

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ “ΔΙΡΦΥΣ-ΞΕΡΟΒΟΥΝΙ”

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Α.Ε.Μ.: 1988



ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Ρ.Ε.Π. ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΚΟΖΑΝΗ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2021

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια Ραφαέλλα Σωτηροπούλου που μου ανέθεσε ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα για να μελετήσω στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στους συμφοιτητές μου που συνεργαζόμασταν άψογα όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου για την υποστήριξη και βοήθεια που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, οι περισσότερες της χώρες της Ευρώπης αναζητούν όλο και περισσότερο τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων. Η συμβολή της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτρέπει την όξυνση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής αφού μειώνει την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρύπων, ενώ ασκεί θετική επιρροή στις οικονομικές και περιβαλλοντικές προοπτικές της εκάστοτε χώρας.

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας με στόχο της παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα μείζονος σημασίας θέμα της σύγχρονης εποχής. Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου είναι αναμφισβήτητα μία λύση που δεν επιφέρει πλήθος περιβαλλοντικών επιπτώσεων συγκριτικά με άλλους τρόπους παραγωγής ενέργειας όπως αυτοί που σχετίζονται με τη καύση στερεών καυσίμων. Το γεγονός ότι ο άνεμος αποτελεί μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, σε συνδυασμό με τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε ό,τι αφορά την εγκατάσταση και συντήρηση ενός αιολικού πάρκου, είναι αδιαμφισβήτητο.

Ωστόσο, η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων που συνεχώς αυξάνεται παγκοσμίως τις τελευταίες δεκαετίες δημιουργεί μελανά σημεία που σχετίζονται τόσο με τα απαιτούμενα ενεργειακά ποσά και τα υλικά για την κατασκευή τους όσο και τις περιβαλλοντικές συνέπειες της χρήσης τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου το οποίο θα εγκατασταθεί σε μια ορεινή περιοχή του νομού Εύβοιας, η οποία λόγω του ισχυρού αιολικού δυναμικού της και την απουσία βλάστησης αποτελεί ιδανική τοποθεσία. Η ΑΚΖ του αιολικού πάρκου στοχεύει στην αποτύπωση της ροής ενέργειας των υλικών και την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συνολικά στον κύκλο της ζωής του αιολικού πάρκου.

Αναλυτικότερα, η διπλωματική εργασία περιγράφει τις βασικές αρχές λειτουργίας των αιολικών πάρκων αλλά και τα επιμέρους συστήματα τους και μελετάται η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής και τα στάδια αυτής. Έπειτα, παρουσιάζονται οι επιπτώσεις που επιφέρει η εγκατάσταση του αιολικού πάρκου ξεκινώντας από την εξόρυξη των απαραίτητων υλικών για την παραγωγή των ανεμογεννητριών μέχρι και την απόθεση των υλικών αυτών μετά το τέλος του κύκλου ζωής. Τέλος, για την πραγματοποίηση της μελέτης σχεδιάζεται ένα αιολικό πάρκο σε μια περιοχή του νομού Εύβοιας και τη χρήση του λογισμικού OpenLCA υπολογίζεται το σύνολο των επιπτώσεων που επιφέρει στο περιβάλλον.

Abstract

In recent years, most of the European countries are constantly looking for ways to generate electricity through the installation of photovoltaic and wind farms. The contribution of wind energy to electricity generation prevents the exacerbation of the climatic change problem, as it reduces the greenhouse gas emissions as well as other pollutants, while having a positive economic and environmental impact on the prospects of each country.

The utilization of wind energy with the aim of generating electricity is one of the most important challenges of modern times. The installation of wind farms through which the exploitation of wind energy is achieved, is undoubtedly a solution that does not bring about a multitude of environmental consequences compared to other ways of generating energy such as those which are related to combustion of solid fuels. The fact that wind is an inexhaustible source of energy, combined with minimal environmental impact in terms of installation and maintenance of wind farms, is indisputable.

However, the installation of wind farms, which has been constantly increasing worldwide in the last decades, raises questions related to both the energy consumption required for their construction and the environmental consequences of their use.

The dissertation focuses on Life Cycle Analysis (LCA) of a wind farm, scheduled to be installed in a mountainous area of Evoia, which due to its strong wind potential and the absence of flora, is an ideal location. The method (LCA) of the wind farm aims at capturing the energy flow of the materials and assessing the environmental impacts concerning the entire life cycle of the wind farm.

Last but not least, this dissertation describes in detail the basic operational principles of wind farms and studies the Life Cycle Analysis and its stages. Then, the effects of the installation of the wind farm are presented, starting from the production of the necessary materials for the construction of the wind turbines to their exploitation after the end of the life cycle of the wind farm. For the elaboration of the study, a wind farm is designed in an area of Evoia and a life cycle assessment is carried out using the OpenLCA software that is publicly available.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	7
Ευρετήριο Εικόνων	11
Ευρετήριο Πινάκων.....	13
Ευρετήριο Σχημάτων.....	15
1. Εισαγωγή.....	17
1.1. Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	17
1.2. Άνεμοι και αιολική ενέργεια	18
1.2.1. Ιστορική αναδρομή της αιολικής ενέργειας	19
1.3. Αιολικό δυναμικό	20
1.4. Ανεμογεννήτριες	22
1.4.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.....	23
1.4.2. Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα	25
1.5. Αιολικά Πάρκα.....	26
1.5.1. Τα αιολικά πάρκα στην Ευρώπη	28
1.6. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	30
1.7. Επιπτώσεις αιολικών πάρκων.....	31
2. Ανάλυση κύκλου ζωής.....	35
2.1. Εισαγωγή.....	35
2.2. Γενικά στοιχεία της ανάλυσης κύκλου ζωής.....	35
2.3. Μεθοδολογία της ανάλυσης του κύκλου ζωής.....	36
2.4. Οι στόχοι της ανάλυσης κύκλου ζωής.....	37
2.5. Τα στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	37
Στάδιο 1: Αρχές και οριοθέτηση συστήματος.....	38
Στάδιο 2: Εκτενής απογραφή των δεδομένων του συστήματος.....	39
Στάδιο 3: Εκτίμηση των επιπτώσεων της ανάλυσης κύκλου ζωής	40
Στάδιο4: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	44
2.6. Πλεονεκτήματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	44
3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικών Πάρκων.....	47
3.1. Στάδια εφαρμογής μελέτης AKZ	48
3.2. Καθορισμός στόχου.....	48
3.2.1. Λειτουργική μονάδα.....	49
3.2.2. Ανάλυση του συστήματος	49

3.2.3.	Εύρεση δεδομένων	52
3.2.4.	Όρια και υποθέσεις εργασίας	53
3.3.	Απογραφή δεδομένων	55
3.4.	Κατηγορίες επιπτώσεων και ανάλυση δεικτών	56
3.5.	Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	58
3.6.	Παράδειγμα μελέτης AKZ σε αιολικό πάρκο της Κίνας.....	58
4.	Αιολικό πάρκο στην τοποθεσία “ Δίρφυς-Ξεροβούνι”	61
4.1.	Τοποθεσία αιολικού πάρκου	61
4.2.	Αναγκαιότητα του έργου.....	62
4.3.	Ανάλυση του αιολικού πάρκου	63
4.3.1.	Τεχνικές προδιαγραφές αιολικού πάρκου	63
4.3.2.	Έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης αιολικού πάρκου.....	66
4.4.	Διάρκεια ζωής και λειτουργία αιολικού πάρκου	66
4.5.	Υπολογισμός των παραγόμενων ρύπων	66
4.6.	Οικονομική ανάλυση του αιολικού πάρκου	67
5.	Ανάλυση κύκλου ζωής αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι”.....	70
5.1.	Καθορισμός στόχου και αντικειμένου μελέτης.....	70
5.1.1.	Λειτουργική μονάδα.....	70
5.1.2.	Περιγραφή του συστήματος	71
5.1.3.	Εύρεση δεδομένων	74
5.1.4.	Όρια και υποθέσεις εργασίας	74
5.2.	Απογραφή δεδομένων	76
5.3.	Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	77
5.3.1.	Εισαγωγή στο OpenLCA.....	77
5.3.2.	Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα OpenLCA	79
5.3.3.	Ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων	80
5.3.4.	Ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τα επιμέρους υλικά	81
6.	Συμπεράσματα.....	87
7.	Βιβλιογραφία.....	91

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Άποψη ενός μετεωρολογικού σταθμού [24]	21
Εικόνα 2: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου και κάθετου άξονα [10].....	22
Εικόνα 3: Κυριότερα εξαρτήματα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα [12].....	23
Εικόνα 4: Οι κυριότερες κατηγορίες ανεμογεννητριών κάθετου άξονα [14]	25
Εικόνα 5: Άποψη ενός onshore αιολικού πάρκου [20]	27
Εικόνα 6: Άποψη ενός offshore αιολικού πάρκου [21]	27
Εικόνα 7: Αναπαράσταση του συστήματος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [34]	40
Εικόνα 8: Ανάλυση των περιβαλλοντικών συνεπειών, με βάση το ISO [34].....	41
Εικόνα 9: Απεικόνιση των δεδομένων απογραφής και σύνδεση αυτών με τις κατηγορίες των επιπτώσεων [34]	41
Εικόνα 10: Αναπαράσταση του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου [41].....	47
Εικόνα 11: Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου “Δίρφους-Ξεροβούνι”, του νομού Εύβοιας [48]	61
Εικόνα 12: Ακριβής τοποθεσία εγκατάστασης των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου “Δίρφους-Ξεροβούνι”, του νομού Εύβοιας [48]	62
Εικόνα 13: Πλάγια όψη ανεμογεννήτριας με τομή για την απεικόνιση των εξαρτημάτων της [55]	65
Εικόνα 14: Αναλυτική απεικόνιση των οικονομικών δεδομένων [50]	68
Εικόνα 16: Απεικόνιση της διαδρομής του πλοίου μεταφοράς των ανεμογεννητριών από το εργοστάσιο κατασκευής τους στο Bromont μέχρι το λιμάνι του Ασπρόπυργου [51] .	73
Εικόνα 17: Εισαγωγή στο πρόγραμμα OpenLCA [54].....	78
Εικόνα 18: Εισαγωγή της βάσης δεδομένων NEEDS στο OpenLCA [54]	79
Εικόνα 19: Διαμόρφωση των επιθυμητών εκροών ανά λειτουργική μονάδα [54]	79
Εικόνα 20: Αναλυτική απεικόνιση εισροών του προγράμματος [54].....	80
Εικόνα 21: Παρουσίαση των παραμέτρων του προγράμματος [54].....	80
Εικόνα 22: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της υπερθέρμανσης του πλανήτη [54] ...	82
Εικόνα 23: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου του ευτροφισμού [54]	82
Εικόνα 24: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της οξίνισης [54]	83
Εικόνα 25: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της ανθρώπινης τοξικότητας [54]	83
Εικόνα 26: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της οικοτοξικότητας του εδάφους [54]..	84
Εικόνα 27: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της εξάντλησης των ορυκτών πόρων [54]	84

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Απογραφή υλικών αιολικού πάρκου 40 MW [44].....	59
Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι” [49]	64
Πίνακας 3: Επιπτώσεις αιολικού πάρκου συγκριτικά με λιγνιτική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.	67
Πίνακας 4: Ανάλυση των υλικών για τα επιμέρους εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας AAERA1500-70 [49].....	76
Πίνακας 5: Συνολικές επιπτώσεις αιολικού πάρκου [54].....	81

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Αιολικά πάρκα προς εγκατάσταση τα έτη 2021-2025 [17]	29
Σχήμα 2: Απεικόνιση του ποσοστού κάλυψης των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια από αιολικά πάρκα για όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [17]	30
Σχήμα 3: Διάγραμμα οικονομικής απόσβεσης [50]	69

1. Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο γίνεται μια σημαντική προσπάθεια απεξάρτησης των κρατών από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (καύση λιγνίτη ή πετρελαίου) με επίκεντρο την εκμετάλλευση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η προσπάθεια αυτή ξεκίνησε τη δεκαετία του 70 με αφορμή δύο πετρελαϊκές κρίσεις που ώθησαν τα ανεπτυγμένα κράτη να επιδιώξουν τη σταδιακή απεξάρτηση τους από τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ειδικότερα από τα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, είχαν αρχίσει να παρουσιάζονται έντονα φαινόμενα περιβαλλοντικής υποβάθμισης και ρύπανσης. Επομένως, ξεκίνησαν οι προσπάθειες και οι μελέτες με στόχο την αξιοποίηση των ΑΠΕ που θα μείωνε την μεγάλη κατανάλωση των ορυκτών πόρων, οι οποίοι εκτός από πεπερασμένοι επιβάρυναν σε σημαντικό βαθμό το περιβάλλον [1].

Ωστόσο για να πραγματοποιηθεί αυτή η μεγάλη αλλαγή νοοτροπίας χρειάστηκε να περάσουν κάποιες δεκαετίες κατά τη διάρκεια των οποίων πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από δράσεις και κρατικές αποφάσεις που ανέδειξαν την ανάγκη της αξιοποίησης των ΑΠΕ. Σταδιακά η εμφάνιση των φαινομένων της κλιματικής αλλαγής συνετέλεσε στην ανάπτυξη τεχνολογιών με βάση τις ΑΠΕ.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σημαντική η προσέγγιση των ΑΠΕ ανά κατηγορία. Οι κατηγορίες των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτελούνται κυρίως από τις εξής μορφές:

- Αιολική Ενέργεια
- Ηλιακή Ενέργεια
- Υδροηλεκτρικά φράγματα
- Κυψέλες Καυσίμου
- Γεωθερμική Ενέργεια
- Ενέργεια Βιομάζας
- Ενέργεια των Ωκεανών

Ως συμβατικές πηγές ενέργειας ορίζονται αυτές οι πηγές των οποίων ο σχηματικός διαρκεί πάρα πολλά χρόνια όπως επίσης και η ανανέωση τους από την στιγμή που εξαντληθούν. Κάποιες από αυτές είναι ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και η πυρηνική ενέργεια. Ωστόσο, με εξαίρεση την πυρηνική ενέργεια η κατανάλωση τους για την παραγωγή ενέργειας έχει ως συνέπεια την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου που είναι υπεύθυνη για την κλιματική αλλαγή [2].

Το 80% της παγκοσμίας κατανάλωσης σε ενεργεία προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Η αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας που παρατηρήθηκε στη δεκαετία του '90 επέφερε σταδιακά την αύξηση της κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο θα πρέπει να αναφερθούν και τα πλεονεκτήματα της χρήσης των ορυκτών

καυσίμων όπως ότι είναι η οικονομικά προσιτή εξόρυξη τους, διαδομένες οι μέθοδοι αξιοποίησης τους, το γεγονός ότι υπάρχουν αρκετά αποθέματα κ.α. [2].

Επανερχόμενοι στο ζήτημα των ΑΠΕ, με βάση τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, η βέλτιστη αξιοποίηση τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της αξιοποίησης των μορφών που αναφέρθηκαν νωρίτερα.

Συγκεκριμένα, οι ανεμογεννήτριες αξιοποιούν την αιολική ενέργεια και μέσω των πτερυγίων τους τη μετατρέπουν σε κινητική. Τα φωτοβολταϊκά αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια μετατρέποντας την ηλεκτρική. Τα υδροηλεκτρικά φράγματα εκμεταλλεύονται την ενέργεια των υδάτινων ρευμάτων (συνήθως των ποταμών), ενώ οι κυψέλες καυσίμου μετασχηματίζουν την χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική χωρίς να μεσολαβεί ενδιάμεση μετατροπή σε μηχανική. Η κινητική ενέργεια των κυμάτων από τους ωκεανούς μπορεί να μετατραπεί μέσω των κατάλληλων διατάξεων σε ηλεκτρική, ενώ η γεωθερμία που είναι η φυσική θερμική ενέργεια της Γης μπορεί να μετασχηματιστεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του δυαδικού κύκλου. Τέλος, η βιομάζα προέρχεται από γεωργικά προϊόντα, απόβλητα και υπολείμματα ξυλείας και χρησιμοποιείται για θέρμανση και παραγωγή βιοαερίου [1].

Η αξιοποίηση των ΑΠΕ αποτελεί μια κατ' εξοχήν φιλική προς το περιβάλλον λύση αφού περιορίζει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και κατά συνέπεια δεν επιβαρύνει το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, αντικαθιστά τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας που αυξάνουν τις εκπομπές διαφόρων ρύπων όπως τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Στον ελλαδικό χώρο αποτελούν υπολογίσιμες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στην αύξηση της ενεργειακών πόρων[1,2].

Η ανάπτυξη των ΑΠΕ αποτελεί μια επένδυση η οποία δημιουργεί ορισμένες θέσεις εργασίας και προσφέρει δυνατότητες αξιοποίησης οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών, μέσω της προώθησης σημαντικών επενδύσεων. Εξάλλου η χρήση των ΑΠΕ ενδείκνυται για απομακρυσμένες περιοχές όπου τα κόστη σύνδεσης με το δίκτυο ηλεκτροδότησης είναι ιδιαίτερος υψηλά [3].

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα όπως είναι ο σχετικά μικρός συντελεστής απόδοσης τους (περίπου 25%) που συνεπάγεται την εύρεση αρκετά μεγάλων διαθέσιμων εκτάσεων για την εγκατάστασή τους. Επίσης, σε ό,τι αφορά τα αιολικά πάρκα δημιουργούνται προβλήματα τοπικής αύξησης της θερμοκρασίας στην περιοχή εγκατάστασής τους και έντονες περιβαλλοντικές συνέπειες για την πανίδα των περιοχών [3].

1.2. Άνεμοι και αιολική ενέργεια

Άνεμος ονομάζεται κάθε οριζόντια κίνηση μαζών ατμοσφαιρικών αερίων μεγάλης κλίμακας. Οι άνεμοι κατηγοριοποιούνται με βάση την χωρική κλίμακα, την διεύθυνση, τις δυνάμεις από τις οποίες προκαλούνται, τις περιοχές στις οποίες εμφανίζονται και την επίδραση τους σε αυτές. Οι κυριότεροι παράγοντες που διαμορφώνουν και δημιουργούν κινούμενες αέριες μάζες είναι:

- Η συνεχής περιστροφή της Γης.
- Η ύπαρξη του ανάγλυφου.
- Η ανομοιόμορφη θέρμανση της ατμόσφαιρας από τις ηλιακές ακτίνες.

Λόγω των παραπάνω παραγόντων, η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της Γης διαφέρει από τόπο σε τόπο με αποτέλεσμα να δημιουργείται βαθμίδα πίεσης που προκαλεί την κίνηση των αέριων μαζών. Οι βαθμίδες της πίεσης οφείλονται κυρίως στην παρουσία έντονων δυνάμεων λόγω της μετατροπής της ηλιακής σε κινητική ενέργεια με τη μορφή των κινούμενων αέριων μαζών. Ο διαχωρισμός μεταξύ αιτίας και αποτελέσματος αποτελεί μια πολύ δύσκολη υπόθεση, δηλαδή μεταξύ της πίεσης, της θερμοκρασίας και του ανέμου, εξαιτίας της στενής αλληλεπίδρασης όλων αυτών των στοιχείων με το φαινόμενο του ανέμου. Γενικότερα, η αιτία δημιουργίας των ανέμων είναι η βαθμίδα πίεσης κατά την οριζόντια έννοια, εννοώντας το αποτέλεσμα της υπάρχουσας θερμοκρασιακής διαφοράς σε ολόκληρο τον πλανήτη [4].

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις σημαντικότερες ήπιες μορφές ενέργειας και είναι η πιο αποδοτική, αφού είναι μια συμφέρουσα πηγή, με οικονομικά προσιτό εξοπλισμό, με κατασκευαστική ευελιξία και με μεγάλη ποικιλία σχεδιασμού σε ό,τι αφορά την ωφέλιμη ισχύ. Η ισχύς του αιολικού δυναμικού $2,3 \cdot 10^{10}$ MW, ωστόσο η ισχύς που μετασχηματίζεται σε ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ λιγότερη. Η συνολική εκμεταλλεύσιμη ενέργεια ανέρχεται περίπου σε $8,8 \cdot 10^{13}$ kWh, ποσό το οποίο είναι κατά προσέγγιση περίπου ίσο με αυτό της ενεργειακής κατανάλωσης σε παγκόσμιο επίπεδο [5].

Ο άνεμος αποτελεί μια απεριόριστη πηγή ενέργειας για τον πλανήτη Γη, συνεπώς είναι απόλυτα φυσικό να μελετάται το ζήτημα της αξιοποίησης του στο έπακρο. Μέχρι σήμερα αυτό επιτυγχάνεται με τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε κινητική μέσω των πτερυγίων των ανεμογεννητριών και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Κάποια από τα προβλήματα που ενδέχεται να προκαλεί η λειτουργία των ανεμογεννητριών είναι ο θόρυβος, οι ενδεχόμενες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες, η αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής τοπικά όπως επίσης και σημαντικά αισθητικά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις προβλήματα αποτελούν η χρήση γης και οι συνέπειες στην τοπική πανίδα λόγω απώλειας ζωής των πτηνών, που προσκρούουν στα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Παρόλα αυτά, τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω της σωστής σχεδίασης και εγκατάστασης των αιολικών πάρκων σε συνδυασμό με την κατάλληλη κρατική μέριμνα που ως στόχο θα έχει την προβολή της αναγκαιότητας για αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας [4].

1.2.1. Ιστορική αναδρομή της αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια άρχισε να αξιοποιείται μέσω ανεμογεννητριών για πρώτη φορά στην Αμερική το 1888, όταν ο Charles Brush ξεκίνησε την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια ενός ανεμόμυλου. Στη συνέχεια η τεχνολογία αυτή εξελίχθηκε από τον Paula La Coure, ο οποίος κατάφερε να βελτιώσει το βαθμό απόδοσης αντιλαμβανόμενος πως απαιτείται αύξηση της περιστροφικής κίνησης και

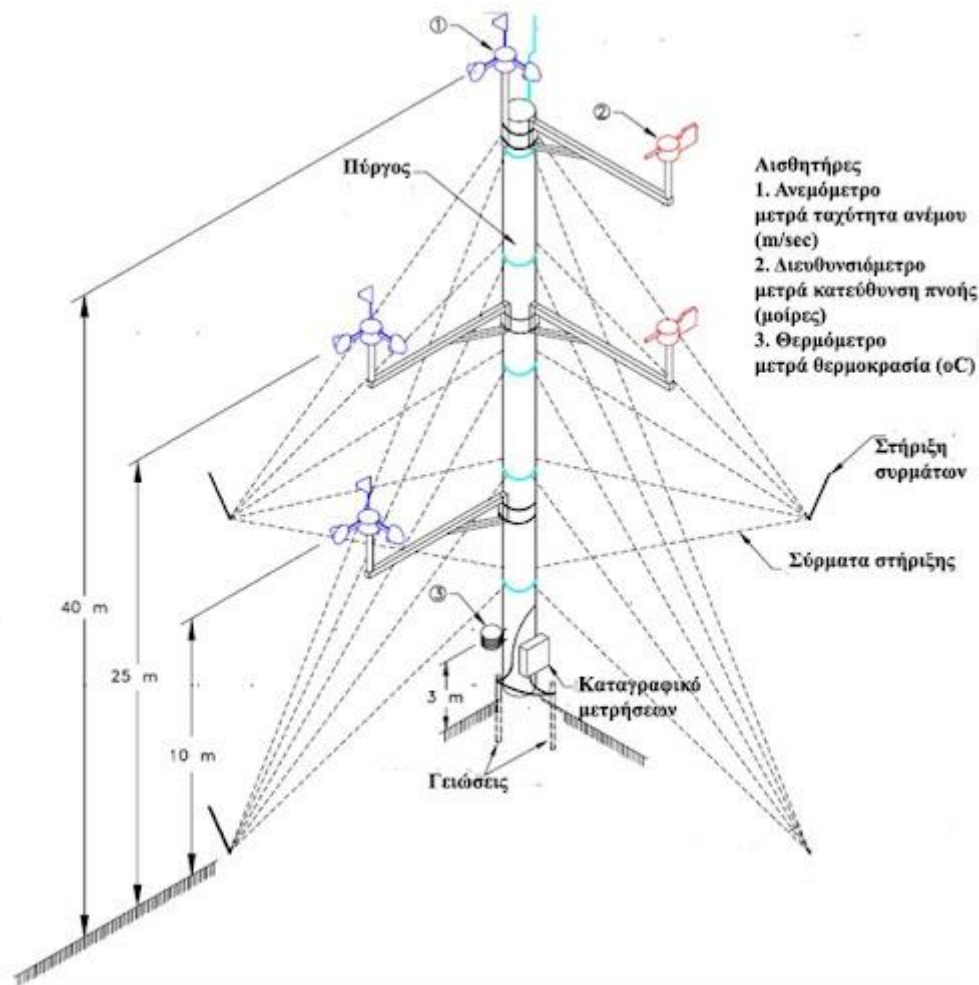
μείωση των πτερυγίων, επιτυγχάνοντας την παραγωγή 30 MW ηλεκτρικής ενέργειας και την κάλυψη του 10% των αναγκών της Δανίας. Με βάση τα αρχεία της Danish Wind Industry Association (DWIA) η αμέσως επόμενη κομβικής σημασίας χρονιά για την αιολική ενέργεια ήταν σχεδόν έναν αιώνα αργότερα, το έτος 1956 όταν κατασκευάστηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης. Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 ανάγκασε πολλές χώρες της Ευρώπης αλλά και των ΗΠΑ να δραστηριοποιηθούν και να κατασκευάσουν μεγαλύτερου μεγέθους ανεμογεννήτριες [6].

1.3. Αιολικό δυναμικό

Η ανάλυση και ο προσδιορισμός του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής αποτελεί μια αρκετά απαιτητική διαδικασία, η οποία για να πραγματοποιηθεί σωστά απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένων υπολογιστικών μοντέλων. Εκτός αυτού, απαιτούνται δεδομένα σχετικά με την ένταση του ανέμου, την κατεύθυνση του και τα υψομετρικά στοιχεία της περιοχής που μελετάται. Ωστόσο, για να επιτευχθεί η απλούστευση της διαδικασίας είναι κοινώς αποδεκτή η παραδοχή ότι τα δεδομένα που προέρχονται από έναν ανεμογράφο θεωρούνται αξιόπιστα ακόμη και για περιοχές που απέχουν μέχρι και 10 χιλιόμετρα από αυτόν [24].

Η ορθή και απόλυτα αξιόπιστη μέτρηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής επιτυγχάνεται αποκλειστικά με την εγκατάσταση ενός μετεωρολογικού σταθμού, ο οποίος θα μετρά και θα αποθηκεύει τα δεδομένα του μέτρου και της κατεύθυνσης του ανέμου. Η ασφάλεια της μέτρησης του αιολικού δυναμικού είναι δεδομένη όταν τα ανεμολογικά δεδομένα προέρχονται από ένα ικανοποιητικά μεγάλο χρονικό διάστημα μετρήσεων της τάξης των 6 ή ακόμα και 12 μηνών[24].

Οι μετεωρολογικοί σταθμοί εγκαθίστανται κατά κανόνα σε ύψος μεγαλύτερο των 10 μέτρων από το έδαφος και σε σημείο τέτοιο που να μην επηρεάζεται η λειτουργία τους από κάποιο εμπόδιο. Σε τοποθεσίες στις οποίες έχει παρατηρηθεί υψηλό αιολικό δυναμικό συνήθως είναι ορθή επιλογή η εγκατάσταση ενός σταθμού σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το έδαφος, όμως σε τοποθεσίες με χαμηλές εντάσεις ανέμου απαιτείται ύψος εγκατάστασης της τάξης των 40-50 μέτρων για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων. Οι σύγχρονοι ιστοί δεν περιορίζονται μόνο σε ανεμολογικές μετρήσεις αλλά λειτουργούν ως θερμόμετρο και διευθυνσιόμετρο, που συλλέγουν και αποθηκεύουν το σύνολο των απαραίτητων δεδομένων. Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται ένας σύγχρονος μετεωρολογικός σταθμός [25].



Εικόνα 1: Άποψη ενός μετεωρολογικού σταθμού [24]

Ακόμη ένα άκρως σημαντικό μέγεθος για την μελέτη του αιολικού δυναμικού αποτελεί η ένταση του ανέμου, η μέτρηση της οποίας πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός ανεμομέτρου. Υπάρχουν 4 διαφορετικά είδη ανεμομέτρων τα οποία είναι [24]:

- Ανεμόμετρα πίεσης, που μετρούν την ένταση μέσω της πίεσης που ασκείται στο όργανο,
- Ανεμόμετρα ταχύτητας, που μετρούν την ένταση μέσω της περιστροφικής ταχύτητας του οργάνου,
- Ανεμόμετρα θερμού στοιχείου, που παρέχουν μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας,
- Ανεμοδείκτες, που τοποθετούνται κατά κανόνα σε ύψος 10 μέτρα από το έδαφος

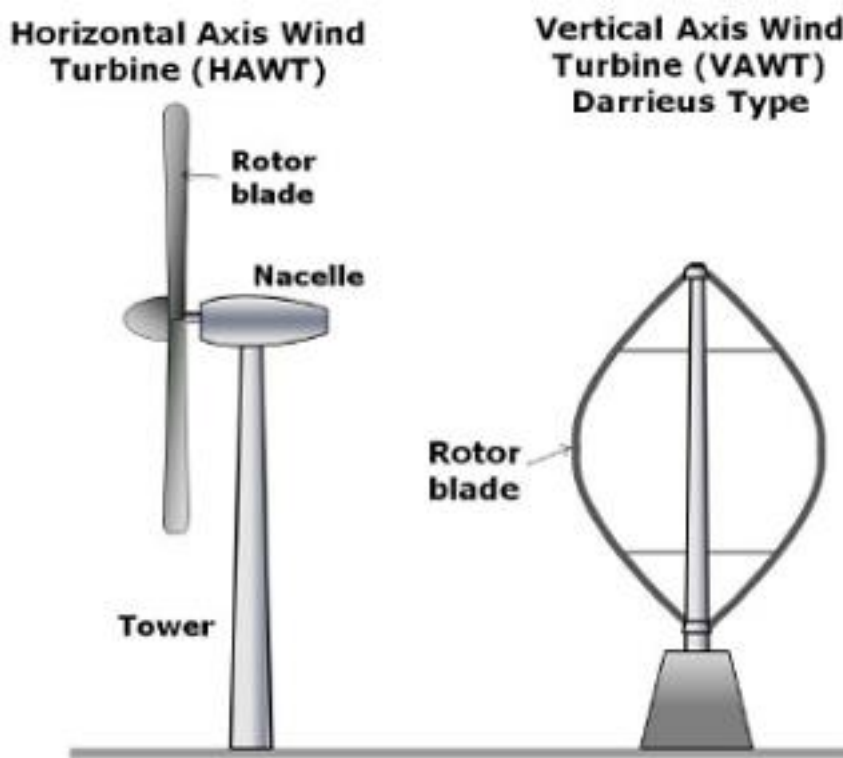
Ο σωστός προσδιορισμός της διεύθυνσης του ανέμου αποτελεί ένα απαραίτητο μέσο για την μελέτη του αιολικού δυναμικού. Η διεύθυνση του ανέμου προσδιορίζεται ως το διάνυσμα του ορίζοντα που προέρχεται ο άνεμος σε σχέση με το σημείο της μέτρησης. Το μέγεθος αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση των ανεμογεννητριών, διότι είναι συνεχώς μεταβαλλόμενο μέγεθος με μικρότερες όμως

μεταβολές συγκριτικά με τη ταχύτητα του ανέμου. Η μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου πραγματοποιείται μέσω του ανεμοδείκτη[25].

1.4. Ανεμογεννήτριες

Τα τελευταία χρόνια, το μοναδικό μέσο αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας είναι οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες είναι αιολικές μηχανές που μετασχηματίζουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός της ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με την βοήθεια των πτερυγίων ενώ στο δεύτερο στάδιο, η γεννήτρια μετασχηματίζει την ενέργεια του περιστροφικού άξονα σε ηλεκτρική. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται συνήθως καταναλώνεται κατ' ευθείαν, ενώ λιγότερο συχνά αποθηκεύεται. Οι ανεμογεννήτριες ανάλογα με τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου διαχωρίζονται σε 2 κατηγορίες και οι 2 τύποι ανεμογεννητριών απεικονίζονται στην Εικόνα 2 [8]:

- Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (horizontal axis wind turbine HAWT), που έχουν δρομέα τύπου έλικας και άξονα που έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται παράλληλα στον άνεμο [9].
- Και στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (vertical axis wind turbine VAWT), που είναι σταθερός και κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους και στην διεύθυνση του ανέμου [9].

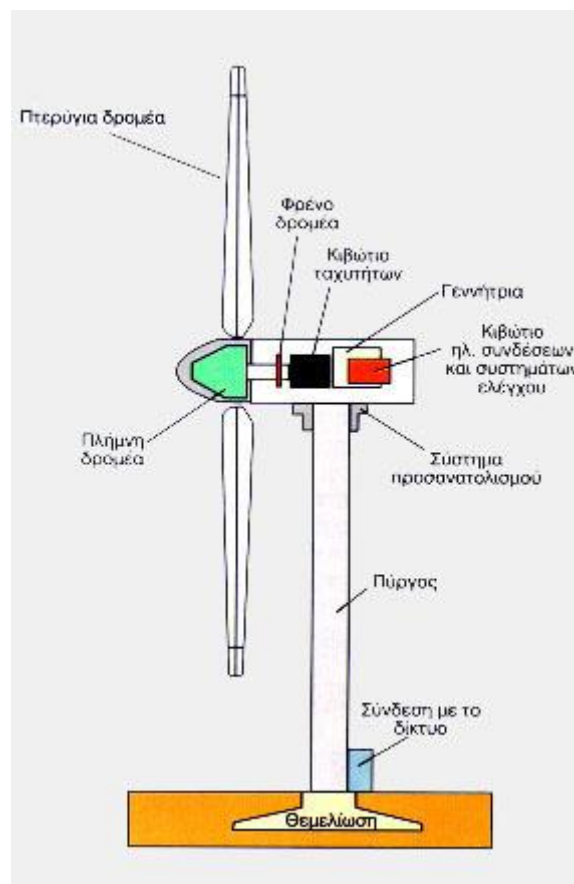


Εικόνα 2: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου και κάθετου άξονα [10]

1.4.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Από την εποχή δημιουργίας των πρώτων ανεμογεννητριών μέχρι και σήμερα έχουν δοκιμαστεί πολλά διαφορετικά είδη ανεμογεννητριών σε ό,τι αφορά τον προσανατολισμό του άξονα, την ταχύτητα περιστροφής και τον αριθμό των πτερυγίων. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια ανεξάρτητα από το μέγεθος της είναι τα εξής και απεικονίζονται στην Εικόνα 3[11]:

1. η γεννήτρια
2. ο ρότορας
3. το σύστημα ελέγχου ταχύτητας
4. ο πύργος



Εικόνα 3: Κυριότερα εξαρτήματα ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα [12]

Ο ακριβής προσδιορισμός της ανεμογεννήτριας πραγματοποιείται με τη χρήση των ακόλουθων παραγόντων:

- Ύψος ατράκτου: η υψομετρική απόσταση του άξονα περιστροφής της έλικας από το έδαφος.
- Επιφάνεια σάρωσης: η επιφάνεια της έλικας που σαρώνεται από τον άνεμο.
- Στερεότητα: ο λόγος του αθροίσματος των επιφανειών των πτερυγίων προς την επιφάνεια σάρωσης.

- Λόγος ταχύτητας ακραίου σημείου: ο λόγος της ταχύτητας στη άκρη του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου
- Εκτιμητέα ισχύς: η μέγιστη παραγόμενη ισχύς που διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ο ρότορας και η ηλεκτρογεννήτρια τοποθετούνται στην κορυφή του πύργου και στρέφονται προς τον άνεμο. Η πλειονότητα αυτών χρησιμοποιούν κιβώτιο ταχυτήτων που για την αύξηση της ταχύτητας της περιστροφικής κίνησης των πτερυγίων, έτσι ώστε να τροφοδοτείται κατάλληλα η ηλεκτρική γεννήτρια. Γνωρίζοντας ότι η ύπαρξη του πύργου συνεπάγεται την δημιουργία κραδασμών στο πίσω μέρος του, ολόκληρο το σύστημα της γεννήτριας τοποθετείται μπροστά από αυτόν έτσι ώστε να έρχεται πρώτο σε επαφή με τον άνεμο. Ακόμα, είναι απολύτως κατανοητική η μεγάλη σκληρότητα των πτερυγίων μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η μεγάλη αντοχή σε λυγισμό και θραύση λόγω των δυνατών ανέμων. Η τοποθέτηση των λεπίδων είναι σε αρκετή απόσταση μπροστά από τον πύργο, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις έχουν μια μικρή κλίση προς τα εμπρός μέσα στον άνεμο. Σε ό,τι σχετίζεται με την κατεύθυνση του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα κατηγοριοποιούνται ως ανάντη και κατάντη. Ωστόσο, οι περισσότερες ανήκουν στην πρώτη κατηγορία λόγω του ότι οι συνεχείς κραδασμοί κυκλικών διακυμάνσεων ενδέχεται να επιφέρουν κόπωση και αστοχία του υλικού. Κατάντη ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται, παρά το πρόβλημα των κραδασμών των ανέμων, λόγω του ότι δεν απαιτείται επιπλέον μηχανισμός για να διατηρηθούν στην κατεύθυνση του ανέμου και σε περιπτώσεις δυνατών ανέμων τα πτερύγια ενδέχεται να υποστούν κάμψη με αποτέλεσμα την μείωση της περιβάλλουσας περιοχής και κατά συνέπεια την αντίσταση στους ανέμους [11].

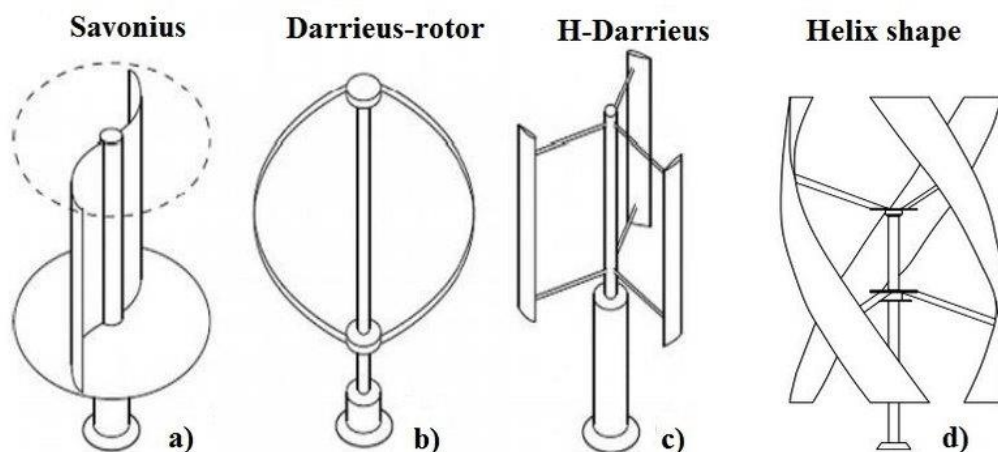
Για την πλειονότητα των ανεμογεννητριών, η διάμετρος των ελίκων κυμαίνεται από 25-50m, έχουν συνήθως τρία πτερύγια και στρέφονται προς τον άνεμο μέσω προγραμματισμού και ελέγχου υπολογιστή. Οι ανεμογεννήτριες αυτές λειτουργούν με ταχύτητες περιστροφής μεγαλύτερες των 320 km/h, έχουν υψηλές αποδόσεις και χαμηλή μέση ροπή, με αποτέλεσμα να έχουν και αρκετά μεγάλη αξιοπιστία. Τα πτερύγια τους είναι λευκού χρώματος γιατί έτσι είναι εύκολα θεατά από αεροσκάφη από αποστάσεις 20-50m και περισσότερο. Το ύψος των χαλύβδινων σωληνωτών πύργων κυμαίνεται από 60-90m και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων κυμαίνεται από 10-22 στροφές ανά λεπτό. Στις 22 στροφές ανά λεπτό η γραμμική ταχύτητα ξεπερνά τα 90 m/s, για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται κάποιο κιβώτιο ταχυτήτων για να αυξηθεί η ταχύτητα της γεννήτριας. Ωστόσο, κάποιες ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται εξ' αρχής με στόχο η αύξηση της ταχύτητας να πραγματοποιείται απευθείας στη γεννήτρια. Άλλες ανεμογεννήτριες λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα, παρόλα αυτά ενδέχεται να προσφέρουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας σε σχέση με ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, που χρησιμοποιούν μετατροπέα ενέργειας λόγω του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Τέλος, όλες ανεξαιρέτως οι ανεμογεννήτριες εφοδιάζονται με συστήματα ασφαλείας για

περιπτώσεις μεγάλης ταχύτητας ανέμου, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη αξιοπιστία [11].

1.4.2. Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

Το κυριότερο πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα (VAWT) είναι ότι χάρη στον τρόπο κατασκευής τους εκμεταλλεύονται τον άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση και αν προέρχεται, εν αντιθέσει με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT) που είναι στραμμένες προς τον άνεμο. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι, η γεννήτρια και ο μηχανισμός μετάδοσης βρίσκονται στο έδαφος, ενώ στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα βρίσκονται ψηλά στον πύργο, γεγονός το οποίο εξασφαλίζει ευκολότερη πρόσβαση, επισκευή και μικρότερο κόστος. Ακόμη, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα υπερέχουν συγκριτικά με αυτές του οριζόντιου άξονα, έχουν μεγαλύτερη απόδοση σε χαμηλότερες ταχύτητες και μπορούν να τοποθετηθούν σε συστοιχία. Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι παράγουν σημαντικά λιγότερη ηχορύπανση κατά τη λειτουργία τους [13].

Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα είναι ότι τα πτερύγια μπορούν να περιστρέφονται κατά 360°, με συνέπεια την ύπαρξη δυναμικών φορτίσεων, αλλά και του γεγονότος ότι υπό συγκεκριμένες γωνίες σε κάθε περιστροφή λειτουργούν σε μεγάλες γωνίες προσβολής, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλων αντιστάσεων και κατά συνέπεια μειωμένη απόδοση σε σύγκριση με μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Οι υπάρχουσες κατηγορίες των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα παρουσιάζονται στην Εικόνα 4 [13].



Εικόνα 4: Οι κυριότερες κατηγορίες ανεμογεννητριών κάθετου άξονα [14]

Η πρακτικότερη εφαρμογή των ανεμογεννητριών κάθετου λέγεται ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus, και εφευρέθηκε το 1931 από τον George J.M. Darrieus. Αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας λειτουργεί με την δυναμική άνωση. Δύο είδη σχεδιασμών είναι τα πιο διαδεδομένα, ο κυριότερος είναι η ανεμογεννήτρια (Darrieus-rotor) που εικονίζεται με το γράμμα β και ο άλλος που έχει κάθετα πτερύγια και εικονίζεται με το γράμμα γ της εικόνας 3 (H-Darrieus). Κάθε τύπος ανεμογεννήτριας Darrieus αποτελείται από δύο πτερύγια σχήματος αεροτομής, που έχουν προσδεθεί

πάνω στον άξονα περιστροφής. Ο αέρας διασχίζοντας τα πτερύγια προκαλεί αεροδυναμική άνωση, μέσω της γωνίας προσβολής που δημιουργείται λόγω της ροής, με αποτέλεσμα να περιστρέφεται. Ένα σημαντικό μειονέκτημα δεν είναι άλλο από τη συνεχή μεταβολή της γωνίας προσβολής με συνέπεια τη δημιουργία κυκλικής φόρτισης των πτερυγίων και την ύπαρξη σημαντικών προβλημάτων σε ό,τι αφορά το σχεδιασμό τους. Στα θετικά συγκαταλέγεται το γεγονός ότι, η μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής δεν παίζει ρόλο στην κίνηση, επειδή η κινητήρια δύναμη έχει κατεύθυνση ίδια με αυτή της περιστροφής ακόμα και για αρνητικές γωνίες προσβολής. Ωστόσο, αρνητικό αντίκτυπο δημιουργεί η δυσκολία εκκίνησης της ανεμογεννήτριας, κάτι που συμβαίνει εξαιτίας του σχεδιασμού μέσω συμμετρικών αεροτομών [15,16].

1.5. Αιολικά Πάρκα

Σε παγκόσμια κλίμακα η συντριπτική πλειοψηφία των ανεμογεννητριών είναι οριζόντιου άξονα. Η συνολική ισχύς τους ενδέχεται να υπερβαίνει τα 500 kW παρέχοντας την δυνατότητα απευθείας σύνδεσης τους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Συνεπώς, ως αιολικό πάρκο ορίζεται ένας μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος που βρίσκονται εγκατεστημένες σε ένα χώρο και λειτουργούν συνολικά ως μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια μέσω των πτερυγίων και έπειτα σε ηλεκτρική απαιτεί ογκώδεις εγκαταστάσεις συγκριτικά με τα παραγόμενα ενεργειακά ποσά. Σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις έχει διαπιστωθεί ότι, η μεγαλύτερη ταχύτητα και διάρκεια του ανέμου εντοπίζεται σε ακτογραμμές και υψηλά οροπέδια. Ωστόσο, η ιδανικότερη τοποθεσία για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου είναι δίπλα στην ακτή, ή ακόμα και στη μέση ενός πελάγους [18].

Με βάση μία μελέτη που έγινε από το Ινστιτούτο Carnegie της Washington προέκυψε το συμπέρασμα ότι η ταχύτητα του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να ωθήσει τις υπεράκτιες τουρμπίνες στην παραγωγή πολύ μεγαλύτερων ποσών ενέργειας συγκριτικά με ένα αιολικό πάρκο που εδράζεται στο έδαφος. Επομένως, προκύπτει ένας τρόπος κατηγοριοποίησης των αιολικών πάρκων, τα οποία διακρίνονται σε **onshore** (ξηράς) και **offshore** (θαλάσσια), με αυτά της ξηράς να υπερτερούν σε αριθμό. Οι δύο κατηγορίες αιολικών πάρκων απεικονίζονται στις Εικόνες 5 και 6 αντίστοιχα [18].



Εικόνα 5: Άποψη ενός onshore αιολικού πάρκου [20]



Εικόνα 6: Άποψη ενός offshore αιολικού πάρκου [21]

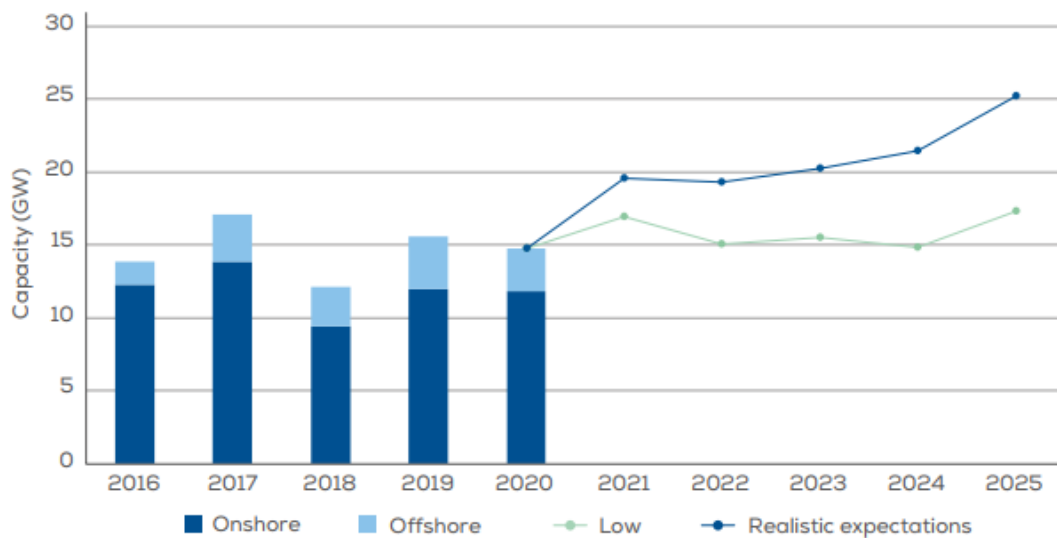
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των onshore αιολικών πάρκων είναι η οικονομία στην εγκατάσταση και τη συντήρηση, η εύκολη σύνδεση σε κάποιο δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος και το γεγονός ότι η εγκατάστασή τους αποτελεί σχετικά γρήγορη διαδικασία σε σχέση με αυτή των παράκτιων αιολικών πάρκων. Επιπλέον,

αποτελούν μια αποδεδειγμένα αποδοτική λύση αφού μέχρι και το 2010 παρήγαγαν περίπου το 25% της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στο Ηνωμένο Βασίλειο. Στον αντίποδα συνοδεύονται από κάποια μειονεκτήματα με τα βασικότερα να είναι η περιβαλλοντική επιβάρυνση κατά την κατασκευή και την εγκατάστασή τους, την πρόκληση ηχορύπανσης κατά τη λειτουργία τους και την καταστροφή της φυσικής ομορφιάς που επιφέρουν στις περιοχές που εγκαθίστανται [19].

Το βασικότερο πλεονέκτημα της εγκατάστασης των θαλάσσιων αιολικών πάρκων είναι το γεγονός ότι στην επιφάνεια της θάλασσας αναπτύσσονται πολύ υψηλότερες ταχύτητες ανέμου σε σχέση με τη στεριά, συγκεκριμένα έχει διαπιστωθεί ότι η ταχύτητες αυτές είναι περίπου πενταπλάσιες από αυτές που επικρατούν στην ξηρά, με συνέπεια την ύπαρξη μεγαλύτερων βαθμών απόδοσης. Επίσης, μειώνονται σε μεγάλο βαθμό οι επιπτώσεις για τους ανθρώπους και τα ζώα, αφού δεν ενοχλούνται από την ηχορύπανση και τις συνέπειες που υπάρχουν για το υπέδαφος. Ωστόσο θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν τα υπέρογκα έξοδα εγκατάστασης και συντήρησης του εξοπλισμού καθώς επίσης και οι καθυστερήσεις που συνεπάγονται σε περιπτώσεις ύπαρξης βλαβών [19].

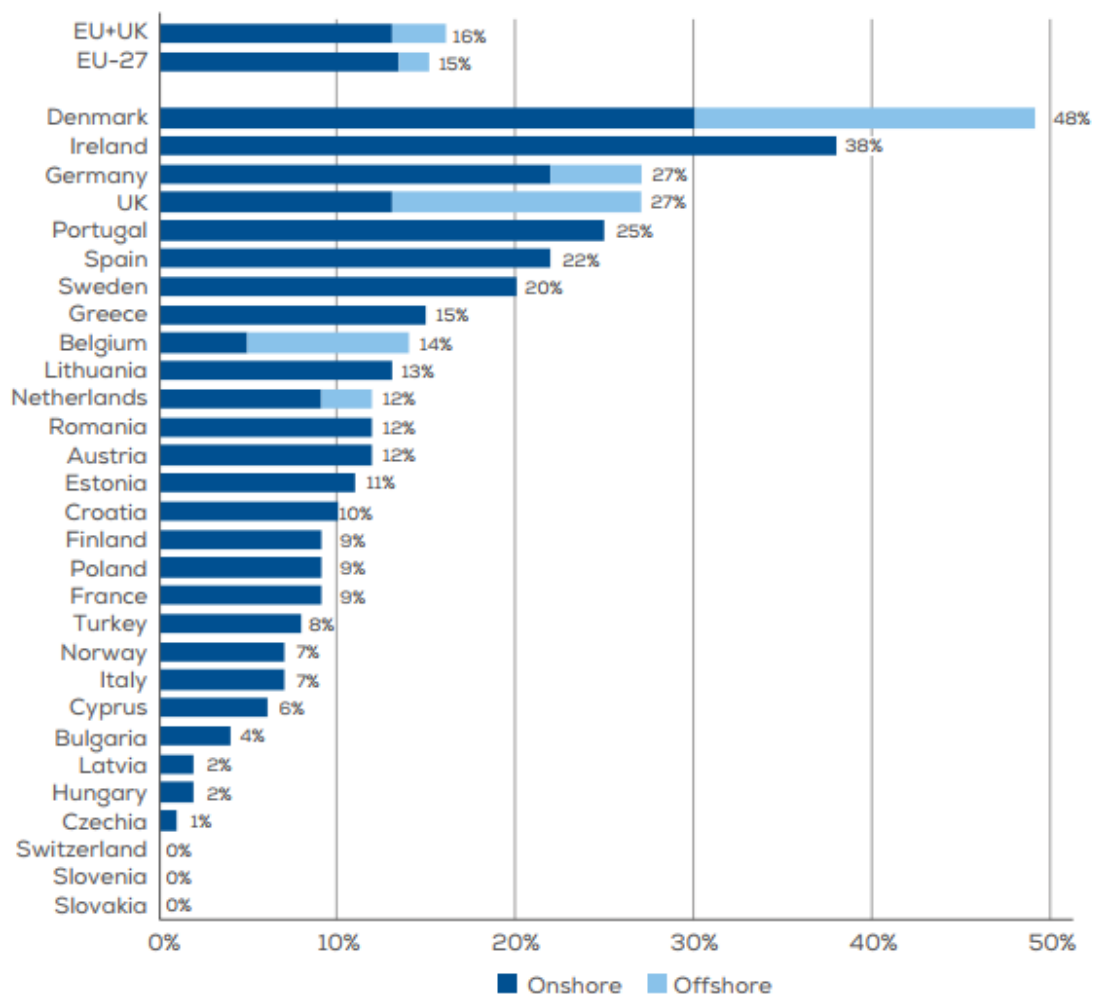
1.5.1. Τα αιολικά πάρκα στην Ευρώπη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια συνεχής εξάπλωση των αιολικών πάρκων τόσο σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο. Με βάση στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας, κατά τη διάρκεια του έτους 2020 έχουν εγκατασταθεί αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 10,5 GW σε ευρωπαϊκά εδάφη. Από την παραπάνω παραγόμενη ισχύ προκύπτει το 16% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στην Ευρώπη, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στον ευρωπαϊκό χώρο αγγίζει τα 220 GW. Επιπλέον, όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 1 αναμένεται η εγκατάσταση νέων αιολικών πάρκων ισχύος 105 GW την τετραετία 2021-2025 μόνο σε ευρωπαϊκά πλαίσια, εκ των οποίων το 70% θα βρίσκονται στην ξηρά (onshore) [17].



Σχήμα 1: Αιολικά πάρκα προς εγκατάσταση τα έτη 2021-2025 [17]

Η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς διαφέρει για κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενδεικτικά πρώτη για το έτος 2020 είναι η Γερμανία με εγκατεστημένη αιολική ισχύ 62.627 MW, από το οποίο καλύπτει το 27% της ετήσιας συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας. Ωστόσο αν λάβουμε υπόψη το ποσοστό κάλυψης της ετήσιας συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας τότε η πρωτιά ανήκει στη Δανία με ποσοστό 48% και τις Ιρλανδία, Γερμανία και Ηνωμένο Βασίλειο να ακολουθούν με μικρότερα ποσοστά. Σε ό,τι αφορά την Ελλάδα, η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανέρχεται σε 4.113 MW μέσω του οποίου καλύπτεται ένα ποσοστό της τάξης του 15% της ετήσιας συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 2 που ακολουθεί αποτυπώνονται τα ποσοστά της ετήσιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια που καλύπτεται από αιολικά πάρκα για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης με βάση στοιχεία του έτους 2020 [17].



Σχήμα 2: Απεικόνιση του ποσοστού κάλυψης των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια από αιολικά πάρκα για όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [17]

1.6. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω ανεμογεννητριών συνήθως αποθηκεύεται με στόχο την μετέπειτα χρήση της, αφού συνήθως η ζήτηση ηλεκτρικού ρεύματος υπερβαίνει τα παραγόμενα ποσά. Η αποθήκευση επιτυγχάνεται μέσω δύο διαφορετικών τρόπων, που εξαρτώνται τα ενεργειακά ποσά που παράγονται. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) αποτελούν τον κυριότερο και πιο διαδεδομένο τρόπο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τη χρήση της σε μικρού βεληνεκούς παραγωγικές μονάδες οι οποίες δεν έχουν συνδεθεί στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Σε περιπτώσεις όπου τα ποσά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγάλα, η επιθυμητή αποθήκευση επιτυγχάνεται με έναν πιο πολύπλοκο τρόπο. Η άντληση υδάτων με την βοήθεια ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ανεμογεννήτριες και η συσσώρευση αυτών σε λίμνες που βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο, έτσι ώστε κινούν έναν υδροηλεκτρικό σταθμό, αποτελεί τη μέθοδο αποθήκευσης που υιοθετείται όταν τα ενεργειακά ποσά που παράγονται είναι μεγάλα. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε τρία είδη ανάλογα με το που χρησιμοποιείται η ενέργεια που παράγουν[18]:

- Σε ανεμογεννήτριες που είναι άμεσα συνδεδεμένες με ηλεκτρικά δίκτυα.
- Σε ανεμογεννήτριες που τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια νοικοκυριά ή επιχειρήσεις.
- Σε ανεμογεννήτριες offshore, δηλαδή όσες βρίσκονται στη θάλασσα.

1.7. Επιπτώσεις αιολικών πάρκων

Αρχικά, είναι γνωστό ότι αποτελεί μια ‘καθαρή’ μορφή ενέργειας και αυτός είναι ο λόγος που συγκαταλέγεται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Επομένως, η αιολική ενέργεια είναι ανεξάντλητη και έτσι δεν υπάρχει πρόβλημα όπως με τις συμβατικές πηγές των οποίων τα αποθέματα ελαχιστοποιούνται γρήγορα και αναπληρώνονται με αργό ρυθμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι, δεν απαιτείται η καύση ορυκτών καυσίμων για να λειτουργήσουν οι ανεμογεννήτριες, λόγω του γεγονότος αυτού η αιολική ενέργεια δεν προκαλεί εκπομπές δηλητηριωδών χημικών ουσιών για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Η εγκατάσταση και η συντήρηση των ανεμογεννητριών ενδέχεται να περιλαμβάνει μεγάλο αρχικό κόστος όμως με την εκκίνηση της λειτουργίας τους το λειτουργικό κόστος είναι σημαντικά μικρότερο και ο χρόνος απόσβεσης δεν είναι μεγάλος. Παρά το γεγονός ότι, ο άνεμος που αποτελεί την κινητήρια δύναμη των ανεμογεννητριών είναι δωρεάν και άφθονος, δεν σημαίνει ότι η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας έχει μόνο πλεονεκτήματα [7].

Είναι προφανές ότι η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου εκτός από τα οφέλη και πλεονεκτήματα, επιφέρει και κάποιες επιπτώσεις. Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί το υψηλό κόστος κατασκευής ενός αιολικού πάρκου που σχετίζεται άμεσα με το αν βρίσκεται στην ξηρά ή στη θάλασσα. Η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου στη θάλασσα είναι πολύ περισσότερο δαπανηρή σε σχέση με την ξηρά, αφού απαιτούνται μεγάλα χρηματικά ποσά για να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες ηλεκτρικές συνδέσεις του αιολικού πάρκου με το υπάρχον δίκτυο μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων. Επιπλέον, για ένα τέτοιο έργο απαιτούνται στιβαρότερες ανεμογεννήτριες για την αντιμετώπιση των σημαντικά εντονότερων ανέμων που επικρατούν στα πελάγη [22].

Μια εξίσου σημαντική πηγή προβλημάτων που πηγάζει από τα αιολικά πάρκα, είναι και ο θόρυβος που διαχωρίζεται σε δύο διαφορετικά είδη τον αεροδυναμικό και το μηχανικό. Ο αεροδυναμικός θόρυβος πηγάζει από την περιστροφή των πτερυγίων των ανεμογεννητριών και αντιμετωπίζεται και στην πηγή και στην διαδρομή του, ενώ ο μηχανικός από τα περιστρεφόμενα μηχανικά τμήματα που αποτελούνται οι ανεμογεννήτριες.

Ωστόσο, είναι αυτονόητο ότι όσο πιο σύγχρονης τεχνολογίας είναι μια ανεμογεννήτρια τόσο μικρότερους μηχανικούς θορύβους παράγει, κάτι το οποίο είναι απόρροια των μελετών και βελτιώσεων που πραγματοποιούνται με την πάροδο του χρόνου. Οι κύριοι τρόποι μείωσης ή ελαχιστοποίησης του μηχανικού θορύβου είναι είτε η καλύτερη σχεδίαση των γραναζιών πλάγιας οδόντωσης είτε η τοποθέτηση ηχομονωτικής επένδυσης στο εσωτερικό κέλυφος της κατασκευής, όπως επίσης και η τοποθέτηση ηχομονωτικών πετασμάτων και αντικραδασμικών πλεγμάτων στήριξης.

Σε ό,τι αφορά τους αεροδυναμικούς θορύβους, ο μοναδικός τρόπος μείωσης τους αποτελεί η όσο το δυνατόν καλύτερη σχεδίαση των πτερυγίων από πλευράς των κατασκευαστών. Ο στόχος του εγχειρήματος αυτού είναι ο παραγόμενος θόρυβος μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας να είναι μικρότερος σε απόσταση 200 μέτρων από τον αντίστοιχο θόρυβο περιβάλλοντος, έτσι ώστε να μην αποτελεί πηγή όχλησης [22].

Ακόμη, ένα σημαντικό πρόβλημα της πρώτης γενιάς ανεμογεννητριών ήταν τα μεταλλικά πτερύγια με συνέπεια την ύπαρξη αυξομειώσεων του σήματος εξαιτίας των αντανakλάσεων. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε μέσω της κατασκευής των πτερυγίων από συνθετικά υλικά, που δεν επηρεάζουν τη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [22].

Οι υπάρχουσες ταχύτητες του ανέμου προκαλούν θόρυβο σε δέντρα και θάμνους, συνεπώς υπερκαλύπτεται ο οποιοσδήποτε θόρυβος προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες. Επομένως, στα πλαίσια μιας μελέτης και εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου λαμβάνονται υπόψη όλα τα παραπάνω καθώς επίσης και η γεωγραφική θέση του μέρους που πρόκειται να εγκατασταθεί. Επιπλέον, τα αιολικά πάρκα δεν αυξάνουν τον υπάρχοντα θόρυβο εκτός των προβλεπόμενων ορίων ακόμα και σε περιπτώσεις που βρίσκονται στα όρια κατοικημένων περιοχών [22].

Σε ό,τι αφορά τη γεωργία και την κτηνοτροφία της περιοχής που εγκαθίστανται αιολικά πάρκα, δεν υπάρχουν βάσιμες ενδείξεις ότι επιβαρύνονται οι δύο αυτοί τομείς. Η τοποθέτηση ανεμογεννητριών σε κάποιον ορεινό όγκο δεν αποτελεί πρόβλημα για την ανάπτυξη της κτηνοτροφίας, αλλά τις περισσότερες φορές ευνοείται λόγω της δροσιάς που πηγάζει από τους πύργους των ανεμογεννητριών [23].

Επιπλέον, κάποιες καταγγελίες από ορνιθολόγους που σχετίζονται με τις συνέπειες των αιολικών πάρκων σε σχέση με τα πτηνά της εκάστοτε περιοχής εγκατάστασης οδήγησαν σε πολλές περιπτώσεις κάποια προγραμματισμένα έργα σε οριστική άρση αδειών και τέλος σε ακύρωση τους. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα πτηνά καθώς πετούν συγκρούονται με κτήρια ή άλλες κατασκευές. Ωστόσο, οι διάφορες μελέτες αποδεικνύουν ότι οι ανεμογεννήτριες δεν οξύνουν ιδιαίτερος το ήδη υπάρχον πρόβλημα, αφού ο ετήσιος αριθμός θανάτων των πτηνών εξαιτίας των ανεμογεννητριών ανέρχεται σε 20 (για εγκατεστημένη ισχύ 1000MW), σε 1500 εξαιτίας των κυνηγών και σε 2000 λόγω της πρόσκρουσης τους με αυτοκίνητα και με γραμμές που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια. Τα παραπάνω στοιχεία δεν σημαίνουν ότι το ζήτημα της προστασίας της ορνιθοπανίδας θεωρείται δευτερεύων, ειδικά όταν πρόκειται για οικολογικά ευαίσθητες και προστατευόμενες περιοχές απαιτείται να μελετώνται επισταμένως κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού και οριοθέτησης του αιολικού πάρκου [23].

Τέλος, ένα ακόμη ζήτημα για τις περιοχές στις οποίες εγκαθίστανται αιολικά πάρκα είναι η πεποίθηση ορισμένων ότι υποτιμάται η αξία της γης. Φυσικά, δεν υπάρχουν

βάσιμα στοιχεία που να μπορούν να τεκμηριώσουν κάτι τέτοιο, καθώς οι περιοχές αυτές είναι συνήθως ορεινές και χωρίς ιδιαίτερη γλωρίδα.

2. Ανάλυση κύκλου ζωής

2.1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότεροι επιστήμονες ενδιαφέρονται για ζητήματα που σχετίζονται με το περιβάλλον, την κλιματική αλλαγή και το πρόβλημα αύξησης του ενεργειακού αποτυπώματος. Ένα μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού ενδιαφέρεται και επιδιώκει την εφαρμογή τεχνικών που ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις που προκαλούνται στο περιβάλλον από τις μεγάλες μονάδες παραγωγής. Συνεπώς οι περισσότερες χώρες υιοθετούν όλο και περισσότερο οικολογικότερους τρόπους παραγωγής προϊόντων [26].

Μέχρι τον περασμένο αιώνα η βέλτιστη ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων και η επίτευξη μεγαλύτερου κέρδους από την πώληση τους ήταν οι μοναδικοί στόχοι των βιομηχανιών που τα παρήγαγαν. Ωστόσο, στα χρόνια που ακολούθησαν παρατηρείται η υιοθέτηση νέων και απαράβατων στόχων που σχετίζονται με την μείωση των παραγόμενων ρύπων, την βέλτιστη δυνατή διαχείριση των αποβλήτων και γενικότερα την υιοθέτηση κανόνων με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος. Επομένως, οι περισσότερες επιχειρήσεις μελετώντας τις συνέπειες που έχει στο περιβάλλον η λειτουργία της παραγωγικής διαδικασίας ανέπτυξαν συστήματα ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής διαχείρισης, που στοχεύουν στη βελτίωση της περιβαλλοντικής τους απόδοσης [27].

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ΑΚΖ αποτελεί ένα σημαντικό μέσο περιβαλλοντικής αξιολόγησης, που μελετά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που προκαλεί ένα προϊόν σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του, ξεκινώντας από τη εξόρυξη των απαιτούμενων πόρων, τα διάφορα στάδια παραγωγής των υλικών, την παραγωγή κάποιων αναγκαίων εξαρτημάτων, τη χρήση του προϊόντος, την απόρριψη αυτού ίσως την επαναχρησιμοποίηση κάποιων μερών του, την ανακύκλωση και την οριστική απόρριψη. Η ΑΚΖ είναι μια μεθοδολογία που πραγματοποιείται μέσω της ακριβούς ποσοτικοποίησης όλων των μεγεθών ανεξαιρέτως, ενώ σε περίπτωση που κάτι τέτοιο καθίσταται ανέφικτο γίνεται χρήση ποιοτικών παραμέτρων με σκοπό τη δημιουργία της καλύτερης δυνατής προσομοίωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η μελέτη της ΑΚΖ επικεντρώνεται στην αποτύπωση των εισροών και των εκροών, στην κατάσταση των ισοζυγίων ενέργειας και μάζας και στην αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων που προκύπτουν από αυτά και συνδέονται άμεσα με τη λειτουργία του προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του [28].

2.2. Γενικά στοιχεία της ανάλυσης κύκλου ζωής

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ΑΚΖ αποτελεί μια μέθοδο που αναπτύχθηκε με στόχο την αξιολόγηση του συνόλου των περιβαλλοντικών συνεπειών για το σύνολο της διάρκειας ζωής ενός προϊόντος, και είναι μια από τις πιο ολοκληρωμένες μεθόδους αξιολόγησης της αειφορίας για κάθε παραγωγική διαδικασία. Ο βασικότερος στόχος της ΑΚΖ είναι η μελέτη και ο ακριβής καθορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλείται από την παραγωγή ενός προϊόντος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συνεχούς μελέτης ενός προϊόντος ξεκινώντας από την διαδικασία παραγωγής του και

καταλήγοντας στην καταστροφή ή την ανακύκλωση του. Οι διαδικασίες αυτές συνήθως σχετίζονται με την εξόρυξη και μεταφορά των πρώτων υλών, την απαιτούμενη επεξεργασία και το τελικό προϊόν. Για το σύνολο των διαδικασιών αυτών απαιτείται ο ακριβής υπολογισμός των ενεργειακών και άλλων πόρων που δαπανήθηκαν σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές συνέπειες που προκλήθηκαν. Κατ' αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των συνολικών ενεργειακών μεγεθών και των πόρων που καταναλώθηκαν όπως επίσης και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προήλθαν από την παραγωγή του προϊόντος. Έπειτα, η AKZ εμβαθύνει στην καταναλισκόμενη ενέργεια και στην περιβαλλοντικές συνέπειες που προέρχονται από τη χρήση του προϊόντος, όπως επίσης και η καταστροφή ή η αξιοποίηση αυτού που έρχεται μετά το πέρας της διάρκειας ζωής του. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μέθοδος AKZ αποτελεί ένα σύγχρονη μεθοδολογία αξιολόγησης του βαθμού αειφορίας ενός προϊόντος [27].

Η μελέτη της AKZ εμβαθύνει στην λεπτομερή ανάλυση των εισροών και των εκροών, στην κατάστρωση των ενεργειακών ισοζυγίων και ισοζυγίων μάζας, όπως επίσης και τον προσδιορισμό της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που αναμφίβολα θα προκύψει. Η AKZ στοχεύει στην αποτίμηση των επιπτώσεων που προέρχονται από τις ανάγκες σε πρώτες ύλες και ενέργεια, της απόρριψης των αποβλήτων, μελετώντας παράλληλα και τα ενδεχόμενα βελτίωσης των περιβαλλοντικών τεχνικών με στόχο την ορθολογικότερη χρήση πρώτων υλών και ενέργειας [27].

2.3. Μεθοδολογία της ανάλυσης του κύκλου ζωής

Η ανάλυση του κύκλου ζωής AKZ αποτελεί μια εύχρηστη μεθοδολογία που στοχεύει στον καθορισμό των συνολικών συνεπειών κάποιας τεχνολογίας και πραγματοποιείται μέσω του συσχετισμού όλων των περιβαλλοντικών συνεπειών που προκύπτουν από τις διαδικασίες της αγοράς, της επεξεργασίας, της κατασκευής, της χρήσης και της απόρριψης ή της ανακύκλωσης των υλικών που απαιτούνται για ολόκληρη τη διαδικασία. Η προσέγγιση αυτή είναι ωφέλιμη για το βιώσιμο σχεδιασμό διαφόρων συστημάτων και επομένως χρησιμοποιείται από πολλούς βιομηχανικούς σχεδιαστές που μελετούν την ανάπτυξη προϊόντων και την βιώσιμη διαχείριση συστημάτων. Κατ' αρχήν για την διεξαγωγή μελέτης AKZ για διάφορα συστήματα ή προϊόντα τα στάδια που πρέπει να ακολουθηθούν είναι τα εξής[28]:

1. Ορισμός των ανοχών του συστήματος, των απαιτήσεων και των υποθέσεων.
2. Η συλλογή των πόρων για τις εισροές και τις εκροές του συστήματος.
3. Ο ορισμός των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις εισόδους και τις εξόδους.
4. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων: για να πραγματοποιηθεί μία AKZ πρέπει να διεξαχθεί διεξοδική έρευνα για να προσδιοριστούν οι παράγοντες που συμβάλλουν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος. Για τον υπολογισμό του απαιτείται κάποιο λογισμικό ανάλυσης κύκλου ζωής, εργαλείων και βάσεις δεδομένων σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα που διέπουν τις διαδικασίες αξιολόγησης της βιωσιμότητας [28].

Σε ό,τι αφορά τις ανεμογεννήτριες, τα στάδια που συνήθως λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια προετοιμασίας της διαδικασίας AKZ είναι το κατασκευαστικό στάδιο, η μεταφορά, η ανέγερση και κατασκευή, η λειτουργία και η απόρριψη ή η ανακύκλωση, ενώ η διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών θεωρείται πως είναι 20 χρόνια. Τα αποτελέσματα της AKZ των ανεμογεννητριών αξιολογούνται μέσω περιβαλλοντικών παραγόντων όπως ο χρόνος ενεργειακής απόδοσης. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται συνήθως για κάθε στάδιο ζωής και για όλα τα δομικά στοιχεία ξεχωριστά [28].

2.4. Οι στόχοι της ανάλυσης κύκλου ζωής

Μέσω της μεθόδου AKZ επιτυγχάνεται η παρουσίαση και ο καθορισμός των περιβαλλοντικών συνεπειών (κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών, ατμοσφαιρική και υδάτινη ρύπανση) και άλλων δραστηριοτήτων, προϊόντων και διαδικασιών παραγωγής. Η AKZ αποτελεί μια μεθοδολογία μελέτης που έχει εφαρμογή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του εκάστοτε προϊόντος ή διαδικασίας (παραγωγή, μεταφορά, εγκατάσταση, χρήση και απόρριψη). Οι κυριότεροι πυλώνες στους οποίους βασίζεται ολόκληρη η μεθοδολογία είναι τα ισοζύγια ενέργειας και μάζας των πρώτων υλών με στόχο τον υπολογισμό των ποσοτήτων των εκπομπών, την μείωση των υλικών και των καυσίμων που απαιτούνται για να μετατραπούν οι πρώτες ύλες σε προϊόντα, τη χρήση και την απόρριψή αυτών όπως επίσης και την ανακύκλωση των υπολοίπων όταν αυτή είναι εφικτή. Οι επερχόμενες περιβαλλοντικές συνέπειες επιβαρύνουν συνήθως περισσότερο την ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα[29].

Πέρα όμως από τους κυριότερους στόχους που αναφέρθηκαν, η μέθοδος AKZ ενδεχομένως να περιλαμβάνει και άλλους όπως:

- Παροχή στήριξης σε επιχειρήσεις σε ζητήματα οικολογικού μάρκετινγκ,
- Διάκριση βέλτιστου τρόπου ανακύκλωσης υλικών και διαχείρισης αποβλήτων μέσω εξέτασης όλων των εφικτών λύσεων,
- Αυστηροποίηση του περιβαλλοντικού νομοθετικού πλαισίου και καθορισμό προτεραιοτήτων για το σχεδιασμό και της παραγωγή προϊόντων,
- Υιοθέτηση επιστημονικά τεκμηριωμένων περιβαλλοντικών αποφάσεων,
- Αξιολόγηση επενδυτικών προτάσεων με περιβαλλοντικά κριτήρια,
- Δημιουργία σύγχρονης βάσης με σκοπό την εφαρμογή προγραμμάτων “ποιότητας περιβάλλοντος”,
- Δημιουργία επιστημονικού υποβάθρου με στόχο την υιοθέτηση οικονομικών μέτρων σε περιπτώσεις εμφάνισης έντονων οι αρνητικών συνεπειών προϊόντων ή δραστηριοτήτων στο περιβάλλον[29].

2.5. Τα στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής AKZ που εφαρμόζεται για προϊόντα ή διεργασίες περιλαμβάνει τέσσερα κύρια βήματα, με βάση το Διεθνή Οργανισμό Πιστοποίησης (ISO). Τα πρότυπα ISO 14043 αναφέρονται στην μεθοδολογία της

AKZ επισημαίνουν ότι η AKZ αποτελεί ένα σημαντικό μέσο περιβαλλοντικής μελέτης και ορίζουν τα στάδια που ακολουθούνται για την εφαρμογή της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας AKZ:

- 1) ISO 14040-1997: Αρχές και οριοθέτηση συστήματος,
- 2) ISO 14041-1998: Αναλυτική προσδιορισμός σκοπών και στόχων και εκτενής περιγραφή δεδομένων του συστήματος,
- 3) ISO 14042-2000: Εκτίμηση των συνεπειών του κύκλου ζωής,
- 4) ISO 14043-2000: Αιτιολόγηση των αποτελεσμάτων [30].

Η AKZ ενδέχεται να περιλαμβάνει και οικονομικά μεγέθη, μέσω των οποίων διευρύνονται τα πεδία εφαρμογής και χρήσης της περαιτέρω. Ο βαθμός αξιοπιστίας μια τέτοιας μελέτης εξαρτάται σε ένα μεγάλο μέρος από τους παρακάτω παράγοντες:

- 1) Το σύνολο και τον αριθμό των παραδοχών και των υποθέσεων που έχουν υιοθετηθεί για το εκάστοτε βήμα της ανάλυσης,
- 2) Το πλήθος και τη διαθεσιμότητα των αξιόπιστων δεδομένων,
- 3) Τον τρόπο μοντελοποίησης και τον βαθμό απλούστευσης των παραγωγικών διαδικασιών που μελετώνται [30].

Στάδιο 1: Αρχές και οριοθέτηση συστήματος

Αποτελεί το πρώτο και το κυριότερο στάδιο για τη μεθοδολογία της AKZ. Εμπεριέχει εκτενή και αναλυτικό καθορισμό του σκοπού και του αντικειμένου για το οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση. Εν συνεχεία, αναλύονται οι υπάρχουσες εφαρμογές των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας, όπως επίσης οι υποθέσεις και οι περιορισμοί που έγιναν για να διεκπεραιωθεί η ανάλυση. Τα βήματα που περιλαμβάνει είναι τα εξής:

- Η εκτενής ανάλυση του στόχου της AKZ,
- Η αναλυτική περιγραφή του κύκλου ζωής και χρησιμότητας του προϊόντος ή της διεργασίας,
- Ο καθορισμός των ορίων και η περιγραφή του συστήματος που μελετάται,
- Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας
- Η μελέτη των ποιοτικών προδιαγραφών σχετικά με τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται,
- Οι υποθέσεις και οι περιορισμοί που υιοθετήθηκαν για την ερμηνεία της ανάλυσης[31].

Η μελέτη της AKZ επαφίεται στον απαιτούμενο βαθμό λεπτομέρειας για την εξασφάλιση αξιόλογων αποτελεσμάτων. Η αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των δεδομένων που έχουν χρησιμοποιηθεί [29].

Η λειτουργική μονάδα: Αποτελεί το κυριότερο μέτρο απόδοσης της μελέτης και πρέπει να καθορίζεται με ακρίβεια, στοχεύοντας έτσι στη δημιουργία μιας κοινής μονάδας αναφοράς για διαφορετικές παραγωγικές διαδικασίες [29].

Τα όρια του συστήματος: Το σύνολο των διεργασιών του συστήματος σχετίζεται με τη επεξεργασία της ύλης και την κατανάλωση ενέργειας (εργασίες κατασκευής, εργασίες μεταφοράς). Αποτελεί τον καθορισμό των ορίων του συστήματος που το διαχωρίζουν από άλλες διεργασίες εκτός αυτού[29].

Το διάγραμμα ροής: των διαδικασιών απεικονίζει με τη βοήθεια σχημάτων το σύνολο των διεργασιών του κύκλου ζωής της διαδικασίας που μελετάται. Το διάγραμμα αποτελείται αποκλειστικά από τα στάδια του κύκλου ζωής που βρίσκονται εντός των ορίων της παραγωγικής διαδικασίας[29].

Η εκτίμηση ποιότητας των αποτελεσμάτων: σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα των δεδομένων που εισάγονται. Κατά κανόνα, για το σύνολο των δεδομένων επιβάλλεται να εξακριβωθεί η χρονική και γεωγραφική ακρίβεια, η επαναληψιμότητα και η καλύτερη δυνατή αντιπροσωπευτικότητα αυτών [29].

Στάδιο 2: Εκτενής απογραφή των δεδομένων του συστήματος

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η εκτενής καταγραφή και εκτίμηση των δεδομένων του συστήματος. Κάθε υποπροϊόν μελετάται και παρουσιάζεται ως ένα σύστημα, το οποίο εμπεριέχει όλες τις διεργασίες που σχετίζονται με τις ροές μάζας και ενέργειας [30].

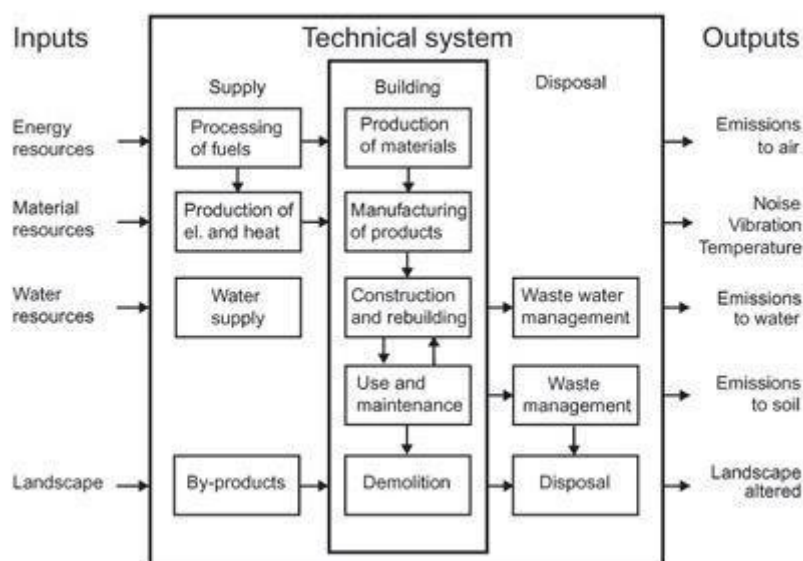
Η καταγραφή των δεδομένων είναι μια ακριβής περιγραφή των συνολικών ποσοτήτων μάζας και ενέργειας στα πλαίσια του συστήματος και των υποσυστημάτων αυτού. Η είσοδος του κάθε υποσυστήματος ταυτίζεται με την έξοδο της προηγούμενης διεργασίας, συνεπώς η έξοδος του αποτελεί την είσοδο της διεργασίας που έπεται. Αυτός είναι ο τρόπος υπολογισμού όλων των εισερχόμενων και εξερχόμενων ροών [30].

Τα δεδομένα ενδέχεται να προέρχονται από πρωτογενείς πηγές, εργαστηριακά δεδομένα ή μετρήσεις. Όταν τέτοιου είδους δεδομένα δεν υπάρχουν ακολουθούνται μεθοδολογίες εκτίμησης μέσω υπολογιστικών μοντέλων με τη βοήθεια συγκεκριμένων βάσεων δεδομένων, δημοσιεύσεων και μελετών AKZ, που είναι όμοιες με τα χαρακτηριστικά του συστήματος που μελετάται [31].

Γενικότερα, το στάδιο αυτό εμπεριέχει αβεβαιότητες και ανακρίβειες. Οι διάφορες παράμετροι θα πρέπει να αναφερθούν στο βήμα αρχές και οριοθέτηση του συστήματος και να αναλυθούν στο βήμα της ανάλυσης των αποτελεσμάτων [31].

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται οι βασικές διεργασίες της πρακτικής εφαρμογής της μεθόδου AKZ. Η ενέργεια και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν, η ποσοτικοποίηση των εκπομπών της ατμόσφαιρας, του νερού και του εδάφους για όλα τα βήματα της διεργασίας συνδυάζονται στο διάγραμμα ροής και παραθέτονται συνολικά για όλο το εύρος του συστήματος. Επιπλέον, το σύνολο των εισροών και εκροών του συστήματος παρουσιάζονται ως μέρος της απογραφής. Συνεπώς, τα προϊόντα και οι διεργασίες μπορούν να συγκριθούν και να αξιολογηθούν μέσω των αποτελεσμάτων του Life Cycle Inventory (LCI). Στην περίπτωση που τα

αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από συνέπεια και ακρίβεια σηματοδοτεί την σωστή απόδοση του προϊόντος σε σχέση με την περιβαλλοντική επιβάρυνση [32].



Εικόνα 7: Αναπαράσταση του συστήματος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [34]

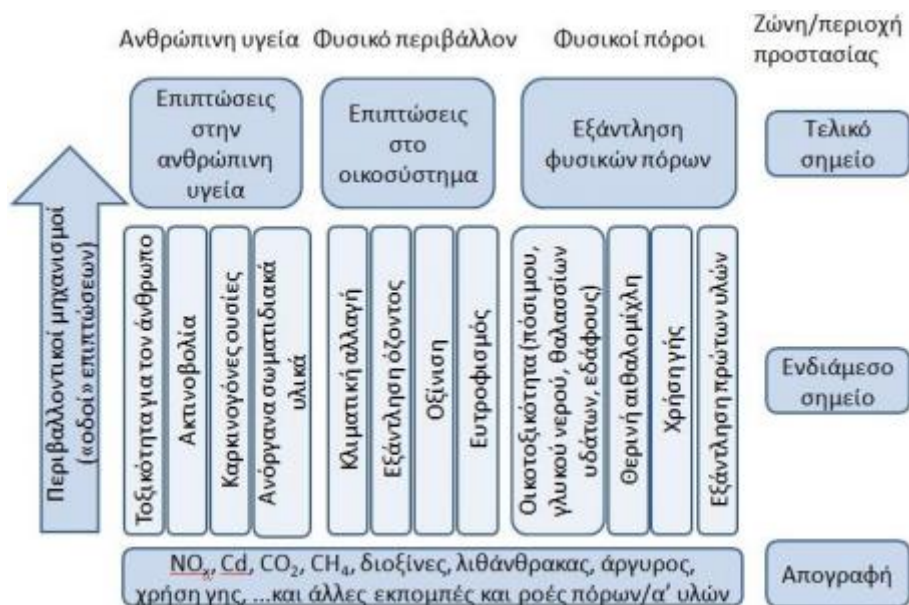
Στάδιο 3: Εκτίμηση των επιπτώσεων της ανάλυσης κύκλου ζωής

Η αποτίμηση των επιπτώσεων είναι ένας συνδυασμός ποιοτικής αλλά και ποσοτικής μελέτης των περιβαλλοντικών συνεπειών που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα της καταγραφής των δεδομένων. Η εκτίμηση πραγματοποιείται μέσω διαφόρων τρόπων. Ο συνηθέστερος τρόπος εξετάζει αναλυτικά τις εισροές και τις εκροές, τις επιπτώσεις που προέρχονται από το σύνολο των φάσεων του κύκλου ζωής, καταλήγοντας στον εντοπισμό των κυριότερων προβλημάτων των σταδίων ζωής του προϊόντος και τέλος, στον υπολογισμό των επιπτώσεων του συνολικά[32].

Με βάση τα πρότυπα ISO 14040 και 14044, η περιβαλλοντική εκτίμηση των χαρακτηριστικών ενός προϊόντος μελετά τις επιπτώσεις των ενδιάμεσου αλλά και του τελικού σημείου. Οι συνέπειες ενδιάμεσου σημείου σχετίζονται με την αλλαγή κλίματος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, την οξίνιση, τον ευτροφισμό, τις συνέπειες στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, την επερχόμενη εξάντληση των ορυκτών πόρων, την σπατάλη υδάτινων πόρων, την κατάληψη εδάφους, την ηχορύπανση κ.α. Οι συνέπειες του τελικού σημείου απεικονίζονται στην Εικόνα 8 και κατηγοριοποιούνται ως εξής:

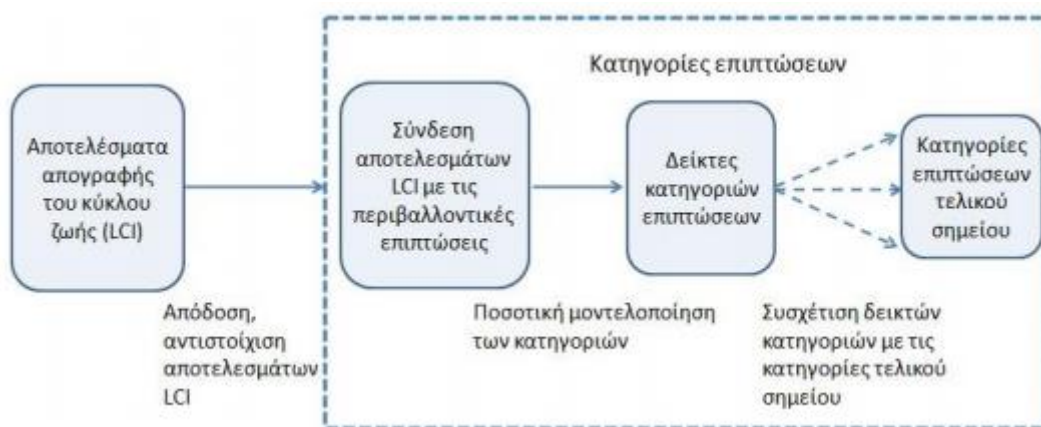
- Εξάντληση των φυσικών πόρων: οι φυσικοί πόροι διαχωρίζονται ως ανανεώσιμοι (ήλιος, άνεμος, βιομάζα κ.α.) και μη ανανεώσιμοι (λιγνίτης, πετρέλαιο),
- επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία: διακρίνονται είτε σε έμμεσες επιπτώσεις (από πυρκαγιές, πλημμύρες, εκρήξεις κ.α.) είτε σε άμεσες λόγω συνεχούς έκθεσης των ανθρώπων σε τοξικές ουσίες όπως (βενζόλιο, ρύποι κ.α.),

- επιπτώσεις στο περιβάλλον: αφορούν τις επιπτώσεις δομής (πληθυσμός, διατροφή, οικοσύστημα) και λειτουργίας (παραγωγική διαδικασία, διεργασία)[33].



Εικόνα 8: Ανάλυση των περιβαλλοντικών συνεπειών, με βάση το ISO [34]

Εδώ διαμορφώνεται η αναλυτική μοντελοποίηση των επιπτώσεων των διαφόρων ουσιών. Η διαδικασία αυτή γίνεται με στόχο τη σύνδεση των στοιχείων που προέκυψαν από την απογραφή με τις ενδεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η Εικόνα 9 απεικονίζει την εκτίμηση των επιπτώσεων του τελικού σημείου ή των βλαβών[31].



Εικόνα 9: Απεικόνιση των δεδομένων απογραφής και σύνδεση αυτών με τις κατηγορίες των επιπτώσεων [34]

Τα σημαντικότερα στάδια της μελέτης των επιπτώσεων είναι τα εξής:

1. Καθορισμός της μεθόδου και των επιπτώσεων που θα μελετηθούν

Οι κατηγορίες των επιπτώσεων είναι οι εξής:

- Αραίωση της στοιβάδας του όζοντος, υπολογίζεται ισοδύναμα με την επιβάρυνση που προκαλεί 1 kg CFC-11,
- ευτροφισμός, υπολογίζεται ισοδύναμα με την επιβάρυνση που προκαλεί 1 kg PO₄⁻³,
- θαλάσσια οικοτοξικότητα, σχετίζεται με την ποσότητα του μέχρι ένα κρίσιμο σημείο μολυσμένου νερού που θα προκύψει από 1kg της ουσίας,
- οικοτοξικότητα εδάφους, υπολογίζεται ισοδύναμα με την επιβάρυνση που προκαλεί 1 kg ουσίας,
- οξίνιση, μετριέται ισοδύναμα με την επιβάρυνση που προκαλεί 1 kg SO₄⁻²,
- εξάντληση των ορυκτών πόρων, υπολογίζεται σε σχέση με υφιστάμενα αποθέματα σε παγκόσμιο επίπεδο,
- παγκόσμια υπερθέρμανση, υπολογίζεται ισοδύναμα με την επιβάρυνση που προκαλεί 1 kg CO₂
- ανθρώπινη τοξικότητα, επιβαρύνει την ανθρώπινη υγεία μέσω της έκθεσης σε τοξικές ουσίες, υπολογίζεται σε kg ανά 1,4 DCB_{eq}[35].

2. Κατηγοριοποίηση των δεδομένων της απογραφής στα είδη των επιπτώσεων

Με βάση τα στοιχεία της απογραφής δεδομένων, τα περιβαλλοντικά φορτία κυρίως τοποθετούνται στις υπάρχουσες κατηγορίες επιπτώσεων. Συνήθως, οι εκπομπές συνεισφέρουν σε μια ή και περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων (π.χ. η παραγωγή ρύπων CO₂ επιδεινώνει το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης και αυτό της ανθρώπινης τοξικότητας)[35].

3. Χαρακτηρισμός

Το στάδιο που έπεται της κατηγοριοποίησης των περιβαλλοντικών φορτίων στα είδη των επιπτώσεων είναι ο χαρακτηρισμός. Το στάδιο αυτό εμπεριέχει μια εκτενή ανάλυση και ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών φορτίων και επιπτώσεων που προέκυψαν από τα προηγούμενα στάδια[36].

Ο χαρακτηρισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη συμβολή πληροφοριών που προέρχονται από πίνακες απογραφής δεδομένων. Η μοντελοποίηση της έκθεσης και των επιδράσεων προκύπτει από διάφορες προσεγγίσεις που εξειδικεύονται σε τέτοια είδη αναλύσεων. Έτσι προκύπτουν οι μετρήσεις και οι μελέτες επιπτώσεων[36].

Η διαμόρφωση των δεικτών για την εκάστοτε κατηγορία επιπτώσεων πραγματοποιείται ανατρέχοντας στο στάδιο της απογραφής δεδομένων και υπολογίζεται μέσω με τη βοήθεια εξισώσεων, συντελεστών και βάσεων δεδομένων [36].

Τα στοιχεία που προέκυψαν από την απογραφή των δεδομένων μετασχηματίζονται σε ισοδύναμες μονάδες μέτρησης, διαφορετικές για την

εκάστοτε κατηγορία. Συγκεκριμένα, το μέτρο επιρροής για τα διαφορετικά αέρια σε μία μελέτη επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής αποτιμώνται με βάση τα παραγόμενα kg CO₂, με τη βοήθεια των σχετικών δυναμικών κλιματικής αλλαγής (GWP_s). Επομένως, κάθε ρύπος που συντελεί στην χειροτέρευση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής μετατρέπεται σε ισοδύναμα παραγόμενα kg CO₂ με τη βοήθεια των συγκεκριμένων συντελεστών[36].

Για παράδειγμα, για μία τιμή GWP₁₀₀=27 ισοδύναμα kg CO₂ καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι 1 kg της συγκεκριμένης κατηγορίας ρύπου θα επιβαρύνει το περιβάλλον όσο 27 kg CO₂ σε χρονικό ορίζοντα 100 χρόνων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένοι συντελεστές είναι μοναδικοί για την εκάστοτε κατηγορία, μέσο, χρονικό ορίζοντα, χωρικό περιβάλλον κ.λπ[36].

Για το σύνολο των ρύπων οι οποίοι επηρεάζουν μόνο μια κατηγορία επιπτώσεων, η τελική τιμή αυτής υπολογίζεται ως άθροισμα του γινομένου των συντελεστών με τους ρύπους[36].

4. Κανονικοποίηση (Normalization)

Η ύπαρξη του συγκεκριμένου σταδίου στην μελέτη δεν είναι απαραίτητη βάσει ISO, ωστόσο συμβάλλει κατά πολύ στη σωστή κατανόηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις διάφορες επιπτώσεις και τομείς που μελετώνται. Κατ' αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται η επίλυση των επιδράσεων των εναλλακτικών προϊόντων (για παράδειγμα ενδέχεται για μια επιλογή να απαιτείται ο υπολογισμός χαμηλότερων δεικτών, ενώ σε μια διαφορετική επιλογή η χρήση υψηλότερων δεικτών). Ένα επιπρόσθετο βήμα αποτελεί και η σύγκριση των δεικτών κατηγορίας επιπτώσεων, ωστόσο πραγματοποιείται σε κάποιες περιπτώσεις AKZ καθώς συμπεριλαμβάνεται στο ISO 14040 και υλοποιείται στα πλαίσια της κανονικοποίησης[35].

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις διάφορες κατηγορίες με μια πρότυπη τιμή αποτελεί μέρος του σταδίου της κανονικοποίησης. Τις περισσότερες φορές οι τιμές αναφοράς είναι ο λόγος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα πλαίσια μιας χώρας ή μιας ηπείρου για τη διάρκεια ενός έτους, διά τον αριθμό των κατοίκων [35].

Μετά το τέλος του βήματος της κανονικοποίησης, το σύνολο των κατηγοριών έχουν την ίδια μονάδα με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η σύγκριση τους. Τα συγκρίσιμα πλέον αποτελέσματα που προκύπτουν χρησιμοποιούνται με στόχο την εύρεση της σημαντικότητας των κατηγοριών επιπτώσεων. Επιπλέον, στο σημείο αυτό θεωρείται δεδομένη η ισοδυναμία των κατηγοριών. Τέλος, το πρόβλημα επιλύεται με τη βοήθεια συντελεστών στάθμισης, αρκεί να ληφθεί υπόψη η υποκειμενικότητα αυτών που επιβαρύνει την αξιοπιστία τους [35].

Στάδιο4: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό γίνεται εκτενής εξέταση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων βημάτων καθώς επίσης και των παραδοχών που υιοθετήθηκαν, με στόχο η μελέτη να οδηγηθεί στα τελικά συμπεράσματα και να εκπληρωθεί ο αρχικός της στόχος [37].

Με βάση τα πρότυπα ISO 14040-14044 το τελευταίο αυτό στάδιο απαρτίζεται από 3 επιμέρους βήματα:

- Μελέτη των αποτελεσμάτων,
- Αποτίμηση των αποτελεσμάτων,
- Δημιουργία των τελικών αποφάσεων και των βελτιωτικών ιδεών.

Στο στάδιο αυτό χρήσιμο εργαλείο θα μπορούσε να αποτελέσει και η ανάλυση ευαισθησίας, όπου εισρέουν διάφορες εναλλακτικές δεδομένων με στόχο να μελετηθεί η επίδραση αυτών στα αποτελέσματα. Επομένως, με δεδομένη τη γνώση του εύρους αβεβαιότητας των δεδομένων, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού του συνολικού εύρους σφάλματος των αποτελεσμάτων. Ειδικά για περιπτώσεις στις οποίες τα δεδομένα δεν προέκυψαν από συγκεκριμένες μετρήσεις, με συνέπεια να υπάρχει αρκετά μεγάλη αβεβαιότητα, γίνεται επιτακτική η ανάγκη της ανάλυσης ευαισθησίας [37].

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται παράλληλα με τα άλλα στάδια της ΑΚΖ. Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα της απογραφής δεδομένων ή το στάδιο της αποτίμησης των επιπτώσεων δεν πληρούν τις προδιαγραφές που ορίστηκαν στο στάδιο οριοθέτησης του συστήματος, απαιτείται η βελτιστοποίηση του σταδίου της απογραφής μέσω της επιθεώρησης των ορίων του συστήματος με μία εκτενέστερη συλλογή δεδομένων. Έπειτα, θα προκύψει μια βελτιωμένη μορφή της αποτίμησης των επιπτώσεων έως ότου πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις του σταδίου των αρχών και της οριοθέτησης του συστήματος [37].

Στο τέλος της ανάλυσης θα πρέπει να περιλαμβάνονται ιδέες και προτάσεις με στόχο την βελτίωση του προϊόντος ή της υπηρεσίας.

2.6. Πλεονεκτήματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

- **Οικονομικά κέρδη:** Μέσω της ΑΚΖ πραγματοποιείται μια εκτενής ανάλυση του κύκλου ζωής του προϊόντος, αποτυπώνονται οι κυριότερες περιβαλλοντικές του επιπτώσεις, με στόχο την ελαχιστοποίηση τους μέσω της αύξησης της αποδοτικότητας χρησιμοποιούμενων υλικών και ενέργειας. Η βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων συμβάλλει στην μείωση της κατανάλωσης τους, αλλά και στη μείωση της ποσότητας των αποβλήτων που θα παραχθούν, με τελική συνέπεια μια σημαντική μείωση στο συνολικό κόστος.
- **Σχεδιασμός:** Η ΑΚΖ συμβάλλει σημαντικά στο σχεδιασμό και στη λήψη βελτιωτικών αποφάσεων στα πλαίσια των παραγωγικών διαδικασιών του

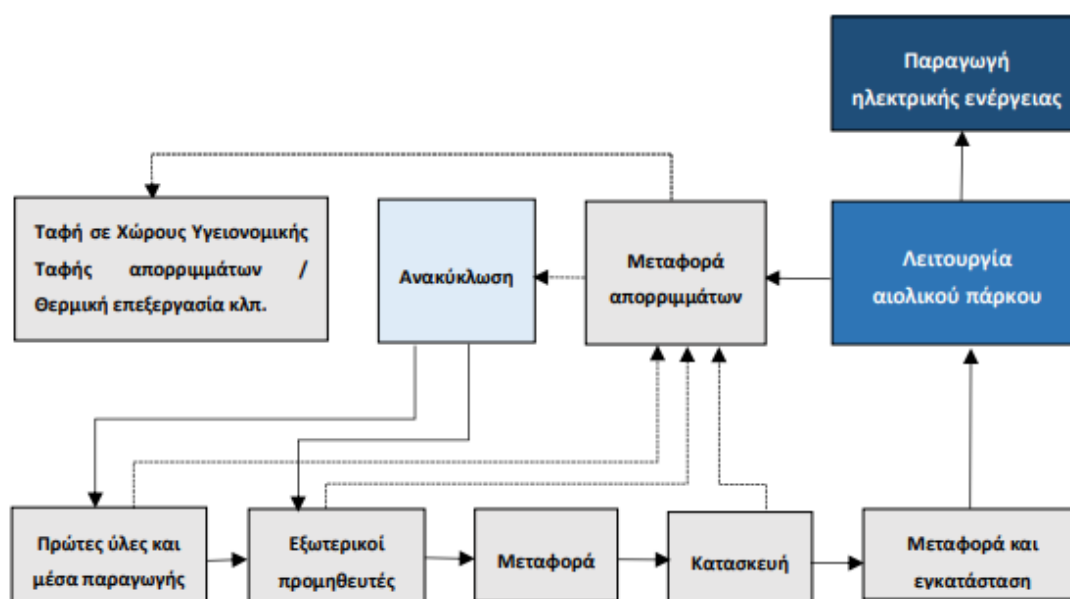
συστήματος. Η AKZ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ διαφορετικών τρόπων σχεδιασμού, προσφέροντας την δυνατότητα να εξεταστούν όλες οι πιθανές λύσεις με στόχο την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών συνεπειών. Συνήθως, μέσω της τροποποίησης του σχεδιασμού μιας παραγωγικής διαδικασίας επιτυγχάνονται μεγάλα περιβαλλοντικά οφέλη[39].

- **Marketing:** Στην εποχή μας, η συνεχής αύξηση της περιβαλλοντικής ευσυνειδησίας έχει σαν αποτέλεσμα να δίνεται όλο και μεγαλύτερη αξία στην περιβαλλοντικό αντίκτυπο των παραγωγικών διαδικασιών. Το περιβαλλοντικό marketing αποτελείται από τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη ονομάζεται περιβαλλοντική σήμανση, και χρησιμοποιείται από τις επιχειρήσεις και τους ιδιώτες που στοχεύουν στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων των προϊόντων. Είναι οι περιβαλλοντικές αξιώσεις που ορίζονται από το ISO, που απεικονίζει τις περιβαλλοντικά στοιχεία του εκάστοτε προϊόντος και αποτυπώνεται ως έκθεση, σύμβολα και γραφικά στο προϊόν. Επίσης, οι περιβαλλοντικές δηλώσεις χρησιμοποιούνται κυρίως ως μέσο του marketing και ενημερώνουν τον καταναλωτή για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος. Εν τέλει, το οργανωτικό marketing επικεντρώνεται σε ενέργειες που σχετίζονται με τις δυνατότητες βελτιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος [40].
- **Προσφορά περιβαλλοντικών πληροφοριών:** Μέσω της AKZ, η εκάστοτε επιχείρηση στοχεύει στην δημιουργία μιας πηγής δεδομένων όπου θα καταγράφονται όλες οι περιβαλλοντικές συνέπειες που προέρχονται από τις παραγωγικές της διαδικασίες, προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα ενημέρωσης όλων των ενδιαφερόμενων (π.χ. δημόσιοι φορείς και καταναλωτές προϊόντων που παράγει).

3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικών Πάρκων

Η ΑΚΖ για τα αιολικά πάρκα εφαρμόζεται με βάση τις γενικές αρχές των μελετών ΑΚΖ, εστιάζοντας στα περιβαλλοντικά ζητήματα και τις πιθανές περιβαλλοντικές συνέπειες που ενδέχεται να υπάρχουν στο σύνολο του κύκλου ζωής. Συγκεκριμένα, για το σύνολο των εξαρτημάτων και τμημάτων από τα οποία απαρτίζεται το αιολικό πάρκο, υπολογίζεται οι ενεργειακοί πόροι που καταναλώνονται και οι περιβαλλοντικοί εκπομπές ρύπων που συνεπάγονται, για ολόκληρο τον κύκλο ζωής. Κατά συνέπεια, το ενεργειακό περιεχόμενο των υπό μελέτη υλικών, ισοδυναμεί με το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για το σύνολο των σταδίων της ανάλυσης κύκλου ζωής τους. Ειδικότερα, σε ό,τι αφορά τα αιολικά πάρκα, τα στάδια αυτά σχετίζονται με την εξασφάλιση των απαιτούμενων υλικών, την παραγωγή των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών, την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρηση του αιολικού πάρκου, την αξιοποίηση των υλικών μετά το πέρας του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου και τέλος το σύνολο των απαιτούμενων μεταφορών[41].

Στην Εικόνα 10 απεικονίζεται ένας πλήρης κύκλος ζωής ενός αιολικού πάρκου.



Εικόνα 10: Αναπαράσταση του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου [41]

Τα πορίσματα της μελέτης ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου, μπορούν να βοηθήσουν στην υλοποίηση των στόχων της μελέτης που έχουν να κάνουν με:

- Τη σύγκριση διαφορετικών παραγωγικών διαδικασιών,
- Την εύρεση των εξαρτημάτων, που ευθύνονται για τις δυσμενέστερες περιβαλλοντικές συνέπειες,
- Την αποκόμιση πολύτιμων αποτελεσμάτων, σχετικά με την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών συνεπειών και τη βελτιστοποίηση του αιολικού πάρκου,
- Την αιτιολόγηση και την αξιολόγηση για τα οφέλη της παραγωγής ενέργειας μέσω των ΑΠΕ[41].

3.1. Στάδια εφαρμογής μελέτης AKZ

Η μελέτη των αιολικών πάρκων στα πλαίσια της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και με βάση τον διεθνή οργανισμό πιστοποίησης ISO, περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. Καθορισμός στόχου,
2. Απογραφή των δεδομένων,
3. Εκτίμηση των επιπτώσεων,
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων [42].

3.2. Καθορισμός στόχου

Ο καθορισμός του στόχου της μελέτης AKZ ενός αιολικού πάρκου αναλύει τη το λόγο ύπαρξης της μελέτης, περιγράφει αναλυτικά τα όσα αυτή περιλαμβάνει, τις απαιτήσεις του συστήματος σε εισροές και τις παραδοχές που έγιναν για το εκάστοτε έργο που μελετάται [43].

Ο καθορισμός του στόχου είναι να δώσει απαντήσεις σε πλήθος ερωτημάτων που προκύπτουν από τα εμπλεκόμενα μέρη, πάντα με βάση την ενδεχόμενη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τη μελέτη. Η αποσαφήνιση του θέματος της ανάλυσης καθορίζει τα όρια σε όλα τα επίπεδα που σχετίζονται με το εξεταζόμενο έργο [43].

Πιο συγκεκριμένα, στόχος της AKZ είναι ο ακριβής καθορισμός των περιβαλλοντικών συνεπειών του αιολικού πάρκου, σε ολόκληρο το εύρος του κύκλου ζωής. Κατά συνέπεια, μελετώνται εκτενώς η εξασφάλιση των απαιτούμενων υλικών, η παραγωγή των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών, η εγκατάσταση η λειτουργία και συντήρηση του αιολικού πάρκου, οι αναγκαίες επισκευές και αλλαγές εξαρτημάτων, οι απώλειες λόγω των καιρικών συνθηκών και του βαθμού απόδοσης των ανεμογεννητριών, η αξιοποίηση των υλικών και των αποβλήτων μετά την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου και το σύνολο των μεταφορών, για το σύνολο των σταδίων του κύκλου ζωής [43].

Γενικότερα, μια μελέτη AKZ είτε εφαρμόζεται στα πλαίσια ενός εγκατεστημένου αιολικού πάρκου, έτσι ώστε να είναι γνωστά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών και τα μετεωρολογικά δεδομένα της τοποθεσίας που εγκαταστάθηκε, είτε σε κάποιο υπό-σχεδίαση αιολικό πάρκο, με στόχο την εξασφάλιση όλων των απαραίτητων δεδομένων για την επίτευξη της βέλτιστης εφαρμογής και εγκατάστασης. Εδώ γίνεται αντιληπτό ότι είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ο τρόπος αξιοποίησης των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τη μελέτη [43].

Τα αποτελέσματα αυτά έχουν μεγάλη αξία για πολλούς λόγους όπως:

- η συμβολή τους στην λήψη των αποφάσεων,
- η βελτιστοποίηση και η περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας που μελετάται,
- η πραγματοποίηση περιβαλλοντικών μελετών,

- η τήρηση περιβαλλοντικών περιορισμών στο σχεδιασμό των προϊόντων,
- η δημιουργία και η προβολή διαφημίσεων, με στόχο την ενίσχυση της περιβαλλοντικής συνείδησης.

3.2.1. Λειτουργική μονάδα

Ένα αιολικό πάρκο λειτουργεί με τη βοήθεια την ενέργειας του ανέμου και παράγει ηλεκτρική ενέργεια με στόχο την διοχέτευση της σε κάποιο ηλεκτρικό δίκτυο. Είναι γνωστό ότι η μεθοδολογία της AKZ επικεντρώνεται στη μελέτη των περιβαλλοντικών συνεπειών του αιολικού πάρκου σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής, όπως και τον ακριβή υπολογισμό τους. Επομένως, η δημιουργία συσχέτισης μεταξύ των συνεπειών και της παραγόμενης ενέργειας είναι μείζονος σημασίας, προκειμένου να πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις για μια συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Ως λειτουργική μονάδα για την ανάλυση κύκλου ζωής, ορίζεται η 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας που διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο και προέρχεται από το υπό-μελέτη αιολικό πάρκο[43].

Κρίνοντας από ανάλογες μελέτες AKZ αιολικών πάρκων, στα πλαίσια της λειτουργικής μονάδας μελετώνται εκτενώς η διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου, που θεωρείται πως είναι τα 20 έτη και τα συνολικά ενεργειακά ποσά που εξασφαλίζονται στο συγκεκριμένο χρόνο από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου.

3.2.2. Ανάλυση του συστήματος

Εκτός όλων των υπολοίπων, ένα αιολικό πάρκο αποτελεί μια μονάδα παραγωγής ενέργειας, αποτελούμενη από πολλά και ξεχωριστά τμήματα, τα οποία είναι εκτός των ανεμογεννητριών δηλαδή των μηχανών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι θεμελιώσεις τους, τα συνωδά έργα διάνοιξης οδών και τα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης στο δίκτυο, όπως οι απαιτούμενες καλωδιώσεις κ.α.

Στην συνέχεια θα περιγραφεί ο κύκλος ζωής των τμημάτων αυτών σε σχέση με τα επιμέρους στάδια. Στα επιμέρους αυτά στάδια περιλαμβάνονται, η μελέτη του συστήματος για την ποσοτικοποίηση των πρώτων υλών, των διεργασιών και των συνεπειών που θα προκύψουν στα πλαίσια της μελέτης. Στην συνέχεια, αναλύονται διεξοδικά στα στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου[41]:

1. Εξόρυξη πρώτων υλών και κατασκευή εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών:

- Εξόρυξη πρώτων υλών και κατασκευή εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών
- Κατασκευή εξαρτημάτων που σχετίζονται με τη θεμελίωση των ανεμογεννητριών
- Παραγωγή πρώτων υλών και κατασκευή των εξαρτημάτων ηλεκτρικής διασύνδεσης
- Παραγωγή πρώτων υλών για την διάνοιξη νέων οδών που εξασφαλίζουν ευκολότερη πρόσβαση

Στα πλαίσια του σταδίου αυτού πραγματοποιείται η παραγωγή πρώτων υλών και η κατασκευή των διαφόρων εξαρτημάτων από τα οποία θα προκύψει η ανεμογεννήτρια, όπως είναι ο πυλώνας, το κέλυφος, τα πτερύγια, τα θεμέλια, οι καλωδιώσεις, η γεννήτρια κ.λπ.. Τα απαραίτητα υλικά και τα εξαρτήματα τοποθετούνται εκεί σε μέρος που θα οριστεί από τον κατασκευαστή, έτσι ώστε να υπάρξει δυνατότητα παραγωγής των τμημάτων και των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών και να μεταφερθούν στο χώρο της εγκατάστασης [41].

2. Εγκατάσταση αιολικού πάρκου

- Χάραξη δρόμων με στόχο την εύκολη πρόσβαση στο σημείο εγκατάστασης
- Δημιουργία υποδομών ηλεκτρικού δικτύου
- Πραγματοποίηση εργασιών θεμελίωσης των ανεμογεννητριών
- Μεταφορά των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών στο σημείο εγκατάστασης
- Συναρμολόγηση των ανεμογεννητριών και εγκατάσταση

Στο σημείο αυτό μελετάται η μεταφορά των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών, η συναρμολόγηση, η κατασκευή και η τελική εγκατάσταση τους στο χώρο του αιολικού πάρκου. Επιπλέον, το συγκεκριμένο στάδιο εμπεριέχει το σύνολο των εργασιών διαμόρφωσης των χώρων και θεμελίωσης των ανεμογεννητριών, σε συνδυασμό με τα έργα χάραξης δρόμων και δημιουργίας υποδομών ηλεκτρικού δικτύου. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται η τοποθέτηση των απαραίτητων καλωδίων με στόχο την ηλεκτρική σύνδεση του αιολικού πάρκου με το δίκτυο και την εγκατάσταση εξοπλισμού ανύψωσης τάσης [41].

3. Λειτουργία αιολικού πάρκου

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Συνεχής συντήρηση του αιολικού πάρκου
- Επισκευές και αντικαταστάσεις εξαρτημάτων και τμημάτων των ανεμογεννητριών σε περιπτώσεις βλαβών

Το συγκεκριμένο στάδιο της λειτουργίας του αιολικού πάρκου αποτελείται από τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και όλες τις απαιτούμενες διαδικασίες συντήρησης και επισκευής βλαβών των ανεμογεννητριών, όπως η επιδιόρθωση και η αντικατάσταση των φθαρμένων εξαρτημάτων [41].

4. Τέλος του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου

- Αποσυναρμολόγηση των ανεμογεννητριών
- Ανακύκλωση όλων των ανακυκλώσιμων εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών
- Αξιοποίηση των μη ανακυκλώσιμων υλικών
- Αποκατάσταση της περιοχής

Μετά το τέλος της διάρκειας ζωής του αιολικού πάρκου, οι ανεμογεννήτριες αποσυναρμολογούνται σε επιμέρους τμήματα και μεταφέρονται σε κάποια άλλη περιοχή με στόχο να επανέλθει στην κατάσταση που βρισκόταν πριν εγκατασταθεί εκεί το αιολικό πάρκο μέσω των απαραίτητων αποκαταστάσεων.

Η αξιοποίηση των περισσευόμενων υλικών μετά την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου και η απομάκρυνση των ανεμογεννητριών μελετάται στο συγκεκριμένο στάδιο και περιλαμβάνει:

- Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών
- Θερμική επεξεργασία των υλικών με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας
- Απόθεση των μη ανακυκλώσιμων υλικών σε χώρους υγειονομικής ταφής

Το ποσοστό των υλικών που αξιοποιούνται μετά το τέλος του κύκλου ζωής ενός αιολικού σε σχέση με το σύνολο αυτών, εξαρτάται από τα ίδια τα υλικά, την σύσταση, την καθαρότητά τους και κυρίως την ευκολία ή τη δυσκολία που συνεπάγεται η αποσυναρμολόγηση τους. Επομένως, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για κάθε διαφορετικό υλικό υπάρχει και διαφορετικός βαθμός ανακύκλωσης [40].

Γενικότερα, η αξιοποίηση των υλικών μετά το πέρας του κύκλου ζωής εμπεριέχει πολλές δυσκολίες, καθώς επηρεάζει σημαντικά το πόσο φιλικό προς το περιβάλλον είναι ή όχι το έργο, αφού μπορεί να παίξει θετικό ή αρνητικό ρόλο στο ενεργειακό αποτύπωμα του. Για παράδειγμα, η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για την απόθεση των μη ανακυκλώσιμων υλικών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργειακών αναγκών, με συνέπεια την γενικότερη αύξηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος. Αντιθέτως, μέσω της ανακύκλωσης, της επαναχρησιμοποίησης και της θερμικής επεξεργασίας μπορεί να προκύψουν ωφέλιμα αποτελέσματα για το σύστημα, μέσω της αξιοποίησης των επιμέρους εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών [40].

5. Μεταφορά ανεμογεννητριών

Είναι γνωστό ότι κάθε στάδιο της ανάλυσης κύκλου ζωής στα πλαίσια ενός αιολικού πάρκου εμπεριέχει εκτός των άλλων και τη διαδικασία της μεταφοράς, η συμβολή της οποίας είναι απαραίτητη για να φτάνουν τα εξαρτήματα και τα επιμέρους τμήματα του αιολικού πάρκου στις τοποθεσίες που πρέπει εγκαίρως.

Συγκεκριμένα, σε ό,τι αφορά το στάδιο της εξόρυξης πρώτων υλών και της κατασκευής των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών μεγάλη σημασία έχει η μεταφορά των πρώτων υλών στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου [41].

Έπειτα, τα επιμέρους τμήματα των ανεμογεννητριών θα πρέπει να μεταφερθούν από τις τοποθεσίες στις οποίες παράγονται στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο να διανυθούν μεγάλες αποστάσεις και να επιστρατευτούν ειδικά μέσα μεταφοράς, όπως είναι ειδικά φορτηγά οχήματα και πλοία, με στόχο να φτάσουν τα απαραίτητα στην θέση εγκατάστασης [41].

Επιπλέον, δεν θα πρέπει να αμεληθούν όλες οι μεταφορές που απαιτούνται για την επιθεώρηση, τον τεχνικό έλεγχο, τη συντήρηση και τις ενδεχόμενες επισκευές που θα πραγματοποιηθούν καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του αιολικού πάρκου. Σε τέτοιες περιπτώσεις δεν απαιτείται η χρήση μεγάλων και εξειδικευμένων οχημάτων όπως κατά τη μεταφορά, με εξαίρεση φορές που πρέπει να μεταφερθούν ογκώδη εξαρτήματα και ανταλλακτικά, για την αντιμετώπιση κάποιας εκτεταμένης βλάβης [41].

Εν τέλει, η απομάκρυνση των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών από την περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, συνεπάγεται την κάλυψη σημαντικών αποστάσεων μέχρι τις τοποθεσίες ανακύκλωσης ή απόθεσης αυτών [41].

3.2.3. Εύρεση δεδομένων

Για την ολοκλήρωση της μελέτη του κύκλου ζωής, η εξασφάλιση δεδομένων εξαιρετικής ακρίβειας αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας, διότι μόνο έτσι μπορούν να μειωθούν στο ελάχιστο οι αβεβαιότητες και να καταστεί η μελέτη ακριβής. Επομένως, είναι απαραίτητη η χρήση τόσο πρωτογενών όσο και δευτερογενών δεδομένων προερχόμενων από τους κατασκευαστές του αιολικού πάρκου και τους δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς που σχετίζονται με το έργο [42].

Τα πρωτογενή δεδομένα αποτελούνται από:

- Την εξασφάλιση των πρώτων υλών,
- Την παραγωγή των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών από τους κατασκευαστές,
- Τα ενεργειακά φορτία και τα απαραίτητα υλικά των κατασκευαστών,
- Τη μεταφορά των υλικών και εξαρτημάτων στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου,
- Την εξασφάλιση των διάφορων μηχανημάτων και υλικών για να διαμορφωθεί η τοποθεσία της εγκατάστασης,
- Τη λειτουργία και τη συντήρηση του αιολικού πάρκου,
- Τα παραγόμενα ενεργειακά ποσά που προέρχονται από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου,
- Τις ενεργειακές απώλειες λόγω του δικτύου και των ανεμογεννητριών,

- Τις τελικές ποσότητες των ανακυκλώσιμων υλικών, μετά την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου [42].

Σε περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτή η εύρεση πρωτογενών δεδομένων, αναζητούνται και χρησιμοποιούνται δευτερογενή δεδομένα, σε σχέση με:

- Την εξασφάλιση των απαιτούμενων υλικών,
- Τις απαιτούμενες μεταφορές αυτών στην τοποθεσία εγκατάστασης,
- Τις απαραίτητες εργασίες μετά την απεγκατάσταση του πάρκου σε σχέση με την αξιοποίηση των υλικών,
- Τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές πηγές [42].

3.2.4. Όρια και υποθέσεις εργασίας

Με βάση τα στάδια εκτέλεσης των μελετών ΑΚΖ, είναι απαραίτητος ο αναλυτικός ορισμός των περιορισμών και των υποθέσεων που θεωρούνται δεδομένες στα πλαίσια της μελέτης. Οι εν λόγω περιορισμοί συμβάλλουν σημαντικά να εξασφαλιστεί η σωστή αποτύπωση και σύγκριση των περιβαλλοντικών συνεπειών που θα επιφέρει η κατασκευή και η λειτουργία του έργου που μελετάται.

Επομένως, τα προαναφερθέντα όρια σχετίζονται με:

- **Μάζα:** σε περιπτώσεις όπου μια ενδεχόμενη ροή κάποιου υλικού είναι λιγότερη σε σχέση με ένα ορισμένο ποσοστό της συνολικής μάζας, στα πλαίσια του προϊόντος ή κάποιας συγκεκριμένης διεργασίας, τότε μπορεί να αγνοηθεί εξαιτίας του μικρού ποσοστού του, συνεπάγεται αμελητέες περιβαλλοντικές συνέπειες [43].
- **Ενέργεια:** όταν μια πιθανή ροή ενέργειας είναι μικρότερη σε σχέση με ένα ορισμένο ποσοστό του συνόλου της ενέργειας, στα πλαίσια του προϊόντος ή κάποιας συγκεκριμένης διεργασίας, τότε μπορεί να μην ληφθεί υπόψη, διότι λόγω του μικρού ποσοστού του, επιφέρει απειροελάχιστες περιβαλλοντικές συνέπειες [43].
- **Περιβαλλοντική σύγκριση:** όταν μια ροή θεωρείται αρκετά μικρή για να εντάσσεται σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες, ωστόσο ενδέχεται να επιφέρει κάποια σημαντική περιβαλλοντική συνέπεια, θα πρέπει να εξεταστεί εκτενώς στα πλαίσια της ΑΚΖ [43].
- **Η ποσότητα των υλικών** που δεν υπολογίζεται στην ανάλυση, δεν γίνεται να υπερβαίνει κάποιο ορισμένο ποσοστό του συνόλου της μάζας, της ενέργειας, ή περιβαλλοντικών συνεπειών είτε στα πλαίσια του προϊόντος είτε στα πλαίσια συγκεκριμένης διεργασίας [43].

Τα συνηθέστερα όρια και υποθέσεις σε μελέτες ΑΚΖ αιολικών πάρκων σχετίζονται με:

1. Τη διάρκεια ζωής

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες της περιβαλλοντικής αποτίμησης ενός αιολικού πάρκου, αποτελεί αυτός της διάρκειας ζωής του, αφού ο καθορισμός των περιβαλλοντικών συνεπειών υπολογίζεται σε kg ρύπου ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας, σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Η εν λόγω χρονική περίοδος με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ανέρχεται σε 20 έτη.

2. Την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η περιοχή που βρίσκεται το αιολικό πάρκο και οι άνεμοι που επικρατούν σε αυτή. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι εδώ αγνοούνται οι πάσης φύσεως ηλεκτρικές απώλειες εξαιτίας του ηλεκτρικού δικτύου, των καλωδίων και του βαθμού απόδοσης των συστημάτων των ανεμογεννητριών κ.α [45].

3. Την μελέτη των επιμέρους τμημάτων των αιολικού πάρκου

Όπως είναι γνωστό, τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από πλήθος διαφορετικών μερών και τμημάτων όπως είναι οι ανεμογεννήτριες, τα έργα διάνοιξης οδών για τη δημιουργία της ευκολότερης δυνατής πρόσβασης στη θέση εγκατάστασης και τα έργα που στοχεύουν στη διοχέτευση της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο [45].

4. Την περιβαλλοντική επιβάρυνση της παραγωγής των υλικών και της ανακύκλωσης τους

Η συντριπτική πλειοψηφία των τμημάτων των ανεμογεννητριών είναι κατασκευασμένα από βαρέα μέταλλα, τα οποία φέρουν και τη μεγαλύτερη ευθύνη σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνέπειες που συνεπάγεται η κατασκευή και η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Συγκεκριμένα, οι επιπτώσεις προκύπτουν από το πρώτο στάδιο παραγωγής των συγκεκριμένων μετάλλων σε συνδυασμό με το τελευταίο στάδιο που εμπεριέχει την αξιοποίηση και την απόθεση τους. Κατά συνέπεια, η χρήση των συγκεκριμένων πρώτων υλών που απαιτούνται για να παραχθούν οι ανεμογεννήτριες και τα τμήματά τους, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι απαιτείται η εξόρυξη των πρώτων υλών επιφέρει και τις κυριότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Επιπλέον, η τελική αξιοποίηση των υλικών αυτών μέσω της ανακύκλωσης μετά το πέρας του κύκλου του αιολικού πάρκου, έχει αναμφισβήτητα θετική επίδραση στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών συνεπειών [45].

5. Την αποτίμηση των περιβαλλοντικών συνεπειών

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται από πολλά και διαφορετικά τμήματα και εξαρτήματα, που διαφέρουν μεταξύ τους κατά βάρος και σύσταση. Κατά συνέπεια, στη συντριπτική πλειοψηφία των μελετών ΑΚΖ αγνοούνται τα

εξαρτήματα, το βάρος των οποίων δεν υπερβαίνει κάποιο καθορισμένο ποσοστό του συνολικού βάρους, συνήθως της τάξης (2-4)%, διότι είναι δεδομένο πως οι περιβαλλοντικές συνέπειες που επιφέρουν είναι μικρού βεληνεκούς και έτσι θεωρείται αμελητέα η συνεισφορά τους στα αποτελέσματα της μελέτης [45].

6. Τις απαιτούμενες μεταφορές

Οι εν λόγω μεταφορές διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μεταφορές των υλικών και των προκατασκευασμένων εξαρτημάτων στον τόπο παραγωγής και συναρμολόγησής τους,
- Μεταφορές που ως στόχο έχουν την παράδοση των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών στο σημείο εγκατάστασής τους,
- Μεταφορές των απαιτούμενων υλικών για την διεκπεραίωση των έργων θεμελίωσης των ανεμογεννητριών,
- Μεταφορές των απαιτούμενων υλικών για την διάνοιξη οδών και λοιπών έργων που εξασφαλίζουν την ευκολότερη πρόσβαση στο σημείο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου,
- Μεταφορές των απαιτούμενων υλικών για την διεκπεραίωση των έργων ηλεκτρικής διασύνδεσης,
- Μεταφορές των υλικών στους χώρους ανακύκλωσης και απόθεσης τους μετά το πέρας του κύκλου ζωής τους,
- Μεταφορές του ανθρώπινου δυναμικού στο σημείο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου για τακτικά έργα συντήρησης και τυχόν επισκευές βλαβών [46].

7. Τις λοιπές περιβαλλοντικές συνέπειες που επιφέρει η λειτουργία του αιολικού πάρκου

Στις περισσότερες περιπτώσεις εκπόνησης μελετών ΑΚΖ, οι περιβαλλοντικές συνέπειες σχετίζονται με το έδαφος, την αισθητική όχληση, την ηχορύπανση και τις συνέπειες που προκαλούνται στην πανίδα και τη χλωρίδα της περιοχής. Από την άλλη πλευρά, τα σοβαρά οφέλη που αποκομίζονται όπως είναι η ενίσχυση της τοπικής οικονομίας λόγω της δημιουργίας επιπλέον θέσεων εργασίας και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της χρήσης μιας ανανεώσιμης πηγής [46].

3.3. Απογραφή δεδομένων

Το συγκεκριμένο στάδιο της απογραφής δεδομένων περιλαμβάνει μια ποιοτική και ποσοτική ανάλυση όλων των τμημάτων του υπό εξέταση έργου και περιλαμβάνει:

- Τα απαιτούμενα υλικά και ενέργεια
- Τα παραγόμενα και επιμέρους προϊόντα
- Οι παραγόμενοι περιβαλλοντικοί ρύποι και τα εναπομείναντα υλικά προς απόθεση

Η απογραφή δεδομένων δεν είναι τίποτα περισσότερο από μια λεπτομερή παράθεση του συνόλου των περιβαλλοντικών εισροών (υλικά και ενέργεια) και των εκροών (παραγόμενοι ρύποι, υλικά προς απόθεση). Επιπλέον, σημαντικό τμήμα της απογραφής δεδομένων αποτελεί η εκτίμηση των επιπτώσεων της ΑΚΖ που έχει ως στόχο την μελέτη και ποσοτικοποίηση του αποτυπώματος των περιβαλλοντικών συνεπειών, με τη βοήθεια χρήσιμων δεικτών. Η απογραφή των δεδομένων και η εκτίμηση των περιβαλλοντικών συνεπειών έχουν ως αντικειμενικό σκοπό την ορθή ερμηνεία των κυριότερων χαρακτηριστικών του υπό μελέτη συστήματος, τον καθορισμό των εναλλακτικών προσεγγίσεων με στόχο την κατά το δυνατόν βελτιστοποίηση τους [46].

3.4. Κατηγορίες επιπτώσεων και ανάλυση δεικτών

Ο καθορισμός των κατηγοριών επιπτώσεων που πρέπει να μελετηθούν στα πλαίσια μιας μελέτης ΑΚΖ, πραγματοποιείται με βάση τις επιπτώσεις που προέρχονται από την εγκατάσταση και τη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι, γίνεται μια εκτενής μελέτη των κατηγοριών επιπτώσεων με γνώμονα την εξόρυξη υλικών, την παραγωγή, την εγκατάσταση και τέλος την ανακύκλωση και αξιοποίηση των υλικών.

Για την εκπόνηση μιας εκτενούς μελέτης ΑΚΖ για ένα αιολικό πάρκο γίνεται επιτακτικός ο υπολογισμός των ακόλουθων περιβαλλοντικών δεικτών:

Κατηγορίες επιπτώσεων:

- Ανθρώπινη τοξικότητα
- Οξίνιση
- Ευτροφισμός
- Ιονίζουσα ακτινοβολία
- Υπερθέρμανση του πλανήτη
- Εξάντληση ορυκτών πόρων
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα
- Αραιώση στοιβάδας όζοντος
- Οικοτοξικότητα εδάφους

Συγκεκριμένα ο κάθε δείκτης από τους παραπάνω σχετίζεται με:

Ανθρώπινη τοξικότητα: Περιλαμβάνει το σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προέρχονται από τις εκπομπές χημικών ουσιών και εξαρτώνται από την τοξικότητα της συγκεκριμένης χημικής ένωσης και την ποσότητα που ενδέχεται να εισέλθει στον ανθρώπινο οργανισμό. Η απορρόφηση της συγκεκριμένης χημικής ουσίας δημιουργεί σημαντικά αναπνευστικά προβλήματα στον ανθρώπινο οργανισμό. Η ισοδύναμη μονάδα μέτρησης είναι $\text{kg C}_2\text{H}_3\text{CL}$ [47].

Οξίνιση: Αποτελεί μια σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση που επηρεάζει το έδαφος, τα ύδατα, το οικοσύστημα και τους οργανισμούς. Η οξίνιση προκαλείται από τις εκπομπές διοξειδίου του θείου, αμμωνίας, υδροχλωρικού οξέως και γενικότερα

από οξείδια του αζώτου και του θείου. Η ισοδύναμη μονάδα μέτρησης είναι kg SO₂ [47].

Ευτροφισμός: Η συγκεκριμένη περιβαλλοντική επίπτωση προκύπτει από τις αυξημένες εκπομπές θρεπτικών ουσιών στο περιβάλλον και έχει ως συνέπεια την υπέρμετρη ανάπτυξη της άλγης σε λίμνες και άλλα οικοσυστήματα, την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και της ζωής των οργανισμών. Η όξυνση του προβλήματος αυτού οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αύξηση των εκπομπών του αζώτου και του φωσφόρου και η μονάδα αναφοράς ισοδυναμεί με παραγόμενα kg PO₄³⁻ [47].

Ιονίζουσα ακτινοβολία: Η συγκεκριμένη περιβαλλοντική επίπτωση σχετίζεται με την ακτινοβολία που απελευθερώνεται από τα ηλεκτρόνια που ιονίζονται, αποτελείται από υποατομικά σωματίδια, ηλεκτρομαγνητικά μικροκύματα και ραδιοκύματα. Η εν λόγω ακτινοβολία είναι κατά κανόνα εξαιρετικά επικίνδυνη για τον άνθρωπο και τους ζώντες οργανισμούς. Η μονάδα αναφοράς της ισοδυναμεί με Bq C-14 [47].

Υπερθέρμανση του πλανήτη: Ονομάζεται το φαινόμενο της παγκόσμιας ανόδου της θερμοκρασίας, που οφείλεται κυρίως στις εκπομπές των αερίων των θερμοκηπίου. Οι συνεχείς και αυξανόμενες εκπομπές των αερίων αυτών επηρεάζουν δραματικά το κλίμα και βλάπτουν την ανθρώπινη υγεία. Η ισοδύναμη μονάδα αναφοράς της παγκόσμιας υπερθέρμανσης είναι τα παραγόμενα kg CO₂ σε χρονικό διάστημα μιας εκατονταετίας [47].

Εξάντληση των ορυκτών πόρων: Είναι το φαινόμενο που επέρχεται από τη συνεχή εξόρυξη ορυκτών πόρων μέσω εκσκαφών και εξόρυξης πόρων. Σε τέτοιες διαδικασίες, η μεταλλοποίηση λαμβάνεται από το έδαφος μέσω της χρήσης επιφανειακών και υπόγειων μεθόδων. Η ισοδύναμη μονάδα μέτρησης της συγκεκριμένης περιβαλλοντικής επίπτωσης είναι MJ [47].

Θαλάσσια οικοτοξικότητα: Η συγκεκριμένη επίπτωση επιβαρύνει τα θαλάσσια οικοσυστήματα και έχει ως ισοδύναμη μονάδα αναφοράς τα kg C₂H₃CL [47].

Αραίωση της στριβάδας του όζοντος: Το όζον αποτελεί την αλλοτροπική μορφή του οξυγόνου και δημιουργείται από την επίδραση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο της αραίωσης του δημιουργείται από την υπερβολική χλωροφθορανθράκων, τα καυσαέρια και τα αέρια απόβλητα των εργοστασίων. Η ισοδύναμη μονάδα μέτρησης του είναι kg CFC-11 [47].

Οικοτοξικότητα του εδάφους: Αποτελεί μια περιβαλλοντική επίπτωση που εμφανίζεται στα χερσαία οικοσυστήματα. Η ισοδύναμη μονάδα μέτρησης είναι kg C₂H₃CL [47].

Επιπλέον, ορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρει η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου αμελούνται στα πλαίσια των μελετών ΑΚΖ, όπως είναι η ηχορύπανση, η αισθητική όχληση και οι επιπτώσεις στο έδαφος και το υπέδαφος. Το σύνολο των εν λόγω επιπτώσεων εξετάζονται μέσω άλλων μεθοδολογιών όπως είναι

αυτή της περιβαλλοντικής αδειοδότησης λειτουργώντας συνεργατικά με την μελέτη AKZ [47].

3.5. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Αποτελεί το τελευταίο στάδιο της κάθε μελέτης AKZ, κατά το οποίο μελετώνται εκτενώς τα αποτελέσματα και διακρίνονται οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μέσω της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των διεργασιών, των ροών που απαιτούν την πλειοψηφία των υλικών και συνδέονται άμεσα με την παραγωγή των περισσότερων εκπομπών περιβαλλοντικών ρύπων.

Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις στα πλαίσια του εν λόγω σταδίου είθισται να εκπονείται και κάποιας ανάλυσης ευαισθησίας, με στόχο την πληρέστερη κατανόηση των αποτελεσμάτων σε συνθήκες μεταβολής των εισροών. Έτσι επιτυγχάνεται η μελέτη της κλίμακας και της ακρίβειας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μοντελοποίησης του συστήματος.

Εν τέλει, από το συγκεκριμένο στάδιο της ανάλυσης προκύπτουν τα συμπεράσματα και οι τρόποι βελτίωσης των διαδικασιών από τις οποίες πηγάζουν οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές συνέπειες.

3.6. Παράδειγμα μελέτης AKZ σε αιολικό πάρκο της Κίνας

Στα πλαίσια του συγκεκριμένου παραδείγματος, θα παρουσιαστεί η μελέτη AKZ ενός νεόκτιστου onshore αιολικού πάρκου ισχύος 40 MW που εγκαταστάθηκε στην Κίνα. Τα στάδια της μεθοδολογίας AKZ που υιοθετήθηκαν για την μελέτη του αιολικού πάρκου ταυτίζονται με αυτά που προηγήθηκαν.

Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι να αξιολογήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα οικονομικά οφέλη της αιολικής ενέργειας. Το πεδίο της μελέτης εμπεριέχει όχι μόνο τις ανεμογεννήτριες, αλλά και την παροχή και κατανάλωση υλικών και ενέργειας που απαιτούνται για την παραγωγή και την κατασκευή των υπόλοιπων εγκαταστάσεων όπως είναι οι ενισχυτικοί σταθμοί, τα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης και τα έργα οδοποιίας.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης, αναλύεται ένα αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος 40 MW που αποτελείται από 20 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2 MW έκαστη. Με βάση τους υπάρχοντες κανόνες σχετικά με τη σχεδίαση των αιολικών πάρκων στην Κίνα, τα απαιτούμενα υλικά για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου είναι οι ανεμογεννήτριες και οι κύριες μηχανολογικές και βοηθητικές εγκαταστάσεις. Επειδή οι ανεμογεννήτριες είναι εγκατεστημένες σε αιολικό πάρκο ισχύος 40 MW διαφέρουν ως προς τον αριθμό, την ισχύ και τις απαιτούμενες εισροές σε υλικά. Ωστόσο, τα είδη των χρησιμοποιούμενων υλικών για τις μηχανολογικές και βοηθητικές εγκαταστάσεις παραμένουν ίδια. Τα είδη και οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του συγκεκριμένου αιολικού πάρκου αντιπροσωπεύουν το μέσο επίπεδο ποσοτήτων που

απαιτούνται για την κατασκευή των αιολικών πάρκων σε παγκόσμιο επίπεδο και παραθέτονται στον Πίνακα 1 [44].

Πίνακας 1: Απογραφή υλικών αιολικού πάρκου 40 MW [44]

Τμήμα αιολικού πάρκου	Κατηγορίες υλικών	Βάρος [tn]
Υλικά ανεμογεννητριών		
	Ανοξειδωτο ατσάλι	5928
	Χυτοσίδηρος	787
	Χαλκός	48
	Εποξικές ρητίνες	200
	Οπτικές ίνες	486
	Σκυρόδεμα	23280
Υλικά μηχανολογικών εγκαταστάσεων		
	Χάλυβας	988,2
	Αλουμίνιο	145,9
	Ρητίνες σιλικόνης	6,2
	Χαλκός	15
	Ψευδάργυρος	0,1
Υλικά βοηθητικών εγκαταστάσεων		
	Ατσάλι	2085,2
	Σκυρόδεμα	66292

Η μεθοδολογία της AKZ ακολουθεί τα στάδια που προβλέπονται από το διεθνή οργανισμό πιστοποίησης ISO 14040 και 14044, για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για ολόκληρο τον κύκλο ζωής. Συνεπώς, το σύνολο του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου αποτελείται από τα παρακάτω στάδια [44]:

1. Υλικά και κατασκευή (περιλαμβάνει την κατασκευή ανεμογεννητριών),
2. Μεταφορές (περιλαμβάνει την μεταφορά των ανεμογεννητριών και όλων των απαιτούμενων υλικών)
3. Συναρμολόγηση ανεμογεννητριών και εγκατάσταση αιολικού πάρκου
4. Λειτουργία και συντήρηση του αιολικού πάρκου
5. Αποσυναρμολόγηση του αιολικού πάρκου, ανακύκλωση των υλικών και τελική διάθεση του εξοπλισμού

Για το σύνολο των 5 προαναφερθέντων σταδίων, απαιτείται η κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων σε ενέργεια και πρώτες ύλες.

Στην συνέχεια ακολουθεί η μέθοδος υπολογισμού ρύπων με βάση τις υπάρχουσες πηγές δεδομένων. Οι συνολικές εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι το άθροισμα των πέντε σταδίων που αναφέρθηκαν παραπάνω και υπολογίζονται ως εξής [44]:

$$GHG_{total} = GHG_1 + GHG_2 + GHG_3 + GHG_4 + GHG_5$$

Στην συνέχεια, προκύπτουν τα αποτελέσματα της μελέτης από πλευράς ρύπων δεδομένης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, για το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο ισχύος 40 MW υπολογίζεται ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανέρχεται σε $92,72 \cdot 10^6$ kWh ετησίως. Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου συγκεντρώθηκαν κυρίως κατά τη φάση κατασκευής. Οι ισοδύναμη εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου για συγκεκριμένο αιολικό πάρκο είναι 16,4-28,2 gr CO₂eq/ kWh, που είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της πυρηνικής ενέργειας. Τέλος, η μείωση των εκπομπών ρύπων μπορεί να επιτευχθεί όχι μόνο με τη βελτίωση της παραγωγής του σκυροδέματος και της εποξικής ρητίνης αλλά και με την αύξηση των ανακυκλούμενων τύπων μετάλλων [44].

4. Αιολικό πάρκο στην τοποθεσία “ Δίρφυς-Ξεροβούνι”

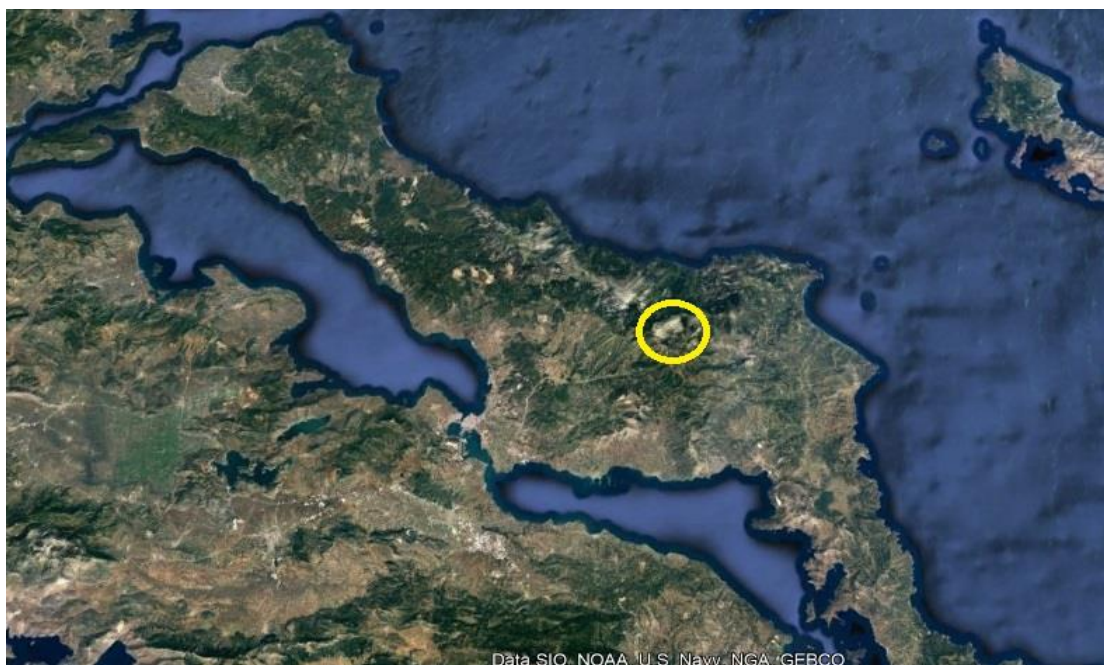
Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου στην τοποθεσία “Δίρφυς-Ξεροβούνι”, συνολικής ισχύος 6 MW. Η τοποθεσία βρίσκεται στο νομό Εύβοιας, και συγκεκριμένα στην περιοχή της Στενής, του Δήμου Μεσσαπίων-Διρφύων, ανάμεσα στους οικισμούς Στενή και Στρόπωνες, σε απόσταση 15 km από τον οικισμό Στενή, και σε μέσο υψόμετρο 800m. Η εγκατάσταση του αιολικού πάρκου θα πραγματοποιηθεί σε ένα οροπέδιο δίπλα στον ορεινό όγκο του Ξεροβουνίου.

Η θέση επιλέχθηκε έπειτα από λεπτομερή εξέταση της περιοχής, έτσι ώστε να μην παραβιάζεται η υπάρχουσα νομοθεσία περί αιολικών πάρκων, να μην επιβαρύνεται το περιβάλλον, οι παραπλήσιοι οικισμοί και γενικότερα οι δραστηριότητες της περιοχής.

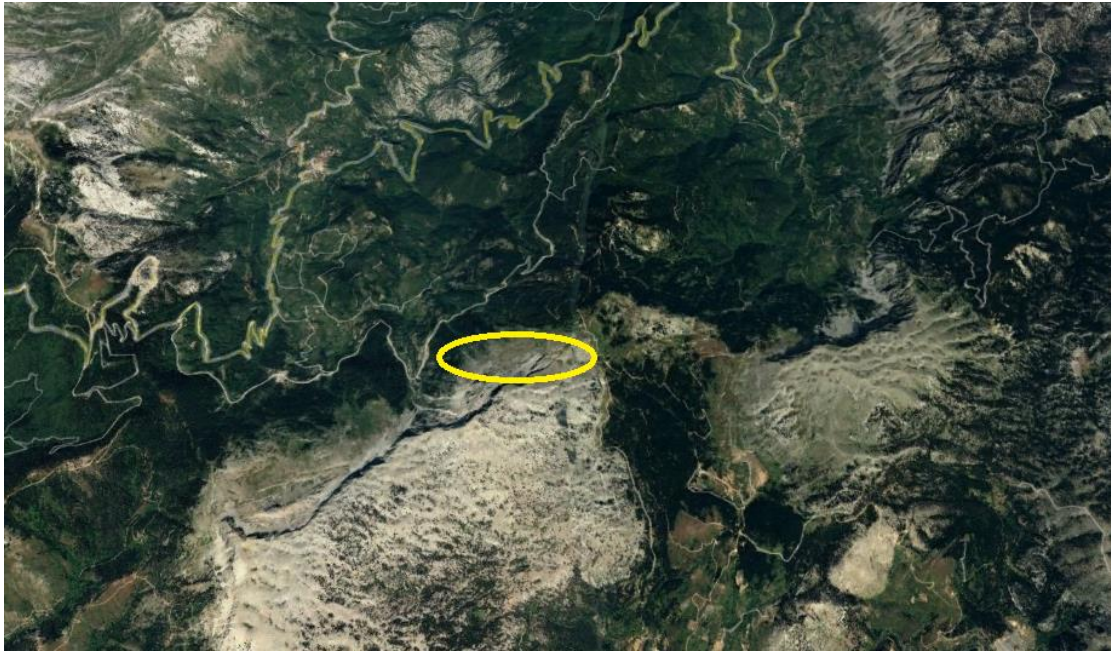
Το αιολικό πάρκο πρόκειται να περιλαμβάνει 4 ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 1,5 MW η καθεμία. Το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο θα αποτελέσει μια ανεξάρτητη μονάδα παραγωγής ενέργειας και θα συνδεθεί με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής.

4.1. Τοποθεσία αιολικού πάρκου

Η περιοχή στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο είναι ορεινή με πολύ έντονο ανάγλυφο με ελάχιστες ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η περιοχή αποτελείται από ψηλές και χωρίς βλάστηση κορυφές, στη θέση “Δίρφυς-Ξεροβούνι”, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 11 και 12.



Εικόνα 11: Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι”, του νομού Εύβοιας [48]



Εικόνα 12: Ακριβής τοποθεσία εγκατάστασης των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου “Δίρφους-Ξεροβούνι”, του νομού Εύβοιας [48]

Η τοποθεσία εγκατάστασης βρίσκεται στην περιφέρεια της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και Εύβοιας. Η τοποθεσία “Δίρφους-Ξεροβούνι” βρίσκεται κοντά στο υψηλότερο βουνό του νομού Εύβοιας, στις πρόποδες του όρους Ξεροβούνι. Η εν λόγω τοποθεσία παρουσιάζει ελάχιστη βλάστηση καθώς αποτελείται περισσότερο από γεωλογικούς σχηματισμούς και διάφορα είδη λίθων και είναι εκτεθειμένη σε έντονους βορειοανατολικούς ανέμους καθ’ όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Η συγκεκριμένη γεωγραφική θέση και το έντονο ανάγλυφο της περιοχής έχουν σαν αποτέλεσμα τις σχετικά έντονες κλιματολογικές διακυμάνσεις καθ’ όλη τη διάρκεια του χρόνου, εξαιτίας της συνύπαρξης του μεσογειακού και του ορεινού κλίματος. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης για την τοποθεσία κυμαίνεται από 900-1000 mm και η μέση ετήσια θερμοκρασία από 17-19 °C. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης για την περιοχή ανέρχεται σε 1000 mm.

4.2. Αναγκαιότητα του έργου

Όπως έχει ήδη αποτυπωθεί, η περιοχή στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο θεωρείται με βάση τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί ιδανική για τη συγκεκριμένη χρήση.

Αρχικά, θα πρέπει να τονισθεί το πλεονέκτημα του αιολικού της δυναμικού το οποίο κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Η συγκεκριμένη τοποθεσία βρίσκεται στο υψηλότερο βουνό του νομού Εύβοιας, το οποίο βρίσκεται στην ανατολική πλευρά με αποτέλεσμα να επικρατούν ικανοποιητικής έντασης βορειοανατολικοί άνεμοι από την πλευρά του Αιγαίου πελάγους. Κατά συνέπεια, η μέση ταχύτητα ανέμου που επικρατεί στην περιοχή υπολογίζεται σε 8,5 m/s.

Η συγκεκριμένη τοποθεσία είναι ιδανική για την εγκατάσταση αιολικού πάρκου διότι λόγω του βραχέως εδάφους και του μεγάλου υψομέτρου δεν ευδοκιμεί ιδιαίτερη βλάστηση. Το μοναδικό δείγμα χλωρίδας είναι κάποιοι θάμνοι και κάποια ποώδη φυτά. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί η σημαντική απόσταση της θέσης εγκατάστασης του αιολικού πάρκου από τους παρακείμενους οικισμούς, γεγονός το οποίο περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τις επιπτώσεις που σχετίζονται με την οπτική όχληση και τον θόρυβο που παράγεται από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών.

Σε ό,τι αφορά την πανίδα, είναι και αυτή περιορισμένη εξαιτίας της απουσίας δάσους και περιορίζεται αποκλειστικά σε κάποια είδη αιγοπροβάτων. Η μοναδική αξιοποίηση της ευρύτερης περιοχής είναι μέσω της κτηνοτροφίας χρησιμοποιούμενη δηλαδή ως βοσκότοπος. Γενικότερα, η κτηνοτροφία αποτελεί την κυριότερη μορφή παραγωγής φορτίων ρύπανσης για την συγκεκριμένη περιοχή της Εύβοιας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η απουσία βιομηχανικών μονάδων και άλλων μεγάλων έργων και εγκαταστάσεων από την περιοχή.

4.3. Ανάλυση του αιολικού πάρκου

4.3.1. Τεχνικές προδιαγραφές αιολικού πάρκου

Όλα τα αιολικά πάρκα περιλαμβάνουν έναν ορισμένο αριθμό μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννητριών), μέσω των οποίων μετατρέπεται η αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα, το αιολικό πάρκο “Δίρφος-Ξεροβούνι”, θα περιέχει 4 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 1,5 MW έκαστη.

Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται εν σειρά σε ολόκληρο το μήκος του οικοπέδου και είναι προσβάσιμες με τη βοήθεια εσωτερικού δρόμου διασύνδεσης, ενώ η ηλεκτρική τους διασύνδεση επιτυγχάνεται μέσω υπόγειας γραμμής μέσης τάσης 20 kV, κατασκευασμένης εντός του αιολικού πάρκου με στόχο την μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας στο υπάρχον δίκτυο.

Για την σύνδεση των ανεμογεννητριών στο δίκτυο της περιοχής απαιτείται ένας μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης. Η ισχύς του κάθε μετασχηματιστή ανέρχεται σε 900 kVA. Οι μετασχηματιστές θα τοποθετηθούν μέσα σε ένα μεταλλικό οικίσκο, έτσι ώστε να είναι προστατευμένοι όπως ορίζουν οι προδιαγραφές.

Η σύνδεση των ανεμογεννητριών με το παρακείμενο ηλεκτρικό δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω της πλησιέστερης γραμμής μέσης τάσης. Το δίκτυο διασύνδεσης, εμπεριέχει το σύνολο των απαιτούμενων μέσων ζεύξεως της ΔΕΗ.

Κάθε ανεμογεννήτρια που θα εγκατασταθεί έχει ονομαστική ισχύ 1500 kW, διαθέτει 3 πτερύγια σταθερού βήματος και διαμέτρου 77 m. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας διαθέτει πολλαπλασιαστή στροφών και σύγχρονη γεννήτρια με στόχο την μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου. Τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2 [49].

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου “Δίρφους-Ξεροβούνι” [49]

Μοντέλο	AAER A1500-70
Ονομαστική Ισχύς	1500 kW
Διάμετρος	77 m
Ταχύτητα εκκίνησης	3 m/s
Ταχύτητα διακοπής κύλισης	20 m/s
Διάρκεια ζωής	20 έτη

Ο πυλώνας στον οποίο εδράζεται το μεταλλικό κέλυφος της ανεμογεννήτριας έχει ύψος 70 m. Ο κύριος μηχανισμός βρίσκεται στο κέλυφος και περιλαμβάνει την πτερωτή. Ο πρωτεύων άξονας περιστροφής, το κιβώτιο μετάδοσης και η ηλεκτρική γεννήτρια τοποθετούνται μέσα στο κέλυφος [49].

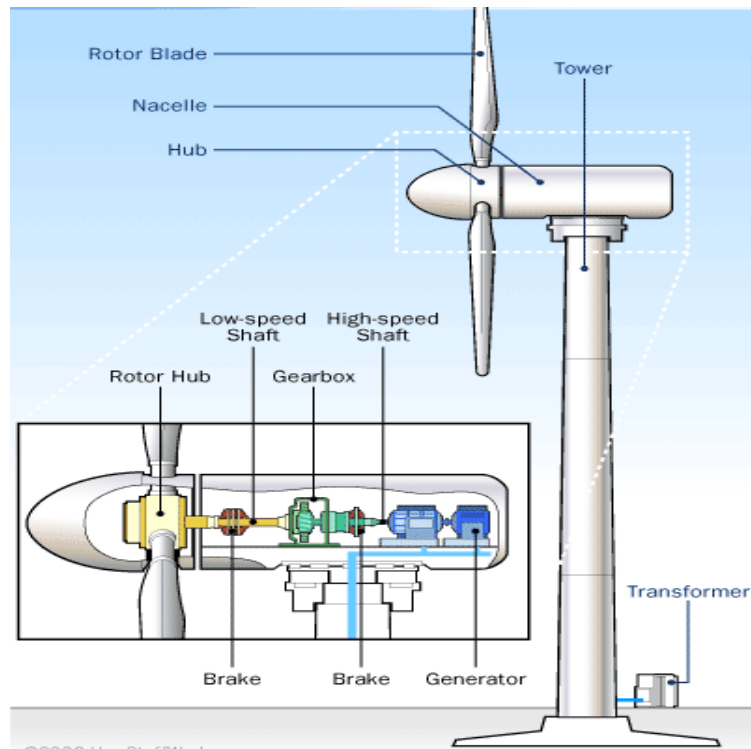
Ο πυλώνας των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν είναι κατασκευασμένος από χάλυβα, έχει κωνικό σχήμα και φέρει βαφή για να είναι ανθεκτικός στην διάβρωση. Το κέλυφος είναι κατασκευασμένο από χάλυβα και το περίβλημα από γαλβανισμένα ελάσματα. Επιπλέον, το κέλυφος είναι κλειστό και έχει στεγανοποιηθεί για να αποτρέπεται η εισχώρηση της υγρασίας και οι φθορές που αυτή προκαλεί. Η ψύξη της ανεμογεννήτριας πραγματοποιείται με την βοήθεια εναλλακτών ψύξεως νερού [49].

Ο ηλεκτρονικός πίνακας είναι τοποθετημένος στο κάτω μέρος της ανεμογεννήτριας και εξασφαλίζει την ηλεκτρική διασύνδεση της με το δίκτυο της περιοχής, με στόχο την μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας σε αυτό [49].

Το σύνολο των καλωδίων της γεννήτριας συνδέουν το κέλυφος με τη βάση του πύργου φτάνοντας μέχρι και τον κεντρικό ηλεκτρονικό πίνακα. Επιπλέον, η σύνδεση της κάθε ανεμογεννήτριας με τον υπάρχοντα υποσταθμό πραγματοποιείται με τη βοήθεια των καλωδιώσεων χαμηλής τάσης [49].

Σε ό,τι αφορά το σύνολο των ηλεκτρικών διασυνδέσεων της ανεμογεννήτριας αξίζει να αναφερθεί πως προστατεύονται με βάση την ισχύουσα νομοθεσία, μέσω της χρήσης ασφαλειών και αυτοματοποιημένων διακοπών, που προστατεύουν τον ηλεκτρονικό πίνακα σε περιπτώσεις βραχυκυκλώματος και λοιπών δυσλειτουργιών [49].

Τέλος, στο εν λόγω αιολικό πάρκο πρόκειται να εγκατασταθεί ένα σύγχρονο σύστημα ελέγχου και επίβλεψης, που θα ελέγχεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, θα αποθηκεύει όλα τα απαραίτητα στοιχεία της λειτουργίας του αιολικού πάρκου και θα επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση του αιολικού πάρκου και την εξ' αποστάσεως αλλαγή των ρυθμίσεων του [49]. Τα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας απεικονίζονται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Πλάγια όψη ανεμογεννήτριας με τομή για την απεικόνιση των εξαρτημάτων της [55]

Η μελέτη εγκατάστασης του αιολικού πάρκου πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων δασικών και άλλων δρόμων που υπάρχουν στην περιοχή, έτσι ώστε να υπάρξει η μικρότερη δυνατή αλλοίωση του χαρακτήρα του εδάφους. Ένας ακόμη βασικός άξονας της μελέτης είναι η διάνοιξη δρόμων με την πραγματοποίηση όσο το δυνατό λιγότερων εκσκαφών εξασφαλίζοντας τη μικρότερη δυνατή περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Για να εξασφαλιστεί η πρόσβαση στην περιοχή των ανεμογεννητριών με στόχο την διάνοιξη πλατωμάτων, την κατασκευή θεμελιώσεων, την ανέγερση των ανεμογεννητριών και την πραγματοποίηση τακτικών συντηρήσεων και τυχόν επισκευών απαιτείται η κατασκευή του κατάλληλου οδικού δικτύου.

Ο δρόμος που πρόκειται να κατασκευαστεί θα έχει μήκος 400 m, πλάτος 6 m και κλίση μικρότερη του 15%, έτσι ώστε να είναι σχετικά εύκολα προσβάσιμος από τα βαρέα οχήματα που πρόκειται να μεταφέρουν και να εγκαθιστούν τα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών.

Δίπλα στην τοποθεσία του αιολικού πάρκου υπάρχει παρακείμενη δασική οδός που επικοινωνεί με το υφιστάμενο επαρχιακό δίκτυο της περιοχής. Η μετάβαση στην περιοχή πραγματοποιείται μέσω της επαρχιακής οδού Αρτάκης-Κύμης και στην συνέχεια μέσω των δασικής οδού και του αυτής που θα κατασκευαστεί, παρέχεται πρόσβαση στο αιολικό πάρκο.

4.3.2. Έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης αιολικού πάρκου

Σε ό,τι αφορά τα απαραίτητα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης του αιολικού πάρκου, τα καλώδια μέσης και χαμηλής τάσης ακολουθεί τη διαδρομή των έργων του οδικού δικτύου. Επιπλέον, στα έργα διασύνδεσης συμπεριλαμβάνονται εκτός της γραμμής μέσης τάσης και τα απαιτούμενα έργα ασφαλείας και μέσα ζεύξεως του αιολικού πάρκου.

4.4. Διάρκεια ζωής και λειτουργία αιολικού πάρκου

Ο κυριότερος παράγοντας που καθορίζει την διάρκεια ζωής του υπό μελέτη αιολικού πάρκου ταυτίζεται με τη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών και των υποσταθμών ανύψωσης τάσης. Με βάση τα ειδικά εγχειρίδια λειτουργίας των υποσταθμών μέσης τάσης και την υπάρχουσα τεχνογνωσία σχετικά με τη λειτουργία τους, η διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών και γενικότερα του εξοπλισμού υπερβαίνει τα 35 έτη.

Σε ό,τι αφορά τις ανεμογεννήτριες, σχεδιάζονται με προοπτική να έχουν διάρκεια ζωής της τάξης των 20 ετών. Ο σχεδιασμός και η μελέτη όλων των εξαρτημάτων τους πραγματοποιείται με βάση την συγκεκριμένη διάρκεια ζωής σε συνδυασμό με τις καταπονήσεις που δέχεται το καθένα από αυτά. Αναλυτικότερα, με βάση την κατασκευάστρια εταιρεία AAER των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν η διάρκεια ζωής τους ανέρχεται κατ' ελάχιστο σε 20 έτη. Η παραγωγική διαδικασία και ο έλεγχος των συγκεκριμένων ανεμογεννητριών πιστοποιείται με βάση τα διεθνή πρότυπα ISO 9000. Η ελάχιστη διάρκεια ζωής των 20 ετών διασφαλίζεται από την παραπάνω πιστοποίηση τόσο για τα επιμέρους εξαρτήματα όσο και για ολόκληρη την ανεμογεννήτρια. Κατά συνέπεια, μπορεί να θεωρείται δεδομένη η διάρκεια ζωής της τάξης των 20 ετών για το αιολικό πάρκο.

Το αιολικό πάρκο πρόκειται να λειτουργεί συνεχώς με μοναδικές διακοπές σε μέρες άπνοιας ή επικράτησης πολύ ισχυρών ανέμων. Η ανεμογεννήτρια εκκινεί όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί τα 3m/s. Ωστόσο, για να προβλεφθούν τυχόν βλάβες σε περιπτώσεις μεγάλων εντάσεων ανέμων, η ανεμογεννήτριες βγαίνουν εκτός λειτουργίας για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 25 m/s. Κατά συνέπεια, το αιολικό πάρκο λειτουργεί για το εύρος ταχυτήτων ανέμου 3-25 m/s και αν ληφθούν υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα το 90% του έτους οι ταχύτητες ανέμου της περιοχής ανήκουν στο συγκεκριμένο εύρος τιμών [49].

4.5. Υπολογισμός των παραγόμενων ρύπων

Ο υπολογισμός και η ανάλυση των ρύπων που παράγονται από την κατασκευή και τη λειτουργία του αιολικού πάρκου πραγματοποιείται με τη βοήθεια του λογισμικού RET Screen. Το συγκεκριμένο λογισμικό υπολογίζει τις παραγόμενες εκπομπές ρύπων του αιολικού πάρκου ετησίως με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα για μια ασφαλή αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Συγκεκριμένα, το αιολικό πάρκο “Δίρφυς-Ξεροβούνι” ονομαστικής ισχύος 6 MW, τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο με ηλεκτρική ενέργεια 17.870 MWh ετησίως και επιβαρύνει το περιβάλλον με 478,9 τόνους ισοδύναμου CO₂. Κατά συνέπεια, η εκπομπές ρύπων του αιολικού

πάρκου ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχονται σε 26,8gr CO₂/kWh. Η συγκεκριμένη ποσότητα εκπομπής ρύπων ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται ως αποδεκτή αν και λίγο αυξημένη, καθώς με βάση τη βιβλιογραφία ο συγκεκριμένος δείκτης για τα αιολικά πάρκα κυμαίνεται 16,4-28,2 gr CO₂/kWh. Για να γίνει αντιληπτή η συγκεκριμένη ποσότητα εκπομπών ρύπων ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας αρκεί να αναφερθεί ότι ο αντίστοιχος δείκτης μιας λιγνιτικής μονάδας παραγωγής ενέργειας ανέρχεται σε 1530 gr CO₂/kWh. Συνεπώς, η ποσοστιαία μείωση της εκπομπής ρύπων συγκριτικά με τη συγκεκριμένη λιγνιτική μονάδα υπολογίζεται σε 98,2 %. Στον Πίνακα 3 πραγματοποιείται μια συγκριτική ανάλυση των παραγόμενων ρύπων του αιολικού πάρκου σε σχέση με μια λιγνιτική μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας ίσης ονομαστικής ισχύος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αιολικών πάρκων επιφέρει άκρως σημαντική μείωση των παραγόμενων ρύπων σε σχέση με την παραγωγή αυτού μέσω της καύσης του λιγνίτη.

Πίνακας 3: Επιπτώσεις αιολικού πάρκου συγκριτικά με λιγνιτική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Φαινόμενο	Τιμή αιολικού πάρκου	Τιμή μονάδας λιγνίτη	Μονάδα μέτρησης	Μείωση (%)
Ανθρώπινη τοξικότητα	314.262,5	7,536*10 ⁶	kg C ₂ H ₃ Cl	95,83
Οξίνιση	707,64627	5502,693	kg SO ₂	87,14
Ευτροφισμός	9,01225	11,103	kg PO ₄ ³⁻	18,83
Ιονίζουσα ακτινοβολία	76.143,4	-	Bq C-14	
Υπερθέρμανση του πλανήτη	78.575,9	1,769*10 ⁶	kg CO ₂	95,56
Εξάντληση ορυκτών πόρων	0	39614,4	MJ	100
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	9,8711*10 ⁹	6,738*10 ¹⁰	kg TEG water	
Αραίωση στοιβάδας όζοντος	0,00069	0,0043	kg CFC ⁻¹¹	83,96
Οικοτοξικότητα εδάφους	3,8713*10 ⁹	-	kg TEG soil	

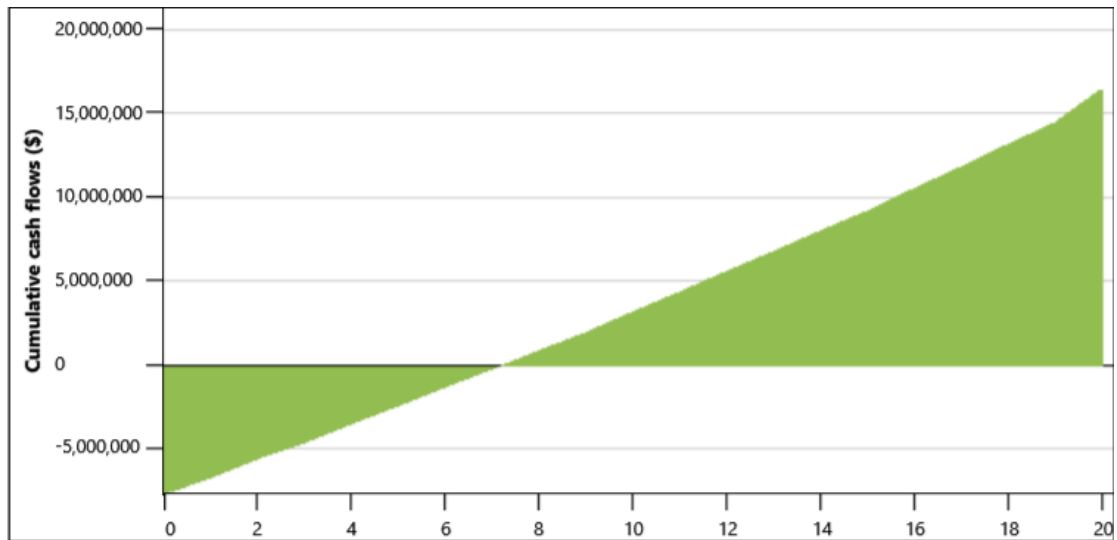
4.6. Οικονομική ανάλυση του αιολικού πάρκου

Το κόστος της κατασκευής και της εγκατάστασης του αιολικού πάρκου “Δίρφους-Ξεροβούνι” ισχύος 6 MW, ανέρχεται σε 7.800.000 €. Το σύνολο του χρηματικού αυτού ποσού θα προέλθει από τραπεζικό δανεισμό, με ευνοϊκό επιτόκιο αφού πρόκειται για ένα άκρως αναπτυξιακό έργο. Το συγκεκριμένο δάνειο πρόκειται σε αποπληρωθεί σε ορίζοντα 15 ετών, έχοντας ένα επιτόκιο της τάξης του 7%. Τα

ετήσια έξοδα συντήρησης του αιολικού πάρκου ανέρχονται σε 150.000 €, ποσό που επιτρέπει την εξασφάλιση ικανοποιητικών κερδών. Με βάση αυτά τα δεδομένα, η απόσβεση του αιολικού πάρκου πραγματοποιείται σε 7 έτη όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3 και γνωρίζοντας ότι η διάρκεια ζωής του ανέρχεται σε 20 έτη, υπολείπονται 13 ολόκληρα έτη για την είσπραξη των κερδών. Η συγκεκριμένη επένδυση θεωρείται πολύ ικανοποιητική και με χαμηλά επίπεδα κινδύνου καθώς υπάρχει συμφωνία με τον πάροχο για σταθερή τιμή αγοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κέρδη του αιολικού πάρκου για το σύνολο του κύκλου ζωής του ανέρχονται σε 16.426.900 €. Το ετήσια έσοδα από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου ανέρχονται σε 1.429.632 €. Κατά συνέπεια, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου αποτελεί εκτός από ένα τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μειωμένους ρύπους και μια εξαιρετική επένδυση, της οποίας τα αναλυτικά οικονομικά στοιχεία παρουσιάζονται στην Εικόνα 14 [50].

Financial parameters		Costs Savings Revenue		Yearly cash flows			
General		Initial costs		Year	Pre-tax	After-tax	Cumulative
Fuel cost escalation rate	2%	Initial cost	100% \$ 7,800,000	#	\$	\$	\$
Inflation rate	2%	Total initial costs	100% \$ 7,800,000	0	-7,800,000	-7,800,000	-7,800,000
Discount rate	9%	Yearly cash flows - Year 1		1	1,305,225	1,030,657	-6,769,343
Reinvestment rate	9%	Annual costs and debt payments		2	1,331,329	1,043,080	-5,726,262
Project life	20	O&M costs (savings)	\$ 150,000	3	1,357,956	1,056,162	-4,670,101
Finance		Debt payments	\$ 0	4	1,385,115	1,069,893	-3,600,208
Incentives and grants	\$ 0	Total annual costs	\$ 150,000	5	1,412,817	1,084,269	-2,515,938
Debt ratio	0%	Annual savings and revenue		6	1,441,073	1,099,284	-1,416,655
Income tax analysis		Electricity export revenue	\$ 1,429,632	7	1,469,895	1,114,932	-301,722
Effective income tax rate	30%	GHG reduction revenue	\$ 0	8	1,499,293	1,131,210	829,488
Loss carryforward?	No	Other revenue (cost)	\$ 0	9	1,529,279	1,148,115	1,977,603
Depreciation method	Declining balance	CE production revenue	\$ 0	10	1,559,864	1,165,644	3,143,248
Half-year rule - year 1	No	Total annual savings and revenue	\$ 1,429,632	11	1,591,062	1,183,795	4,327,043
Depreciation tax basis	100%	Net yearly cash flow - Year 1	\$ 1,279,632	12	1,622,883	1,202,568	5,529,610
Depreciation rate	5%	Financial viability		13	1,655,340	1,221,960	6,751,571
Tax holiday available?	No	Pre-tax IRR - equity	% 17.8%	14	1,688,447	1,241,974	7,993,545
Annual revenue		Pre-tax MIRR - equity	% 12.1%	15	1,722,216	1,262,609	9,256,154
Electricity export revenue		Pre-tax IRR - assets	% 17.8%	16	1,756,661	1,283,867	10,540,022
Electricity exported to grid	MWh 17,870	Pre-tax MIRR - assets	% 12.1%	17	1,791,794	1,305,750	11,845,772
Electricity export rate	\$/kWh 0.08	After-tax IRR - equity	% 13.2%	18	1,827,630	1,328,261	13,174,033
Electricity export revenue	\$ 1,429,632	After-tax MIRR - equity	% 10.6%	19	1,864,182	1,351,402	14,525,435
Electricity export escalation rate	% 2%			20	1,901,466	1,901,466	16,426,900

Εικόνα 14: Αναλυτική απεικόνιση των οικονομικών δεδομένων [50]



Σχήμα 3: Διάγραμμα οικονομικής απόσβεσης [50]

5. Ανάλυση κύκλου ζωής αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι”

Με βάση τα όσα ειπώθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, η συγκεκριμένη μελέτη έχει ως στόχο την εκπόνηση μιας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής ΑΚΖ για το αιολικό πάρκο, του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά αναλύθηκαν εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μεθοδολογία της ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου ισοδυναμεί με την εφαρμογή της για το σύνολο των ανεμογεννητριών που αυτό περιλαμβάνει. Είναι γνωστό ότι, στην ευρύτερη περιοχή της Εύβοιας υπάρχουν πλέον αρκετά εγκατεστημένα αιολικά πάρκα με βάση τα δεδομένα των οποίων θα πραγματοποιηθεί η ΑΚΖ του αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι”.

5.1. Καθορισμός στόχου και αντικειμένου μελέτης

Βασική επιδίωξη της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα προκύψουν από το αιολικό πάρκο “Δίρφυς-Ξεροβούνι”, ονομαστικής ισχύος 6 MW. Η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ξεκινώντας από την κατασκευή των ανεμογεννητριών μέχρι και την ανακύκλωση μετά το πέρας της λειτουργίας του αιολικού πάρκου. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις οποίες θα βασιστεί η μελέτη είναι αυτές οι οποίες είθισται να εξετάζονται σε ανάλογες μελέτες ΑΚΖ στα πλαίσια αιολικών πάρκων.

Η συγκεκριμένη μελέτη ΑΚΖ περιλαμβάνει το σύνολο των επιμέρους σταδίων και εργασιών που σχετίζονται με το αιολικό πάρκο ξεκινώντας από τη συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών, τη μεταφορά και τη συναρμολόγηση των ανεμογεννητριών στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου. Αναλυτικότερα, οι απαραίτητες διεργασίες είναι οι ακόλουθες:

- Η κατασκευή και συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών από τους κατασκευαστές,
- Η διαδικασία παραγωγής των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών και η μεταφορά αυτών στην περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου,
- Την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στην καθορισμένη περιοχή,
- Τη λειτουργία και τη συντήρηση του αιολικού πάρκου είτε πρόκειται για τακτική συντήρηση είτε για τυχόν απρόσμενη βλάβη και αντικατάσταση κάποιων εξαρτημάτων,
- Το παραγόμενο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που θα διοχετευθούν στο δίκτυο,
- Την αξιοποίηση του συνόλου των ανακυκλώσιμων υλικών που θα προκύψουν μετά την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου [43].

5.1.1. Λειτουργική μονάδα

Είναι γνωστό ότι η μονάδα μέτρησης μέσω της οποίας αποτιμάται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς που προέρχεται από τη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου και διοχετεύεται στο δίκτυο είναι η 1 kWh. Σε ό,τι αφορά τη συγκεκριμένη μελέτη,

υπολογίζεται πως το ποσό της παραγόμενης ισχύος ανέρχεται σε 357.400.000 kWh ετησίως. Το εν λόγω αποτέλεσμα προέκυψε με βάση στοιχεία ήδη εγκατεστημένων αιολικών πάρκων στην ευρύτερη περιοχή της Εύβοιας. Ο συντελεστής διαθεσιμότητας για το αιολικό πάρκο υπολογίζεται σε 34% και η μέση διαθεσιμότητα του πάρκου σε 97% [43].

5.1.2. Περιγραφή του συστήματος

Η κατασκευή ενός μεγάλου έργου όπως είναι ένα αιολικό πάρκο περιλαμβάνει εκτός του βασικού που είναι οι ανεμογεννήτριες που το αποτελούν ένα πλήθος συνοδών έργων. Πιο συγκεκριμένα, για την κατασκευή του αιολικού πάρκου “Δίρφους-Ξεροβούνι” η ανάλυση του συστήματος περιλαμβάνει εκτενή μελέτη των ανεμογεννητριών αλλά και των συνοδών έργων που πρέπει να πραγματοποιηθούν. Το υπό-περιγραφή σύστημα οριοθετείται ξεκινώντας από την παραγωγή των επιμέρους εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών από τους κατασκευαστές και καταλήγει στην απόθεση και αξιοποίηση των ανεμογεννητριών μετά την απεγκατάστασή τους.

Εν συνεχεία, θα αναλυθούν όλα τα επιμέρους στάδια της μελέτης ΑΚΖ έτσι ώστε να γίνουν απολύτως κατανοητά για το υπό-μελέτη αιολικό πάρκο. Σε ό,τι αφορά το στάδιο της αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων θα γίνει εκτενής αναφορά στο σύνολο των παραδοχών που έχουν θεωρηθεί.

5.1.2.1. Στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής

Τα στάδια της μελέτης του αιολικού πάρκου που παρατίθενται στην συνέχεια προήλθαν από τη διαδικασία εύρεσης των δεδομένων.

1. Παραγωγή και κατασκευή εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών

Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει την παραγωγή των απαιτούμενων υλικών και την εξασφάλιση των απαιτούμενων ενεργειακών πόρων για την κατασκευή των εξαρτημάτων και των τμημάτων των ανεμογεννητριών. Σε ό,τι αφορά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν μελετώνται με βάση τους δείκτες που σχετίζονται με την τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και δίνουν την ακριβέστερη δυνατή εικόνα για τις απαιτούμενες ποσότητες υλικών και ενέργειας. Επιπλέον, η συνεισφορά των δεικτών κρίνεται απολύτως απαραίτητη αφού σχετίζεται άμεσα με την εξασφάλιση και τις κατεργασίες των πρώτων υλών που προηγείται της κατασκευής των τμημάτων των ανεμογεννητριών [41].

2. Εγκατάσταση αιολικού πάρκου

Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει την συναρμολόγηση και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στην τοποθεσία λειτουργίας του αιολικού πάρκου, σε συνδυασμό με την πραγματοποίηση των έργων θεμελίωσης των ανεμογεννητριών [41].

Για να εγκατασταθούν οι ανεμογεννήτριες είναι αναγκαία η σωστή διαμόρφωση της τοποθεσίας έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ο απαιτούμενος χώρος που θα επιτρέπει στα οχήματα άνετη και ασφαλή πρόσβαση για την πραγματοποίηση τυχόν επισκευών και

για τακτικές συντηρήσεις των ανεμογεννητριών. Αναλυτικότερα, για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών απαιτείται η κατασκευή πλατωμάτων με διαστάσεις περίπου 70 m x 30 m, με τον πυλώνα να θεμελιώνεται στο κέντρο του πλατώματος αυτού.

Επιπλέον, ο απαιτούμενος χώρος για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών ανέρχεται περίπου σε 15 m x 15 m για την κάθε μια. Το απαιτούμενο βάθος για τη διασφάλιση της ακίνδυνης εγκατάστασης και σωστής θεμελίωσης των ανεμογεννητριών είναι περίπου 3 m. Το σύνολο της εκσκαφής για την κάθε ανεμογεννήτρια υπολογίζεται ότι είναι 675 m³.

Για την θεμελίωση των ανεμογεννητριών στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε αρχικά σκυρόδεμα καθαριότητας και έπειτα οπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, για τη βάση της κάθε ανεμογεννήτριας απαιτούνται 50m³ σκυροδέματος καθαριότητας και 250m³ οπλισμένου σκυροδέματος. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω υπολογισμών λήφθηκαν σοβαρά υπόψη το μέγεθος και η ισχύς των ανεμογεννητριών όπως επίσης τα μετεωρολογικά και σεισμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης του αιολικού πάρκου.

3. Λειτουργία αιολικού πάρκου

Το συγκεκριμένο στάδιο της λειτουργίας του αιολικού πάρκου αποτελείται κυρίως από τη διαδικασία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας και την διοχέτευση αυτής στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον, στα πλαίσια του εν λόγω σταδίου περιλαμβάνονται και η τακτική συντήρηση των ανεμογεννητριών (αλλαγή λαδιών και φίλτρων, αντικατάσταση εξαρτημάτων λόγω φθοράς) αλλά και η αποκατάσταση τυχόν βλαβών [41].

4. Τέλος του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου

Το συγκεκριμένο στάδιο της μελέτης AKZ του αιολικού πάρκου περιλαμβάνει τη διαχείριση των ανεμογεννητριών μετά την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου. Με βάση τα υπολογιστικά μοντέλα και τις βάσεις δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, επιδιώκεται η μεγαλύτερη δυνατή ανακύκλωση και αξιοποίηση των υλικών των ανεμογεννητριών που πρόκειται να απεγκατασταθούν [41].

Κατά συνέπεια, θεωρείται δεδομένο ότι μετά την απεγκατάσταση των ανεμογεννητριών ο στόχος που απαιτείται να επιτευχθεί δεν είναι άλλος από την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των περισσότερων υλικών των ανεμογεννητριών. Τα μοναδικά υλικά των οποίων η επαναχρησιμοποίηση είναι δικαιολογημένα ανέφικτη είναι τα απόβλητα, τα οποία πρόκειται να μεταφερθούν σε χώρους υγειονομικής ταφής [41].

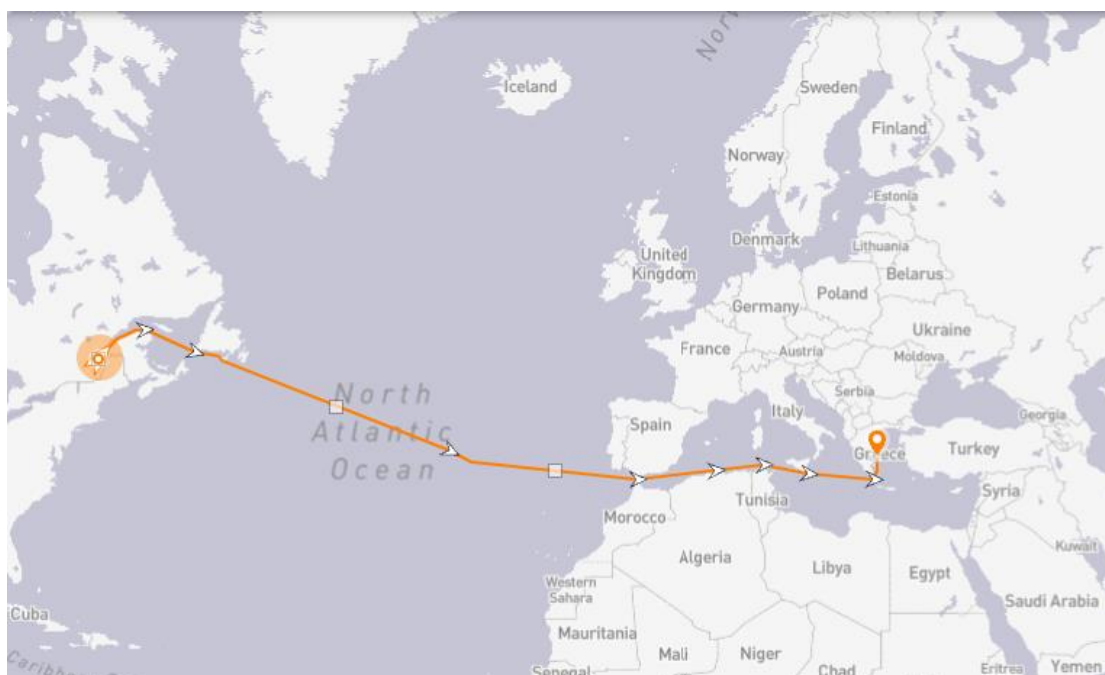
Αξίζει να σημειωθεί ότι μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από μεταλλικά υλικά κατά ένα ποσοστό μεγαλύτερο του 85% με βάση κατά βάρος σύσταση της. Επομένως, το σύνολο των μεταλλικών αυτών υλικών θα ανακυκλωθούν και έπειτα θα

επαναχρησιμοποιηθούν. Εν τέλει, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών πρόκειται να μεταφερθούν σε κατάλληλους χώρους υγειονομικής ταφής [41].

5. Μεταφορά των ανεμογεννητριών

Οι απαιτούμενες μεταφορές των ανεμογεννητριών ξεκινούν αρχής γενομένης από την τοποθεσία του εργοστασίου όπου κατασκευάζονται στον χώρο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Η συγκεκριμένη μεταφορά θα πραγματοποιηθεί αρχικά με πλοίο και στην συνέχεια με φορτηγά οχήματα. Για την συγκεκριμένη μεταφορά χρησιμοποιήθηκαν 1 φορτηγό πλοίο και 20 φορτηγά οχήματα για το σύνολο των ανεμογεννητριών [41].

Τα μη συναρμολογημένα τμήματα των ανεμογεννητριών πρόκειται να μεταφερθούν από την πόλη Βromont του Καναδά, όπου και εδρεύει το εργοστάσιο παραγωγής της εταιρείας AAER, μέσω φορτηγών οχημάτων στην πόλη Κεμπέκ, όπου βρίσκεται το πλησιέστερο λιμάνι. Από το λιμάνι του Κεμπέκ τα τμήματα των ανεμογεννητριών θα ξεκινήσουν μέσω πλοίου με προορισμό το λιμάνι του Ασπροπύργου. Τέλος, από εκεί με τη βοήθεια των φορτηγών οχημάτων και του υπάρχοντος οδικού δικτύου της περιοχής θα φτάσουν στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Η απόσταση που πρόκειται να διανύσει το πλοίο είναι 4566,5 NM (8456,2 km) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 16, ενώ τα φορτηγά οχήματα πρόκειται να διανύσουν 278 km [51].



Εικόνα 15: Απεικόνιση της διαδρομής του πλοίου μεταφοράς των ανεμογεννητριών από το εργοστάσιο κατασκευής τους στο Bromont μέχρι το λιμάνι του Ασπρόπυργου [51]

Επιπλέον, θεωρείται απαραίτητος ο υπολογισμός των μεταφορών που σχετίζονται με τα προβλεπόμενα έργα συντήρησης και τις επισκευές του αιολικού πάρκου για όλα τα

έτη λειτουργίας του. Με βάση του υπολογισμούς που έγιναν τα χιλιόμετρα που διανύονται είναι 488 kmγια κάθε έτος λειτουργίας [51].

Σε ό,τι αφορά τις απαραίτητες μεταφορές που απαιτούνται μετά την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου και σχετίζονται με την απόθεση και την ανακύκλωση των τμημάτων των ανεμογεννητριών, αυτά υπολογίζονται κατά προσέγγιση σε 110 km [52].

Στους πίνακες που ακολουθούν αποτυπώνονται οι απαιτούμενες μεταφορές του αιολικού πάρκου, οι οποίες διαχωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Οι μεταφορές που πραγματοποιήθηκαν για την μετάβαση των τμημάτων των ανεμογεννητριών από την τοποθεσία του εργοστασίου παραγωγής στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου
- Οι μεταφορές που πραγματοποιήθηκαν για τις τακτικές συντηρήσεις και τις επισκευές κατά την λειτουργία του αιολικού πάρκου
- Οι μεταφορές που πραγματοποιήθηκαν για την απόθεση και την ανακύκλωση των υλικών μετά την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου.

5.1.3. Εύρεση δεδομένων

Για την εξασφάλιση των δεδομένων του αιολικού πάρκου πραγματοποιήθηκε εκτενής αναζήτηση δεδομένων, προερχόμενων κυρίως από την κατασκευάστρια εταιρεία με στόχο την κατά το δυνατόν αύξηση της ορθότητας της μελέτης και την μείωση της αβεβαιότητας.

Το στάδιο της εύρεσης δεδομένων αποτελείται επιγραμματικά από τα ακόλουθα υπό-στάδια:

- Τη σύσταση των απαιτούμενων υλικών για την κατασκευή των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών,
- Τη διαδικασία συναρμολόγησης των τμημάτων των ανεμογεννητριών στο εργοστάσιο παραγωγής τους,
- Τις απαιτούμενες ανάγκες σε ενέργεια και επιπρόσθετα υλικά από πλευράς της κατασκευάστριας εταιρείας,
- Τις απαιτούμενες ανάγκες σε υλικά για τις εργασίες στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και τη συντήρηση του,
- Τα παραγόμενα ενεργειακά ποσά που διοχετεύονται στο δίκτυο της περιοχής,
- Τις ενεργειακές απώλειες που προκύπτουν από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών [46].

5.1.4. Όρια και υποθέσεις εργασίας

Με βάση την οριοθέτηση του συστήματος της μελέτης αλλά και των υποθέσεων που έχουν υιοθετηθεί για την εκπόνηση αυτής, ακολουθούν οι κυριότερες υποθέσεις εργασίας:

1. Η διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου

Είναι γνωστό ότι, η διάρκεια ζωής των αιολικών πάρκων θεωρείται ως 20 έτη και αποτελεί ένα καθοριστικό μέγεθος τόσο για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και για τον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [43].

2. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Η παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ωστόσο οι κυριότεροι είναι το αιολικό δυναμικό της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο. Με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής και γνωρίζοντας τις απώλειες λειτουργίας των ανεμογεννητριών, το συνολικό ποσό ενέργειας που θα παραχθεί κατά την διάρκεια των 20 ετών υπολογίζεται σε 357.400.000 kWh [45].

3. Οι επιπτώσεις από την εξόρυξη των μετάλλων και την τελική απόθεσή τους

Είναι γνωστό ότι, ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της κάθε ανεμογεννήτριας της τάξης του 85% κατασκευάζεται από μεταλλικά υλικά (χάλυβα, αλουμίνιο, σίδηρο κ.α.), η συμβολή των οποίων στις επιπτώσεις κάθε άλλο παρά αμελητέα κρίνεται. Τα υλικά αυτά επιφέρουν σημαντικές επιπτώσεις κατά την εξόρυξη τους και κατά την ανακύκλωση και απόθεση τους [43].

4. Η μελέτη των επιπτώσεων των συνοδών έργων του αιολικού πάρκου

Η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου εμπεριέχει εκτός των ανεμογεννητριών, μια σειρά από έργα διάνοιξης οδών προς τη τοποθεσία εγκατάστασης και τα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης στο δίκτυο. Για την παρούσα μελέτη αξίζει να σημειωθεί ότι τα έργα για την διάνοιξη οδών και την ηλεκτρική διασύνδεση χαρακτηρίζονται ως μεσαίας κλίμακας, κυρίως λόγω του ότι το αιολικό πάρκο αποτελείται από 4 ανεμογεννήτριες. Η επιλογή να μελετηθεί ένα αιολικό πάρκο τέτοιου μεγέθους έγινε εξαιτίας την μη ύπαρξης επαρκούς χώρου για να τοποθετηθούν περισσότερες ανεμογεννήτριες [43].

5. Οι λοιπές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του αιολικού πάρκου

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των μελετών ΑΚΖ είναι ότι δεν περιλαμβάνει τις επιπτώσεις που προέρχεται από τον θόρυβο, την οπτική όχληση και τις πιθανές συνέπειες στην χλωρίδα και την πανίδα. Οι συγκεκριμένοι παράμετροι μελετώνται στα πλαίσια του σταδίου ανάλυσης περιβαλλοντικών επιπτώσεων [45].

Το συγκεκριμένο έργο χαρακτηρίζεται ως μικρής κλίμακας, κατά συνέπεια η περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρει είναι περιορισμένες. Ωστόσο, είναι βέβαιο ότι θα υπάρξουν διαφοροποιήσεις στην περιοχή σε σχέση με την πρότερη μορφή της. Σε ό,τι αφορά το θόρυβο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι πλησιέστεροι οικισμοί απέχουν 5-10 km από την τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Οι ανεμογεννήτριες που θα εγκατασταθούν δεν παράγουν θόρυβο ικανό να προκαλέσει όχληση σε

αποστάσεις μεγαλύτερες των 500 m, συνεπώς οι κάτοικοι δεν θα αντιμετωπίζουν κανένα πρόβλημα.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου βλάστηση καθώς αποτελεί κομμάτι ενός βραχώδους ορεινού όγκου. Κατά συνέπεια, η επιβάρυνση σε ό,τι αφορά τον τομέα της χλωρίδας κρίνεται ως ελάχιστη εξαιτίας του άγονου εδάφους.

Σε ό,τι αφορά τις συνέπειες στην πανίδα της περιοχής, αυτές είναι οι ελάχιστες δυνατές αφού το αιολικό πάρκο καταλαμβάνει μια σχετικά περιορισμένη έκταση από την οποία απουσιάζει η βλάστηση. Γενικότερα, η πανίδα της περιοχής κρίνεται ως πενιχρή καθώς χρησιμοποιείται για κτηνοτροφικές χρήσεις και η μόνη παρουσία ζώων είναι κάποια αιγοπρόβατα.

5.2. Απογραφή δεδομένων

Στο συγκεκριμένο σημείο θα πραγματοποιηθεί μια πλήρης ανάλυση με κύριο άξονα τον καθορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προέρχονται από το αιολικό πάρκο. Κάθε ανεμογεννήτρια αναλύεται στα επιμέρους τμήματα της και το καθένα από αυτά στα υλικά από τα οποία αποτελείται, έτσι ώστε να ποσοτικοποιηθούν οι ανάγκες σε ενέργεια, υλικά, απόβλητα και λοιπές εκπομπές για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του αιολικού πάρκου. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται όλες οι μάζες των υλικών του κάθε τμήματος της ανεμογεννήτριας AAERA1500-70.

Πίνακας 4: Ανάλυση των υλικών για τα επιμέρους εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας AAERA1500-70 [49]

Τμήμα ανεμογεννήτριας	Υλικό	Μάζα [tn]
Κέλυφος	Χάλυβας	37,42
	Χαλκός	3,12
	Αλουμίνιο	1,41
	Υαλονήματα	0,31
	Πυρίτιο	0,19
	Βινυλεστέρας	0,15
	Σύνολο	42,6
Ρότορας	Υαλονήματα	4,67
	Εποξικές ρητίνες	4,38
	Χυτοσίδηρος	4,02
	Ανθρακονήματα	2,04
	Βινυλεστέρας	0,09
	Σύνολο	15,2
Πυλώνας		
	Χάλυβας	135
Θεμελίωση	Σκυρόδεμα	721,96
	Σίδηρος	21,66

5.3. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

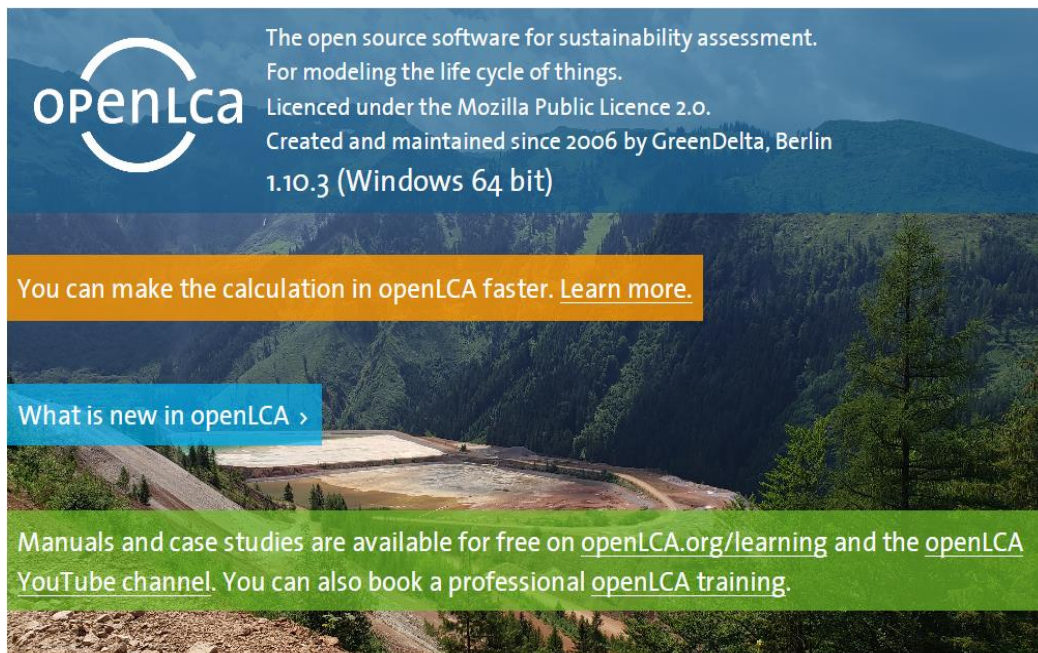
Η συγκεκριμένη μελέτη ΑΚΖ του αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι” στοχεύει στην πρόβλεψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του. Οι κατηγορίες των επιπτώσεων μελετώνται και παρουσιάζονται με την βοήθεια κάποιων δεικτών που σχετίζονται τόσο με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο και με τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η μεθοδολογία ανάλυσης Impact 2002+.

Επομένως, με βάση την μέθοδο ανάλυσης πραγματοποιήθηκε η επιλογή των ακόλουθων δεικτών για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του αιολικού πάρκου [47]:

- Ανθρώπινη τοξικότητα
- Οξίνιση
- Ευτροφισμός
- Ιονίζουσα ακτινοβολία
- Υπερθέρμανση του πλανήτη
- Εξάντληση ορυκτών πόρων
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα
- Αραίωση στοιβάδας όζοντος
- Οικοτοξικότητα εδάφους

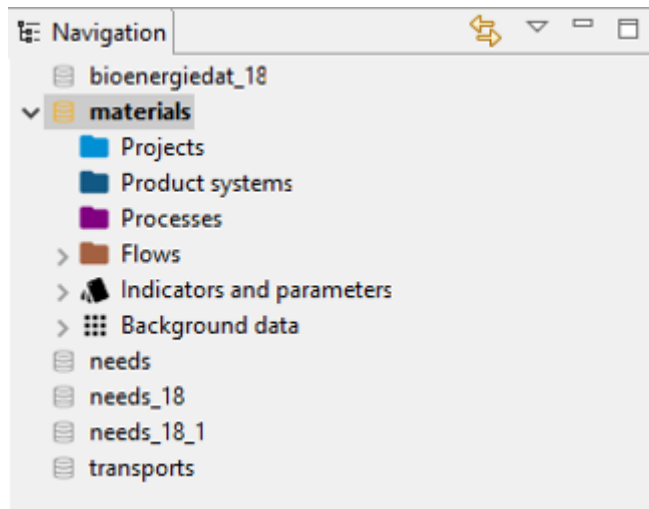
5.3.1. Εισαγωγή στο OpenLCA

Το επόμενο βήμα προς την ολοκλήρωση της μελέτης ΑΚΖ του αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι” είναι η εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων στο κατάλληλο πρόγραμμα. Για το συγκεκριμένο σκοπό επιλέχθηκε το πρόγραμμα OpenLCA, με τον κυριότερο λόγο της επιλογής να είναι η δωρεάν διάθεση του προγράμματος σε σύγκριση με άλλα. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα πραγματοποιεί τη συγκριτική μελέτη σχετικά με την απόδοση και τις επιπτώσεις που επιφέρει κάθε ένα από τα προϊόντα και τις διεργασίες για το σύνολο της κατασκευής, της λειτουργίας, της συντήρησης και τέλος της απεγκατάστασης και ανακύκλωσης των υλικών του αιολικού πάρκου. Τα προγράμματα μελετών ΑΚΖ είναι πλέον απαραίτητα για κάθε παραγωγική διαδικασία, καθώς παραθέτουν αφενός τα οφέλη που προσφέρονται και αφετέρου τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν για το σύνολο της παραγωγής και της χρήσης τους. Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης ανάλυσης, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί κάποιες βάσεις δεδομένων ως κύρια εισροή σε συνδυασμό με διάφορα άλλα δεδομένα. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται η εισαγωγή του λογισμικού Ανάλυσης Κύκλου Ζωής OpenLCA.



Εικόνα 16: Εισαγωγή στο πρόγραμμα OpenLCA [54]

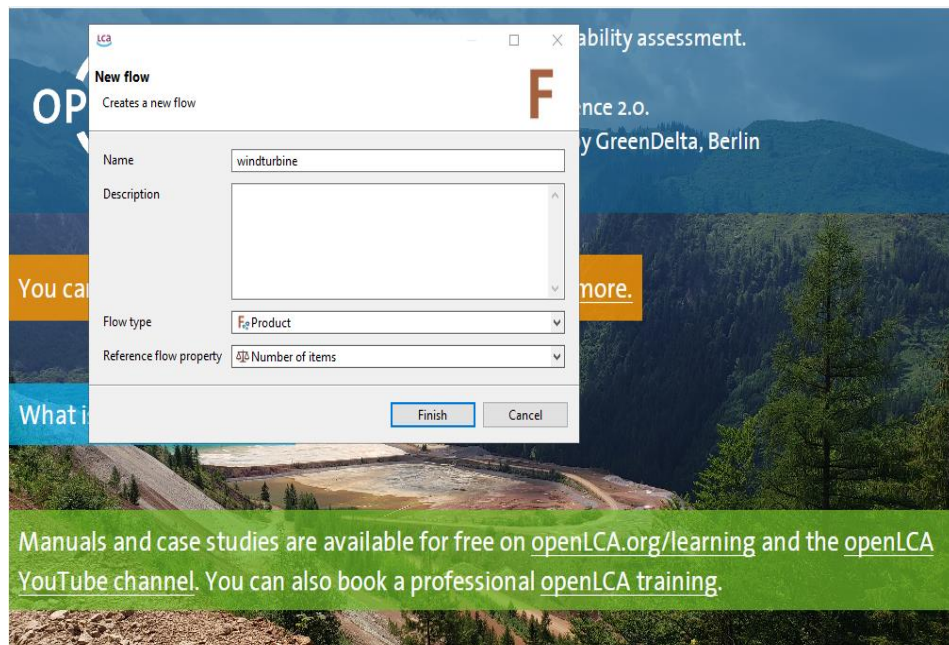
Συγκεκριμένα, για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής του αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι”, η καταλληλότερη βάση δεδομένων που παρέχεται δωρεάν μέσω της ιστοσελίδας του προγράμματος είναι η NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability). Η εν λόγω βάση δεδομένων αποτελεί προϊόν μελέτης της γαλλικής επιτροπής ενέργειας, ενώ στην συνέχεια αποτέλεσε εργαλείο αποτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων με εφαρμογή σε ενεργειακά συστήματα. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε τη χρήση της βάσης δεδομένων NEEDS για την εκπόνηση μελετών AKZ σε αιολικά πάρκα. Τα κύρια αποτελέσματα της μελέτης είναι οι παραγόμενοι ρύποι και περιβαλλοντικές επιπτώσεις του αιολικού πάρκου, που αναλύονται ανά κατηγορίες (νερό, ζώντες οργανισμοί, έδαφος, ανθρώπινη υγεία κ.α). Εν τέλει, στην μελέτη έχουν συμπεριληφθεί όλα τα απαιτούμενα στοιχεία που σχετίζονται με τις μεταφορές, τη συντήρηση, τη λειτουργία και την ανακύκλωση των υλικών μετά την απεγκατάσταση του αιολικού πάρκου. Η Εικόνα 18 παρουσιάζει τη διαδικασία εισαγωγής της βάσης δεδομένων NEEDS στο λογισμικό OpenLCA [53].



Εικόνα 17: Εισαγωγή της βάσης δεδομένων NEEDS στο OpenLCA [54]

5.3.2. Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα OpenLCA

Το επόμενο στάδιο μετά την εισαγωγή της βάσης δεδομένων στο πρόγραμμα, αποτελεί η καταχώριση των δεδομένων που σχετίζονται με τις ποσότητες των απαιτούμενων υλικών και των απαιτούμενων μεταφορών που έγιναν για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής flow, μέσω της οποίας εισάγεται το αντικείμενο της μελέτης και στη συνέχεια μέσω της εντολής processπραγματοποιείται η εισαγωγή των εισροών. Η διαμόρφωση των δεδομένων με στόχο την εξασφάλιση των επιθυμητών εκροών παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 18: Διαμόρφωση των επιθυμητών εκροών ανά λειτουργική μονάδα [54]

Έπειτα, πραγματοποιείται η εισαγωγή του συνόλου των απαραίτητων δεδομένων που σχετίζονται με την παραγωγή των ανεμογεννητριών. Οι μονάδες μέτρησης των

υλικών που χρησιμοποιήθηκαν διευκολύνουν στο μέγιστο βαθμό τη διαδικασία της ανάλυσης και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Είναι αυτονόητο ότι έχουν ληφθεί υπόψη και οι διανυθείς αποστάσεις που πραγματοποιούνται είτε για την μεταφορά των ανεμογεννητριών είτε για την πραγματοποίηση των εργασιών στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται το σύνολο των εισροών.

Inputs/Outputs: wind-turbine

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data quali...	Descript...
Fe transport, lorry 40t - CH	NEEDS dummy produ...	KM*TN	t*km		none				
Fe excavation, hydraulic digger ...	construction processe...	EXCAV	m3		none				
Fe concrete, normal, at plant - ...	construction material...	CONCR	m3		none				
Fe steel, converter, low-alloyed,...	metals/extraction	STEEL	kg		none				
Fe Aluminium	Emission to air/high p...	ALUM	kg		none				
Fe Copper	Emission to air/high p...	COPP	kg		none				
Fe Particulates, fine mineral fib...	Emission to air/unspe...	FIBGL	kg		none				
Fe Silicon	Emission to air/high p...	SI	kg		none				
Fe Copper resinate	Emission to air/unspe...	EPRHT	kg		none				
Fe Iron	Emission to air/high p...	SIDERA	kg		none				

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided p...	Provider	Data quali...	Descript...
Fe wind-turbine		4.00000	Item(s)		none				

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

Εικόνα 19: Αναλυτική απεικόνιση εισροών του προγράμματος [54]

Εν κατακλείδι, σε ό,τι αφορά τη μοντελοποίηση των μεταβλητών προτιμήθηκε να γίνει με παραμετρικό τρόπο όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 21.

Parameters: wind-turbine

Input parameters

Name	Value	Uncertainty	Description
KM	8734.2	none	
TN	192.4	none	
EXCAV	675.0	none	
CONCR	300.82	none	
STEEL	37420.0	none	
ALUM	1410.0	none	
COPP	3120.0	none	
FIBGL	4980.0	none	
SI	190.0	none	
EPRHT	4380.0	none	
SIDERA	21660.0	none	

Εικόνα 20: Παρουσίαση των παραμέτρων του προγράμματος [54]

5.3.3. Ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Είναι γνωστό ότι η πραγματοποίηση κάθε έργου ανεξαρτήτως μεγέθους επιφέρει μια σειρά από περιβαλλοντικές και λοιπές επιπτώσεις. Εξάλλου, ο κύριος στόχος της

μεθοδολογίας AKZ που εφαρμόζεται δεν είναι άλλος από την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου πραγματοποιήθηκε και η προσπάθεια να αντικατασταθούν συγκεκριμένα υλικά από την κατασκευή των ανεμογεννητριών που ήταν υπεύθυνα για ένα μεγάλο μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι ποσότητες για την εκάστοτε κατηγορία επιπτώσεων για το αιολικό πάρκο “Δίρφυς-Ξεροβούνι”.

Πίνακας 5: Συνολικές επιπτώσεις αιολικού πάρκου [54]

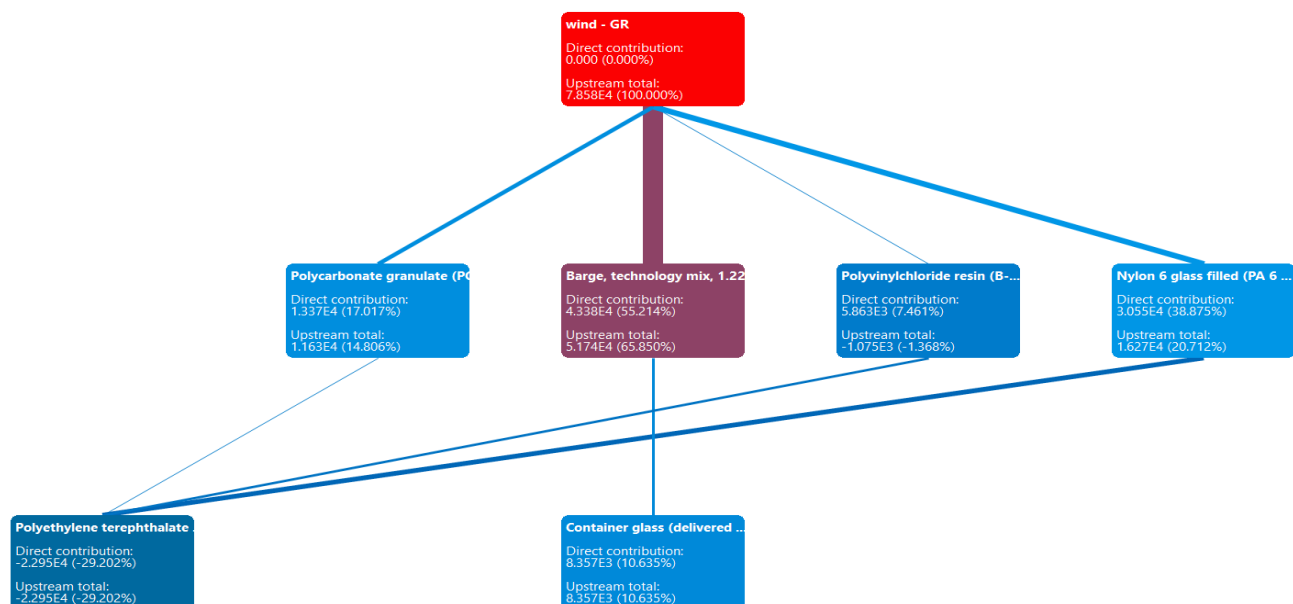
Κατηγορίες επιπτώσεων	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ανθρώπινη τοξικότητα	314262,5	kg C ₂ H ₃ Cl
Οξίνιση	707,64627	kg SO ₂
Ευτροφισμός	9,01225	kg PO ₄ ³⁻
Ιονίζουσα ακτινοβολία	76143,4	Bq C-14
Υπερθέρμανση πλανήτη	78575,9	kg CO ₂
Εξάντληση ορυκτών πόρων	0	MJ
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	9,8711*10 ⁹	kg TEG water
Αραίωση στοιβάδας όζοντος	0,00069	kg CFC ⁻¹¹
Οικοτοξικότητα εδάφους	3,8713*10 ⁹	kg TEG soil

5.3.4. Ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τα επιμέρους υλικά

Στα πλαίσια του αιολικού πάρκου με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό OpenLCA, το μεγαλύτερο μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων προκύπτει από τον τομέα των μεταφορών. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα θεωρείται αναμενόμενο λόγω των μεγάλων αποστάσεων που διανύθηκαν για την μεταφορά των ανεμογεννητριών από το εργοστάσιο κατασκευής τους στην περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Ο τομέας των μεταφορών παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην επιδείνωση των φαινομένων της οξίνισης, των ανόργανων αιωρούμενων σωματιδίων και της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Σε ό,τι αφορά τις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων, πρωτεύοντα ρόλο παίζει η παρουσία των εποξικών ρητινών και των υαλονημάτων, με τη χρήση του βινυλεστέρα και των υπόλοιπων υλικών να έρχονται σε δεύτερη μοίρα.

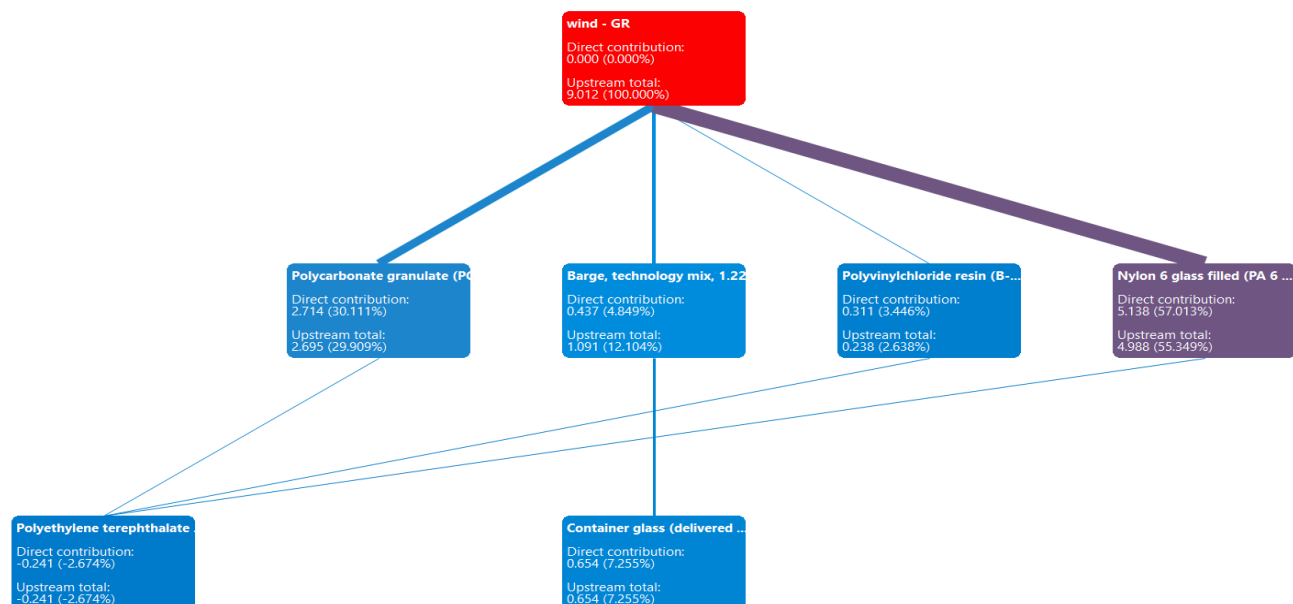
Ένας από τους κυριότερους δείκτες αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων αποτελεί η ισοδύναμη συνεισφορά των επιμέρους υλικών σε ποσοστό CO₂. Η συντριπτική πλειοψηφία των παραγόμενων ρύπων οφείλεται στις μεταφορές των ανεμογεννητριών από το εργοστάσιο στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, με το ανάλογο ποσοστό να ανέρχεται σε 55,21 %. Επιπλέον, αξιοσημείωτη συνεισφορά στην παραγωγή ρύπων με ποσοστό 38,87% επιφέρει η χρήση των υαλονημάτων, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Τέλος, ακολουθούν με πολύ μικρότερα ποσοστά τα ανθρακονήματα και οι εποξικές ρητίνες με ποσοστά 17,02 % και 7,46 % αντίστοιχα.

Το σύνολο των υλικών και η συνεισφορά τους στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη φαίνονται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 21: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της υπερθέρμανσης του πλανήτη [54]

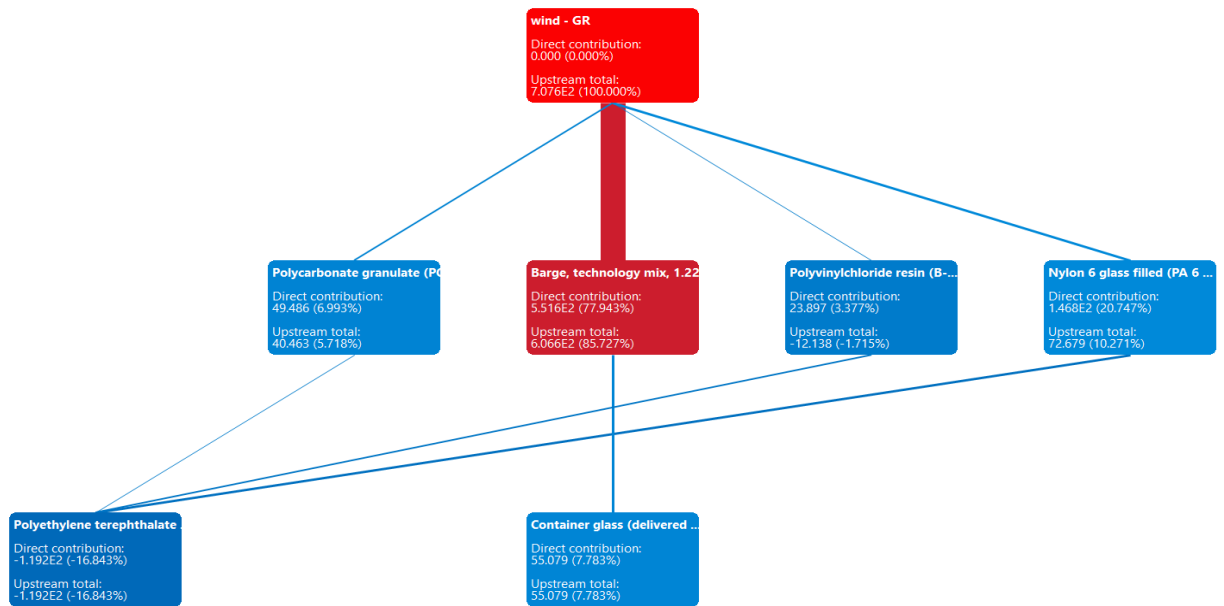
Σε ό,τι αφορά το φαινόμενο του ευτροφισμού, παρατηρείται ότι η σημαντικότερη συμβολή προέρχεται από τη χρήση των υαλονημάτων με ποσοστιαία συνεισφορά 57,02 %. Η χρήση των ανθρακονημάτων και ο τομέας των μεταφορών έρχονται σε δεύτερη μοίρα και συνεισφέρουν με ποσοστά 30,11 % και 7,26 % όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 22: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου του ευτροφισμού [54]

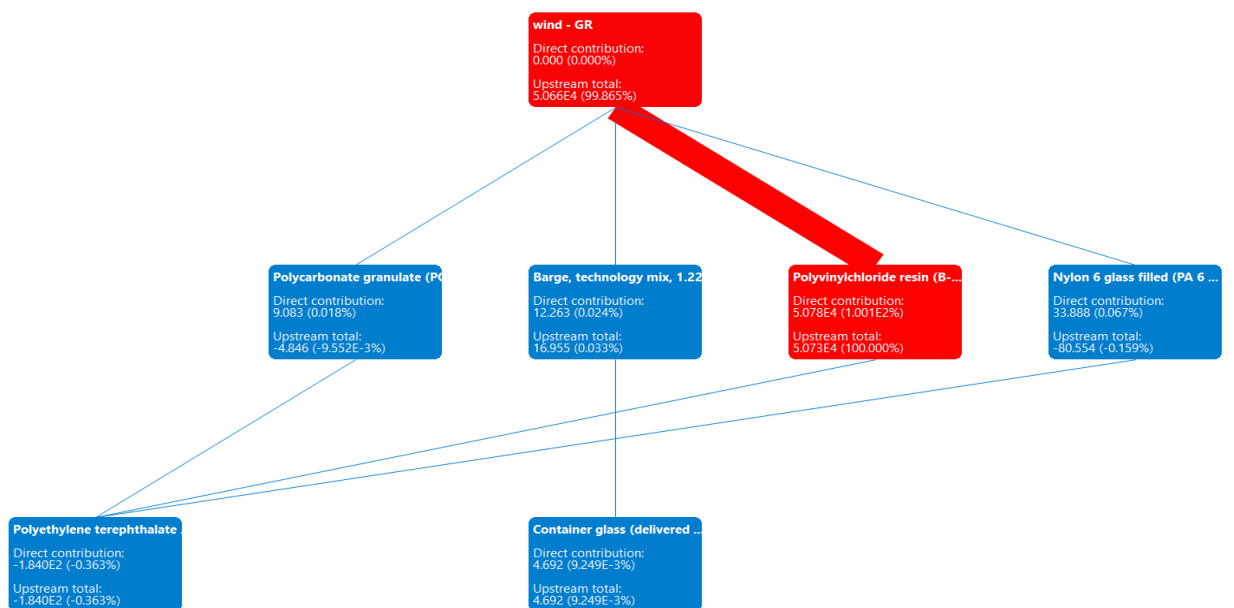
Με βάση την Εικόνα 24 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την επιδείνωση του φαινομένου της οξίνισης είναι ο τομέας των μεταφορών με

ποσοστό 77,94%. Η χρήση των υαλονημάτων για την κατασκευή των ανεμογεννητριών όπως επίσης και αυτή των ανθρακονημάτων περνούν σε δεύτερη μοίρα με ποσοστά 20,75% και 6,99%.



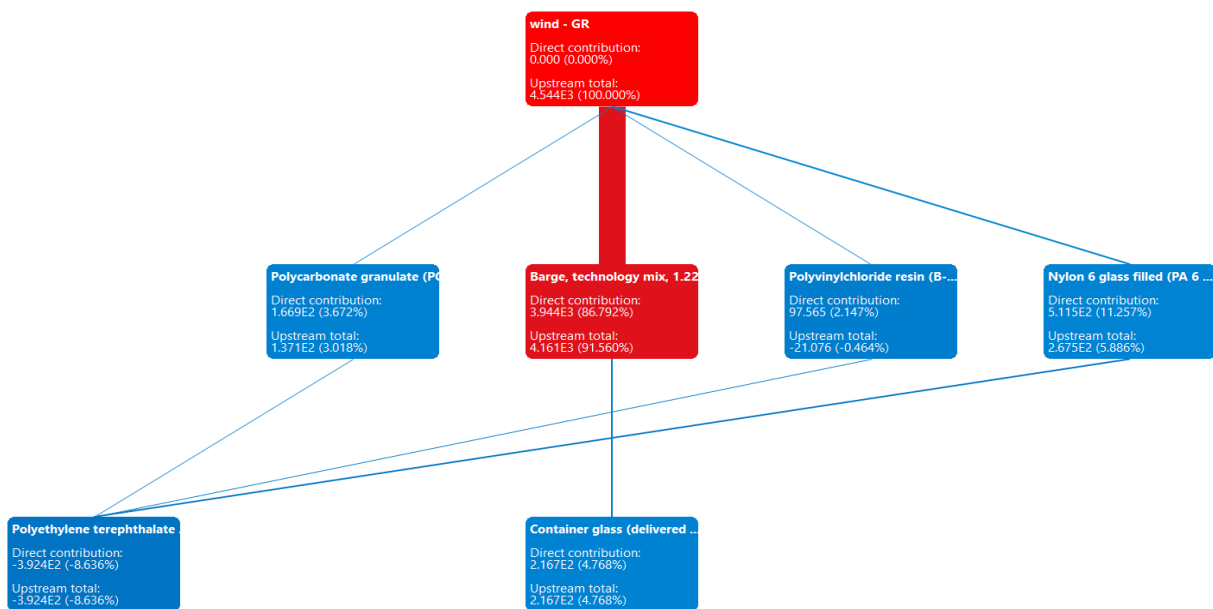
Εικόνα 23: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της οξίνισης [54]

Το φαινόμενο της ανθρώπινης τοξικότητας αποτελεί μια κατηγορία επιπτώσεων η οποία προέρχεται σε τεράστιο βαθμό από τη παραγωγή και χρήση των εποξικών ρητινών με ποσοστό 99,87% όπως φαίνεται και στην Εικόνα 25. Με απειροελάχιστες ποσοστιαίες συνεισφορές ακολουθούν τα υαλονήματα και οι μεταφορές με 0,067% και 0,024% αντίστοιχα.



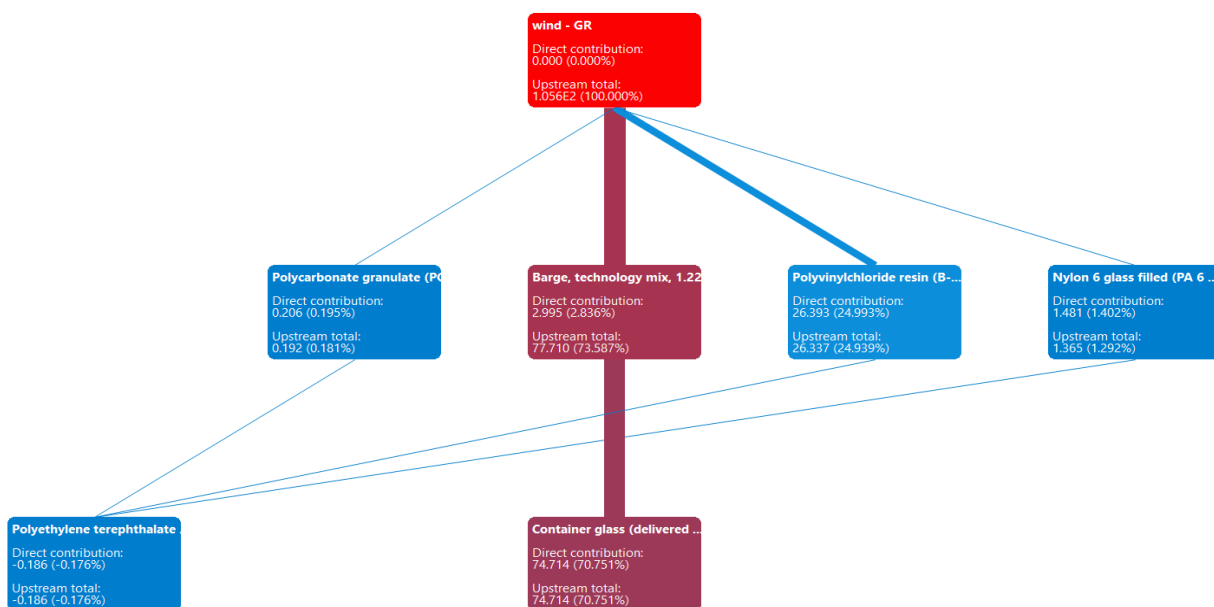
Εικόνα 24: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της ανθρώπινης τοξικότητας [54]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 26 η επιδείνωση του φαινομένου της οικοτοξικότητας του εδάφους οφείλεται κατά κύριο λόγο στον τομέα των μεταφορών, ο οποίος συνεισφέρει κατά 86,79%. Δευτερευόντως, στο φαινόμενο της οικοτοξικότητας του εδάφους συμβάλλουν τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα με ποσοστά 11,26% και 3,67%.



Εικόνα 25: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της οικοτοξικότητας του εδάφους [54]

Όπως γίνεται αντιληπτό από την Εικόνα 27, η κυριότερη αιτία πρόκλησης του φαινομένου της εξάντλησης των ορυκτών πόρων είναι ο τομέας των μεταφορών, ο οποίος συνεισφέρει με ποσοστό 77,73%. Κατά δεύτερο λόγο στην όξυνση του φαινομένου συμβάλλουν οι εποξικές ρητίνες και τα υαλονήματα με ποσοστά 24,99% και 1,4% αντίστοιχα.



Εικόνα 26: Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της εξάντλησης των ορυκτών πόρων [54]

Όπως αναλύθηκε εκτενώς και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το αιολικό πάρκο “Δίρφυς-Ξεροβούνι” ονομαστικής ισχύος 6 MW, πρόκειται να παράγει 17.870 MWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως. Με βάση την ενεργειακή ανάλυση του πάρκου που έγινε μέσω του λογισμικού RET Screen προέκυψε ότι 26,8 γραμμάρια ισοδύναμου CO₂. Η συγκεκριμένη κρίνεται βρίσκεται μεν εντός των βιβλιογραφικών ορίων παραγωγής ρύπων για τα αιολικά πάρκα αλλά θεωρείται κάπως αυξημένη, γεγονός το οποίο οφείλεται αφενός στην μικρή σχετικά τεχνογνωσία της Ελλάδας στον συγκεκριμένο τομέα και αφετέρου στο εκτεταμένο όγκο μεταφορών που πραγματοποιήθηκαν για την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της μελέτης θεωρούνται ικανοποιητικά και η εγκατάσταση του αιολικού πάρκου μια συμφέρουσα επένδυση τόσο από οικονομικής όσο και από περιβαλλοντικής άποψης.

6. Συμπεράσματα

Είναι πλέον επιστημονικά αποδεδειγμένο το γεγονός ότι, το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με αυτό της αύξησης των εκπομπών CO₂. Η χειροτέρευση του συγκεκριμένου φαινομένου ξεκίνησε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα εξαιτίας της βιομηχανικής επανάστασης και από τότε μέχρι σήμερα έχει παρατηρηθεί αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου της τάξης του 45%. Κατά συνέπεια, η επιστημονική κοινότητα καταβάλλει κάθε δυνατή προσπάθεια τόσο για την μείωση των συγκεκριμένων εκπομπών όσο για τον περιορισμό του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Ένας από τους πλέον υπεύθυνους τομείς σε ό,τι έχει να κάνει με την αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα είναι αυτός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα καύσιμα και οι μηχανισμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετές δεκαετίες παράγουν υπέρογκες ποσότητες CO₂ και άλλων πιο τοξικών ρύπων όπως είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος που γίνεται προσπάθεια για να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις παραγωγής της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ΑΠΕ. Οι πλέον διαδομένοι τρόποι αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά πάρκα. Ωστόσο, δεν θα πρέπει να αγνοούνται οι τυχόν επιπτώσεις που μπορεί να έχει η εγκατάσταση και η λειτουργία τους τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία.

Η πλέον χρήσιμη και αξιόπιστη μεθοδολογία ολοκληρωμένης εκτίμησης των επιπτώσεων της παραγωγής και χρήσης ενός προϊόντος ή μιας παραγωγικής διαδικασίας, είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζεται με σαφήνεια από το διεθνή οργανισμό πιστοποίησης ISO 14040 και 14044, ο οποίος καθορίζει τον τρόπο υπολογισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το σύνολο της εκάστοτε παραγωγικής διαδικασίας ξεκινώντας από την παραγωγή, τις μεταφορές, τη λειτουργία, τη συντήρηση και την αξιοποίηση των υλικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει 4 στάδια, τον καθορισμό του στόχου και του αντικειμένου της μελέτης, την απογραφή των δεδομένων, την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με τις βελτιωτικές προτάσεις. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την ανάλυση της λειτουργικής μονάδας, την περιγραφή του υπό-μελέτη συστήματος και την ανάλυση των δεδομένων και των υποθέσεων εργασίας. Το δεύτερο στάδιο είναι μια εκτενής καταγραφή των δεδομένων του συστήματος όπως είναι οι ανάγκες σε υλικά και ενέργεια και τα παραγόμενα προϊόντα. Στα πλαίσια του επόμενου σταδίου πραγματοποιείται ο υπολογισμός των παραγόμενων ρύπων και των επιπτώσεων που αυτοί προκαλούν στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Το τέταρτο στάδιο της μεθοδολογίας περιλαμβάνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τις προτάσεις για τον περιορισμό των επιπτώσεων.

Η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου αποτελεί μια εξαιρετική επιλογή για τον ελληνικό χώρο, ο οποίος βρίσκεται από περιοχές στις οποίες επικρατεί ισχυρό αιολικό δυναμικό, με αποτέλεσμα το αιολικά πάρκα να λειτουργούν πολύ αποδοτικά. Το

αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετά την κατασκευή, την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τέλος την απεγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου υπό το πρίσμα της μεθοδολογίας της ανάλυσης κύκλου ζωής.

Οι βασικοί πυλώνες στους οποίους στηρίζεται η συγκεκριμένη μεθοδολογία ανάλυσης είναι ο υπολογισμός των επιπτώσεων του αιολικού πάρκου σε συνδυασμό με την προσπάθεια μέσω προτάσεων βελτιστοποίησης για περαιτέρω περιορισμό των επιπτώσεων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθούν και τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από αυτή, καθώς κάποια πιθανή αύξηση της αποτελεσματικότητας των παραγωγικών διαδικασιών συνεπάγεται τη μείωση του κόστους. Ακόμη, η εφαρμογή μιας μελέτης AKZ στα πλαίσια ενός προϊόντος δημιουργεί τις προϋποθέσεις για τον προσδιορισμό τόσο των πλεονεκτημάτων όσο και των μειονεκτημάτων ανοίγοντας διάπλατα το δρόμο για περαιτέρω βελτίωση του.

Ωστόσο, δεν θα πρέπει να αγνοούνται και κάποια από τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας όπως είναι η απουσία της απόλυτης ακρίβειας των εισροών που ενδεχομένως θα επιφέρουν αντίστοιχες ανακρίβειες και στα αποτελέσματα της μελέτης. Επίσης, σε ό,τι αφορά τα απαιτούμενα δεδομένα για την πραγματοποίηση τέτοιου είδους μελετών σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολο να βρεθούν στην πρωτογενή μορφή τους και κατ' ανάγκη στρεφόμαστε σε δευτερογενή δεδομένα.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός και η μελέτη του αιολικού πάρκου “Δίρφυς-Ξεροβούνι” ισχύος 6 MW σε μια περιοχή του νομού Εύβοιας, της οποίας το αιολικό δυναμικό κρίθηκε ως πολύ ικανοποιητικό για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Η συγκεκριμένη περιοχή συγκέντρωνε και άλλα πλεονεκτήματα όπως η απουσία ιδιαίτερης βλάστησης και η αρκετά μεγάλη απόσταση από οικισμούς προς αποφυγή προβλημάτων όχλησης.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας της AKZ στα πλαίσια του συγκεκριμένου αιολικού πάρκου ανέδειξε τόσο τα οφέλη από την λειτουργία του όσο και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται. Αρχικά, θα πρέπει να ειπωθεί ότι το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που θα διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου ανέρχεται σε 17.870 MWh ετησίως, ποσό εξαιρετικά ικανοποιητικό αν ληφθεί υπόψη η ισχύς του αιολικού πάρκου. Οι αντίστοιχοι περιβαλλοντικοί ρύποι που παράγονται ανέρχονται σε 478,9 τόνους ισοδύναμου CO₂, η πλειονότητα των οποίων οφείλεται κατά κύριο λόγο στις μεταφορές και κατά δεύτερο λόγο σε υλικά όπως οι εποξικές ρητίνες και τα υαλονήματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ανεμογεννητριών. Ωστόσο, η συγκεκριμένη ποσότητα των παραγόμενων ρύπων δεν θα πρέπει να μας προβληματίζει, αφού αντιστοιχεί σε 26,8 gr CO₂/kWh ηλεκτρικής ενέργειας, ποσότητα η οποία βρίσκεται εντός των ορίων που βρέθηκαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση για τους παραγόμενους ρύπους ενός αιολικού πάρκου ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι για να παραχθούν 17.870 MWh χρησιμοποιώντας συμβατικά συστήματα παραγωγής

ενέργειας και πιο συγκεκριμένα την καύση του λιγνίτη, η ποσότητα των παραγόμενων ρύπων θα ανερχόταν σε 27.341,1 τόνους ισοδύναμου CO₂.

Σε ό,τι αφορά την οικονομική αξιολόγηση του εγχειρήματος, πρόκειται για μια εξαιρετικά συμφέρουσα επένδυση της οποίας η απόσβεση πραγματοποιείται σε χρονικό ορίζοντα 7 ετών, χρονικό διάστημα ιδιαίτερος ικανοποιητικό αν ληφθεί υπόψη ότι ο κύκλος ζωής του αιολικού πάρκου υπολογίζεται σε 20 έτη. Εν τέλει, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου αποτελεί μια εξαιρετικά συμφέρουσα επιλογή για τις περιοχές που πληρούν τις προϋποθέσεις, οι οποίες στην Ελλάδα είναι αρκετές. Είναι εμφανής η τεράστια μείωση των παραγόμενων ρύπων ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αξιοποίησης των ΑΠΕ και ειδικότερα της αιολικής ενέργειας, η οποία θα έχει μόνο θετικά αποτελέσματα τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία.

7. Βιβλιογραφία

1. Ασημακόπουλος,Δ "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας" Δυναμικό και Τεχνολογίες, Εκδόσεις Σοφία, Αθήνα (2015).
2. Χαραλαμπίδης,Δ,Κονταράς,Β,Παυλακέλλη,Ν 2001, Αειφόρος χρήση ενέργειας.
3. Ψαρράς, Ι., & Πατλιτζιάνας, Κ. (2005). Διαχείριση ενέργειας και περιβαλλοντική πολιτική. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, Αθήνα.
4. Σμιδαλάς,Γ, Σταμόπουλος,Κ "Ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα."(2018).
5. <https://windeurope.org/> , "2020 Statistics and the outlook for 2021-2025"
6. Shahan, Z. (2014, Νοέμβριος 21). History of Wind Turbines. Renewable Energy
7. <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>
8. Γκίζας,Γ, Μαζαράκης,Α. "Ανανεώσιμη Τεχνολογία-Ανεμογεννήτριες." (2021).
9. Islam, M., Ting, S.-K., D., Fartaj, A., (2008) Aerodynamic models for Darrieus type straight-bladed vertical axis wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008)
10. http://www.ecosources.info/en/topics/Darrieus_vertical_axis_wind_turbine
11. Γ.Μπεργελές "Ανεμοκινητήρες" Εκδόσεις Συμεών-Αθήνα 1995 ISBN: 978-960-7888-57-X
12. http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm
13. Óskarsdóttir, M. (2014). A general description and comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines. Iceland: Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science University of Iceland
14. Battisti, L.; Persico, G.; Dossena, V.; Paradiso, B.; Castelli, M.R.; Brighenti, A.; Benini, E. Experimental benchmark data for H-shaped and troposkienVAWT architectures. Renew. Energy 2018, 125, 425–444.
15. Altan, B.D.; Atılgan, M. An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor. Energy Convers. Manag. 2008, 49, 3425–3432, doi:10.1016/j.enconman.2008.08.021.
16. Battisti, L.; Brighenti, A.; Benini, E.; Castelli, M.R. Analysis of different blade architectures on small VAWT performance. In Journal of Physics: Conference Series; IOP Publishing: Bristol, UK, 2016; Volume 753, p. 062009
17. https://ec.europa.eu/info/index_en , "Wind energy in Europe 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025"
18. Gilbert M. Masters, Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ΠΕΔΙΟ ΕΚΔΟΤΙΚΗ,ΔΙΑΦΗΜΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΡΑΔΙΟΤΗΛΕΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ Α.Ε, 2016 ISBN: 9789605467432
19. Ιωάννης,Κ.Καλδέλλης "Διαχείριση της αιολικής ενέργειας", εκδόσεις Σταμούλη 2005 ISBN: 9603515760
20. <https://energypress.gr/news/valorem-ikanopoiisi-gia-tin-epilogi-toy-aiolikoy-parkoy-ton-28-mw-sti-v-ellada>
21. <https://www.contentarchive.wwf.gr/> "Θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας"
22. Μπινόπουλος,Ε Χαβιαρόπουλος,Π "Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων: ‘Μύθος και πραγματικότητα’" (ΚΑΠΕ) "
23. <https://www.contentarchive.wwf.gr/> "Επιπτώσεις της λειτουργίας των αιολικών πάρκων"
24. National Center for Environmental Prediction (NCEP). Reanalysis data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, U.S.A.

25. AWS Scientific Inc. National Renewable Energy Laboratory. Wind resource assessment handbook. Fundamentals for conducting a successful monitoring program.
26. Zagmani A., Masoni P., Buomanamici R., Ekvall T., Rydberg T., Guinee J., Heijungs R., Huppes G., "Life Cycle Assessment: Past, Present, Future". Journal of Environmental Science and Technology
27. Αβραμίδης Μ "Ανάλυση κύκλου ζωής ως υποστηρικτικό εργαλείο". Λευκωσία Πανεπιστήμιο Κύπρου, 2003
28. Tilche A., Galatola M "Life cycle assessment in the European seventh framework programme for research" (2007-2013). International Journal of LCA. 2008
29. Διακάκη Χ., Γρηγορούδης Ε. "Ανάλυση του Κύκλου Ζωής ΑΚΖ: Ένα εργαλείο ορθολογικής διαχείρισης των φυσικών πόρων. Φυσικοί πόροι, περιβάλλον και ανάπτυξη" Εκδόσεις Τζιόλα, 2008. ISBN:978-960-418-153-7
30. Pieragostini C. Mussati M.C., Aguirre P "On process optimization considering LCA methodology". Journal of Environmental Management. 2012
31. Joint Research Centre (JRC, European Commission). ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Brussels : International Reference Life Cycle Data System, 2010
32. Uddin, M. S., & Kumar, S. (2014). Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique. Journal of cleaner production, 69, 153-164.
33. ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment -Principles and Framework. Geneva: International Standards Organization, 2006.
34. https://www.researchgate.net/figure/The-phases-of-an-LCA-according-to-ISO-14044-2006_fig1_333517550 [accessed 7 Oct, 2021]
35. https://www.researchgate.net/figure/General-structure-of-the-LCIA-framework-adapted-from-Jolliet-et-al-2003b-Solid-arrows_fig2_225365550
36. Jolliet O., Jolliet A., Crettaz P., Saade - Sbeih M., Shaked S. (2016), Environmental Life Cycle Assessment, CRC Press.
37. Guinee J.B., Gorree M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A., Oers L., Sleswijk A. W., Suh S., Haes H. A., Bruijn H., Duin R., Huijbreg M., Lindeijer E., Roorda A., Bernhard L., Weidema B. (2001), Life Cycle Assessment, An operational guide to the ISO standards, The New Dutch Guide, Final Report 2001.
38. Hardi, P., & Zdan, T. (1997). Assessing sustainable development: principles in practice.
39. European Environment Agency. Environmental Management Tools for SMEs: A handbook .Copenhagen : European Environment Agency, 1998
40. Fava J., Valdivia S., Leeuw B., Ciroth A., Jensen A., Sonnemann G., New activities launched in Warsaw and consultations on emerging ideas. International Journal of LCA. 2008.
41. Life cycle assessment on electricity production of an onshore V112-3.45MW Windplant, Vestas 2013
42. International Standards Organization. ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment - Principles and Framework. Geneva : International Standards Organization, 1997
43. Κορωνάιος Χρ. Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) Ε.Μ.Π. "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

44. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of a 40 MW wind farm with consideration of the infrastructure, Science Direct
45. Padey, P., Blanc, I., Le Boulch, D., & Xiusheng, Z. (2012). A simplified life cycle approach for assessing greenhouse gas emissions of wind electricity. *Journal of Industrial Ecology*, 16, S28-S38.
46. Schleisner, L. (2000). Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. *Renewable energy*, 20(3), 279-288.
47. Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *The international journal of life cycle assessment*, 8(6), 324-330.
48. <https://earth.google.com/web/>
49. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/597-aaer-a1500-70>
50. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>
51. <https://www.marinetraffic.com/>
52. <https://www.google.com/maps>
53. <https://nexus.openlca.org/databases>
54. <https://www.openlca.org/>