργων. Το repowering προσφέρει τη δυνατότητα αύξησης της παραγόμενης ενέργειας χωρίς να απαιτείται η ανάπτυξη νέων εκτάσεων, αξιοποιεί υφιστάμενες υποδομές και αδειοδοτήσεις, μειώνει τη χωρική πίεση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και συμβάλλει στην αποτελεσματική ανανέωση του ενεργειακού δυναμικού. Παρ' όλα αυτά, η πρόοδος στην εφαρμογή έργων repowering παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ορισμένες χώρες, όπως η Δανία και η Γερμανία, έχουν αναπτύξει ώριμες αγορές και σταθερά θεσμικά πλαίσια, ενώ άλλες παραμένουν σε πρώιμο στάδιο, αντιμετωπίζοντας ρυθμιστικά, τεχνικά ή κοινωνικά εμπόδια.

Η παρούσα εργασία εξετάζει το επίπεδο ωριμότητας του repowering χερσαίων αιολικών πάρκων σε επτά ευρωπαϊκές χώρες: Δανία, Γαλλία, Γερμανία, Ελλάδα, Ιταλία, Ισπανία, και Σουηδία. Σκοπός είναι να εντοπιστούν οι χώρες που διαθέτουν το πιο ανεπτυγμένο και υποστηρικτικό πλαίσιο για την ανανέωση και να εξαχθούν τα διδάγματα και οι βέλτιστες πρακτικές που μπορούν να καθοδηγήσουν τις χώρες που υστερούν στην υιοθέτηση πιο ώριμων μηχανισμών και πολιτικών. Η μελέτη υιοθετεί μια συγκριτική μεθοδολογία, ώστε να αποτιμήσει με αντικειμενικό τρόπο την επίδοση κάθε χώρας μέσα από οικονομικούς, τεχνικούς, νομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες.



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

Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα πλαίσιο Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA), το οποίο περιλαμβάνει δώδεκα κριτήρια, οργανωμένα σε πέντε θεματικούς πυλώνες: οικονομικό, νομικό, τεχνικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό. Η επιλογή των κριτηρίων βασίστηκε σε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση και σε ευρωπαϊκές πρακτικές αξιολόγησης πολιτικών ΑΠΕ, με στόχο τη διασφάλιση της σύγκρισης των δεδομένων και της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από επίσημες πηγές, ευρωπαϊκές εκθέσεις και θεσμικά κείμενα, καθώς και από εθνικούς ενεργειακούς φορείς και επιστημονικές δημοσιεύσεις.

Για την επεξεργασία και τη σύνθεση των δεδομένων εφαρμόστηκε η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution), η οποία επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών επιλογών βάσει της εγγύτητάς τους προς την ιδανική και την αρνητικά ιδανική λύση. Η μέθοδος αυτή αποδείχθηκε κατάλληλη, καθώς συνδυάζει τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά δεδομένα, αποδίδοντας ένα σαφές και μετρήσιμο αποτέλεσμα κατάταξης. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με ίσες βαρύτητες μεταξύ των κριτηρίων, ώστε να αποφευχθεί η μεροληψία υπέρ ενός συγκεκριμένου πυλώνα.

Η ανάλυση ανέδειξε τρεις διακριτές ομάδες χωρών ως προς την ωριμότητα της ανανέωσης. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τη Δανία, τη Γερμανία και την Ισπανία, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως πρωτοπόρες. Οι χώρες αυτές διαθέτουν σταθερά και μακροχρόνια συστήματα ενίσχυσης της αιολικής ενέργειας, καθαρές διαδικασίες αδειοδότησης, ώριμη τεχνολογική υποδομή και υψηλή κοινωνική αποδοχή. Επιπλέον, παρουσιάζουν σημαντική πρόοδο στην ενσωμάτωση πρακτικών κυκλικής οικονομίας, όπως η ανάπτυξη τεχνολογιών ανακύκλωσης πτερυγίων και η διαχείριση αποβλήτων. Η δεύτερη ομάδα, στην οποία ανήκουν η Γαλλία και η Ιταλία, παρουσιάζει μέτρια ωριμότητα. Παρά την ύπαρξη θεσμικών πλαισίων που υποστηρίζουν την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, οι χώρες αυτές αντιμετωπίζουν διοικητική πολυπλοκότητα και καθυστερήσεις στην αδειοδότηση, οι οποίες περιορίζουν τη δυναμική του *repowering*. Ωστόσο, παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον και πρόοδος σε επίπεδο ερευνητικών προγραμμάτων και πολιτικών προσαρμογής. Η τρίτη ομάδα, που περιλαμβάνει τη Σουηδία και την Ελλάδα, εμφανίζει χαμηλό βαθμό ωριμότητας. Στη Σουηδία, η έλλειψη ισχυρών οικονομικών κινήτρων και η κορεσμένη αγορά καθαρής ενέργειας περιορίζουν την ανάπτυξη της ανανέωσης, ενώ στην Ελλάδα, τα κυριότερα εμπόδια σχετίζονται με τη χρονοβόρα και πολύπλοκη αδειοδοτική διαδικασία, την ασάφεια του θεσμικού πλαισίου και την απουσία οργανωμένης πολιτικής για την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικών.

Η συνολική κατάταξη βάσει της μεθόδου TOPSIS ανέδειξε τη Δανία ως τη χώρα με την υψηλότερη επίδοση, ακολουθούμενη από τη Γερμανία και την Ισπανία. Η Γαλλία και η Ιταλία κατατάσσονται στη μεσαία κατηγορία, ενώ η Σουηδία και η Ελλάδα βρίσκονται στις τελευταίες θέσεις. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η επιτυχία των έργων *repowering* εξαρτάται άμεσα από τη συνέργεια θεσμικών, τεχνικών και κοινωνικών παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα της έρευνας αναδεικνύουν κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας που διαφοροποιούν τις ώριμες από τις υστερούσες αγορές. Πρώτον, η ύπαρξη σαφούς και σταθερού θεσμικού πλαισίου αποτελεί τη βάση για την προσέλκυση επενδύσεων και τη μείωση του ρίσκου. Οι χώρες που έχουν κατορθώσει να διαμορφώσουν συνεπή και μακροπρόθεσμα προγράμματα στήριξης, όπως η Δανία και η Γερμανία, πέτυχαν να διασφαλίσουν τη συνέχεια της αγοράς και να δημιουργήσουν κλίμα εμπιστοσύνης. Δεύτερον, η



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

απλοποίηση των αδειοδοτικών διαδικασιών αποδεικνύεται καθοριστικός παράγοντας, καθώς μειώνει τους χρόνους ανάπτυξης και τα διοικητικά κόστη. Τρίτον, η προσαρμογή των ηλεκτρικών δικτύων και των χωροταξικών πολιτικών στις ανάγκες της ανανέωσης είναι κρίσιμη για την αποφυγή συμφόρησης και για τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Τέταρτον, η ενσωμάτωση πρακτικών κυκλικής οικονομίας, όπως η ανακύκλωση πτερυγίων και η ανάκτηση σύνθετων υλικών, συμβάλλει στην περιβαλλοντική αποδοχή και στη βιωσιμότητα του κύκλου ζωής των έργων. Τέλος, η κοινωνική διάσταση παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς η ενημέρωση, η συμμετοχή και η διαφάνεια μειώνουν τις αντιδράσεις και ενισχύουν τη συναίνεση των τοπικών κοινωνιών.

Για τις χώρες που βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο ωριμότητας, όπως η Ελλάδα και η Σουηδία, η μελέτη προτείνει μια σειρά πολιτικών παρεμβάσεων που μπορούν να επιταχύνουν την ανάπτυξη της ανανέωσης. Η θέσπιση ενός σαφούς και εξειδικευμένου πλαισίου για την αντικατάσταση παλαιών ανεμογεννητριών, η δημιουργία μηχανισμών οικονομικών κινήτρων και χρηματοδοτικών εργαλείων, η ανάπτυξη εθνικής στρατηγικής ανακύκλωσης πτερυγίων και η ενίσχυση της συμμετοχής των πολιτών αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για την επιτυχή εφαρμογή της διαδικασίας.

Η συμβολή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πολλαπλή. Πρώτον, προσφέρει ένα ολοκληρωμένο και διαφανές μεθοδολογικό πλαίσιο αξιολόγησης της ωριμότητας της ανανέωσης σε ευρωπαϊκό επίπεδο, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δεύτερον, παρέχει ένα εργαλείο πολιτικής που μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων από κυβερνήσεις, ρυθμιστικές αρχές και επενδυτές. Τρίτον, ενισχύει τη γνώση γύρω από τη σύνδεση τεχνικών, νομικών και κοινωνικών παραγόντων που καθορίζουν την επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης.

Συνολικά, η εργασία υπογραμμίζει ότι η ανανέωση των χερσαίων αιολικών πάρκων δεν αποτελεί απλώς τεχνική διαδικασία αντικατάστασης εξοπλισμού, αλλά μια σύνθετη πολιτικο-οικονομική και κοινωνική πρόκληση, η οποία απαιτεί ολοκληρωμένο σχεδιασμό, διατομεακή συνεργασία και σταθερή στρατηγική κατεύθυνση. Η επιτυχής εφαρμογή της μπορεί να συμβάλει αποφασιστικά στη διατήρηση της ενεργειακής ασφάλειας, στη μείωση των εκπομπών και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της ευρωπαϊκής οικονομίας στο πλαίσιο της πράσινης μετάβασης. Η ανάπτυξη ώριμων αγορών repowering δεν είναι μόνο απαραίτητη για την επίτευξη των ευρωπαϊκών στόχων για το 2030, αλλά και για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας βιωσιμότητας της αιολικής ενέργειας ως βασικού πυλώνα του ενεργειακού μέλλοντος της Ευρώπης.

Λέξεις-Κλειδιά: Αιολική ενέργεια, Repowering, Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA), TOPSIS, Οδηγία RED III, Χερσαία αιολικά, Συγκριτική αξιολόγηση, Ευρωπαϊκή Ένωση.