



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας. Ανάλυση Κύκλου Ζωής υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης, συνολικής ισχύος 216 MW

ΜΗΛΙΩΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
A.E.M.: 1663

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: **Ρ.Ε.Π. Σωτηροπούλου**

KOZANH, 2021

Πρόλογος

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο αμφιλεγόμενες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συχνά αποτελεί πεδίο αντιπαράθεσης μεταξύ των μελών της εκάστοτε κοινότητας. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αποτυπωθεί πλήρως το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαθέσιμες μορφές παραγωγής ενέργειας και να εξεταστούν οι επιπτώσεις και τα οφέλη που προκύπτουν από τη στροφή του ενεργειακού τομέα προς την ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε μελέτη περίπτωσης υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης, συνολικής ισχύος 216 MW. Στο πλαίσιο της μελέτης πραγματεύονται, αφενός οι επιπτώσεις που προκύπτουν στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, αφετέρου το ανθρακικό αποτύπωμα του αιολικού πάρκου και ο ρόλος που διαδραματίζει στην ενεργειακή μετάβαση για την οικοδόμηση ενός μοντέλου βιώσιμης ανάπτυξης.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κα. Ραφαέλα Σωτηροπούλου, που δέχτηκε να συνεργαστούμε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την ορθή καθοδήγηση και τις εύστοχες επισημάνσεις που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται μια προσπάθεια προκειμένου να αποτυπωθεί εκτενώς, τόσο ο αντίκτυπος της αιολικής ενέργειας στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, όσο και το ρόλο που διαδραματίζει στην αειφόρο ανάπτυξη που σχεδιάζεται και υλοποιείται με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιωσιμότητα. Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί μια από τις πιο χρήσιμες και αξιόπιστες μεθόδους που διαθέτουμε, για να αξιολογούμε την αειφορία ενός αγαθού ή μιας υπηρεσίας. Κατά τη μελέτη μιας αιολικής μονάδας, η ανάλυση κύκλου ζωής, συμβάλλει στον προσδιορισμό ενός πλήθους μεγεθών και όρων, που μας βοηθούν να κατανοήσουμε τον τρόπο κατά τον οποίο η αιολική ενέργεια επιδρά στη συνεισφορά ή στην αντιμετώπιση ορισμένων περιβαλλοντικών ζητημάτων, συγκριτικά με τους υπόλοιπους διαθέσιμους τύπους παραγωγής ενέργειας.

Ως εκ τούτου, παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα στάδια που περιγράφουν τον κύκλο ζωής μιας αιολικής μονάδας, το ανθρακικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας σύμφωνα με τις εναρμονισμένες εκτιμήσεις της δημοσιευμένης βιβλιογραφίας, το μέγεθος των αέριων ρύπων που εκτοπίζεται από την αιολική ενέργεια και ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να αντισταθμιστούν οι ρύποι που προκαλούνται από τη δημιουργία ενός αιολικού σταθμού. Στη συνέχεια, εξετάζεται και αξιολογείται η διατάραξη της ισορροπίας του οικοσυστήματος που μπορεί να επιφέρει η παρουσία ενός χερσαίου ή υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Επιπλέον, αναφέρονται οι κύριοι λόγοι στους οποίους αποδίδεται η πλειονότητα των αντιδράσεων της εκάστοτε κοινότητας, καθώς και ορισμένα από τα μέτρα που εφαρμόζονται προκειμένου να μετριαστούν.

Τέλος, πραγματοποιείται ανάλυση κύκλου ζωής για τη μελέτη περίπτωσης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης. Το εν λόγω αιολικό πάρκο πρόκειται να αποτελέσει το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Ελλάδας και θα διαθέτει συνολική ισχύ 216 MW. Για το σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκαν ειδικά υπολογιστικά εργαλεία και κατάλληλες βάσεις δεδομένων. Προσδιορίστηκαν οι ρύποι που εκλύονται σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής και οι οποίοι συντελούν στις διάφορες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως στα φαινόμενα της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, της φωτοχημικής οξείδωσης, του ευτροφισμού, της ανθρώπινης τοξικότητας κ.ά. Επιπλέον, εκτιμήθηκε η συνολική ενέργεια που δαπανάται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του υπεράκτιου αιολικού σταθμού και ο χρόνος που απαιτείται για να αποπληρωθεί τόσο η καταναλισκόμενη ενέργεια όσο και οι προκληθέντες εκπομπές άνθρακα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, υποδεικνύουν τη συνεισφορά του συγκεκριμένου αιολικού πάρκου στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, στη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

Λέξεις κλειδιά: «Ανάλυση κύκλου ζωής, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ανθρακικό αποτύπωμα, ένταση άνθρακα, ενσωματωμένη ενέργεια, περίοδος αποπληρωμής άνθρακα, αιολικό πάρκο, ανεμογεννήτριες, αιολική ενέργεια»

Abstract

In the context of this thesis, an effort is made to extensively reflect the impact of wind energy on the natural and anthropogenic environment, as well as the role it plays in the sustainable development. The Life Cycle Analysis (LCA) methodology, consists of one of the most useful and reliable methods to assess the sustainability of a product or a service. When we study a wind power plant, the LCA helps us identify a number of sizes and terms that contribute to understand how wind energy affects different environmental issues, compared to the other available types of energy production.

Therefore, all stages that describe the life cycle of wind energy, the carbon footprint of wind energy according to the harmonized estimates of the literature, the carbon emissions which are displaced by wind energy and the time that is required to payback carbon emissions, are presented in detail. Then, the disturbance of the ecosystem balance that the existence of an onshore or offshore wind farm can cause, was assessed. In addition, a specific reference is made, in order to present the main reasons for the society's concerns, as well as some measures implemented to mitigate them.

Finally, the LCA methodology is applied for the case study of an offshore wind farm in the Alexandroupolis area. This wind farm will be the first offshore wind farm in Greece and it will have a total capacity of 216 MW. For this purpose, special software tools and appropriate databases have been used. Hence, the carbon emissions of each one stage of the life cycle, which contribute to the various categories of environmental impact, such as global warming, photochemical oxidation, eutrophication, human toxicity, etc., have been identified. Moreover, the total energy demand to establish the offshore wind power plant and the time that is required to payback both the energy consumed and the induced carbon emissions, have been evaluated. The results obtained, indicate the contribution of this wind farm to the mitigation of the environmental impacts, through the production of electricity during its life cycle.

Keywords: *«Life Cycle Assessment, environmental impacts, carbon footprint, carbon intensity, embodied energy, carbon payback period, wind farm, wind turbines, wind energy»*

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΜΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΗΣ ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑΣ

Δηλώνω ρητά ότι η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο:

« Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας. Ανάλυση Κύκλου Ζωής υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης, συνολικής ισχύος 216 MW »

καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη της κας. Ραφαέλας-Ελένης Σωτηροπούλου, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Γεώργιος Μηλιώνης & Ραφαέλα-Ελένη Σωτηροπούλου, Νοέμβριος 2021, Κοζάνη



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Εικόνες.....	10
Πίνακες.....	11
Σχήματα.....	12

Κεφάλαιο 1. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής και ο ρόλος των ανανεώσιμων

πηγών ενέργειας.....	14
1.1. Κλιματική αλλαγή.....	14
1.1.1 Ορισμός.....	14
1.1.2. Αίτια κλιματικής αλλαγής.....	15
1.1.3. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής.....	15
1.1.4. Πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	16
1.2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	16
1.2.1. Ορισμός.....	16
1.2.2. Οι κυριότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	17
1.3. Αιολικά συστήματα.....	18
1.3.1. Προέλευση ανέμου.....	18
1.3.2. Η ιστορία των ανεμογεννητριών.....	20
1.3.3. Η δομή των ανεμογεννητριών.....	21
1.3.4. Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	26
1.3.5. Χρησιμοποιούμενοι τύποι γεννητριών.....	32
1.3.5.1. Ασύγχρονες ή επαγωγικές γεννήτριες.....	32
1.3.5.2. Σύγχρονες γεννήτριες.....	36

Κεφάλαιο 2. Ο αντίκτυπος της αιολικής ενέργειας στην ατμοσφαιρική ρύπανση.....39

2.1. Άνθρακας, αέρια του θερμοκηπίου και λοιπές εννοιολογήσεις.....	39
2.2. Ανάλυση κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου – Μεθοδολογική προσέγγιση.....	40
2.2.1. Στάδια του κύκλου ζωής.....	41
2.2.2. Παράμετροι που επιδρούν στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.....	44
2.2.3. Η συμβολή κάθε σταδίου του κύκλου ζωής στις συνολικές εκπομπές ρύπων.....	48
2.3. Εξόφληση ενεργειακού χρέους.....	50
2.3.1. Κυρώσεις απόδοσης.....	51
2.3.2. Οριακές εκπομπές.....	53
2.3.3. Περίοδος αποπληρωμής.....	54
2.4. Το ανθρακικό αποτύπωμα των ανεμογεννητριών ως συνάρτηση της ονομαστικής τους ισχύος.....	55
2.5. Το ανθρακικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας συγκριτικά με το αντίστοιχο άλλων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας.....	58

2.6. Η συμβολή της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	60
--	----

Κεφάλαιο 3. Ο αντίκτυπος της αιολικής ενέργειας στο φυσικό και ανθρωπογενές

περιβάλλον.....	63
3.1. Χερσαία αιολικά πάρκα – Δυνητικές επιπτώσεις.....	63
3.1.1. Πτηνά.....	63
3.1.2. Χειρόπτερα.....	70
3.1.3. Θηλαστικά, ερπετά, ασπόνδυλα.....	75
3.1.4. Αποδόσωση και διάβρωση του εδάφους.....	77
3.2. Υπεράκτια αιολικά πάρκα – Δυνητικές επιπτώσεις.....	77
3.2.1. Βενθικό οικοσύστημα.....	78
3.2.2. Ψάρια.....	83
3.2.3. Θαλάσσια θηλαστικά.....	84
3.3. Εκπομπές θορύβου.....	85
3.4. Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.....	89
3.5. Αισθητικές επιπτώσεις – Οπτική όχληση – Αλλοίωση τοπίου.....	94

Κεφάλαιο 4. Ανάλυση κύκλου ζωής υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της

Αλεξανδρούπολης.....	101
4.1. Γενικά χαρακτηριστικά αιολικού πάρκου – Περιγραφή έργου.....	101
4.2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	103
4.3. Ανάλυση κύκλου ζωής του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	106
4.3.1. Όρια του συστήματος.....	106
4.3.2. Συλλογή δεδομένων – Παραδοχές.....	107
4.3.2.1. Στάδιο Α. Εξόρυξη πρώτων υλών και κατασκευή επιμέρους τμημάτων.....	107
4.3.2.2. Ηλεκτρική διασύνδεση αιολικού πάρκου.....	108
4.3.2.3. Στάδιο Β1. Μεταφορά των ανεμογεννητριών.....	110
4.3.2.4. Στάδιο Β2. Εγκατάσταση των ανεμογεννητριών.....	112
4.3.2.5. Στάδιο Γ. Λειτουργία και συντήρηση.....	114
4.3.2.6. Στάδιο Δ. Παροπλισμός.....	116
4.3.2.7. Τέλος του κύκλου ζωής, διάθεση αποβλήτων και ανακύκλωση.....	116
4.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	118
4.4.1. Συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων.....	118
4.4.2. Ένταση άνθρακα.....	122
4.4.3. Περίοδος αποπληρωμής της ενσωματωμένης ενέργειας.....	123
4.4.3. Περίοδος αποπληρωμής του άνθρακα.....	125

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....

5.1. Συμπεράσματα.....	126
5.2. Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	130

Βιβλιογραφία.....

Ιστοσελίδες.....137

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....139

Εικόνες

Εικόνα 1. Λεπτομερής απεικόνιση του εσωτερικού τμήματος της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.....	21
Εικόνα 2. (α) Δικτυωτός πύργος Lattice (β) Σωληνωτός πύργος Tubular.....	22
Εικόνα 3. Σύστημα ελέγχου βήματος (Pitch control).....	25
Εικόνα 4. Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.....	27
Εικόνα 5. (α) Ανεμογεννήτρια Upwind με σύστημα προσανατολισμού (β) Ανεμογεννήτρια Downwind χωρίς σύστημα προσανατολισμού.....	28
Εικόνα 6. (α) Savonius δρομέας κατακόρυφου άξονα (β) Darrieus δρομέας κατακόρυφου άξονα.....	29
Εικόνα 7. Μαγνητική ανεμογεννήτρια τύπου Maglev.....	31
Εικόνα 8. Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού σταθερής ταχύτητας.....	34
Εικόνα 9. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μεταβλητής ταχύτητας.....	34
Εικόνα 10. Επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση μειωμένης μεταβλητής ταχύτητας.....	36
Εικόνα 11. Σύγχρονη γεννήτρια (δακτυλιοφόρου δρομέα / μόνιμου μαγνήτη) μεταβλητής ταχύτητας.....	37
Εικόνα 12. Όρια συστήματος σε χερσαίο αιολικό πάρκο.....	42
Εικόνα 13. Όρια συστήματος σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο.....	43
Εικόνα 14. Διάφοροι τύποι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών ανάλογα με το βάθος του πυθμένα.....	79
Εικόνα 15. Το φαινόμενο της διασωλήνωσης που αναπτύχθηκε σε μονοπάσσαλη θεμελίωση (αριστερά) και σε θεμελίωση τύπου πλέγματος (δεξιά).....	81
Εικόνα 16. Προστασία κατά της υδραυλικής υποσκαφής με τρεις στρώσεις χαλικιών διαφορετικού διαμετρήματος.....	81
Εικόνα 17. Το φαινόμενο της ιζηματοπόθεσης και ο σχηματισμός νεφών “αιωρούμενης” σωματιδιακής ύλης εντός του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.....	82
Εικόνα 18. Ο φραγμός του σήματος (κόκκινο χρώμα) που προκαλείται στο πίσω μέρος της ανεμογεννήτριας.....	91
Εικόνα 19. Τα ραντάρ εναέριου ελέγχου απαρτίζονται από το ραντάρ πρωτογενούς επιτήρησης (PSR) και από το ραντάρ δευτερογενούς επιτήρησης (SSR).....	93
Εικόνα 20. Ζώνη κάλυψης του ραντάρ συναρτίζει του ανάγλυφου και της καμπυλότητας της γης.....	94
Εικόνα 21. Ο οπτικός αντίκτυπος ενός τοπίου συναρτίζει της απόστασης από τη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου.....	96
Εικόνα 22. Το θαλάσσιο οικόπεδο εντός του οποίου σχεδιάζεται να αναπτυχθεί το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Αλεξανδρούπολης.....	101
Εικόνα 23. Χάρτης Natura 2000, με τις προστατευόμενες περιοχές της Μακεδονίας και της Θράκης.....	104
Εικόνα 24. Χάρτης με κατανομή πιθανότητας ύπαρξης λειμώνων της Ποσειδωνίας, στην ευρύτερη περιοχή του Θρακικού πελάγους.....	105

Εικόνα 25. Όρια του συστήματος του υπό μελέτη υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	107
Εικόνα 26. Πορεία διαδρομής του υπερωκεάνιου πλοίου από το εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρίας στην πόλη Cuxhaven της Γερμανίας, μέχρι το λιμάνι της Αλεξανδρούπολης.....	111
Εικόνα 27. Μοντελοποίηση της ατράκτου της ανεμογεννήτριας εντός του λογισμικού OpenLCA...139	
Εικόνα 28. Καταγραφή των πόρων που αξιοποιούνται και των χημικών ενώσεων που προκαλούνται κατά την παραγωγική διαδικασία του αλουμινίου (διεργασία Aluminium, cast alloy {GLO}).....	140
Εικόνα 29. Η δομή του συστήματος “ανάλυση κύκλου ζωής” και οι ροές που εισάγονται ως αποτέλεσμα της μοντελοποίησης του κάθε σταδίου.....	141
Εικόνα 30. Επιλογή μεθοδολογίας εντός του λογισμικού OpenLCA για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	141
Εικόνα 31. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό OpenLCA σχετικά με την κατηγορία της παγκόσμιας υπερθέρμανσης.....	142
Εικόνα 32. Λεπτομερή παρουσίαση των προκληθέντων χημικών ενώσεων που διαμορφώνουν το δείκτη της παγκόσμιας υπερθέρμανσης.....	143
Εικόνα 33. Επιλογή μεθοδολογίας εντός του λογισμικού OpenLCA για τον υπολογισμό της πρωτογενούς ενέργειας που καταναλώνεται καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.....	144
Εικόνα 34. Η πρωτογενής ενέργεια που καταναλώνεται καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου και η οποία παρήχθη από τη χρήση ορυκτών καυσίμων.....	144

Πίνακες

Πίνακας 1. Διαχείριση υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου	44
Πίνακας 2. Λεπτομερή καταγραφή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση κύκλου ζωής για κάθε ανεμογεννήτρια. Οι δείκτες “Α” και “Β” υποδεικνύουν δύο διαφορετικές ανεμογεννήτριες με ίδια ονομαστική ισχύ. Ο δείκτης “20 years” αναφέρει τις εκπομπές που υπολογίστηκαν με δεδομένο την 20ετή διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας, ενώ ο δείκτης “25 years” αντιπροσωπεύει μια διάρκεια ζωής 25 ετών.....	56
Πίνακας 3. Ο εκτιμώμενος αριθμός πτηνών που θανατώνονται ετησίως (ανά ανεμογεννήτρια) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Ευρώπης.....	65
Πίνακας 4. Ο εκτιμώμενος αριθμός πτηνών που θανατώνονται ετησίως (ανά ανεμογεννήτρια) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής.....	66
Πίνακας 5. Ο εκτιμώμενος αριθμός χειροπτέρων που θανατώνονται ετησίως (ανά ανεμογεννήτρια) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Ευρώπης.....	72
Πίνακας 6. Ο εκτιμώμενος αριθμός χειροπτέρων που θανατώνονται ετησίως (ανά ανεμογεννήτρια) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής.....	73
Πίνακας 7. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του αιολικού πάρκου και της πλησιέστερης κατοικημένης περιοχής, ανάλογα το μέγεθος των ανεμογεννητριών, για διάφορες χώρες της Ευρώπης.....	88
Πίνακας 8. Το επίπεδο αντίθεσης των ανεμογεννητριών συναρτήσει της απόστασης θέασης και των επικρατουςών καιρικών συνθηκών.....	97

Πίνακας 9. Η συνολική έκταση χρησιμοποιούμενης γης, το μέγεθος της οπτικής επίδρασης και η γενική αντίληψη που έχει το ευρύ κοινό για κάθε τύπο ΑΠΕ, σύμφωνα με δεδομένα της δημοσιευμένης βιβλιογραφίας.....	99
Πίνακας 10. Στο συγκριμένο πίνακα αναγράφονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	103
Πίνακας 11. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις ποσότητες των επιμέρους υλικών που απαρτίζουν την ανεμογεννήτρια που επιλέχθηκε για το αιολικό πάρκο της Αλεξανδρούπολης.....	108
Πίνακας 12. Τα είδη και οι ποσότητες των υλικών που απαρτίζουν τα καλώδια διασύνδεσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	109
Πίνακας 13. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις αποστάσεις που διανύει το κάθε τμήμα των ανεμογεννητριών από το χώρο κατασκευής (Siemens Gamesa) έως την τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου (Αλεξανδρούπολη).....	111
Πίνακας 14. Τα κύρια χαρακτηριστικά του αυτοκινούμενου σκάφος MPI Resolution, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών στη θέση ανάπτυξης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.....	112
Πίνακας 15. Συγκεντρωτικός πίνακας με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του χρόνου και της ποσότητας του καυσίμου που απαιτούνται, για την πλήρη εγκατάσταση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	114
Πίνακας 16. Ποσοστό ανακύκλωσης για κάθε είδος υλικού.....	117
Πίνακας 17. Η ποσότητα ρύπων που εκπέμπεται στο περιβάλλον σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	119
Πίνακας 18. Η ένταση άνθρακα του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης και το μέγεθος συνεισφοράς του κάθε σταδίου, για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	123
Πίνακας 19. Το μέγεθος της συνολικής ενέργειας που καταναλώθηκε σε κάθε στάδιο, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	124
Πίνακας 20. Περίοδος αποπληρωμής άνθρακα του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	125

Σχήματα

Σχήμα 1. Στάδια του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου.....	41
Σχήμα 2. Παράγοντες που διαφοροποιούν τις εκτιμήσεις των εκπομπών άνθρακα των αιολικών πάρκων.....	45
Σχήμα 3. Σύγκριση δημοσιευμένων και εναρμονισμένων εκτιμήσεων σχετικά με τους αέριους ρύπους που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων.....	48
Σχήμα 4. Η συμβολή κάθε σταδίου του κύκλου ζωής μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας στις εκπομπές ρύπων.....	49
Σχήμα 5. Λεπτομερής ανάλυση των εκπομπών άνθρακα μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.....	49
Σχήμα 6. (α) Κυρώσεις απόδοσης συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής λιθάνθρακα και συνδυασμένου κύκλου (β) Ένταση των εκπομπών συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας.....	52

Σχήμα 7. Εκπομπές αέριων ρύπων τυπικών συμβατικών σταθμών λιθάνθρακα και συνδυασμένου κύκλου συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας, ονομαστικής ισχύος 488 MW και 492 MW αντίστοιχα.....	53
Σχήμα 8. Περίοδος αποπληρωμής για μελλοντικά (χερσαία) αιολικά πάρκα.....	55
Σχήμα 9. Εκπεμπόμενοι ρύποι ανά κιλοβατώρα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες μορφές παραγωγής ενέργειας (g CO ₂ /kWh).....	59
Σχήμα 10. Σύγκριση των μέσων εκτιμώμενων εκπομπών άνθρακα της αιολικής ενέργειας με τις αντίστοιχες εκπομπές άλλων μορφών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σχήμα διαφαίνεται και το εύρος διακύμανσης των δημοσιευμένων εκτιμήσεων.....	60
Σχήμα 11. Εκπομπές CO ₂ που αποφεύχθηκαν την περίοδο 2011-2016 μέσω της αιολικής ενέργειας στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	61
Σχήμα 12. Εισαγωγές ορυκτών καυσίμων που αποφεύχθηκαν την περίοδο 2011-2016 μέσω της αιολικής ενέργειας στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	62
Σχήμα 13. Η θνησιμότητα που προκαλεί η αιολική ενέργεια στα πτηνά συγκριτικά με άλλες πηγές θνησιμότητας.....	70
Σχήμα 14. Στάθμη θορύβου διαφόρων ηχητικών πηγών.....	89
Σχήμα 15. Το μέγεθος της οπτικής όχλησης συναρτήσει της απόστασης θέασης των ανεμογεννητριών. Η τιμή 3,00 αποτελεί ουδέτερη τιμή. Οι πέντε διαφορετικές γραμμές αντιπροσωπεύουν τα πέντε διαφορετικά σενάρια καιρικών συνθηκών (Πίνακας 8).....	98
Σχήμα 16. Οπτικοποίηση των δεδομένων του Πίνακα 9, για κάθε τύπο ΑΠΕ. Ο εσωτερικός κύκλος αντιπροσωπεύει την έκταση της γης που καταλαμβάνει ο χώρος της εγκατάστασης και ο εξωτερικός κύκλος υποδεικνύει την έκταση της περιοχής κατά την οποία μπορεί να γίνει ορατός ο χώρος της εγκατάστασης. Η δυσφορία του κοινού απεικονίζεται μέσω της απόχρωσης της “σκίασης”.....	100
Σχήμα 17: Η καμπύλη ισχύος της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας Siemens SWT-3,6-120.....	102
Σχήμα 18. Η διάταξη των ανεμογεννητριών και ο τρόπος διασύνδεσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	110
Σχήμα 19. Διεργασίες που πραγματοποιούνται κατά το τέλος του κύκλου ζωής και ο τρόπος συνεισφοράς της κάθε διεργασίας στο ανθρακικό αποτύπωμα.....	118
Σχήμα 20. Ποσοστό συνεισφοράς κάθε φάσης του κύκλου ζωής, στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	119
Σχήμα 21. Ποσοστό συνεισφοράς του κάθε υλικού, στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	120
Σχήμα 22. Ποσοστό συνεισφοράς του κάθε τμήματος, στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	121
Σχήμα 23. Απεικονίζεται το ποσοστό της ενέργειας (ανανεώσιμης και μη ανανεώσιμης) που δαπανήθηκε σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.....	124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1. Κλιματική αλλαγή

1.1.1 Ορισμός

Με τον όρο κλίμα, νοούνται οι μέσες καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα τόπο για πολλά χρόνια. Η κλιματική αλλαγή, χαρακτηρίζεται ως ένα παγκόσμιο φαινόμενο μεταβολής των καιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, βροχοπτώσεις, άνεμος) και αποδίδεται κατά κύριο λόγο στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Ως αποτέλεσμα της συστηματικής και παρατεταμένης απόκλισης από τη μέση κλιματική κατάσταση, απειλείται τόσο μακροπρόθεσμα όσο και βραχυπρόθεσμα η βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων του πλανήτη, η σταθερότητα της παγκόσμιας οικονομίας καθώς και το ίδιο το μέλλον της ανθρωπότητας. Η παγκόσμια υπερθέρμανση, αποτελεί μόνο μια πτυχή της κλιματικής αλλαγής αφού αναφέρεται στην άνοδο της παγκόσμιας θερμοκρασίας, ως συνέπεια των αυξανόμενων συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Πολλές φορές, το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, αποδίδεται ή ταυτίζεται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ωστόσο, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, υπάρχει από μόνο του στη φύση και χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Είναι μια φυσική διαδικασία που θερμαίνει την επιφάνεια της Γης και διατηρεί τη θερμοκρασία της περίπου 33 βαθμούς Κελσίου θερμότερη από ότι θα ήταν διαφορετικά, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για την ύπαρξη της ζωής. Όταν η ενέργεια του ήλιου φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης, ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από την ατμόσφαιρα (αέρια και αερολύματα), τα νέφη, τη ξηρά και τους ωκεανούς, ενώ ένα ποσοστό αυτής επανακτινοβολείται πίσω στο διάστημα. Το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί. Το πρόβλημα στο ενεργειακό αυτό ισοζύγιο, προκύπτει από την αύξηση των συγκεντρώσεων των θερμοκηπιακών αερίων που τελικά δεσμεύουν περισσότερη θερμότητα από ότι σε μια αδιατάρακτη ισορροπία, προκαλώντας υπερθέρμανση. Ορισμένα από τα πιο σημαντικά αέρια του θερμοκηπίου, πέρα από τους υδρατμούς είναι, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄), το οξείδιο του αζώτου (NO_x), το όζον (O₃) και ορισμένες τεχνητές χημικές ουσίες όπως οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs).

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), δημιουργήθηκε το 1988, με σκοπό να μελετηθεί η εξέλιξη του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής και να αποτυπωθούν οι συνέπειες της. Η IPCC δημοσίευσε την πρώτη της έκθεση το 1990, ενώ η τελευταία τους έκθεση πραγματοποιήθηκε το 2018, με κύριο θέμα την αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 1,5 °C συγκριτικά με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα. Ουσιαστικά, αυτές οι εκθέσεις αποτελούν μια προσπάθεια αποτύπωσης της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη και ένα κίνητρο προκειμένου να εφαρμοστούν νέες στρατηγικές και νέες πολιτικές για την αντιμετώπιση της.

1.1.2. Αίτια κλιματικής αλλαγής

Πολλοί είναι οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν έως ένα βαθμό το κλιματικό σύστημα της γης. Μερικοί από αυτούς αποδίδονται στη φύση, ενώ άλλοι στην ανθρωπογενή δραστηριότητα.

Γενικά, υπάρχουν ορισμένοι φυσικοί κύκλοι που μπορούν να προκαλέσουν την εναλλαγή του κλίματος σε κατάσταση θέρμανσης και ψύξης. Η Γη, καθώς βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τον ήλιο, η πορεία και η κλίση του άξονά της μπορούν ελαφρώς να μεταβληθούν. Αυτές οι μεταβολές είναι γνωστές ως κύκλοι Milankovitch και καθορίζουν την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη. Ωστόσο, οι κύκλοι Milankovitch λαμβάνουν χώρα σε δεκάδες ή και εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια και θεωρείται απίθανο να ευθύνονται για τις αλλαγές που βλέπουμε σήμερα στο κλίμα. Επίσης, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Όμως, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, τα ηφαίστεια παράγουν τουλάχιστον 50 φορές λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από ότι οι άνθρωποι, οπότε σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αποδοθεί το σύνολο των ευθυνών στις ηφαιστειακές εκρήξεις (*Causes of climate change*, n.d.).

Αντιθέτως, κατά γενική ομολογία, η κύρια αιτία της κλιματικής αλλαγής, είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα. Μέχρι προσφάτως, η ανθρωπότητα δεν προκαλούσε πολλές εκπομπές αέριων ρύπων. Ωστόσο, η περίοδος της βιομηχανικής επανάστασης, οδήγησε στην εκβιομηχάνιση της κοινωνίας. Δασικές εκτάσεις αποψιλώθηκαν, πόλεις και βιομηχανίες αναπτύχθηκαν και οι ανάγκες για ενέργεια αυξάνονται αδιάκοπα έως και σήμερα. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε για τη μεταφορά, προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, τα οποία συνιστούν και την κύρια πηγή εκπομπών της ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Εξίσου σημαντική πηγή είναι η αποψίλωση των δασών. Η υλοτομία, οι πυρκαγιές και άλλες μορφές υποβάθμισης των δασών, συμβάλλουν στο 20 % των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα. Άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες που δημιουργούν ατμοσφαιρική ρύπανση περιλαμβάνουν τη χρήση λιπασμάτων (πηγή εκπομπών οξειδίων του αζώτου), την κτηνοτροφία (πηγή εκπομπών μεθανίου) και ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες που απελευθερώνουν φθοριούχα αέρια (Denchak, 2017).

1.1.3. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής

Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη, δεν περιορίζεται μόνο στην αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να γίνει αισθητή από τον άνθρωπο ή την τήξη των παγετώνων, αλλά είναι ικανή να επηρεάσει ολόκληρο το οικοσύστημα της Γης. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα, αποτελούν ένα από τα πιο φανερά σημάδια και προμηνύουν για το τι θα ακολουθήσει. Με την πάροδο των χρόνων, τα ακραία καιρικά φαινόμενα εκδηλώνονται πιο εντατικά και με μεγαλύτερη ένταση. Ταυτόχρονα, σε περίπτωση που η παγκόσμια θερμοκρασία αυξηθεί δραματικά, η στάθμη των υδάτων επίσης θα αυξηθεί και οι ωκεανοί θα έρθουν αντιμέτωποι με φαινόμενα όπως της οξίνισης και της αποξυγόνωσης. Το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας, εν μέρει δεσμεύεται από τους ωκεανούς, καθιστώντας τους πιο όξινους. Έτσι, είναι πιθανό να μεταβληθεί η ισορροπία του pH, με αποτέλεσμα να διαταραχθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του βενθικού οικοσυστήματος. Εξίσου σημαντικός

και ορατός είναι ο κίνδυνος ως προς την ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να προκαλέσει περίπου 250.000 επιπλέον θανάτους ετησίως, στο διάστημα μεταξύ 2030 και 2050. Καθώς η παγκόσμια θερμοκρασία αυξάνεται, τόσο αυξάνονται και τα περιστατικά θανάτων που οφείλονται σε καρδιαγγειακές και νεφρικές παθήσεις, ενώ παράλληλα υποβαθμίζεται αισθητά η ποιότητα της ατμόσφαιρας (άσθμα, περισσότερη αερομεταφερόμενη γύρη και μούχλα) προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα (Denchak, 2017).

1.1.4. Πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η πρώτη αξιόλογη προσπάθεια που έγινε προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, υλοποιήθηκε μέσω μιας διακρατικής σύμβασης γνωστή ως Πρωτόκολλο του Κιότο. Το Πρωτόκολλο του Κιότο, εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 1997, αλλά τέθηκε σε ισχύ το Φεβρουάριο του 2005. Εν ολίγοις, η συγκεκριμένη σύμβαση δέσμευσε τις βιομηχανικές χώρες να υιοθετήσουν πολιτικές και μέτρα ώστε να επιτύχουν μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, σύμφωνα με τους καθορισμένους στόχους. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αφότου πέτυχε τους στόχους που είχαν τεθεί στο πλαίσιο του Πρωτοκόλλου του Κιότου για την περίοδο 2008 – 2012, υιοθέτησε το στόχο μέχρι το 2020 να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έως και 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Επιπλέον, σύμφωνα με τη Συμφωνία των Παρισίων, όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχουν δεσμευτεί να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 (συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990) και να καταστήσουν την Ευρωπαϊκή Ένωση την πρώτη κλιματικά ουδέτερη οικονομία και κοινωνία έως το 2050. (Ευρωπαϊκό Συμβούλιο. Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 2021; Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, 2020)

1.2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.2.1. Ορισμός

Ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, χαρακτηρίζεται εκείνη η μορφή ενέργειας που θεωρείται αστείρευτη και ανεξάντλητη στο απώτερο ορατό μέλλον της ανθρωπότητας και μπορεί να αξιοποιηθεί με σταθερό αξιόπιστο και βιώσιμο τρόπο. Κοινή συνιστώσα και αρχή σχεδόν όλων των μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποτελεί ο ήλιος. Όλες οι ΑΠΕ, με εξαίρεση τη γεωθερμία και την παλιρροϊκή ενέργεια, ουσιαστικά αποτελούν έμμεση ηλιακή ενέργεια, αφού ο κύκλος του νερού, η δύναμη του ανέμου και η ανάπτυξη των φυτών, είναι απόρροια της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη. Στον αντίποδα, η ενέργεια που προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα καθώς και η πυρηνική ενέργεια, αποτελούν συμβατικές μορφές ενέργειας.

Πολλές φορές, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποκαλούνται ως εναλλακτικές πηγές ενέργειας, λόγω του ότι αντικαθιστούν τις συμβατικές μορφές ενέργειας, ήπιες, διότι έχουν μικρό αντίκτυπο στο περιβάλλον συγκριτικά με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, και πρόσθετες, επειδή έως και σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο, λειτουργούν συμπληρωματικά και συνυπάρχουν με τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Η ύπαρξη των ΑΠΕ, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια της αειφόρου ανάπτυξης

και την προσπάθεια που εκτυλίσσεται τα τελευταία χρόνια να μειωθούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, καμία μορφή ενέργειας, όσο «πράσινη» και «καθαρή» αν αποκαλείται, δεν έχει μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να αξιοποιηθούν οι ΑΠΕ και μερικές από αυτές συμμετέχουν ήδη σε σημαντικό βαθμό στις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας, κυρίως των αναπτυσσόμενων χωρών. Οι κυριότερες εφαρμογές εντοπίζονται στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, στις μεταφορές (χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, βιοκαύσιμα, υδρογόνο) και στην παραγωγή θερμότητας (χρήση βιομάζας, βιοκαυσίμων, ηλιακών συλλεκτών, γεωθερμίας). (Ανδρίτσος, 2008)

1.2.2. Οι κυριότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Στην παρούσα ενότητα, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη περιγραφή και επισκόπηση των κυριότερων διαθέσιμων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που συμμετέχουν στη διαμόρφωση του παγκόσμιου ενεργειακού μίγματος (Ανδρίτσος, 2008).

Ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια, είναι η ενέργεια που μεταφέρεται στη γη από τον ήλιο. Η ενέργεια του ήλιου, πηγάζει από τις αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης που μετατρέπουν το υδρογόνο σε ήλιο. Η ανώτερη ατμόσφαιρα της γης, λαμβάνει ετησίως περίπου $1,5 \times 10^{18}$ kWh ηλιακής ενέργειας, ενέργεια που είναι περίπου 23.000 φορές μεγαλύτερη από αυτή που καταναλώνει ολόκληρος ο πλανήτης, ενώ στην επιφάνεια της γης προσπίπτει περίπου το 40% της συνολικής ενέργειας. Οι κυριότερες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνουν τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τους ηλιακούς συλλέκτες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα, περιγράφουν την κατασκευή των κτιρίων (σχεδιασμός, υλικά) με κατάλληλο τρόπο προκειμένου να επιτευχθεί σημαντική μείωση στην ενεργειακή κατανάλωση σε τομείς όπως η θέρμανση, η ψύξη και ο φωτισμός. Οι ηλιακοί συλλέκτες, αποτελούν μια ώριμη τεχνολογία και αξιοποιούνται κυρίως στην παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, για τη θέρμανση χώρων (τηλεθέρμανση), σε αγροτικές διεργασίες (ξήρανση δημητριακών), για αφαλάτωση του νερού αλλά και για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεί είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και αποτελούν ιδιαίτερος ευέλικτα συστήματα, αφού μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα, είτε υβριδικά όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας.

Βιομάζα. Με τον όρο βιομάζα, νοείται η οργανική ύλη που προέρχεται από τα φυτά ως αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας. Ωστόσο, περιλαμβάνονται όλα τα υλικά που εμπεριέχουν άνθρακα και τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε ενέργεια (βιοενέργεια). Η βιομάζα, μπορεί να προέρχεται είτε άμεσα από πρωτογενή πηγή (φυτά), είτε έμμεσα από αστικά, βιομηχανικά, ή αγροτικά απόβλητα. Τα υλικά αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για παραγωγή βιοενέργειας ή ισχύος μέσω της καύσης, ή να μετατραπούν σε βιοκαύσιμα (ξυλάνθρακας, βιοντίζελ). Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της βιομάζας αποτελεί η φτωχή θερμοαντική αξία που διαθέτει, γεγονός που καθιστά ασύμφορα υψηλό το κόστος μεταφοράς της.

Αιολική ενέργεια. Ο άνεμος, αποτελεί μια πηγή ενέργειας που προέρχεται από τις μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης που οφείλονται στην άνιση θέρμανση της γης και της θάλασσας από τον ήλιο. Εκτιμάται πως περίπου το 1-2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετατρέπεται σε άνεμο. Οι μηχανές που έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να αξιοποιηθεί η ενέργεια του πνέοντος ανέμου, ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Γενικά, υπάρχουν δυο κατηγορίες ανεμογεννητριών, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα όπου ο άξονας περιστροφής τους είναι κάθετος ως προς τη διεύθυνση του ανέμου και οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα όπου ο άξονας περιστροφής τους είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση του ανέμου. Ο οριζόντιος τύπος αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο ανεμογεννητριών και η ονομαστική του ισχύς ποικίλει από 600 kW έως 9 MW.

Υδροηλεκτρική ενέργεια. Υδροηλεκτρική ενέργεια αποκαλείται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τους υδροστροβίλους που αξιοποιούν την πτώση του νερού ποταμών ή λιμνών (φυσικών και τεχνητών) προκειμένου να περιστραφούν. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας, διαθέτουν έναν υδατοφράκτη ο οποίος εξυπηρετεί στη δημιουργία υψομετρικής διαφοράς του νερού καθώς και στη συλλογή και την αποθήκευση του νερού για να χρησιμοποιηθεί όταν απαιτείται. Θεωρείται μια ώριμη και πλήρως ανεπτυγμένη τεχνολογία, αφού παράγει ηλεκτρισμό για περισσότερο από 100 χρόνια με αξιόπιστο τρόπο και σε ανταγωνιστικό κόστος. Οι συνηθέστεροι τύποι στροβίλων είναι οι στρόβιλοι Francis, που αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο και χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιπτώσεις όπου η υψομετρική διαφορά και η παροχή του νερού είναι μεγάλη, οι στρόβιλοι Kaplan, όπου είναι κατάλληλοι για μικρή υψομετρική διαφορά και μεγάλη παροχή νερού, και οι τροχοί Pelton, που χρησιμοποιούνται όταν η ροή του νερού είναι μικρή αλλά πέφτει από μεγάλο ύψος.

Γεωθερμική ενέργεια. Με τον όρο γεωθερμική ενέργεια, νοείται η εκμεταλλεύσιμη γήινη θερμότητα που βρίσκεται αποθηκευμένη σε μορφή θερμού νερού ή ατμού και περιορίζεται στα πρώτα τρία περίπου χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης. Η γεωθερμική ενέργεια, αποτελεί μια ήπια εναλλακτική μορφή ενέργειας και αξιοποιείται σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως τη θέρμανση χώρων, τη θέρμανση νερού, τη θέρμανση θερμοκηπίων, την ξήρανση αγροτικών προϊόντων κ.α.

Ενέργεια από τη θάλασσα. Η θάλασσα αποτελεί μια τεράστια πηγή ενέργειας και οι κυριότερες μορφές ενέργειας που μπορούμε να αξιοποιήσουμε είναι η ενέργεια από τα κύματα, η παλιρροϊκή ενέργεια και τα θαλάσσια ρεύματα και η θερμική ενέργεια των ωκεανών.

1.3. Αιολικά συστήματα

1.3.1. Προέλευση ανέμου

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που προκύπτει από την κατάλληλη διαχείριση του πνέοντος ανέμου. Ουσιαστικά πρόκειται για μια μορφή ηλιακής ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει με διαφορετικό ρυθμό διαφορετικά μέρη της γης, τα οποία απορροφούν ή αντανακλούν την ακτινοβολία με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη θέρμανση της ατμόσφαιρας. Οι θερμές αέριες μάζες ανυψώνονται,

μειώνοντας την ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της γης και στη θέση τους συσσωρεύεται ψυχρός αέρας. Η μετακίνηση μεγάλων αέριων μαζών της ατμόσφαιρας, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του ανέμου (Θεοδώρου, Αντωνίου, Ρούσος & Χατζηευθυμίου, 2010).

Ο άνεμος είναι μια καθαρή, ελεύθερη και άμεσα διαθέσιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Στην προσπάθεια του ανθρώπου να μειώσει το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας διαδραματίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούμε τον κόσμο μας με καθαρό και βιώσιμο τρόπο. Τα τελευταία χρόνια, η εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει μέτρια έως ισχυρή υποστήριξη σε ολόκληρο τον κόσμο. Ορισμένοι τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια, θεωρούνται πλήρως ανεπτυγμένοι και άλλοι όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια γνωρίζουν ολοένα και μεγαλύτερη άνθιση. Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται με διάφορους τρόπους (ανεμόμυλοι) από την αρχαιότητα. Σήμερα η κινητική ενέργεια του πνέοντος ανέμου συλλαμβάνεται με ειδικές μηχανές, γνωστές στο ευρύ κοινό ως ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες μας επιτρέπουν να αξιοποιήσουμε την ισχύ του ανέμου και να τη μετατρέψουμε αρχικά σε μηχανικό έργο και έπειτα σε ηλεκτρική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο άνεμος φυσά, τα πτερύγια του στροβίλου περιστρέφονται δεξιόστροφα συλλαμβάνοντας ενέργεια. Στο εσωτερικό της ατράκτου, ανάμεσα στα περιστρεφόμενα πτερύγια και το κιβώτιο ταχυτήτων μεσολαβεί ο κύριος άξονας, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μετάδοση της κίνησης. Το κιβώτιο ταχυτήτων μεταφέρει τη μηχανική ενέργεια με βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανάλογα τις επικρατούσες συνθήκες (στροφές, ροπή) στον άξονα της γεννήτριας, η οποία το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Έπειτα, η ηλεκτρική ενέργεια μεταβαίνει στο μετασχηματιστή, όπου τα επίπεδα της τάσης ρυθμίζονται ώστε να ταιριάζουν με το δίκτυο. Το ρεύμα αυτό μπορεί να διοχετευτεί απευθείας στο δίκτυο ή να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές.

Ανεξάρτητες έρευνες έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα πως αν υπήρχε η δυνατότητα με την υπάρχουσα τεχνολογία να εκμεταλλευτούμε το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, η ηλεκτρική ενέργεια που θα παραγόταν σε χρονικό διάστημα ενός έτους, θα υπερκάλυπτε ολοκληρωτικά τις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας για το ίδιο διάστημα (Θεοδώρου et al., 2010). Συνεπώς, αντιλαμβανόμαστε πως η αιολική ενέργεια είναι μια από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ως τέτοια θα πρέπει να αντιμετωπίζεται. Ο ισχυρισμός αυτός, ενισχύεται αφενός από τη συνεχόμενη τεχνολογική πρόοδο των ανεμογεννητριών και αφετέρου από τη μείωση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας, φτάνοντας σε επίπεδο συγκρίσιμο με το αντίστοιχο κόστος παραγωγής των συμβατικών μονάδων.

Από την άλλη μεριά, υπάρχουν σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη, στην επιλογή της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Καταρχάς, η μέγιστη θεωρητική τιμή του συντελεστή απόδοσης (όριο Benz) είναι 59% ενώ πρακτικά λόγω μηχανικών τριβών και αεροδυναμικών ατελειών η μέγιστη τιμή δεν ξεπερνά το 50%. Επιπλέον, η πυκνότητα της δεν φτάνει σε υψηλά επίπεδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος εφαρμογής, αφού απαιτείται η λειτουργία πολυάριθμων ανεμογεννητριών για την παραγωγή σημαντικής ποσότητας ισχύος, αλλά και το κόστος έρευνας και εγκατάστασης, αφού η αναζήτηση κατάλληλων τοποθεσιών με τις κατάλληλες συνθήκες (αιολικό δυναμικό, έκταση) κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική έως και καθοριστική.

1.3.2. Η ιστορία των ανεμογεννητριών

Ο άνθρωπος αναγνώρισε από πολύ νωρίς τα χαρακτηριστικά και τις εν δυνάμει προοπτικές του ανέμου ως μια μορφή αστείρευτης ενέργειας και την αξιοποίησε με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετούνται οι καθημερινές του ανάγκες, γεγονός που διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου συναντάται από την αρχαιότητα (5000 π.Χ.), όπου ο αέρας χρησιμοποιήθηκε για τη μετακίνηση των πρώτων ιστιοφόρων κατά μήκος του ποταμού Νείλου, γεγονός που συνέβαλε στην ανάπτυξη της ναυτιλίας. Μερικές χιλιάδες χρόνια αργότερα, ο αυτοκράτορας της Βαβυλώνας χρησιμοποίησε τον άνεμο για να λειτουργήσει το σύστημα άρδευσης και να τροφοδοτήσει το παλάτι του με νερό.

Οι πρώτοι ανεμόμυλοι που θα ανακαλύψουν οι αρχαιολόγοι χρονολογούνται από το 500 μ. Χ. και χρησιμοποιούνταν περισσότερο ως διακοσμητικά στοιχεία, ιδιαίτερα στην Κίνα και την Ασία, παρά ως μέθοδο παραγωγής ενέργειας. Τον 12ο αιώνα, οι Ευρωπαίοι άρχισαν να κατασκευάζουν και να αναπτύσσουν μύλους, για την επεξεργασία σιτηρών αλλά και για την άντληση του νερού. Στην Ολλανδία τον 14ο αιώνα, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση μεγαλύτερων έργων όπως την αποστράγγιση του δέλτα του Ρήνου. Με την πάροδο των χρόνων, η επιθυμία του ανθρώπου να χειραγωγήσει τον κόσμο γύρω του, οδήγησε στον πολλαπλασιασμό των ανεμόμυλων, πολλοί από τους οποίους αξιοποιήθηκαν και για γεωργικούς σκοπούς.

Μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα, επιστήμονες και εφευρέτες άρχισαν να βλέπουν την αιολική ενέργεια ως πιθανή πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν ο Σκωτσέζος καθηγητής και μηχανικός James Blyth όπου το 1887, χρησιμοποιώντας συσσωρευτές που είχε αναπτύξει ο Γάλλος Camille Faure, κατασκεύασε στον κήπο του ένα είδος πρώιμης ανεμογεννήτριας με την οποία κατάφερε να τροφοδοτήσει με ρεύμα τα φώτα του εξοχικού του. Ταυτόχρονα, οι Αμερικανοί ανέπτυσαν κατασκευές πολύ μεγαλύτερες σε μέγεθος, με πτερύγια μήκους 50 ποδιών, ο οποίος περιστρεφόταν αργά αλλά ήταν αρκετός για να τροφοδοτήσει με ρεύμα τα φώτα ενός εργαστηρίου.

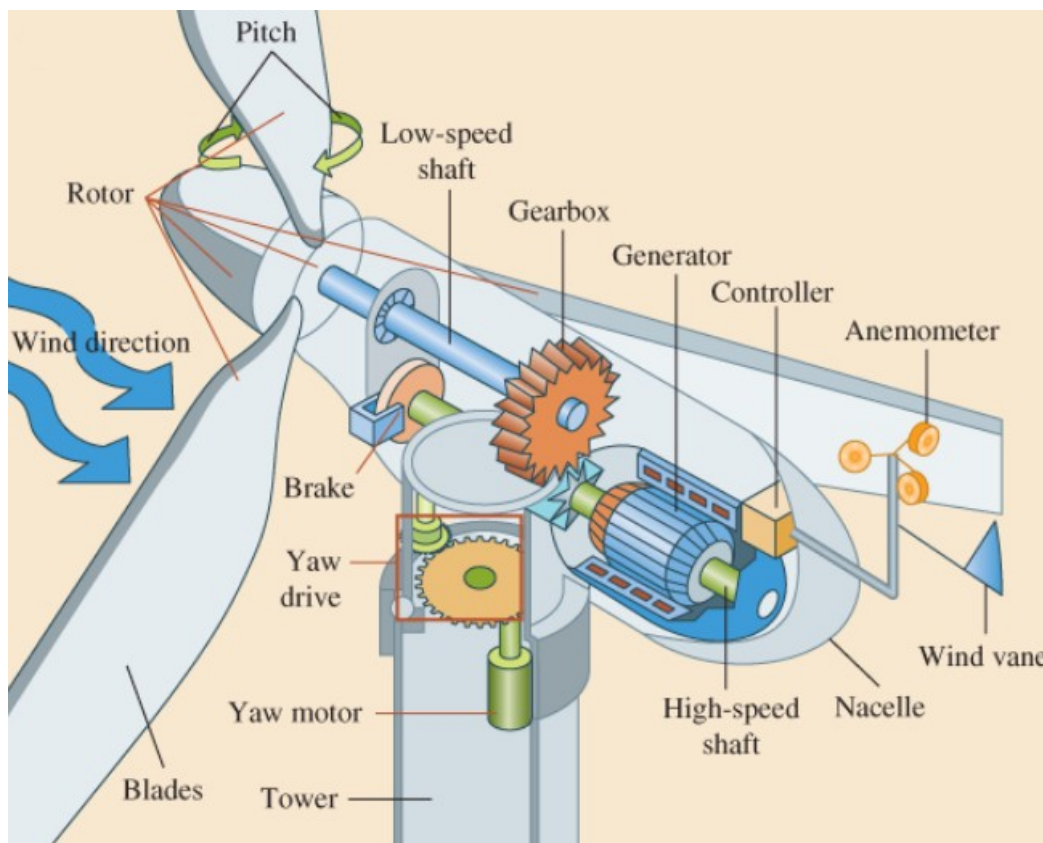
Στις αρχές του 20 αιώνα, παρόλο που πολλές απομακρυσμένες περιοχές όπως οι γεωργικές καλλιέργειες στις ΗΠΑ χρησιμοποιούσαν τις ανεμογεννήτριες ως το κύριο μέσο παραγωγής ενέργειας, η ευρεία χρήση τους δεν θεωρούνταν βιώσιμη επιλογή για τα αστικά κέντρα του κόσμου. Η μεγάλη αλλαγή για τις ανεμογεννήτριες ήρθε με την κρίση των καυσίμων στις αρχές της δεκαετίας του 70', όταν οι κυβερνήσεις αναγκάστηκαν να εξετάσουν και να προωθήσουν πιο συμφέρουσες, αποδοτικές και καθαρότερες πηγές ενέργειας.

Λαμβάνοντας υπόψη, τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις και φυσικά τις ραγδαίες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών ηλεκτροπαραγωγών μέσων, μπορούμε να κατανοήσουμε το ιδιαίτερο ενδιαφέρον και την επίμονη προσπάθεια που επέδειξε η επιστημονική κοινότητα αλλά και η πολιτική σκηνή για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στα μέσα της δεκαετίας του 80', οι ανεμογεννήτριες είχαν τυπική μέγιστη ονομαστική ισχύ 150 kW. Το 2006, οι εμπορικές ανεμογεννήτριες γενικής χρήσης έχουν ονομαστική ισχύ πάνω από 1 MW. Πλέον, η αιολική ενέργεια κατέχει μια σημαντική θέση μεταξύ των άλλων πηγών ενέργειας, αν αναλογιστεί κανείς ότι παράγει παγκοσμίως 17.000 MW,

μέγεθος ικανό να καλύψει την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτούν 10 εκατομμύρια νοικοκυριά. (*The History of Wind Turbines*, n.d.)

1.3.3. Η δομή των ανεμογεννητριών

Τα τελευταία χρόνια, η προσπάθεια της σύγχρονης κοινωνίας να αξιοποιήσει τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) προκειμένου να μειωθεί δυναμικά το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα, οδήγησε τη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας σε οικονομική και τεχνολογική άνθιση. Έχουν κατασκευαστεί περισσότεροι από 25 διαφορετικοί τύποι ανεμογεννητριών. Ο επικρατέστερος και πιο δημοφιλής τύπος, είναι η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Παρακάτω, αναλύονται τα δομικά και λειτουργικά μέρη της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (*The Inside of a Wind Turbine*, n.d.).

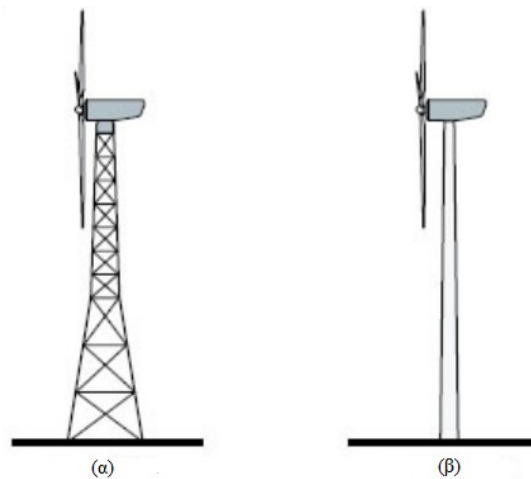


Εικόνα 1. Λεπτομερής απεικόνιση του εσωτερικού τμήματος της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Πηγή: <https://electricalacademia.com/electric-power/power-plants-work/>

Πύργος (Tower)

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας υποστηρίζει την άτρακτο (nacelle) και το δρομέα (rotor). Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος, οι ψηλότεροι πύργοι επιτρέπουν τις ανεμογεννήτριες να συλλάβουν περισσότερη ενέργεια και να παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ισχύ. Οι πύργοι των

μεγάλων ανεμογεννητριών μπορεί να είναι κυλινδρικής μορφής κατασκευασμένοι από χάλυβα ή σκυρόδεμα. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες παραδίδονται με σωληνωτούς ατσάλινους πύργους, οι οποίοι κατασκευάζονται σε τμήματα των 20-30 μέτρων, με φλάντζες σε κάθε άκρο, για να βιδώνονται και να συναρμολογούνται στην περιοχή τοποθέτησης. Οι πύργοι είναι κωνικοί, δηλαδή η διάμετρος τους αυξάνεται όσο πλησιάζουμε στη βάση, προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή τους και ταυτόχρονα να εξοικονομηθούν υλικά. Η τιμή ενός πύργου εκτιμάται περίπου στο 20% του συνολικού κόστους μιας ανεμογεννήτριας. Οι δικτυωτοί πύργοι (Lattice) είναι οι φθηνότεροι στην κατασκευή, δεδομένου ότι απαιτούν τη μισή ποσότητα υλικών συγκριτικά με τους αντίστοιχους σωληνωτούς πύργους (Tubular). Συχνά οι κατασκευαστές ακολουθούν ένα γενικό κανόνα, όπου το ύψος του πύργου είναι ίσο με τη διάμετρο του δρομέα. Μία τυπική ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1 MW (MegaWatt), θα έχει πύργο ύψους 50 έως 80 μέτρων. Οι σωληνωτοί πύργοι είναι ασφαλέστεροι για το προσωπικό που συντηρεί τις ανεμογεννήτριες, καθώς μπορεί να χρησιμοποιεί εσωτερική σκάλα για να φτάνει στην κορυφή της.



Εικόνα 2. (α) Δικτυωτός πύργος Lattice (β) Σωληνωτός πύργος Tubular
Πηγή: https://amslaurea.unibo.it/10261/1/Mazza_Lorenzo_tesi.pdf

Πλήμνη (Hub)

Η πλήμνη είναι ένα μηχανικό εξάρτημα στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Η πλήμνη του δρομέα προσαρτάται στον άξονα χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας. Είναι ένα βασικό εξάρτημα, όχι μόνο επειδή διατηρεί τα πτερύγια στη βέλτιστη τους θέση για μέγιστη αεροδυναμική απόδοση, αλλά και επειδή ουσιαστικά είναι το πρώτο εξάρτημα που τροφοδοτεί με περιστροφική κίνηση τα υπόλοιπα επιμέρους στοιχεία της ανεμογεννήτριας. Υπάρχουν πλήμνες πολλών σχεδιάσεων και διαμορφώσεων ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας και των πτερυγίων που χρησιμοποιούνται.

Άτρακτος (Nacelle)

Η άτρακτος (κεντρική μονάδα) είναι ένα ισχυρό κοίλο κέλυφος που εσωτερικά περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας. Συνήθως είναι κατασκευασμένο από υαλοβάμβακα και περιέχει τον κύριο άξονα κίνησης και το κιβώτιο ταχυτήτων. Περιέχει επίσης το σύστημα ελέγχου της γωνίας

κλίσης των πτερυγίων και το κινητήρα περιστροφής, ο οποίος ελέγχει τη θέση του δρομέα σε σχέση με τη διεύθυνση ροής του ανέμου. Το προσωπικό συντήρησης μπορεί να εισέλθει στην άτρακτο, από τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Η άτρακτος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας ζυγίζει περίπου 10 τόνους.

Ανεμόμετρο και Ανεμοδείκτης (Anemometer & Wind Vane)

Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας και για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης του ανέμου. Ο ελεγκτής συγκεντρώνει και αξιολογεί τα δεδομένα που συλλέγονται από το ανεμόμετρο και προγραμματίζει την εκκίνηση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει τα 5 m/s (μέτρα ανά δευτερόλεπτο). Οι υπολογιστές διακόπτουν αυτόματα τη λειτουργία εάν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει τα 25 m/s (μέτρα ανά δευτερόλεπτο), για να προστατεύσει τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας καθώς και το χώρο γύρω από αυτήν. Τα σήματα του ανεμοδείκτη, αξιοποιούνται από τον ελεγκτή της για να προσανατολίσει κατάλληλα την ανεμογεννήτρια σε σχέση με τον άνεμο, διαμέσου του μηχανισμού περιστροφής.

Κιβώτιο Ταχυτήτων (Gear Box)

Το κιβώτιο ταχυτήτων συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη της ταχύτητας περιστροφής από 30-60 rpm (στροφές ανά λεπτό) σε περίπου 1000-1800 rpm (στροφές ανά λεπτό). Συνήθως αυτή είναι η ταχύτητα περιστροφής που απαιτείται από τις περισσότερες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας (Shaitami, 2020). Ουσιαστικά, μετατρέπει την αργή περιστροφική ταχύτητα και τη μεγάλη ροπή που παρέχει η πλήμνη, σε υψηλή ταχύτητα περιστροφής και μικρή ροπή που απαιτείται για τη γεννήτρια. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα δαπανηρό και βαρύ τμήμα της ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί διερευνούν την κατασκευή ανεμογεννητριών “άμεσης ώθησης” (direct – drive), με σκοπό να λειτουργεί σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής δίχως τη χρήση κιβωτίων ταχυτήτων.

Άξονας Υψηλών Ταχυτήτων (High Speed Shaft)

Ο άξονας υψηλής ταχύτητας περιστρέφεται περίπου με 1500 rpm (στροφές ανά λεπτό) και οδηγεί τη γεννήτρια. Είναι εξοπλισμένο με μηχανικό δισκόφρενο έκτακτης ανάγκης, το οποίο χρησιμοποιείται σε περίπτωση αστοχίας του αεροδυναμικού φρένου ή κατά τη συντήρηση του στροβίλου (Shaitami, 2020).

Άξονας Χαμηλών Ταχυτήτων (Low Speed Shaft)

Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας, συνδέει την πλήμνη με το κιβώτιο ταχυτήτων. Στο συγκεκριμένο άξονα, βρίσκεται τοποθετημένο ένα υδραυλικό σύστημα το οποίο με τη βοήθεια σωληνώσεων ενεργοποιεί το αεροδυναμικό φρένο. Ο δρομέας μιας τυπικής ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 1 MW (MegaWatt), περιστρέφεται σχετικά αργά περίπου με 30 έως 60 rpm (στροφές ανά λεπτό) (Shaitami, 2020).

Μηχανισμός Περιστροφής (Yaw System)

Πρόκειται για ένα μηχανισμό περιστροφής που χρησιμοποιεί ηλεκτροκινητήρες (yaw motor) προκειμένου να εξασφαλίσει ότι ο δρομέας θα είναι πάντα στραμμένος προς την κατεύθυνση του μεταβαλλόμενου ανέμου. Ο ελεγκτής επιτηρεί την κατεύθυνση του ανέμου με τη βοήθεια του

ανεμοδείκτη και ενεργοποιεί το μηχανισμό περιστροφής προκειμένου να προβεί σε τυχόν διορθωτικές κινήσεις. Ο άξονας του δρομέα μιας ανεμογεννήτριας συνήθως δεν ευθυγραμμίζεται με τον άνεμο, αφού ο άνεμος αλλάζει συνεχώς την κατεύθυνσή του. Η ανεμογεννήτρια θεωρούμε πως έχει σφάλμα εκτροπής (yaw error), εάν ο δρομέας δεν είναι κάθετος στο άνεμο. Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με σφάλμα εκτροπής επιβάλλουν μεγαλύτερα φορτία στα πτερύγια, προκαλώντας επιπλέον φθορά λόγω κόπωσης αλλά και σημαντικές απώλειες ισχύος. Για αυτό το λόγο, σχεδόν όλες οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Urwind) χρησιμοποιούν μηχανισμό περιστροφής. Ο μηχανισμός περιστροφής, περιλαμβάνει αρκετούς οδηγούς και ηλεκτροκινητήρες, προκειμένου να καταναείμουν ομοιόμορφα τη φόρτωση που υφίστανται τα επιμέρους στοιχεία. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την επίτευξη μέγιστης προσαρμοστικότητας σε σύνθετα εδάφη. Ωστόσο, για να αποφευχθούν τα μεγάλα φορτία που προκαλούνται από τον περιστρεφόμενο δρομέα, ο ρυθμός εκτροπής (yaw rate) διατηρείται συνήθως πολύ χαμηλός. Έτσι, η άτρακτος της ανεμογεννήτριας συχνά παραμένει σταθερή και ο οδηγός εκτροπής (yaw drive) δεν λειτουργεί, μέχρι η μεταβολή της κατεύθυνσης του ανέμου να ξεπεράσει κάποιο προκαθορισμένο μέγιστο όριο (Stavrakakis, 2012).

Ελεγκτής (Controller)

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής της ανεμογεννήτριας, παρακολουθεί και ελέγχει το στρόβιλο και συλλέγει απαραίτητα δεδομένα που καθορίζουν τη λειτουργία του. Η αποτελεσματική εφαρμογή του συστήματος ελέγχου μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην παραγωγή ενέργειας της ανεμογεννήτριας και συνεπώς εξελίσσεται συνεχώς. Ο ελεγκτής παρακολουθεί και καταγράφει ένα τεράστιο αριθμό από παραμέτρους, από την περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων και τις θερμοκρασίες του υδραυλικού συστήματος, μέχρι τις γωνίες κλίσης του πτερυγίου, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου. Ο ελεγκτής ενεργοποιεί την ανεμογεννήτρια όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει τα 5 m/s (μέτρα ανά δευτερόλεπτο) και διακόπτει αυτόματα τη λειτουργία της εάν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει τα 25 m/s (μέτρα ανά δευτερόλεπτο). Μέσω του ηλεκτρονικού ελεγκτή, γίνεται εφικτό ο υπεύθυνος του αιολικού πάρκου να έχει πλήρη πληροφόρηση για τον έλεγχο και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών από απομακρυσμένη τοποθεσία. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας, όπως υπερθέρμανση του κιβωτίου ταχυτήτων ή της γεννήτριας, ο ελεγκτής σταματά αυτόματα την ανεμογεννήτρια και καλεί στον υπολογιστή του υπεύθυνου χειριστή μέσω ενός τηλεφωνικού μόντεμ (Shaitami, 2020).

Γεννήτρια (Generator)

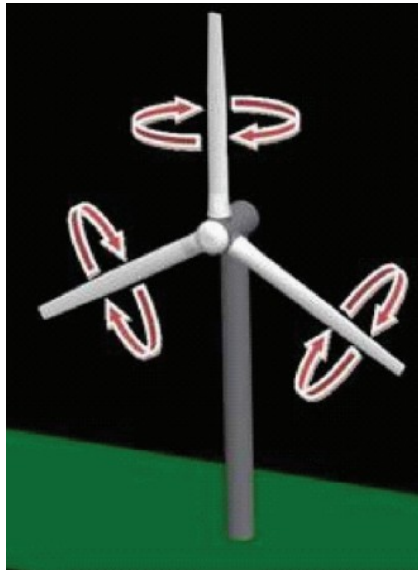
Συνήθως μια ανεμογεννήτρια αποδίδει μέγιστη ηλεκτρική ισχύ από 600 έως 3000 KW (KiloWatt). Ως γεννήτρια, συχνά επιλέγεται μια γεννήτρια επαγωγής ή αλλιώς ασύγχρονη γεννήτρια. Στεγάζεται εσωτερικά του κελύφους και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του δρομέα σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι περισσότερες λειτουργούν στα 690 Volt και παρέχουν τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι γεννήτριες που συναντάμε στις ανεμογεννήτριες διαφέρουν αρκετά από τις συνηθισμένες, δεδομένου ότι τροφοδοτούνται από μια πηγή ενέργειας (αιολική), όπου παρέχει μεταβαλλόμενη μηχανική ισχύ (ροπή στρέψης) (Beig & Mueeen, 2016).

Φρένο (Brake)

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα δισκόφρενο, δηλαδή ένα σύστημα πέδησης το οποίο μπορεί να λειτουργεί είτε αμιγώς μηχανικά, είτε ηλεκτρικά ή υδραυλικά και έχει ως κύριο σκοπό να σταματά την περιστροφή του δρομέα σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

Σύστημα Ελέγχου Βήματος (Pitch Control)

Πρόκειται για ένα μηχανισμό όπου στρέφει τα πτερύγια του δρομέα γύρω από το διαμήκη άξονα τους, με σκοπό να ελαττώσει ή να αυξήσει τα αεροδυναμικά φορτία που υφίστανται στην επιφάνειά τους, έχοντας ως κύριο μέλημα να διατηρηθεί η περιστροφή του δρομέα σε ανέμους που είναι πολύ υψηλοί ή πολύ χαμηλοί για την παραγωγή ηλεκτρισμού (Stavrakakis, 2012).



Εικόνα 3. Σύστημα ελέγχου βήματος (Pitch control)

Πηγή: Stavrakakis, 2012.

Πτερύγια (Blades)

Τα πτερύγια του δρομέα αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας όσον αναφορά την απόδοση και το κόστος του συστήματος αιολικής ενέργειας. Το σχήμα των πτερυγίων έχει άμεση επίπτωση στην απόδοση, καθώς είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια (ροπή στρέψης). Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν υψηλή αναλογία άνωσης προς αντίσταση, με βάση τις αεροδυναμικές αρχές. Ο πιο διαδεδομένος τύπος ανεμογεννητριών είναι ο τύπος οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια. Τα πτερύγια θα πρέπει να έχουν χαμηλή αδράνεια και αυξημένη μηχανική αντοχή, για ανθεκτική και αξιόπιστη λειτουργία. Τα πτερύγια είναι κατασκευασμένα από πολυεστέρα ενισχυμένο με αλουμίνιο ή υαλοβάμβακα και πλαστικές ύλες ενισχυμένες με ανθρακονήματα. Σε ανεμογεννήτριες χαμηλής ισχύος τα πτερύγια είναι βιδωμένα στην πλήμνη και επομένως είναι στατικά. Σε ανεμογεννήτριες υψηλής ισχύος, τα πτερύγια τοποθετούνται στο μηχανισμό ελέγχου βήματος (pitch control), προκειμένου να ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής τους. Αυτό επιτυγχάνεται, με τη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης, περιστρέφοντας το πτερύγιο γύρω από το διαμήκη άξονα του. Οι επιφάνειες των πτερυγίων συνήθως υπόκεινται σε συχνό καθαρισμό (και γυάλισμα αν απαιτείται) για

να διατηρηθεί ομοιόμορφη και σταθερή η απόδοση του πτερυγίου. Σε μια τυπική ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1 MW (MegaWatt), κάθε πτερύγιο έχει μήκος περίπου 27 μέτρα (Beig & Muyeen, 2016).

Δρομέας (Rotor)

Ο δρομέας αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια. Τα πτερύγια στερεώνονται στην επιφάνεια της πλήμνης, είτε σταθερά είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους, μεταβάλλοντας το βήμα και κατά επέκταση τη γωνία πρόσπτωσης (Beig & Muyeen, 2016).

Μετασχηματιστής (Transformer)

Ο μετασχηματιστής συχνά στεγάζεται στο εσωτερικό του πύργου της ανεμογεννήτριας. Η έξοδος μέσης τάσης της γεννήτριας αυξάνεται από το μετασχηματιστή σε 10 έως 35 KV ανάλογα με τις απαιτήσεις του τοπικού δικτύου.

1.3.4. Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που τις διακρίνουν αλλά και τις βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία τους. Καταρχάς, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο είναι προσανατολισμένες ως προς τη ροή του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα και τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Έπειτα, υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας. Η μέθοδος λειτουργίας σταθερής ταχύτητας (fixed speed) και η μέθοδος λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας (variable speed). Σε πρώτη φάση, θα αναλυθούν οι κατηγορίες με κριτήριο τον τρόπο προσανατολισμού και στη συνέχεια οι κατηγορίες με βάση τη μέθοδο λειτουργίας των ανεμογεννητριών.

Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT)

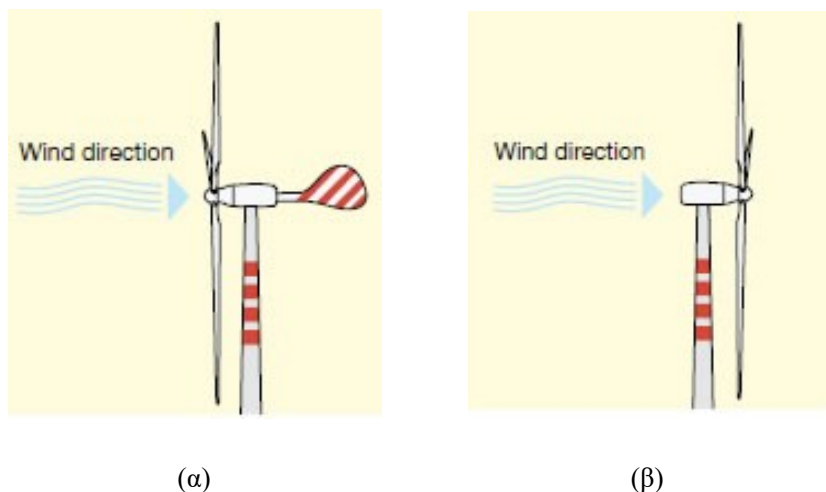
Μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, αποτελεί ένα εκσυγχρονισμένο σχέδιο του παραδοσιακού ανεμόμυλου που υπάρχει εδώ και πολλούς αιώνες. Η άτρακτος που είναι τοποθετημένη κάθετα στον πύργο της ανεμογεννήτριας και οριζόντια σε σχέση με το έδαφος, εξηγεί την ονομασία του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 4. Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

Πηγή: <https://poweredbymothernature.com/index.php/2011/06/14/what-is-wind-energy/>

Γενικά, υπάρχουν δυο τύποι ανεμογεννητριών, οι upwind ανεμογεννήτριες στις οποίες ο δρομέας προσανατολίζεται με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε να είναι στραμμένος μετωπικά ως προς την κατεύθυνση του ανέμου και οι downwind ανεμογεννήτριες, στις οποίες ο δρομέας “υπακούει” και οδηγείται από την κατεύθυνση του ανέμου (Εικόνα 5). Οι upwind ανεμογεννήτριες είναι εφοδιασμένες με ένα κινητήρα εκτροπής (yaw motor) και ένα μετρητή εκτροπής (yaw meter). Ο μετρητής εκτροπής, προσδιορίζει την ακριβή κατεύθυνση του ανέμου και ο κινητήρας εκτροπής κινεί το δρομέα προκειμένου να είναι πάντα προσανατολισμένος μετωπικά ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Δεδομένου ότι είναι πιθανό να περιστραφεί προς την ίδια κατεύθυνση για πολλές φορές “τυλίγοντας” τα καλώδια, η ανεμογεννήτρια διαθέτει ένα μετρητή που την αναγκάζει έπειτα από ένα συγκεκριμένο αριθμό περιστροφών προς την ίδια κατεύθυνση, να περιστραφεί προς την αντίθετη φορά για να “ξετυλίξει” τα καλώδια. Επιπλέον, τα πτερύγια τους έχουν σχήμα αεροτομής (όπως της πτέρυγας ενός αεροπλάνου) και κατασκευάζονται με κύριο χαρακτηριστικό τη δυσκαμψία, ούτως ώστε σε περίπτωση ισχυρών ανέμων, να αποτρέπεται η ώθηση τους προς τον πύργο στήριξης. Από την άλλη πλευρά, οι downwind ανεμογεννήτριες, είναι μηχανές όπου δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσουν πρόσθετο μηχανισμό για να τις κρατήσει στραμμένες προς την κατεύθυνση του ανέμου. Ωστόσο, σε περίπτωση ισχυρού ανέμου, τα πτερύγια τους μπορούν να καμφθούν, με αποτέλεσμα να μειωθεί η αντίσταση και κατά επέκταση η επιφάνεια της περιοχής στροβιλισμού (swept area) οδηγώντας σε σημαντικές απώλειες. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που πλέον ο πιο διαδεδομένος τύπος ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, είναι οι upwind machines (Beig & Muyeen, 2016; Saad, 2014; Θεοδώρου et al., 2010).



Εικόνα 5. (α) Ανεμογεννήτρια Upwind με σύστημα προσανατολισμού (β) Ανεμογεννήτρια Downwind χωρίς σύστημα προσανατολισμού.

Πηγή: <https://govschoolagriculture.com/2015/07/24/whats-up-with-wind-turbines/>

Από τη χρήση ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, προκύπτουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα. Πρώτα απ' όλα, το μεταβλητό βήμα των πτερυγίων, δίνει τη δυνατότητα στην ανεμογεννήτρια να συλλέξει τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας από τον άνεμο. Έπειτα, το γεγονός ότι τα πτερύγια της είναι τοποθετημένα κάθετα προς την κατεύθυνση του ανέμου, της επιτρέπει αφενός να λαμβάνει περισσότερη ισχύ για να περιστραφεί και αφετέρου να είναι ιδιαίτερα αποδοτική. Έπειτα, το υψηλό ύψος του πύργου, εκθέτει την ανεμογεννήτρια σε ανέμους αυξημένης ταχύτητας. Αναφορικά, ένας πύργος στήριξης ψηλότερος κατά 10 μέτρα, εκθέτει τα πτερύγια του δρομέα σε ισχυρότερους ανέμους (τουλάχιστον κατά 20%), γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύς έως και 34%. Τέλος, πρόκειται για μία “τεχνολογικά ώριμη” ανεμογεννήτρια που είναι ευρέως διαδεδομένη παγκοσμίως και συνεχώς εξελίσσεται (Θεοδώρου et al., 2010).

Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα (VAWT)

Υπάρχουν γενικά δύο βασικά είδη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα, που ονομάζονται Savonius και Darrieus. Ο πρώτος τύπος λειτουργεί παρόμοια με ένα τροχό νερού αξιοποιώντας τις δυνάμεις οπισθέλκουσας που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του πτερυγίου από το ρευστό, ενώ ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί πτερύγια παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Μεταξύ αυτών των δύο ανεμογεννητριών, ο τύπος Darrieus μπορεί να είναι πιο αποδοτικός από τον Savonius, αλλά ο κύριος περιορισμός έγκειται στο γεγονός πως δεν έχει την ικανότητα να εκκινεί μόνος του.



(α)



(β)

Εικόνα 6. (α) Savonius δρομέας κατακόρυφου άξονα (β) Darrieus δρομέας κατακόρυφου άξονα
Πηγή: <http://mrssandrakelly.blogspot.com/2016/07/guide-to-get-wind-turbine-design.html>
<https://www.windml.org/vertical-axis-wind-turbine/>

Οι ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα, έχουν τον κεντρικό άξονα περιστροφής τοποθετημένο κάθετα. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι η ανεμογεννήτρια μπορεί αξιοποιήσει τον άνεμο από όλες τις κατευθύνσεις. Ως εκ τούτου, δεν είναι απαραίτητη η χρήση ενός μηχανισμού εκτροπής (yaw mechanism) για να προσανατολίζεται συνεχώς στην κατεύθυνση ροής του ανέμου. Λειτουργούν συνήθως πιο κοντά στο έδαφος με αποτέλεσμα να επιτρέπουν την τοποθέτηση βαρέων εξοπλισμών, όπως τη γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων, στην επιφάνεια του εδάφους και όχι στον πύργο στήριξης της. Ωστόσο, η ταχύτητα του ανέμου είναι πιο μικρή σε χαμηλότερο ύψος, με αποτέλεσμα να περιορίζεται αισθητά η διαθέσιμη ενέργεια του πνέοντος ανέμου και ως εκ τούτου να παράγεται λιγότερη ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, λόγω της σχεδίασης τους, μπορούν να τοποθετούνται πολύ πιο κοντά μεταξύ τους εντός του αιολικού πάρκου, επιτρέποντας αφενός την καλύτερη διαχείριση του χώρου και αφετέρου την εγκατάσταση περισσότερων μονάδων. Παράλληλα, επειδή είναι τοποθετημένες πιο κοντά στο έδαφος, ελέγχονται και συντηρούνται πολύ πιο εύκολα. (Beig & Muyeen, 2016; Saad, 2014; Θεοδώρου et al., 2010) Πολλές επιστημονικές έρευνες, αποκάλυψαν ότι η προσεκτική σχεδίαση των αιολικών πάρκων που χρησιμοποιούν ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που είναι έως και δέκα φορές μεγαλύτερη από ένα αιολικό πάρκο με ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ίδιου μεγέθους (Saad, 2014). Γενικά, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι πιο αθόρυβες από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, με τα επίπεδα dB να είναι περίπου 95 dB για τις HAWT (πρόκειται για τη στάθμη θορύβου που προκαλείται από ένα αυτοκινητόδρομο) σε σύγκριση με περίπου 38 dB για μια VAWT (ο θόρυβος που προκαλείται από μια ήρεμη συνομιλία μεταξύ ανθρώπων). Αυτό οφείλεται σε πολλούς λόγους, κυριότερος όλων η μικρότερη ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων (Saad, 2014).

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, παρουσιάζουν όμως και αρκετά μειονεκτήματα. Αρχικά η λειτουργία τους κρίνεται προβληματική, όταν πνέουν ισχυροί άνεμοι. Παράγουν εξαιρετικά χαμηλή ροπή εκκίνησης και παρουσιάζουν προβλήματα δυναμικής σταθερότητας. Είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες όταν λειτουργούν σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού και το χαμηλό ύψος τοποθέτησης τους, περιορίζει τη λειτουργία τους σε περιβάλλοντα με χαμηλή ταχύτητα ανέμου. Επιπλέον, η ροή του πνέοντος ανέμου κοντά στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να δημιουργήσει αναταραχές στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, οι οποίες συνοδεύονται από κραδασμούς και δονήσεις, με αποτέλεσμα να καταπονούνται αισθητά. Απόρροια αυτού, είναι η συχνότερη και πιο εκτεταμένη συντήρηση του εξοπλισμού και η μειωμένη διάρκεια ζωής της (Saad, 2014). Παρακάτω, παρουσιάζεται ένας τύπος ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα (μαγνητικές ανεμογεννήτριες), η οποία ενσωματώνει μια από τις καλύτερες τεχνολογίες σε αυτή την κατηγορία ανεμογεννητριών.

- Μαγνητικές ανεμογεννήτριες ή ανεμογεννήτριες Maglev

Οι μαγνητικές ανεμογεννήτριες ή ανεμογεννήτριες Maglev, παρουσιάστηκαν αρχικά στην έκθεση αολικής ενέργειας στο Πεκίνο το 2006 και η μαζικής τους παραγωγή ξεκίνησε το Νοέμβριο του 2007. Πρόκειται για ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό και καινοτόμο σύστημα και συγκαταλέγεται στην κατηγορία των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα. Οι μαγνητικές ανεμογεννήτριες, βασίζονται στην τεχνολογία του μαγνητικού μετεωρισμού (magnetic levitation), αφού τα κατακόρυφα πτερύγια της “αιωρούνται” στον αέρα, πάνω από τη βάση της μηχανής, αντικαθιστώντας την αδήριτη ανάγκη για χρήση ρουλεμάν. Η επίτευξη αυτού του φαινομένου, επιτυγχάνεται με τη χρήση ισχυρών μόνιμα φορτισμένων (full permanent) μαγνητών τύπου νεοδυμίου και όχι με ηλεκτρομαγνήτες. Συνεπώς, δεν απαιτείται η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και οι απώλειες λόγω της τριβής πρακτικά μηδενίζονται, με αποτέλεσμα τα πτερύγια να μπορούν να περιστρέφονται αβίαστα και να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια ακόμα και σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου (1,5 m/s). Ωστόσο, είναι ικανές να λειτουργούν απροβλημάτιστα και με ισχυρούς ανέμους της τάξεως των 40 m/s. Εξαιτίας του κωνικού σχηματισμού της, η ανεμογεννήτρια Maglev μπορεί να τοποθετηθεί εντός κατοικημένων περιοχών εφόσον δεν δεσμεύει χώρο μεγάλης έκτασης, σε αντίθεση με μια συμβατικού τύπου ανεμογεννήτρια. Το κύριο πλεονέκτημα των μαγνητικών ανεμογεννητριών, είναι το εντυπωσιακά μειωμένο κόστος συντήρησης αλλά και η αυξημένη διάρκεια ζωής της (Θεοδώρου et al., 2010).



Εικόνα 7. Μαγνητική ανεμογεννήτρια τύπου Maglev

Πηγή: <https://ecofriend.com/magnetically-levitated-maglev-wind-turbine-enters-production.html>

Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας (Fixed Speed Wind Turbines)

Σε μια ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας, ο δρομέας της ανεμογεννήτριας περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό και αριθμό στροφών, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό σημαίνει πως η ταχύτητα του δρομέα δεν προσαρμόζεται με την ταχύτητα του ανέμου, αλλά καθορίζεται κυρίως από τη συχνότητα του δικτύου. Η γεννήτρια συνδέεται απευθείας με το δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή, ο οποίος προσαρμόζει (αυξάνει) την τάση εξόδου της γεννήτριας, σε αυτή του δικτύου. Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται, μπορεί να είναι είτε σύγχρονη, είτε επαγωγική. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, χρησιμοποιούν ασύγχρονες γεννήτριες επειδή είναι κατασκευαστικά απλούστερες, κάτι που μειώνει το κόστος συντήρησης και αυξάνει την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Αυτού του είδους οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση σε κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, συνήθως από 12m/s έως 15m/s. Όμως, εξαιτίας των σταθερών στροφών, οι ανεμογεννήτριες αυτές δεν αξιοποιούν με το βέλτιστο τρόπο την αεροδυναμική ροπή, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση. Επιπλέον, σοβαρό μειονέκτημα των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας, είναι η κατανάλωση άεργου ισχύος από το δίκτυο και οι σημαντικές καταπονήσεις που υφίστανται τα μηχανικά της μέρη, λόγω των απότομων μεταβολών του ανέμου. Η συγκεκριμένη τεχνολογία, πλέον θεωρείται παρωχημένη. (Beig & Muyeen, 2016)

Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας (Variable speed wind turbines)

Στο συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννητριών, οι γεννήτριες συνδέονται με το δίκτυο (σταθερής συχνότητας) μέσω ενός μετατροπέα ηλεκτρικής ισχύος AC/DC/AC και μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών τιμών του ανέμου. Αυτό έχει ως συνέπεια να αυξάνεται κατακόρυφα η ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας, αφού καθίσταται ικανή να διαχειριστεί και να εκμεταλλευτεί σε μεγαλύτερο βαθμό την κινητική ενέργεια του ανέμου, συγκριτικά με τις αντίστοιχες ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας. Ο μετατροπέας αποτελείται από ένα τριφασικό ανορθωτή (full bridge rectifier) που συνδέεται στην έξοδο της γεννήτριας με σκοπό να μετατρέπει τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη σε συνεχή και από έναν αντιστροφέα (inverter) όπου λαμβάνει το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, το μετατρέπει ξανά σε εναλλασσόμενο (ίδιας συχνότητας με αυτή του δικτύου) και το διοχετεύει στο δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου, συνήθως ενσωματώνουν ένα μηχανισμό ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων, για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Η μέθοδος λειτουργίας μεταβλητών στροφών επιτυγχάνεται κυρίως με τη χρήση είτε σύγχρονων γεννητριών, είτε επαγωγικών γεννητριών βραχυκυκλωμένου κλωβού, είτε επαγωγικών γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα. Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας, είναι κυρίαρχη στο χώρο της παραγωγής αιολικής ενέργειας και έχουν αντικαταστήσει πλήρως τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Μπορούν να ελεγχθούν και να προσαρμοστούν κατάλληλα ώστε να λειτουργούν με υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, να έχουν μειωμένο αεροδυναμικό θόρυβο και αισθητά μειωμένη καταπόνηση στα διάφορα μηχανικά τους μέρη. Σημαντικό μειονέκτημα έναντι των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας, είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος λόγω της ύπαρξης του μετατροπέα. (Beig & Muyeen, 2016)

1.3.5. Χρησιμοποιούμενοι τύποι γεννητριών

Κάθε τύπος γεννήτριας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ανεμογεννήτρια. Ωστόσο, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή γεννήτριας, καθώς και συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης που πρέπει να τηρούνται από το γενικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να είναι σε θέση η ανεμογεννήτρια να συνδέεται στο δίκτυο με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Για να ικανοποιηθούν τα κριτήρια και οι απαιτήσεις του δικτύου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταγενέστεροι μετατροπείς ακόμη και αν η γεννήτρια παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) μεταβλητής ποιότητας ή και συνεχές ρεύμα (DC). Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις σύγχρονες γεννήτριες και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές γεννήτριες.

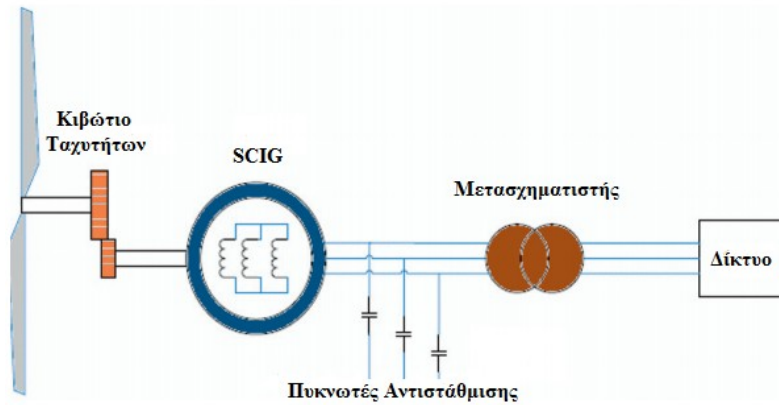
1.3.5.1. Ασύγχρονες ή επαγωγικές γεννήτριες

Οι ασύγχρονες γεννήτριες ή γεννήτριες επαγωγής, χρησιμοποιούνταν σπάνια σε εφαρμογές ηλεκτρικής παραγωγής μέχρι που η βιομηχανία αιολικής ενέργειας βρήκε την κατάλληλη χρήση για αυτές, λόγω της απλής κατασκευής τους και λόγω του σχετικά μικρού τους μεγέθους ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος. Όμως, όπως όλες οι γεννήτριες έχουν κάποιες ιδιαιτερότητες, έτσι και η

επαγωγική γεννήτρια παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς στα όρια λειτουργίας της. Από τη στιγμή που δεν διαθέτει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, η επαγωγική γεννήτρια δεν μπορεί να παράγει άεργο ισχύ. Η άεργος ισχύς, μπορεί να μην χρησιμεύει στην παραγωγή έργου, αλλά είναι απαραίτητη καθώς αυτή ευθύνεται για την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου. Στην πραγματικότητα, μια ασύγχρονη γεννήτρια καταναλώνει άεργο ισχύ (λόγω της ύπαρξης πηνίων) και για αυτό θα πρέπει να συνδέεται σε μια εξωτερική πηγή άεργης ισχύος, είτε στο υπάρχον δίκτυο είτε σε συστοιχίες πυκνωτών, προκειμένου να διατηρείται το μαγνητικό πεδίο του στάτη της. Η επαγωγική γεννήτρια, από τη στιγμή που στερείται τυλίγματος διέγερσης, άρα και ρεύματος διέγερσης, δεν είναι ικανή να ρυθμίζει από μόνη της την τάση εξόδου της. Το συγκεκριμένο ρόλο, αναλαμβάνει να τον καλύψει επίσης η πηγή της άεργης ισχύος. Όταν χρησιμοποιούνται πυκνωτές για την αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος, υπάρχει κίνδυνος να προκληθεί αυτό-διέγερση. Υπό κανονικές συνθήκες η τάση της γεννήτριας διατηρείται από το εξωτερικό σύστημα ισχύος στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Οι γεννήτριες επαγωγής είναι επιρρεπείς σε αστάθεια τάσης, αλλά γενικά θεωρούνται απλές, φθηνές, ιδιαίτερα αξιόπιστες και καλά ανεπτυγμένες. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται μερικοί από τους πιο διαδεδομένους τύπους επαγωγικών γεννητριών.

Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG)

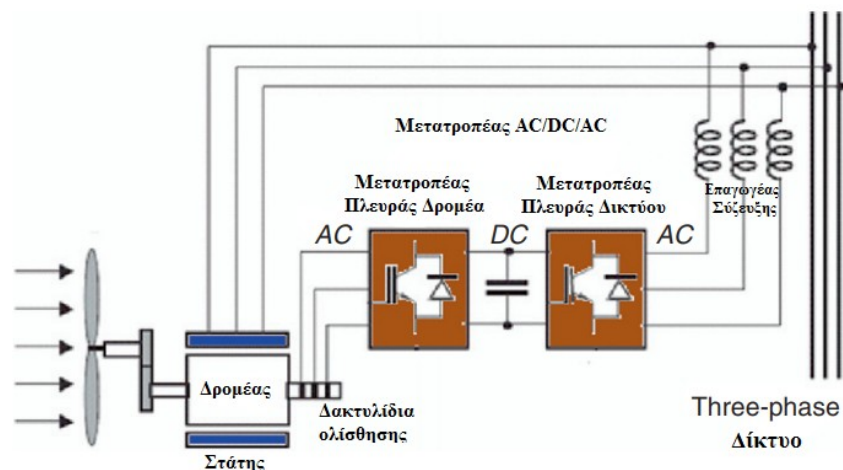
Στο συγκεκριμένο τύπο γεννήτριας, οι σπείρες του δρομέα είναι ράβδοι αλουμινίου που χυτεύονται στις εγκοπές του δρομέα και είναι βραχυκυκλωμένες μαζί με τους αλουμινένιους δακτυλίους στα δύο άκρα του δρομέα. Οι γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας. Αποτελούνται από το δρομέα, από μία γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού και το κιβώτιο ταχυτήτων. Η περιέλιξη του στάτη της γεννήτριας συνδέεται με το δίκτυο. Η ολίσθηση της γεννήτριας ποικίλει ανάλογα με την παραγόμενη ισχύ, οπότε η ταχύτητα δεν είναι στην πραγματικότητα σταθερή αλλά οι διακυμάνσεις της είναι πολύ μικρές (μόλις 1-2%) για αυτό συνήθως αναφέρεται ως γεννήτρια σταθερής ταχύτητας. Δεδομένου ότι μια γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού αντλεί πάντα άεργο ισχύ από το δίκτυο, αυτό είναι ανεπιθύμητο, ειδικά για “αδύναμα” δίκτυα. Η κατανάλωση αυτή, τις περισσότερες φορές αντισταθμίζεται με πυκνωτές. Ο συγκεκριμένος τύπος γεννήτριας έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε μικρές ανεμογεννήτριες. Αυτό οφείλεται στην αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα που προσφέρει αφού αποτελείται από πολύ λίγα εξαρτήματα. Το πιο αδύναμο τμήμα του συγκεκριμένου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι το κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο πρέπει να αντέχει σε πολλές διακυμάνσεις ροπής. Αυτές οι διακυμάνσεις μεταδίδονται στην τάση του δικτύου. Στα πλαίσια ενός αιολικού πάρκου αυτές οι διαταραχές εξομαλύνονται και δεν δημιουργούν πρόβλημα. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι η άεργη ισχύς δεν μπορεί να ελεγχθεί. Αυτό σημαίνει πως η κατανάλωση άεργης ισχύος θα αυξηθεί, όταν αυξηθεί και η παραγωγή ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ο κίνδυνος η γεννήτρια να προκαλέσει σοβαρές υπερτάσεις. Με τη χρήση ενός πλήρως ελεγχόμενου μετατροπέα ισχύος IGBT, είναι δυνατός ο έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος και η προσαρμογή τους στις εκάστοτε συνθήκες του ανέμου αλλά και στις απαιτήσεις του δικτύου. Μια άλλη μέθοδος που εφαρμόζεται σε ειδικές περιπτώσεις για την αύξηση της απόδοσης, είναι η χρήση δύο διαφορετικών γεννητριών, μιας μικρής για χαμηλές ταχύτητες ανέμου και μιας μεγαλύτερης για υψηλότερες ταχύτητες ανέμου (Cao, Xie & Tan, 2012; Chapman, 2009; Stavrakakis, 2012).



Εικόνα 8. Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού σταθερής ταχύτητας. Πηγή: Stavrakakis, 2012. Ιδία επεξεργασία

Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG)

Μια επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας πρόκειται ουσιαστικά για μια ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator - WRIG), με τις περιελίξεις του στάτη να είναι απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο και τις περιελίξεις του δρομέα να συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα. Με την επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας, μπορούμε να έχουμε λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Ο μετατροπέας AC/DC/AC χωρίζεται σε δύο επιμέρους μέρη, την πλευρά του δρομέα και την πλευρά του δικτύου. Το τμήμα του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου, συνδέεται με το δίκτυο μέσω ενός επαγωγέα σύζευξης. Η άλλη πλευρά του μετατροπέα συνδέεται με την τριφασική περιέλιξη του δρομέα μέσω δακτυλίων ολίσθησης. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα ελέγχει την ενεργό και την άεργο ισχύ της μηχανής μέσω του ρεύματος του δρομέα, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση συνεχούς διασύνδεσης και διασφαλίζει λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.



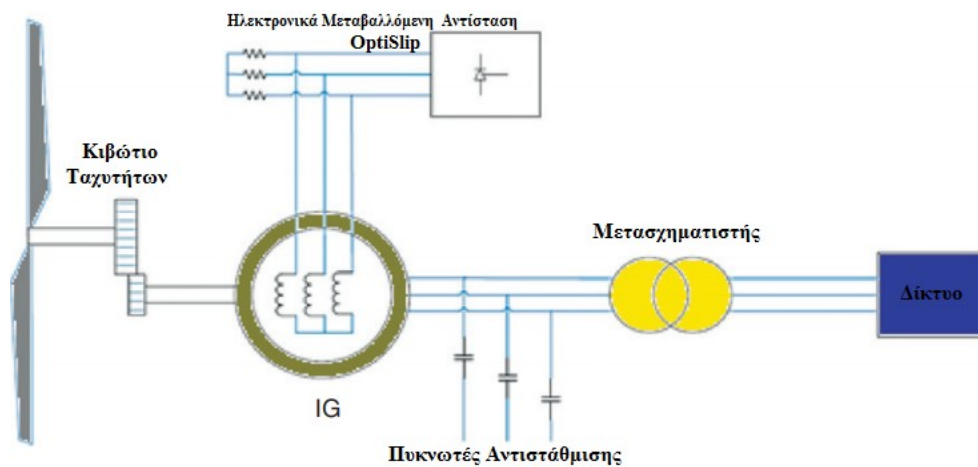
Εικόνα 9. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μεταβλητής ταχύτητας Πηγή: Stavrakakis, 2012. Ιδία επεξεργασία

Το συγκεκριμένο σύστημα ανάλογα με την ολίσθηση έχει δύο περιοχές λειτουργίας, την υπερσύγχρονη λειτουργία (αρνητική ολίσθηση) και την υποσύγχρονη λειτουργία (θετική ολίσθηση). Από την περιοχή λειτουργίας, εξαρτάται και η κατεύθυνση της ισχύος του δρομέα. Σε συνθήκες αρνητικής ολίσθησης, έχουμε ροή ισχύος από το δρομέα προς το δίκτυο. Η συνολική παραγόμενη ισχύς, αποτελείται από την ισχύ που παρέχει ο στάτης της γεννήτριας, συν την ισχύ ολίσθησης που τροφοδοτεί ο δρομέας στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα συχνότητας. Υπό υπερσύγχρονη κατάσταση, ο μετατροπέας της πλευράς του δρομέα λειτουργεί ως ανορθωτής και ο μετατροπέας της πλευράς του δικτύου ως αντιστροφέας. Αντιθέτως, υπό υποσύγχρονη κατάσταση, ο στάτης της γεννήτριας τροφοδοτεί όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο και επιπλέον αφήνει την ισχύ ολίσθησης διαθέσιμη. Η ισχύ ολίσθησης τροφοδοτείται από το μετατροπέα στο δρομέα (αντίθετη κατεύθυνση), δια μέσου των δακτυλιδιών ολίσθησης της γεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση, ο μετατροπέας της πλευράς του δρομέα λειτουργεί ως αντιστροφέας και ο μετατροπέας της πλευράς του δικτύου ως ανορθωτής. Επομένως, ο στάτης μεταφέρει πάντα ενέργεια στο δίκτυο, ενώ ο δρομέας μπορεί να χειριστεί την ισχύ και στις δύο κατευθύνσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετατροπείς είναι σε θέση να τροφοδοτούν τάση και ρεύμα σε διαφορετικές γωνίες φάσης. Σήμερα πάνω από το 85 % των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας. Τέτοιες γεννήτριες επαγωγής είναι ικανές να λειτουργούν σε ευρεία κλίμακα ολίσθησης (τυπικά $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας). Προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως του ξεχωριστού ελέγχου της ενεργής και άεργης ισχύος. Επιπλέον, αυξάνει σημαντικά την απόδοση του συστήματος, αφού μόνο το 1/3 περίπου της ονομαστικής ισχύος ρέει μέσω του μετατροπέα. Από την άλλη πλευρά, οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας, απαιτούν σύστημα ελέγχου και μετατροπείς, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του συστήματος και το συνολικό κόστος. (Cao, Xie & Tan, 2012; Chapman, 2009; Stavrakakis, 2012)

Επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση (OSIG)

Η επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση (OptiSlip Induction Generator), ανήκει στην κατηγορία της ασύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator – WRIG) και πρόκειται περί μιας γεννήτριας “περιορισμένης” μεταβλητής ταχύτητας. Συνδέεται απευθείας με το δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή ισχύος. Έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την αντίσταση και να επιλέγει τη βέλτιστη τιμή, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές στη ροπή στρέψης και στην εξαγόμενη ενέργεια, οι οποίες προκαλούνται συχνά από τις ριπές του ανέμου. Η μεταβλητή αντίσταση προσαρτάται στις περιελίξεις του δρομέα. Η ολίσθηση και η ισχύς της γεννήτριας ελέγχονται, τροποποιώντας δυναμικά την πρόσθετη αντίσταση του δρομέα και συνεπώς τη συνολική αντίσταση του δρομέα. Ο στάτης της επαγωγικής γεννήτριας είναι συνδεδεμένος απευθείας στο δίκτυο. Ωστόσο, επειδή πρόκειται περί επαγωγικής γεννήτριας κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη συστοιχίας πυκνωτών με σκοπό την αντιστάθμιση της άεργους ισχύος. Επίσης το εύρος μεταβολής της ταχύτητας κυμαίνεται σε τιμές από 0 έως 10% και είναι άμεσα εξαρτώμενη από την τιμή της μεταβαλλόμενης αντίστασης. Η ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση αποτελεί αξιόπιστη επιλογή, εύκολη στην εφαρμογή της και συμβάλλει στην αποτελεσματική μείωση των φορτίων σε σχέση με άλλες πιο πολύπλοκες λύσεις. Όμως, υπάρχουν σημαντικές απώλειες ενέργειας

αφού η ενέργεια της ολίσθησης, καταναλώνεται από την αντίσταση υπό τη μορφή θερμότητας (Ackermann, 2012; Stavrakakis, 2012).



Εικόνα 10. Επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση μειωμένης μεταβλητής ταχύτητας. Πηγή: Stavrakakis, 2012. Ίδια επεξεργασία

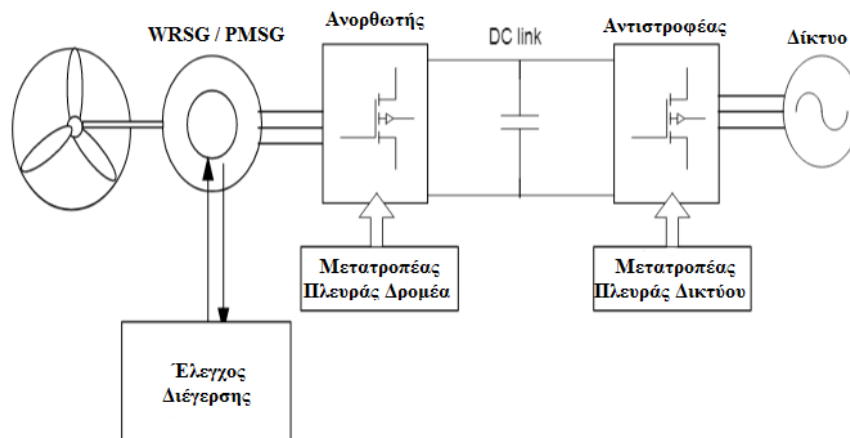
1.3.5.2. Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι πολύ πιο ακριβές και μηχανολογικά περίπλοκες από τις αντίστοιχες γεννήτριες επαγωγής ανάλογου μεγέθους. Το κύριο πλεονέκτημα που έχουν και υπερτερούν έναντι των επαγωγικών γεννητριών είναι ότι το ρεύμα μαγνήτισης δεν δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη. Το μαγνητικό πεδίο στις σύγχρονες γεννήτριες, μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρήση μόνιμων μαγνητών, είτε μέσω των συμβατικών περιελίξεων του δρομέα. Επιπλέον, οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να συνδεθούν απευθείας με τον άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας χωρίς τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων, αρκεί να διαθέτουν μεγάλο αριθμό πόλων. Μια σύγχρονη γεννήτρια είναι καταλληλότερη στον έλεγχο πλήρους ισχύος, εφόσον συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας, έχει ως κύριο στόχο αφενός να αποσβένει τις διαταραχές ισχύος που προκαλούνται από τις ριπές του ανέμου και αφετέρου να ελέγχει τη μαγνήτιση προκειμένου η μηχανή να παραμένει συγχρονισμένη με τη συχνότητα του δικτύου. Ως εκ τούτου, η γεννήτρια μπορεί να λειτουργεί με μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Οι δύο πιο συνηθισμένοι τύποι σύγχρονων γεννητριών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία των ανεμογεννητριών είναι : η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG) και η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG). (Ackermann, 2012)

Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG)

Η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα αποτελεί τον κυρίαρχο τύπο σύγχρονης γεννήτριας λόγω της εκτεταμένης χρήσης του από τη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι περιελίξεις του στάτη συνδέονται απευθείας στο δίκτυο με αποτέλεσμα η ταχύτητα περιστροφής να ρυθμίζεται από τη συχνότητα του δικτύου. Ο δρομέας, είναι κατασκευασμένος έχοντας ξεχωριστή περιέλιξη για

το πεδίο διέγερσης και διεγείρεται με συνεχές ρεύμα (DC) με τη χρήση δακτυλίων ολίσθησης ή μέσω ενός διεγέρτη με ένα στρεφόμενο ανορθωτή το οποίο περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα και παράγει το πεδίο διέγερσης. Έτσι, τα χαρακτηριστικά του φορτίου και ο συντελεστής ισχύος μπορούν να ρυθμίζονται με τον έλεγχο του ρεύματος μαγνητίσεως, δηλαδή μέσω του συνεχούς ρεύματος διέγερσης (DC) που παρέχεται στην περιέλιξη του δρομέα. Για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος παράλληλα με τη σύγχρονη γεννήτρια τοποθετείται συνήθως ένας “back to back” μετατροπέας (Εικόνα 11). Κύριο πλεονέκτημα της έναντι των επαγωγικών γεννητριών, είναι ότι δεν χρειάζεται περαιτέρω μέτρα αντιστάθμισης για τη ρύθμιση της άεργου ισχύος. Η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα, θεωρείται ιδανική για παραγωγή υψηλής ισχύος. Έχει βελτιωμένο συντελεστή ισχύος δεδομένου ότι είναι γεννήτρια αυτοδιέγερσης και απομονώνεται ηλεκτρικά από το δίκτυο, επομένως είναι λιγότερο ευαίσθητη σε περίπτωση σφάλματος δικτύου. Σημαντικό μειονέκτημα είναι, ότι απαιτεί πρόσθετο μετατροπέα για να διεγείρει την περιέλιξη του δρομέα και έχει υψηλότερο κόστος συντήρησης σε σύγκριση με τη γεννήτρια επαγωγής. (Ackermann, 2012; Gupta, Bhushan & Samuel, 2013)



Εικόνα 11. Σύγχρονη γεννήτρια (δακτυλιοφόρου δρομέα / μόνιμου μαγνήτη) μεταβλητής ταχύτητας. Πηγή: Gupta et al., 2013. Ιδία επεξεργασία

Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG)

Όλο και περισσότεροι ερευνητές προτείνουν την εφαρμογή της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη στις ανεμογεννήτριες λόγω της ικανότητας της να αυτοδιεγείρεται, επιτρέποντας την να λειτουργεί με υψηλό συντελεστή ισχύος και να είναι ιδιαίτερα αποδοτική. Δεδομένου ότι οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη είναι αυτοδιεγείρομενες, δηλαδή η διέγερση τους προκαλείται χωρίς να υπάρχει πρόσθετη παροχή ενέργειας, παρουσιάζουν αυξημένη απόδοση συγκριτικά με τις επαγωγικές γεννήτριες. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι μαγνήτες (κράμα νεοδυμίου σιδήρου και βορίου ή κράμα σαμαρίου κοβαλτίου) είναι ιδιαίτερος ακριβά και δύσκολα στην επεξεργασία, γεγονός να αυξάνει σημαντικά το συνολικό κόστος της γεννήτριας. Η δομή της γεννήτριας είναι σχετικά απλή. Οι μόνιμοι μαγνήτες, είναι εγκατεστημένοι στο δρομέα για να παράγουν σταθερό μαγνητικό πεδίο και το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα λαμβάνεται από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη. Μερικές φορές οι μαγνήτες μπορούν να ενσωματωθούν σε έναν κυλινδρικό δρομέα από χυτό

αλουμινίου για μείωση του κόστους. Σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου γεννητριών, είναι η απουσία ύπαρξης δακτυλιδιών ολίσθησης, καθιστώντας τη γεννήτρια απλή και αξιόπιστη. Η χρήση τέτοιων γεννητριών απαιτεί την ύπαρξη ενός μετατροπέα ισχύος AC/DC/AC προκειμένου να γίνεται προσαρμογή της τάσης, της συχνότητας της γεννήτριας στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου. Η παραγόμενη ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος μεταβλητής συχνότητας και μεγέθους, αρχικά διορθώνεται σε σταθερό συνεχές ρεύμα (DC) και στη συνέχεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής συχνότητας και μεγέθους. Η προσθήκη του μετατροπέα στο σύστημα αυξάνει το κόστος. Ωστόσο το κέρδος είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου. Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη είναι πιθανό να δημιουργήσουν πρόβλημα κατά την εκκίνηση, το συγχρονισμό και τη ρύθμιση της τάσης. Επιπλέον, τα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, είναι ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η παρουσία ενός συστήματος ψύξης. Υπάρχουν γενικά τρεις τύποι γεννητριών μόνιμου μαγνήτη: ακτινική, αξονική και η εγκάρσια. Ωστόσο, στις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται μόνο τα δύο πρώτα σχέδια σήμερα. Ο δρομέας των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου αποτελείται από ένα σύστημα πόλων μόνιμου μαγνήτη που μπορεί να είναι κυλινδρικοί ή έκτυποι. Οι έκτυποι πόλοι είναι ευρέως διαδεδομένοι σε μηχανές χαμηλής ταχύτητας και εφαρμόζονται κυρίως σε ανεμογεννήτριες. (Ackermann, 2012; Cao et al., 2012; Stavrakakis, 2012)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Ο ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

2.1. Άνθρακας, αέρια του θερμοκηπίου και λοιπές εννοιολογήσεις

Αρχικά, πολλές φορές ο όρος “εκπομπές άνθρακα” δεν είναι σαφής, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε παρερμηνείες. Μπορεί να είναι ένα μέτρο των εκπομπών όλων των αερίων συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που δεν έχουν αντίκτυπο στην υπερθέρμανση του πλανήτη, μπορεί να επικεντρωθεί αποκλειστικά στο διοξείδιο του άνθρακα ή του μεθανίου, ή μπορεί να περιλαμβάνει όλα τα αέρια του θερμοκηπίου τα οποία εντοπίστηκαν από τη Διακυβερνητική Επιτροπή σχετικά με την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC). Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, ο όρος “άνθρακας” αντιπροσωπεύει όλα τα αέρια του θερμοκηπίου.

Οι εκτιμήσεις των εκπομπών άνθρακα ενός αιολικού πάρκου, από μόνες τους δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμες και παρουσιάζουν ενδιαφέρον μόνο όταν συγκρίνονται με τις αντίστοιχες εκπομπές άνθρακα άλλων μορφών παραγωγής ενέργειας. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω ερμηνεία τους, για τον υπολογισμό άλλων σημαντικών μεγεθών που θα προσδώσουν πληρέστερες και ποιοτικότερες πληροφορίες. Μερικά από τα πιο διαδεδομένα μεγέθη που συμβάλλουν στην εκτίμηση και την ποσοτικοποίηση των εξοικονομούμενων εκπομπών άνθρακα είναι, οι αποφευχθέντες εκπομπές (Avoided Emissions), η ένταση άνθρακα (Carbon Intensity) και η αποπληρωμή του άνθρακα (Carbon Payback) (Smoucha, Fitzpatrick, Buckingham & Knox, 2016).

Οι αποφευχθέντες εκπομπές, είναι η εξοικονόμηση των εκπεμπομένων ρύπων που απελευθερώνονται στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια ζωής ενός αιολικού πάρκου. Πρόκειται για την καθαρή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHGs), λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις εκπομπές που προκαλούνται κατά τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου, όσο και τις εκπομπές που αποφεύγονται στο ίδιο διάστημα. Οι εκτιμήσεις των τελευταίων ποικίλουν, καθώς αποτελούν μέτρο των “εξοικονομούμενων” εκπομπών και προκύπτει από το γεγονός πως η αιολική ενέργεια αντικαθιστά άλλες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Thomson & Harrison, 2015a). Μία από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους σύγκρισης των εκπομπών άνθρακα, είναι ο υπολογισμός της έντασης του άνθρακα. Η ένταση του άνθρακα αναφέρεται στις συνολικές εκπομπές που εκλύονται καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής μιας μονάδας παραγωγής, σε σχέση με τη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που προήλθε από αυτή, δίνοντας μια τιμή σε μονάδες g CO₂ eq/kWh (Smoucha et al., 2016). Ακόμα ένα χρήσιμο μέγεθος είναι η περίοδος αποπληρωμής του άνθρακα (Carbon Payback Period). Η “αποπληρωμή του άνθρακα” είναι ένας όρος που αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να αντισταθμιστεί η αρνητική περιβαλλοντική επίπτωση που προκλήθηκε με την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου, από το θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο της παραγωγής “καθαρής” ενέργειας αντί της καύσης ορυκτών καυσίμων. Υπό την προϋπόθεση ότι η περίοδος αποπληρωμής του άνθρακα είναι

σημαντικά μικρότερη από τη διάρκεια ζωής ενός αιολικού πάρκου, θα επιτευχθεί καθαρή μείωση εκπομπών άνθρακα (Froese, 2019).

2.2. Ανάλυση κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου – Μεθοδολογική προσέγγιση

Η ανάλυση του κύκλου ζωής (AKZ) είναι μία μέθοδος η οποία έχει αναπτυχθεί κυρίως για να αξιολογήσει την περιβαλλοντική επίπτωση που προκύπτει από την παραγωγή προϊόντων και των διαδικασιών που τη συνοδεύουν. Αποτελεί μια από τις πιο ολοκληρωμένες μεθόδους αξιολόγησης της αειφορίας μιας παραγωγικής διαδικασίας και αποτυπώνει όλες τις διαδικασίες και τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγική διαδικασία. Καλύπτει κάθε τμήμα της αλυσίδας του κύκλου ζωής, από την προμήθεια και την επεξεργασία των πρώτων υλών, έως τη χρήση του τελικού προϊόντος, την επεξεργασία κατά τη λήξη της ωφέλιμης ζωής του, την ανακύκλωση και τη μέθοδο διάθεσης τυχόν εναπομεινάντων υλικών. Για κάθε σειρά εργασιών που πραγματοποιείται, υπολογίζεται η ενεργειακή κατανάλωση και η χρήση άλλων πόρων, καθώς και η περιβαλλοντική επιβάρυνση που αποφέρει. Καθίσταται, λοιπόν, προφανές ότι η μέθοδος AKZ αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο αξιολόγησης της αειφορίας μιας διαδικασίας ή επένδυσης (Μουσιόπουλος, Ντζιαχρήστος & Σλίνη, 2015).

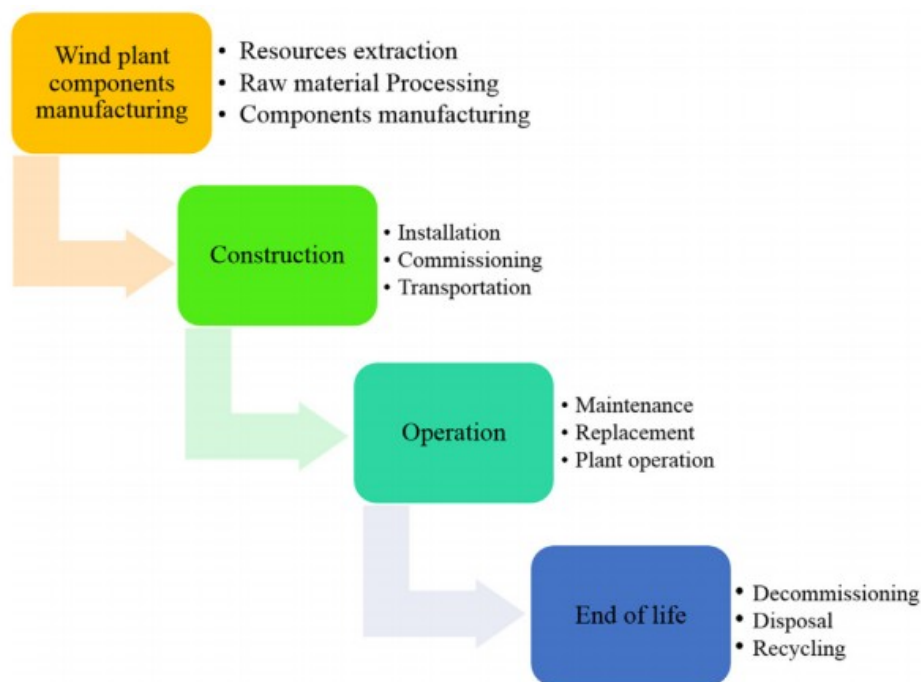
Ωστόσο, τα αποτελέσματα κάθε AKZ διαφέρουν ανάλογα με το στόχο, το πεδίο εφαρμογής, τις διαδικασίες που εξετάζονται και τις παραδοχές που διατυπώνονται στην ανάλυση. Για παράδειγμα, δεν περιλαμβάνουν όλες οι AKZ των ανεμογεννητριών, ανακύκλωση υλικών στο τέλος της ζωής τους, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα. Λόγω της αναπόφευκτης αβεβαιότητας που προκύπτει κατά τη μοντελοποίηση, τα αποτελέσματα των AKZ δεν είναι απόλυτα ακριβή, αλλά αποτελούν τις βέλτιστες εκτιμήσεις βάσει των δεδομένων που χρησιμοποιούνται (Smoucha et al., 2016).

Η AKZ ακολουθεί δύο βασικές προσεγγίσεις, είτε ένα μοντέλο εισροών-εκροών είτε μια ανάλυση αλυσίδας διεργασιών. Οι εθνικές μέσες στατιστικές που διαμορφώνουν τις χρηματοοικονομικές ροές μεταξύ των τομέων της οικονομίας, αναφέρονται ως δεδομένα εισροών – εκροών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των κενών που προκαλούνται από τα ελλιπή όρια του συστήματος (Crawford, 2009). Τα μοντέλα εισροών-εκροών αξιολογούν όλα τα στοιχεία εισόδου και εξόδου του μοντέλου που επηρεάζουν τη λειτουργική μονάδα, δηλαδή το προϊόν του συστήματος που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση και για το οποίο μπορεί να υπολογιστεί μια τιμή. Για AKZ ανεμογεννητριών, η λειτουργική μονάδα συχνά ορίζεται η ένταση άνθρακα δηλαδή οι εκπομπές άνθρακα που παράγονται ανά kWh παραγόμενης ενέργειας (Smoucha et al., 2016). Με τη χρήση παραδοσιακών τεχνικών αξιολόγησης (όπως η ανάλυση διεργασιών με βάση το ISO 14040), έχει ως αποτέλεσμα τα όρια του συστήματος του εξεταζόμενου προϊόντος ή υπηρεσίας, να είναι έως και 87% ελλιπή. Γενικά, η ανάλυση διεργασιών βασίζεται σε λεπτομερή αρχεία καταγραφής των υλικών και των διεργασιών που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής. Έτσι, θεωρείται πιο ακριβής και σχετική με το προϊόν που αναλύεται, αλλά από την άλλη πλευρά, η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων αποτελεί μια διαδικασία εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα. Για το λόγο

αυτό, εξετάζει τις ενεργειακές απαιτήσεις συνήθως μόνο των κύριων υλικών και εξαιρεί τις ενεργειακές απαιτήσεις που συνδέονται με την υποστήριξη αγαθών και υπηρεσιών (π.χ. διαφήμιση, ασφάλιση και χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες), τον κεφαλαιούχο εξοπλισμό (π.χ. μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ανεμογεννητριών), τη μετατροπή βασικών υλικών σε πιο σύνθετα προϊόντα, περικόπτοντας αισθητά τα όρια του συστήματος. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα ευρήματα όπως, σε μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, μικρότερες περιόδους αποπληρωμής και σε μεγαλύτερα περιβαλλοντικά οφέλη από ότι είναι δυνατόν να επιτευχθούν. Η υβριδική ανάλυση βασίζεται σε ένα αναλυτικό μοντέλο εισροών-εκροών που αναπτύχθηκε από τον Trelor και στο οποίο ενσωματώνονται όλα τα διαθέσιμα δεδομένα διεργασίας. Χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση, η συστημική πληρότητα του μοντέλου δεν διακυβεύεται με κανέναν τρόπο και τα πιο αξιόπιστα δεδομένα διεργασίας μπορούν να ενσωματωθούν εκεί όπου είναι διαθέσιμα (Crawford, 2009).

2.2.1. Στάδια του κύκλου ζωής

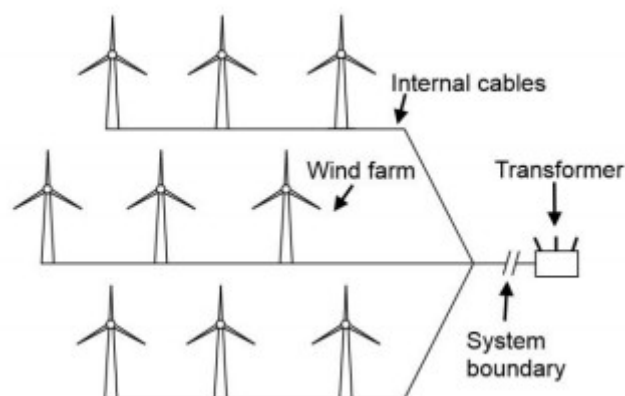
Σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου παράγονται αέριοι ρύποι όπου απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Τα στοιχεία όλων των επιμέρους σταδίων, εξετάζονται και εξηγούνται αναλυτικά παρακάτω.



Σχήμα 1. Στάδια του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου
Πηγή: Bhandrari, Kumar & Mayer, 2020.

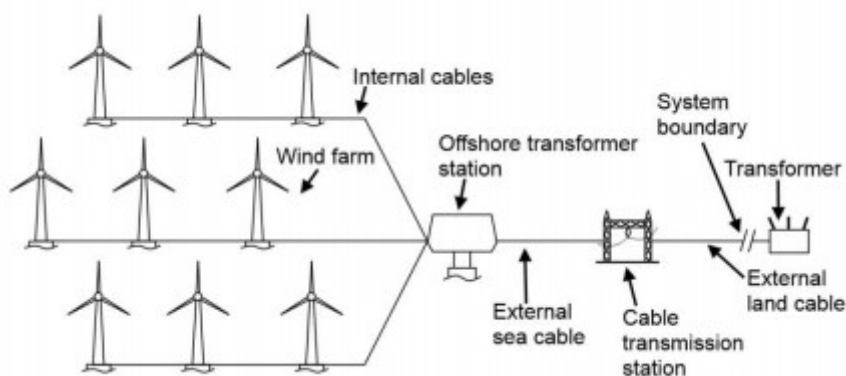
Εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την εξόρυξη και την επεξεργασία των πρώτων υλών (χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός, πολυμερές πλαστικό ενισχυμένο με ρητίνες), αλλά και την κατασκευή των επιμέρους στοιχείων ενός αιολικού πάρκου (Chipindula, Botlaguduru, Du, Kommalarati & Huque, 2018). Στις παρακάτω εικόνες, τυπικά απεικονίζονται τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος, για την εκτίμηση των εκπομπών άνθρακα ενός χερσαίου (onshore) και ενός υπεράκτιου (offshore) αιολικού πάρκου αντίστοιχα. Ουσιαστικά, η συναρμολόγηση της ανεμογεννήτριας διαφέρει ελάχιστα για χερσαίες ή υπεράκτιες εγκαταστάσεις, με την κύρια διαφορά τους να έγκειται στο ύψος του πύργου. Το ύψος μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι 80 μέτρα ενώ μιας onshore είναι περίπου 100 μέτρα. Οι κυριότερες διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα σε χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα, εντοπίζονται στο σχεδιασμό της εγκατάστασης, τη θεμελίωση και τον εξοπλισμό μετάδοσης (Thomson & Harrison, 2015a). Η θεμελίωση των χερσαίων αιολικών πάρκων, αποτελείται ως επί το πλείστον από σκυρόδεμα (οπλισμένο) με ένα ποσοστό ενισχυμένου χάλυβα, ενώ στα υπεράκτια αιολικά πάρκα χρησιμοποιούνται κυρίως χάλυβδινες κατασκευές, σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν στις απαιτητικές συνθήκες ενός υδάτινου περιβάλλοντος (Chipindula et al., 2018).



Εικόνα 12. Όρια συστήματος σε χερσαίο αιολικό πάρκο
Πηγή: Thomson & Harrison, 2015a

Επίσης, η σχεδίαση των ανεμογεννητριών διαφέρει σημαντικά ανάλογα τον κατασκευαστή κυρίως στο μέγεθος και την επιλογή των υλικών, επηρεάζοντας τις εκπομπές άνθρακα του κάθε σχεδίου. Συγκεκριμένα, ο ακριβής σχεδιασμός των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του κελύφους, της πλήμνης ή των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας μπορεί να ποικίλει, ενώ για τα καλώδια, τον ηλεκτρικό εξοπλισμό, τον υδραυλικό εξοπλισμό και τα θεμέλια, χρησιμοποιούνται διαφορετικές ποσότητες υλικών ανάλογα την τοποθεσία και το σχεδιασμό του ίδιου του αιολικού πάρκου. Επιπλέον, διαφορετικοί κατασκευαστές από διαφορετικά μέρη, μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικές αναλογίες ανακυκλωμένων πρώτων υλών, γεγονός που θα επηρεάσει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα σε αυτό το στάδιο (Thomson & Harrison, 2015a).



Εικόνα 13. Όρια συστήματος σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο
 Πηγή: Thomson & Harrison, 2015b

Εγκατάσταση αιολικού πάρκου

Το δεύτερο στάδιο αφορά τη μεταφορά και την εγκατάσταση. Στην περίπτωση ενός χερσαίου αιολικού πάρκου, περιλαμβάνεται επιπλέον η κατασκευή οδών πρόσβασης και η προετοιμασία των θεμελίων που θα δεχτούν τις ανεμογεννήτριες. Πέρα από τις προαναφερθέντες διεργασίες, σημαντικό αντίκτυπο στις εκπομπές άνθρακα είναι πιθανό να έχει και η αλλαγή χρήσης της γης στο χώρο της εγκατάστασης. Οι εργασίες εδάφους που σχετίζονται με ένα αιολικό πάρκο, μπορούν να προκαλέσουν άμεση εκπομπή άνθρακα απευθείας απ το έδαφος (Thomson & Harrison, 2015a). Στην περίπτωση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, συνυπολογίζονται οι διεργασίες προετοιμασίας των θεμελίων για την υποδοχή των ανεμογεννητριών και του υπεράκτιου σταθμού μετασχηματιστών, η τοποθέτηση των καλωδίων και η κατασκευή οδών πρόσβασης στην ξηρά. Σημαντική επίδραση στις εκπομπές άνθρακα, μπορούν να έχουν όλες οι μεταβολές που υφίσταται το θαλάσσιο περιβάλλον και ο θαλάσσιος βυθός (Thomson & Harrison, 2015b).

Λειτουργία αιολικού πάρκου

Οι εκπομπές άνθρακα που προκύπτουν στο τρίτο στάδιο του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου, οφείλονται σε μεγάλο βαθμό σε δραστηριότητες συντήρησης όπως επισκέψεις επιθεώρησης (συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς εξειδικευμένου προσωπικού και εξοπλισμού), τακτικές αλλαγές λαδιού και άλλων λιπαντικών, συντήρηση βαφής, συντήρηση ή αντικατάσταση εξαρτημάτων (συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων που σχετίζονται με τα υλικά και την κατασκευή αυτών των εξαρτημάτων αλλά και τη διάθεση οποιουδήποτε λειτουργικού απόβλητου) (Thomson & Harrison, 2015a). Επιπλέον, υπάρχουν εκπομπές που συνδέονται με τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, λόγω της ενέργειας που δαπανάται για τη λειτουργία του συστήματος εκτροπής (Yaw System), των φρένων και την ενεργοποίηση της γεννήτριας. Συνήθως, αυτή η καταναλισκόμενη ενέργεια (περίπου το 1% της παραγόμενης ενέργειας) αφαιρείται από την εκτιμώμενη ενέργεια παραγωγής, με αποτέλεσμα να θεωρείται κομμάτι της απώλειας εσόδων ή της μείωσης της συνολικής παραγωγής (Guezuraga, Zauner & Polz, 2012).

Παροπλισμός αιολικού πάρκου

Το τελικό στάδιο του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου είναι ο παροπλισμός, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις εργασίες αποσυναρμολόγησης, μεταφοράς, διάθεσης και ανακύκλωσης. Όλες οι παραπάνω διαδικασίες συνδέονται με εκπομπές άνθρακα, αν και η ανακύκλωση μπορεί επίσης να οδηγήσει σε εξοικονόμηση αέριων ρύπων. Η ενέργεια που απαιτείται κατά το στάδιο του παροπλισμού, εκτιμάται περίπου στο 2% της συνολικής ενέργειας που έχει παράξει η ανεμογεννήτρια σε όλη τη διάρκεια ζωής της (Guezuraga et al., 2012). Το στάδιο του παροπλισμού, είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τους ρύπους που εκλύονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Στον παρακάτω πίνακα, αναφέρεται η μέθοδος διάθεσης όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Να σημειωθεί πως η θεμελίωση των χερσαίων ανεμογεννητριών, συνήθως καλύπτεται και αφήνεται στο έδαφος (Chipindula et al., 2018).

Πίνακας 1. Διαχείριση υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου
Πηγή: Guezuraga et al., 2012. Ιδία επεξεργασία.

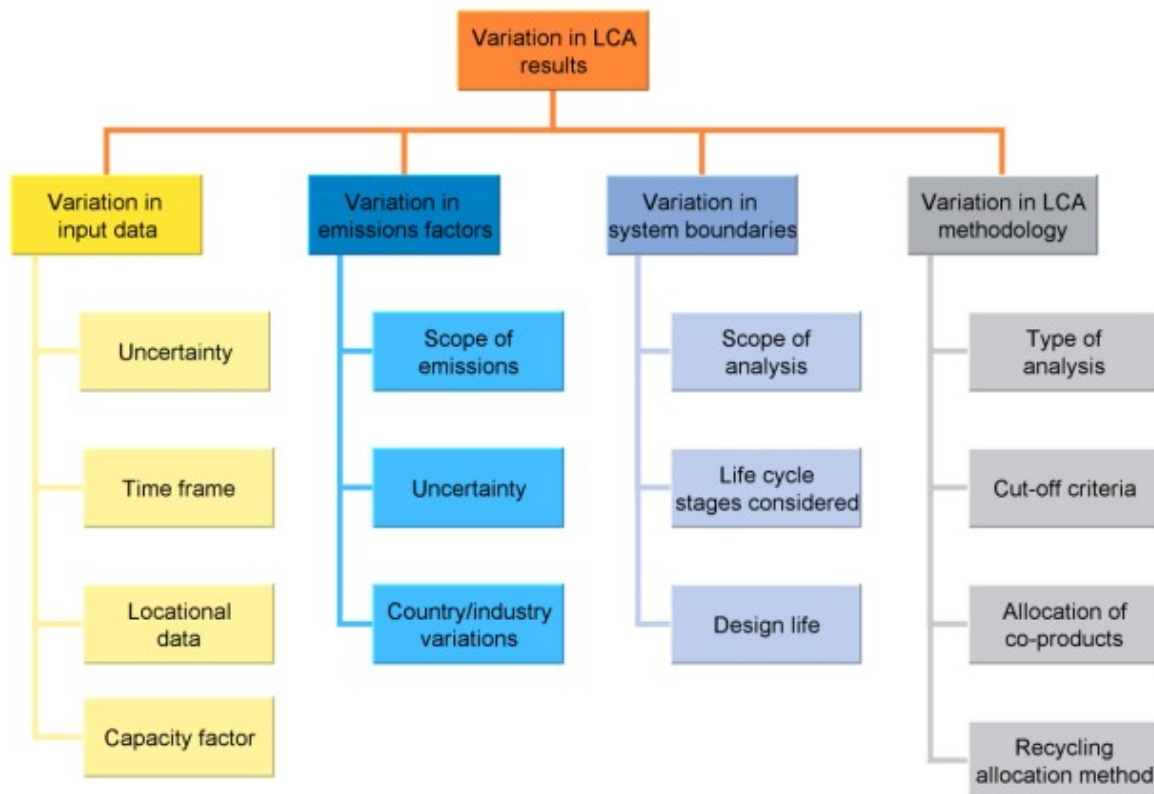
Material Type	Disposal Method
Iron	90% Recycling, 10% Landfill
Aluminum	90% Recycling, 10% Landfill
Steel	90% Recycling, 10% Landfill
Copper	90% Recycling, 10% Landfill
Fiberglass	100% Incinerated
Epoxy	100% Incinerated
Oil	100% Incinerated
Plastic PVC	100% Incinerated
Concrete	100% Landfill

2.2.2. Παράμετροι που επιδρούν στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων

Οι εκπομπές άνθρακα που προκαλούνται από τα αιολικά πάρκα κατά τη διάρκεια της ζωής τους, υπολογίζονται κατά κανόνα με τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment), η οποία ορίζεται από μια σειρά διεθνών προτύπων. Αυτό περιλαμβάνει τη συστηματική ανάλυση των εκπομπών αέριων ρύπων από κάθε διαδικασία σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου.

Δεδομένου ότι η μέθοδος AKZ έχει σχεδιαστεί για να εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα αγαθών και υπηρεσιών, υπάρχουν σημαντικά περιθώρια για να εισαχθούν σφάλματα στα αποτελέσματα, μέσω διαφοροποιήσεων στις παραδοχές, στην επιλογή της μεθοδολογίας και στην αβεβαιότητα των δεδομένων. Το Σχήμα 2 απεικονίζει τους βασικούς τομείς, όπου τέτοιες διακυμάνσεις θα μπορούσαν να εισαχθούν και να επηρεάσουν τις εκτιμήσεις των εκπομπών άνθρακα ενός αιολικού πάρκου. Αυτοί οι τομείς μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις μεταβολές

στα δεδομένα εισόδου, καθώς και την τυχόν αβεβαιότητα που υπάρχει στα εισαχθέντα δεδομένα. Η διαφοροποίηση των δεδομένων, προκύπτει από το προφίλ του εκάστοτε αιολικού πάρκου που μελετάται (χρονολογία κατασκευής, τοποθεσία, τεχνολογία). Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις αποκλίσεις που εντοπίζονται στους συντελεστές εκπομπής (οι οποίοι εξάγονται από σύνολα δεδομένων του κύκλου ζωής), στις ανόμοιες διεργασίες που πραγματοποιούνται ανά χώρα και στις μεταβολές σχετικά με το εύρος του πεδίου εκπομπής GHGs. Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει όλες τις φυσικές και χρονικές μεταβολές των ορίων του συστήματος και η τέταρτη, εμπεριέχει όλες τις παραλλαγές που εισάγονται από την τροποποίηση της μεθοδολογίας AKZ.



Σχήμα 2. Παράγοντες που διαφοροποιούν τις εκτιμήσεις των εκπομπών άνθρακα των αιολικών πάρκων.
Πηγή: Thomson & Harrison, 2015a

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη επεξήγηση των όρων που περιέχονται στο παραπάνω σχήμα (Thomson & Harrison, 2015a).

Αβεβαιότητα (Uncertainty). Συχνά αναφέρεται ως κατανομή πιθανοτήτων και περιλαμβάνει δυνητικά σφάλματα μετρήσεων καθώς και τις αβεβαιότητες των υποθέσεων. Για παράδειγμα, στο στάδιο της κατασκευής, η διάρκεια ζωής ενός αιολικού πάρκου είναι μια υπόθεση. Η πραγματική τιμή μπορεί να διαφέρει μερικά χρόνια.

Χρονικό πλαίσιο (Time frame). Τα αιολικά πάρκα που έχουν διαφορετικό έτος κατασκευής θα έχουν διαφορετικές επιπτώσεις καθώς τα σχέδια, τα υλικά και οι διαδικασίες εξελίσσονται συνεχώς.

Τοποθεσία/Χώρα/Βιομηχανία (Location/Country/Industry). Οι εκπομπές άνθρακα που προκαλούνται μέσω των διεργασιών, ποικίλουν ανάλογα τη βιομηχανία και το χώρο που εδράζεται. Επιπλέον, οι εκπομπές άνθρακα του κύκλου ζωής, επηρεάζονται από τις αποστάσεις μεταφοράς καθώς η τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου ποικίλει ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο.

Σχεδιασμός διάρκειας ζωής (Design life). Θεωρείται συχνά ότι είναι το χρονικό όριο του συστήματος μιας ανάλυσης και μπορεί να ποικίλει σε όλες τις μελέτες καθώς και να έχει μια σχετική αβεβαιότητα.

Συντελεστής δυναμικότητας (Capacity factor). Ο συντελεστής δυναμικότητας αποτελεί σημαντική τιμή για την εκτίμηση των εκπομπών άνθρακα. Πρόκειται για ένα μέτρο της παραγόμενης ισχύος ενός αιολικού πάρκου, που περιγράφεται ως ποσοστό της μέγιστης δυνατής παραγωγής. Ο συντελεστής δυναμικότητας, ποικίλει ανάλογα με το προφίλ του ανέμου στη δεδομένη τοποθεσία εγκατάστασης και εκτιμάται ότι ανέρχεται κατά μέσον όρο στο 26% για το στόλο αιολικών πάρκων της ΕΕ. Το νούμερο θεωρείται σχετικά χαμηλό, καθώς αντιπροσωπεύει ολόκληρο τον αιολικό στόλο συμπεριλαμβανομένων και πολύ παλιών αιολικών πάρκων. Οι συντελεστές δυναμικότητας των σύγχρονων αιολικών πάρκων κυμαίνονται από 30 έως 35 % για τα χερσαία και από 35 έως 55% για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα (Komusanac, Brindley & Fraile, 2020).

Εύρος πεδίου εκπομπών (Scope of emissions). Ουσιαστικά, μια εκτίμηση σχετικά με τις εκπομπές άνθρακα, θα πρέπει να περιλαμβάνει τις εκπομπές όλων των αερίων του θερμοκηπίου έτσι όπως προσδιορίστηκαν από την IPCC (2007). Όμως, συχνά λαμβάνεται υπόψη μόνο το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το οξείδιο του αζώτου ενώ πολλές μελέτες επικεντρώνονται αποκλειστικά στο διοξείδιο του άνθρακα. Επίσης, αρκετές μελέτες εστιάζουν στα έξι αέρια που προσδιορίζονται από το πρωτόκολλο του Κιότο (The Carbon Trust, 2012).

Αντικείμενο της ανάλυσης (Scope of analysis). Διάφορες μελέτες ενδέχεται να ορίζουν διαφορετικά όρια στο σύστημα. Συγκεκριμένα, υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις σχετικά με το αν η ανάλυση θα πρέπει να περιλαμβάνει τις εκπομπές που συνδέονται με τον κύκλο ζωής των κεφαλαιουχικών αγαθών, φερειπείν τα οχήματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των ανεμογεννητριών.

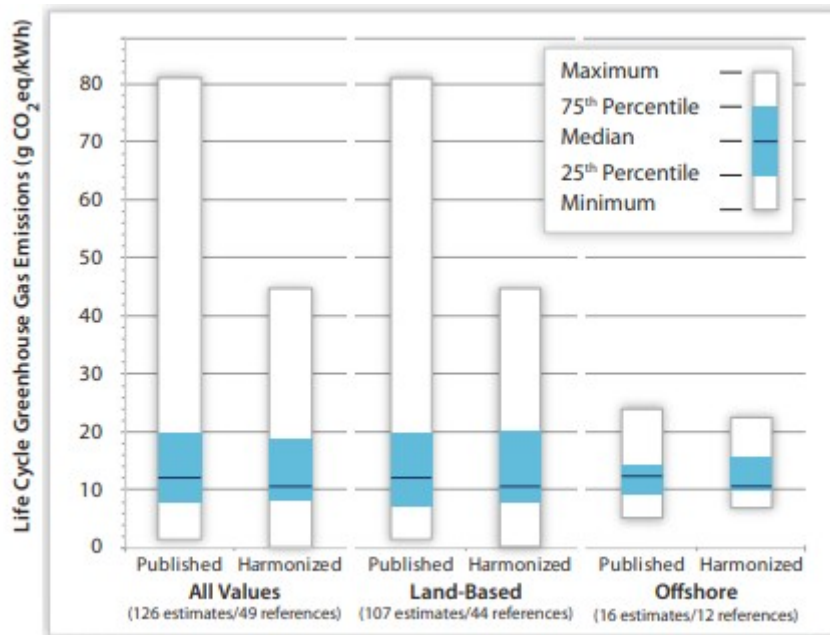
Στάδια του κύκλου ζωής (Life cycle stages). Παρόλο που όλα τα στάδια του κύκλου ζωής θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εκτίμηση των εκπομπών άνθρακα ενός αιολικού πάρκου, υπάρχουν μελέτες που εστιάζουν περισσότερο στη διεξοδική ανάλυση επιμέρους σταδίων όπως η συντήρηση των ανεμογεννητριών.

Κριτήρια αποκοπής (Cut-off criteria). Τα πρότυπα των AKZ επιτρέπουν να καθοριστούν κριτήρια αποκοπής, προκειμένου να αποκλειστούν από την ανάλυση τα υλικά ή οι διαδικασίες με χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Συχνά είναι χρονοβόρα η εκτίμηση των εκπομπών των μικρών αντικειμένων που δεν θα συμβάλουν σημαντικά στις συνολικές εκπομπές άνθρακα, αλλά η συγκεκριμένη πρακτική αφήνει περιθώρια να υπεισέλθουν σφάλματα.

Μεθοδολογία AKZ (LCA methodology). Οι εκπομπές άνθρακα συνήθως υπολογίζονται με βάση τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της AKZ, αλλά ο καθορισμός των ορίων του συστήματος και η εφαρμογή των κριτηρίων αποκοπής μπορεί να εισάγει “σφάλματα περικοπής”. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν εναλλακτικές υβριδικές τεχνικές που συνδυάζουν εθνικά δεδομένα από πίνακες οικονομικών εισροών-εκροών (ή πίνακες προσφοράς και χρήσης) με λεπτομερείς πληροφορίες διεργασιών, ώστε να εξετάζονται διεξοδικά όλες οι επιπτώσεις σε επίπεδο διεργασιών. Ωστόσο, αυτοί οι μέθοδοι θα μπορούσαν να υπολογίζουν διπλά τις εκπομπές άνθρακα και να οδηγούν σε υπερεκτιμήσεις. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα τόσο των αναλύσεων που βασίζονται στις διεργασίες όσο και των υβριδικών αναλύσεων.

Κατανομή (Allocation). Είναι η μέθοδος με την οποία κατανέμονται οι εκπομπές άνθρακα, σε περίπτωση ανακύκλωσης. Έτσι, προκύπτει ο προβληματισμός εάν η “πίστωση” της ανακύκλωσης πρέπει να διατεθεί στο προϊόν που ανακυκλώθηκε (closed-loop approximation method) ή στο προϊόν που κατασκευάζεται από το ανακυκλωμένο υλικό (recycled content method).

Τα τελευταία χρόνια έχουν εκπονηθεί χιλιάδες αναλύσεις κύκλου ζωής για διάφορους τύπους παραγωγής ενέργειας. Αναλυτές από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών (NREL) στις ΗΠΑ το 2013, εφάρμοσαν μια συστηματική προσέγγιση προκειμένου να αναθεωρήσουν την υπάρχουσα βιβλιογραφία, να εντοπίσουν τις κύριες πηγές μεταβλητότητας και όπου είναι δυνατόν, να μειώσουν τη διακύμανση στις εκτιμήσεις εκπομπών άνθρακα μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται εναρμόνιση (harmonization). Αυτή η μελέτη αξιολόγησε περισσότερες από 240 δημοσιευόμενες αναλύσεις κύκλου ζωής αιολικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων χερσαίων και υπεράκτιων τεχνολογιών. Η εναρμόνιση πραγματοποιήθηκε ώστε να επιτευχθεί μια μορφή συνέπειας μεταξύ παραμέτρων όπως ο συντελεστής δυναμικότητας (30% για χερσαία και 40% για υπεράκτια αιολικά συστήματα), η διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας και των εξαρτημάτων της (20 χρόνια), τα όρια του συστήματος και το εύρος του πεδίου εκπομπών. Από όλες τις παραμέτρους που διερευνήθηκαν, ο συντελεστής δυναμικότητας είχε το μεγαλύτερο αντίκτυπο στη μείωση της μεταβλητότητας που παρουσίαζαν οι εκτιμήσεις των εκπομπών. Στη δημοσιευμένη βιβλιογραφία, οι συντελεστές δυναμικότητας ποικίλουν ευρέως και κυμαίνονται από 11% έως 71%. Όταν αυτές οι τιμές προσαρμόστηκαν (στο 30% για χερσαία και 40% για υπεράκτια αιολικά συστήματα), η διακύμανση στο εύρος των εκτιμώμενων εκπομπών μειώθηκε κατά 42 % για όλες τις τεχνολογίες αιολικής ενέργειας (Dolan & Heath, 2012).



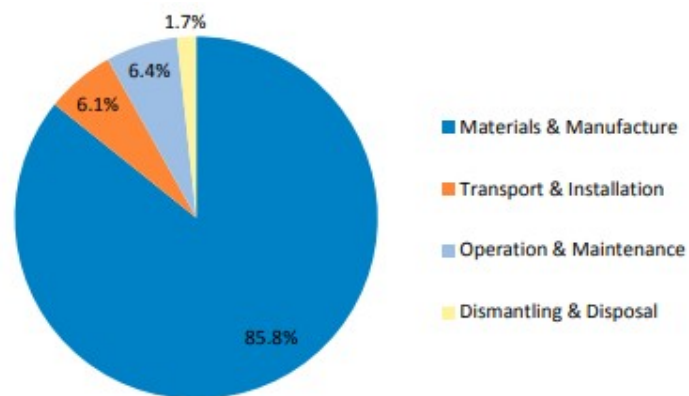
Σχήμα 3. Σύγκριση δημοσιευμένων και εναρμονισμένων εκτιμήσεων σχετικά με τους αέριους ρύπους που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Πηγή: National Renewable Energy Laboratory, 2013.

2.2.3. Η συμβολή κάθε σταδίου του κύκλου ζωής στις συνολικές εκπομπές ρύπων

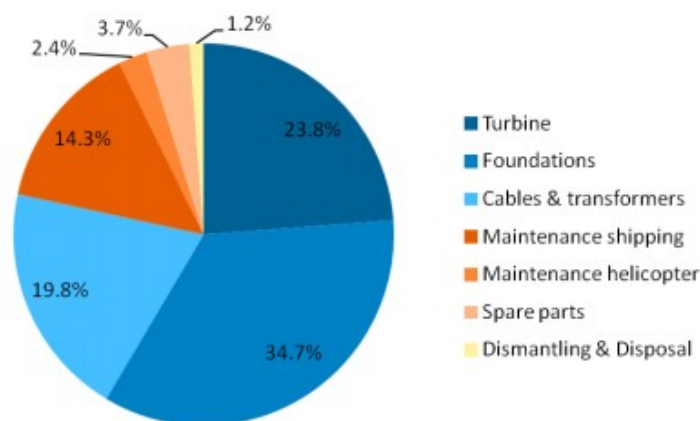
Οι δημοσιευμένες εκτιμήσεις σχετικά με τους αέριους ρύπους που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των αιολικών πάρκων (onshore-offshore) ποικίλουν, με μόνο το 41% αυτών να πληρούν τα βασικά κριτήρια ποιοτικού ελέγχου (Dolan και Heath, 2012). Η μελέτη που δημοσιεύτηκε από το NREL το 2013, έπειτα από εναρμόνιση βασικών παραδοχών (συντελεστές δυναμικότητας, όρια του συστήματος) παρέχει την πιο ολοκληρωμένη ανασκόπηση από δημοσιευμένες εκτιμήσεις εκπομπών, προσδιορίζοντας μέση εκτίμηση 11 g CO₂eq/kWh για χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα αντίστοιχα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι πραγματικές εκπομπές άνθρακα χερσαίων αιολικών πάρκων ενδέχεται να είναι υψηλότερες, καθώς ορισμένα αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε τυρφώνες, παράγοντας που δεν εξετάστηκε στη μελέτη του NREL. Η τύρφη ή αλλιώς ποάνθραξ, ουσιαστικά αποτελεί μια μορφή ορυκτού άνθρακα που σχηματίζεται στο υπέδαφος από την αργή μερική αποσύνθεση φυτικών υπολειμμάτων. Η τύρφη έχει μέχρι και 50% περιεκτικότητα σε άνθρακα. Μεγάλα κοιτάσματα τύρφης βρίσκονται στη Γερμανία, στην Ιρλανδία, στη Μεγάλη Βρετανία κ.α. Στην Ελλάδα, σύμφωνα με το τμήμα Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πάτρας, αξιόλογα κοιτάσματα τύρφης βρίσκονται στην περιοχή των Φιλιππων (Ανατολική Μακεδονία), στην Κωπαΐδα και στη λίμνη Χειμαδίτιδα. Οι τυρφώνες συχνά αποστραγγίζονται ως αποτέλεσμα των κατασκευαστικών διαδικασιών, αυξάνοντας το ρυθμό αποσύνθεσης στο έδαφος, γεγονός που οδηγεί σε πρόσθετες εκπομπές άνθρακα (Smoucha et al., 2016). Έτσι η απομάκρυνση της τύρφης έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια άνθρακα που έχει ήδη συσσωρευτεί.

Η ανάλυση κύκλου ζωής, φανέρωσε πως τα κύρια ποσοστά εκπομπών συμβαίνουν κατά την εξόρυξη πρώτων υλών, την κατασκευή και την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Στην περίπτωση ενός χερσαίου αιολικού πάρκου, τα στάδια της κατασκευής και της εγκατάστασης αντιπροσωπεύουν από κοινού περισσότερο από το 90% των συνολικών εκπομπών άνθρακα, με την πλειονότητα αυτών των εκπομπών να εκλύονται κατά την εξόρυξη των υλικών και την κατασκευή των επιμέρους εξαρτημάτων (Thomson & Harrison, 2015a). Αντίστοιχα, στην περίπτωση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, τα στάδια της κατασκευής και της εγκατάστασης είναι υπεύθυνα για περισσότερο από το 75% των συνολικών εκπομπών (Thomson & Harrison, 2015b).



Σχήμα 4. Η συμβολή κάθε σταδίου του κύκλου ζωής μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας στις εκπομπές ρύπων Πηγή: Thomson & Harrison, 2015a



Σχήμα 5. Λεπτομερής ανάλυση των εκπομπών άνθρακα μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας Πηγή: Thomson & Harrison, 2015b

Το στάδιο της μεταφοράς και της εγκατάστασης συμβάλλει περίπου 6% στο σύνολο των εκπομπών για ένα χερσαίο αιολικό πάρκο, με την προϋπόθεση ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις που οφείλονται σε αλλαγή χρήσης της γης σε άνθρακα (που αποτελεί κοινή πρακτική σε υφιστάμενες μελέτες). Για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, το ποσοστό θα είναι υψηλότερο ως αποτέλεσμα της εκτεταμένης χρήσης σκαφών.

Η πλειονότητα των ρύπων που προκύπτουν κατά το στάδιο λειτουργίας του αιολικού πάρκου οφείλονται σε δραστηριότητες συντήρησης, συνεισφέροντας περίπου 6% στις συνολικές εκπομπές στην περίπτωση ενός χερσαίου αιολικού πάρκου και περίπου 20% στην περίπτωση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Οι τελευταίες είναι σημαντικά υψηλότερες, λόγω του ότι ο χώρος εγκατάστασης είναι πιο δύσκολα προσβάσιμος. Οι δραστηριότητες συντήρησης που εξετάζονται στις υπάρχουσες δημοσιευμένες μελέτες, περιλαμβάνουν συνήθως την επισκευή ή την αντικατάσταση κιβωτίων ταχυτήτων, γεννητριών και μετασχηματιστών. Σε ορισμένες μελέτες εξετάζουν επίσης την αντικατάσταση των πτερυγίων των ανεμογεννητριών.

Το στάδιο του παροπλισμού εκτιμάται ότι συμβάλλει περίπου 1-2% στις συνολικές εκπομπές άνθρακα του κύκλου ζωής μιας ανεμογεννήτριας. Οι επιπτώσεις ή οι πιστώσεις της ανακύκλωσης, μπορούν ωστόσο να εισάγουν ορισμένες σημαντικές αποκλίσεις στις εκτιμήσεις των εκπομπών, λόγω των διαφορετικών παραδοχών σχετικά με τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίζονται οι επιπτώσεις (ή οι πιστώσεις) της ανακύκλωσης κατά την αξιολόγηση των εκπομπών, καθώς τα ανακυκλωμένα υλικά μπορούν αφενός να χρησιμοποιηθούν στο αρχικό στάδιο της κατασκευής (recycled content method) και αφετέρου να ανακυκλωθούν στο τέλος του κύκλου ζωής τους (closed-loop approximation method). Και οι δύο αυτές πρακτικές ενδέχεται να επηρεάσουν τις εκτιμήσεις των εκπομπών άνθρακα, τόσο στο στάδιο της κατασκευής όσο και στο στάδιο του παροπλισμού. Επιπλέον, ανεξάρτητα από τη μέθοδο ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται, οι παραδοχές σχετικά με τη δυνατότητα ανακύκλωσης στο τέλος του κύκλου ζωής, θα επηρεάσουν τις εκπομπές που συνδέονται με τη διάθεση των αποβλήτων, καθώς το ανακυκλωμένο υλικό δεν θα χρειάζεται να υποβάλλεται σε επεξεργασία αποβλήτων. Η πλειονότητα των μελετών δεν αναφέρει ρητά το μέγεθος των ρύπων που αποφεύγεται χάρη στη διαδικασία της ανακύκλωσης. (Thomson & Harrison, 2015b) Σύμφωνα με τους Guezuraga et al. (2012), οι εκπομπές άνθρακα μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 2MW εκτιμούνται σε 17,35 gCO₂/kWh, ενώ η ίδια ανεμογεννήτρια αν κατασκευάζονταν με τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών (μέθοδος recycled content), οι εκπομπές άνθρακα θα ήταν 9,78 gCO₂/kWh, μια μείωση εκπομπών της τάξεως του 44%. Επιπλέον, η αποπληρωμή του άνθρακα της ανεμογεννήτριας που κατασκευάστηκε από ανακυκλώσιμα υλικά, θα γινόταν εντός των πρώτων 7,8 μηνών λειτουργίας της, ενώ στην αντίθετη περίπτωση θα χρειαζόταν 13,8 μήνες.

2.3. Εξόφληση ενεργειακού χρέους

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι εκτιμήσεις των αέριων ρύπων, από μόνες τους δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμες και πρακτικά παρουσιάζουν ενδιαφέρον, μόνο όταν συγκρίνονται με αντίστοιχες εκπομπές άλλων μορφών παραγωγής ενέργειας. Απαιτείται περαιτέρω ερμηνεία για τον υπολογισμό πιο ουσιαστικών μεγεθών και όρων, όπως η μείωση εκπομπών που επιτυγχάνεται κατά τη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου (δηλαδή η καθαρή μείωση των εκπομπών άνθρακα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις εκπομπές που παράγονται κατά τον κύκλο ζωής του, όσο και τις εκπομπές που εκτοπίζει καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του) ή η περίοδος αποπληρωμής του άνθρακα (δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε οι εξοικονομούμενες εκπομπές να αντισταθμίσουν τις εκπομπές του κύκλου ζωής). Οι εκτιμήσεις των εξοικονομούμενων εκπομπών ποικίλουν ευρέως, καθώς αποτελούν μέτρο των εκτοπισμένων

εκπομπών που προκύπτουν από το γεγονός ότι η αιολική ενέργεια αντικαθιστά άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας. Η τρέχουσα πρακτική και η πολιτική που εφαρμόζεται μεταξύ των ακαδημαϊκών ερευνών, είναι να εκτιμηθεί το ποσό αυτό με βάση τις μέσες εκπομπές ολόκληρου του δικτύου χρησιμοποιώντας ετήσια στοιχεία (Thomson & Harrison, 2015a).

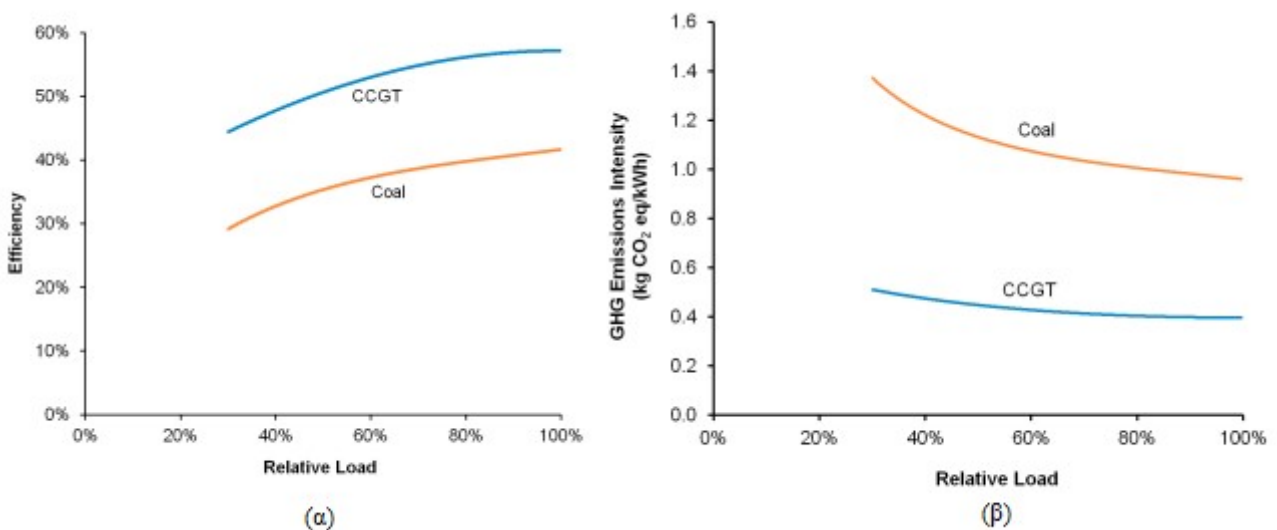
Η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, καλύπτεται από ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών παραγωγής, συμπεριλαμβανομένων των αιολικών και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για να υπολογιστούν οι επιπτώσεις που θα έχει η προσθήκη της αιολικής ενέργειας στις εκπομπές άνθρακα, αρχικά θα πρέπει να καθοριστεί ποιος από όλους αυτούς τους τύπους παραγωγής, θα αντικατασταθεί από την αιολική ενέργεια. Για να διατηρηθεί σταθερή η “προσφορά” του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να υπάρχει πάντα ίση ζήτηση. Ωστόσο, σχεδόν σε όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η προσφορά τείνει να αυξάνεται και να μειώνεται ώστε να ανταποκρίνεται στη μεταβαλλόμενη ζήτηση, ανά λεπτό, με βάση την τιμή με την οποία κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πρόθυμος να παρέχει μια πρόσθετη μονάδα (MWh) ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, οι τύποι παραγωγής με χαμηλό οριακό κόστος παραγωγής επιλέγονται πρώτοι από την αγορά. Έπειτα, καθώς αυξάνεται η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, αρχίζουν να λειτουργούν μονάδες παραγωγής με προοδευτικά υψηλότερο οριακό κόστος. Ο τύπος παραγωγής που έχει το υψηλότερο οριακό κόστος, είναι ο τελευταίος που ανταποκρίνεται στην αύξηση της ζήτησης και ο πρώτος που τερματίζει την παραγωγή καθώς μειώνεται η ζήτηση. Αυτός ο τύπος παραγωγής είναι γνωστός ως οριακή μονάδα. (Platt, Roy & Gardner, 2012)

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική ενέργεια, έχει ορισμένες μοναδικές οικονομικές ιδιότητες. Η πιο σημαντική από αυτές είναι το σχεδόν μηδενικό οριακό κόστος και αποδίδεται στο γεγονός ότι μια ανεμογεννήτρια δεν απαιτεί οικονομικές εισροές (όπως τα καύσιμα) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η αιολική ενέργεια θα επιλεγεί πριν από τους συμβατικούς σταθμούς που τροφοδοτούνται με ορυκτά καύσιμα. Η προσθήκη της αιολικής ενέργειας στο σύστημα παραγωγής, θα εκτοπίσει ή θα εξαλείψει μια ισοδύναμη ποσότητα παροχής από την οριακή μονάδα.

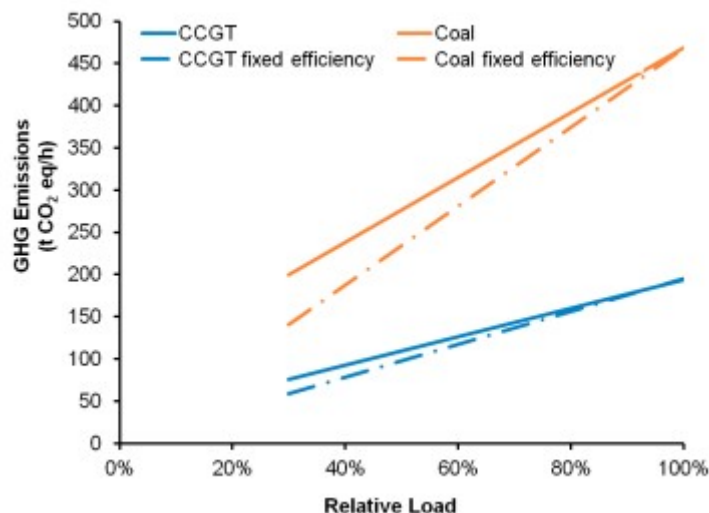
2.3.1. Κυρώσεις απόδοσης

Οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής θα λειτουργούν με μερικό φορτίο (part load) είτε λόγω της αυξημένης διαθεσιμότητας της αιολικής ενέργειας, είτε για την παροχή εφεδρείας προκειμένου να αντιμετωπιστούν τυχόν αιφνίδιες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου ή της ζήτησης. Ένας παράγοντας που δυσχεραίνει τον υπολογισμό των εκτοπισμένων οριακών εκπομπών της αιολικής ενέργειας, είναι ότι υπάρχουν σημαντικές “κυρώσεις απόδοσης” που οφείλονται στη λειτουργία των συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας με μειωμένο φορτίο (Σχήμα 6). Συνεπώς η ένταση άνθρακα των συμβατικών σταθμών, δηλαδή οι εκπομπές που προκαλούνται για την παραγωγή μιας kWh ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνεται λόγω της συμμετοχής της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο (Σχήμα 6) (Thomson & Harrison, 2015a).

Το γεγονός αυτό, οδήγησε στη δημοσίευση ορισμένων εκθέσεων, όπου υποστήριξαν πως η αιολική ενέργεια, στην πραγματικότητα οδηγεί σε αύξηση των εκπομπών άνθρακα αφού αναγκάζει τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής να λειτουργούν σε πιο “ρυπογόνες” συνθήκες λειτουργίας. Στην πραγματικότητα, ενώ η ένταση των εκπομπών αυξάνεται, γενικά οι συνολικές εκπομπές των συμβατικών σταθμών εξακολουθούν να μειώνονται καθώς μειώνεται η παραγωγή ενέργειας (αντιπροσωπεύονται από τις συνεχείς γραμμές στο Σχήμα 7). Συνέπεια της μειωμένης απόδοσης, είναι να μειωθεί ως ένα βαθμό το μέγεθος των εξοικονομούμενων εκπομπών της αιολικής ενέργειας. Αυτό απεικονίζεται από τις δυο διακεκομμένες γραμμές που δείχνουν τις εκπομπές άνθρακα, εάν υποτεθεί ότι οι συμβατικοί σταθμοί λειτουργούν σταθερά με μέγιστη απόδοση ακόμα και σε συνθήκες μερικού φορτίου. Καθώς οι συμβατικές γεννήτριες λειτουργούν με χαμηλότερη απόδοση όταν είναι μερικώς φορτισμένες, οι εκπομπές του άνθρακα δεν μειώνονται όσο θα αναμένονταν, αλλά εξακολουθεί να υπάρχει εξοικονόμηση εκπομπών. Μελέτες σχετικά με τις οριακές εκπομπές των δικτύων σε ολόκληρο τον κόσμο κατέδειξαν ότι οι συνέπειες της μειωμένης απόδοσης έχουν αντίκτυπο και επομένως πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να υπάρξει μια ακριβή εκτίμηση των εκπομπών άνθρακα της αιολικής ενέργειας.



Σχήμα 6. (α) Κυρώσεις απόδοσης συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής λιθάνθρακα και συνδυασμένου κύκλου (β) Ένταση των εκπομπών συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας. Πηγή: Thomson & Harrison, 2015a



Σχήμα 7. Εκπομπές αέριων ρύπων τυπικών συμβατικών σταθμών λιθάνθρακα και συνδυασμένου κύκλου συναρτήσεως του φορτίου λειτουργίας, ονομαστικής ισχύος 488 MW και 492 MW αντίστοιχα. Πηγή: Thomson & Harrison, 2015a

2.3.2. Οριακές εκπομπές

Η ακριβής καταγραφή των εκπομπών που εκπομίζονται από την αιολική ενέργεια, θα πρέπει να αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι η αιολική ενέργεια αντικαθιστά μόνο ορισμένους τύπους παραγωγής. Για παράδειγμα, η πυρηνική ενέργεια δεν ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις που παρουσιάζει η αιολική ενέργεια στην παραγωγή. Η απόφαση για το ποιες μονάδες παραγωγής θα είναι οριακές και για πόσες ώρες στη διάρκεια ενός έτους, είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Η οριακή μονάδα, εκτός του ότι ορίζει την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, υποδεικνύει επίσης τον τύπο του καυσίμου που πιθανότητα θα υποκατασταθεί. Οι οριακοί σταθμοί παραγωγής, συμπεριλαμβανομένων των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου και λιθάνθρακα, λειτουργούν με μερικό φορτίο για να παρέχουν αποθεματικό και να ανταποκρίνονται στις διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας και της ζήτησης. Οι εκπομπές που εκπομίζονται από την αιολική ενέργεια, σχετίζονται με αυτό το οριακό μίγμα παραγωγής (Platt, Roy & Gardner, 2012).

Μελέτες σε διεθνές επίπεδο, επιβεβαιώνουν πως οι οριακές εκπομπές διαφέρουν σημαντικά από τις μέσες εκπομπές των αντίστοιχων δικτύων, με τις πραγματικές τιμές να εξαρτώνται από τους τύπους παραγωγής που διατίθενται στο δίκτυο και τις σχετικές τιμές των διαφόρων καυσίμων. Σχετικά με το δίκτυο παραγωγής της Μεγάλης Βρετανίας, ενώ οι κυρώσεις απόδοσης μείωσαν το μέγεθος των εκτοπισμένων οριακών εκπομπών, αυτές παρέμειναν υψηλότερες από τον αντίστοιχο μέσο όρο εκπομπών του δικτύου. Συγκεκριμένα, οι εκτοπισμένες οριακές εκπομπές της αιολικής ενέργειας ήταν 560 g CO₂eq/kWh (για την περίοδο Νοέμβριος 2008 – Ιούνιος 2013), 9% υψηλότερες από τις αντίστοιχες μέσες εκπομπές του δικτύου, αποτρέποντας συνολικά την έκλυση περίπου 19 Mt CO₂eq (Thomson & Harrison, 2015a). Ωστόσο, άλλες μελέτες έχουν βρει πολύ διαφορετικά ευρήματα. Μια τέτοια μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Wheatley το 2013 και αφορούσε το δίκτυο παραγωγής της Ιρλανδίας, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι εξοικονομούμενες οριακές εκπομπές της αιολικής

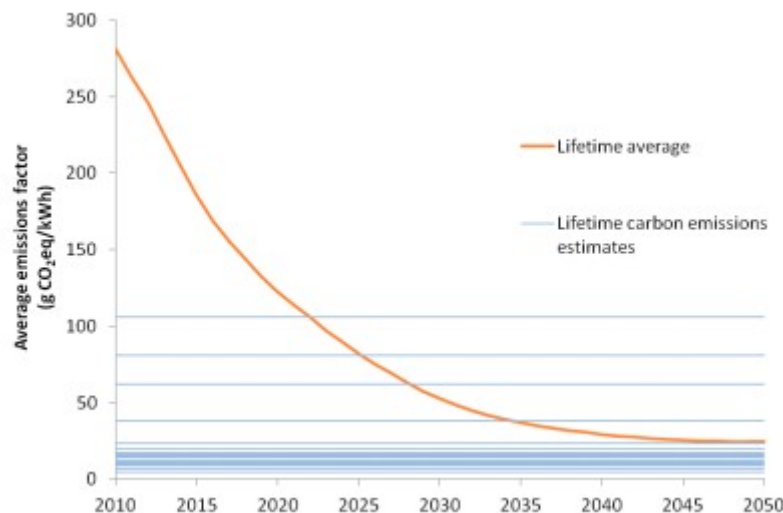
ενέργειας για το 2011, ήταν 0,28 t CO₂/MWh, σημαντικά χαμηλότερες από τις μέσες εκπομπές του δικτύου 0,52 tCO₂/MWh. Ωστόσο, το μοντέλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ιρλανδίας, διαφέρει σημαντικά από το αντίστοιχο της Μεγάλης Βρετανίας, αφού η Ιρλανδία δεν διαθέτει κανένα πυρηνικό σταθμό, η διείσδυση της αιολικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη και ο λιθάνθρακας χρησιμοποιείται ευρέως ως το βασικό καύσιμο. Έτσι, η μειωμένη απόδοση των συμβατικών σταθμών που λειτουργούν με μερικό φορτίο λόγω της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στο οριακό μίγμα παραγωγής, έχει ως αποτέλεσμα, να μην υπάρχει μείωση των συνολικών εκπομπών, αλλά το μέγεθος των εκπομπών να είναι μικρότερο από αυτό που αναμενόταν και σχεδιαζόταν.

2.3.3. Περίοδος αποπληρωμής

Η περίοδος αποπληρωμής, είναι το διάστημα που απαιτείται προκειμένου οι εκπομπές που εκτοπίζονται από την αιολική ενέργεια, να αντισταθμίσουν τις εκπομπές που εκλύονται κατά τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου. Σύμφωνα με τα τρέχοντα ποσοστά των εξοικονομούμενων οριακών εκπομπών, η αποπληρωμή του άνθρακα κυμαίνεται περίπου από 6 μήνες έως 2 χρόνια, αν και αυτό μπορεί να διαρκέσει αρκετά χρόνια για χερσαία αιολικά πάρκα που έχουν κατασκευαστεί σε τυρφώνες, χωρίς να έχει καταβληθεί καμία προσπάθεια για το μετριασμό των επιπτώσεων (Thomson & Harrison, 2015a). Από την άλλη πλευρά, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, μπορούν να “αποπληρώσουν” τις εκπομπές άνθρακα που εκλύθηκαν καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής τους, σε χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 5 μήνες έως 1 χρόνο (Thomson & Harrison, 2015b). Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για την αποπληρωμή της ενέργειας (embodied energy) που δαπανήθηκε για τη δημιουργία και την κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού ή ενός συμβατικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εκτιμάται πως είναι 3,16 και 2,72 φορές αντίστοιχα, μεγαλύτερη από εκείνη ενός αιολικού πάρκου (Guezuraga et al., 2012).

Τόσο οι μέσες όσο και οι οριακές εκπομπές που προκύπτουν σε ένα δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι πιθανό να μειωθούν με την πάροδο του χρόνου, καθώς οι πιο ρυπογόνοι σταθμοί παραγωγής, σταδιακά, θα αντικαθίστανται με εναλλακτικές πηγές που θα είναι πιο φιλικές ως προς το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, οι εκπομπές που εκτοπίζονται από ένα δεδομένο αιολικό πάρκο, θα τείνουν να μειώνονται με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα τα αιολικά πάρκα που θα κατασκευαστούν μετέπειτα στο μέλλον, να χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να αποπληρώσουν το “ενεργειακό τους χρέος” (Smoucha et al., 2016; Thomson & Harrison, 2015a). Το Σχήμα 8, απεικονίζει το κατώτατο όριο αποπληρωμής (Lifetime average) για χερσαία αιολικά πάρκα με διάρκεια ζωής 20 έτη, που κατασκευάστηκαν ή θα κατασκευαστούν μεταξύ 2010 και 2050. Παρατηρείται πως η πλειονότητα των εκτιμήσεων που σχετίζονται με το αποτύπωμα άνθρακα των χερσαίων αιολικών πάρκων (Lifetime carbon emissions estimates), υπολείπονται αυτού του ορίου αποπληρωμής και θα επιτύχουν την αποπληρωμή του άνθρακα. Ωστόσο, οι τρεις υψηλότερες εκτιμήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε χερσαία αιολικά πάρκα που κατασκευάστηκαν σε δασικές εκτάσεις τύρφης, δεν θα επιτύχαιναν την αποπληρωμή, εάν είχαν κατασκευαστεί μετά τα μέσα της δεκαετίας του 2020. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα αιολικά πάρκα που σχεδιάζονται επί του παρόντος και τονίζει τη σημασία να διασφαλιστεί ότι οι τυρφώνες διαταράσσονται όσο το δυνατόν λιγότερο. Για τα υπεράκτια αιολικά

πάρκα, όλες οι τρέχουσες εκτιμήσεις του αποτυπώματος άνθρακα, βρίσκονται κάτω από το όριο αποπληρωμής έως το 2050, αρκεί το αποτύπωμα τους να διατηρηθεί όσο το δυνατόν σε χαμηλότερα επίπεδα (Thomson & Harrison, 2015b).



Σχήμα 8. Περίοδος αποπληρωμής για μελλοντικά (χερσαία) αιολικά πάρκα
Πηγή: Thomson & Harrison, 2015a

2.4. Το ανθρακικό αποτύπωμα των ανεμογεννητριών ως συνάρτηση της ονομαστικής τους ισχύος

Ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου ένα αιολικό πάρκο να αντισταθμίσει το ανθρακικό του αποτύπωμα και να επιτύχει καθαρή μείωση των συνολικών εκπομπών, όπως έχει αναφερθεί, είναι άμεσα συνδεδεμένο με τους τύπους παραγωγής που καλείται να “εκτοπίσει” και φυσικά από το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της υποψήφιας περιοχής. Ωστόσο, εξίσου υψίστης σημασίας, φαίνεται πως είναι το μέγεθος των ανεμογεννητριών που θα συγκροτήσουν μια μονάδα αιολικής εκμετάλλευσης. Δεδομένου ότι μια ανεμογεννήτρια που διαθέτει μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ, απαιτεί μεγαλύτερη ποσότητα υλικών για την κατασκευή της (γεγονός που ισοδυναμεί με πρόσθετες εκπομπές) αλλά παράλληλα προσφέρει αυξημένη παραγωγική ικανότητα συγκριτικά με μια ανεμογεννήτρια μικρότερης ονομαστικής ισχύος, προκύπτει εύλογα το ερώτημα, πως διαμορφώνονται σημαντικά μεγέθη όπως η ένταση άνθρακα (carbon intensity), η περίοδος αποπληρωμής (payback period) καθώς και οι εκπομπές που αντισταθμίζει η κάθε ανεμογεννήτρια (offset emissions), πάντα με γνώμονα την ονομαστική ισχύ. Με τα στοιχεία αυτά να δείχνουν τα οφέλη της εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας σε σχέση με κάποια άλλη, οι κυβερνήσεις και οι σχεδιαστές αναπτυξιακής στρατηγικής, μπορούν να αξιολογήσουν ποια ανεμογεννήτρια κρίνεται επωφελής η εγκατάσταση της, προκειμένου να επιτύχουν τους στόχους τους για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Σε μια μελέτη που διεξήχθη από τους Smoucha et al. (2016), εξετάστηκαν συνολικά 14 διαφορετικές ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ από 50 kW έως 3,4 MW. Στα πλαίσια

της ανάλυση κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών, οι ερευνητές συμπεριέλαβαν μόνο τα στάδια της κατασκευής, της μεταφοράς και της εγκατάστασης, εφόσον αρκούν για σκοπούς σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πινάκας 2. Λεπτομερή καταγραφή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση κύκλου ζωής για κάθε ανεμογεννήτρια. Οι δείκτες “Α” και “Β” υποδεικνύουν δύο διαφορετικές ανεμογεννήτριες με ίδια ονομαστική ισχύ. Ο δείκτης “20 years” αναφέρει τις εκπομπές που υπολογίστηκαν με δεδομένο την 20ετή διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας, ενώ ο δείκτης “25 years” αντιπροσωπεύει μια διάρκεια ζωής 25 ετών. Πηγή: Smoucha et al., 2016.

Rated Power	Electricity generated over lifetime (MWh)	Total emissions (tCO _{2eq})	Carbon intensity (kg/MWh)	Payback period (days)	Payback period as percentage of lifetime (%)	Offset emissions (tCO _{2eq})
50 kW	2260	59	26.1	312	4.3	1317
80 kW	3616	58	16	192	2.6	2144
100 kW _A	4520	61	13.4	160	2.2	2692
100 kW _B	4520	134	29.5	354	4.9	2619
250 kW	11300	148	13.1	157	2.1	6734
500 kW	22601	274	12.1	145	2.0	13490
900 kW _{20 years}	40681	289	7.1	85	1.2	24486
900 kW _{25 years}	50852	289	5.7	85	0.9	30680
2 MW kW _{20 years}	90403	937	10.4	124	1.7	54119
2 MW kW _{25 years}	113004	937	8.3	124	1.4	67883
2.05 MW _A	92663	641	6.9	83	1.1	55791
2.05 MW _B	92663	747	8.1	97	1.3	55685
2.3 MW _{20 years}	103964	859	8.3	99	1.4	62455
2.3 MW _{25 years}	129955	859	6.6	99	1.1	78283
3. MW	135605	1046	7.7	92	1.3	81538
3.2 MW	144645	957	6.6	79	1.1	87132
3.4 MW	153685	824	5.4	64	0.9	92770

Σύμφωνα με τα δεδομένα, οι συνολικές εκπομπές της Α/Γ ονομαστικής ισχύος 50 kW ήταν ελαφρώς υψηλότερες από την Α/Γ ονομαστικής ισχύος 80 kW, λόγω των οριακά υψηλότερων εκπομπών που εκλύονται κατά τη διαδικασία κατασκευή τους. Η διαφορά του 1 t CO_{2eq} που εντοπίζεται στις συνολικές εκπομπές, έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η περίοδος αποπληρωμής των Α/Γ 50 kW για επιπλέον 120 ημέρες. Πρόκειται για ένα επιπλέον 1,6% του χρόνου αποπληρωμής εκφρασμένου ως ποσοστό της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών, γεγονός που οφείλεται κυρίως στη διαφορά των 30 kW στην ονομαστική ισχύ. Τα οφέλη που αποκομίζονται από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών των 80 kW, είναι η αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα και η αποπληρωμή του άνθρακα σε σημαντικά μικρότερο διάστημα, αποτρέποντας 826,8 t CO_{2eq} παραπάνω από τις Α/Γ των 50 kW. Συνεπώς, αντί της εγκατάστασης 100 ανεμογεννητριών με ονομαστική ισχύ 50 kW, εάν είχαν εγκατασταθεί 100 ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 80 kW, θα αποτρέπονταν επιπλέον 82.680 t CO_{2eq} καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής, ή περίπου 4.134 t CO_{2eq} κάθε χρόνο. Εναλλακτικά, θα πρέπει να εγκατασταθούν μόνο 63 Α/Γ των 80 kW για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας (με την αντίστοιχη των 100 Α/Γ των 50 kW) αντισταθμίζοντας όμως επιπλέον 3.342 t CO_{2eq} σε ορίζοντα εικοσαετίας (διάρκεια ζωής των Α/Γ).

Υπό συνθήκες τοποθεσίας όπου όλοι οι συνδυασμοί ανεμογεννητριών θα παρήγαγαν εξίσου αποδοτικά ηλεκτρική ενέργεια, θα υπήρχαν λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση μιας Α/Γ των 500 kW αντί δύο Α/Γ των 250 kW, αφού με την Α/Γ των 500 kW αποτρέπονται 22 t CO₂eq παραπάνω. Αν και η διαφορά είναι μικρή για μια σύγκριση, γίνεται πιο σημαντική όταν εξετάζεται για αιολικό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 5 MW, αφού αποτρέπονται 216 t CO₂eq. Παρομοίως, λόγω της υψηλής έντασης άνθρακα της Α/Γ των 50 kW, με την εγκατάσταση μιας Α/Γ των 250 kW αντί για πέντε Α/Γ των 50 kW εξοικονομούνται 147 t CO₂eq. Με την εγκατάσταση μιας Α/Γ των 500 kW αντί για δέκα Α/Γ των 50 kW αποφεύγονται 315 t CO₂eq. Αν και τα μεγέθη αυτά δεν είναι σημαντικά για τόσο μικρά αιολικά πάρκα, όταν κλιμακώνονται η εξοικονόμηση αυξάνεται ραγδαία. Για παράδειγμα, εάν το αιολικό πάρκο ήταν 5 MW, η εγκατάσταση ανεμογεννητριών ονομαστικής ισχύος 250 kW αντί των 50 kW θα απέτρεπε την εκπομπή 2.937 t CO₂eq. Αντίστοιχα, αν εγκατασταθούν Α/Γ ονομαστικής ισχύος 500 kW αντί των 50 kW, η εξοικονόμηση θα έφτανε στους 3.153 t CO₂eq σε ορίζοντα εικοσαετίας. Η εξοικονόμηση συνεχίζει να αυξάνεται με μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Για τη δημιουργία αιολικού πάρκου 6 MW, η εγκατάσταση δύο Α/Γ των 3 MW αντί τριών Α/Γ των 2 MW έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση της τάξεως των 719 t CO₂eq.

Μια παρόμοια έρευνα που πραγματοποιήθηκε πρόσφατα από τους Bhandari et al. το 2020, εξέτασε τον τρόπο με τον οποίο το μέγεθος των ανεμογεννητριών και ο συντελεστής δυναμικότητας, επιδρούν στο ανθρακικό αποτύπωμα των αιολικών πάρκων. Στα πλαίσια της μελέτης αναθεωρήθηκε μεγάλο τμήμα της δημοσιευμένης βιβλιογραφίας για να εξακριβωθεί η επιρροή διάφορων παραγόντων όπως το ύψος της πλήμνης, η διάμετρος του δρομέα, ο συντελεστής δυναμικότητας κ.ά. Διαπιστώθηκε εξίσου, πως στην περίπτωση ενός χερσαίου αιολικού πάρκου, η αύξηση των διαστάσεων των ανεμογεννητριών θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών ισοδύναμου άνθρακα. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, το μέγεθος των ανεμογεννητριών δεν φαίνεται να έχει καθοριστικό ρόλο. Βέβαια, λόγω της περιορισμένης βιβλιογραφίας, το μέγεθος του δείγματος που εξετάστηκε για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα ήταν αρκετά μικρό για να θεωρηθεί αξιόπιστο και ασφαλές ένα τέτοιο συμπέρασμα. Συνεπώς, δεδομένου ότι απαιτούνται εκατοντάδες περισσότερες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών για την επίτευξη των στόχων σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη μείωση του άνθρακα, κρίνεται απαραίτητο να εξεταστεί η εξοικονόμηση σε μεγαλύτερη κλίμακα αντί της κάθε ανεμογεννήτριας μεμονωμένα.

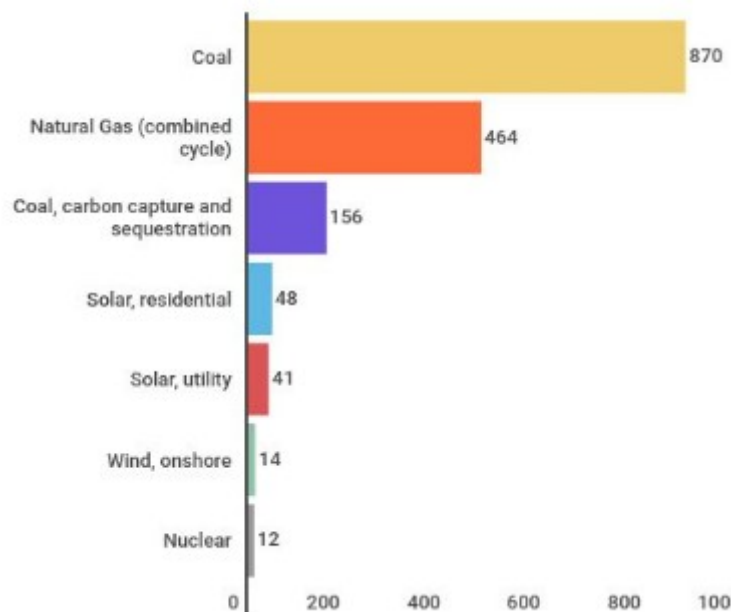
Γίνεται αντιληπτό πως η εγκατάσταση ανεμογεννητριών μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος, είναι πιο συμφέρουσα από την εγκατάσταση πολλών ανεμογεννητριών μικρότερης ονομαστικής ισχύος. Παρά τις μεγαλύτερες διαστάσεις του δρομέα και του πύργου στήριξης που έχουν οι ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ, αυτά τα πρόσθετα υλικά δεν επαρκούν για να αναιρέσουν το πλεονέκτημα της πρόσθετης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που είναι ικανές να παράξουν. Για την ακρίβεια, η συνολική ποσότητα των υλικών, εξακολουθεί να είναι μικρότερη από αυτή που θα χρησιμοποιούνταν για την εγκατάσταση πολλών μικρότερων ανεμογεννητριών (Bhandari et al., 2020; Smoucha et al., 2016).

Παρόλα αυτά, το τρέχον σύστημα οικονομικών κινήτρων (financial incentive scheme) φαίνεται να αντιτίθεται σε αυτή τη λογική, αφού καταστούν για τις εταιρείες παραγωγής και εγκατάστασης, οικονομικά πιο βιώσιμο και κερδοφόρο την κεφαλαιοποίηση της εγκατάστασης Α/Γ μικρότερης ονομαστικής ισχύος, γεγονός που προσφέρει μεγαλύτερη οικονομική απόδοση στην τρέχουσα αγορά παρά το μειωμένο περιβαλλοντικό όφελος. Όπως αναφέρθηκε, οι Α/Γ με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ, έχουν μεγαλύτερη ικανότητα να μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα ανά kWh παραγόμενης ενέργειας και έχουν τις μικρότερες περιόδους αποπληρωμής τόσο ως προς τον άνθρακα όσο και ως ποσοστό της διάρκειας ζωής τους (Πίνακας 2). Ωστόσο, όπως αναφέρουν και οι Smoucha et al. (2016), τα οικονομικά κίνητρα στρεβλώνονται για να ενθαρρύνουν τους κατασκευαστές αιολικών πάρκων να εγκαταστήσουν μεγαλύτερο αριθμό Α/Γ με μικρότερη ονομαστική ισχύ, οι οποίες έχουν μεγαλύτερη ένταση άνθρακα και μεγαλύτερες περιόδους αποπληρωμής.

2.5. Το ανθρακικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας συγκριτικά με το αντίστοιχο άλλων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Το ανθρακικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας είναι από τα μικρότερα, συγκριτικά με τις υπόλοιπους διαθέσιμους τύπους παραγωγής ενέργειας. Σύμφωνα με το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) του Υπουργείου Ενέργειας (DOE) των ΗΠΑ, το ανθρακικό αποτύπωμα του λιθάνθρακα είναι 90 φορές μεγαλύτερο και του φυσικού αερίου 40 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας.

Είναι αλήθεια πως η αιολική ενέργεια, δεν αποτελεί μια μορφή ενέργειας με μηδενικές εκπομπές ρύπων. Αέριοι ρύποι παράγονται όταν οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται, εγκαθίστανται, συντηρούνται και παροπλίζονται. Ωστόσο, οι εκπομπές που εκλύονται κατά τη διάρκεια ζωής των ηλιακών, αιολικών και πυρηνικών τεχνολογιών, είναι σημαντικά μικρότερες και λιγότερο μεταβαλλόμενες από τις αντίστοιχες εκπομπές των τεχνολογιών που βασίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων. Πιο συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια ευθύνεται για την εκπομπή περίπου 11 γραμμαρίων διοξειδίου του άνθρακα ανά κιλοβατώρα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (NREL, 2013) τη στιγμή που ο λιθάνθρακας προκαλεί την εκπομπή περίπου 870 g CO₂/kWh και το φυσικό αέριο 464 g CO₂/kWh (Schipani, 2018). Να σημειωθεί πως υπάρχουν σταθμοί παραγωγής που χρησιμοποιούν μια τεχνολογία επανασυγκόλλησης και αποθήκευσης, όπου εμποδίζει το διοξείδιο του άνθρακα να απορρίπτεται στην ατμόσφαιρα, συλλαμβάνοντας το και αποθηκεύοντας το, υπόγεια του εδάφους. Ενδεικτικά, ένας σταθμός παραγωγής που είναι εφοδιασμένος με τη συγκεκριμένη τεχνολογία απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα 156 g CO₂/kWh. Όπως γίνεται αντιληπτό, αν και οι εκπομπές άνθρακα περιορίζονται σημαντικά, παραμένουν αισθητά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες εκπομπές της αιολικής ενέργειας. Επιπλέον, υπάρχουν μόνο δύο σταθμοί παραγωγής σε ολόκληρο τον κόσμο, όπου λειτουργούν με τη συγκεκριμένη τεχνολογία, ένας στο Τέξας και ένας στον Καναδά.

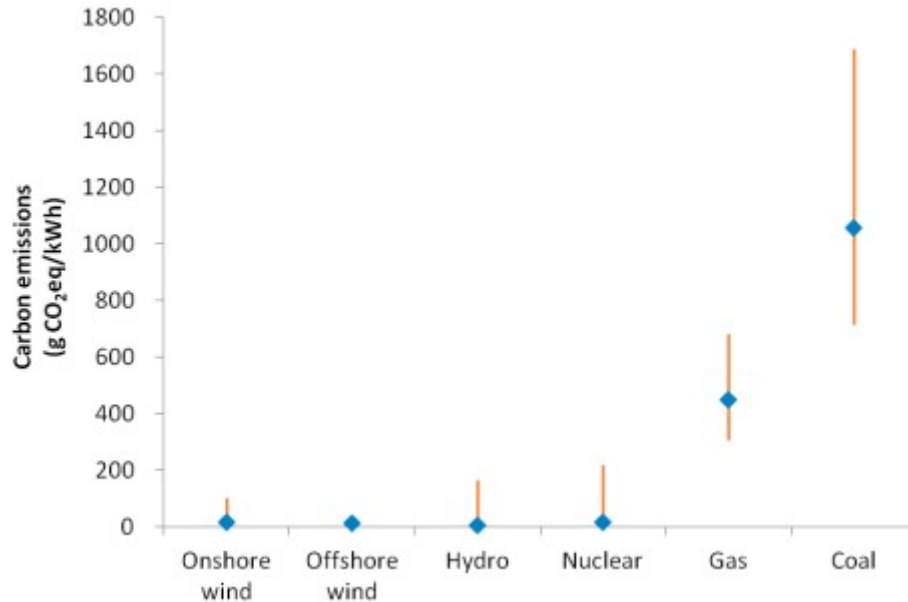


Σχήμα 9. Εκπεμπόμενοι ρύποι ανά κιλοβατώρα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες μορφές παραγωγής ενέργειας (g CO₂/kWh). Πηγή: Schipani, 2018

Σύμφωνα με το Εθνικό Εργαστήριο Brookhaven του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ, το αποτύπωμα της ηλιακής ενέργειας κυμαίνεται από 14 έως 45 g CO₂/kWh, ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου υλικού. Οι ηλιακές κυψέλες λεπτής μεμβράνης οι οποίες μπορούν να εγκατασταθούν σε στέγες, φεγγίτες και άλλα δομικά υλικά και προορίζονται για οικιακή χρήση, έχουν μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς για εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το αποτύπωμα της γεωθερμικής ενέργειας, πλησιάζει το αντίστοιχο της ηλιακής ενέργειας και κυμαίνεται από 11,3 έως 47 g CO₂/kWh, ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται. Όσον αφορά τη βιομάζα, η οποία προέρχεται από οργανικά υλικά (κάθε είδους φυτικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα και απορρίμματα), έχει ανθρακικό αποτύπωμα περίπου 43 g CO₂/kWh. Να σημειωθεί πως τα οργανικά απόβλητα που παράγονται στην Ελλάδα έχει εκτιμηθεί πως ανέρχονται ετησίως σε 18 εκατομμύρια τόνους, όγκος που εάν αξιοποιηθεί μπορεί να παράξει 370 MW ηλεκτρικής ισχύος, μέγεθος ικανό να ηλεκτροδοτήσει 740.000 νοικοκυριά (Αβουκάτου, 2018).

Όλα τα παραπάνω στοιχεία, αποτελούν μέσες τιμές μεταξύ ενός εύρους εκτιμήσεων για κάθε τύπο ενέργειας. Κάθε μεμονωμένη ανεμογεννήτρια, υδροηλεκτρικό φράγμα ή συμβατικός σταθμός παραγωγής, δεν θα έχει πανομοιότυπες εκπομπές άνθρακα, αλλά τα προαναφερθέντα στοιχεία μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά για σκοπούς σύγκρισης. Στο Σχήμα 10, παρουσιάζονται οι τιμές των εκπεμπομένων ρύπων για διάφορες μορφές παραγωγής, με τις κλίμακες να αντιπροσωπεύουν το μέγιστο φάσμα των δημοσιευμένων (εναρμονισμένων) εκτιμήσεων. Αξίζει να αναφερθεί, πως στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρείται ότι αφενός δεν υπάρχει “αλληλεπικάλυψη” μεταξύ της αιολικής ενέργειας και οποιουδήποτε άλλου τύπου παραγωγής από

ορυκτά καύσιμα και αφετέρου υπάρχει μεγαλύτερη σύμπτωση μεταξύ των ερευνών για τις εκπομπές που παρουσιάζει η αιολική ενέργεια από ότι άλλες μορφές παραγωγής χαμηλών εκπομπών άνθρακα, όπως η υδροηλεκτρική και η πυρηνική ενέργεια.

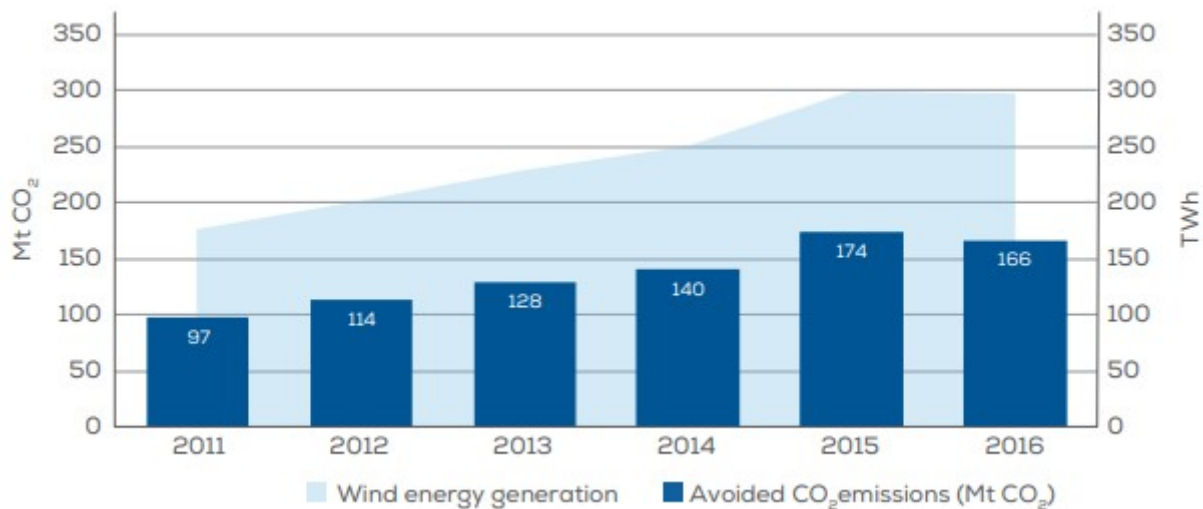


Σχήμα 10. Σύγκριση των μέσων εκτιμώμενων εκπομπών άνθρακα της αιολικής ενέργειας με τις αντίστοιχες εκπομπές άλλων μορφών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σχήμα διαφαίνεται και το εύρος διακύμανσης των δημοσιευμένων εκτιμήσεων. Πηγή: Thomson & Harrison, 2015a.

2.6. Η συμβολή της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης

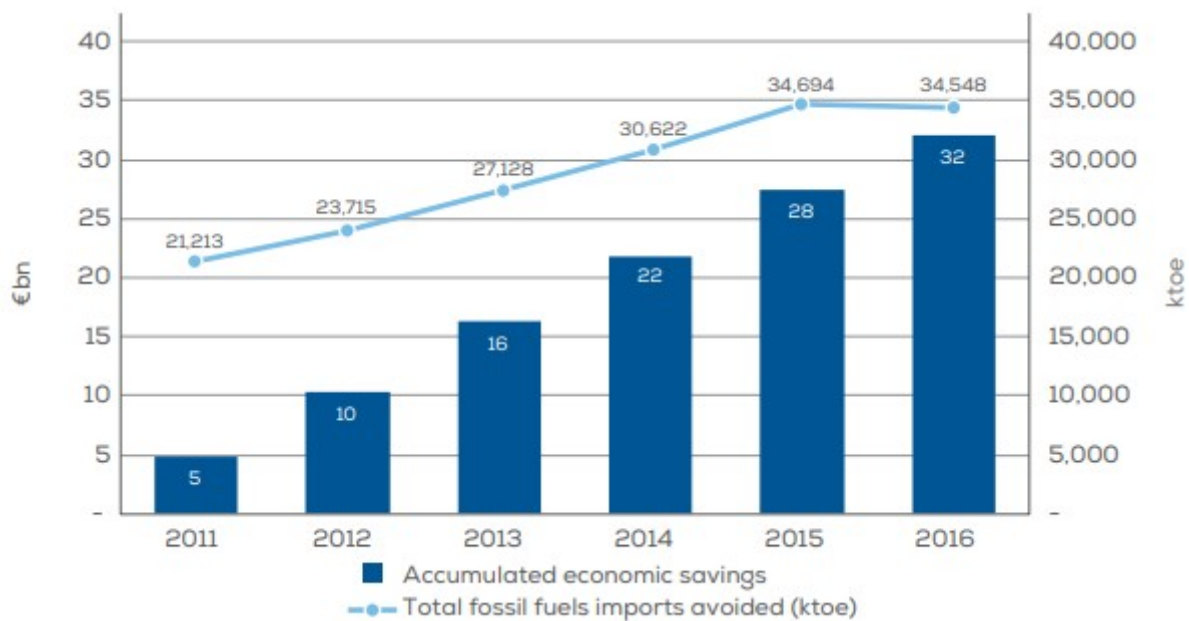
Η αιολική ενέργεια είναι η πιο ανταγωνιστική (από άποψη κόστους) τεχνολογία για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, προκειμένου να εκπληρωθεί η δέσμευση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο της συμφωνίας του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή. Μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το 2016 η αιολική ενέργεια παρήγαγε 296 TWh (TeraWatt-hours) ηλεκτρικής ενέργειας, περιορίζοντας την κατανάλωση συμβατικών μορφών ενέργειας (λιγνίτης, φυσικό αέριο, λιθάνθρακας) με αποτέλεσμα να αποφευχθεί η εκπομπή τουλάχιστον 166 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα (Mt CO₂) στην ατμόσφαιρα (Mbistrova & Pineda, 2017). Στο διάστημα μεταξύ 2011 και 2016 η αιολική ενέργεια παρήγαγε συνολικά 1.451 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, αποφεύγοντας εκπομπές, μεγέθους 819 Mt CO₂. Το ποσό αυτό ισοδυναμεί με τα 22 εκατομμύρια κατά μέσο όρο των αυτοκινήτων, που αποσύρονται από τους δρόμους κάθε χρόνο. Εξίσου σημαντική μείωση επετεύχθη και σε ρύπους όπως το διοξείδιο του θείου (SO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM). Το διάστημα μεταξύ 2011 και 2015 μεγάλες θερμικές μονάδες παραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας, παράγααν περίπου 8.200 χιλιοτόνους (ktonnes) SO₂, γύρω στους 6.400 ktonnes NO_x και κοντά σε 465 ktonnes σκόνης.



Σχήμα 11. Εκπομπές CO₂ που αποφεύχθηκαν την περίοδο 2011-2016 μέσω της αιολικής ενέργειας στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πηγή: Mbistrova & Pineda, 2017.

Πέρα από τα άμεσα οικονομικά οφέλη της, η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας συμβάλλει επίσης στην ευρωπαϊκή οικονομία μέσω του σημαντικού κόστους των καυσίμων που αποφεύγει. Η αιολική ενέργεια περιορίζει την ενεργειακή εξάρτηση της ΕΕ και ως εκ τούτου αποδίδει σημαντικά μακροοικονομικά οφέλη. Πιο συγκεκριμένα, βραχυπρόθεσμα ελαττώνεται κυρίως η εισαγωγή φυσικού αερίου σε βαθμό που αντιπροσωπεύει το 70% της συνολικής ζήτησης φυσικού αερίου στην Ευρώπη. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα αναμένεται να περιοριστεί και η εισαγωγή άλλων μορφών ορυκτών καυσίμων συμπεριλαμβανομένου του λιθάνθρακα και του πετρελαίου. Στην ΕΕ η αιολική ενέργεια το 2016 ανέστειλε την εισαγωγή 34.548 ktoe (kilotonne of oil equivalent) ορυκτών καυσίμων και συνολικά 171.951 ktoe για το διάστημα μεταξύ 2011 και 2016. Το μέγεθος αυτό, μεταφράζεται σε μια εξοικονόμηση της τάξεως των 32 δισεκατομμυρίων ευρώ. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη όλες τις “εκτοπισμένες” πηγές καυσίμων (λιθάνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) καθώς και την τιμή τους στην άμεση αγορά.



Σχήμα 12. Εισαγωγές ορυκτών καυσίμων που αποφεύχθηκαν την περίοδο 2011-2016 μέσω της αιολικής ενέργειας στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πηγή: Mbistrova & Pineda, 2017.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Ο ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η αιολική ενέργεια τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται και εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς, εφόσον αποτελεί έναν από τους πιο τεχνολογικά ώριμους και αποδοτικούς τύπους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συνιστά μια από τις κυρίαρχες επιλογές των αρμόδιων σχεδιαστών και των εθνικών κυβερνήσεων που επιδιώκουν τη διαφοροποίηση των ενεργειακών πόρων, τη μείωση εκπομπών άνθρακα, τη δημιουργία νέων βιομηχανιών και νέων θέσεων απασχόλησης. Ωστόσο, η αιολική ενέργεια δεν είναι απαλλαγμένη από δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ελλιπής κατανόηση αυτών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων επιφέρει ανησυχία και ενέχει σοβαρούς κινδύνους, ιδίως για τις οικολογικά ευάλωτες περιοχές. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου, αναπτύσσονται τα πιθανά περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν από την εγκατάσταση και τη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου.

3.1. Χερσαία αιολικά πάρκα – Δυνητικές επιπτώσεις

3.1.1. Πτηνά

Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία των αιολικών πάρκων, αποτελεί αναμφίβολα η διατάραξη του αρμονικού βίου των πτηνών. Εδώ και πολλά χρόνια, διεξάγονται έρευνες προκειμένου αφενός να διευκρινιστεί ο τρόπος με τον οποίο τα αιολικά πάρκα επιδρούν στα πτηνά και αφετέρου να ποσοτικοποιηθεί το μέγεθος αυτών των δυσμενών επιπτώσεων. Παράλληλα, γίνονται προσπάθειες προκειμένου να διευκρινιστούν οι συνθήκες στις οποίες τα πτηνά είναι πιο ευάλωτα ως προς τον κίνδυνο των ανεμογεννητριών. Πρωτίστως, τα πτηνά απειλούνται από τις θανατηφόρες συγκρούσεις. Για τις συγκρούσεις, κατά κύριο λόγο ευθύνονται τα πτερύγια και η άτρακτος της ανεμογεννήτριας, μιας και αποτελούν στοιχεία τα οποία υπόκεινται σε σχετικά απρόβλεπτη περιστροφική κίνηση (δύο διευθύνσεων), αλλά εξίσου σημαντικό ρόλο έχουν και άλλες σταθερές δομικές κατασκευές όπως ο πύργος της ανεμογεννήτριας και οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.

Ο Desholm, στην προσπάθεια του να αξιολογήσει τον κίνδυνο που διατρέχουν τα πτηνά να συγκρουστούν με μια ανεμογεννήτρια, χρησιμοποίησε δύο δείκτες, τη σχετική αφθονία (relative abundance) και τη δημογραφική ευαισθησία (demographic sensitivity) (Dai, Bergot, Liang, Xiang & Huang, 2015). Τα διάφορα πληθυσμιακά μοντέλα, αποτελούν ένα μέσο πρόβλεψης, του κατά πόσον είναι πιθανό να προκύψουν μεταβολές στο επίπεδο του πληθυσμού λόγω της θνησιμότητας. Στο ίδιο μήκος κύματος, οι ερευνητές Langston and Pullan (2003), υποστήριξαν πως μια ανάλυση κινδύνου σύγκρουσης, πρέπει να συνυπολογίζει παράγοντες όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα, ο χώρος της πτήσης, η απόσταση, το ύψος και κυρίως η

χρονική στιγμή που αυτά λαμβάνουν χώρα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς τα πτηνά τείνουν να συμπεριφέρονται διαφορετικά ανάλογα την ώρα της ημέρας ή της νύκτας.

Παρόλο που υπάρχει ένας τεράστιος όγκος δημοσιευμένων μελετών, η συσχέτιση μεταξύ της θνησιμότητας των πτηνών και πολλών άλλων μεταβλητών όπως ο τύπος της ανεμογεννήτριας, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και οι κλιματικές συνθήκες, δεν έχει τεκμηριωθεί πλήρως. Στην πραγματικότητα, το ακριβές ποσοστό θνησιμότητας των πτηνών, είναι δύσκολο να οριστεί με σαφήνεια καθώς είναι ένα πολυδιάστατο πρόβλημα με πολλές μεταβλητές. Πέρα από το ότι πολλοί ερευνητές προσεγγίζουν το ζήτημα από διαφορετική σκοπιά, ο υπολογισμός των θανατηφόρων συγκρούσεων είναι δύσκολο να εκτιμηθεί λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών που διέπουν την εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος. Ακόμα και αν μια μελέτη εστιάζει στην ίδια τοποθεσία, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις ανάμεσα σε διαφορετικές ομάδες ανεμογεννητριών (Dai et al., 2015). Σε γενικές γραμμές, οι ερευνητές συνήθως επιλέγουν να αποτυπώνουν την έκταση της θνησιμότητας με κάποιο από τα εξής μεγέθη.

- Αριθμός των πτηνών που θανατώνονται ετησίως ανά ανεμογεννήτρια
- Αριθμός των πτηνών που θανατώνονται ετησίως ανά MW εγκατεστημένης ισχύος
- Αριθμός των πτηνών που θανατώνονται ετησίως ανά GWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 3 και Πίνακας 4), συνοψίζεται ένα μεγάλο τμήμα των διαθέσιμων εκτιμήσεων, που αφορούν τη θνησιμότητα που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες στα πτηνά, στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Όπως παρατηρούμε, υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στο εύρος των εκτιμήσεων. Σε ορισμένες εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης, η θνησιμότητα που παρατηρείται είναι είτε μηδαμινή, είτε κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, την ίδια στιγμή που σε άλλα αιολικά πάρκα, μια ανεμογεννήτρια είναι ικανή να σκοτώσει τουλάχιστον 60 πτηνά σε διάστημα ενός έτους. Λαμβάνοντας υπόψη συνολικά τα κατατεθέντα στοιχεία, η διάμεση τιμή της προσκληθείσας θνησιμότητας, ανέρχεται σε 2,3 πτηνά ανά ανεμογεννήτρια ετησίως (Rydell et al., 2012). Ωστόσο, αυτές οι τιμές πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή και να μην γενικεύονται, καθώς έχουν υπάρξει καταγραφές που διαφέρουν σημαντικά από τις προαναφερθέντες εκτιμήσεις. Σε επιστημονικό συνέδριο που πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2012 για την αιολική ενέργεια και την προστασία της άγριας πανίδας στην Ισπανία, η Ισπανική Ορνιθολογική Κοινότητα (SEO/Birdlife) ανακοίνωσε πως σύμφωνα με εκτιμήσεις τους, ο ετήσιος αριθμός θανάτωσης ανά ανεμογεννήτρια κυμαίνεται από 333 έως και 1000 πτηνά και νυχτερίδες, αριθμός που διαφέρει σημαντικά από τις εκτιμήσεις της υπάρχουσας επιστημονικής βιβλιογραφίας. Δεδομένου ότι στην Ισπανία υπάρχουν τουλάχιστον 18.000 εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες, τα θύματα που προκύπτουν υπολογίζονται από 6 έως 18 εκατομμύρια. Είναι φανερό, πως κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες οι ανεμογεννήτριες συνιστούν σημαντικό κίνδυνο για τα πτηνά. (Kaldellis, Apostolou, Kapsali & Kondili, 2016). Στο χώρο της Ευρώπης, το ετήσιο ποσοστό θνησιμότητας (6,5 πτηνά ανά ανεμογεννήτρια) είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο της Βόρειας Αμερικής (1,6 πτηνά ανά ανεμογεννήτρια), αποδεικνύοντας ότι η βιοποικιλότητα μιας τοποθεσίας αποτελεί κύριο και καθοριστικό παράγοντα. Στην Αμερική, τα περισσότερα αιολικά πάρκα συναντώνται σε ορεινούς λειμώνες, ενώ στην Ευρώπη

ως επί το πλείστον βρίσκονται κοντά σε υγροβιότοπους ή ακτές, περιοχές όπου αποδεδειγμένα φιλοξενούν μεγαλύτερο πλήθος πτηνών (Rydell et al., 2012).

Πίνακας 3. Ο εκτιμώμενος αριθμός πτηνών που θανατώνονται ετησίως (ανά ανεμογεννήτρια) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Ευρώπης. Πηγή: Rydell et al., 2012.

Name of wind farm	Location	No. of turbines	Fatality rate	References
Belgium				
Oostdam	Wetland	25	21.0	Everaert & Kuijken 2007
Boudewijnkanal 1	Wetland	14	26.0	Everaert & Kuijken 2007
Boudewijnkanal 2	Wetland	7	43.0	Everaert & Kuijken 2007
Te Schelle	Wetland	3	12.0	Everaert & Kuijken 2007
Gent 1		11	7.0	Everaert & Kuijken 2007
Gent 2		2	2.0	Everaert & Kuijken 2007
Nieuwkapelle		2	1.0	Everaert & Kuijken 2007
The Netherlands				
Jaap Rodenburg	Fields*	10	20.0	Krijgsveld et al.2009
Waterkaapocht	Fields*	8	39.0	Krijgsveld et al.2009
Groettocht	Fields*	7	20.0	Krijgsveld et al.2009
Osterbierum	Grassland	18	1.8	Winkelman 1992a
Kreekraak sluice	Wetland	5	3.7	Musters et al. 1996
Urk	Wetland	25	1.7	Winkelman 1989
Great Britain				
Blyth harbour	Grassland	9	19.0	Newton & Little 2009
Bryn Tylti	Grassland	?	0.0	Philips 1994
Burgar Hill, Orkney	Grassland	?	0.2	Percival 2000
Haverigg Cumbria	Grassland	?	0.0	Percival 2000
Ovenden Moor	Grassland	?	0.04	Percival 2000
Cemmaes	Grassland	?	0.04	Percival 2000
Germany				
Bremerhaven	Wetlands	?	9.0	Schermer 1999b
Denmark				
Tjaereborg	Wetlands	?	3.0	Pedersen & Poulsen 1991
Sweden				
Näsudden	Forest		0.7	Percival 2000
Norway				
Smøla	Heath	68	0.4	Bevanger et al. 2009
Spain				
Salajones	Ridge	33	21.7	Leukona 2001
Izco-Albar	Ridge	75	22.6	Leukona 2001
Alaiz	Ridge	75	3.6	Leukona 2001
Guerinda	Ridge	145	8.5	Leukona 2001
El Perdon	Ridge	40	64.3	Leukona 2001
Basque Country		40	6.0	Onrubia et al. 2002
PESUR, Tarifa	Ridge	190	0.07**	de Lucas et al. 2008
E3, Tarifa	Ridge	66	0.04**	de Lucas et al. 2008

* large scale daily movements of birds from the fields to nearby wetlands occurred

** only large birds were sampled; this figure is not used to calculate averages

? the number of turbines in the park was not provided in the report

Πίνακας 4. Ο εκτιμώμενος αριθμός πτηνών που θανατώνονται ετησίως (ανά ανεμογεννήτρια) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής. Πηγή: Rydell et al., 2012

Name of wind farm	Location	No. of turbines	Fatality rate	References
Eastern USA				
Searsborg	Mountain	11	0.0	Kerlinger 2002
Maple Ridge 1	Grassland	120	3.9	Jain et al. 2007
Casselman	Mountain	23	4.7	Arnett et al. 2009
Meyersdale	Mountain	20	0.9	Kerns et al. 2005
Mountaineer	Mountain	44	2.6	Kerns & Kerlinger 2004
Buffalo Mountain 1	Mountain	18	1.8	Fiedler et al. 2007
Somerset County	Ridge	8	0.0	Kerlinger 2000
Central USA				
Buffalo Ridge 1	Grassland	733	0.9	Johnson et al. 2003a
Buffalo Ridge 2	Grassland	143	2.3	Johnson et al. 2004
Buffalo Ridge 3	Grassland	138	4.4	Johnson et al. 2004
Lincoln	Fields	31	1.3	Howe et al. 2002
Top of Iowa	Fields, wetland	98	0.6	Koford et al. 2004
IDGWP	Ridge	3	0.0	Erickson et al. 2001
Western USA				
Judith Gap	Pass, grassland	90	4.5	TRC 2008
Klondike	Fields	16	1.4	Johnson et al. 2003b
Vansycle	Grassland	38	0.6	Erickson et al. 2000
Stateline	Grassland	454	1.9	Erickson et al. 2003a
Foote Creek Rim	Grassland	69	1.5	Young et al. 2003
Nine Canyon	Grassland	37	3.6	Erickson et al. 2003b
High Winds	Grassland	90	2.3	Kerlinger et al. 2006
Altamont	Pass, grassland	1526	0.8	Smallwood et al. 2006
Diablo Winds		31	1.2	WEST Inc. 2006
San Geronio	Ridge	2947	2.3	Erickson et al. 2001
Canada				
McBride Lake	Fields, grassland	114	0.4	Brown & Hamilton 2004
Magrath		20	2.6	Brown, cited in Barclay 2007
Summerview	Fields	39	1.9	Brown & Hamilton 2006b
Cypress		16	1.4	NE Ltd. 2004
Pickering	Lake shore	1	4.0	James 2003

Οι περισσότερες μελέτες που εξετάζουν τη θνησιμότητα των πτηνών, εστιάζουν κυρίως στην κατηγορία των αρπακτικών πτηνών. Λαμβάνοντας υπόψη πως τα πτηνά αυτά έχουν χαμηλό ποσοστό αναπαραγωγής, ακόμα και μια σχετικά μικρή αύξηση της θανάτωσης είναι ικανή να έχει σημαντικό αντίκτυπο στον πληθυσμό. Στη Γερμανία, τα τέσσερα συνηθέστερα είδη πτηνών που καταγράφονται ως θύματα των ανεμογεννητριών, είναι αρπακτικά όπως η γερακίνα (common buzzard), ο ψαλιδιάρης (red kite), ένα είδος ικτίνου που απαντάται και στον ελληνικό χώρο, ο αλιαετός (sea eagle) και το

βραχοκιρκίνεζο (kestrel) (Rydell et al., 2012). Στις ΗΠΑ, το μεγαλύτερο ποσοστό θνησιμότητας (περίπου 57%) παρατηρήθηκε κατά κύριο λόγο σε μικρά στρουθιόμορφα ωδικά πτηνά όπως η χιονάδα (*Eromophila alpestris*) και ο κοκκινομάτης βίρος (*Vireo olivaceus*) (Allison et al., 2019). Το ποσοστό θανάτωσης των στρουθιόμορφων πτηνών, στην παρούσα φάση δεν κρίνεται ανησυχητικό, δεδομένου του μεγάλου όγκου πληθυσμού των εν λόγω πτηνών (Rydell et al., 2012). Τα αρπακτικά πτηνά αποτελούν περίπου το 9% των καταγεγραμμένων θανάτων, με τα ποσοστά αυτά να είναι υψηλότερα στις δυτικές ΗΠΑ, όπου ο πληθυσμός τους είναι σχετικά πιο ανεπτυγμένος (Allison et al., 2019).

Ορισμένα αρπακτικά, όπως ο χρυσός αετός και το γεράκι, είναι πιο ευάλωτα και παρουσιάζουν αυξημένη θνησιμότητα συγκριτικά με άλλες υποκατηγορίες αρπακτικών όπως οι γύπες και τα κοράκια. Μάλιστα, ο εστεμμένος γερανός (*Crowned crane*) και το κοράκι, συγκαταλέγονται μεταξύ των συνηθέστερων αρπακτικών πουλιών που δραστηριοποιούνται εντός της “επικίνδυνης περιοχής” των ανεμογεννητριών, αλλά σπάνια καταγράφεται κάποιο περιστατικό σύγκρουσης. Το γεγονός αυτό, ενδεχομένως οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο ορισμένα πτηνά αναζητούν την τροφή τους ή ακόμα και από τα πτηνικά τους χαρακτηριστικά. (Allison et al., 2019; Dai et al., 2015). Οι Allison et al. (2019) αξιοποιώντας το δείκτη σχετικής αφθονίας του Desholm, διαπίστωσαν πως μια ομάδα αρπακτικών που αποτελείται από 26 μέλη και άνω, θεωρείται πιο ευάλωτη και παρουσιάζει αυξημένες πιθανότητες να πληγεί ο πληθυσμός της. Έτσι, καθίσταται σαφές πως πέρα από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής και τα είδη των πτηνών που φιλοξενεί, η θνησιμότητα συνδέεται άρρηκτα και με το μέγεθος του πληθυσμού των πτηνών.

Μια μελέτη που διεξήχθη στον ελλαδικό χώρο, σε δύο χρονικές περιόδους (2008-2009 και 2009-2010) αφορούσε τη διαρκή παρατήρηση εννέα αιολικών πάρκων, που χωροθετούνται στην ορεινή περιοχή μεταξύ των νομών Έβρου και Ροδόπης. Σκοπός της έρευνας ήταν να καταγραφεί, η συνύπαρξη των ανεμογεννητριών με την πανίδα της περιοχής και κυρίως οι επιπτώσεις που προκύπτουν στους πληθυσμούς των πτηνών. Να σημειωθεί πως η εν λόγω περιοχή αποτελεί μεταναστευτικό διάδρομο για τα αποδημητικά πουλιά και βρίσκεται κοντά στο Εθνικό Πάρκο της Δαδιάς, μια προστατευόμενη δασική έκταση πανευρωπαϊκής σημασίας, όπου εκεί συναντάται το τελευταίο καταφύγιο του Μαυρόγυπα στην Ελλάδα και τη νοτιοανατολική Ευρώπη (*Aegypius monachus*) καθώς και άλλα υπό εξαφάνιση είδη (ασπροπάρης, όρνιο, βασιλαετός, χρυσαετός κ.α). Κατά την περίοδο 2008-2009, ελέγχονταν ανά 14 ημέρες, οι 127 από τις 163 ανεμογεννήτριες και βρέθηκαν νεκρά, 5 αρπακτικά πουλιά, 11 πουλιά άλλων ειδών και 8 νυχτερίδες. Την περίοδο 2009-2010, ο έλεγχος (88 από τις 163 ανεμογεννήτριες) ήταν πιο εντατικός και σε καθημερινή βάση, με αποτέλεσμα να εντοπιστούν νεκρά, 9 αρπακτικά πουλιά, 73 πουλιά άλλων ειδών και 186 νυχτερίδες. Ανάμεσα στα καταγεγραμμένα νεκρά πτηνά, υπήρχαν αρκετά είδη πουλιών και νυχτερίδων τα οποία αναγνωρίζονται ως απειλούμενα, ευάλωτα ή κινδυνεύοντα είδη, τόσο στην Ελλάδα, όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Με βάση τα προαναφερθέντα στοιχεία, η ετήσια θνησιμότητα των αρπακτικών πτηνών ορίστηκε ως 0,173 πτηνά ανά ανεμογεννήτρια. Αυτός ο ρυθμός θνησιμότητας, σε συνδυασμό με την πρόθεση να αυξηθεί ο αριθμός των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών στην υπό μελέτη περιοχή (+ 300 νέες Α/Γ), προκαλεί έντονη ανησυχία στους ειδικούς σχετικά με τη μακροχρόνια επιβίωση των αρπακτικών πουλιών, ιδίως του σπάνιου Μαυρόγυπα (WWF-Ελλάς, 2013).

Είναι γεγονός πως με την πάροδο των χρόνων, η ανάπτυξη της αιολικής τεχνολογίας αποδίδει όλο και μεγαλύτερου μεγέθους ανεμογεννήτριες. Ο πύργος στήριξης γίνεται υψηλότερος και τα πτερύγια του δρομέα μακρύτερα, αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια που διαγράφεται με κάθε περιστροφή. Αυτό σημαίνει πως οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες λειτουργούν σε ένα σημείο (> 100 μέτρα από το έδαφος) όπου τα πτηνά δραστηριοποιούνται τακτικά με μεγάλη πυκνότητα ιδίως κατά τις αποδημητικές περιόδους. Όπως είναι αναμενόμενο, σύντομα προέκυψε η ανησυχία για τον κίνδυνο που εγκυμονούν οι ανεμογεννήτριες μεγαλύτερων διαστάσεων. Από τις αναλύσεις που ακολούθησαν, τόσο για τα δεδομένα της Βόρειας Αμερικής όσο και της Ευρώπης (Βέλγιο, Γερμανία), όλες κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα, πως ο κίνδυνος που διατρέχουν τα πτηνά και η συχνότητα των συγκρούσεων δεν επηρεάζονται άμεσα ούτε από το ύψος ούτε από την αυξημένη διάμετρο του ρότορα των ανεμογεννητριών. Αντιθέτως, δημιουργούνται συνθήκες όπου καθιστούν ευνοϊκότερη την επιλογή μεγαλύτερων ανεμογεννητριών έναντι των μικρότερων, αν λάβουμε υπόψη πως οι μεγαλύτερες μονάδες είναι ικανές να αποδώσουν περισσότερα MW ηλεκτρικής ισχύος, διατηρώντας παράλληλα τη συχνότητα των συγκρούσεων στα ίδια επίπεδα (Rydell et al., 2012).

Αναφορικά με τα δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών, το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης στη θνησιμότητα των πτηνών, αποδίδεται στις ανεμογεννήτριες παλαιού τύπου, όπου τα πτερύγια τους περιστρέφονται με υψηλή γωνιακή ταχύτητα και συνήθως είναι τοποθετημένες σε δικτυωτούς πύργους στήριξης. Οι δικτυωτοί πύργοι (lattice), συνθέτουν ένα επικίνδυνο σκηνικό για τα πτηνά αφού λόγω της σχεδίασης τους, προσφέρουν ένα ιδανικό σημείο ανάπαυσης, που εν τέλει μετατρέπεται σε θανατηφόρα παγίδα λόγω των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Επιπροσθέτως, οι δικτυωτοί πύργοι είναι πιο δυσδιάκριτοι. Όταν στην περιοχή επικρατούν άστατες καιρικές συνθήκες (ομίχλη, βροχή, ισχυροί άνεμοι), πέρα από το ότι επηρεάζεται η ικανότητα των πτηνών να εκτελούν ελιγμούς, μειώνεται η ορατότητα και κατά επέκταση το ύψος πτήσης των πτηνών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερες συγκρούσεις. Από την άλλη μεριά, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες, ως επί το πλείστον διαθέτουν σωληνωτούς πύργους μονοπολικού τύπου (tubular) και χαμηλότερη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, ελαχιστοποιώντας έτσι την πιθανότητα σύγκρουσης των πτηνών με αυτές. Εντούτοις, οι σωληνωτοί πύργοι δεν αποτελούν πανάκεια. Στις ΗΠΑ εκτιμάται ότι κάθε χρόνο θανατώνονται 234.000 πτηνά έπειτα από συγκρούσεις με πύργους μονοπολικού τύπου. (Dai et al., 2019; Παπασταματίου, Λαδακάκος, Βλαμάκης & Αγγελοπούλου, 2009)

Ένας ακόμα λόγος ανησυχίας, αποτέλεσαν οι προειδοποιητικές λυχνίες που τοποθετούνται την κορυφή των ανεμογεννητριών. Οι λυχνίες εκπέμπουν φως, είτε κόκκινου είτε λευκού χρώματος ανάλογα με το ύψος της ανεμογεννήτριας. Το λευκό πολλές φορές τρεμάμενο φως, υποδεικνύει την ύπαρξη ενός αντικειμένου σε απόσταση μεγαλύτερη των 150 μέτρων από το έδαφος. Ωστόσο, κατά τη σύμφωνη γνώμη των ερευνητών, κανένα από αυτά τα φώτα δεν συμβάλει στη θανάτωση των πτηνών. Βέβαια, έχει προταθεί πως ο κίνδυνος μειώνεται ακόμα περισσότερο, εάν μεγιστοποιείται το χρονικό διάστημα μεταξύ του “αναβοσβήματος” ή όταν η ένταση του φωτός φθίνει σταδιακά. (Dai et al., 2015; Rydell et al., 2012)

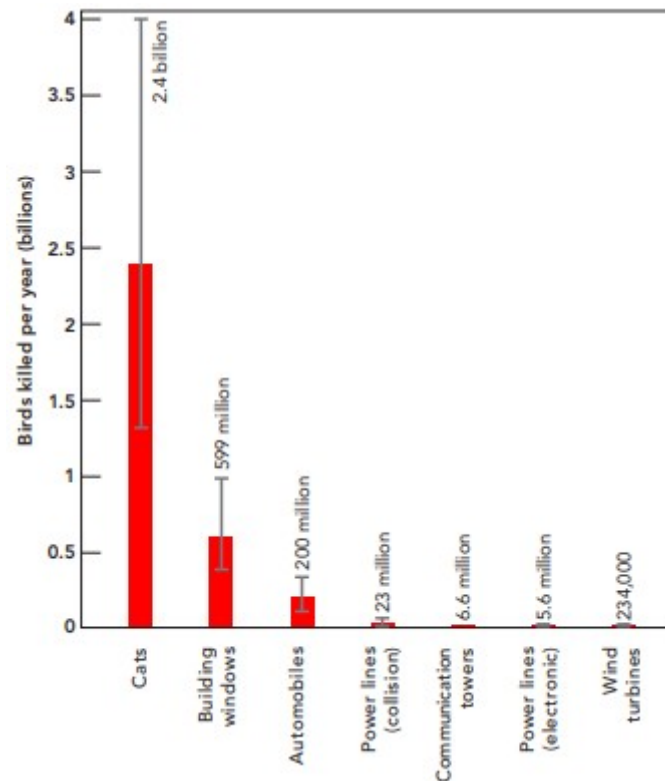
Η αιολική ενέργεια, πέρα από τον κίνδυνο πρόκλησης άμεσης θανάτωσης στα πτηνά, χρεώνεται και με τη διατάραξη της ισορροπίας του τοπικού οικοσυστήματος. Το φαινόμενο της διατάραξης,

περιλαμβάνει την καταστροφή των οικοτόπων και τις επιπτώσεις στη συμπεριφορά αναπαραγωγής και διατροφής των πτηνών. Κατά το στάδιο εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και συναφών υποδομών, είναι πολύ πιθανό να προκληθεί κατάτμηση των ενδιαιτημάτων και αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος. Έχει διαπιστωθεί, πως τα στρουθιόμορφα πτηνά που ζουν και δραστηριοποιούνται σε λιβάδια και χωράφια, προσπάθησαν να αποφύγουν τα καλώδια μεταφοράς ρεύματος και τα εργοτάξια οδοποιίας κατά τουλάχιστον 100 μέτρα (Dai et al., 2015). Τα καλώδια μεταφοράς ρεύματος και οι ίδιοι δρόμοι, μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένο κατακερματισμό των οικοτόπων και να προσφέρουν μια δίοδο εισβολής σε “ξένα” αρπακτικά είδη. Ορισμένες ανεμογεννήτριες, λειτουργούν επίσης ως φραγμός, εμποδίζοντας τα πτηνά να έχουν ελεύθερη πρόσβαση στους χώρους όπου σιτίζονται και φωλιάζουν. Ως φραγμός λειτουργεί και ένα αιολικό πάρκο στην περίπτωση που βρίσκεται εντός της μεταναστευτικής διαδρομής των αποδημητικών πτηνών, με αποτέλεσμα τα πουλιά προκειμένου να το αποφύγουν, αναγκάζονται να αποκλίνουν από τη συνήθη διαδρομή τους. Αυτή η διαδικασία της αποφυγής, αυξάνει την ενεργειακή τους δαπάνη και ταυτόχρονα μειώνει τις πιθανότητες επιβίωσης τους. Επιπλέον, οι θόρυβοι και τα ταραχώδη ρεύματα αέρα που προκαλούνται κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, μπορούν να τρομάζουν τα πτηνά και να περιορίσουν την έκταση στην οποία δραστηριοποιούνται, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά τους. Έχει παρατηρηθεί, πως το 14 με 22% των πτηνών, στην προσπάθειά τους να παρακάμψουν τα υπό μελέτη αιολικά πάρκα, αύξησαν το ύψος πτήσης τους, ενώ η πλειοψηφία των πτηνών εμφάνισαν συμπεριφορές επαναπροσανατολισμού, αφού είτε άλλαξαν την κατεύθυνση πτήσης τους κατά απόσταση 400 ή 1000 μέτρων, είτε απομακρύνθηκαν εντελώς από την ευρύτερη περιοχή.

Κατά γενική ομολογία, διατυπώνεται ρητά πως η αιολική ενέργεια δεν συμβάλει σε σημαντικό βαθμό στη συνολική ανθρωπογενή θνησιμότητα των πτηνών. Για κάθε 10.000 πτηνά που θανατώνονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, λιγότερο από ένας θάνατος πιστώνεται σε εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης (Kaldellis et al., 2016). Σύμφωνα με εκτιμήσεις, στις ΗΠΑ αν αξιοποιούνταν αποκλειστικά η αιολική ενέργεια για την πλήρη κάλυψη των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια, για κάθε 250 πτηνά που θανατώνονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, μόνο ένας θάνατος θα αποδιδόταν σε έργα αιολικής εκμετάλλευσης (Saidur, Rahim, Islam & Solangi, 2011). Έτσι, σε επίπεδο πληθυσμού, φαίνεται να μην επηρεάζονται αισθητά κρίσιμοι ζωτικοί δείκτες όπως η ετήσια πιθανότητα επιβίωσης, η σχετική αφθονία, η πυκνότητα ή η πληρότητα ενός πληθυσμού. Αναμφίβολα ο αριθμός των ανεμογεννητριών αυξάνεται συνεχώς, αλλά προς το παρόν, συγκριτικά με άλλες υποδομές (π.χ. κτίρια, φυτοφάρμακα, παρασιτοκτόνα) ή υποδομές παραγωγής ενέργειας (π.χ. συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας), οι ανεμογεννήτριες δεν αποτελούν κρίσιμο παράγοντα θνησιμότητας των πτηνών. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, τα χερσαία αιολικά πάρκα ευθύνονται για τη θανάτωση 0,3 πτηνών ανά GWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ένα μέγεθος σχεδόν είκοσι φορές μικρότερο, από το αντίστοιχο που προκαλείται από συμβατικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων (5,2 πτηνά / GWh) (Kaldellis et al., 2016).

Στις ΗΠΑ έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί το μέγεθος της θνησιμότητας που προκαλείται από διάφορες ανθρωπογενείς ή μη πηγές (Σχήμα 13). Στις κυριότερες πηγές συμπεριλαμβάνονται οι γάτες, οι πύργοι τηλεπικοινωνιών, τα οχήματα, τα παράθυρα των κτιρίων και οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Μια άλλη άμεση πηγή θνησιμότητας,

αποτελούν τα γεωργικά φυτοφάρμακα και τα παρασιτοκτόνα. Στον Καναδά, εκτιμάται πως τουλάχιστον 2,7 εκατομμύρια πτηνά θανατώνονται ετησίως εξαιτίας αυτών των χημικών ουσιών (Allison et al., 2019).



Σχήμα 13. Η θνησιμότητα που προκαλεί η αιολική ενέργεια στα πτηνά συγκριτικά με άλλες πηγές θνησιμότητας. Πηγή: Allison et al., 2019

3.1.2. Χειρόπτερα

Είναι γεγονός πως έχει παρατηρηθεί μεγάλο ποσοστό θνησιμότητας χειροπτέρων κοντά σε αιολικά πάρκα. Οι νυχτερίδες ίσως αποτελούν το πιο απειλούμενο είδος ζωικού οργανισμού, με τον αριθμό των θανατώσεων να εκτιμάται πως είναι πολλαπλάσιος από τον αντίστοιχο των πτηνών. Ενδεικτικά, μόνο στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής, εκτιμήσεις έχουν δείξει πως θανατώνονται ετησίως περίπου 600.000 με 949.000 νυχτερίδες, μέγεθος σημαντικά μεγαλύτερο από εκείνο των πτηνών που κυμαίνεται από 140.000 έως 679.000 νεκρά πουλιά (Choi, Wittig & Kluever, 2020). Στις ΗΠΑ, η θνησιμότητα που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες, επηρεάζει σήμερα 22 από τα 47 είδη χειροπτέρων, με τρία από τα είδη των αποδημητικών νυχτερίδων (Hoary bat, Eastern Red bat, Silver Haired bat) να αποτελούν το 72% των αναφερθέντων περιστατικών (Allison et al., 2019). Στη Γερμανία, οι ερευνητές Brinkmann et al., όπως αναφέρεται από τους Γεωργιακάκης και Παπαδάτου (2011), έπειτα από διαρκή έλεγχο του περιβάλλοντα χώρου των ξεταζόμενων ανεμογεννητριών, εντόπισαν πενήντα νεκρές νυχτερίδες και εννέα νεκρά πουλιά, δηλαδή τουλάχιστον πενταπλάσια θνησιμότητα για την κατηγορία των χειροπτέρων. Μάλιστα, ανέφεραν πως το μέγεθος της θνησιμότητας που σημειώθηκε, αποτελεί μια υποεκτίμηση της πραγματικής τιμής, δεδομένου πως οι νυχτερίδες είναι ένα μικρόσωμο ζώο με

έντονα καμουφλαρισμένη αμφίεση, παράγοντας που περιορίζει την αποτελεσματικότητα της αναζήτησης των παρατηρητών.

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5 και Πίνακας 6), παρουσιάζεται ο αριθμός των θανατώσεων που σημειώθηκε στα υπό μελέτη αιολικά πάρκα που βρίσκονται σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Αντίστοιχα με την περίπτωση των πτηνών, το εύρος των αποτελεσμάτων παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, ανάλογα με την τοποθεσία κατασκευής του αιολικού πάρκου. Οι περισσότερες νυχτερίδες θανατώνονται από ανεμογεννήτριες που βρίσκονται κοντά σε ακτογραμμές, σε κορυφογραμμές και σε δασικές περιοχές. Μάλιστα, η πιθανότητα πρόσκρουσης είναι έως και έξι φορές μεγαλύτερη για ανεμογεννήτριες που βρίσκονται κοντά σε ακτογραμμές. Επίσης, έχει παρατηρηθεί πως ο κίνδυνος θανάτωσης αυξάνεται σημαντικά, όταν οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται έως και 200 μέτρα πλησίον μιας δασικής έκτασης (Rydell et al., 2012). Αναμφίβολα, ο πρωταρχικός παράγοντας που καθορίζει το ρυθμό θανάτωσης των χειροπτέρων, αποτελεί η τοποθεσία κατασκευής του εκάστοτε αιολικού πάρκου. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τα δεδομένα, το ποσοστό θνησιμότητας δεν φαίνεται να σχετίζεται με το μέγεθος της αιολικής εκμετάλλευσης, δηλαδή με το πλήθος των ανεμογεννητριών που διαθέτει. Αντιθέτως υπάρχει ισχυρή συσχέτιση με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών. Ανεμογεννήτριες που διαθέτουν υψηλότερους πύργους στήριξης και μακρύτερα περύγια (αυξημένη περιοχή σάρωσης), αυξάνουν εκθετικά τη θνησιμότητα των χειροπτέρων. Αυτό σημαίνει πως μια μικρή αύξηση στις διαστάσεις των ανεμογεννητριών, είναι ικανή αν επιφέρει τεράστια θνησιμότητα στην κατηγορία των χειροπτέρων. Γίνεται αντιληπτό πως τα πτηνά και οι νυχτερίδες είναι δύο εντελώς διαφορετικές περιπτώσεις (Rydell et al., 2012; Dai et al., 2015; Allison et al., 2019).

Πίνακας 5. Ο εκτιμώμενος αριθμός χειροπτέρων που θανατώνονται ετησίως (ανά ανεμογεννήτρια) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Ευρώπης. Πηγή: Rydell et al., 2012.

Name of wind farm	Location	No. of turbines	Fatality rate	References
Northwestern Germany				
Blumendorf	Fields	2	(2.0)	Göbel & Götttsche 2005
Tralau	Fields	4	(2.0)	Götttsche & Göbel 2007
Friedrich-Wilhelm Lübke Koog	Fields	13	0.0	Grünkorn et al. 2005
Bosbüll	Fields	4	0.0	Grünkorn et al. 2005
Marienkoog	Fields	15	0.0	Grünkorn et al. 2005
Reussenkøge	Fields	17	0.0	Grünkorn et al. 2005
Breklumer Koog	Fields	11	0.0	Grünkorn et al. 2005
Simonsberger Koog	Fields	13	0.0	Grünkorn et al. 2005
Uelvesbuller Koog	Fields	4	0.0	Grünkorn et al. 2005
Cappel-Neufeld	Fields	5	3.1	Bach & Bach 2010
Langwedel	Fields	5	3.0	Bach & Niermann 2011
Eastern Germany				
Puschwitz	Woodland	10	4.1	Endl et al. 2004
Wendischbora	Fields	17	3.6	Endl et al. 2004
Bayerhöhe	Hill, fields	5	4.0	Endl et al. 2004
Wachau	Fields	5	0.0	Endl et al. 2004
Bernsdorf	Woodland	3	0.0	Endl et al. 2004
Röhrsdorf	Fields	4	0.0	Endl et al. 2004
Ludwigsdorf	Fields	18	1.1	Endl et al. 2004
Thornberg	Fields	12	1.1	Endl et al. 2004
Kleinröhrsdorf	Fields	3	2.2	Endl et al. 2004
Melaune	Fields	7	2.6	Endl et al. 2004
Reichenbach	Fields	7	1.9	Endl et al. 2004
Eckardsberg	Fields	5	2.6	Endl et al. 2004
Southern Germany				
Lahr	Mountain	3	(0.6)	Behr & Helversen 2005
Ittenschwander Horn	Mountain	2	18.3	Behr et al. 2006
Roskopf	Mountain	4	26.0	Brinkmann et al. 2006
Brudergarten	Mountain	3	15.0	Brinkmann et al. 2006
Hohe Eck	Mountain	1	41.1	Brinkmann et al. 2006
Schillinger Berg	Mountain	2	31.6	Brinkmann et al. 2006
Holzschlägermatte	Mountain	2	13.3	Brinkmann et al. 2006
Plattenhöfe	Grassland, hill	4	3.9	Brinkmann et al. 2006
Fürstenberg	Grassland, hill	1	0.0	Brinkmann et al. 2006
Austria				
Oberdorf	Fields	5	0.0	Traxler et al. 2004
Prellenkirchen	Fields	8	8.8	Traxler et al. 2004
Steinberg	Fields	9	5.3	Traxler et al. 2004
Switzerland				
Mont Soleil	Grassland, hill	3	13.6	Leuzinger et al. 2008
Feldmos	Grassland, hill	1	0.0	Leuzinger et al. 2008
Tramelan	Grassland, hill	1	0.0	Leuzinger et al. 2008
England				
Coldham 1	Fields	8	1.2	Bioscan 2008
France				
Bouin	Coast, fields	8	19.0	Dulac 2008

Πίνακας 6. Ο εκτιμώμενος αριθμός χειροπτέρων που θανατώνονται ετησίως (ανά ανεμογεννήτρια) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής. Πηγή: Rydell et al., 2012.

Name of wind farm	Location	No. of turbines	Fatality rate	References
Eastern USA				
Searsborg	Mountain	11	0.0	Kerlinger 2002
Maple Ridge 1	Grassland, hill	120	24.5	Jain et al. 2007
Maple Ridge 2	Grassland, hill	195	12.3	Jain et al. 2009
Casselman	Mountain	23	32.3	Arnett et al. 2009
Meyersdale	Mountain	20	25.6	Kearns et al. 2005
Mountaineer	Mountain	44	47.5	Kerns & Kerlinger 2004
Buffalo Mountain 1	Mountain	3	28.0	Nicholson 2003
Buffalo Mountain 2	Mountain	15	69.6	Fiedler et al 2007
Central USA				
Buffalo Ridge 1	Grassland	73	0.1	Johnson et al. 2003a
Buffalo Ridge 2	Grassland	143	2.0	Johnson et al. 2004
Buffalo Ridge 3	Grassland	138	2.1	Johnson et al. 2004
Lincoln	Fields	31	4.3	Howe et al. 2002
Top of Iowa	Fields	98	7.8	Koford et al. 2004
Western USA				
Judit Gap	Grassland	90	13.4	TRC 2008
Klondike	Fields	16	1.2	Johnson et al. 2003b
Vansycle	Grassland	38	0.8	Erickson et al. 2000
Stateline	Grassland	454	1.1	Erickson et al. 2003a
Foote Creek Rim	Grassland	69	1.3	Young et al. 2003
Nine Canyon	Grassland	37	3.2	Erickson et al. 2003b
High Winds	Grassland	90	3.7	Kerlinger et al. 2006
Canada				
McBride Lake	Fields	114	0.5	Brown & Hamilton 2004
Castle River	Fields	60	0.6	Brown & Hamilton 2006a
Summerview	Fields	39	18.5	Brown & Hamilton 2006b
Pickering	Lake shore	1	10.7	James 2002

Παρόλο που έχει διεξαχθεί ένα πλήθος ερευνών, τα συμπεράσματα που προέκυψαν φαίνεται να μην συμφωνούν απόλυτα στον τρόπο, με τον οποίο οι ανεμογεννήτριες απειλούν τις νυχτερίδες. Οι πρώτες μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα πως εξαιτίας της ξαφνικής πτώσης πίεσης που δημιουργείται κοντά στις ακμές των πτερυγίων (υποπίεση), οι νυχτερίδες καταλήγουν από εσωτερική αιμορραγία. Πάνω από το 50% των νεκρών νυχτερίδων που έχουν εξεταστεί κατά καιρούς, βρέθηκαν με εσωτερική αιμορραγία κυρίως στην περιοχή των πνευμόνων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη εννέα αιολικών πάρκων (συνολικά 88 Α/Γ) που βρίσκονται κοντά σε κορυφογραμμές (υψόμετρο 750-1000 m) στην ευρύτερη περιοχή της Θράκης. Από τις 194 νυχτερίδες που εντοπίστηκαν, οι 106 εξ αυτών (55% του συνόλου) δεν έφεραν εμφανή εξωτερικά τραύματα και η αιτία θανάτωσης αποδόθηκε στην εσωτερική αιμορραγία (βαροτραύμα). Να σημειωθεί πως το ετήσιο ποσοστό θνησιμότητας που καταγράφηκε, κυμαίνεται από 2 έως 14 νυχτερίδες ανά ανεμογεννήτρια (Γεωργιακάκης & Παπαδάτου, 2011). Ωστόσο, πιο πρόσφατες μελέτες, υποστηρίζουν πως το μέγεθος της θανάτωσης που προκαλείται αποκλειστικά από εσωτερικές αιμορραγίες, είναι μικρότερο από αυτό

που θεωρούνταν αρχικά, και πως η κύρια αιτία θανάτωσης είναι οι τραυματισμοί που προκαλούνται λόγω των προσκρούσεων (Allison et al., 2019; Dai et al., 2015).

Όμως, πέρα από το να εξακριβωθεί ο τρόπος με τον οποίο οι ανεμογεννήτριες πλήττουν τις νυχτερίδες, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν και οι λόγοι για τους οποίους οι ανεμογεννήτριες αποτελούν πόλο έλξης για αυτές. Μερικές από τις βασικές υποθέσεις που έχουν εξεταστεί, είναι ότι ίσως οι νυχτερίδες προσελκύονται από τις εκπομπές υπερήχων των ανεμογεννητριών ή την περίπτωση να αντιμετωπίζουν τις ανεμογεννήτριες ως δέντρα, με αποτέλεσμα να προσπαθούν να τις εξερευνησουν ως πιθανό μέρος δημιουργίας φωλιάς. Μια άλλη πιθανότητα είναι ότι λόγω της υψηλής θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπει η άτρακτος, συγκεντρώνεται μεγάλο πλήθος εντόμων και ως εκ τούτου, ο περιβάλλον χώρος της ανεμογεννήτριας μετατρέπεται σε ιδανική τοποθεσία για αναζήτηση τροφής (Dai et al., 2015). Όντως, ορισμένα είδη νυχτερίδων επισκέπτονται ενεργά τις ανεμογεννήτριες προκειμένου να τραφούν με έντομα που συσσωρεύονται γύρω από τους πύργους και τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Μερικές φορές πετούν κοντά στα πτερύγια και κάνουν έντονους ελιγμούς και βυθίσεις, μια συμπεριφορά που συνδέεται άμεσα με το κυνήγι της λείας τους. Επίσης, είναι συχνό φαινόμενο, οι νυχτερίδες να παρασύρονται από τις δίνες που δημιουργούνται πίσω από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Όμως, σύμφωνα με τον Ahlen, η συμπεριφορά των νυχτερίδων είναι ίδια, ανεξάρτητα από το αν λειτουργεί ή όχι η ανεμογεννήτρια. Δεδομένου ότι κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, εκπέμπονται μαγνητικά πεδία και υπέρηχοι, συνάγεται το συμπέρασμα πως κανένας από τους δύο προαναφερθέντες λόγους δεν συμπράττει στην προσέλκυση των νυχτερίδων. Εξίσου καμία επίδραση στην προσέλκυση των νυχτερίδων, δεν φαίνεται να έχουν και οι προειδοποιητικές λυχνίες (Rydell et al., 2012).

Όσο αναφορά το ρόλο της εποχικότητας, το ποσοστό θνησιμότητας των νυχτερίδων φαίνεται να είναι υψηλότερο κατά τα τέλη καλοκαιριού και στις αρχές του φθινοπώρου (Αύγουστο-Σεπτέμβριο), όταν οι νυχτερίδες συνήθως ξεκινάν τη φθινοπωρινή τους μετανάστευση. Όμως, ακόμα και εντός αυτής της περιόδου, ο αριθμός των ατυχημάτων διαφέρει σημαντικά από μέρα σε μέρα. Αυτή η διακύμανση στη συχνότητα θανάτωσης, αποδίδεται κατά κύριο λόγο στην ένταση του πνέοντος ανέμου και όχι γενικά στις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Οι νυχτερίδες κατά κύριο λόγο δραστηριοποιούνται εντός της επικίνδυνης περιοχής των ανεμογεννητριών, κατά τη διάρκεια της νύχτας και όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι σχετικά χαμηλή (έως 4 m/s). Η δραστηριότητα των νυχτερίδων μειώνεται αισθητά σε ταχύτητες ανέμου από 4 έως 8 m/s (Arnett et al., 2007; Rydell et al., 2012).

Σε γενικές γραμμές, επειδή οι νυχτερίδες έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής και χαμηλούς αναπαραγωγικούς ρυθμούς (μόλις 1-2 νεογνά ανά έτος), το μέγεθος του πληθυσμού τους είναι δύσκολο να διατηρηθεί σταθερό, ιδίως όταν αντιμετωπίζουν πρόσθετη ανθρωπογενή θνησιμότητα. Λαμβάνοντας υπόψη, ότι εκλείπουν βασικές δημογραφικές πληροφορίες για πολλά είδη χειροπτέρων, εγείρονται σημαντικές και βάσιμες ανησυχίες ως προς τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των ανεμογεννητριών, τουλάχιστον για τους πληθυσμούς των πλέον πληττόμενων ή και σπάνιων ειδών χειροπτέρων (Allison et al., 2019; Choi et al., 2020; Γεωργιακάκης & Παπαδάτου, 2011).

3.1.3. Θηλαστικά, ερπετά, ασπόνδυλα

Πέρα από την κατηγορία των πτηνών και των χειροπτέρων, σαφώς, κανένα άλλο είδος της άγριας πανίδας δεν έρχεται αντιμέτωπο με τον άμεσο κίνδυνο της θανάτωσης, από χερσαία αιολικά πάρκα. Οι νέες συνθήκες που εισάγουν οι εγκαταστάσεις της αιολικής ενέργειας, περιορίζονται στην κατάληψη και στην άρνηση πρόσβασης σε ωφέλιμες «ως προς αυτά» εκτάσεις γης, την κατάτμηση ή την υποβάθμιση των ενδιαιτημάτων και φυσικά, το ταραχώδες σκηνικό που συνθέτουν οι προκαλούμενοι θόρυβοι.

Τα μεγάλα θηλαστικά, κατά την περίοδο κατασκευής του αιολικού πάρκου (9 έως 12 μήνες), έχει παρατηρηθεί πως εκτοπίζονται από την περιοχή, λόγω της έντονης παρουσίας ανθρώπων και βαρέος εξοπλισμού. Η διαδικασία της κατασκευής, σπάνια υλοποιείται κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ελαχιστοποιώντας έτσι τις όποιες επιπτώσεις σε ορισμένα οπληφόρα θηλαστικά (τάρανδος, ελάφια, αντιλοκάπρα, βίσονας) (Arnett et al., 2007). Σύμφωνα και με τον οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος της Σουηδίας, η επίδραση των αιολικών πάρκων στα τοπικά θηλαστικά κρίνεται αμελητέα και άνευ ανησυχίας. Ο αντίκτυπος, περιορίζεται στην προσωρινή απομάκρυνση μεγάλων σαρκοφάγων και οπληφόρων ζώων, από τις υπό μελέτη περιοχές (European Commission [EC], 2020). Εντούτοις, με την ολοκλήρωση του έργου, τα επίπεδα διαταραχής που προκαλούνται από τον εξοπλισμό και το ανθρώπινο δυναμικό μειώνονται και οι κύριες διαταραχές, θα σχετίζονται με το προσωπικό λειτουργίας και συντήρησης, την περιστασιακή κυκλοφορία οχημάτων και την παρουσία των ανεμογεννητριών και λοιπών εγκαταστάσεων (Arnett et al., 2007).

Στις δυτικές και ανατολικές Πολιτείες της Αμερικής καθώς και στον Καναδά, το ελάφι της Βιρτζίνια (*Odocoileus virginianus*) και η μαύρη αρκούδα (*Ursus americanus*), υπάρχουν ενδείξεις πως επηρεάζονται αισθητά από την ανάπτυξη έργων αιολικής εκμετάλλευσης. Η υποβάθμιση και ο περιορισμός της έκτασης των ενδιαιτημάτων, φαίνεται πως μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση του πληθυσμού. Γενικά, έχει παρατηρηθεί πως οι μαύρες αρκούδες επιλέγουν ως ιδανικό μέρος για τη δημιουργία φωλιάς, μια περιοχή που απέχει 1-2 km από ανθρώπινη δραστηριότητα (δρόμοι, κατοικίες, βιομηχανίες). Ενώ οι μαύρες αρκούδες φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ανεκτικές όταν βρίσκονται σε τέτοια απόσταση, σε περίπτωση που η “πηγή διαταραχής” πλησιάσει λιγότερο από 1 km και ιδιαίτερα στα 200 m από τη φωλιά, έχει παρατηρηθεί πως οι αρκούδες αντιδρούν σπασμωδικά και πιθανόν να εγκαταλείψουν άτακτα τη φωλιά τους. Αν και η απώλεια ενός καταφύγιου δεν μπορεί να επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις, η επαναλαμβανόμενη ή η μαζική εγκατάλειψη των φωλιών, είναι ικανή να οδηγήσει σε αυξημένη θνησιμότητα ιδίως των μικρών τους (Arnett et al., 2007).

Στην Πολωνία, δεν διαπιστώθηκε καμία μεταβολή στην ποικιλομορφία και την αφθονία των τοπικών μικρών θηλαστικών. Το ευρωπαϊκό χάμστερ (*Cricetus cricetus*), επίσης γνωστό ως χάμστερ της Ευρασίας, το συνηθέστερο είδος τρωκτικού που συναντάται ευρέως σε περιοχές εντός ή περίξ των αιολικών πάρκων της Πολωνίας, φαίνεται να συνυπάρχει και να συμβιώνει αρμονικά με τις υπάρχουσες ανεμογεννήτριες. Όσο αναφορά τα μεγαλύτερα θηλαστικά, ορισμένα είδη όπως το ζαρκάδι (*Capreolus capreolus*) και ο καφέ λαγός (*Lepus europaeus*), σταδιακά περιόρισαν τη δραστηριότητα τους, σε ενδιαιτήματα που βρίσκονταν σε ακτίνα εντός των 700 μέτρων από το πλησιέστερο αιολικό πάρκο. Επειδή αυτά τα είδη θηλαστικών, βασίζονται κυρίως στην ακοή για την

ανίχνευση των θηρευτών τους, η εκτόπιση τους, ενδεχομένως συνδέεται με τη μειωμένη ικανότητα τους να αντιλαμβάνονται την απειλή των φυσικών τους εχθρών. Μειωμένη συχνότητα εμφάνισης εντός του χώρου της αιολικής εκμετάλλευσης, παρατηρήθηκε και για την κόκκινη αλεπού (*Vulpes vulpes*), ως απόρροια της μειωμένης διαθεσιμότητας θηραμάτων (καφές λαγός) αλλά και εξαιτίας της υψηλής στάθμης θορύβου, παράγοντας που επηρεάζει την ικανότητα ακοής και κατά επέκταση, την αποτελεσματικότητα των κυνηγετικών της τακτικών. Ωστόσο, ορισμένες φορές, έχει καταγραφεί η κόκκινη αλεπού να επισκέπτεται τις εν λόγω τοποθεσίες, προκειμένου να τραφεί με πτώματα πτηνών και νυχτερίδων που θανατώθηκαν από τις ανεμογεννήτριες. Στην Πορτογαλία, ορισμένα είδη μεγάλων θηλαστικών, όπως ο γκρίζος λύκος (*Canis lupus*), απομακρύνθηκαν από την υπό μελέτη περιοχή και οι νέες τους φωλιές εντοπίστηκαν έως και 2,5 km μακριά από τα αιολικά πάρκα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μειωμένη αναπαραγωγική δραστηριότητα κατά το στάδιο της κατασκευής και των πρώτων ετών λειτουργίας των αιολικών πάρκων (EC, 2020).

Μια άλλη μελέτη που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, πραγματοποιήθηκε από τους Βρετανούς ερευνητές Agnew et al., στην περιοχή του Ηνωμένου Βασιλείου. Η μελέτη εστίαζε στην παρατήρηση δυο διαφορετικών ομάδων ασβών, που δραστηριοποιούνταν σε περιοχές κοντά (< 1 km) και μακριά (> 10 km) από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης. Η συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον επειδή ο ασβός, είναι ένα θηλαστικό που έχει παρόμοιο ακουστό φάσμα με εκείνο των ανθρώπων. Οι ερευνητές συνέλεξαν τρίχωμα από τους εξεταζόμενους ασβούς, προκειμένου να μετρήσουν τα επίπεδα κορτιζόλης και να προσδιοριστεί κατά πόσο προκλήθηκε στρες στη φυσιολογία τους. Η κορτιζόλη, θεωρείται η κατεξοχήν ορμόνη του άγχους και δύναται να επηρεάσει αρνητικά τόσο το ανοσοποιητικό τους σύστημα (κίνδυνος λοιμώξεων και ασθενειών), όσο και το επίπεδο του πληθυσμού τους. Η ομάδα των ασβών που δραστηριοποιούνταν σε απόσταση μικρότερη του 1 km από τις ανεμογεννήτριες, εντοπίστηκαν με 264% περισσότερη κορτιζόλη από την αντίστοιχη ομάδα που ζούσε σε απόσταση μεγαλύτερη των 10 km. Δεδομένου ότι η κορτιζόλη ενσωματώνεται στην τρίχα σε όλη τη φάση ανάπτυξης της, διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει από 3 έως 5 μήνες, γίνεται σαφές πως οι ασβοί υποφέρουν από στρες για μήνες, αποκτώντας χρόνιο χαρακτήρα. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη πως δεν παρατηρήθηκε καμία διαφορά στα επίπεδα κορτιζόλης των ασβών, που ζούσαν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κοντά σε ανεμογεννήτριες, συνάγεται το συμπέρασμα πως ορισμένα θηλαστικά, δεν προσαρμόζονται ούτε εξοικειώνονται στο θόρυβο των ανεμογεννητριών (EC, 2020).

Όσο αναφορά τα ερπετά και τα ασπόνδυλα, οι συγκεκριμένες κατηγορίες ζώων, επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από την απώλεια, την υποβάθμιση και τον κατακερματισμό των οικοτόπων. Ειδικά τα ασπόνδυλα, είναι ευαίσθητα σε οποιαδήποτε δραστηριότητα υποβαθμίζει τη δομή του εδαφικού υποστρώματος. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία και οι έρευνες που εστιάζουν αποκλειστικά στις συγκεκριμένες κατηγορίες ζώων, είναι εξαιρετικά περιορισμένες και ελλιπείς. Στην Πορτογαλία, μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μοντέλων και μεθόδων προσομοίωσης, βασισμένη σε εμπειρικά δεδομένα, έδειξε πως η ποικιλομορφία των σπονδυλωτών και των ερπετών της υπό εξέταση περιοχής, μειώθηκε κατά 20% μετά την εγκατάσταση δυο ανεμογεννητριών (εφοδιασμένες με μονοπολικού τύπου πύργους στήριξης). Επίσης, η ελληνική χελώνα (*Testudo graeca*), η οποία συγκαταλέγεται στα προστατευόμενα είδη, έχει παρατηρηθεί πως επηρεάζεται από τον

κατακερματισμό των οικοτόπων που προκαλείται κατά την κατασκευή των αιολικών πάρκων, κυρίως στην περιοχή της νοτιοανατολικής Ευρώπης. Το φαινόμενο γίνεται ακόμα πιο έντονο όταν τα αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε βραχώδεις οικοτόπους. Μακροπρόθεσμα, έχει την τάση να απομακρύνεται από περιοχές που παρουσιάζουν υψηλή συγκέντρωση σε ανεμογεννήτριες (EC, 2020).

Ενώ το αποτύπωμα των αιολικών πάρκων είναι σχετικά μικρό, εάν οι εγκαταστάσεις τοποθετηθούν σε κρίσιμες περιοχές και σε ευαίσθητους οικοτόπους, η άμεση απώλεια των ενδιαιτημάτων, σαφώς, θα ήταν δυσμενής για τα περισσότερα από τα είδη του ζωικού βασιλείου. Τα μεγάλα θηλαστικά, ενδέχεται να αποφύγουν τις αιολικές εγκαταστάσεις σε κάποιο βαθμό, ανάλογα με το επίπεδο της ανθρώπινης δραστηριότητας. Αυτές οι επιπτώσεις θα μπορούσαν να είναι αρνητικές και ίσως βιολογικά σημαντικές, εάν οι εγκαταστάσεις τοποθετηθούν σε λάθος θέσεις και ειδικά εάν η πληγείσα περιοχή, θεωρείται κρίσιμος πόρος του οποίου η απώλεια θα περιόριζε τους πληθυσμούς (Arnett et al., 2007).

3.1.4. Αποδάσωση και διάβρωση του εδάφους

Κατά το στάδιο της κατασκευής ενός αιολικού πάρκου, ορισμένες δραστηριότητες φερειπείν η εκσκαφή θεμελίων και η κατασκευή οδών, δύναται να επηρεάσουν σημαντικά το τοπικό οικοσύστημα. Όταν αφαιρείται η τοπική χλωρίδα, το ανώτερο στρώμα εδάφους καθίσταται εκτεθειμένο σε ισχυρούς ανέμους και βροχοπτώσεις, με αποτέλεσμα τη διάβρωση του εδάφους. Επιπλέον, τα λύματα και λοιπές χημικές ουσίες που προέρχονται από το εργοτάξιο, μπορούν να εισχωρήσουν στο έδαφος και να προκληθούν άλλου είδους σοβαρά περιβαλλοντικά ζητήματα. Περιοχές που παρουσιάζουν πλούσιο αιολικό δυναμικό, όπως λειμώνες και ημιέρημες ξηρές εκτάσεις γης, έχουν συνήθως αδύναμα οικοσυστήματα με χαμηλή βιοποικιλότητα. Η κατασκευή αιολικών πάρκων με εκτεταμένη χρήση βαρέων τύπου μηχανημάτων, ενδέχεται να διαταράξει την τοπική οικολογική ισορροπία και η ανάκαμψη του τοπικού περιβάλλοντος ίσως διαρκέσει πολλά χρόνια. Μια κινέζικη κατασκευαστική εταιρία, έχει προτείνει πως η διεργασία της ανασκαφής, θα πρέπει να περιλαμβάνει στο μέγιστο βαθμό την ανθρώπινη εργασία προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η διαταραχή που προκαλείται από τα βαριά μηχανήματα και έπειτα, με το πέρας της κατασκευής να αναφυτεύεται το συντομότερο δυνατό η εκτοπισμένη χλωρίδα (Dai et al., 2015).

3.2. Υπεράκτια αιολικά πάρκα – Δυνητικές επιπτώσεις

Στη συγκεκριμένη ενότητα, γίνεται μια εκτενή αναφορά σχετικά με τον αντίκτυπο που έχουν οι δομές των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες επηρεάζουν τη λειτουργία του θαλάσσιου οικοσυστήματος, είτε με θετικό είτε με αρνητικό τρόπο, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους και κυρίως κατά το στάδιο της εγκατάστασης και της λειτουργίας. Οι αρνητικές επιπτώσεις επιδρούν σε διαφορετικό βαθμό και με διαφορετικό τρόπο στους θαλάσσιους οργανισμούς και πηγάζουν κυρίως από το θόρυβο που δημιουργείται κατά το στάδιο της εγκατάστασης, από το λειτουργικό θόρυβο, από τη δέσμευση και άρα την απώλεια έκτασης

θαλάσσιων φυσικών ενδιαιτημάτων, από την ανάπτυξη υδροδυναμικών φαινομένων που αλλοιώνουν τα ιζήματα του πυθμένα και φυσικά από την ανάπτυξη ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

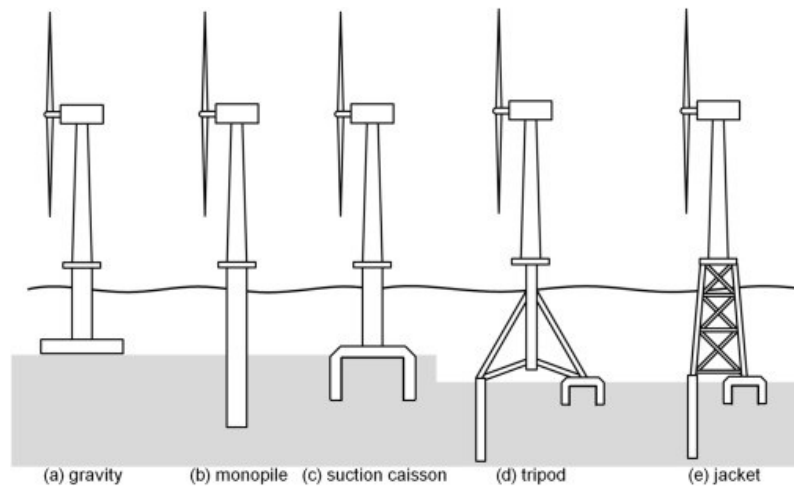
3.2.1. Βενθικό οικοσύστημα

Με τον όρο βενθικό οικοσύστημα, χαρακτηρίζεται ένα οικοσύστημα που περιλαμβάνει το σύνολο των έμβιων οργανισμών, που ζουν και αναπτύσσονται εντός, στην επιφάνεια ή και κοντά στον πυθμένα αλμυρών ή γλυκών υδάτινων εκτάσεων. Οι βενθικοί οργανισμοί διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες, σε φυτοβένθος και ζωοβένθος. Το βένθος αποτελεί ένα τύπο οικοσυστήματος που παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον, τόσο από οικολογικής όσο και από οικονομικής σκοπιάς. Οικολογικής, διότι εκεί συναντάται ένας τεράστιος φυσικός πλούτος που φιλοξενεί πολλές διαφορετικές μορφές ζωής με μοναδικά χαρακτηριστικά. Οικονομικής δε, επειδή πολλά από τα αυτά τα είδη παρουσιάζουν παγκόσμιο οικονομικό ενδιαφέρον (σπόγγοι, κοράλλια, μαλάκια, καρκινοειδή, εχινόδερμα, ψάρια) και αρκετές από τις οικονομικές δραστηριότητες των ανθρώπων σχετίζονται με τη σύλληψη τους (Κουτσούμπας, 2003).

Η Μεσόγειος, έχει σχετικά στενή υφαλοκρηπίδα και περιλαμβάνει πολλά βενθικά οικοσυστήματα όπως θαλάσσια λιβάδια, υφάλους, συγκεντρώσεις κοραλλιογενών πετρωμάτων, ρηχά υποθαλάσσια πετρώματα, αμμώδη ιζήματα, κοραλλιογενείς υφάλους βαθέων υδάτων και αβυσσαλέες πεδιάδες. Εκεί ευδοκμούν και ένας από τους πιο σημαντικούς οικοτόπους, τα θαλάσσια λιβάδια γνωστά με τον όρο Ποσειδώνια (*Posidonia oceanica*). Η Ποσειδώνια είναι ένα θαλάσσιο φυτό, ενδημικό της Μεσογείου, το οποίο σχηματίζει εκτεταμένους λειμώνες σε αμμώδεις περιοχές του βυθού, σε βάθη από 1 έως 40 μέτρα. Καλύπτει μια επιφάνεια από 25.000 έως 50.000 km², μέγεθος που αντιστοιχεί στο 25% της υφαλοκρηπίδας (με βάθος από 0 έως 40 m). Η Ποσειδώνια, έχει χαρακτηριστεί ως οι “πνεύμονες της Μεσογείου” και αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πηγές οξυγόνου, αφού καθημερινά παράγει 14 έως 20 λίτρα οξυγόνου ανά τετραγωνικό μέτρο. Συγκροτεί ένα πολύ σημαντικό οικοσύστημα για τη Μεσόγειο, με σπουδαίο ρόλο τόσο από οικολογικής όσο και οικονομικής άποψης, αλλά είναι εξαιρετικά ευαίσθητο σε επιπτώσεις ανθρωπογενών παρεμβάσεων. Για αυτό το λόγο, η Ποσειδώνια, προστατεύεται από όλες τις χώρες της Ευρώπης και περιλαμβάνεται στα παραρτήματα της Σύμβασης της Βέρνης για τη διατήρηση της άγριας ζωής και του φυσικού περιβάλλοντος της Ευρώπης, ως άμεσα προστατευόμενο είδος (1979) και στη Συνθήκη της Βαρκελώνης (ως κινδυνεύον είδος), στο Παράρτημα I της οδηγίας 92/43/EOK με κωδικό 1120 ως τύπος οικοτόπου προτεραιότητας (Poursanidis, 2019; WWF-France, 2019).

Γενικά, οι θαλάσσιες ζώνες, ανάλογα με το βάθος των υδάτων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, τα ρηχά νερά (0 έως 30 m), τα μεταβατικά νερά (30 έως 50 m) και τα βαθιά νερά (50 έως 200 m). Η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για την ανάπτυξη του αιολικού πάρκου, αποτελεί ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που κρίνει βιωσιμότητα του, αφού το κόστος των δομών θεμελίωσης αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με το βάθος (Oh, Nam, Ryu, Kim & Erureanu, 2018). Οι προτεινόμενοι τύποι βυθού που ενδείκνυνται για την εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων, είναι εκείνοι που αποτελούνται από άμμο ή ψιλό χαλίκι (Draget, 2014). Στα ρηχά νερά εΐθισται να χρησιμοποιείται η μονοπάσσαλη θεμελίωση (ο πιο διαδεδομένος τύπος, ιδίως στην Ευρώπη) και η

θεμελίωση βαρυτικού τύπου (gravity type). Στα μεταβατικά και βαθιά νερά, χρησιμοποιείται κυρίως θεμελίωση τύπου πλέγματος, μια κατηγορία που περιλαμβάνει τόσο τους τρίποδες (tripod) όσο και τα δικτυώματα (jackets). Η θεμελίωση τύπου στεγανού θαλάμου αναρρόφησης (suction caisson), ουσιαστικά πρόκειται για μία μέθοδο πάκτωσης του τύργου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου σε ρηγά ή μεταβατικά νερά (Εικόνα 14). Να σημειωθεί πως τα καινοτόμα θεμέλια πλωτού τύπου (floating type), έχουν περιορισμένη χρήση αφού βρίσκονται σε δοκιμαστικό στάδιο, αλλά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου πως στοχεύουν τοποθεσίες με πολύ μεγάλα βάθη (100 έως 200 m) (Oh et al., 2018).



Εικόνα 14. Διάφοροι τύποι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών ανάλογα με το βάθος του πυθμένα. Πηγή: Oh et al., 2018.

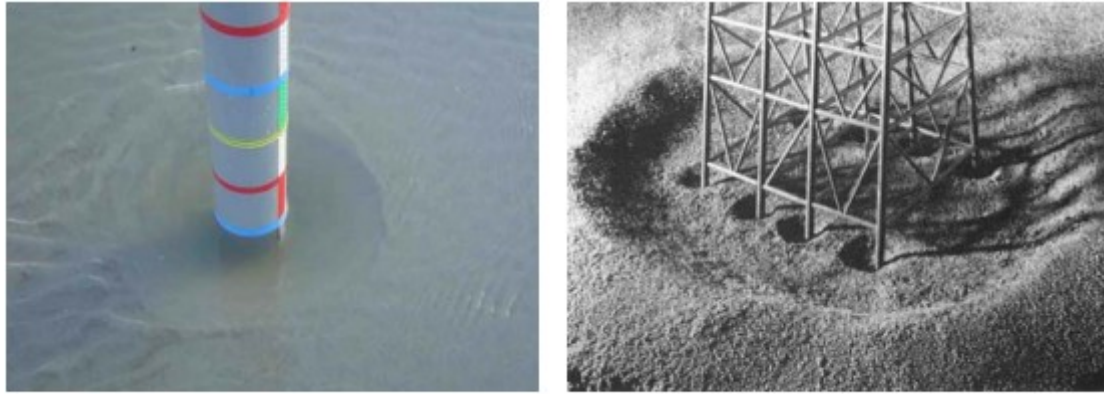
Η ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, ισοδυναμεί με την απώλεια ορισμένων φυσικών θαλάσσιων περιοχών. Ανάλογα με τον τύπο της δομής, δεσμεύεται διαφορετική έκταση από την επιφάνεια του πυθμένα, η οποία κυμαίνεται από 1.500 έως 2.000 m² για μονοπάσσαλη θεμελίωση, 800 έως 2.300 m² για θεμελίωση βαρυτικού τύπου και 700 έως 1.700 m² για θεμελίωση τύπου πλέγματος (WWF-France, 2019). Όμως, πέρα από την απώλεια των ενδιαιτημάτων μαλακού ιζήματος (αμμουδιά) που προκαλείται, εισάγονται δύο νέα διακριτά τεχνητά ενδιαιτηματα. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα σκληρά κάθετα υποστρώματα, τα οποία κατανέμονται κατακόρυφα σε ολόκληρο το εύρος βάθους, από την επιφάνεια της θάλασσας έως τον πυθμένα, συνθέτοντας έναν ομοιόμορφο βιότοπο σε περιοχές όπου συνήθως δε υπάρχουν παρόμοιες σκληρές φυσικές επιφάνειες. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει ένα σύνθετο φάσμα οριζόντιων ενδιαιτημάτων, ανάλογα με τον τύπο της θεμελίωσης και τον τύπο της προστασίας κατά της υδραυλικής υποσκαφής, που έχουν χρησιμοποιηθεί (Degraer et al., 2020; Kaldellis et al., 2016).

Οι βενθικοί οργανισμοί συνήθως αναζητούν καταφύγιο μακριά από την ακτογραμμή και σε βαθύτερα νερά, είτε λόγω της εκτεταμένης ρύπανσης (πλαστικής, χημικής, ηχορύπανσης) των υδάτων ως απόρροια των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, είτε λόγω του ευτροφισμού, ένα φαινόμενο κατά το οποίο η υπέρμετρη αύξηση των θρεπτικών συστατικών οδηγεί σε μειωμένη περιεκτικότητα διαλυμένου οξυγόνου (Draget, 2014). Έτσι, οι υποθαλάσσιες υποδομές φαίνεται πως μπορούν να

λειτουργήσουν ως “βιολογικά καταφύγια” παρέχοντας ένα ιδιαίτερα ελκυστικό υπόστρωμα. Μάλιστα, η αποίκηση των μικροοργανισμών ξεκινά εντός ολίγων ωρών, οδηγώντας στην προσέλκυση μεγαλύτερων ειδών τις επόμενες εβδομάδες και μήνες. Οι οργανισμοί που αναπτύσσονται συχνότερα στη θεμελίωση των ανεμογεννητριών, είναι οι πεταλίδες (*Balanus improvisus*) και τα μύδια (*Mytilus edulis*). Αναφορικά, μια μόνο ανεμογεννήτρια δύναται να φιλοξενήσει περίπου 1 έως 2 τόνους μύδια. Αυτά με τη σειρά τους παρέχουν τροφή και καταφύγιο σε καρκινοειδή (καβούρια, караβίδες, γαρίδες, αστακοί) και συμβάλλουν στην ανάπτυξη της βιοποικιλότητας των μακροασπονδύλων οργανισμών (Degraer et al., 2020; Draget, 2014). Τα μακροασπόνδυλα μπορούν να αξιοποιηθούν και ως βιοτικοί δείκτες για την εκτίμηση της οικολογικής ποιότητας ενός υδάτινου οικοσυστήματος. Τα μικρά καρκινοειδή μπορούν να τρέφονται με τα απόβλητα των μυδιών, ενώ τα ίδια αποτελούν θήραμα για τα ψάρια. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, μια ανεμογεννήτρια συντελεί στην αύξηση της βιομάζας ενός οικοσυστήματος έως και 4.000 φορές, συγκριτικά με αυτή υπήρχε αρχικά στα ιζήματα, προτού υπάρξει ανθρωπογενή παρέμβαση (Degraer et al., 2020). Στο υπεράκτιο αιολικό πάρκο Egmond aan Zee της Ολλανδίας το οποίο διαθέτει συνολικά 36 ανεμογεννήτριες, αναπτύχθηκαν συνολικά περίπου 7,4 τόνοι μυδιών και 100 κιλά μικρών καρκινοειδών και πολύχαιτων σκουληκιών, ενώ καταγράφηκε και η προσέλευση νέων ειδών (Draget, 2014). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως η αιολική ενέργεια συμβάλει στην ενίσχυση ενός τοπικού οικοσυστήματος ή έχει “αποκαταστατική” επίδραση σε υποβαθμισμένους φτωχούς φυσικούς οικοτόπους (Degraer et al., 2020; Draget, 2014; Kaldellis et al., 2016).

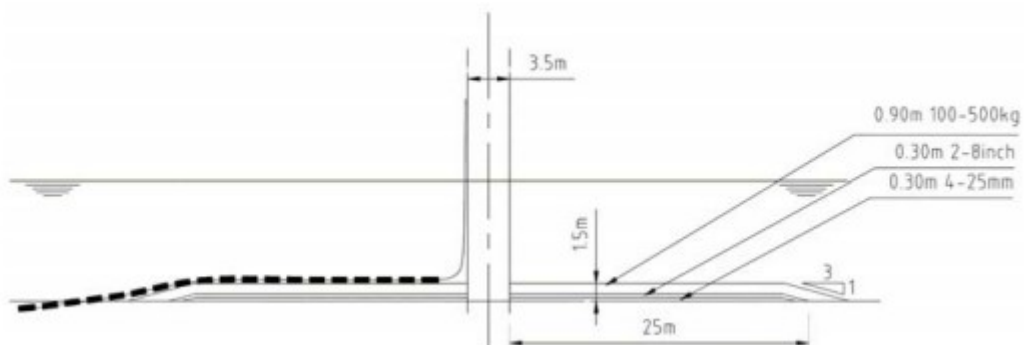
Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη ανάπτυξη των βενθικών οργανισμών στα υποθαλάσσια δομικά στοιχεία των ανεμογεννητριών, μπορεί να προκαλέσει σημαντικό λειτουργικό κίνδυνο. Εκτός από τη διάβρωση που προκαλείται και το επιπλέον βάρος που προστίθεται, οι θαλάσσιοι οργανισμοί προσδίδουν μια τραχύτητα στην επιφάνεια των δομικών μερών, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται πρόσθετη πίεση στη θεμελίωση από τα ρεύματα του νερού. Μια ενδιαφέρουσα πρόταση που θα μπορούσε να συμβάλει στην αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, είναι η ανάπτυξη υδατοκαλλιεργειών εντός του χώρου των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Με αυτό τον τρόπο, οι υδατοκαλλιεργητές επωφελούνται από το πλούσιο και παραγωγικό περιβάλλον που συνθέτουν οι ανεμογεννήτριες, ενώ παράλληλα το κόστος συντήρησης μειώνεται σημαντικά για τους υπεύθυνους ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας (Draget, 2014).

Τώρα, το βυθισμένο τμήμα της ανεμογεννήτριας, μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιες επιπτώσεις στα ιζήματα του βυθού. Δεδομένου ότι το ίζημα του βυθού είναι φυσικά κινητό, λόγω της ανάπτυξης του φαινομένου της διασωλήνωσης, μπορεί να προκληθεί υδραυλική υποσκαφή στον πυθμένα περιμετρικά της θεμελίωσης (Εικόνα 15). Η δύναμη διήθησης που αναπτύσσεται, εξαρτάται κυρίως από τις εποχιακές διακυμάνσεις των θαλάσσιων ρευμάτων και από τη στάθμη του νερού. Η υδραυλική υποσκαφή, μπορεί να αναπτυχθεί τόσο βαθιά όσο 1,38 φορές η διάμετρος της μονοπάσας της θεμελίωσης.



Εικόνα 15. Το φαινόμενο της διασωλήνωσης που αναπτύχθηκε σε μονοπάσσαλη θεμελίωση (αριστερά) και σε θεμελίωση τύπου πλέγματος (δεξιά). Πηγή: Tempel, Zaaijer & Subroto, 2004.

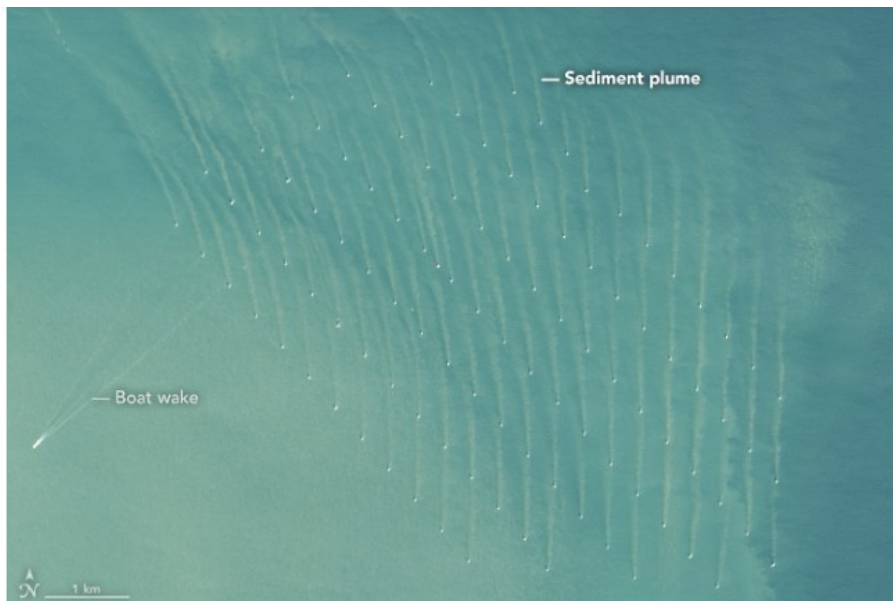
Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της διασωλήνωσης, εγκαθίστανται ειδικές προστατευτικές στρώσεις στον πυθμένα, 20 έως 30 μέτρα περιμετρικά της θεμελίωσης, για να αυξηθεί η δομική σταθερότητα του πύργου και η ασφάλεια του καλωδίου (WWF-France, 2019). Υπάρχουν διάφοροι τύποι προστασίας, όπως στρώσεις από άσφαλτο ή σκυρόδεμα, οι οποίες έχουν ιδιαίτερο υψηλό κόστος. Η οικονομικά πιο συμφέρουσα επιλογή, αποτελεί η προστασία με στρώσεις από χαλίκια. Σε αρκετές περιπτώσεις τοποθετούνται πολλαπλές στρώσεις, η μία πάνω από την άλλη, προκειμένου να αποφευχθεί η απομάκρυνση χαλικιών μικρότερου διαμετρήματος. Στην παρακάτω εικόνα αναπαρίστανται οι προστατευτικές στρώσεις που έχουν ήδη εφαρμοστεί σε μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια, για το σκοπό της οποίας χρησιμοποιήθηκαν 6.500 τόνοι χαλίκια (Tempel et al., 2004). Ωστόσο, η ίδια η προστασία μπορεί να προκαλέσει δευτερογενής υδραυλική υποσκαφή και σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι βαθύτερη από ότι σε “γυμνές” θεμελιακές δομές (Draget, 2014).



Εικόνα 16. Προστασία κατά της υδραυλικής υποσκαφής με τρεις στρώσεις χαλικιών διαφορετικού διαμετρήματος. Πηγή: Tempel et al., 2004.

Η στροβιλώδης χαοτική ροή που αναπτύσσεται αφού το ρευστό διέλθει από τη θεμελίωση, επιδρά στους θαλάσσιους οργανισμούς επηρεάζοντας την πρόσληψη προνυμφών και τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου. Οι τυρβώδεις ροές των θαλάσσιων ρευμάτων, ευθύνονται επίσης για του ανάπτυξη του φαινομένου της ιζηματοπόθεσης (sedimentation), δηλαδή το σχηματισμό “νεφών” στερεάς

σωματιδιακής ύλης από τα ιζήματα του πυθμένα (sediment plume), τα οποία έχουν πλάτος από 30 έως 150 μέτρα και εκτείνονται σε απόσταση αρκετών χιλιομέτρων ανάλογα με την κατεύθυνση των ρευμάτων (Εικόνα 17). Η ιζηματοπόθεση, αποδεδειγμένα αυξάνει τον κίνδυνο ραγδαίας μεταβολής της βιοποικιλότητας ενός οικοτόπου. Οι δραστικές πληθυσμιακές μεταβολές των ειδών, είναι ικανές να επιφέρουν αλυσιδωτές αντιδράσεις στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των οικοσυστημάτων όπως την παραγωγικότητα, την ανθεκτικότητα στις διαταραχές και την αντοχή στις “εισβολές” νέων ξενικών ειδών. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα της Δανίας και της Σουηδίας, όπου τα δύο από τα τρία ξενικά είδη που εντοπίστηκαν, κυριάρχησαν έναντι των αυτοχθόνων τοπικών πληθυσμών (Draget, 2014; WWF-France, 2019).



Εικόνα 17. Το φαινόμενο της ιζηματοπόθεσης και ο σχηματισμός νεφών “αιωρούμενης” σωματιδιακής ύλης εντός του υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Πηγή: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/89063/offshore-wind-farms-make-wakes>

Όσον αφορά, τα θαλάσσια ασπόνδυλα, μια τεράστια ομάδα οργανισμών που αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ενός βενθικού οικοσυστήματος, μέχρι και σήμερα δεν υπάρχει σαφής εικόνα σχετικά με το βαθμό που η υπεράκτια αιολική ενέργεια επιδρά σε αυτά. Αρκετές αναφορές, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως στην πλειονότητα τους, τα ασπόνδυλα είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στο θόρυβο. Εν τούτοις, ενώ ορισμένα μαλάκια όπως το στρείδι (*Crassostrea virginica*) παρουσιάζουν μεγάλη ανοχή στον έντονο θόρυβο, άλλα μαλάκια όπως οι αλιώτιδες (*Haliotis corrugate*) είναι πολύ πιο ευαίσθητα. Επίσης μαλάκια όπως το καλαμάρι, βασίζονται στα ηχητικά σήματα προκειμένου να εντοπίσουν τα θηράματα και τους θηρευτές τους, καθώς και σε άλλους φυσικούς ήχους που βοηθούν στον προσανατολισμό και την πλοήγηση τους. Σε περίπτωση που ο θόρυβος των εν λειτουργία ανεμογεννητριών διαταράξει αυτές τις φυσικές ηχητικές ενδείξεις, ίσως προκύψουν δυσμενείς επιπτώσεις (Draget, 2014). Εξίσου σημαντική, είναι η ρύπανση που προκαλείται από τις ίδιες τις ανεμογεννήτριες και η οποία μπορεί να υποβαθμίσει συνολικά και με άμεσο τρόπο, την ποιότητα του νερού. Ενδεικτικά, μία ανεμογεννήτρια εναποθέτει στα ύδατα κάθε χρόνο από 0,5 έως και 1 τόνο μέταλλα όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος, καθώς και άλλα βαρέα μέταλλα όπως το ίνδιο. Τα

μέταλλα αυτά, χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε ανόδια γαλβανικής δράσης για την αντιδιαβρωτική προστασία της εγκατάστασης (WWF-France, 2019).

3.2.2. Ψάρια

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια, διαμορφώνει ορισμένες συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη και τη διατήρηση της πληθυσμιακής πυκνότητας των ψαριών, αφενός παρέχοντας τεχνητά ενδιαίτηματα που εξασφαλίζουν αφθονία σε τροφή, αφετέρου αποκλείοντας σε απόλυτο βαθμό την τέλεση αλιείας βιομηχανικής κλίμακας (μηχανότρατες, γρι-γρι). Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν επιπτώσεις που προκαλούν προβληματισμό και συνδέονται με την υψηλή στάθμη θορύβου κυρίως κατά τη φάση εγκατάστασης των θεμελίων, την αλλαγή της τοπικής μορφολογίας, το φαινόμενο της ιζηματοπόθεσης και την ανάπτυξη ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Ο θόρυβος που προκαλείται κατά το στάδιο της εγκατάστασης, αποτελεί πρωταρχική και κύρια αιτία διαταραχής των ψαριών και σίγουρα είναι πολύ πιο ισχυρός από το θόρυβο που προκαλείται σε οποιαδήποτε άλλο στάδιο του κύκλου ζωής. Η εγκατάσταση, περιλαμβάνει πολλές θορυβώδεις επιμέρους διαδικασίες (Draget, 2014; WWF-France, 2019). Η έμπηξη της μονοπάσσαλης θεμελίωσης μέσω υδραυλικής κρούσης (pile drivers) στο βυθό, είναι μακράν η πιο δυσμενής δραστηριότητα. Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την εγκατάσταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο Ηνωμένο Βασίλειο, έδειξαν πως ο θόρυβος που προκαλείται κατά την κρούση σε βάθος 5 μέτρων ήταν 260 dB και σε βάθος 10 μέτρων 262 dB (Kaldellis et al., 2016). Ο έντονος θόρυβος, πέρα από την πρόκληση θανάσιμων τραυματισμών στα ψάρια που βρίσκονται αρκετά κοντά στο εργοτάξιο, πιθανών να επιφέρει αλλαγές στη συμπεριφορά τους φερεπειείν άτακτη φυγή από περιοχές εκτροφής ή αναπαραγωγής, προσωρινή ή μόνιμη απώλεια ακοής και αδυναμία επικοινωνίας και ανίχνευσης του ακουστικού περιβάλλοντος (Draget, 2014; WWF-France, 2019).

Λιγότερο ισχυρός αλλά μεγαλύτερος σε διάρκεια, είναι ο θόρυβος των εν λειτουργία ανεμογεννητριών. Κατά τη λειτουργίας τους, δημιουργείται θόρυβος που προέρχεται από δονήσεις μεταξύ του πύργου στήριξης και των μηχανικών μερών (κιβώτιο ταχυτήτων, γεννήτρια), με αποτέλεσμα να μεταφέρονται εύκολα μέσω της θεμελίωσης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αν και ο λειτουργικός θόρυβος δεν είναι σε καμία περίπτωση θανατηφόρος για τα ψάρια, ίσως υποσκιάζει ως ένα βαθμό τα ηχητικά σήματα των θαλάσσιων πλασμάτων ή αυξάνει τα επίπεδα άγχους εξασθενώντας το ανοσοποιητικό τους σύστημα. Η απόσταση κατά την οποία τα ψάρια μπορούν να ανιχνεύσουν το θόρυβο των ανεμογεννητριών, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο αριθμός και το μέγεθος των ανεμογεννητριών, την ταχύτητα των ρευμάτων, το βάθος των υδάτων και τον τύπο του πυθμένα. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, τα ψάρια (ανάλογα και με το είδος) μπορούν να ανιχνεύσουν το θόρυβο από απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων έως και 25 χιλιομέτρων. Ωστόσο, ο λειτουργικός θόρυβος δεν αποτελεί λόγο για τον οποίο τα ψάρια θα εγκατέλειπαν έναν ωφέλιμο οικότοπο (Draget, 2014).

Όσον αφορά το φαινόμενο της ιζηματοπόθεσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, λειτουργεί ως κατασταλτικός παράγοντας για τη βιοποικιλότητα ενός οικοσυστήματος. Εντούτοις, στην περίπτωση των ψαριών και κυρίως στα μικρότερα είδη, αποτελεί ένα πρόσθετο κίνδυνο αφού τα ψιλά στερεά

σωματίδια φράζουν τα βράγχια τους, με αποτέλεσμα να αναστέλλεται η λειτουργία του αναπνευστικού τους συστήματος και να εμποδίζεται η σίτιση τους (Draget, 2014). Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα διαθέτουν δύο διακριτά κυκλώματα ηλεκτρικών γραμμών, το εσωτερικό κύκλωμα με το οποίο γίνεται η διασύνδεση όλων των ανεμογεννητριών και το εξαγωγικό κύκλωμα, το οποίο μεταφέρει την παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια από το αιολικό πάρκο στην ξηρά. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου μεγάλης κλίμακας, παραδίδεται συνήθως σε έναν υπεράκτιο υποσταθμό (ανάλογα και με την απόσταση από την ακτή) και στη συνέχεια μεταφέρεται προς το ηπειρωτικό δίκτυο. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από το εξαγωγικό καλώδιο (συνήθως είναι ένα), υπό τη μορφή εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος (Draget, 2014; Kaldellis et al., 2016). Τα είδη των ψαριών που χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό για τον προσανατολισμό τους (καρχαρίες, σαλάχια, χέλια), φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητα στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία των ανεμογεννητριών. Πολλά από αυτά τα είδη είναι ικανά να ανιχνεύσουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε απόσταση άνω των 300 μέτρων. Ωστόσο, ενώ ορισμένα είδη όπως το σκυλόψαρο απωθούνται από τα επαγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, άλλα είδη όπως το σαλάχι φαίνεται να ελκύνονται από αυτά, ενώ άλλα παρουσιάζουν ασθενή αποπροσανατολισμό κατά το μεταναστευτικό τους ταξίδι. Έρευνες που διεξήχθησαν στο υπεράκτιο αιολικό πάρκο Robin Rigg της Σκωτίας (διαθέτει 60 ανεμογεννήτριες), πριν και μετά την κατασκευή αλλά και κατά το στάδιο λειτουργίας του, έδειξαν σημαντική αύξηση των “ηλεκτροευαίσθητων” ψαριών κατά μήκος της διαδρομής που διανύει το εξαγωγικό καλώδιο (Draget, 2014).

3.2.3. Θαλάσσια θηλαστικά

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια, παρόλο που εκμηδενίζει πλήρως την όχληση που προκαλεί ο θόρυβος των εν λειτουργία ανεμογεννητριών στους ανθρώπους, αυτό δεν φαίνεται να ισχύει εξίσου και για τα θαλάσσια θηλαστικά όπως τα δελφίνια, τις φώκιες και τις φάλαινες. Τα θηλαστικά, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό στο ακουστικό τους σύστημα, προκειμένου να προσανατολιστούν, να επικοινωνήσουν και να αναζητήσουν τη λεία τους. Ωστόσο, στην παρούσα φάση, είναι δύσκολο να αξιολογηθεί και να γενικευτεί η μακροπρόθεσμη επίδραση της αιολικής ενέργειας στα διάφορα είδη θηλαστικών (Kaldellis et al., 2016).

Μερικά από τα βιολογικά χαρακτηριστικά των θαλάσσιων θηλαστικών, όπως η μεγάλη διάρκεια ζωής, το χαμηλό αναπαραγωγικό δυναμικό και οι μικροί πληθυσμοί, τα καθιστούν ιδιαίτερα ευάλωτα σε ανθρωπογενείς επιπτώσεις. Όπως στην περίπτωση των ψαριών, έτσι και στα θηλαστικά, η πλειονότητα των επιπτώσεων αποδίδονται στις εργασίες εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και σε μικρότερο βαθμό στην αυξημένη παρουσία μηχανοκίνητων σκαφών. Ο θόρυβος που προκαλείται κατά την κρούση για την έμπηξη της μονοπάσσας της θεμελίωσης (pile drivers), εκτοπίζει με άμεσο τρόπο θηλαστικά όπως οι φώκιες (*Phoca vitulina* & *Halichoerus grypus*), οι φώκαινες (*Phocoena phocoena*) και τα δελφίνια (*Tursiops truncatus*). Η ζώνη επίδρασης των προαναφερθέντων ειδών, εκτείνεται σε απόσταση έως και 20 χιλιόμετρα περιμετρικά του εργοταξίου και η προσωρινή μετατόπιση που υφίστανται, εκτιμάται από 40 έως και 50 χιλιόμετρα για θηλαστικά όπως η γκριζα φώκια και το ρινοδέλφινο αντίστοιχα (Draget, 2016; WWF-France, 2019).

Κατά την αναζήτηση της κατάλληλης τοποθεσίας για την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, από περιβαλλοντικής σκοπιάς, προκειμένου να εκτιμηθούν οι δυνητικές επιπτώσεις στα θαλάσσια θηλαστικά, είναι σημαντικό να αξιολογούνται αθροιστικά και όχι μεμονωμένα, το σύνολο των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που εκτυλίσσονται στην υπό μελέτη περιοχή (Draget, 2016; WWF-France, 2019). Μια πολύ ενδιαφέρουσα μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη Δανία, προκειμένου να προβλεφθεί η επίδραση των ανεμογεννητριών, της ναυτιλίας και της αλιείας στους πληθυσμούς της φώκαινας (*Phocoena phocoena*), αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα που προσομοιώνει τη γέννηση, την ανάπτυξη, την κίνηση και το θάνατο της κάθε φώκαινας ξεχωριστά. Μολονότι καμιά από τις παραπάνω δραστηριότητες δεν είχε σημαντικές επιπτώσεις στο επίπεδο του πληθυσμού όταν εξετάστηκαν μεμονωμένα, υπήρξε μεγάλη μείωση του πληθυσμού όταν εξετάστηκαν συνδυαστικά, καταδεικνύοντας τη σημασία που έχει η εκτίμηση του σωρευτικού αντίκτυπου των διαφόρων ανθρωπινων δραστηριοτήτων (Danish Energy Agency [DEA], 2013).

Ο χώρος της Μεσογείου, περιλαμβάνει μερικές από τις πιο πολυσύχναστες θαλάσσιες οδούς στον κόσμο. Έτσι, ενώ ορισμένες τοποθεσίες διαθέτουν υψηλό αιολικό δυναμικό και ενδείκνυται για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων (π.χ. Κόλπος του Λέοντα ή Βόρεια Αδριατική θάλασσα), εκτίθενται σε υψηλή συμφόρηση πλοίων και έντονη αλιευτική δραστηριότητα, γεγονός που ενδέχεται να ενέχει σημαντικό κίνδυνο για τα θαλάσσια θηλαστικά (WWF-France, 2019). Η Μεσογειακή φώκια (*Monachus monachus*), αποτελεί ένα από τα σπανιότερα θηλαστικά της Ευρώπης, έχοντας απομείνει 600 περίπου ζώα σε ολόκληρο τον κόσμο. Η Γυάρος, ένα κυκλαδίτικο νησί που βρίσκεται μεταξύ της Άνδρου, της Σύρου και της Κέας, φιλοξενεί το 12% του παγκόσμιου πληθυσμού της Μεσογειακής φώκιας. Δεδομένου της κρισιμότητας της κατάστασης και την πρόσθετη απειλή που υφίστανται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (ρύπανση, όχληση, αλιεία), η Γυάρος εντάχθηκε το 2011 στο πανευρωπαϊκό δίκτυο προστατευόμενων περιοχών Natura 2000, προκειμένου να περιοριστούν οι πιέσεις που δέχονται αυτά τα θηλαστικά (Φώκια, n.d.).

3.3. Εκπομπές θορύβου

Το τίμημα της τεχνολογικής ανάπτυξης είναι ιδιαίτερα μεγάλο στο όργανο της ακοής -το αυτί- καθώς τα επίπεδα του θορύβου στη σημερινή βιομηχανική κοινωνία είναι πολύ υψηλότερα σε σχέση με το παρελθόν. Παρά την αξιοσημείωτη πρόοδο που έχει επιφέρει η αιολική βιομηχανία στη μείωση των προκαλούμενων θορύβων των σύγχρονων εμπορικών μηχανημάτων, ο θόρυβος εξακολουθεί να είναι ένα κρίσιμο ζήτημα για τις τοπικές κοινότητες και τις αρμόδιες αρχές, επηρεάζοντας την έγκριση κατασκευής νέων χερσαίων έργων αιολικής εκμετάλλευσης (Kaldellis et al., 2016). Αρκετές είναι οι περιπτώσεις, που σημειώθηκαν έντονες αντιδράσεις από κατοίκους που βρισκόταν έως και 1900 μέτρα μακριά από εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης, κυρίως κατά τις νυχτερινές ώρες. Κατά ομολογία τους, οι περισσότεροι από αυτούς ήταν ενοχλημένοι κυρίως από το θόρυβο των εν λειτουργία ανεμογεννητριών, παρά από το θόρυβο των μεταφορών (Dai et al., 2015).

Με τον όρο θόρυβος, νοείται κάθε ανεπιθύμητος ή δυσάρεστος ήχος. Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι θορύβου που παράγονται από τις ανεμογεννήτριες, ο τονικός θόρυβος και ο ευρωζωνικός θόρυβος. Ο θόρυβος δεν είναι ένας σταθερός ήχος και χαρακτηρίζεται από τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται

κατά την πάροδο τού χρόνου. Συχνά, η ηχητική ενέργεια που προκαλείται από μια εκπομπή θορύβου, κατανέμεται σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων (ευρυζωνικός θόρυβος). Ο ευρυζωνικός θόρυβος, ένα τυχαίο μη περιοδικό σήμα με συχνότητα μεγαλύτερη των 100 Hz, προέρχεται κυρίως κατά τη ροή του αέρα κατά μήκος της επιφάνειας του πτερυγίου ή την αλληλεπίδραση των πτερυγίων με τις ταραχώδεις ροές του αέρα. Ωστόσο, μερικές φορές μια πηγή θορύβου, εκπέμπει θόρυβο που συγκεντρώνεται σε ένα στενό τμήμα του φάσματος ή περιέχει ένα υψηλό ποσοστό ενέργειας σε μία μόνο συχνότητα. Αυτό αναφέρεται ως τονικός θόρυβος. Ο τονικός θόρυβος, θεωρείται ότι είναι πιο αισθητός και πιο ενοχλητικός από έναν ευρυζωνικό θόρυβο αντίστοιχης έντασης. Συνήθως προκαλείται από πηγές που αποτελούνται από κινούμενα μέρη, που περιστρέφονται ή δονούνται σε μία δεδομένη ακουστική συχνότητα, όπως κινητήρες, συμπιεστές, μετασχηματιστές. Τονικός θόρυβος δύναται να προκληθεί και από τις ασταθείς ροές του ανέμου πάνω από οπές, σχισμές ή το αμβλύ άκρο του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας.

Ο θόρυβος των ανεμογεννητριών, επίσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στον αεροδυναμικό θόρυβο και στο μηχανικό θόρυβο. Ο αεροδυναμικός θόρυβος σχετίζεται με την αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων. Περιέχει ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών συχνοτήτων και συχνά χαρακτηρίζεται ως ευρυζωνικός θόρυβος. Ο αεροδυναμικός θόρυβος αποτελείται από το θόρυβο περιστροφής και το θόρυβο τύρβης. Η στάθμη του θορύβου περιστροφής αυξάνεται με τη διάμετρο του δρομέα, τη μείωση του αριθμού των πτερυγίων, τη μεγαλύτερη ταχύτητα των ακροπτερυγίων και την αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων. Ο θόρυβος τύρβης, προκαλείται από την ταραχώδη ροή στο χείλος εκφυγής των ακροπτερυγίων, αλλά και από την τυρβώδη ροή του ανέμου στο χώρο, πίσω από το δρομέα της ανεμογεννήτριας. Καθώς οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες μπορούν να προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του ανέμου, ο θόρυβος που προκαλείται, είναι κάθετος στην επιφάνεια περιστροφής και μπορεί να διαχέεται προς διάφορες κατευθύνσεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (Dai et al., 2015). Ο αεροδυναμικός θόρυβος με την πάροδο των χρόνων έχει περιοριστεί σημαντικά μέσω της βελτιωμένης αεροδυναμικής σχεδίασης των πτερυγίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ανεμογεννήτριες νέα γενιάς, που προκαλούν αεροδυναμικό θόρυβο έντασης μικρότερης από το 10% της έντασης που παρήγαγαν οι ανεμογεννήτριες που κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, ακόμα αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού θορύβου. Από την άλλη πλευρά, ο μηχανικός θόρυβος προέρχεται από τα εσωτερικά γρανάζια του κιβωτίου ταχυτήτων, τη γεννήτρια, τους μετασχηματιστές και άλλα βοηθητικά μέρη. Είναι ιδιαίτερα οχληρός και εριστικός, ειδικά σε ανεμογεννήτριες χωρίς επαρκή μόνωση. Σε αντίθεση με τον αεροδυναμικό θόρυβο, η ένταση του μηχανικού θορύβου δεν εξαρτάται από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και μπορεί να περιοριστεί σημαντικά μέσω της κατάλληλης μόνωσης και της χρήσης αντικραδασμικών πελμάτων. Ο συνολικός θόρυβος, μετρούμενος σε στάθμη ηχητικής πίεσης dBA, είναι συνδυασμός των μηχανικών και αεροδυναμικών θορύβων (Dai et al., 2015).

Πρόσφατες μελέτες που διενεργήθηκαν σε διάφορες εγκαταστάσεις αιολικής εκμετάλλευσης, έδειξαν ότι η στάθμη ηχητικής πίεσης σε απόσταση 40 μέτρων από μια μόνο ανεμογεννήτρια, μπορεί να κυμαίνεται από 50 dBA έως 60 dBA. Όπως είναι λογικό, το επίπεδο θορύβου σχετίζεται άμεσα και με τον αριθμό των ανεμογεννητριών που βρίσκονται σε λειτουργία. Για παράδειγμα, η στάθμη ηχητικής πίεσης σε μια κατοικία που βρίσκεται σε απόσταση 500 μέτρων από μια μόνο ανεμογεννήτρια,

κυμαίνεται συνήθως από 25 έως 35 dBA. Στην ίδια απόσταση, το επίπεδο θορύβου που προκαλείται κατά τη λειτουργία 10 ανεμογεννητριών, μπορεί να κυμαίνεται από 35 dBA έως 40 dBA (Dai et al., 2015). Οι μοναδικές μετεωρολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής, τα εμπόδια που παρεμβάλλονται ή ακόμα και τα υλικά που συνθέτουν τη μορφολογία του εδάφους, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τα επίπεδα θορύβου και δύνανται να συμβάλλουν στη διάδοση ή την εξασθένηση του. Με βάση αυτά τα κριτήρια, καθορίζεται η ενδεδειγμένη απόσταση μεταξύ του αιολικού πάρκου και της πλησιέστερης κατοικημένης περιοχής. Τώρα, η αντίληψη του θορύβου, εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους όπως ο τύπος της περιοχής, ο αριθμός των κατοίκων, η απόσταση από το χώρο του αιολικού πάρκου, η οπτική επαφή με το αιολικό πάρκο και ο τύπος της κοινότητας που επηρεάζεται (οικιστική, βιομηχανική, τουριστική). Η αλληλεπίδραση αυτών των παραγόντων, συντελεί στο είτε να μειώσει, είτε να ενισχύσει την αντίληψη του θορύβου που προκαλείται από τις ανεμογεννήτριες. Ενώ ο θόρυβος εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό κριτήριο χωροθέτησης για τα χερσαία αιολικά πάρκα, οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις ουδέποτε αποτέλεσαν ζήτημα για τον τοπικό πληθυσμό. Λόγω του ότι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα βρίσκονται πολύ πιο μακριά από τις κατοικημένες περιοχές (συνήθως σε απόσταση μεγαλύτερη του 1 km), η αντίληψη του θορύβου κυμαίνεται σαφώς σε μικρότερα επίπεδα, καθιστώντας έτσι τη στάση του πληθυσμού πιο θετική (Kaldellis et al., 2016).

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας είναι ο θόρυβος βάθους (background noise). Ο θόρυβος βάθους, είναι κατά μια έννοια ο παρασκηνιακός θόρυβος, δηλαδή ο συνολικός θόρυβος που επικρατεί στο ευρύτερο περιβάλλον όταν η εξεταζόμενη ηχητική πηγή δεν λειτουργεί. Τη νύχτα, οι ήχοι μπορούν να γίνονται αντιληπτοί με διαφορετικό τρόπο. Σύμφωνα με τον Van Den Berg, κατά τη διάρκεια μιας σχετικά ήσυχης νύχτας, ένα άτομο που ζει 1,5 χιλιόμετρο μακριά από ένα αιολικό πάρκο αντιλαμβάνεται το θόρυβο των ανεμογεννητριών ως ένα “ατελείωτο τρένο” (Dai et al., 2015). Ωστόσο, εάν το αιολικό πάρκο βρισκόταν κοντά σε παραθαλάσσια ακτή, οι περιβάλλοντα θόρυβοι των κυμάτων και του ανέμου θα κάλυπταν ως ένα βαθμό το θόρυβο των ανεμογεννητριών με αποτέλεσμα να μην γίνεται εύκολα διακριτός και κατά επέκταση ενοχλητικός. Επομένως, κατά την ανάλυση του θορύβου, η μετρούμενη στάθμη ηχητικής πίεσης των ανεμογεννητριών, θα πρέπει να διαχωρίζεται από το θόρυβο βάθους της περιοχής (Dai et al., 2015; Kaldellis et al., 2016). Για το μετριασμό των επιπτώσεων, οι αρμόδιες αρχές ορίζουν ως μέτρο πρόληψης μια ελάχιστη απόσταση που θα πρέπει να παρεμβάλλεται μεταξύ των αιολικών πάρκων και των ενδιαιτημάτων, τα όρια των οποίων συνήθως ποικίλουν ανάλογα τη χώρα. Παρακάτω, στον Πίνακα 7, ενδεικτικά αναγράφονται τα επιτρεπτά όρια (ελάχιστες αποστάσεις) που έχουν θεσπίσει διάφορες χώρες, για μικρές και μεγάλες ανεμογεννήτριες. Ορισμένες από αυτές τις τιμές παρουσιάζονται ως εύρος, δεδομένου ότι σε μερικές χώρες τα επιτρεπτά όρια διαφέρουν ανάλογα την περιοχή.

Μια άλλη προσέγγιση για τον έλεγχο της στάθμης θορύβου, είναι ο καθορισμός μιας ανώτερης οριακής τιμής dBA, που επιτρέπεται να ακουστεί στην πλησιέστερη κατοικημένη περιοχή. Ενδεικτικά, στη Δανία, στην Ολλανδία και στη Σουηδία, το επιτρεπόμενο όριο είναι τα 40 dBA ενώ στις ΗΠΑ κυμαίνεται από 36 dBA έως 55 dBA ανάλογα την πολιτεία (Dai et al., 2015). Στην Ελλάδα, παρά το γεγονός ότι η ελληνική νομοθεσία δεν επιβάλλει επιτρεπόμενο όριο θορύβου ειδικά για τις ανεμογεννήτριες, ορίζει τη μέγιστη επιβάρυνση από σταθερές μηχανολογικές εγκαταστάσεις πάσης

φύσεως, για τις κατοικημένες περιοχές, σε 50 dBA ανεξαρτήτως ώρας και ημέρας (Παπασταματίου et al., 2009).

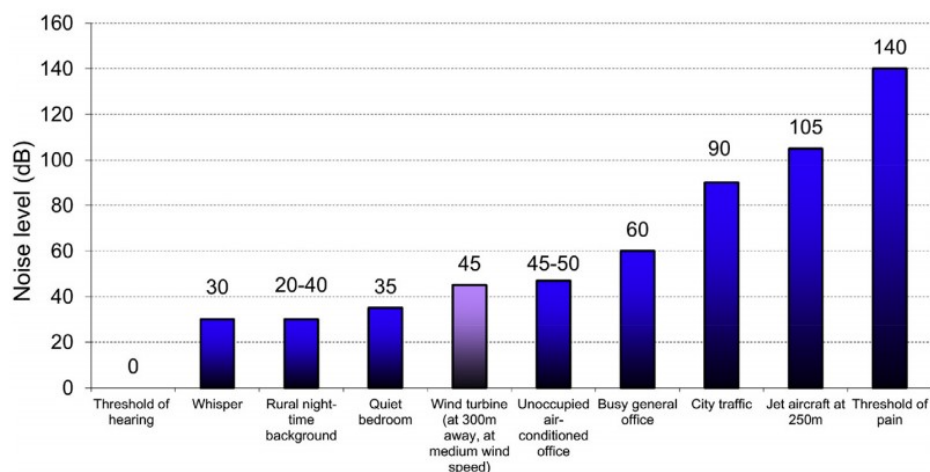
Πίνακας 7. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του αιολικού πάρκου και της πλησιέστερης κατοικημένης περιοχής, ανάλογα το μέγεθος των ανεμογεννητριών, για διάφορες χώρες της Ευρώπης. Πηγή: Dalla Longa et al., 2018. Ιδία επεξεργασία

Country	Small Wind Turbine [m]	Large Wind Turbine [m]
Austria	800-1200	800-1200
Belgium	400-600	400-600
Cyprus	500	500
Denmark	600	600
Finland	1000	1000
France	500	500
Germany	200-1000	500-1250
Greece	500	500
Iceland	120	500
Italy	200	750
Luxembourg	120	500
Netherlands	400	400
Norway	120	500
Poland	550	1250
Portugal	120	500
Romania	500	500
Serbia	120	500
Spain	500	500
Sweden	1000	1000
Switzerland	120	500
United Kingdom	500-1000	500-2000

Εφόσον ο ήχος δεν είναι ένα σταθερό μέγεθος αλλά μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο, οι ερευνητές δημιούργησαν ορισμένους δείκτες, προκειμένου μέσω μετρήσεων να αποτυπώσουν το μοτίβο που παρουσιάζει ο θόρυβος κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Ο γενικός δείκτης περιβαλλοντικού θορύβου L_n , είναι η στάθμη την οποία υπερβαίνει ο θόρυβος, για ποσοστό $n\%$ μιας ορισμένης χρονικής περιόδου. Οι πιο διαδεδομένοι δείκτες L_n , είναι οι L_{10} , L_{50} και L_{90} . Ουσιαστικά, πρόκειται για στατιστικά επίπεδα θορύβου που χρησιμοποιούνται για να αξιολογηθούν τα επίπεδα ηχητικής πίεσης που προκαλούνται από τις μεταβαλλόμενες πηγές θορύβου. Συγκεκριμένα, ο δείκτης L_{50} ή αλλιώς μέση στάθμη, αποτελεί μια μέση τιμή ενός μεγάλου όγκου μετρήσεων, και υποδεικνύει τη στάθμη που έχει υπερβεί ο θόρυβος, στο 50% του χρόνου παρατήρησης. Η τιμή L_{10} γνωστή και ως

στάθμη κορυφής, υποδηλώνει τη στάθμη που ξεπεράστηκε κατά το 10% του χρόνου παρατήρησης. Αντίστοιχα, η τιμή L90 υποδηλώνει τη στάθμη που ξεπεράστηκε κατά το 90% του χρόνου παρατήρησης. Συνήθως, η τιμή L90 αντιπροσωπεύει το επίπεδο θορύβου που μπορεί να ακούσει κάποιος αργά το βράδυ ή τη νύχτα. Έτσι, πολλές φορές για την επιβολή ορίων χρησιμοποιείται ευρέως η τιμή L90, υποδηλώνοντας πως τα επίπεδα ηχητικής πίεσης που προκαλούνται από την εξεταζόμενη πηγή (ανεμογεννήτριες), δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν σημαντικά τα επίπεδα του θορύβου βάθους (θόρυβος του τοπικού περιβάλλοντος), δηλαδή να μην αποτελούν ένα ήχο διακριτό και κατά επέκταση αισθητό. Ακόμα, επειδή το ανθρώπινο αυτί έχει διαφορετική ευαισθησία στις διάφορες συχνότητες, για τον προσδιορισμό του περιβαλλοντικού θορύβου χρησιμοποιείται η κλίμακα A, που δίνει έμφαση σε συχνότητες κοντά στα 2.000 Hz. Για αυτό το λόγο, το επίπεδο θορύβου είθισται να εκφράζεται σε dBA ή dB(A). (Παπασταματίου et al., 2009; *Ln values what are they and how are they used*, 2018). Σε αρκετές χώρες, τα επιτρεπόμενα όρια θορύβου, εκφράζονται με τη βοήθεια του δείκτη L90. Στη Γαλλία και την Αυστραλία, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ορίζεται ως L90 + 5 dBA (Dai et al., 2015).

Η έκθεση σε ήχους υψηλής συχνότητας, είναι ικανή να επιφέρει πονοκεφάλους, ευερεθιστότητα, αίσθημα έντονης κόπωσης, συστολή αρτηριών, εξασθένηση του ανοσοποιητικού συστήματος αλλά και να προκαλέσει αρνητικές υποκειμενικές επιπτώσεις, όπως ενόχληση ή δυσαρέσκεια. Μελέτες έχουν δείξει πως η διαταραχή του ύπνου λόγω του θορύβου των ανεμογεννητριών, μακροπρόθεσμα μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας. Ωστόσο, οι ανεμογεννήτριες ως μηχανές, θεωρούνται σχετικά αθόρυβες και σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να συγκριθούν με τη στάθμη θορύβου αντίστοιχων συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας. Στο Σχήμα 14, παρουσιάζονται τα επίπεδα ακουστικής πίεσης που προκαλούν διάφορες πηγές, προκειμένου να γίνει αντιληπτό που κατατάσσονται οι ανεμογεννήτριες ως πηγή θορύβου.



Σχήμα 14. Στάθμη θορύβου διαφόρων ηχητικών πηγών. Πηγή: Kaldellis et al., 2016.

3.4. Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές

Κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας για την ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου, σίγουρα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι δυνητικές ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις. Είναι γεγονός πως η παρουσία ενός αιολικού πάρκου κοντά σε πομπούς ή δέκτες τηλεπικοινωνιών, ενδέχεται να προκαλέσει παρεμβολές στα μεταδιδόμενα σήματα. Ο αντίκτυπος αυτών των παρεμβολών στις υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνιών, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τη ζώνη συχνοτήτων, τη διαμόρφωση του σήματος (πλάτος, γωνία) και το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας (radiation pattern). Οι υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνιών που φαίνεται να είναι περισσότερο ευαίσθητες στην παρουσία ανεμογεννητριών, είναι τα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, τα μετεωρολογικά ραντάρ, τα συστήματα αεροναυτιλίας και οι υπηρεσίες ραδιοηλεκτρονικών μεταδόσεων. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να προβλεφθούν οι πιθανές επιπτώσεις στις υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνιών πριν την κατασκευή του αιολικού πάρκου. Οι εκ των υστέρων διορθωτικές κινήσεις, είναι συνήθως τεχνικά πολύπλοκες και οικονομικά ασύμφορες. Τα προληπτικά μέτρα εστιάζουν κυρίως στον επανασχεδιασμό της εγκατάστασης, δηλαδή την αλλαγή θέσης μιας ανεμογεννήτριας ή τη διαμόρφωση ενός αιολικού πάρκου με ανεμογεννήτριες διαφορετικών διαστάσεων, στη χάραξη ζωνών ασφαλείας ή και στην υιοθέτηση εναλλακτικών λύσεων για τις υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνιών, φερειπείν νέες θέσεις πομπών.

Γενικά το ραντάρ, είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό σύστημα ανίχνευσης, εντοπισμού και αναγνώρισης αντικειμένων-στόχων, το οποίο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά σήματα προς διάφορες κατευθύνσεις και έπειτα λαμβάνει τα επιστρεφόμενα σήματα που ανακλάστηκαν από τα αντικείμενα-στόχους. Διαθέτει έναν πομπό για την παραγωγή σήματος υψηλής συχνότητας, μια κεραία για την αποστολή του σήματος και έναν δέκτη για την ανίχνευση του σήματος που επιστρέφει από το στόχο. Η κεραία του ραντάρ συνήθως περιστρέφεται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα, σαρώνοντας τον ορίζοντα προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα περισσότερα ραντάρ είναι εξοπλισμένα και με δυνατότητα Doppler προκειμένου πέρα από τον εντοπισμό και την αναγνώριση του στόχου, να μετρούν επίσης την ταχύτητα που κινείται προς ή μακριά από το ραντάρ. Υπάρχουν διάφορα είδη ραντάρ ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν. Καθένα από αυτά έχει σχεδιαστεί για να ανιχνεύει ένα συγκεκριμένο είδος στόχου και διαθέτει διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά (ζώνες συχνοτήτων, εύρη λειτουργιών). Συνήθως τα μετεωρολογικά ραντάρ λειτουργούν σε συχνότητες που κυμαίνονται από τη ζώνη S (2,0-4,0 GHz) έως τη ζώνη X (8,0-12,0 GHz), ενώ τα ραντάρ εναέριου ελέγχου από τη ζώνη L (1,0-2,0 GHz) έως τη ζώνη S (2,0-4,0 GHz) (Angulo et al., 2014).

Ουσιαστικά, οι ανεμογεννήτριες αποτελούν τεράστιοι ανακλαστήρες με διαστάσεις συνήθως πολύ μεγαλύτερες από τα αντικείμενα που στοχεύουν τα ραντάρ και ως εκ τούτου, η παρουσία τους είναι ικανή να αποκρύπτει τα ασθενέστερα σήματα των μικρότερων στόχων. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να προκαλέσει ένα σκεδαζόμενο σήμα δυναμικής φύσης, το οποίο τόσο το πλάτος όσο και η συχνότητα του, εξαρτώνται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Ορισμένοι παράγοντες είναι σταθεροί, όπως οι διαστάσεις και τα υλικά της ανεμογεννήτριας ή και η απόσταση που απέχει από τον πομπό, ενώ άλλοι μεταβάλλονται στο χρόνο (προσανατολισμός της ατράκτου, ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων). Επιπλέον, είναι συχνό φαινόμενο τα περιστρεφόμενα πτερύγια να προκαλούν κάποιου είδους παρεμβολή στη λειτουργία Doppler (μεταβολή της συχνότητας του ανακλώμενου σήματος) παραπλανώντας τα ραντάρ. Δεδομένου ότι τα τρέχοντα ραντάρ δεν είναι σχεδιασμένα για να

εντοπίζουν και να φιλτράρουν τα σήματα που προέρχονται από τις ανεμογεννήτριες, μπορεί να χαθούν σημαντικές πληροφορίες στο περιβάλλον ενός αιολικού πάρκου ή να προκληθούν εσφαλμένες ενδείξεις. Αυτά τα σφάλματα, κατά κύριο λόγο αποδίδονται σε ανεπιθύμητες επιστροφές του σήματος, σε φραγμό του σήματος (πίσω από την ανεμογεννήτρια δημιουργείται μια νεκρή ζώνη) και φυσικά στην παρεμβολή της λειτουργίας Doppler.

Ο φραγμός του σήματος (radar beam blocking), συμβαίνει όταν το ραντάρ εκπέμπει προς την κατεύθυνση της ανεμογεννήτριας και όταν υπάρχει άμεση οπτική επαφή μεταξύ τους. Σε περίπτωση που το σώμα της ανεμογεννήτριας αποκλείει έστω και ένα μέρος της δέσμης του ραντάρ, η παρεμπόδιση αυτή, είναι ικανή να οδηγήσει σε εσφαλμένες ενδείξεις. Τα τυπικά μετεωρολογικά ραντάρ εκπέμπουν το σήμα σε ένα πολύ περιορισμένο φάσμα, χρησιμοποιώντας κεραίες με “άνοιγμα” δέσμης 1°-2°. Καθώς η δέσμη απομακρύνεται από το ραντάρ, το “άνοιγμα” της προοδευτικά αυξάνει. Το τμήμα της δέσμης που φράζεται από μια ανεμογεννήτρια, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το ύψος του εδάφους, τη θέση του ραντάρ και της ανεμογεννήτριας, τη μεταξύ τους απόσταση, το μέγεθος της ανεμογεννήτριας, τον όγκο που καταλαμβάνει η δέσμη σάρωσης και από τη γωνία ανύψωσης της δέσμης. Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός, προτείνει ως μέγιστη αποδεκτή τιμή φραγμού, το 10% του συνολικού τμήματος της δέσμης σάρωσης. Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες βασίζονται σε αυτό το όριο, αν και υπάρχουν χώρες που χρησιμοποιούν πιο αυστηρούς περιορισμούς όπως το Ηνωμένο βασίλειο (1% μέγιστος φραγμός δέσμης) ή η Σουηδία (2% ο μέγιστος φραγμός δέσμης). Άλλες χώρες όπως η Γερμανία και η Δανία εφαρμόζουν μια πιο γενικευμένη προσέγγιση, τηρώντας μια ελάχιστη απόσταση που θα πρέπει να μεσολαβεί μεταξύ του ραντάρ και των ανεμογεννητριών (Angulo et al., 2014; Radio Advisory Board of Canada [RABS] & Canadian Wind Energy Association [CanWEA], 2009).



Εικόνα 18. Ο φραγμός του σήματος (κόκκινο χρώμα) που προκαλείται στο πίσω μέρος της ανεμογεννήτριας. Πηγή: Angulo et al., 2014.

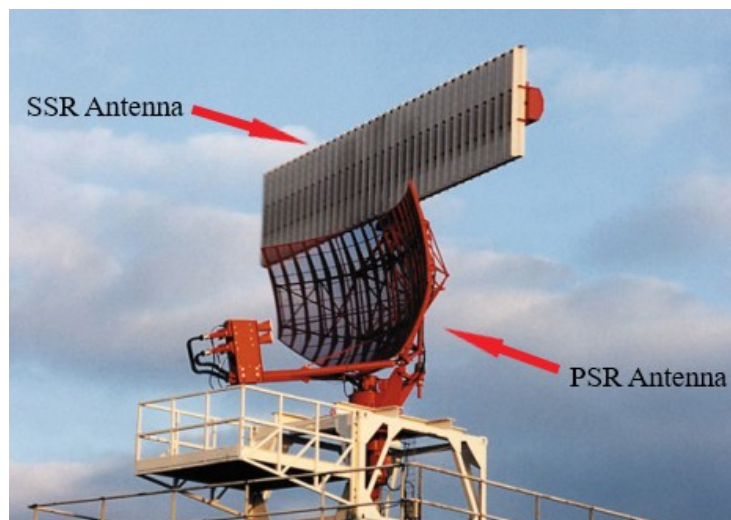
Οι ανεπιθύμητες επιστροφές (clutter), συμβαίνουν όταν το ανακλώμενο προσπίπτον σήμα που προέρχεται από την ανεμογεννήτρια, φτάνει στο ραντάρ με μεγαλύτερη ισχύ από την ευαισθησία του

ραντάρ ή με μεγαλύτερη ισχύ από εκείνη που απαιτείται για την ανίχνευση του στόχου. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό, σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να αγνοείται η επίδραση των ανεμογεννητριών στα επίπεδα των ανεπιθύμητων επιστροφών, σε αποστάσεις έως και 15 km για ραντάρ ζώνης C (4,0-8,0 GHz) και σε αποστάσεις τουλάχιστον 30 km για ραντάρ ζώνης S (2,0-4,0 GHz). Εντός αυτών των περιοχών, τα επίπεδα των ανεπιθύμητων επιστροφών θα πρέπει να υπολογίζονται ως συνάρτηση των προδιαγραφών του εκάστοτε ραντάρ (συχνότητα λειτουργίας, διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, εσωτερικές απώλειες) και των χαρακτηριστικών της εκάστοτε ανεμογεννήτριας (απόσταση από το ραντάρ, RCS) (Angulo et al., 2014). Η ενεργός επιφάνεια Radar (Radar Cross Section – RCS), ουσιαστικά πρόκειται για την ηλεκτρομαγνητική υπογραφή ενός αντικειμένου και σχετίζεται αποκλειστικά από τα γεωμετρικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Το RCS μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από τις διαστάσεις και από τα υλικά που έχει κατασκευαστεί, αλλά και από την ταχύτητα των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Ενδεικτικά, μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1,5 MW έχει μεγαλύτερο RCS, από το αντίστοιχο ενός μεγάλου επιβατηγού αεροσκάφους τύπου Boeing 747 (Department of Defence [DoD], 2006; Environment and Climate Change Canada's [ECCC], 2018). Τα περισσότερα σύγχρονα ραντάρ, διαθέτουν τεχνικές επεξεργασίας των σημάτων περιορίζοντας αρκετά τις επιπτώσεις των ανεπιθύμητων επιστροφών. Ωστόσο, οι ανεπιθύμητες επιστροφές αποτελούν μια από τις σημαντικότερες πηγές αύξησης του “θορύβου” του ραντάρ, υποβαθμίζοντας την ικανότητα ανίχνευσης και κατά επέκταση την ποιότητα των δεδομένων που λαμβάνονται από το ραντάρ (Angulo et al., 2014).

Η λειτουργία Doppler επικεντρώνεται στην ανίχνευση της κίνησης ενός στόχου. Όταν ο στόχος πλησιάζει προς το ραντάρ, η απόσταση ελαττώνεται, η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του εκφράζεται ως αρνητική και η μεταβολή της συχνότητας του ανακλώμενου σήματος είναι θετική. Αντίστοιχα, όταν ο στόχος απομακρύνεται από το ραντάρ, η μεταξύ τους απόσταση αυξάνεται, η ταχύτητα εκφράζεται με θετικό πρόσημο και η μεταβολή της συχνότητας του ανακλώμενου παλμού είναι αρνητική. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο με χρήση υλικών FRP-GRP (πολυεστερικές ρητίνες με ίνες γυαλιού) και στην επιφάνεια τους διαθέτουν μεταλλικά ένθετα με εσωτερική καλωδίωση για αντικεραυνική προστασία, καθώς και εσωτερικούς αποσβεστήρες προκειμένου να περιοριστούν οι κραδασμοί και οι δονήσεις. Τα εν λόγω μεταλλικά στοιχεία των πτερυγίων, λειτουργούν ως δευτερεύουσες πηγές ανάκλασης των προσπίπτουσων σημάτων. Επιπλέον, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών συνήθως περιστρέφονται με 10 έως 20 στροφές ανά λεπτό και τα άκρα των πτερυγίων αποκτούν ταχύτητα που κυμαίνεται από 40 έως 80 m/s. Τα άκρα των πτερυγίων κινούνται με ταχύτητα που εμπίπτει στο εύρος ταχυτήτων ορισμένων αεροσκαφών, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ψευδής ενδείξεις στο ραντάρ τα οποία ανιχνεύουν κινούμενο στόχο σημαντικού μεγέθους (DoD, 2006). Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός και οι Ευρωπαϊκές Εθνικές Μετεωρολογικές Υπηρεσίες (EUMETNET), θεωρούν πως η επίδραση των ανεμογεννητριών στη λειτουργία Doppler, είναι η πλέον κρίσιμη για τα μετεωρολογικά ραντάρ. Για αυτό το λόγο, έχουν ορίσει “αποστάσεις αποκλεισμού”, εντός των οποίων θα πρέπει να αποφεύγεται η εγκατάσταση αιολικών πάρκων και “αποστάσεις συντονισμού”, εντός των οποίων θα πρέπει να διεξαχθούν προκαταρκτικές μελέτες και λεπτομερείς αναλύσεις. Συγκεκριμένα, η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, θα πρέπει να αποφεύγεται σε περιοχές κάτω των 5 km και 10 km για ραντάρ που λειτουργούν σε ζώνη συχνοτήτων C και S αντίστοιχα, και να πραγματοποιείται κατόπιν συντονισμού

με τους αρμόδιους χειριστές των μετεωρολογικών ραντάρ σε αποστάσεις έως 20 km ή 30 km (για ραντάρ ζώνης C και S, αντίστοιχα). Η απόσταση των 30 km, ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τη μέγιστη απόσταση ανίχνευσης που είναι ικανό να εκτελέσει ένα ραντάρ με λειτουργία Doppler σε συνθήκες “καθαρού ουρανού” (Angulo et al., 2014).

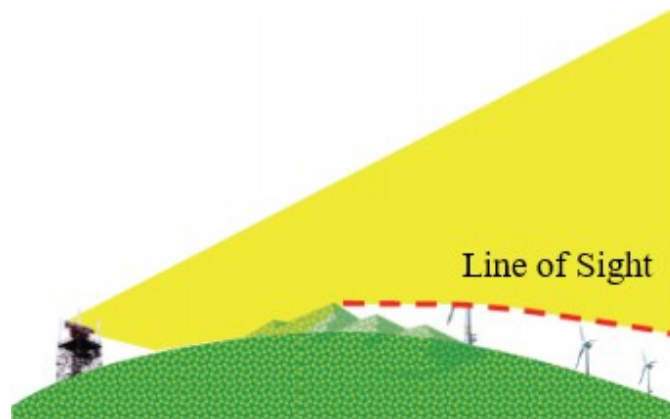
Τα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (Air Traffic Control – ATC) επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από την αύξηση των επιπέδων θορύβου του δέκτη, γεγονός για το οποίο ευθύνονται οι ανεπιθύμητες επιστροφές σημάτων (clutter). Τα υψηλά επίπεδα θορύβου είναι ικανά να μειώσουν σημαντικά την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των ραντάρ, αλλά και να υποδείξουν την ύπαρξη ψευδών στόχων. Τα ραντάρ ATC, χρησιμοποιούνται για τη συνεχή παρακολούθηση της πτητικής κατάστασης των αεροσκαφών, την αποφυγή συγκρούσεων, τον ασφαλή διαχωρισμό των ιπτάμενων μέσων και τη διατήρηση τακτικής ροής της εναέριας κυκλοφορίας. Ένα ραντάρ ATC, αποτελείται από το ραντάρ πρωτογενούς επιτήρησης (Primary Surveillance Radar - PSR) και από το ραντάρ δευτερογενούς επιτήρησης (Secondary Surveillance Radar – SSR). Τα σύγχρονα ATC ραντάρ, συνήθως προσφέρουν κάλυψη PSR έως και 96 km και κάλυψη SSR έως και 193 km (DoD, 2006).



Εικόνα 19. Τα ραντάρ εναέριου ελέγχου απαρτίζονται από το ραντάρ πρωτογενούς επιτήρησης (PSR) και από το ραντάρ δευτερογενούς επιτήρησης (SSR). Πηγή: EUROCONTROL, 2014. Ιδία επεξεργασία.

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Eurocontrol, υπεύθυνος για την Ασφάλεια της Αεροναυτιλίας, έχει δημοσιεύσει ορισμένες οδηγίες, αναφορικά με τον τρόπο που θα πρέπει να αξιολογούνται οι δυνητικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών στα ATC ραντάρ. Ουσιαστικά, ταξινομεί την υπό ανάλυση περιοχή σε τέσσερις διακριτές ζώνες, που η κάθε μια διαθέτει διαφορετικό ποσοστό επίδρασης και εντός της οποίας θα πρέπει να διεξάγονται διαφορετικές διεργασίες ανάλυσης και για τους δύο τύπους ραντάρ (PSR, SSR) (Angulo et al., 2014; EUROCONTROL, 2014).

- Ζώνη Α – Ζώνη Προστασίας (PSR, SSR): αποτελεί προστατευόμενη περιοχή ακτίνας 500 m, όπου βρίσκεται το ραντάρ ελέγχου και εντός της οποίας απαγορεύεται ρητά η εγκατάσταση ανεμογεννητριών αλλά και οποιοδήποτε άλλου εμποδίου.
- Ζώνη Β – Ζώνη Λεπτομερούς Αξιολόγησης (PSR, SSR): μετά την προστατευόμενη περιοχή ακολουθεί μια περιοχή (500 m έως 15 km για PSR και 500 m έως 16 km για SSR) εντός της οποίας, για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου, οι υπεύθυνοι της εναέριας επιτήρησης απαιτούν λεπτομερή τεχνική και επιχειρησιακή αξιολόγηση, τα αποτελέσματα των οποίων εξετάζονται και κρίνονται ως αποδεκτά από τους ίδιους. Η συγκεκριμένη ζώνη δεν αποτελεί απαγορευμένη περιοχή, αλλά υποδεικνύει τους τομείς που χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης συγκριτικά με τη Γ Ζώνη. Γενικά, μπορούν να τοποθετηθούν ανεμογεννήτριες και στις δύο ζώνες, εφόσον οι επιπτώσεις είναι περιορισμένες.
- Ζώνη Γ – Ζώνη Απλής Αξιολόγησης (PSR): είναι η περιοχή σε απόσταση άνω των 15 km αλλά εντός της οπτικής επαφής του ραντάρ (Line of Sight), όπου μια απλή αξιολόγηση των επιδόσεων του ραντάρ πρωτογενούς επιτήρησης PSR, αρκεί ώστε οι υπεύθυνοι της εναέριας επιτήρησης να μπορούν αξιολογήσουν την αίτηση εγκατάστασης ανεμογεννητριών (Εικόνα 20).
- Ζώνη Δ – Αποδεκτή Ζώνη (PSR, SSR): σε περιοχές που απέχουν ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις και είναι εκτός γραμμής ορίζοντα του ραντάρ (Line of Sight), δεν απαιτείται κανενός είδους αξιολόγηση για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων (Εικόνα 20).



Εικόνα 20. Ζώνη κάλυψης του ραντάρ συναρτήσει του ανάγλυφου και της καμπυλότητας της γης. Πηγή: DoD, 2006. Ίδια επεξεργασία

3.5. Αισθητικές επιπτώσεις – Οπτική όχληση – Αλλοίωση τοπίου

Ο οπτικός αντίκτυπος, θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα αρνητικά χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας και συχνά, αποτελεί πεδίο αντιπαράθεσης μεταξύ των μελών της εκάστοτε τοπικής

κοινότητας. Περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές πτυχές, την επίδραση στο τοπίο και τις αισθητικές επιπτώσεις.

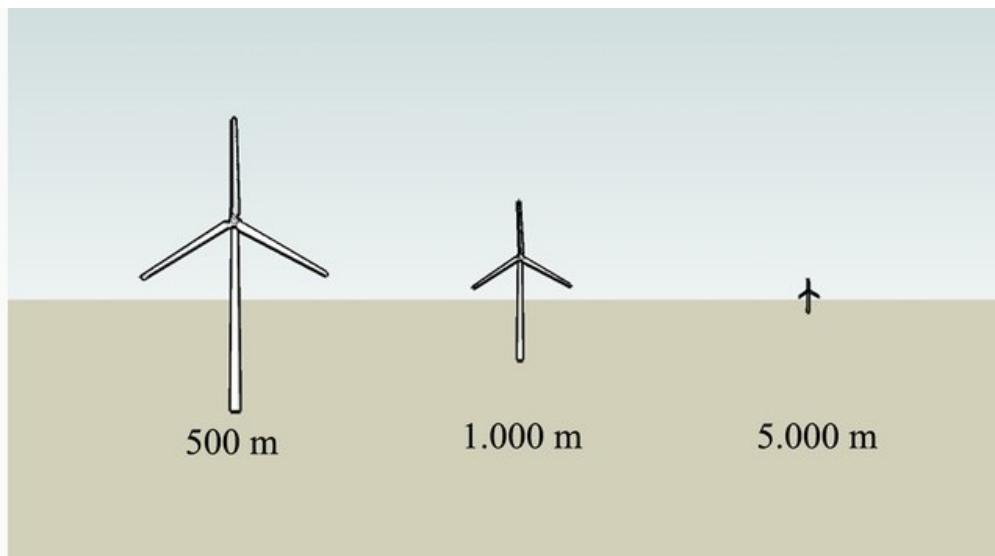
Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, προκειμένου να εκτιμηθεί και να προσδιοριστεί ποσοτικά το μέγεθος της οπτικής όχλησης, από φωτομετρία και ψηφιακές αναπαραστάσεις, έως αναλύσεις με Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems – G.I.S) (Ioannidis & Koutsoyiannis, 2020). Οι πληγείσες περιοχές, συχνά αποκαλούνται ως ζώνες οπτικών επιρροών (Zones Visual Influences – ZVIs) (Saidur et al., 2011). Όλοι οι τύποι αναλύσεων πραγματοποιούνται με μια κοινή μεθοδολογία υπολογισμού. Χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό μοντέλο ανύψωσης (Digital Elevation Model - DEM) της περιοχής, στο οποίο προσδιορίζονται οι θέσεις των αντικειμένων που προκαλούν οπτική όχληση και η ορατότητα τους υπολογίζεται ακτινικά έπειτα από προσαρμογές της οπτικής γωνίας (Radial Line of Sight) (Ioannidis & Koutsoyiannis, 2020). Η μεγαλύτερη δυσκολία στην ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων, είναι η έμφυτη υποκειμενικότητα των αναλύσεων που σχετίζονται με την αισθητική. Η θετική ή αρνητική στάση των ανθρώπων, εξαρτάται από τις ευαισθησίες που έχουν ως προς τα περιβαλλοντικά ζητήματα, τις προσωπικές τους απόψεις, ή και τη γενική τους στάση απέναντι στη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας. Αφενός, ένα μέρος του πληθυσμού αντιλαμβάνεται τις ανεμογεννήτριες ως όμορφες κατασκευές που αντικατοπτρίζει την ανθρώπινη πρόοδο και ως μια εναλλακτική λύση, που σηματοδοτεί την απαρχή της απολιγνιτοποίησης και τη στροφή της ανθρωπότητας στην πράσινη ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, οι ανεμογεννήτριες όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά από τους Ioannidis και Koutsoyiannis (2020), θεωρούνται ογκώδεις ενοχλητικές κατασκευές που αλλοιώνουν τα φυσικά και ιστορικά χαρακτηριστικά των τοπίων, μετατρέποντας τα σε βιομηχανικές ζώνες. Η αντίληψη δεν είναι αποκλειστικά συναισθηματική ούτε ορθολογική, αλλά ορίζεται σε κάθε άνθρωπο από ένα συνδυασμό διαφορετικών παραγόντων, μερικών εκ των οποίων αποδίδονται στο συναίσθημα και άλλοι στη λογική.

Ο οπτικός αντίκτυπος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Οι πιο σημαντικοί εξ αυτών, είναι το χρώμα της ανεμογεννήτριας, το επίπεδο αντίθεσης (contrast) που δημιουργεί με γνώμονα τις αποχρώσεις του τοπικού περιβάλλοντος, το μέγεθος των ανεμογεννητριών, η διάταξη των ανεμογεννητριών, ο χαρακτήρας και η αξία του τοπίου, η απόσταση που έχει από τις κατοικίες, το “τρεμόπαιγμα” των σκιών που δημιουργούν τα περιστρεφόμενα πτερύγια και η χρονική διάρκεια λειτουργίας (ή μη) της ανεμογεννήτριας (Saidur et al., 2011).

Έρευνες που διεξήχθησαν υπό τη μορφή ερωτηματολογίων, για την καταγραφή και την αξιοποίηση των απόψεων των άμεσα επηρεαζόμενων κατοίκων, έδειξαν ότι ένα αιολικό πάρκο έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο σε ανθρώπους που διαμένουν πλησιέστερα ως προς αυτό. Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων, προτιμά να αντικρίζει ανεμογεννήτριες σε ουδέτερους τόνους, μεγαλύτερες σε μέγεθος και πιο αραιά χωροθετημένες μεταξύ τους. Γενικά, το ευρύ κοινό, φαίνεται να υποστηρίζει την αιολική ενέργεια και τον κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι περισσότερες αντιδράσεις εντοπίζονται σε κατοίκους όπου γεννήθηκαν και μεγάλωσαν στις υπό μελέτη περιοχές, και φαίνεται να είναι πιο “εξαρτημένοι” με τον αναλλοίωτο χαρακτήρα και την επιβλητική διάσταση του φυσικού τοπίου. Ωστόσο, ακόμα και οι ίδιοι (στην πλειοψηφία τους) αναγνωρίζουν πως πρόκειται για έργα που θα

ήταν ωφέλιμα ως προς την κοινωνία. Αυτή η αντίθεση συχνά αποκαλείται ως σύνδρομο Non-In-My-Back-Yard (NIMBY). Η βασική ιδέα του συνδρόμου NIMBY, είναι ότι οι άνθρωποι αν και τείνουν να υποστηρίζουν την αιολική ενέργεια σε θεωρητικό επίπεδο, φοβούμενοι τις αρνητικές επιπτώσεις που μπορούν να προκληθούν, τελικά αντιτίθεται στην υλοποίηση τέτοιων έργων (Dai et al., 2015). Σπουδαίο ρόλο διαδραματίζουν οι τοπικοί φορείς και οι αρμόδιες αρχές, αφού η στάση τους πολλές φορές καθορίζει σε μεγάλο βαθμό, τη στάση του κοινού απέναντι σε ένα έργο αιολικής εκμετάλλευσης.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μέγιστη απόσταση κατά την οποία μπορεί να γίνει αντιληπτή η ύπαρξη μιας ανεμογεννήτριας (υπό ιδανικές συνθήκες), ανέρχεται σε 58 km για χερσαία και 42 km για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Η απόσταση που η οπτική όχληση θεωρείται σημαντική αλλά όχι “κυρίαρχη”, κυμαίνεται από 3 km έως 40 km. Ο Bishop αναφέρει, πως ο οπτικός αντίκτυπος περιορίζεται σημαντικά σε απόσταση μεγαλύτερη των 4 km και η οπτική επίδραση των ανεμογεννητριών φαίνεται να είναι μικρότερη από 10%, όταν παρατηρούνται από απόσταση μεγαλύτερη των 6 km. Αντίστοιχα, οι ερευνητές Betakova et al, πρότειναν ως ελάχιστα επιτρεπτά όρια, αποστάσεις της τάξεως των 10 km για τοπία “υψηλής αισθητικής αξίας” και 5 km για λιγότερο “ελκυστικά” τοπία (Ioannidis & Koutsoyiannis, 2020).



Εικόνα 21: Ο οπτικός αντίκτυπος ενός τοπίου συναρτῆσει της απόστασης από τη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Πηγή: <http://www.aiolikigi.gr/el/e-learning/wind-parks-impacts/>

Μια ανεμογεννήτρια που βρίσκεται κοντά σε ένα γραφικό σημείο ή μια αρχαιολογική περιοχή, είναι πιο πιθανό οι άνθρωποι να τη θεωρήσουν οπτική ρύπανση. Όταν τοποθετείται σε στενές ή κλειστές περιοχές (κοιλιάδες), η οπτική επίδραση φαίνεται να είναι εξίσου έντονη. Επίσης, στην περίπτωση που τοποθετηθεί στην κορυφή ενός λόφου, η ανεμογεννήτρια είναι ικανή να αποτελέσει άμεσο οπτικό φραγμό, αλλά το αίσθημα της ενόχλησης φαίνεται να εξασθενεί όταν παρατηρείται από ψηλότερη υψομετρική θέση (Dai et al., 2015). Οι σχεδιαστές, με σκοπό να ενσωματώσουν ομαλά την ύπαρξη της ανεμογεννήτριας στο σκηνικό ενός τοπίου, παραδίδουν τις ανεμογεννήτριες σε γκρι αποχρώσεις

(ή λευκό). Επιπλέον, είθισται η βάση του πύργου στήριξης να έχει πράσινο χρώμα και σταδιακά, οδεύοντας προς την κορυφή, να μεταβαίνει σε γκρι χρωματισμό ώστε να ελαχιστοποιούνται τα επίπεδα αντίθεσης. Βέβαια, σε περίπτωση που η δομή της ανεμογεννήτριας παρουσιάζει μεγάλη οπτική ομοιομορφία με το περιβάλλον (ή τον ορίζοντα), υπάρχει ο κίνδυνος να επέλθει σημαντική αύξηση στη θνησιμότητα των πτηνών (Saidur et al., 2011).

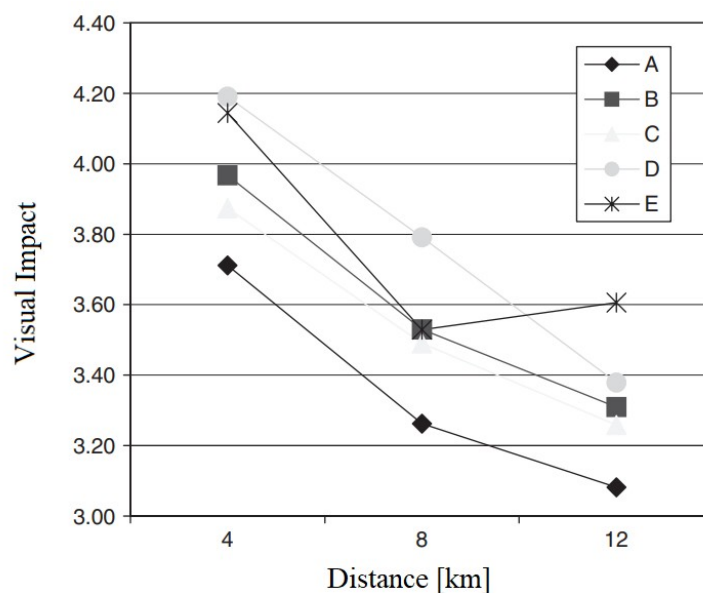
Οι ερευνητές Bishop and Miller (2007), υποστήριξαν πως η ορατότητα ενός αντικειμένου, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα επίπεδα αντίθεσης (contrast) που εισάγει στο χώρο. Βάση της μελέτης τους, προσπάθησαν να προσδιορίσουν το βαθμό στον οποίο η αντίθεση καθορίζει το επίπεδο της οπτικής όχλησης, εξετάζοντας πέντε διαφορετικά σενάρια καιρικών συνθηκών, σε αποστάσεις 4 km, 8 km και 12 km από τις ανεμογεννήτριες. Όπως διαπιστώθηκε, η αύξηση της οπτικής επίδρασης οφείλεται ή δυσχεραίνεται από την αύξηση της αντίθεσης. Ωστόσο, τόσο το μέγεθος της αντίθεσης (Πίνακας 8) όσο και η οπτική όχληση (Σχήμα 15), περιορίζονται σημαντικά όσο μεγαλώνει η απόσταση απ' την οποία παρατηρείς την ανεμογεννήτρια. Καθοριστικό ρόλο φαίνεται πως έχουν και οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες.

Πίνακας 8. Το επίπεδο αντίθεσης των ανεμογεννητριών συναρτήσει της απόστασης θέασης και των επικρατούσων καιρικών συνθηκών. Πηγή: Bishop & Miller, 2007. Ιδία επεξεργασία.

Ατμοσφαιρικές συνθήκες	% αντίθεσης στα 4 km	% αντίθεσης στα 8 km	% αντίθεσης στα 12 km
Πυκνή ομίχλη	1,9	1,5	1,9
Καθαρή ατμόσφαιρα – φωτισμός πίσω από τις Α/Γ	9,5	7,0	2,8
Μεσαία επίπεδα ομίχλης	7,4	5,4	3,7
Καθαρή ατμόσφαιρα – φωτισμός μπροστά από τις Α/Γ	20,5	16,2	7,0
Καθαρή ατμόσφαιρα – μαύρα σύννεφα πίσω από τις Α/Γ	27,9	20,7	11,0

Ακόμα, οι ανεμογεννήτριες φαίνεται να προκαλούν μικρότερη οπτική διαταραχή όταν τα πτερύγια τους περιστρέφονται. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους. Αρχικά, όταν τα πτερύγια περιστρέφονται είναι περισσότερο δυσδιάκριτα για τον παρατηρητή και έπειτα, μια ανεμογεννήτρια που είναι αδρανής, μοιάζει με εγκαταλελειμμένη μηχανή. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην ικανοποιείται η προσδοκία του θεατή, δημιουργώντας την εντύπωση πως η εγκατάσταση δεν εξυπηρετεί το σκοπό της (Dai et al., 2015; Saidur et al., 2011). Γενικά, μια ανεμογεννήτρια που διαθέτει τρία πτερύγια, είναι πιο αποδεκτή από το κοινό, συγκριτικά με εκείνη που διαθέτει μόνο δυο πτερύγια. Ο λόγος, ενδεχομένως οφείλεται στο ότι οι ανεμογεννήτριες που εξοπλίζονται με τρία πτερύγια, τείνουν να δίνουν μια μεγαλύτερη αίσθηση ισορροπίας και ένα πιο αρμονικό συνολικά αποτέλεσμα. Ωστόσο, στην περίπτωση που τα πτερύγια περιστρέφονται αριστερόστροφα, η δυσαρέσκεια είναι εντονότερη. Τώρα, η διάταξη των ανεμογεννητριών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε συμμετρική διάταξη και ακανόνιστη διάταξη. Η τακτική διάταξη προσφέρει μια καλύτερη αίσθηση οπτικής κανονικότητας και συνέπειας, σε αντίθεση με την ακανόνιστη διάταξη η οποία μπορεί να προκαλέσει αίσθηση χάους

στον παρατηρητή. Παρόλα αυτά, ακόμη και με την τακτική διάταξη, το αίσθημα ικανοποίησης που προσφέρει ένα οργανωμένο σύνολο, μπορεί να αλλάξει καθώς ο παρατηρητής κινείται και αντικρίζει τις ανεμογεννήτριες από διαφορετικές κατευθύνσεις και υψόμετρα (Dai et al., 2015).



Σχήμα 15. Το μέγεθος της οπτικής όχλησης συναρτήσει της απόστασης θέασης των ανεμογεννητριών. Η τιμή 3,00 αποτελεί ουδέτερη τιμή. Οι πέντε διαφορετικές γραμμές αντιπροσωπεύουν τα πέντε διαφορετικά σενάρια καιρικών συνθηκών (Πίνακας 8). Πηγή: Bishop & Miller, 2007.

Εξίσου σημαντικός παράγοντας οπτικής όχλησης, αποτελεί το “τρεμόπαιγμα” της σκιάς (shadow flicker). Το φαινόμενο της τρεμάμενης σκιάς, ορίζεται ως η συνεχή μεταβολή της στάθμης του φωτός και προκαλείται είτε από τα περιστρεφόμενα πτερύγια των ανεμογεννητριών, είτε λόγω των αντανακλάσεων των ακτίνων του ηλίου στο σώμα της ανεμογεννήτριας γνωστό και ως “disco effect”. Το “disco effect” αποδίδεται στις περιοδικές αναλαμπές του φωτός και μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, βελτιστοποιώντας την ομαλότητα της επιφάνειας του πτερυγίου καθώς και με τη χρήση υλικών (επικάλυψη) με μειωμένες ανακλαστικές ιδιότητες (Saidur et al., 2011). Το φαινόμενο παύει να υφίσταται όταν ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα, όταν επικρατούν ομιχλώδεις συνθήκες και όταν η ανεμογεννήτρια δεν λειτουργεί. Συνήθως, το τρεμόπαιγμα της σκιάς, εντοπίζεται σε περιοχές όπου βρίσκονται αρκετά κοντά στο χώρο της αιολικής εκμετάλλευσης ή στις χρονικές περιόδους όπου η τροχιά του ηλίου είναι χαμηλή (Ανατολή–Δύση). Όταν ανάμεσα του αιολικού πάρκου και ενός πιθανού δέκτη, παρεμβάλλονται εμπόδια (έδαφος, δέντρα) η επίδραση του φαινομένου μειώνεται σημαντικά. Το εξής φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ειδικά σε υπαίθριες περιοχές, όπου βρίσκονται μακριά από τα αστικά κέντρα και έχουν χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού τις νυχτερινές ώρες, η όχληση που μπορεί να προκληθεί από το φως του φεγγαριού σε συνδυασμό με τα περιστρεφόμενα πτερύγια, είναι εξίσου σημαντική με εκείνη που συμβαίνει σε περιόδους ηλιοφάνειας. Κατά κανόνα, το φαινόμενο της τρεμάμενης σκιάς, γίνεται έντονα αισθητό σε απόσταση έως και δέκα φορές της διαμέτρου του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Συνεπώς, αν η ανεμογεννήτρια διαθέτει δρομέα διαμέτρου 80 μέτρων, το φαινόμενο θα μπορούσε να γίνει αισθητό μέχρι και 800 μέτρα μακριά από την ανεμογεννήτρια (Bolton, 2007).

Στη Σουηδία, στη νήσο Gotland, οι κάτοικοι της περιοχής Klintehamn, αν και σύμφωνα με τους υπολογισμούς (στη χειρότερη περίπτωση) επηρεάζονται από το φαινόμενο της τρεμάμενης σκιάς 30 ώρες/έτος (και το πολύ 30 λεπτά / ημέρα), το 24% εξ αυτών δήλωσε πως είναι αρκετά έως πολύ ενοχλημένο από τις σκιές. Στο ίδιο νησί, στην περιοχή Näsudden, παρόλο που το 17 % των κατοίκων εκτίθενται στον ίδιο βαθμό με τους κατοίκους της περιοχής Klintehamn, μόνο το 4% εξ αυτών δήλωσε πως ενοχλούνται από τις σκιές. Οι κάτοικοι της περιοχής Klintehamn ενοχλούνται σε μεγαλύτερο βαθμό, λόγω του ότι το μεγαλύτερο τμήμα των ερωτηθέντων (90%), ζουν νότια-νοτιοανατολικά των ανεμογεννητριών, με αποτέλεσμα το φαινόμενο να γίνεται έντονα αισθητό κατά τις απογευματινές ώρες (δύση του ηλίου) της περιόδου Απρίλιος-Σεπτέμβριος, όταν οι περισσότεροι από αυτούς βρίσκονται στην οικία τους. Στην περιοχή Näsudden, το 50% των ερωτηθέντων εκτίθενται στις σκιές κατά τις απογευματινές ώρες, ενώ οι υπόλοιποι είτε το πρωί είτε το μεσημέρι. Οι κάτοικοι που δεν ενοχλούνται αν και εκτίθενται σε μεγάλο βαθμό στο “disco effect”, υφίστανται το φαινόμενο τις πρωινές ώρες και κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Αντιθέτως, οι κάτοικοι που δήλωσαν πως ενοχλούνται πολύ, παρόλο που ο αντίκτυπος των σκιών στην περιοχή είναι σχετικά μικρός, υφίστανται το φαινόμενο κατά τις απογευματινές ώρες (Bolton, 2007). Το συμπέρασμα που προκύπτει, είναι πως ανεξάρτητα από το βαθμό που πλήττεται μια περιοχή από το φαινόμενο των τρεμάμενων σκιών, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να οριστεί το διάστημα της ημέρας που αυτό λαμβάνει χώρα, και φυσικά να συσχετιστεί με τις δραστηριότητες, τις συνήθειες και τον τρόπο ζωής της τοπικής κοινότητας.

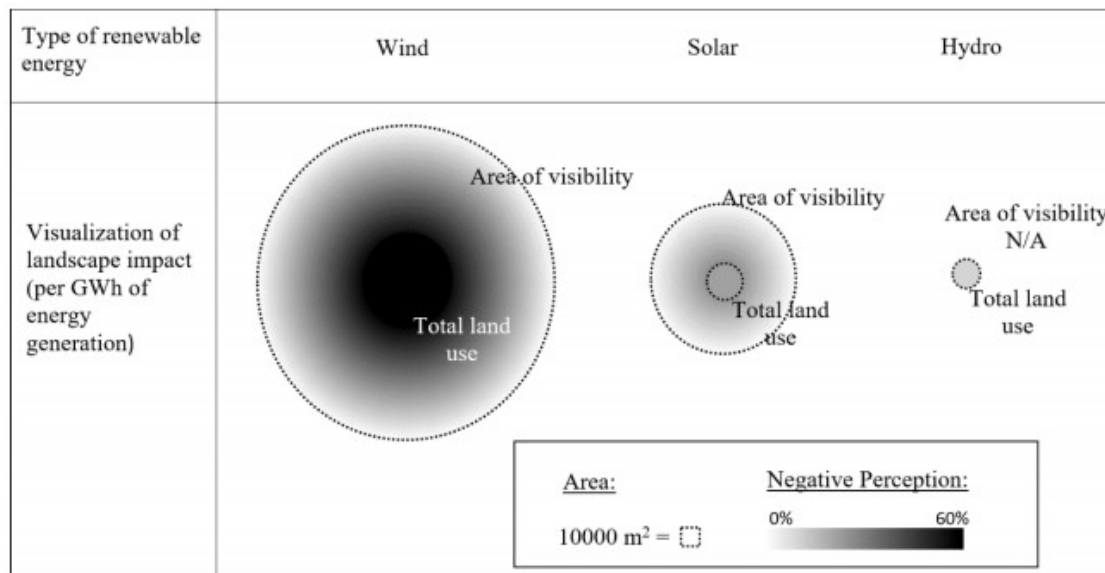
Σε μία πρόσφατη έρευνα, οι ερευνητές Ioannidis και Koutsoyiannis (2020), έπειτα από μια συνολική ανασκόπηση δεδομένων, μετρήσεων και στατιστικών αναλύσεων της υπάρχουσας δημοσιευμένης βιβλιογραφίας, προσπάθησαν να προσδιορίσουν τη συνολική έκταση γης που δεσμεύουν τρεις από τους διαθέσιμους τύπους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ανά GWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική), το βαθμό στον οποίο γίνονται ορατές οι εγκαταστάσεις του κάθε σταθμού, και τη γενική αντίληψη που έχει το ευρύ κοινό για αυτές (Πίνακας 9).

Πίνακας 9. Η συνολική έκταση χρησιμοποιούμενης γης, το μέγεθος της οπτικής επίδρασης και η γενική αντίληψη που έχει το ευρύ κοινό για κάθε τύπο ΑΠΕ, σύμφωνα με δεδομένα της δημοσιευμένης βιβλιογραφίας. Πηγή: Ioannidis & Koutsoyiannis, 2020. Ιδία επεξεργασία.

Type of RE technology	Total Land Use (m ² /GWh)	Visibility (m ² /GWh)	Index of Negative Perception in Literature (%)
Wind (onshore)	176.000	2.014.800	60%
Solar (PV)	28.000	451.500	22%
Hydro (large)	16.900	N/A	15%

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, ανά GWh παραγόμενης ενέργειας, η αιολική ενέργεια (χερσαία αιολικά πάρκα) καταλαμβάνει τουλάχιστον έξι φορές περισσότερο χώρο από όσο δεσμεύει η ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά πάρκα) και 10 φορές μεγαλύτερη έκταση γης από όσο απαιτεί η υδροηλεκτρική ενέργεια (υδροηλεκτρικοί σταθμοί). Φυσικά, οι ανεμογεννήτριες είναι αραιά τοποθετημένες μεταξύ τους, σαν μονάδα δεν καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια

εδάφους και η γη ανάμεσα τους παραμένει εκμεταλλεύσιμη. Συγκεκριμένα, η αμιγής χρήση γης εκτιμάται 3.600 m²/GWh για την αιολική ενέργεια. Επιπλέον, η περιοχή κατά την οποία καθίσταται εφικτή η θέαση των ανεμογεννητριών, είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερη σε έκταση, συγκριτικά με εκείνη στην περίπτωση ενός φωτοβολταϊκού σταθμού (Σχήμα 16).



Σχήμα 16. Οπτικοποίηση των δεδομένων του Πίνακα 9, για κάθε τύπο ΑΠΕ. Ο εσωτερικός κύκλος αντιπροσωπεύει την έκταση της γης που καταλαμβάνει ο χώρος της εγκατάστασης και ο εξωτερικός κύκλος υποδεικνύει την έκταση της περιοχής κατά την οποία μπορεί να γίνει ορατός ο χώρος της εγκατάστασης. Η δυσφορία του κοινού απεικονίζεται μέσω της απόχρωσης της “σκίασης”.
 Πηγή: Ioannidis & Koutsoyiannis, 2020.

Σε γενικές γραμμές, όπως έχουν διατυπώσει και οι Kaldellis et al. (2016), στην παρούσα φάση το ευρύ κοινό εκφράζει γενικά μια πιο θετική στάση, με λιγότερες επιφυλάξεις ως προς τα υπεράκτια αιολικά πάρκα (έναντι των χερσαίων), αν και σαφώς δεν είναι άνευ όρων. Βέβαια, αυτή η “συμπάθεια” θα μπορούσε να αλλάξει μακροπρόθεσμα, αν συνυπολογιστεί η συνεχή και μαζική ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια, σε παγκόσμιο επίπεδο, εξακολουθεί να θεωρείται ένας “νεοεισερχόμενος” τύπος πράσινης ενέργειας και λίγοι άνθρωποι έχουν εμπειρία σε παρόμοιες εγκαταστάσεις. Δεδομένου ότι κατασκευάζονται ολοένα και περισσότερα αιολικά πάρκα σε περιοχές εντός του οπτικού πεδίου, οι προκληθέντες αντιδράσεις ενδεχομένως να διαφέρουν αρκετά, από αυτές που προβλέφθηκαν αρχικά. Ωστόσο, με την πρόοδο της τεχνολογίας, αν καθισταθεί δυνατή και οικονομικά συμφέρουσα, η μαζική εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε μεγάλη απόσταση από τις ακτές, αυτομάτως εξαλείφεται ένα μεγάλο τμήμα των δυσμενών επιπτώσεων και των όποιων ανησυχιών, ίσως ένα από τα πιο ισχυρά πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

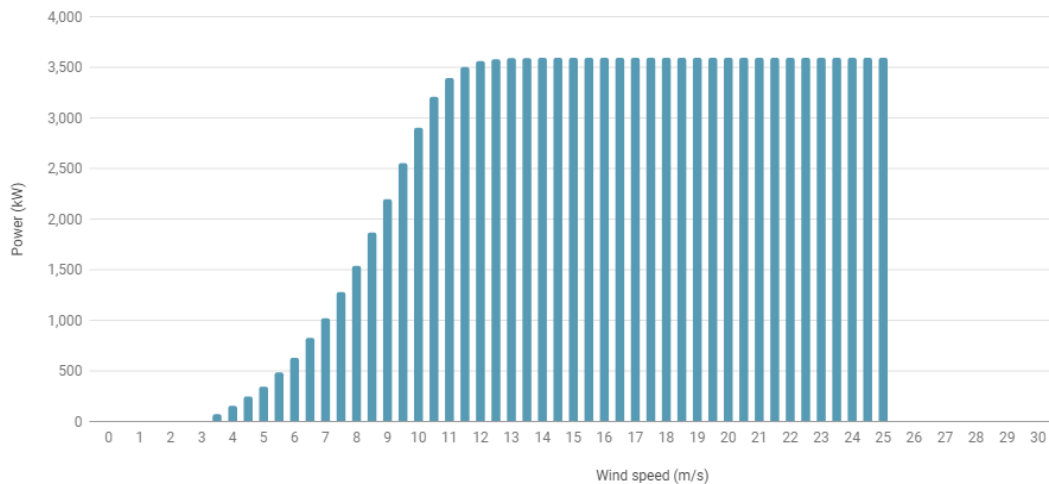
4.1. Γενικά χαρακτηριστικά αιολικού πάρκου – Περιγραφή έργου

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, εξετάζεται η κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου συνολικής ισχύος 216 MW, στο Θρακικό Πέλαγος ανοικτά του λιμένα της Αλεξανδρούπολης. Το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο, πρόκειται να αποτελέσει το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Ελλάδας και ανήκει στον Όμιλο Κοπελούζου, ενώ έχει ήδη αδειοδοτηθεί από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας και βρίσκεται σε φάση εξέτασης η μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σύμφωνα με το σχεδιασμό, η εγκατάσταση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου ενδέχεται να πραγματοποιηθεί σε δύο διαφορετικές περιοχές, νοτιοανατολικά και νοτιοδυτικά του λιμανιού της Αλεξανδρούπολης, συνολικής έκτασης 28,3 km². Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, η θέση εγκατάστασης περιορίζεται μόνο στην περιοχή νοτιοανατολικά του λιμανιού, προκειμένου να απλοποιηθεί η χωροθέτηση των υπό ανάπτυξη ανεμογεννητριών. Η εν λόγω περιοχή, εκτιμάται πως θα απέχει μέση απόσταση περίπου 9,3 km από το λιμάνι της Αλεξανδρούπολης. Το θαλάσσιο οικόπεδο απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 22) και η έκταση του έχει εμβαδόν 28,3 km². Το βάθος των υδάτων στη θέση εγκατάστασης, είναι σχετικά μικρό περίπου 28 m και η μορφολογία του βυθού χαρακτηρίζεται από λεπτή αμμουδιά. Τα ρηγά νερά του κόλπου, καθιστούν την τοποθεσία ιδιαίτερα ελκυστική για ανάπτυξη αιολικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, αφού το κόστος εγκατάστασης περιορίζεται σε χαμηλά επίπεδα. Η θεμελιακή δομή των υπεράκτιων ανεμογεννητριών εκτιμάται πως θα είναι τύπου μονοπάσσαλης θεμελίωσης, αφού είναι εξαιρετικά διαδεδομένες σε περιοχές με ανάλογα βάθη και μορφολογίες βυθού.



Εικόνα 22. Το θαλάσσιο οικόπεδο εντός του οποίου σχεδιάζεται να αναπτυχθεί το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Αλεξανδρούπολης. (Google Earth)

Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο, θα αποτελείται από 60 ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 3,6 MW η καθεμία. Η ανεμογεννήτρια που επιλέχθηκε ως προτεινόμενη, είναι το μοντέλο Siemens SWT-3,6-120 και κατασκευάζεται από τη Siemens Gamesa Renewable Energy. Το συγκεκριμένο μοντέλο διαθέτει τρία πτερύγια, διάμετρο ρότορα 120 m, ενώ το ύψος της πλήμνης φτάνει τα 90 m. Από την καμπύλη ισχύος που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, διακρίνεται πως η έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας πραγματοποιείται με ταχύτητες ανέμου των 3,5 m/s και διακόπτεται σε ταχύτητες ανέμου άνω των 25 m/s για λόγους ασφαλείας. Μάλιστα, η παραγωγική της δυναμικότητα είναι μέγιστη, σε ταχύτητες ανέμου από 14 έως 25 m/s.



Σχήμα 17: Η καμπύλη ισχύος της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας Siemens SWT-3,6-120
Πηγή: https://www.thewindpower.net/turbine_en_79_siemens_swt-3.6-120.php

Σύμφωνα με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, ανέρχεται περίπου σε 7,5 m/s στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών. Έτσι, η συνολική ποσότητα ενέργειας που καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μεταφοράς και μια μέση διαθεσιμότητα του αιολικού πάρκου ίση με 98%, υπολογίζεται πως θα είναι 662.256 MWh/year. Η διάρκεια ζωής του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής καθορίζεται στα 20 έτη λειτουργίας. Επομένως, η συνολική ποσότητα ενέργειας που δύναται να παράξει το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Αλεξανδρούπολης στην προβλεπόμενη εικοσαετή λειτουργία του, ανέρχεται στις 13.245.120 MWh. Έτσι, ο συντελεστής δυναμικότητας (Capacity Factor) λαμβάνει την τιμή 35% η οποία είναι μια σχετικά ασφαλής εκτίμηση. Οι ανεμογεννήτριες, χωροθετούνται εντός του θαλάσσιου οικοπέδου, σε έξι σειρές και δέκα στήλες, και θα διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω καλωδίων (μέσης τάσης 34 KV), τα οποία τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα. Οι ανεμογεννήτριες, σύμφωνα με τον τρόπο που χωροθετούνται, συμβαδίζουν με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θαλάσσιου οικοπέδου και έχουν βορειανατολικό προσανατολισμό.

Στον Πίνακα 10, αναγράφονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα στοιχεία σχετικά με τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που επιλέχθηκε, η ετήσια παραγωγική ικανότητα της ανεμογεννήτριας καθώς και η παραγωγική ικανότητα του αιολικού πάρκου σε οριζόντια 20ετία, αλλά και ορισμένα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, όπως η μέση απόσταση από το λιμάνι της Αλεξανδρούπολης (την

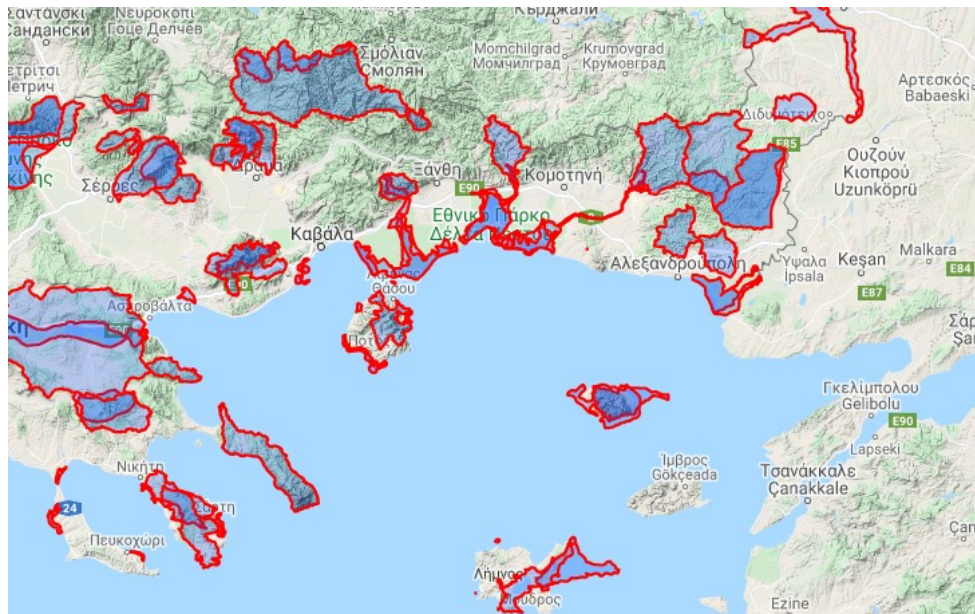
οποία θα διανύει το vessel για την εγκατάσταση των Α/Γ), η μέση απόσταση από την ακτή (την οποία θα διανύουν τα καλώδια εξαγωγής), το βάθος της θάλασσας και η μέση ταχύτητα του ανέμου.

Πίνακας 10. Στο συγκριμένο πίνακα αναγράφονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

Ανεμογεννήτρια	
Model	Siemens SWT-3,6-120
Διάμετρος Ρότορα [m]	120
Αριθμός Πτερυγίων	3
Ύψος Πλήμνης [m]	88/90
Εγκατεστημένη Ισχύς	
Ονομαστική Ισχύς ανά Α/Γ [MW]	3,6
Συνολικός Αριθμός Α/Γ	60
Εγκατεστημένη Ισχύς Αιολικού Πάρκου [MW]	216
Συντελεστής Δυναμικότητας	35 %
Ετήσια Παραχθείσα Ενέργεια ανά Α/Γ [MWh]	11.037,6
Διάρκεια Ζωής [years]	20
Παραχθείσα Ενέργεια Αιολικού Πάρκου σε διάστημα 20 ετών [MWh]	13.245.120
Περιβάλλον	
Μέση Απόσταση από το Λιμάνι της Αλεξανδρούπολης [m]	9.300
Μέση Απόσταση από την Ακτή [m]	4.660
Μέγιστο Βάθος Πυθμένα [m]	28
Μέση Ταχύτητα Ανέμου [m/s]	7,5

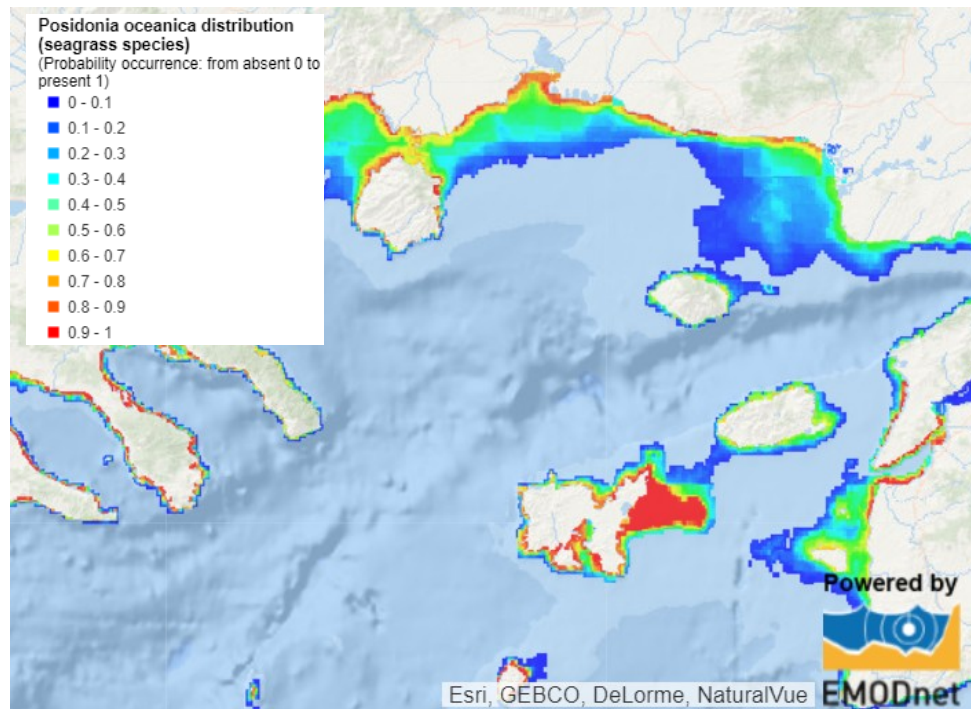
4.2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η θέση ανάπτυξης του υπό μελέτη υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης, αν και δεν ανήκει σε κάποια από τις προστατευόμενες περιοχές Natura 2000, παρόλα αυτά βρίσκεται σε απόσταση μόλις 4 χιλιομέτρων από το Εθνικό Υγροτοπικό Πάρκο Δέλτα Έβρου. Το Εθνικό Υγροτοπικό Πάρκο Δέλτα Έβρου, αποτελεί ζώνη ειδικής προστασίας και συνιστά έναν από τους πλουσιότερους υγρότοπους της Ευρώπης. Φιλοξενεί πολλά σπάνια και απειλούμενα είδη πτηνών, πολλά από τα οποία πλέον απαντώνται σε ελάχιστους ευρωπαϊκούς υδροβιότοπους. Επιπλέον, η εν λόγω περιοχή αποτελεί μεταναστευτικό διάδρομο για πολλά είδη αποδημητικών πτηνών και χειροπτέρων (Spyridonidou, Vagiona & Loukogeorgaki, 2020). Έτσι, υπάρχει ο κίνδυνος το αιολικό πάρκο να αυξήσει την ανθρωπογενή θνησιμότητα των σπάνιων ειδών, με αποτέλεσμα να διαταραχθεί το μέγεθος και η μακροχρόνια επιβίωση των πληθυσμών τους.



Εικόνα 23. Χάρτης Natura 2000, με τις προστατευόμενες περιοχές της Μακεδονίας και της Θράκης. Πηγή: <https://www.geogreece.gr/natura.php>

Η μορφολογία του βυθού της περιοχής που πρόκειται να αναπτυχθεί το αιολικό πάρκο, χαρακτηρίζεται από φιλή αμμουδιά. Η Ποσειδώνια, ένα θαλάσσιο φυτό ενδημικό της Μεσογείου, σχηματίζει εκτεταμένους λειμώνες σε αμμώδη υποστρώματα σε βάθη από 1 έως 60 μέτρα. Όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 24), υπάρχει σημαντική πιθανότητα η Ποσειδώνια να βρίσκεται εντός του θαλάσσιου οικοπέδου που προορίζεται να αναπτυχθεί το αιολικό πάρκο. Λαμβάνοντας υπόψη πως η Ποσειδώνια βρίσκεται υπό καθεστώς προστασίας τόσο μέσω διεθνών συμβάσεων, όσο και από την ευρωπαϊκή νομοθεσία (Σύμβαση της Βέρνης, Συνθήκη της Βαρκελώνης), προκύπτει ένα ζήτημα που χρίζει περαιτέρω διερεύνησης (Poursanidis, 2019; WWF-France, 2019). Επιπλέον λόγω της μορφολογίας του βυθού, η στροβιλώδης χαοτική ροή που αναπτύσσεται αφού το ρευστό διέλθει από το βυθισμένο τμήμα της μονοπάσσας θεμελίωσης, θα μπορούσε να προκαλέσει το φαινόμενο της ιζηματοπόθεσης (sedimentation), δηλαδή το σχηματισμό “νεφών” στερεάς σωματιδιακής ύλης από τα ιζήματα του πυθμένα (sediment plume), τα οποία εκτείνονται σε απόσταση αρκετών χιλιομέτρων ανάλογα με την κατεύθυνση των θαλάσσιων ρευμάτων (WWF-France, 2019). Ακόμα, ο θόρυβος που προκαλείται κατά την έμπηξη της μονοπάσσας θεμελίωσης μέσω υδραυλικής κρούσης (pile drivers) στο βυθό, θα μπορούσε να επιφέρει θανάσιμους τραυματισμούς στα ψάρια που βρίσκονται αρκετά κοντά στο χώρο εργασιών ή και την άτακτη φυγή τους από περιοχές εκτροφής και αναπαραγωγής τους (Draget, 2014). Επομένως, θα πρέπει απαραίτητως να εξεταστεί το ενδεχόμενο λήψης προληπτικών μέτρων, προκειμένου να μειωθεί η ένταση και η διασπορά του θορύβου. Όπως γίνεται αντιληπτό, η παρουσία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, εάν δεν καταβληθεί καμία προσπάθεια για το μετριασμό των επιπτώσεων, θα μπορούσε να συμβάλει στη γενική υποβάθμιση όλων των υδροβιότοπων της ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 24. Χάρτης με κατανομή πιθανότητας ύπαρξης λειμώνων της Ποσειδωνίας, στην ευρύτερη περιοχή του Θρακικού πελάγους.

Πηγή: <https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/en/node/4331>

Μια άλλη παράμετρος που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, είναι η παρουσία του αερολιμένα Αλεξανδρούπολης “Δημόκριτος” και η απόσταση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου από αυτόν. Τα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται για τη συνεχή παρακολούθηση της πτητικής κατάστασης των αεροσκαφών, την αποφυγή συγκρούσεων, τον ασφαλή διαχωρισμό των ιπτάμενων μέσων και τη διατήρηση τακτικής ροής της εναέριας κυκλοφορίας. Τα εν λόγω ραντάρ μπορούν να επηρεαστούν από την ύπαρξη των ανεμογεννητριών, υποβαθμίζοντας την ικανότητα ανίχνευσης και κατά επέκταση την ποιότητα των δεδομένων που λαμβάνουν. Ενδεικτικά, μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1,5 MW έχει μεγαλύτερο RCS, από το αντίστοιχο ενός μεγάλου επιβατηγού αεροσκάφους τύπου Boeing 747 (DoD, 2006). Το υπό μελέτη υπεράκτιο αιολικό πάρκο τοποθετείται σε απόσταση περίπου 6 χιλιομέτρων από τον αερολιμένα “Δημόκριτος”. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Eurocontrol, υπεύθυνος για την Ασφάλεια της Αεροναυτιλίας, ορίζει μια ζώνη από 500 m έως 15 km, εντός της οποίας για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου, οι υπεύθυνοι της εναέριας επιτήρησης απαιτούν λεπτομερή τεχνική και επιχειρησιακή αξιολόγηση, τα αποτελέσματα των οποίων εξετάζονται και κρίνονται ως αποδεκτά από τους ίδιους. Η συγκεκριμένη ζώνη δεν αποτελεί απαγορευμένη περιοχή, αλλά υποδεικνύει τους τομείς που χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης. (EUROCONTROL, 2014)

Όσον αφορά τις επιπτώσεις που θα έχει η ανάπτυξη του αιολικού πάρκου στους κατοίκους της Αλεξανδρούπολης, εκτιμάται πως θα είναι από αρκετά περιορισμένες έως μηδαμινές. Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο εκτιμάται πως θα απέχει από την πλησιέστερη κατοικία, απόσταση τουλάχιστον 5 χιλιομέτρων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο οπτικός αντίκτυπος περιορίζεται σημαντικά σε

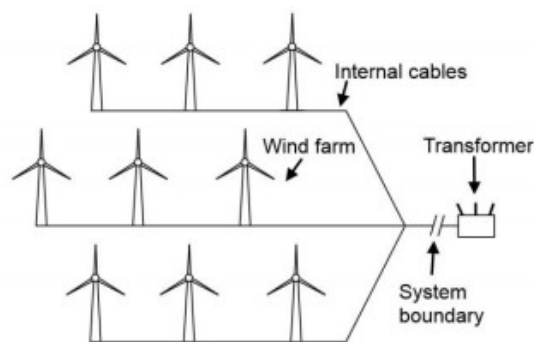
απόσταση άνω των 4 χιλιομέτρων και η οπτική επίδραση των ανεμογεννητριών φαίνεται να είναι μικρότερη από 10% όταν παρατηρούνται από απόσταση μεγαλύτερη των 6 χιλιομέτρων (Ioannidis & Koutsoyiannis, 2020). Επιπλέον, σχετικά με τη στάθμη θορύβου των εν λειτουργία ανεμογεννητριών, η ελληνική νομοθεσία επιβάλλει ως μέγιστο όριο επιβάρυνσης από σταθερές μηχανολογικές εγκαταστάσεις πάσης φύσεως για τις κατοικημένες περιοχές, τα 50 dBA ανεξαρτήτως ώρας και ημέρας (Παπασταματίου et al., 200). Παράλληλα, έχει θεσπίσει ως ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο μεταξύ του αιολικού πάρκου και της πλησιέστερης κατοικίας μια απόσταση μεγαλύτερη των 500 μέτρων (Dalla Longa et al., 2018). Και τα δύο κριτήρια θα πληρούνται στον απόλυτο βαθμό.

4.3. Ανάλυση κύκλου ζωής του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης

4.3.1. Όρια του συστήματος

Η ανάλυση κύκλου ζωής του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, περιλαμβάνει πέντε βασικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μελετώνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν αφενός κατά τη φάση εξόρυξης και επεξεργασίας των πρώτων υλών, αφετέρου κατά την παραγωγική διαδικασία των επιμέρους τμημάτων του αιολικού πάρκου. Το δεύτερο στάδιο, περιλαμβάνει τη μεταφορά των ανεμογεννητριών από το χώρο κατασκευής τους (Cuxhaven, Γερμανία) στην τοποθεσία ανάπτυξης του αιολικού πάρκου (Αλεξανδρούπολη, Ελλάδα). Η μεταφορά των καλωδίων που απαιτούνται για την ηλεκτρική διασύνδεση των ανεμογεννητριών με το χερσαίο ηλεκτρικό δίκτυο, παραλείπεται. Επιπλέον, στο συγκεκριμένο στάδιο πιστώνονται οι επιπτώσεις που προκύπτουν από όλες τις διεργασίες που σχετίζονται με την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου, δηλαδή την τοποθέτηση των θεμελιακών δομών, των ανεμογεννητριών και των καλωδίων. Στο τρίτο στάδιο, λαμβάνονται υπόψη όλες οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση του αιολικού πάρκου σε ορίζοντα εικοσαετίας, ενώ στο τέταρτο στάδιο μελετώνται οι επιπτώσεις που οφείλονται στις εργασίες παροπλισμού του αιολικού πάρκου. Στο τέλος του κύκλου ζωής, όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν την αιολική μονάδα, αποσυναρμολογούνται και οδηγούνται είτε για ανακύκλωση, είτε για αποτέφρωση είτε για ταφή σε κατάλληλους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμάτων (πέμπτο στάδιο).

Στις παρακάτω ενότητες, κάθε στάδιο παρουσιάζεται πιο αναλυτικά και γίνεται εκτενής αναφορά σχετικά με τις παραδοχές που έγιναν κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος. Η ανάλυση κύκλου ζωής “από το λίκνο έως τον τάφο” (cradle-to-grave) πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού OpenLCA και τη χρήση βάσεων δεδομένων Ecoinvent. Εξετάστηκε το σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτει από το κάθε στάδιο, καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ενδιάμεσου σημείου CML 2001 (superseded).



Εικόνα 25. Όρια του συστήματος του υπό μελέτη υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης. Πηγή: Thomson & Harrison, 2015a

Επιπλέον, οι περιβαλλοντικοί δείκτες που επιλέχθηκαν για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, είναι οι εξής:

- Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming)
- Οξίνιση (Acidification)
- Ευτροφισμός (Eutrophication)
- Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity)
- Φωτοχημική Οξειδωση (Photochemical oxidant creation)
- Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity)
- Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity)
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity)

4.3.2. Συλλογή δεδομένων – Παραδοχές

4.3.2.1. Στάδιο Α. Εξόρυξη πρώτων υλών και κατασκευή επιμέρους τμημάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ανεμογεννήτρια αποτελείται από πολλά διαφορετικά μέρη όπως τον πύργο στήριξης, την άτρακτο, τα περύγια. Η άτρακτος, αποτελεί το πιο περίπλοκο τμήμα της ανεμογεννήτριας αφού εντός αυτού, στεγάζεται το κιβώτιο ταχυτήτων, οι άξονες μετάδοσης κίνησης, η γεννήτρια, τα συστήματα ελέγχου και πολλά ακόμα ηλεκτρικά και μηχανολογικά εξαρτήματα. Για το προσδιορισμό του είδους και της μάζας των υλικών που απαρτίζουν κάθε τμήμα της ανεμογεννήτριας, αξιοποιήθηκαν στοιχεία τόσο από την κατασκευάστρια εταιρία όσο και εκτιμήσεις από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία (Bonou, Laurent & Olsen, 2016; Chipindula et al., 2018; Gomaa, Rezk, Mustafa & Al-Dhaifallah, 2019; Guezuraga et al., 2012; Technical Project Description for Offshore Wind Farms (200 MW), 2015). Συνήθως ο προσδιορισμός της ποσότητας του κάθε υλικού, γίνεται κλιμακωτά και προσαρμόζεται ανάλογα με τη ονομαστική ισχύ και το μέγεθος του ρότορα της ανεμογεννήτριας.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 11), αναγράφονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των κύριων τμημάτων της ανεμογεννήτριας Siemens SWT-3,6-120, της μονοπάσσαλης θεμελίωσης και του μεταβατικού τμήματος το οποίο συνδέει τη θεμελιακή δομή με τον πύργο στήριξης. Οι κατηγορίες που επιλέχθηκαν εντός του λογισμικού OpenLCA για τη μοντελοποίηση του εκάστοτε υλικού, συμπεριλαμβάνουν όλες τις διεργασίες εξόρυξης και επεξεργασίας των πρώτων υλών. Κατά κύρια βάση, αξιοποιήθηκε η παγκόσμια κατηγορία (GLO), ενώ η κατηγορία υπόλοιπος κόσμος (ROW) και η κατηγορία Ευρώπη (RER) χρησιμοποιήθηκαν κατά περίπτωση. Οι διεργασίες που αφορούν η φάση κατασκευής των επιμέρους στοιχείων, εξετάστηκαν σε συγκεντρωτικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα υλικά όσο και την ενέργεια που καταναλώθηκε.

Πίνακας 11. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις ποσότητες των επιμέρους υλικών που απαρτίζουν την ανεμογεννήτρια που επιλέχθηκε για το αιολικό πάρκο της Αλεξανδρούπολης.

Parts	Materials	Tonnes
Ρότορας		100
	Cast Iron	23
	Epoxy Resin	8
	Steel	18
	Fiberglass	51
Άτρακτος		125
	Cast Iron	10
	Steel	89
	Chromium Steel	17
	Copper	5,6
	Aluminium	2
	Electronics	0,5
	Lubricating Oil	0,9
Πύργος στήριξης		210
	Steel	210
Μονοπάσσαλη θεμελίωση		400
	Steel	400
Μεταβατικό τμήμα θεμελίωσης		200
	Steel	200

4.3.2.2. Ηλεκτρική διασύνδεση

Συνήθως, στα υπεράκτια αιολικά πάρκα που βρίσκονται αρκετά κοντά στην ακτή, οι ανεμογεννήτριες διασυνδέονται μεταξύ τους με μέση τάση από 1 έως 50 kV (συνήθως 34 kV). Προκειμένου να αποφευχθεί η τοποθέτηση υπεράκτιου μετασχηματιστή, η “εσωτερική” τάση του αιολικού πάρκου που πηγάει από τους μετασχηματιστές που διαθέτουν οι ίδιες οι ανεμογεννήτριες, αξιοποιείται για τη μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας στο ηπειρωτικό δίκτυο. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης,

είναι ότι δεν απαιτείται η χρήση υπεράκτιου μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα να περιορίζεται αρκετά το κόστος εγκατάστασης της αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, το ηπειρωτικό δίκτυο, συνήθως λειτουργεί σε επίπεδο υψηλής τάσης (άνω των 50kV), καθιστώντας αναγκαία τη μετατροπή της μέσης τάσης σε υψηλή μέσω ενός χερσαίου μετασχηματιστή. Η κατασκευή του χερσαίου υποσταθμού δεν λαμβάνεται υπόψη στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, αφού είναι εκτός των ορίων του συστήματος.

Σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης, αποτελεί η περιορισμένη χωρητικότητα μεταφοράς των καλωδίων μέσης τάσης (στα 34 kV περίπου 50 MW), καθιστώντας απαραίτητη την εγκατάσταση πολλαπλών διασυνδέσεων στην περίπτωση μεγάλων αιολικών πάρκων. Οι πολλαπλές διασυνδέσεις, να μεν καθιστούν τη διαδικασία της εγκατάστασης πιο περίπλοκη και δαπανηρή, αλλά σε περίπτωση αστοχίας του καλωδίου, η μεταφορά του φορτίου μπορεί να συνεχιστεί μέσω των υπολοίπων καλωδίων, γεγονός που τους προσδίδει ένα σημαντικό οικονομικό πλεονέκτημα, έναντι των μεμονωμένων διασυνδέσεων. Σε κάθε καλώδιο μέσης τάσης, συνήθως συνδέονται μια σειρά από πέντε έως δέκα ανεμογεννήτριες ανάλογα με το μέγεθος τους. Σε ένα καλώδιο με εμβαδόν διατομής αγωγού 500 mm² και μέση τάση 34 kV, μπορούν να συνδεθούν ανεμογεννήτριες με συνολική εγκατεστημένη ισχύ έως και 36 MW. Η απόσταση μεταξύ των καλωδίων που καταλήγουν από το αιολικό πάρκο στην ακτή, συνίσταται να μην είναι μικρότερη από 50 m κυρίως για λόγους ασφαλείας. (Technical Project Description for Offshore Wind Farms (200 MW), 2015)

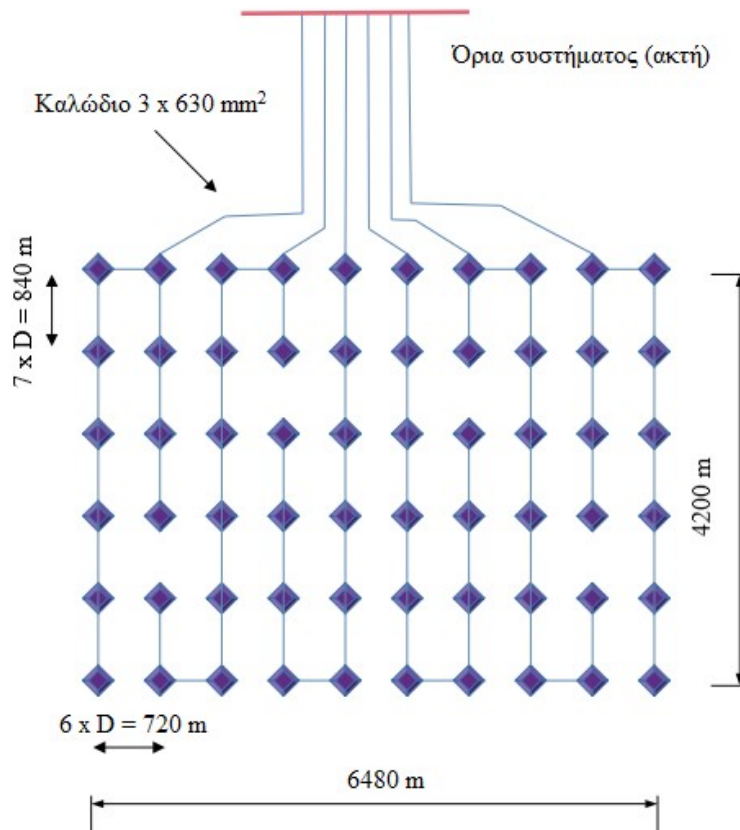
Στα πλαίσια του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου, η διασύνδεση των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται με μέση τάση 34 kV και μέσω καλωδίων με εμβαδόν διατομής αγωγού 630 mm². Συνολικά, θα χρησιμοποιηθούν 6 γραμμές καλωδίων, και σε κάθε γραμμή θα συνδέονται 10 ανεμογεννήτριες. Το βάρος του καλωδίου με τη συγκεκριμένη διατομή, είναι περίπου 29 kg/m (Tsai, Kelly, Simon, Chalat & Keoleian, 2016). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12), αναγράφονται οι ποσότητες των υλικών που το απαρτίζουν. Η μάζα των υλικών εκτιμήθηκε με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία (Gomaa et al., 2019; Vestas, 2011; Vestas, 2006). Η παραγωγική διαδικασία των καλωδίων συμπεριλαμβάνεται στο πρώτο στάδιο του κύκλου ζωής και η μοντελοποίηση των υλικών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση βάσεων δεδομένων Ecoinvent.

Πίνακας 12. Τα είδη και οι ποσότητες των υλικών που απαρτίζουν τα καλώδια διασύνδεσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης

Τύπος Καλωδίου	Είδος υλικού	Ποσότητα [kg/m]
3 x 630 mm ²	Aluminum	12,9
	Copper	2,1
	Polyethylene	14
	Σύνολο	29

Οι ανεμογεννήτριες θα τοποθετηθούν σε 6 σειρές και 10 στήλες. Οι σειρές μεταξύ τους θα απέχουν απόσταση ίση με επτά φορές τη διάμετρο του ρότορα (840 m) ενώ οι στήλες μεταξύ τους θα απέχουν απόσταση ίση με έξι φορές τη διάμετρο του ρότορα (720 m). Ο ρότορας της ανεμογεννήτριας έχει

διάμετρο 120 m. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 18) αναπαρίσταται η χωροθέτηση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης και ο τρόπος διασύνδεσης των ανεμογεννητριών με το ηπειρωτικό δίκτυο. Το συνολικό μήκος και των έξι καλωδίων υπολογίζεται πως θα είναι περίπου 78 km και το συνολικό τους βάρος 2.265,5 τόνους.



Σχήμα 18. Η διάταξη των ανεμογεννητριών και ο τρόπος διασύνδεσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

4.3.2.3. Στάδιο B1. Μεταφορά των ανεμογεννητριών

Κατά το στάδιο της μεταφοράς, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα της ενέργειας που καταναλώθηκε προκειμένου να μεταφερθούν τα επιμέρους τμήματα των ανεμογεννητριών (άτρακτος, ρότορας, πτερύγια, πύργος, θεμελίωση) στην περιοχή ανάπτυξης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία εντός του λογισμικού OpenLCA, οι αποστάσεις εκφράζονται σε τονοχιλιόμετρα (tkm), όπου υποδεικνύουν τη μεταφορά φορτίου βάρους ενός τόνου σε απόσταση ενός χιλιομέτρου. Πιο συγκεκριμένα, οι ανεμογεννήτριες μεταφέρθηκαν αρχικά, από το χώρο παραγωγής Siemens Gamesa Renewable Energy που βρίσκεται στη Βόρεια Γερμανία στην πόλη Cuxhaven, στο πλησιέστερο λιμάνι (Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG) οδικώς με τη βοήθεια φορτηγών οχημάτων (Lorry > 32 metric tonnes) και από εκεί μεταφέρθηκαν στο λιμάνι της Αλεξανδρούπολης, μέσω υπερωκεάνιων πλοίων (transoceanic

ship). Ολόκληρη η διαδικασία παρουσιάζεται αναλυτικά στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13). Οι αποστάσεις, εκτιμήθηκαν με τη βοήθεια της εφαρμογής Google Earth.

Πίνακας 13. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις αποστάσεις που διανύει το κάθε τμήμα των ανεμογεννητριών από το χώρο κατασκευής (Siemens Gamesa) έως την τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου (Αλεξανδρούπολη).

Τμήμα	Βάρος [t]	ME LORRY > 32 Metric tonnes				ME TRANSOCEANIC SHIP			
		Από	Προς	Απόσταση [km]	t * km	Από	Προς	Απόσταση [km]	t * km
Ρότορας	100	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	370	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6470	647000
Ατρακτος	125	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	462,5	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6470	808750
Πύργος στήριξης	210	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	777	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6470	1358700
Μονοπάσσαλη θεμελίωση	400	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	1480	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6470	2588000
Μεταβατικό τμήμα	200	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	740	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6470	1294000
Ανταλλακτικά	21,7	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	80,5	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6470	140722,5
Συνολικά					3910				6837172,5



Εικόνα 26. Πορεία διαδρομής του υπερωκεάνιου πλοίου από το εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρίας στην πόλη Cuxhaven της Γερμανίας, μέχρι το λιμάνι της Αλεξανδρούπολης.

4.3.2.4. Στάδιο B2. Εγκατάσταση των ανεμογεννητριών

Κατά το στάδιο της εγκατάστασης, οι ρύποι που εκλύονται στην ατμόσφαιρα σχετίζονται άμεσα με την ενέργεια που καταναλώθηκε (κυρίως υπό τη μορφή καυσίμου) για τη μεταφορά και την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, των θεμελίων και των καλωδίων, από το λιμάνι της Αλεξανδρούπολης, στη θέση ανάπτυξης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση αυτοκινούμενων σκαφών που είναι ειδικά σχεδιασμένα για την εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Wind turbine installation vessel – WTIV), είτε με τη χρήση μη αυτοκινούμενων πλωτών πλατφορμών (Jack up barges) οι οποίες μεταφέρονται στην κατάλληλη τοποθεσία με τη βοήθεια ρυμουλκών (Tugboats). Ωστόσο, και τα δύο μέσα, διαθέτουν ένα ειδικό “σύστημα ανύψωσης” που τα επιτρέπει με τη βοήθεια ειδικών στηριγμάτων που διεισδύουν στον πυθμένα, να ανυψώνονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (air gap) προκειμένου να διατηρούν τη θέση τους σταθερή. Επιπλέον είναι εφοδιασμένα πλήρως με όλο τον απαραίτητο μηχανολογικό εξοπλισμό που απαιτείται (π.χ γερανούς, υδραυλικούς κρουστήρες) για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών. Σε αντίθεση με τις πλωτές πλατφόρμες, τα αυτοκινούμενα σκάφη WTIV έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα, είναι ικανά να μεταφέρουν μεγαλύτερο φορτίο και θεωρείται πως μπορούν να αναλάβουν εξ ολοκλήρου την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, χωρίς τη χρήση άλλων βοηθητικών μέσων. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης, η εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός αυτοκινούμενου σκάφους WTIV του MPI Resolution, τα χαρακτηριστικά του οποίου αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 14) (*Offshore installation and maintenance vessel MPI Resolution*, 2019).

Πίνακας 14. Τα κύρια χαρακτηριστικά του αυτοκινούμενου σκάφους MPI Resolution, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών στη θέση ανάπτυξης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

Name	Deck Space [m ²]	DeadWeight [tonnes]	Maximum Speed [km/h]	Leg Length [m]	Maximum Water Depth [m]	Jacking Speed [m/min]
MPI Resolution	3200	5000	20	70,5	35	0,5

Γενικά, υπάρχουν πέντε διαφορετικές μέθοδοι που συνήθως εφαρμόζονται κατά την εγκατάσταση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Η κάθε μέθοδος διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά και εν τέλει κρίνει το χρονικό διάστημα εντός του οποίου ολοκληρώνεται το έργο της εγκατάστασης. Κάθε ανεμογεννήτρια, αποτελείται από έξι διακριτά τμήματα (3 πτερύγια, 1 πλήμνη, 1 άτρακτο και 1 πύργο στήριξης) ή επτά τμήματα σε περίπτωση που ο πύργος στήριξης χωρίζεται σε δύο κομμάτια. Έτσι, ανάλογα με τον τρόπο που προ-συναρμολογούνται τα επτά τμήματα στο χώρο εργασιών (λιμάνι της Αλεξανδρούπολης), προκύπτουν πέντε διαφορετικές μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος που είναι γνωστή ως “αυτιά λαγού” (Bunny Ear with Tower in Two Pieces – BE2T), αποδίδει τέσσερα μέρη αφού προ-συναρμολογούνται η άτρακτος, η πλήμνη και τα δύο πτερύγια της ανεμογεννήτριας (πρώτο μέρος) και απομένουν τα δύο τμήματα του πύργου και το τελευταίο πτερύγιο. Τα τέσσερα τμήματα φορτώνονται στο αυτοκινούμενο σκάφος WTIV και συναρμολογούνται με τη βοήθεια του γερανού που διαθέτει,

στο σημείο που έχει καθοριστεί η τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας. Η δεύτερη μέθοδος γνωστή ως Bunny Ear with Tower in One Piece (BE1T), είναι παρόμοια της πρώτης μεθόδου, μόνο που αποδίδει τρία διακριτά μέρη, αφού ο πύργος στήριξης είναι ένα ενιαίο τμήμα. Η τρίτη μέθοδος, ονομάζεται Pre Assembled Rotor (R2T) και αποτελείται από τα τρία πτερύγια που προ-συναρμολογούνται με την πλήμνη (πρώτο μέρος), την άτρακτο και τον πύργο στήριξης χωρισμένο σε δύο τμήματα (συνολικά 4 μέρη). Η τέταρτη μέθοδος αποκαλείται ως Five Pieces Separately (SP5) και προσφέρει συνολικά πέντε τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι ο πύργος στήριξης, το δεύτερο τμήμα είναι η πλήμνη που προ-συναρμολογείται με την άτρακτο και τα υπόλοιπα τρία τμήματα είναι τα τρία πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Η πέμπτη και τελευταία μέθοδος, η οποία έχει επιλεγεί για την εγκατάσταση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης, ονομάζεται Six Pieces Separately (SP6) και αποδίδει συνολικά 6 διακριτά τμήματα. Η πλήμνη προ-συναρμολογείται με την άτρακτο, ο πύργος χωρίζεται σε δύο μέρη και τα υπόλοιπα τρία τμήματα είναι τα τρία πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Συνοπτικά, ολόκληρη η διαδικασία της εγκατάστασης, μπορεί να περιγραφεί από τις εξής επιμέρους φάσεις :

- Φόρτωση των επιμέρους στοιχείων των ανεμογεννητριών στο σκάφος MPI Resolution (Λιμάνι Αλεξανδρούπολης)
- Μεταφορά από το λιμάνι της Αλεξανδρούπολης στη θέση ανάπτυξης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου
- Σταθεροποίηση του σκάφους – ανύψωση πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
- Τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας
- Επαναφορά του σκάφους στην επιφάνεια της θάλασσας
- Αναχώρηση προς την επόμενη τοποθεσία εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας
- Επιστροφή από τη θέση ανάπτυξης του αιολικού πάρκου στο λιμάνι της Αλεξανδρούπολης

Υπολογίζοντας το χρόνο που δαπανάται σε κάθε φάση και επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία έως ότου εγκατασταθούν και οι 60 ανεμογεννήτριες, δύναται να εκτιμηθεί αφενός ο χρόνος που απαιτείται για την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου, αφετέρου η ποσότητα του καυσίμου που καταναλώθηκε από το αυτοκινούμενο σκάφος MPI Resolution. Γενικά το MPI Resolution, διαθέτει συνολικά εγκατεστημένη ισχύ 9,5 MW με μέση κατανάλωση καυσίμου περίπου 195 g diesel ανά kWh καταναλισκόμενης ενέργειας (*Project guide for Marine Applications*, 2002). Δεδομένου πως μια ανεμογεννήτρια (πλήμνη, άτρακτος, πτερύγια, πύργος στήριξης) ζυγίζει συνολικά 535 τόνους και καταλαμβάνει 600 m² χώρο από τη διαθέσιμη επιφάνεια του σκάφους, δύναται να μεταφέρει με τη μέθοδο SP6 πέντε ανεμογεννήτριες τη φορά για εγκατάσταση (δεσμεύοντας 53,5% της μέγιστης μεταφορικής ικανότητας του σκάφους και 93,8% του διαθέσιμου χώρου), πριν χρειαστεί να επιστρέψει στο λιμάνι για να εφοδιαστεί με την επόμενη ομάδα ανεμογεννητριών. Με βάση τα δεδομένα που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 15), η εγκατάσταση των 60 ανεμογεννητριών διαρκεί 1665 ώρες ή 139 ημέρες (με 12 hours/day) και η κατανάλωση καυσίμου εκτιμάται σε 868.170 kg diesel.

Πίνακας 15. Συγκεντρωτικός πίνακας με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του χρόνου και της ποσότητας του καυσίμου που απαιτούνται, για την πλήρη εγκατάσταση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

Αιολικό Πάρκο [Ανεμογεννήτριες]	60	Απόσταση από το λιμάνι [km]	9,3
Vessel	MPI Resolution	Διείσδυση στηριγμάτων στον πυθμένα [m]	5
Μέθοδος Εγκατάστασης	SP6	Air Gap [m]	7,8
Αριθμός Ανυψώσεων από το γερανό	6	Ταχύτητα [km/h]	20
Μεταφορική Ικανότητα Vessel [Ανεμογεννήτριες]	5	Jacking speed [m/min]	0,5
Βάθος Θάλασσας [m]	28	Διάρκεια μιας ανύψωσης από το γερανό [hours]	2

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, υπολογίστηκε ο χρόνος και η ποσότητα του καυσίμου που απαιτείται για την εγκατάσταση των θεμελίων. Πρακτικά, το συγκεκριμένο στάδιο προηγείται της εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Δεδομένου πως η μονοπάσσαλη θεμελίωση και το μεταβατικό τμήμα (transition piece) το οποίο ενώνει τη θεμελίωση με τον πύργο στήριξης, ζυγίζουν 600 τόνους και καταλαμβάνουν 201 m² χώρο από τη διαθέσιμη επιφάνεια του σκάφους, το MPI Resolution είναι ικανό να μεταφέρει 6 μονοπάσσαλους στύλους και 6 μεταβατικά τμήματα τη φορά για εγκατάσταση (καταλαμβάνοντας 72% της μέγιστης μεταφορικής ικανότητας του σκάφους και 75% του διαθέσιμου χώρου), πριν χρειαστεί να επιστρέψει στο λιμάνι για να εφοδιαστεί με την επόμενη ομάδα θεμελίων. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, για την τοποθέτηση 60 θεμελίων θα χρειαστούν 883 ώρες ή 74 ημέρες (12 hours/day) και 547.970 kg diesel. Επομένως, συνολικά για την πλήρη εγκατάσταση του αιολικού πάρκου απαιτούνται περίπου 213 ημέρες και 1.416 τόνους diesel ή αλλιώς 23.602 kg diesel ανά ανεμογεννήτρια. Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού φύλλου Excel.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις που προκαλούνται από την ηλεκτρική διασύνδεση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου και την τοποθέτηση των καλωδίων, η διαδικασία μοντελοποιήθηκε αξιοποιώντας τη βάση δεδομένων Ecoinvent εντός του OpenLCA, για την κατασκευή δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης, μήκους περίπου 78 km. Επιπλέον, περιλαμβάνονται οι εκπομπές από την κατανάλωση καυσίμου ενός “trenching” πλοίου δηλαδή ενός σκάφους που εξειδικεύεται στην τοποθέτηση των υποθαλάσσιων αγωγών.

4.3.2.5. Στάδιο Γ. Λειτουργία και συντήρηση

Η συντήρηση του αιολικού πάρκου, θα εξυπηρετείται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του από το τοπικό λιμάνι της Αλεξανδρούπολης. Η συντήρηση του αιολικού πάρκου, εξαρτάται κυρίως από τον εγκατεστημένο τύπο ανεμογεννήτριας, αλλά σε γενικές γραμμές διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες (Technical Project Description for Offshore Wind Farms (200 MW), 2015).

- Προγραμματισμένη επιθεώρηση και συντήρηση
- Περιοδικές επιθεωρήσεις και έλεγχος
- Έκτακτη μη προγραμματισμένη συντήρηση

Η προγραμματισμένη επιθεώρηση/συντήρηση εστιάζει κυρίως στον έλεγχο και την αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων, λιπαντικών και φίλτρων. Συνήθως, μια ανεμογεννήτρια απαιτεί προγραμματισμένο έλεγχο κάθε έξι μήνες, δηλαδή δύο φορές το χρόνο. Οι περιοδικές επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται σύμφωνα με τις συστάσεις και τις προδιαγραφές του κατασκευαστή των ανεμογεννητριών. Συνήθως λαμβάνουν χώρα, σε περιόδους του έτους που επικρατούν ιδανικές καιρικές συνθήκες, κατά προτίμηση τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι περιοδικές επιθεωρήσεις, περιλαμβάνουν οπτικό έλεγχο ώστε να διαπιστωθεί πως όλα λειτουργούν σύμφωνα με τους κανονισμούς, ανάλυση δειγμάτων λαδιού, έλεγχο των ρουλεμάν, αντικατάσταση των φρένων (τακάκια), και έλεγχο των υδραυλικών συστημάτων. Η έκτακτη μη προγραμματισμένη συντήρηση, αποσκοπεί την επισκευή απρόβλεπτων αστοχιών. Το εύρος αυτής της συντήρησης κυμαίνεται από τη αντικατάσταση δευτερευόντων εξαρτημάτων (π.χ ρουλεμάν) έως την επισκευή ή την αντικατάσταση κύριων εξαρτημάτων όπως η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων ή και τα πτερύγια του ρότορα. Η επισκευή των δευτερευόντων εξαρτημάτων μπορεί να ολοκληρωθεί από το προσωπικό και τα σκάφη που συμμετέχουν στην προγραμματισμένη συντήρηση αλλά σε περίπτωση που απαιτείται η αφαίρεση ή η αντικατάσταση κύριων εξαρτημάτων, τότε μπορεί να χρειαστούν σκάφη παρόμοια με εκείνα που εμπλέκονται στην εγκατάσταση του αιολικού πάρκου.

Οι εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή των ανταλλακτικών εξαρτημάτων, λαμβάνονται υπόψη στο συγκεκριμένο στάδιο. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, κάθε ανεμογεννήτρια, απαιτεί αλλαγή λιπαντικών λαδιών (400 λίτρων) κάθε τέσσερα χρόνια (Gomma et al., 2019). Επίσης, έχει συμπεριληφθεί η κατασκευή τριών επιπλέον ανεμογεννητριών (ρότορας, άτρακτος, πύργος), προκειμένου να καλυφθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κατασκευή των ανταλλακτικών που αντικαθιστούν τα φθαρμένα εξαρτήματα 60 ανεμογεννητριών, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής (5% των συνολικών Α/Γ) (Weinzettel, Reenaas, Solli & Hertwich, 2009).

Πέρα από την επίδραση που έχει η παραγωγή των ανταλλακτικών εξαρτημάτων, εκτιμήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται στην κατανάλωση καυσίμου του χρησιμοποιούμενου στόλου που συμμετέχει σε εργασίες συντήρησης, ακολουθώντας τις παρακάτω βασικές παραδοχές.

- Προγραμματισμένη επιθεώρηση/συντήρηση. Πραγματοποιείται δύο φορές το χρόνο, με τρεις ανεμογεννήτριες να συντηρούνται σε μια ημέρα.

- Έκτακτη μη προγραμματισμένη συντήρηση. Κάθε χρόνο, τρεις ανεμογεννήτριες (5% των συνολικών Α/Γ) απαιτούν εκτεταμένη επισκευή, με μια ανεμογεννήτρια να συντηρείται ανά ημέρα.
- Επιθεώρηση καλωδίων. Τα καλώδια του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, ελέγχονται κάθε δύο χρόνια, με κάθε χιλιόμετρο καλωδίου να επιθεωρείται εντός μιας ώρας.

Για την προγραμματισμένη συντήρηση των ανεμογεννητριών και την επιθεώρηση των καλωδίων, επιλέχθηκε ένα “ταχύπλοο” σκάφος τύπου Damen Twin Axe fcs2610 το οποίο πληροί όλες τις προδιαγραφές για την επίτευξη του έργου. Το συγκεκριμένο σκάφος διαθέτει εγκατεστημένη ισχύ 1.790 kW (*Fast Crew Supplier 2610. Executive Summary., n.d.*), με μέση κατανάλωση καυσίμου 190 g diesel ανά kWh καταναλισκόμενης ενέργειας και μέγιστη ταχύτητα 40 km/h (*Project guide for Marine Applications, 2002*). Σύμφωνα με τους υπολογισμούς, κατά την προγραμματισμένη συντήρηση 60 ανεμογεννητριών σε ορίζοντα 20ετίας, καταναλώνονται 143.658 kg diesel ενώ αντίστοιχα για την επιθεώρηση των καλωδίων σε ορίζοντα 20ετίας καταναλώνονται 11.284 kg diesel. Η έκτακτη μη προγραμματισμένη συντήρηση των ανεμογεννητριών, πραγματοποιείται από ένα αυτοκινούμενο σκάφος WTIV, παρόμοιο με εκείνο που εμπλέκεται στην εγκατάσταση του αιολικού πάρκου και σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, σε διάρκεια 20 ετών καταναλώνονται 264.810 kg diesel. Έτσι, η συντήρηση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης, καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής, απαιτεί περίπου 419,7 τόνους πετρελαίου ή αλλιώς περίπου 7 τόνους πετρελαίου η κάθε ανεμογεννήτρια.

4.3.2.6. Στάδιο Δ. Παροπλισμός

Η διαδικασία του παροπλισμού πραγματοποιείται προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τόσο οι βραχυπρόθεσμες όσο και οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στο περιβάλλον, καθιστώντας παράλληλα το θαλάσσιο χώρο αναλλοίωτο και ασφαλή προς όλους. Οι ανεμογεννήτριες θα παροπλιστούν χρησιμοποιώντας παρόμοια σκάφη με εκείνα που συμμετείχαν κατά τη φάση της εγκατάστασης, ενώ οι εργασίες θα εκτελούνται με αντίστροφη σειρά. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν κατά το στάδιο του παροπλισμού, θεωρήθηκε πως είναι ανάλογες εκείνων που προέκυψαν κατά τη φάση της εγκατάστασης. Ωστόσο, επειδή οι εργασίες του παροπλισμού διαρκούν λιγότερο χρόνο και συχνά διάφορα στοιχεία του αιολικού πάρκου αφήνονται στη θέση τους, όπως το υπόγειο τμήμα της μονοπάσσαλης θεμελίωσης που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα ή ένα τμήμα των καλωδιώσεων, το στάδιο του παροπλισμού είθισται να μην είναι τόσο “ρυπογόνο” όσο η φάση της εγκατάστασης.

4.3.2.6. Τέλος του κύκλου ζωής, διάθεση αποβλήτων και ανακύκλωση

Στο τέλος του κύκλου ζωής τα στοιχεία του αιολικού πάρκου, αφού μεταφερθούν στην ακτή, οδηγούνται σε ειδικούς χώρους και αποσυναρμολογούνται. Η μεταφορά των στοιχείων σε χώρους υγειονομικής ταφής (X.Y.T.A.) και σε ειδικά κέντρα ανακύκλωσης, δεν λαμβάνεται υπόψη στα

πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Οι διαδικασίες που συνδέονται με τη διαχείριση των αποβλήτων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, την ανακύκλωση (Recycling), την εναπόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής (Land-filling) και την αποτέφρωση (Incineration). Αφού αποσυναρμολογηθεί κάθε τμήμα της ανεμογεννήτριας, ένα ορισμένο ποσοστό υλικού πρόκειται να οδηγηθεί σε κάποια από τις τρεις προαναφερθέντες διεργασίες. Τα ποσοστά, καθορίζονται από τη φύση του κάθε υλικού και αναγράφονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Guezuraga et al., 2012).

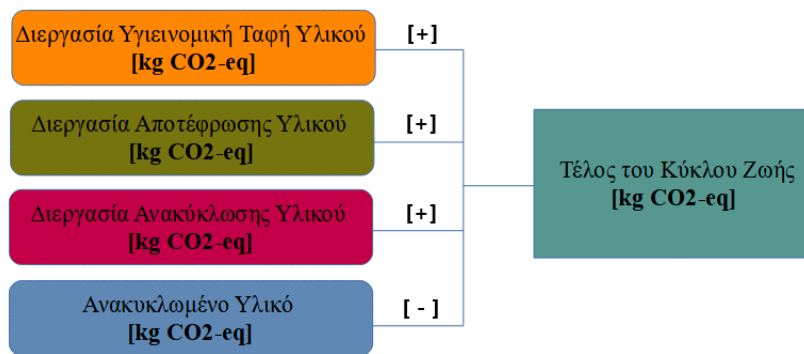
Πίνακας 16. Ποσοστό ανακύκλωσης για κάθε είδος υλικού.

Τύπος Υλικού	Ανακύκλωση	Υγειονομική ταφή	Αποτέφρωση
Χάλυβας (steel)	90 %	10%	0%
Σίδηρος (iron)	90 %	10%	0%
Αλουμίνιο (aluminum)	90 %	10%	0%
Χαλκός (copper)	90 %	10%	0%
Fiberglass	0%	0%	100%
Άλλα πλαστικά	0%	0%	100%
Λιπαντικά (Lubricants)	0%	0%	100%

Και οι τρεις διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων, θεωρούνται διεργασίες υψηλής έντασης άνθρακα και οι συντελεστές εκπομπών ανακτώνται από τη βάση δεδομένων Ecoinvent. Το υλικό που λαμβάνεται μετά τη διαδικασία της ανακύκλωσης, θεωρείται ότι θα διατεθεί ξανά στην αγορά. Σε γενικές γραμμές, το μεγαλύτερο μέρος (>80%) της ανεμογεννήτριας θα ανακυκλωθεί. Το ανακυκλωμένο υλικό αντικαθιστά την ανάγκη για εξόρυξη πρώτων υλών και ως εκ τούτου περιορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την παραγωγή νέων υλικών. Ο ανακυκλωμένος χάλυβας θεωρείται πως αντικαθιστά την παραγωγή σιδήρου (pig iron) ενώ η ανακύκλωση του χαλκού και του αλουμινίου θα αντικαταστήσει τη διαδικασία παραγωγής χαλκού και αλουμινίου αντίστοιχα. Επιπλέον, θεωρείται πως η ποσότητα των μεταλλικών υλικών που συλλέγεται και μπορεί να ανακυκλωθεί είναι (Bonou et al., 2016):

- 50% από τις θεμελιακές δομές και τα υποθαλάσσια καλώδια
- 90% από όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του αιολικού πάρκου

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τις διεργασίες που ακολουθούν στο τέλος του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου, αναπαρίστανται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 19. Διεργασίες που πραγματοποιούνται κατά το τέλος του κύκλου ζωής και ο τρόπος συνεισφοράς της κάθε διεργασίας στο ανθρακικό αποτύπωμα.

4.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του κύκλου ζωής του υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης. Για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αναλύονται εκτενώς οι ρύποι που εκπέμπονται σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, τα κύρια τμήματα του αιολικού πάρκου και οι κατηγορίες των υλικών που συμβάλλουν σε μεγαλύτερο βαθμό στη διαμόρφωση του ανθρακικού αποτυπώματος, καθώς και τα είδη των χημικών ενώσεων που απελευθερώνονται στο περιβάλλον ως προϊόντα των επιμέρους διεργασιών. Με τον όρο ανθρακικό αποτύπωμα, νοείται το άθροισμα όλων των ουσιών που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής. Στη συνέχεια, εκτιμάται η ένταση άνθρακα (Carbon Intensity) του αιολικού πάρκου, η ενσωματωμένη ενέργεια (embodied energy) δηλαδή η πρωτογενής ενέργεια που καταναλώνεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου, καθώς και ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να την αποσβέσει. Τέλος, υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου το αιολικό πάρκο, ως καθαρή πηγή ενέργειας, να αντισταθμίσει τις εκπομπές άνθρακα που εκλύθηκαν στο περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

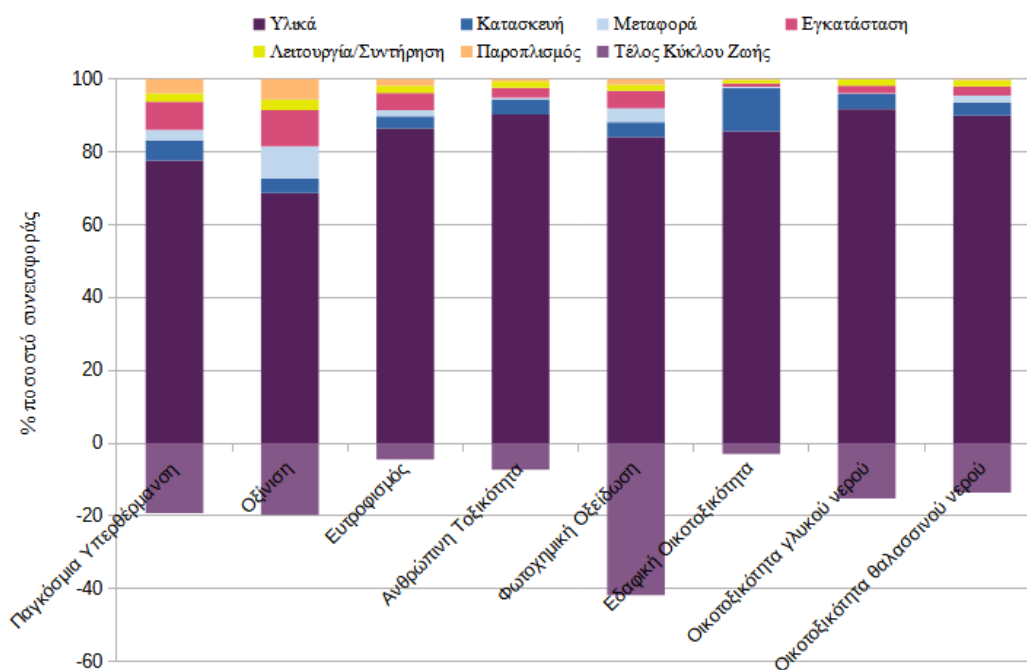
4.4.1. Συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων

Αδιαμφισβήτητα, η φάση της εξόρυξης και της επεξεργασίας των πρώτων υλών (Στάδιο 1), έχει το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης σχετικά με την προκληθέντα περιβαλλοντική ρύπανση, ανεξαρτήτως κατηγορίας περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 17), οι συνολικές εκπομπές άνθρακα ανέρχονται σε 130.658.110 kg CO₂-eq (2.178 t CO₂-eq/ανεμογεννήτρια), με το πρώτο στάδιο να είναι υπεύθυνο για την εκπομπή 13,4 x 10⁷ kg CO₂-eq, δηλαδή για το 83,2 % των συνολικών εκπομπών ισοδύναμου άνθρακα. Σημαντικό μερίδιο ευθύνης έχει και το δεύτερο στάδιο του κύκλου ζωής, ειδικά κατά τη φάση της εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, λόγω της υψηλής κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων (10,6% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq). Στον αντίποδα, το στάδιο της λειτουργίας και συντήρησης (Στάδιο 3), έχει το χαμηλότερο μερίδιο συνεισφοράς με ποσοστό μόλις 2,3% των συνολικών εκπομπών άνθρακα. Βαρύνουσα σημασία φαίνεται να είναι η διεργασία της ανακύκλωσης που

πραγματοποιείται στο τέλος του κύκλου ζωής, αφού επιδρά σε σημαντικό ποσοστό στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του αιολικού πάρκου (- 19,2 %).

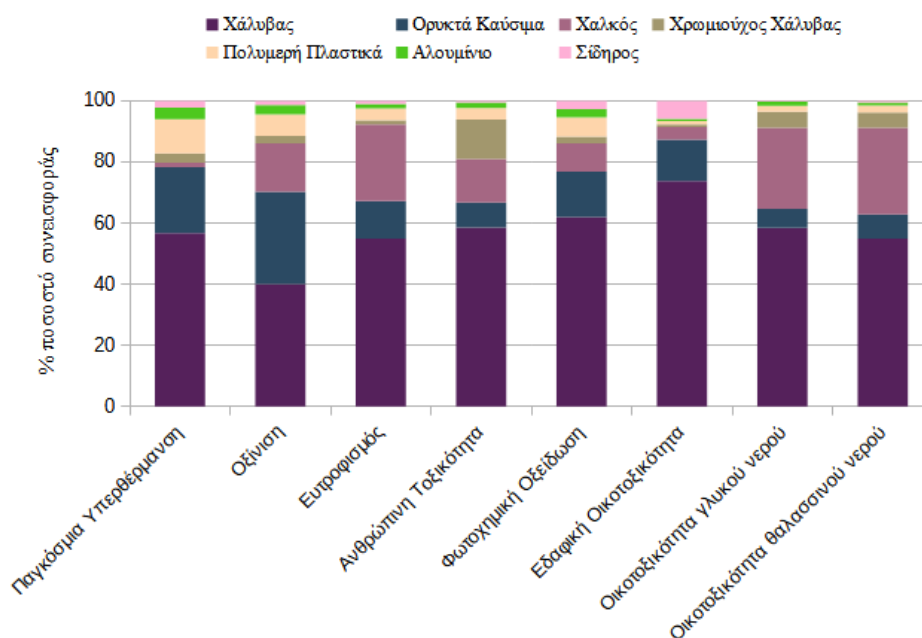
Πίνακας 17. Η ποσότητα ρύπων που εκπέμπεται στο περιβάλλον σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Κατηγορίες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	Μονάδα Μέτρησης	Συνολικά	Στάδιο 1	Στάδιο 2	Στάδιο 3	Στάδιο 4	Τέλος Κύκλου Ζωής
Παγκόσμια Υπερθέρμανση	kg CO2-eq	13,1 x 10 ⁷	13,4 x 10 ⁷	17,1 x 10 ⁶	36,7 x 10 ⁵	63,9 x 10 ⁵	- 31 x 10 ⁶
Οξίνιση	kg SO2-eq	87,8 x 10 ⁴	79,4 x 10 ⁴	20,7 x 10 ⁴	31,4 x 10 ³	61,7 x 10 ³	- 21,5 x 10 ⁴
Ευτροφισμός	kg PO4-eq	55,8 x 10 ⁴	52,4 x 10 ⁴	37,2 x 10 ³	11,6 x 10 ³	10,9 x 10 ³	- 26 x 10 ³
Ανθρώπινη Τοξικότητα	kg 1,4-DCB-eq	59,2 x 10 ⁷	60,3 x 10 ⁷	20,1 x 10 ⁶	11,6 x 10 ⁶	39,4 x 10 ⁵	- 46,4 x 10 ⁶
Φωτοχημική Οξειδωση	kg ethylene-eq	47,6 x 10 ³	72,1 x 10 ³	70,6 x 10 ²	13,5 x 10 ²	12,7 x 10 ²	- 34,2 x 10 ³
Εδαφική Οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB-eq	25,4 x 10 ⁴	25,6 x 10 ⁴	29,8 x 10 ²	26,6 x 10 ²	5,9 x 10 ²	- 78,8 x 10 ²
Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού	kg 1,4-DCB-eq	62,7 x 10 ⁶	70,9 x 10 ⁶	17,1 x 10 ⁵	12,2 x 10 ⁵	10,1 x 10 ⁴	- 11,2 x 10 ⁶
Οικοτοξικότητα του θαλασσινού νερού	kg 1,4-DCB-eq	25,9 x 10 ⁷	28,4 x 10 ⁷	10,4 x 10 ⁶	51,6 x 10 ⁵	67,1 x 10 ⁴	- 40,8 x 10 ⁶



Σχήμα 20. Ποσοστό συνεισφοράς κάθε φάσης του κύκλου ζωής, στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

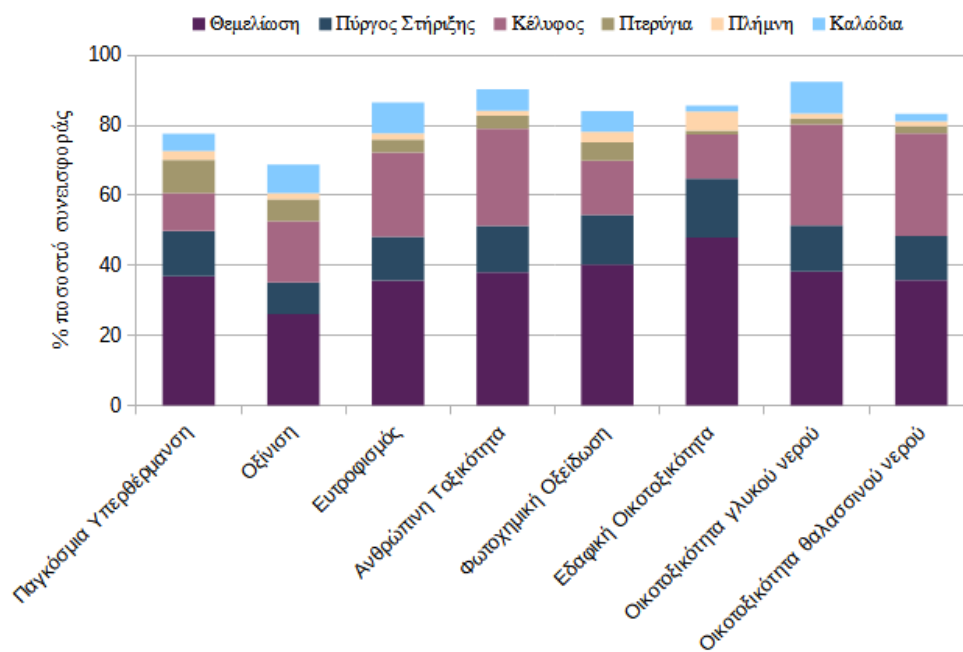
Σε γενικές γραμμές, τα μέρη της ανεμογεννήτριας που ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών εκπομπών, είναι η θεμελίωση, ο πύργος στήριξης και η άτρακτος ή αλλιώς κέλυφος. Ανάλογα με την κατηγορία των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που εξετάζεται, το ποσοστό συνεισφοράς των προαναφερθέντων τμημάτων μεταβάλλεται. Αυτό συμβαίνει, επειδή κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία ως προς το είδος των χημικών στοιχείων και των χημικών ενώσεων που σχηματίζονται κατά την παραγωγική διαδικασία ορισμένων υλικών. Έτσι, παρατηρείται το φαινόμενο, υλικά τα οποία βρίσκονται σε πολύ μικρότερη ποσότητα συγκριτικά με κάποια άλλα, να συμβάλλουν σε εφάμιλλο βαθμό στη διαμόρφωση ορισμένων περιβαλλοντικών δεικτών. Ωστόσο, η παραγωγή του χάλυβα εξακολουθεί να είναι η κυριότερη αιτία ρύπανσης, για όλες τις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και κυρίως για το φαινόμενο της εδαφικής οικοτοξικότητας (73,7% των συνολικών εκπομπών 1,4-DCB), το φαινόμενο της φωτοχημικής οξείδωσης (61,9% των συνολικών εκπομπών αιθυλενίου) και το φαινόμενο της ανθρώπινης τοξικότητας (58,5% των συνολικών εκπομπών 1,4-DCB).



Σχήμα 21. Ποσοστό συνεισφοράς του κάθε υλικού, στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του συνολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

Σχετικά με το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, η πλειονότητα των εκπομπών ισοδύναμου άνθρακα (Σχήμα 21), προκαλείται κατά την παραγωγή του χάλυβα (56,7% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq), ένα υλικό το οποίο συναντάται σε μεγάλες ποσότητες στη μονοπάσσαλη θεμελίωση, στο μεταβατικό τμήμα της θεμελίωσης, στον πύργο στήριξης αλλά και στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, στο τέλος του κύκλου ζωής, η διεργασία της ανακύκλωσης, χάρη στην υψηλή ανακυκλωσιμότητα του χάλυβα, δύναται να αποτρέψει σε σημαντικό βαθμό την πρωτογενή παραγωγή σιδήρου, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας (-19,2% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq). Εξίσου σημαντική, είναι η

συμβολή των ορυκτών καυσίμων (15,6% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq) τα οποία καταναλώνονται από μηχανοκίνητα μέσα, συνήθως υπό τη μορφή πετρελαίου, σε διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής, από τη μεταφορά και την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών έως τη συντήρηση και τον παροπλισμό τους. Ως διεργασία υψηλής έντασης άνθρακα, ακολουθεί η παραγωγή και η επεξεργασία σύνθετων πολυμερών υλικών και εποξικών ρητινών (11,2%) και η παραγωγή του αλουμινίου (3,6%), υλικό το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή του πυρήνα των καλωδίων. Έτσι, τα μέρη της ανεμογεννήτριας που αποτελούν την κυριότερη πηγή ρύπων στην κατηγορία της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (Σχήμα 22), είναι η θεμελιώση (36,9% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq) και έπονται ο πύργος στήριξης (12,9 % των συνολικών εκπομπών CO₂-eq), η άτρακτος (10,9 %), τα πτερύγια των ανεμογεννητριών (9,4 %), τα καλώδια διασύνδεσης (4,9 %) και τέλος η πλήμνη του ρότορα (2,6 %). Ο δείκτης της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (CO₂-eq) διαμορφώνεται κατά κύριο λόγο από τις υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και ακολουθούν με μεγάλη διαφορά οι εκπομπές μεθανίου (CH₄), οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου (N₂O) και οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO).



Σχήμα 22. Ποσοστό συνεισφοράς του κάθε τμήματος, στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

Άλλα φαινόμενα περιβαλλοντικής ρύπανσης, όπως η οικοτοξικότητα του γλυκού νερού, η οικοτοξικότητα του θαλασσινού νερού και ο ευτροφισμός, φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς την παραγωγική διαδικασία του χαλκού. Να σημειωθεί πως το υπό μελέτη υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Αλεξανδρούπολης, εμπεριέχει μια ποσότητα χαλκού περίπου 100 φορές μικρότερη από αυτή του χάλυβα. Έτσι, η συνολική τιμή του δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού και του θαλασσινού νερού (1,4-dichlorobenzene-eq), σε μεγάλο βαθμό αποδίδεται σε υλικά όπως ο

χάλυβας και ο χαλκός (κατά μέσο όρο 56% και 27% των συνολικών εκπομπών 1,4-DCB, αντίστοιχα), η παραγωγή των οποίων εκλύουν μεγάλες ποσότητες χημικών στοιχείων όπως το κοβάλτιο, το βηρύλλιο, το σελήνιο, το βάριο, το θάλλιο και το μολυβδαίνιο. Παρομοίως, η τιμή του δείκτη ευτροφισμού (PO_4 -eq) καθορίζεται από την ύπαρξη φωσφορικών ανιόντων και οξειδίων του αζώτου, χημικές ενώσεις που προκύπτουν επίσης κατά την παραγωγή του χάλυβα και του χαλκού (54,9% και 25,1% των συνολικών εκπομπών PO_4 -eq, αντίστοιχα). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ανάλυση του φαινομένου της οξίνισης. Ο δείκτης της οξίνισης ($kg SO_2$ -eq), οφείλεται κατά βάση στην εκπομπή χημικών ενώσεων όπως το διοξείδιο του θείου (SO_2), το οξείδιο του αζώτου (NO_x) και σε μικρότερο βαθμό στην αμμωνία. Η πλειονότητα αυτών των χημικών ενώσεων προκαλείται κατά την παραγωγή του χάλυβα (40% των συνολικών εκπομπών SO_2 -eq), του χαλκού (15,9% των συνολικών εκπομπών SO_2 -eq) και των πολυμερών πλαστικών (7,2% των συνολικών εκπομπών SO_2 -eq). Ωστόσο, σημαντικό μερίδιο συνεισφοράς, το μεγαλύτερο συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, έχει η καύση ορυκτών καυσίμων (30,2% των συνολικών εκπομπών SO_2 -eq). Ο περιβαλλοντικός δείκτης της ανθρώπινης τοξικότητας (1,4-DCB-eq) διαμορφώνεται κυρίως από τις χημικές ενώσεις του εξασθενούς χρωμίου και του πολυκυκλικού αρωματικού υδρογονάνθρακα καθώς και από το χημικό στοιχείο του αρσενικού, τα οποία προκύπτουν κυρίως κατά τη παραγωγική διαδικασία του χάλυβα, του χαλκού και του χρωμιούχου χάλυβα (56,7%, 14,2% και 12,9% των συνολικών εκπομπών 1,4-DCB, αντίστοιχα). Ακόμα, ο δείκτης της φωτοχημικής οξείδωσης (ethylene-eq) καθορίζεται από την ύπαρξη κυρίως των χημικών ενώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα και του διοξειδίου του άνθρακα, που προκαλούνται κατά τη παραγωγική διαδικασία του χάλυβα και του χαλκού (61,9% και 9,19% των συνολικών εκπομπών ethylene-eq), καθώς και από τη καύση ορυκτών καυσίμων (14,9% των συνολικών εκπομπών kg ethylene-eq). Τέλος, ο δείκτης της εδαφικής οικοτοξικότητας (1,4-DCB-eq) διαμορφώνεται κυρίως από χημικά στοιχεία όπως ο υδράργυρος και το κοβάλτιο, τα οποία αποδίδονται σε μεγάλο ποσοστό στη παραγωγή του χάλυβα (73,7% των συνολικών εκπομπών 1,4-DCB-eq).

4.4.2. Ένταση άνθρακα

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι εκτιμήσεις των συνολικών εκπομπών, παρουσιάζουν ενδιαφέρον μόνο όταν μπορούν να συγκριθούν με αντίστοιχες εκπομπές άνθρακα άλλων μορφών παραγωγής ενέργειας. Το πιο διαδεδομένο μέγεθος που χρησιμοποιείται μεταξύ των ερευνών, είναι η ένταση άνθρακα (Carbon Intensity). Η ένταση άνθρακα υπολογίζεται διαιρώντας τις συνολικές εκπομπές ρύπων που εκλύονται καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής, ως προς συνολική παραχθείσα ενέργεια της μονάδας, δίνοντας μια τιμή σε $g CO_2$ ανά kWh παραγόμενης ενέργειας. Ουσιαστικά εκφράζει την ποσότητα των ρύπων που εκλύονται στο περιβάλλον για την παραγωγή $1 kWh$ ηλεκτρικής ενέργειας από την εξεταζόμενη μονάδα. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Αλεξανδρούπολης, διαθέτει 60 ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ $3,6 MW$ και λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέση ταχύτητα ανέμου είναι $7,5 m/s$, ο συντελεστής δυναμικότητας (C_p) ορίζεται 35%. Επομένως σε ορίζοντα εικοσαετίας εκτιμάται πως το αιολικό πάρκο, θεωρητικά, θα παράξει συνολικά $13.245.120 MWh$. Ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας ενός συστήματος, αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή μεταβλητότητας, εφόσον όπως γίνεται αντιληπτό μπορεί να επηρεάσει άμεσα τις

εκτιμήσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 18), παρουσιάζεται η συνολική ένταση άνθρακα του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και το μέγεθος της συνεισφοράς του κάθε σταδίου.

Πίνακας 18. Η ένταση άνθρακα του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης και το μέγεθος συνεισφοράς του κάθε σταδίου, για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Κατηγορίες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	Μονάδα Μέτρησης (Ανά kWh)	Συνολικά	Στάδιο 1	Στάδιο 2	Στάδιο 3	Στάδιο 4	Τέλος Κύκλου Ζωής
Παγκόσμια Υπερθέρμανση	g CO ₂ -eq	9,86	10,15	1,29	0,28	0,48	- 2,34
Οξίνιση	g SO ₂ -eq	0,066	0,060	0,016	0,002	0,005	- 0,016
Ευτροφισμός	g PO ₄ -eq	0,042	0,040	0,003	0,001	0,001	- 0,002
Ανθρώπινη Τοξικότητα	g 1,4-DCB-eq	44,73	45,54	1,52	0,87	0,30	- 3,50
Φωτοχημική Οξείδωση	g ethylene-eq	0,0036	0,0054	0,0005	0,0001	0,0001	-0,0026
Εδαφική Οικοτοξικότητα	g 1,4-DCB-eq	0,0192	0,0193	0,0002	0,0002	0,00004	- 0,0006
Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού	g 1,4-DCB-eq	4,74	5,35	0,13	0,09	0,01	- 0,85
Οικοτοξικότητα του θαλασσινού νερού	g 1,4-DCB-eq	19,57	21,43	0,79	0,39	0,05	- 3,08

4.4.3. Περίοδος αποπληρωμής της ενσωματωμένης ενέργειας

Ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος που προκύπτει από την ανάλυση του κύκλου ζωής, είναι η ενεργειακή ισορροπία του προϊόντος (Energy Balance). Η ενεργειακή ισορροπία, αναφέρεται αφενός στη συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου, από το στάδιο της κατασκευής έως το στάδιο του παροπλισμού, αφετέρου στη συνολική ενέργεια που παράγει το αιολικό πάρκο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει την εκτίμηση του χρονικού διαστήματος που απαιτείται, προκειμένου το αιολικό πάρκο να αντισταθμίσει τη συνολική ποσότητα ενέργειας που καταναλώθηκε σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής. Η ενέργεια που καταναλώθηκε για τη δημιουργία της αιολικής μονάδας, συχνά αναφέρεται ως ενσωματωμένη ενέργεια (Embodied Energy). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 19) αναγράφεται λεπτομερώς η ενέργεια που καταναλώθηκε σε κάθε φάση του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου. Η ενέργεια που δαπανήθηκε, υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου “Cumulative Energy Demand” εντός του λογισμικού OpenLCA και ανέρχεται συνολικά σε 404.289.728 kWh. Το μεγαλύτερο μέρος της δαπανώμενης ενέργειας (89,3%), προέρχεται από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, αφού μέχρι και σήμερα, οι μεγάλες βιομηχανίες συνεχίζουν να βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα ως κύρια πηγή ενέργειας. Οι μεγαλύτερες απαιτήσεις για ενέργεια, στην πλειονότητα τους, εντοπίζονται στο πρώτο στάδιο του κύκλου ζωής, κατά τη φάση εξαγωγής και επεξεργασίας των πρώτων υλών (75,5 %) και κατά τη φάση της

εγκατάστασης του αιολικού πάρκου (9,9 %). Για τον υπολογισμό του χρόνου “αποπληρωμής” της δαπανώμενης ενέργειας, λαμβάνεται υπόψη η καταναλισκόμενη ενέργεια που προέρχεται μόνο από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ορυκτά καύσιμα, πυρηνική ενέργεια), η οποία ανέρχεται σε 361.173.871,5 kWh. Δεδομένου πως το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Αλεξανδρούπολης, με διάρκεια ζωής 20 έτη, θεωρητικά θα παράξει συνολικά 13.245.120.000 kWh (662,3 GWh/year), ο χρόνος αποπληρωμής εκτιμάται πως θα επιτευχθεί στους 7 πρώτους μήνες λειτουργίας.

Πίνακας 19. Το μέγεθος της συνολικής ενέργειας που καταναλώθηκε σε κάθε στάδιο, καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

Τύπος Ενέργειας	Μονάδα Μέτρησης	Συνολική ποσότητα δαπανώμενης ενέργειας	Εξόρυξη Α' Υλών & Κατασκευή	Μεταφορά	Εγκατάσταση	Λειτουργία & Συντήρηση	Παροπλισμός
Non renewable fossil	kWh	32,4 x 10 ⁷	23 x 10 ⁷	17,2 x 10 ⁶	37,4 x 10 ⁶	12,8 x 10 ⁶	26,4 x 10 ⁶
Non renewable biomass	kWh	15,8 x 10 ³	14,6 x 10 ³	8,1 x 10 ²	2,1 x 10 ²	92,1	66,7
Non renewable nuclear	kWh	36,9 x 10 ⁶	34,4 x 10 ⁶	82,8 x 10 ⁴	82,4 x 10 ⁴	60,4 x 10 ⁴	23,7 x 10 ⁴
Renewable biomass	kWh	88,6 x 10 ⁵	82,5 x 10 ⁵	70,2 x 10 ³	35,6 x 10 ⁴	14,7 x 10 ⁴	32,8 x 10 ³
Renewable water	kWh	31,2 x 10 ⁶	29,1 x 10 ⁶	28,3 x 10 ⁴	12,6 x 10 ⁵	44,6 x 10 ⁴	97,2 x 10 ³
Renewable wind, solar, geothermal	kWh	30,4 x 10 ⁵	28,4 x 10 ⁵	72,6 x 10 ³	50,6 x 10 ³	48,8 x 10 ³	19,8 x 10 ³
Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια	kWh	404.289.728,0					



Σχήμα 23. Απεικονίζεται το ποσοστό της ενέργειας (ανανεώσιμης και μη ανανεώσιμης) που δαπανήθηκε σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, του αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

4.4.3. Περίοδος αποπληρωμής του άνθρακα

Προκειμένου να εκτιμηθεί η συμβολή του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης στην εκπλήρωση των εθνικών στόχων για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, σε αυτή την παράγραφο υπολογίζεται η ποσότητα του ισοδύναμου άνθρακα που αποφεύγεται συνολικά, σε διάρκεια ενός έτους λειτουργίας. Σύμφωνα με το ΔΑΠΕΕΠ, η συνολική ένταση άνθρακα του ενεργειακού μείγματος της ΔΕΗ Α.Ε. κατά το ημερολογιακό έτος 2020, ανέρχεται σε 468,26 g CO₂/kWh παραγόμενης ενέργειας (Διαχειριστής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης [ΔΑΠΕΕΠ], 2021). Ωστόσο, η αιολική ενέργεια αντικαθιστά μόνο μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα (εξαιρείται η πυρηνική ενέργεια). Η ηλεκτρική ενέργεια που διαθέτει η ΔΕΗ στους καταναλωτές της, προέρχεται από διάφορες μορφές ενέργειας με το 66,82% της συνολικής ενέργειας, να αποδίδεται σε ορυκτά καύσιμα όπως ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας, το πετρέλαιο και φυσικό αέριο (312,9 g CO₂/kWh). Από την άλλη πλευρά, η ένταση άνθρακα του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 18, υπολογίστηκε σε 9,86 g CO₂/kWh παραγόμενης ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη πως το αιολικό πάρκο διαθέτει εγκατεστημένη ισχύ 216 MW, σύμφωνα με τους υπολογισμούς, θα δύναται να παράξει ετησίως, 662.256 MWh ηλεκτρική ενέργεια. Επομένως, σε ένα χρόνο λειτουργίας του αιολικού πάρκου, ουσιαστικά θα αποτραπεί η εκπομπή περίπου 200.690.058 kg CO₂-eq. Δεδομένου ότι το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του αιολικού πάρκου υπολογίστηκε σε 130.658.110 kg CO₂-eq (Πίνακας 17), η περίοδος αποπληρωμής του άνθρακα θα επιτευχθεί εντός 238 ημερών λειτουργίας (περίπου 8 μήνες).

Πίνακας 20. Περίοδος αποπληρωμής άνθρακα του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης.

Ένταση άνθρακα αιολικού πάρκου [kg CO ₂ /MWh]	Ένταση άνθρακα ενεργειακού μίγματος ΔΕΗ [kg CO ₂ /MWh]	Μείωση των εκπομπών άνθρακα [kg CO ₂ /MWh]	Ετήσια παραγωγή ενέργειας αιολικού πάρκου [MWh/year]	Αποφευχθέντες εκπομπές άνθρακα ετησίως [kg CO ₂ /year]	Ανθρακικό αποτύπωμα αιολικού πάρκου [kg CO ₂]	Περίοδος αποπληρωμής άνθρακα [Days]
9,86	312,9	303,04	662.256	200.690.058	130.658.110	238

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

5.1. Συμπεράσματα

Η αιολική ενέργεια, στην προσπάθεια που εκτυλίσσεται προκειμένου να επιτευχθεί σημαντική μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με την πάροδο του χρόνου γνωρίζει ολοένα και μεγαλύτερη άνθιση. Θεωρείται ένας από τους πιο τεχνολογικά ώριμους και αποδοτικούς τύπους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αποτελεί μια φυσική και αστείρευτη μορφή ενέργειας, με ήπιες επιπτώσεις τόσο στο φυσικό όσο και ανθρωπογενές περιβάλλον. Οι κυριότερες συνέπειες που προκύπτουν από την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, σχετίζονται με την αλλοίωση που προκαλούν στην αισθητική του τοπίου, την επίδραση που έχουν στην άγρια πανίδα, τις εκπομπές θορύβου και τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι περισσότερες από αυτές τις κατηγορίες επιπτώσεων, με τη θέσπιση ορισμένων κριτηρίων και τη δημιουργία κατάλληλου νομοθετικού πλαισίου, έχουν είτε μετριαστεί είτε εξαλειφθεί.

Σχετικά με την άγρια πανίδα, τα περισσότερα είδη ζώων φαίνεται να προσαρμόζονται στις νέες συνθήκες που εισάγει η παρουσία ενός αιολικού σταθμού παραγωγής ενέργειας. Η μεγαλύτερη ανησυχία των ερευνητών, εντοπίζεται στις θανατηφόρες συγκρούσεις από τις οποίες απειλούνται διάφορα είδη πτηνών και χειροπτέρων. Ωστόσο, κατά γενική ομολογία, οι αιολικοί σταθμοί που χωροθετούνται εκτός προστατευμένων περιοχών υψηλής οικολογικής αξίας, δεν θεωρείται πως συμβάλουν σε σημαντικό βαθμό στη συνολική ανθρωπογενή θνησιμότητα. Στην παρούσα φάση, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, τα χερσαία αιολικά πάρκα, ευθύνονται για τη θανάτωση 0,3 πτηνών ανά GWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ένα μέγεθος σχεδόν είκοσι φορές μικρότερο, από το αντίστοιχο που προκαλείται από συμβατικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων.

Ένα άλλο μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας, αποτελεί ο θόρυβος που προκαλείται κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Παρά την αξιοσημείωτη πρόοδο που έχει επιφέρει η αιολική βιομηχανία στη μείωση των προκαλουμένων θορύβων των σύγχρονων ανεμογεννητριών, ο θόρυβος εξακολουθεί να είναι ένα κρίσιμο ζήτημα για τις τοπικές κοινότητες. Η αντίληψη του θορύβου, εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους (μέγεθος αιολικού πάρκου, απόσταση μεταξύ αιολικού πάρκου και τοπικής κοινότητας, ο τύπος της κοινότητας που επηρεάζεται, οπτική επαφή με το αιολικό πάρκο, ο θόρυβος βάθους) και συχνά αποτελεί βασικό κριτήριο χωροθέτησης των νέων αιολικών μονάδων. Ενδεικτικά, το επίπεδο θορύβου που προκαλείται από τη λειτουργία 10 ανεμογεννητριών σε απόσταση 500 μέτρων, κυμαίνεται από 35 έως 40 dBA. Για το μετριασμό των επιπτώσεων, οι αρμόδιες αρχές ορίζουν είτε μια ελάχιστη απόσταση που απαραίτητως θα πρέπει να απέχει το αιολικό πάρκο από την πλησιέστερη κατοικημένη περιοχή (500 μέτρα για τα δεδομένα της Ελλάδας), είτε μια ανώτερη οριακή στάθμη θορύβου (dBA) που επιτρέπεται να ακουστεί έως την πλησιέστερη κατοικημένη περιοχή (το όριο κυμαίνεται από 35 έως 55 dBA, ανάλογα την περιοχή).

Επιπλέον, η δημιουργία ενός αιολικού πάρκου, θα μπορούσε να ευθύνεται για την πρόκληση ανεπιθύμητων ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων. Οι υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνιών που φαίνεται να είναι περισσότερο ευαίσθητες στην παρουσία των ανεμογεννητριών, είναι τα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, τα μετεωρολογικά ραντάρ, τα συστήματα αεροναυτιλίας και οι υπηρεσίες ραδιοτηλεοπτικών μεταδόσεων. Η ανεμογεννήτρια, λόγω του μεγάλου μεγέθους της και επειδή κατά ένα μεγάλο ποσοστό απαρτίζεται από μεταλλικά υλικά, δρα ως ένας τεράστιος ανακλαστήρας ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. Έτσι, διάφοροι παγκόσμιοι και ευρωπαϊκοί οργανισμοί, ανάλογα με τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε ραντάρ, έχουν ορίσει “ζώνες αποκλεισμού” εντός των οποίων απαγορεύεται η εγκατάσταση αιολικών μονάδων και “ζώνες διαβούλευσης” εντός των οποίων η δημιουργία αιολικού σταθμού, πραγματοποιείται κατόπιν συνεννόησης με τους αρμόδιους υπευθύνους.

Όσον αφορά τις αισθητικές επιπτώσεις, ο οπτικός αντίκτυπος θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα αρνητικά χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας και συχνά, αποτελεί πεδίο σφοδρής αντιπαράθεσης μεταξύ των μελών της εκάστοτε κοινότητας. Ένα μέρος του πληθυσμού, παρότι αναγνωρίζουν πως υπάρχει αδήριτη ανάγκη να διαφοροποιηθούν οι ενεργειακοί μας πόροι και να στραφούμε προς καθαρότερες πηγές ενέργειας, εξακολουθούν να τάσσονται εναντίον στην ανάπτυξη αιολικών μονάδων στην ευρύτερη περιοχή τους. Ο κύριος λόγος σχετίζεται με το γεγονός πως ορισμένοι, αντιλαμβάνονται τις ανεμογεννήτριες ως ογκώδεις άκομμες ενοχλητικές μηχανές, που αλλοιώνουν και υποβαθμίζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των τοπίων, μετατρέποντας τα σε βιομηχανικές ζώνες. Η λύση, προκειμένου να περιοριστούν σε μεγάλο βαθμό πολλά από τα αρνητικά χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας, θα μπορούσε να βρίσκεται στη στροφή προς την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, συνήθως κατασκευάζονται σε θαλάσσιες περιοχές που βρίσκονται αρκετά μακριά από το ευρύ κοινό και σαφώς είναι πολύ πιο δύσκολα προσβάσιμες.

Γενικά, η υπεράκτια αιολική ενέργεια, σε παγκόσμιο επίπεδο, εξακολουθεί να θεωρείται ένας “νεοεισερχόμενος” τύπος πράσινης ενέργειας ενώ το μέγεθος των δυνητικών επιπτώσεων δεν έχει αποτυπωθεί πλήρως. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του θαλάσσιου οικοσυστήματος είτε με θετικό είτε με αρνητικό τρόπο, καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής τους και κυρίως κατά το στάδιο της εγκατάστασης και της λειτουργίας τους. Σε αρκετές περιπτώσεις, έχει παρατηρηθεί ο χώρος ανάπτυξης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, να λειτουργεί ως “βιολογικό καταφύγιο” συμβάλλοντας έτσι στην ενίσχυση του τοπικού οικοσυστήματος. Η περιοχή εντός του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, αφενός αποτρέπει σε απόλυτο βαθμό την τέλεση αλιείας βιομηχανικής κλίμακας παρέχοντας συνθήκες προστασίας στα θαλάσσια είδη, και αφετέρου προσφέρει νέα τεχνητά ενδιαιτήματα που κατανέμονται κατακόρυφα σε ολόκληρο το εύρος βάθους, συνθέτοντας έναν ομοιόμορφο βιότοπο σε περιοχές όπου συνήθως δε υπάρχουν παρόμοιες σκληρές φυσικές επιφάνειες. Στον αντίποδα, η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, ανάλογα πάντα με το τύπο της θεμελίωσης που χρησιμοποιείται, δεσμεύει μια έκταση η οποία ισοδυναμεί σε απώλεια φυσικών ενδιαιτημάτων. Επιπλέον, ο ισχυρός θόρυβος που προκαλείται κατά την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών και κυρίως κατά την εγκατάσταση της μονοπάσσαλης θεμελίωσης, μπορεί να τραυματίσει θανάσιμα τους θαλάσσιους οργανισμούς που δραστηριοποιούνται κοντά στο χώρο εργασιών ή να οδηγήσει στον προσωρινό ή και μόνιμο εκτοπισμό τους. Παράλληλα, η στροβιλώδης χαοτική ροή που αναπτύσσεται

καθώς τα θαλάσσια ρεύματα διέρχονται από το βυθισμένο τμήμα της ανεμογεννήτριας, μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο της ιζηματοπόθεσης, δηλαδή το σχηματισμό “νεφών” στερεάς σωματιδιακής ύλης από τα ιζήματα του πυθμένα, τα οποία εκτείνονται σε απόσταση αρκετών χιλιομέτρων. Το φαινόμενο της ιζηματοπόθεσης είναι ικανό να οδηγήσει στη ραγδαία μεταβολή της βιοποικιλότητας ενός οικοτόπου και να διαταράξει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των οικοσυστημάτων.

Όμως, πέρα από την περιορισμένη επίδραση που ασκεί η αιολική ενέργεια τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που διαθέτει και την καθιστά ως την πλέον προτιμώμενη και ελκυστική επιλογή ηλεκτροπαραγωγής, είναι το χαμηλό ανθρακικό της αποτύπωμα. Η αλήθεια είναι πως η αιολική ενέργεια δεν αποτελεί μια μορφή ενέργειας που είναι ολοκληρωτικά απαλλαγμένη από εκπομπές ρύπων. Αέριοι ρύποι παράγονται όταν οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται, εγκαθίστανται, συντηρούνται και παροπλίζονται. Ωστόσο, οι εκπομπές που εκλύονται καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής, είναι σημαντικά μικρότερες και λιγότερο μεταβαλλόμενες από τις αντίστοιχες εκπομπές άλλων διαθέσιμων ανανεώσιμων ή συμβατικών πηγών ενέργειας. Η μέθοδος που εφαρμόζεται προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί το μέγεθος του ανθρακικού αποτυπώματος, είναι γνωστή ως ανάλυση κύκλου ζωής. Αποτελεί μια από τις πιο ολοκληρωμένες μεθόδους αξιολόγησης της αειφορίας μιας παραγωγικής διαδικασίας και καλύπτει κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, από την προμήθεια και την επεξεργασία πρώτων υλών, έως τη χρήση του τελικού προϊόντος και την επεξεργασία που υφίσταται κατά τη λήξη της ωφέλιμης ζωής του. Μερικά από τα πιο σημαντικά μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση του κύκλου ζωής μιας αιολικής μονάδας, είναι η ένταση άνθρακα (Carbon Intensity) και η περίοδος αποπληρωμής του άνθρακα (Carbon Payback Period). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ένταση άνθρακα της αιολικής ενέργειας, ανέρχεται περίπου σε 11 g CO₂/kWh παραγόμενης ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, η ένταση άνθρακα του λιθάνθρακα είναι 90 φορές μεγαλύτερη και του φυσικού αερίου 40 φορές μεγαλύτερη, από την αντίστοιχη της αιολικής ενέργειας. Επιπλέον, η αποπληρωμή του άνθρακα, δηλαδή το χρονικό διάστημα που απαιτείται προκειμένου οι εκπομπές που εκτοπίζονται από την αιολική ενέργεια, να αντισταθμίσουν τις εκπομπές που προκλήθηκαν κατά τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου, επιτυγχάνεται σύμφωνα με τις εκτιμήσεις εντός 6 έως 24 μηνών λειτουργίας στην περίπτωση των χερσαίων αιολικών πάρκων και από 5 έως 12 μήνες στην περίπτωση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Ο υπολογισμός των “εκτοπισμένων” εκπομπών, ένα μέγεθος το οποίο καθορίζει και το διάστημα αποπληρωμής του άνθρακα, αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από πολλές παραμέτρους (ενεργειακό μείγμα, αιολικό δυναμικό, οριακές εκπομπές, κυρώσεις απόδοσης). Έτσι, η τρέχουσα πρακτική που εΐθισται να εφαρμόζεται μεταξύ των ακαδημαϊκών ερευνών, είναι να υπολογίζονται οι αποφευχθέντες εκπομπές με βάση τις μέσες εκπομπές ολόκληρου του δικτύου αξιοποιώντας ετήσια στοιχεία.

Τέλος, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκε ανάλυση κύκλου ζωής για τη μελέτη περίπτωσης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης. Το εν λόγω αιολικό πάρκο, πρόκειται να αποτελέσει το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Ελλάδας. Θα διαθέτει συνολική εγκατεστημένη ισχύ της τάξεως των 216 MW και θα αποτελείται από 60 ανεμογεννήτριες (ενδεχομένως τύπου Siemens SWT-3,6-120) με ονομαστική ισχύ 3,6 MW η καθεμία. Η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στην τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, ανέρχεται

περίπου σε 7,5 m/s. Έτσι, η συνολική ποσότητα ενέργειας που καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μεταφοράς και μια μέση διαθεσιμότητα του αιολικού πάρκου ίση με 98%, υπολογίζεται πως θα είναι 662.256 MWh/year. Παράλληλα, σύμφωνα και με τις κατευθυντήριες γραμμές της διαθέσιμης βιβλιογραφίας, η ωφέλιμη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου, ορίστηκε στα 20 έτη λειτουργίας. Έτσι, θεωρητικά η συνολική ποσότητα ενέργειας που δύναται να παράξει καθ' όλη τη διάρκεια ζωής, ανέρχεται σε 13.245.120 MWh. Αρχικά, σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που ενδεχομένως να προκύψουν στην ευρύτερη περιοχή, ιδιαίτερης προσοχής χρίζει το γεγονός πως η θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, αν και δεν ανήκει εντός προστατευόμενης περιοχής Natura 2000, βρίσκεται αρκετά κοντά στο Εθνικό Υγροτοπικό Πάρκο Δέλτα Έβρου, στο οποίο απαντώνται πολλά σπάνια και απειλούμενα είδη πτηνών. Να σημειωθεί πως η εν λόγω περιοχή, αποτελεί μεταναστευτικό διάδρομο για πολλά είδη αποδημητικών πτηνών και χειροπτέρων. Επιπλέον, η θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, είναι πιθανό να φιλοξενεί λειμώνες Ποσειδώνιας, ένα ενδημικό θαλάσσιο φυτό της Μεσογείου που προστατεύεται από διεθνείς συμβάσεις και την ευρωπαϊκή νομοθεσία (Σύμβαση της Βέρνης, Συνθήκη της Βαρκελώνης). Μια άλλη παράμετρος που θα πρέπει να εξεταστεί, είναι η παρουσία του αερολιμένα Αλεξανδρούπολης “Δημόκριτος” το οποίο θα απέχει απόσταση περίπου 6 χιλιομέτρων από το υπό μελέτη υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Επομένως, κρίνεται απαραίτητο να διασφαλιστεί σύμφωνα πάντα με τις οδηγίες των υπευθύνων της εναέριας επιτήρησης, η άρτια λειτουργία του ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Όσον αφορά τις επιπτώσεις που θα έχει η ανάπτυξη του αιολικού πάρκου στους κατοίκους της Αλεξανδρούπολης, εκτιμάται πως θα είναι αρκετά περιορισμένες έως και μηδαμινές, λόγω του ότι το αιολικό πάρκο θα αναπτυχθεί σε μια περιοχή με απόσταση μεγαλύτερη των 5 χιλιομέτρων από την πλησιέστερη κατοικία.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση κύκλου ζωής, για την κατηγορία της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης ανέρχεται σε 130.658.110 kg CO₂-eq (2.178 t CO₂-eq/ανεμογεννήτρια), με το πρώτο στάδιο, το οποίο περιγράφει την παραγωγική διαδικασία και την κατασκευή όλων των στοιχείων του αιολικού πάρκου, να είναι υπεύθυνο για το 83,2% των συνολικών εκπομπών ισοδύναμου άνθρακα. Εξίσου σημαντικό ρόλο, έχει και το δεύτερο στάδιο του κύκλου ζωής, ειδικά κατά τη φάση της εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, λόγω της υψηλής κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων (10,6% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq). Στις εκπομπές άνθρακα, συνυπολογίστηκε και η διαδικασία της ανακύκλωσης που πραγματοποιείται κατά το τέλος του κύκλου ζωής. Το ανακυκλωμένο υλικό, αντικαθιστά την ανάγκη για εξαγωγή νέων πρώτων υλών, γεγονός που αποτρέπει την εκπομπή 30.955.140 kg CO₂-eq, επιφέροντας μια μείωση 19,2% στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του αιολικού πάρκου. Έτσι, η ένταση άνθρακα του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης, ανέρχεται σε 9,86 g CO₂-eq/kWh. Η πλειονότητα των εκπομπών ισοδύναμου άνθρακα, προκαλείται κατά την παραγωγή διαδικασία του χάλυβα (56,7% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq). Εξίσου σημαντική, είναι η συμβολή των ορυκτών καυσίμων (15,6% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq) τα οποία καταναλώνονται από μηχανοκίνητα μέσα, κυρίως υπό τη μορφή πετρελαίου και ακολουθεί η παραγωγή σύνθετων πολυμερών υλικών και εποξικών ρητινών (11,2%) και η παραγωγή του αλουμινίου (3,6%). Έτσι, τα μέρη της ανεμογεννήτριας που αποτελούν την κυριότερη πηγή ρύπων στην κατηγορία της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, είναι η θεμελιακή δομή

(36,9% των συνολικών εκπομπών CO₂-eq) και έπονται ο πύργος στήριξης (12,9 % των συνολικών εκπομπών CO₂-eq) και η άτρακτος των ανεμογεννητριών (10,9 % των συνολικών εκπομπών CO₂-eq).

Η ενέργεια που καταναλώνεται (embodied energy) καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της αιολικής μονάδας εκτιμάται σε 404.289.728 kWh. Οι μεγαλύτερες απαιτήσεις για ενέργεια, στην πλειονότητα τους, εντοπίζονται στο πρώτο στάδιο του κύκλου ζωής, κατά τη φάση εξόρυξης και επεξεργασίας των πρώτων υλών (75,5 %). Ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου το αιολικό πάρκο να αποσβέσει την ενέργεια που δαπανάται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, εκτιμάται σε 7 μήνες λειτουργίας. Ακόμα, σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσίευσε το ΔΑΠΕΕΠ, η μέση ένταση άνθρακα του ενεργειακού μείγματος της ΔΕΗ για το 2020, διαμορφώνεται σε 468,26 g CO₂/kWh με το 66,82% της παρεχόμενης ενέργειας να αποδίδεται σε ορυκτά καύσιμα όπως ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας, το πετρέλαιο και φυσικό αέριο (312,9 g CO₂/kWh). Έτσι η αποπληρωμή του ανθρακικού αποτυπώματος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου της Αλεξανδρούπολης, θα επιτευχθεί εντός 238 ημερών λειτουργίας (περίπου 8 μήνες).

5.1. Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Εντός της τρέχουσας δεκαετίας αναμένεται η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων σε τοποθεσίες που βρίσκονται πολύ μακριά από την ακτή. Τα πλωτά αιολικά πάρκα, αποτελούν μια εντελώς καινούργια πτυχή της αιολικής ενέργειας ενώ μέχρι και σήμερα δεν έχουν διατεθεί για εμπορική χρήση. Θα παρουσίαζε μεγάλο ενδιαφέρον να εξεταστεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός εγχώριου εγχειρήματος για τη δημιουργία πλωτού υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Τα χαρακτηριστικά ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου πλωτής θεμελίωσης, διαφέρουν αρκετά από τα αντίστοιχα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου σταθερής θεμελίωσης. Αναφορικά, οι κυριότερες διαφορές εντοπίζονται από τις κατηγορίες και τις ποσότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών έως το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό το οποίο αναμένεται να είναι σημαντικά υψηλότερο, τη μέθοδο εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, την παρουσία υπεράκτιου μετασχηματιστή ο οποίος κρίνεται απαραίτητος, τον τρόπο συντήρησης των ανεμογεννητριών αλλά και τα είδη των αξιοποιούμενων μέσων. Να σημειωθεί πως τον τελευταίο καιρό πραγματοποιούνται προσπάθειες προκειμένου να διαμορφωθεί το θεσμικό πλαίσιο για την ανάπτυξη πλωτών αιολικών πάρκων στην Ελλάδα.

Βιβλιογραφία

- Ackermann, T. (2012). *Wind Power in Power Systems* (2nd ed.). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Allison, T.D., Diffendorfer, J.E., Baerwald, E.F., Beston, J.A., Drake, D., Hale, A.M., Hein, C.D., Huso, M.M., Loss, S.R., Lovich, J.E., Strickland, M.D., Williams, K.A. & Winder, V.L. (2019). *Issues in ecology: Impacts to wildlife of wind energy siting and operation in the United States*. (Report No.21). Washington, DC: Ecological Society of America.
- Angulo, I., de la Vega D., Cascon, I., Canizo, J., Wu, Y., Guerra, D. & Angueira, P. (2014). Impact analysis of wind farms on telecommunication services. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32 (C), 84-99. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.055
- Arnett, E.B., Inkley, D.B., Johnson, D.H., Larkin, R.P., Manes, S., Manville, A.M., Mason, R., Morrison, M., Strickland, M. & Thresher, R. (2007). Impacts of wind energy facilities on wildlife and wildlife habitat. Wildlife Society Technical Review 07-2, The Wildlife Society. Bethesda, Maryland, USA.
- Beig, A. R., & Muyeen, S.M. (2016). Wind energy. In: M. H. Rashid (Eds), *Electric Renewable Energy Systems*. Vol 4. 60-77. Oxford: Elsevier
- Bhandrari, R., Kumar, B., & Mayer, F. (2020). *Life cycle greenhouse gas emission from wind farms in reference to turbine sizes and capacity factors*. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123385. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123385
- Bishop, I.D. & Miller, D.R. (2007). Visual assessment of off-shore wind turbines: The influence of distance, contrast, movement and social variables. *Renewable Energy*, 32(5), 814-831. doi: 10.1016/j.renene.2006.03.009
- Bolton, R.H. (2007). Evaluation of Environmental Shadow Flicker Analysis for “Dutch Hill Wind Power Project”.
- Bonou, A., Laurent, A., & Olsen, S.I. (2016). *Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application*. *Applied Energy*, 180, 327-337. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.058
- Cao, W., Xie, Y., & Tan, Z. (2012). *Wind Turbine Generator Technologies*. *Advances in Wind Power*. Doi: 10.5772/51780
- Chapman, S. J. (2009). *Ηλεκτρικές Μηχανές* (4nd ed.). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ

- Chipindula, J., Botlaguduru, V., Du, H., Kommalapati, R., & Huque, Z. (2018). *Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. Sustainability, 10(6), 2022.* doi:10.3990/su10062022
- Choi, D.Y., Wittig, T.W., & Kluever, B.M. (2020). An evaluation of bird and bat mortality at wind turbines in the Northeastern United States. *PloS ONE, 15(8).* doi:10.1371/journal.pone.0238034
- Crawford, R. H. (2009). *Life Cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9), 2653-2660.* doi: 10.1016/j.rser.2009.07.008
- Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W.N. & Huang, Z. (2015). Environmental issues associated with wind energy: A review. *Renewable Energy, 75, 911-921.* doi: 10.1016/j.renene.2014.10.074
- Dalla Longa, F., Kober, T., Badger, J., Volker, P., Hoyer-Klick, C., Hidalgo, I., Medarac, H., Nijs, W., Politis, S., Tarvydas, D. & Zucker, A. (2018). *Wind potentials for EU and neighbouring countries: Input datasets for the JRC-EU_TIMES Model.* EUR 29083 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: 10.2760/041705
- Danish Energy Agency (2013). *Key Environmental Issues-a Follow-up.*
- Degraer, S., Carey, D.A., Coolen, J.W.P., Hutchison, Z.L., Kerckhof, F., Rumes, B. & Vanaverbeke, J. (2020). Offshore Wind Farm Artificial Reefs Affect Ecosystem Structure and Functioning: A Synthesis. *Oceanography, 33(4), 48-57.* doi: 10.5670/oceanog.2020.405
- Dolan, S. L., & Heath, G. A. (2012). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Utility-Scale Wind Power. Journal of Industrial Ecology, 16, S136-S154.* doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00464.x
- Draget, E. (2014). *Environmental Impacts of Offshore Wind Power Production in the North Sea: A Literature Overview.* WWF-World Wide Fund For Nature, Oslo, Norway.
- Environment and Climate Change Canada's (2018). *Overview of wind turbine interference with weather radar: Protectiong Environment and Climate Change Canada's weather radar monitoring.* Canada: Author
- EUROCONTROL (2014). *How to Assess the Potential Impact of Wind Turbines on Surveillance Sensors-Ed.1.2.* Brussels: Author

- European Commission (2020). *Guidance document on wind energy developments and EU nature legislation*. Brussels: Author
- Gomaa, M. R., Rezk, H., Mustafa, R. J., & Al-Dhaifallah, M. (2019). *Evaluating the Environmental Impacts and Energy Performance of a Wind Farm System Utilizing the Life-Cycle Assessment Method: A Practical Case Study*. *Energies*, 12, 3263. doi: 10.3390/en12173263
- Guezuraga, B., Zauner, R., & Polz, W. (2012). *Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines*. *Renewable Energy*, 37(1), 37-44. doi: 10.1016/j.renene.2011.05.008
- Gupta, A. K., Bhushan, H., & Samuel, P. (2013). *Generator Topologies with Power Electronics Converters for a Wind Energy Conversion System: A Review*. *ResearchGate*.
- Ioannidis, R., & Koutsoyiannis, D. (2020). *A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact*. *Applied Energy*, 276(5):115367. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115367
- Kaldellis, J.K., Apostolou, D., Kapsali, M. & Kondili, E. (2016). *Environmental and social footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart*. *Renewable Energy*, 92, 543-556. doi: 10.1016/j.renene.2016.02.018
- Komusanac, I., Brindley, G., & Fraile, D. (2020). *Wind energy in Europe in 2019: Trends and statistics*. Bryssels, Belgium: Wind Europe.
- Langston, R.H.W. & Pullan, J.D. (2003). *Windfarms and birds: an analysis of the effects of wind farms on birds, and guidance on environmental assessment criteria and site selection issues*. *Report T-PVS/Inf (2003) 12, BirdLife international to the Council of Europe, Bern Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats*.
- Mbistrova, A., & Pineda, I. (2017). *Local impact, global leadership: The impact of wind energy on jobs and the EU economy*. Bryssels, Belgium: Wind Europe.
- National Renewable Energy Laboratory. (2013). *Wind LCA Harmonization*. Washington DC: U.S. Department of Energy. Διαθέσιμο στο: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57131.pdf>
- Oh, K.Y., Nam, W., Ryu, M.S., Kim, J.Y. & Epureanu, B.I. (2018). *A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 16-36. doi: 10.1016/j.rser.2018.02.005
- Platt, R., Roy, O. F., & Gardner, P. (2012). *Beyond the Bluster. Why Wind Power is an Effective Technology*. Bryssels, London: Institute for Public Policy Research/

- Poursanidis, D. (2019). *Ποσειδώνια (Posidonia oceanica) – Τα θαλασσινά λιβάδια*. doi: 10.13140/RG.2.2.34798.66887
- Radio Advisory Board of Canada & Canadian Wind Energy Association (2009). Technical Information and Coordination Process Between Wind Turbines and Radiocommunication and Radar Systems. Canada: Author.
- Rydell, J., Engstrom, H., Hedenstrom, A., Larsen, J.K., Pettersson, J. & Green, M. (2012). *The effect of wind power on birds and bats: A synthesis*. (Report No.6511). The Swedish Environment Protection Agency. Bromma: Swedish.
- Saad, M. (2014). Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbine. *IOSR Journal of Engineering*, 4(8), 27-30. doi: 10.9790/3021-04822730
- Saidur, R., Rahim, N.A., Islam, M.R. & Solangi, K.H. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2423-2430. doi:10.1016/j.rser.2011.02.024
- Shaitami, O. R. (2020). Wind Energy. *ResearchGate*.
- Smoucha, E. A., Fitzpatrick, K., Buckingham, S., & Knox, O. G. G. (2016). *Life Cycle Analysis of the Embodied Carbon Emissions from 14 Wind Turbines with Rated Powers between 50 kW and 3.4 MW*. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 6(4). doi: 10.4172/2090-4541.1000211
- Spyridonidou, S., Vagiona, D. G., & Loukogeorgaki, E. (2020). *Strategic Planning of Offshore Wind Farms in Greece*. *Sustainability*, 12(3), 905. doi: 10.3390/su12030905
- Stavrakakis, G. (2012). *Electrical Parts of Wind Turbines*. In: A. Sayigh (Eds), *Comprehensive Renewable Energy*. Vol 2. pp. 269-328. Oxford: Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00211-0
- Technical Project Description for Offshore Wind Farms (200 MW) (2015). Denmark: Energinet.dk. Διαθέσιμο στο: <https://mst.dk/media/134813/offshore-technical-project-description-generic-vestershav-syd-april-2015.pdf>
- Tempel, J.V.D., Zaaier, M.B. & Subroto, H. (2004). The effects of Scour on the design of Offshore Wind Turbines. Delft University of Technology, Netherlands.
- Thomson, R. C., & Harrison, G. P. (2015a). Life Cycle Costs and Carbon Emissions of Onshore Wind Power. *A ClimateXChange report*, Scotland.

- Thomson, R. C., & Harrison, G. P. (2015b). Life Cycle Costs and Carbon Emissions of Offshore Wind Power. *A ClimateXChange report*, Scotland.
- Tsai, L., Kelly, J.C., Simon, B. S., Chalot, R.M., & Keoleian, G.A. (2016). *Life Cycle Assessment of Offshore Wind Farm Siting: Effects of Locational Factors, Lake Depth, and Distance from Shore*. *Journal of Industrial Ecology*, 20(6), 1370-1383. doi:10.1111/jiec.12400
- U.S. Department of Defense. (2006). *The Effect of Windmill Farms on Military Readiness*. Virginia: Author.
- Vestas, (2006). Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines. Vestas Wind Systems A/S, Alsvej 21, 8900 Randers, Denmark.
- Vestas, (2011). Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V80-2.0MW Gridstreamer Wind Plant. Vestas Wind Systems A/S, Alsvej 21, 8900 Randers, Denmark.
- Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C., & Hertwich, E. G. (2009). *Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine*. *Renewable Energy*, 34(3), 742-747. doi:10.1016/j.renene.2008.04.004
- Wheatley, J. (2013). *Quantifying CO2 savings from wind power*. *Energy Policy*, 63, 89-96. doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.123
- WWF-France. (2019). *Safeguarding marine protected areas in the growing Mediterranean blue economy. Recommendations for the offshore wind energy sector*. PHAROS4MPAs project.
- WWF-Ελλάς. (2013). *Αιολικά Πάρκα στη Θράκη: Αναθεωρημένη Πρόταση Ορθής Χωροθέτησης του WWF Ελλάς*. Δαδιά-Αθήνα, Ελλάδα.
- Ανδρίτσος, Ν. (2008). *Ενέργεια και Περιβάλλον (Διδακτικές σημειώσεις)*. Διαθέσιμο στο: http://users.auth.gr/users/8/3/010438/public_html/tdk/Teaching/BOOK_1.pdf
- Γεωργιακάκης, Π. & Παπαδάτου Ε. (2011). Επιπτώσεις της λειτουργίας των αιολικών πάρκων της Θράκης στα Χειρόπτερα (νυχτερίδες) κατά την περίοδο Ιουλίου 2008 – Αυγούστου 2010. WWF Ελλάς, Αθήνα.
- ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΑΠΕ ΚΑΙ ΕΓΓΥΗΣΕΩΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ, (2021). *ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ ΠΡΟΜΗΘΕΥΤΩΝ 2020*. Διαθέσιμο στο: https://www.dapeep.gr/wp-content/uploads/2021/07/ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ%20ΜΕΙΓΜΑ%20ΠΡΟΜΗΘΕΥΤΩΝ_2020%20%281%29.pdf?_t=1626943037

- Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος. (2020). *Κλιματική αλλαγή*. Διαθέσιμο στο: <https://www.eea.europa.eu/el/themes/climate/intro>
- Ευρωπαϊκό Συμβούλιο. Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2021). *Συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή*. Διαθέσιμο στο: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>
- Θεοδώρου, Μ., Αντωνίου, Α., Ρούσος, Ι., & Χατζηευθυμίου, Μ. (2010, Νοέμβριος 18). Μελέτη εκτίμησης επιπτώσεων στο περιβάλλον από την κατασκευή και λειτουργία αιολικού πάρκου ισχύος 1 MW, στην επαρχία Λευκωσίας. *Υπουργείο Γεωργίας Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος*.
- Κουτσούμπας, Δ. (2003). Βενθικά Οικοσυστήματα. (Σημειώσεις). Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Ελλάδα.
- Μουσιόπουλος, Ν., Ντζιαχρήστος, Λ., & Σλίνη, Θ. (2015). *Τεχνική Προστασίας Περιβάλλοντος-Αρχές Αειφορίας*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Γεωλογίας. (n.d.) *Έλη και Τύρφονες*. Πάτρα: Συγγραφέας. Διαθέσιμο στο: <http://www.geology.upatras.gr/index.php/el/research-researchers-of-energy-raw-materials/research-objects-research-team-of-energy-raw-materials/elves-and-tortoises-research-objects-research-team-of-energy-raw-materials>
- Παπασταματίου, Π., Λαδακάκος, Π., Βλαμάκης, Α. & Αγγελοπούλου, Α. (2009). Ανάλυση επιπτώσεων από την εγκατάσταση και λειτουργία αιολικών πάρκων, ΕΛΕΤΑΕΝ, Αθήνα.

Ιστοσελίδες

- Αβουκάτου, Ν. (2018, Ιούνιος 14). *Τα βιοαπόβλητα της χώρας μπορούν να ηλεκτροδοτήσουν 740.000 νοικοκυριά*. GREENAGENDA.gr. Ανακτήθηκε από <https://greenagenda.gr/τα-βιοαπόβλητα-της-χώρας-μπορούν-να-ηλ/>
- *Causes of climate change*. (n.d.). Met Office. Ανακτήθηκε από <https://www.metoffice.gov.uk/weather/climate-change/causes-of-climate-change>
- Denchak, M. (2017, February 23). *Global Climate Change: What You Need to Know*. NRDC. Ανακτήθηκε από <https://www.nrdc.org/stories/global-climate-change-what-you-need-know>
- *Fast Crew Supplier 2610. Executive Summary*. (n.d.). Damen. Ανακτήθηκε από https://products.damen.com/-/media/products/images/clusters-groups/high-speed-crafts/fast-crew-supplier/fcs-2610/documents/executive_summary_fast_crew_supplier_2610_twin_axe.pdf
- Froese, M. (2019, February 6). *Wind-turbine carbon payback times shorter than expected, finds new study*. Wind power Engineering & Development. Ανακτήθηκε από <https://www.windpowerengineering.com/wind-turbine-carbon-payback-times-shorter-than-expected-finds-new-study/>
- *Ln values what are they and how are they used*. (2018, July 13). pulsarinstruments Plc. Ανακτήθηκε από <https://pulsarinstruments.com/en/post/what-are-ln-values-and-how-are-they-used>
- *Offshore installation and maintenance vessel MPI Resolution*. (2019). MPI Offshore. Ανακτήθηκε από https://www.mpi-offshore.com/beheer/upload/1/content/pdf/Leaflet_Resolution_MPI.pdf
- OpenLCA (Free, professional Life Cycle Assessment (LCA) and footprint software). <https://www.openlca.org>
- *Project guide for Marine Applications*. (2002). Wartsila L20. Ανακτήθηκε από <http://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/2002%20-%20Wartsila%20L20%20-%20Project%20Guide.pdf>

- Schipani, V. (2018, March 14). Wind Energy's Carbon Footprint. *FactCheck.org*. Ανακτήθηκε από <https://www.factcheck.org/2018/03/wind-energys-carbon-footprint/>
- *The History of Wind Turbines*. (n.d.). The Renewable Energy Hub. Ανακτήθηκε από <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/wind-turbines/history-of-wind-turbines/>
- *The Inside of a Wind turbine*. (n.d.). Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Ανακτήθηκε από <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine>
- *Φώκια*. (n.d.). WWF-Greece. Ανακτήθηκε από https://www.wwf.gr/ti_kanoume/fysh/apeiloumena_eidh/fokia/

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ OPENLCA

Κατά τη μοντελοποίηση ενός συστήματος εντός του λογισμικού OpenLCA, χρησιμοποιούνται δύο βασικά στοιχεία, οι ροές (flows) και οι διεργασίες (processes). Η διεργασία, είναι μια δραστηριότητα κατά την οποία μια εισροή (input) μετατρέπεται σε μια εκροή (output). Οι εισροές περιγράφονται από ένα πλήθος ροών, ενώ οι εκροές δηλαδή το αποτέλεσμα της μετατροπής των εισροών, ορίζεται εξίσου από ένα πλήθος διαφορετικών ροών. Ουσιαστικά, οι ροές αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία του συστήματος καθώς και για την εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών. Η μοντελοποίηση ορισμένων διεργασιών αποτελεί μια ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία διότι απαιτείται ακρίβεια και πληρότητα στη καταγραφή των ροών και για αυτό προμηθεύονται απευθείας από έτοιμες βάσεις δεδομένων (Ecoinvent Database).

Πιο αναλυτικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τη μοντελοποίηση του πρώτου σταδίου του κύκλου ζωής, λαμβάνονται υπόψη τα είδη και οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών. Ενδεικτικά, στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 27), φαίνονται τα είδη και οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της ατράκτου μιας ανεμογεννήτριας Siemens SWT-3,6-120. Οι ροές που χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο των εισροών, προήλθαν από βάσεις δεδομένων Ecoinvent και συμπεριλαμβάνουν όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με την εξόρυξη, την επεξεργασία και την παραγωγή των πρώτων υλών.

Flow	Category	Amount	Unit
Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	2000.00000	kg
Cast iron {GLO} market for Cut-off, S - Copied...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	10000.00000	kg
Copper {GLO} market for Cut-off, S - Copied f...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	5600.00000	kg
Electronics, for control units {RER} production ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	500.00000	kg
Lubricating oil {GLO} market for Cut-off, S - C...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	900.00000	kg
Steel, chromium steel 18/8 {RER} steel producti...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	1.70000E4	kg
Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	8.90000E4	kg

Flow	Category	Amount	Unit
Nacelle	Σταδιο_1	1.00000	Item(s)

Εικόνα 27. Μοντελοποίηση της ατράκτου της ανεμογεννήτριας εντός του λογισμικού OpenLCA.

Για παράδειγμα, για την παραγωγή αλουμινίου ποσότητας ενός κιλού, η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 28) απεικονίζει μερικές από τις εκατοντάδες ροές που χρησιμοποιήθηκαν ως εισροές και μερικές από τις εκατοντάδες ροές που προέκυψαν ως εκροές σαν το αποτέλεσμα της διεργασίας (Aluminium, cast alloy {GLO}). Συγκεκριμένα, η επεξεργασία εισροών δηλαδή πόρων όπως του αργίλιου, του άνυδρου θεικού ασβεστίου, του αργού, του βαρύτη, του βασάλτη, του βόρακα, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή του αλουμινίου και το σχηματισμό χημικών ενώσεων όπως amidosulfuron, αμμωνίας, αμμώνιου, ανιλίνης, ανθρακένιου και πολλών άλλων. Με παρόμοιο τρόπο μοντελοποιήθηκε κάθε φάση από κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

P Inputs/Outputs: market for aluminium, cast alloy

▼ Inputs

Flow	Category	Amount	Unit
Aluminium	Resource/in ground	0.21366	kg
Anhydrite	Resource/in ground	6.08009E-9	kg
Argon-40	Resource/in air	0.00025	kg
Barite	Resource/in ground	0.00088	kg
Basalt	Resource/in ground	0.00019	kg
Borax	Resource/in ground	2.03953E-6	kg
Bromine	Resource/in water	7.78065E-9	kg
Cadmium	Resource/in ground	0.00088	kg
Calcite	Resource/in ground	0.08266	kg
Carbon dioxide, in air	Resource/in air	0.06164	kg
Carbon, organic, in soil or biomass stock	Resource/in ground	2.73239E-5	kg
Carnallite	Resource/in water	6.06726E-7	kg
Cerium	Resource/in ground	5.11137E-13	kg
Chromium	Resource/in ground	0.00030	kg
Chrysotile	Resource/in ground	5.07426E-7	kg
Cinnabar	Resource/in ground	3.84008E-9	kg
Clay, bentonite	Resource/in ground	0.00029	kg
Clav. unspecified	Resource/in ground	0.02370	ka

▼ Outputs

Flow	Category	Amount	Unit
Aluminium, cast alloy (GLO) market for Cut...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	1.00000	kg
Amidosulfuron	Emission to soil/agricultural	2.72778E-15	kg
Ammonia	Emission to air/high population density	7.40625E-6	kg
Ammonia	Emission to air/low population density	5.22549E-5	kg
Ammonia	Emission to air/low population density, long-...	2.96517E-9	kg
Ammonia	Emission to air/unspecified	0.00014	kg
Ammonium carbonate	Emission to air/high population density	4.46095E-9	kg
Ammonium, ion	Emission to water/ground water	1.71062E-6	kg
Ammonium, ion	Emission to water/ground water, long-term	1.86348E-6	kg
Ammonium, ion	Emission to water/ocean	2.79406E-7	kg
Ammonium, ion	Emission to water/river	8.22915E-6	kg
Ammonium, ion	Emission to water/unspecified	6.60712E-7	kg
Aniline	Emission to air/high population density	3.56098E-12	kg
Aniline	Emission to water/river	8.54894E-12	kg
Aniline	Emission to water/unspecified	2.39756E-10	kg
Anthracene	Emission to air/unspecified	4.25280E-19	kg
Anthracene	Emission to water/river	2.10311E-12	kg
Anthranilic acid	Emission to air/high population density	1.64854E-13	ka

Εικόνα 28. Καταγραφή των πόρων που αξιοποιούνται και των χημικών ενώσεων που προκαλούνται κατά την παραγωγική διαδικασία του αλουμινίου (διεργασία Aluminium, cast alloy {GLO}).

Έπειτα οι πέντε ροές που δημιουργήθηκαν από τα πέντε στάδια που μοντελοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν ως εισροές σε μια νέα διεργασία που δίνει ως εκροή, δηλαδή ως αποτέλεσμα, τη δομή του συστήματος Ανάλυση Κύκλου Ζωής όπου για το οποίο πραγματοποιούνται και οι απαραίτητοι υπολογισμοί (Εικόνα 29).

Flow	Category	Amount	Unit
Flow	Category	Amount	Unit
Στάδιο 1 - Πρώτες Υλεις & Διεργασίες Κατασκευής	Σταδιο_1	1.00000	Item(s)
Στάδιο 2 - Μεταφορά & Εγκατάσταση	Σταδιο_2	1.00000	Item(s)
Στάδιο 3 - Λειτουργία & Συντήρηση	Σταδιο_3	1.00000	Item(s)
Στάδιο 4 - Παραπλισμός	Σταδιο_4	1.00000	Item(s)
Στάδιο 5 - Τελος Κύκλου Ζωής	Σταδιο_5	1.00000	Item(s)

Flow	Category	Amount	Unit
Flow	Category	Amount	Unit
Ανάλυση Κύκλου Ζωής		1.00000	Item(s)

Εικόνα 29. Η δομή του συστήματος “ανάλυση κύκλου ζωής” και οι ροές που εισάγονται ως αποτέλεσμα της μοντελοποίησης του κάθε σταδίου.

Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν (CML, ReCiPe, TRACI 2.1, eco-indicator 99), ανάλογα με τις κατηγορίες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που επιθυμούμε να αναλύσουμε και τον αριθμό των παραγόντων που επιθυμούμε να ληφθούν υπόψη. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εφαρμόστηκε η μέθοδος ενδιάμεσου σημείου CML 2001 (superseded) η οποία δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο του Leiden της Ολλανδίας το 2001 και θεωρείται ως μια από τις πιο πλήρεις για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

General information: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

General information

Name: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Description: Linking approach during creation: Prefer default providers; Preferred process type: System process

Version: 00.00.001

UUID: 04e47c7d-c058-4b71-a385-d090c89d6b0a

Last change: Calculate

Reference

Process: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Product: Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Flow property: Number of items

Unit: Item(s)

Target amount: 60

Calculation properties

Please select the properties for the calculation

Allocation method: None

Impact assessment method: CML 2001 (superseded)

Normalization and weighting set:

Calculation type: Analysis Quick results Regionalized LCIA Monte Carlo Simulation

Include cost calculation

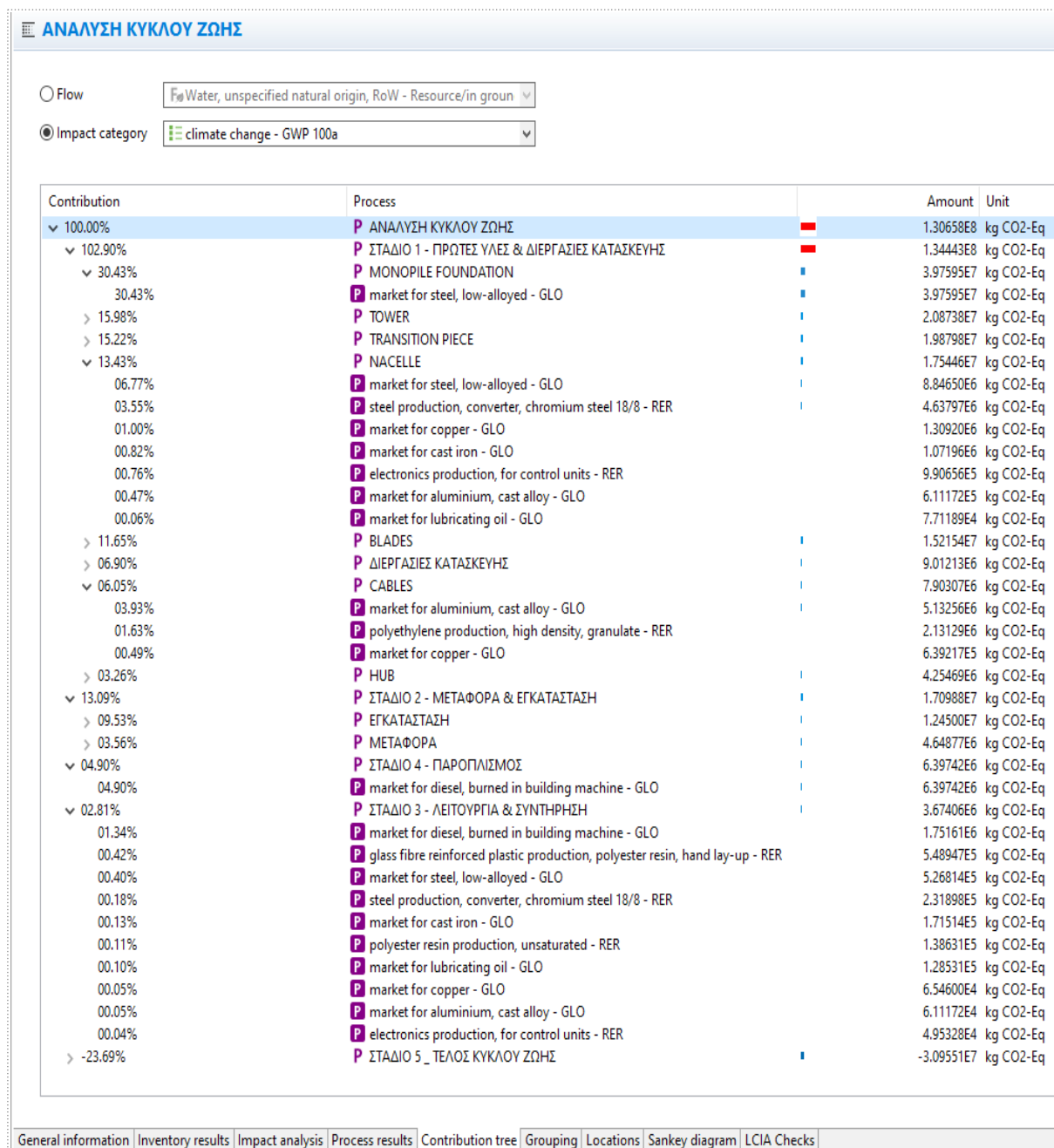
Assess data quality

< Back Next > Finish Cancel

Εικόνα 30. Επιλογή μεθοδολογίας εντός του λογισμικού OpenLCA για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Ως αποτέλεσμα των υπολογισμών που εκτελεί το λογισμικό OpenLCA με βάση τη μέθοδο που επιλέξαμε, προκύπτει η ανάλυση διάφορων περιβαλλοντικών δεικτών (Κλιματική αλλαγή-Παγκόσμια Υπερθέρμανση, Οξίνιση, Ευτροφισμός, Ανθρώπινη τοξικότητα κ.ά.). Για κάθε περιβαλλοντικό δείκτη,

παρουσιάζεται λεπτομερώς το μέγεθος της ρύπανσης που προκαλείται, το μερίδιο συνεισφοράς του κάθε σταδίου, της κάθε φάσης, του κάθε υλικού και της κάθε ενέργειας που έχει πραγματοποιηθεί. Ενδεικτικά στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 31), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση κύκλου ζωής, για την κατηγορία της παγκόσμιας υπερθέρμανσης.



Εικόνα 31. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό OpenLCA σχετικά με την κατηγορία της παγκόσμιας υπερθέρμανσης.

Επιπλέον, στα αποτελέσματα που προκύπτουν υπάρχει η δυνατότητα να εξεταστεί ποια αέρια του θερμοκηπίου διαμορφώνουν τον κάθε περιβαλλοντικό δείκτη, τι χημικές ενώσεις δημιουργούνται από την κάθε επιμέρους διεργασία καθώς και σε τι ποσότητες. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 32), παρουσιάζονται οι χημικές ενώσεις που σχηματίζονται από τις διεργασίες που εκτελούνται κατά τη

διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου και οι οποίες καθορίζουν τη συνολική τιμή του δείκτη της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (kg CO₂-eq).

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Impact analysis: CML 2001 (superseded)

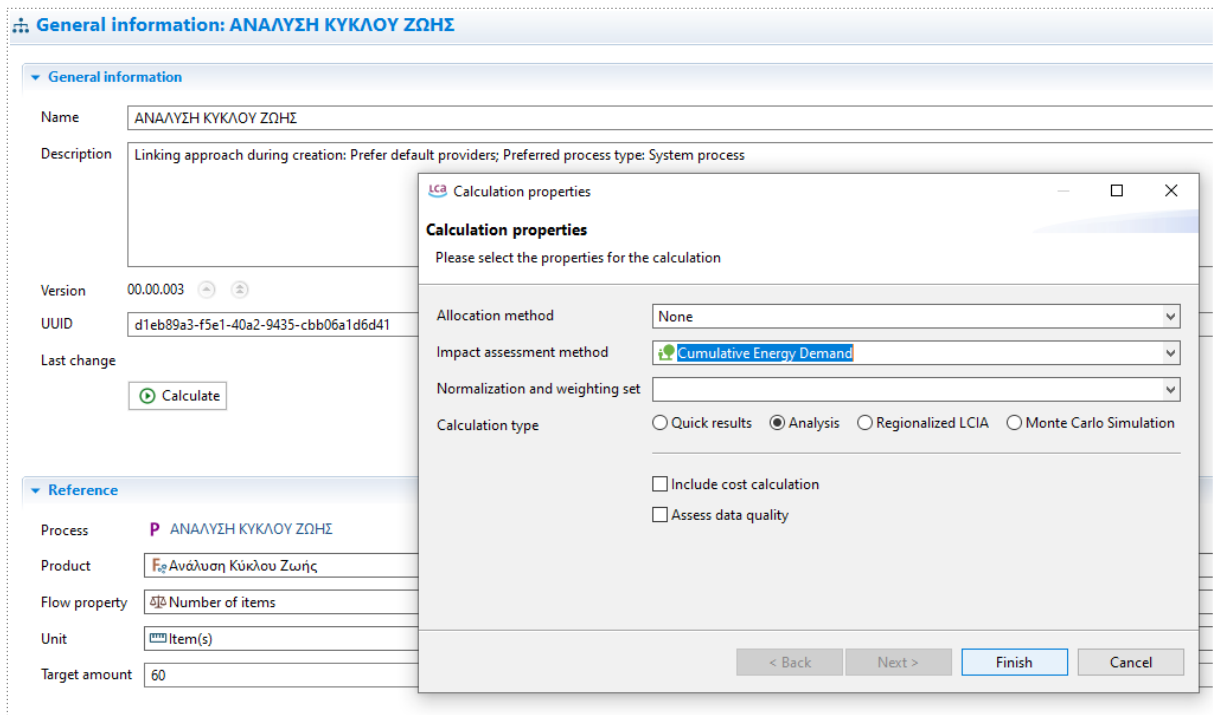
Subgroup by processes Don't show < 1 %

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
> acidification potential - generic				1.0938766	kg SO2-Eq
> eutrophication potential - generic				5.8362065	kg PO4-Eq
> terrestrial ecotoxicity - TAETP 500a				9.2932065	kg 1,4-DC...
> human toxicity - HTP 100a				6.3878668	kg 1,4-DC...
climate change - GWP 100a				1.6161368	kg CO2-Eq
P market for steel, low-alloyed - GLO	Others / Ecoinvent cut-off S copy			9.1675667	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	3.93821E7 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	3.93821E7	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	3.16003E7 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	3.16003E7	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	1.12409E7 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	1.12409E7	kg CO2-Eq
F Methane, fossil	Emission to air / low population density	2.53844E5 kg	25.00000 kg CO2-Eq/kg	6.34611E6	kg CO2-Eq
F Carbon monoxide, fossil	Emission to air / unspecified	1.04414E6 kg	1.57000 kg CO2-Eq/kg	1.63930E6	kg CO2-Eq
P market for diesel, burned in building machine - GLO	Others / Ecoinvent cut-off S copy			1.61339E7	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	1.31391E7 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	1.31391E7	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	1.27496E6 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	1.27496E6	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	1.21988E6 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	1.21988E6	kg CO2-Eq
F Methane, fossil	Emission to air / low population density	8190.70181 kg	25.00000 kg CO2-Eq/kg	2.04768E5	kg CO2-Eq
P glass fibre reinforced plastic production, polyester resin, hand lay-up - RER	Others / Ecoinvent cut-off S copy			1.29917E7	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	4.63356E6 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	4.63356E6	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	4.62737E6 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	4.62737E6	kg CO2-Eq
F Dinitrogen monoxide	Emission to air / unspecified	5984.68006 kg	298.00000 kg CO2-Eq/kg	1.78343E6	kg CO2-Eq
F Methane, fossil	Emission to air / high population density	1.97401E4 kg	25.00000 kg CO2-Eq/kg	4.93502E5	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	4.91663E5 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	4.91663E5	kg CO2-Eq
F Methane, fossil	Emission to air / low population density	1.82145E4 kg	25.00000 kg CO2-Eq/kg	4.55363E5	kg CO2-Eq
F Dinitrogen monoxide	Emission to air / high population density	1148.14252 kg	298.00000 kg CO2-Eq/kg	3.42146E5	kg CO2-Eq
P market for aluminium, cast alloy - GLO	Others / Ecoinvent cut-off S copy			5.80485E6	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	3.49291E6 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	3.49291E6	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	9.38627E5 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	9.38627E5	kg CO2-Eq
F Carbon dioxide, fossil	Emission to air / unspecified	6.26909E5 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	6.26909E5	kg CO2-Eq
F Methane, fossil	Emission to air / low population density	1.72682E4 kg	25.00000 kg CO2-Eq/kg	4.31704E5	kg CO2-Eq
F Methane, tetrafluoro-, CFC-14	Emission to air / unspecified	22.57398 kg	7390.00000 kg CO2-Eq/kg	1.66822E5	kg CO2-Eq
P sheet rolling, steel - RER	Others / Ecoinvent cut-off S copy			5.44128E6	kg CO2-Eq
P steel production, converter, chromium steel 18/8 - RER	Others / Ecoinvent cut-off S copy			4.86987E6	kg CO2-Eq
P market for transport, freight, sea, transoceanic ship - GLO	Others / Ecoinvent cut-off S copy			4.62787E6	kg CO2-Eq
P transmission network construction, electricity, high voltage - CH	Others / Ecoinvent cut-off S copy			4.46522E6	kg CO2-Eq
P market for cast iron - GLO	Others / Ecoinvent cut-off S copy			3.70899E6	kg CO2-Eq
P polyester resin production, unsaturated - RER	Others / Ecoinvent cut-off S copy			2.91124E6	kg CO2-Eq
P market for metal working, average for chromium steel product manufacturing - GLO	Others / Ecoinvent cut-off S copy			2.72320E6	kg CO2-Eq
P polyethylene production, high density, granulate - RER	Others / Ecoinvent cut-off S copy			2.13129E6	kg CO2-Eq
P market for copper - GLO	Others / Ecoinvent cut-off S copy			2.01388E6	kg CO2-Eq

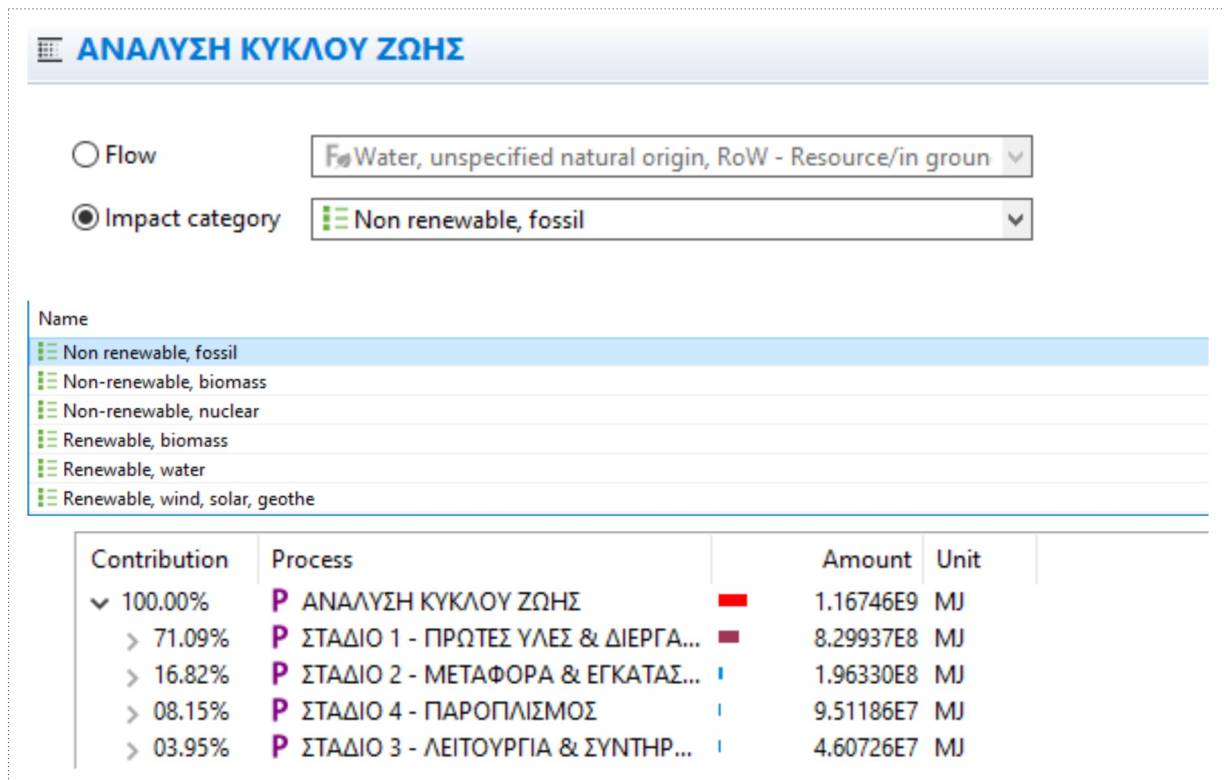
General information | Inventory results | Impact analysis | Process results | Contribution tree | Grouping | Locations | Sankey diagram | LCIA Checks

Εικόνα 32. Λεπτομερή παρουσίαση των προκληθέντων χημικών ενώσεων που διαμορφώνουν το δείκτη της παγκόσμιας υπερθέρμανσης.

Τέλος, σχετικά με την ενσωματωμένη ενέργεια (Embodied Energy) του αιολικού πάρκου, δηλαδή την πρωτογενή ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε στάδιο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της αιολικής μονάδας, μπορεί να υπολογιστεί και να ποσοτικοποιηθεί εντός του λογισμικού OpenLCA με τη χρήση της μεθόδου Cumulative Energy Demand (Εικόνα 33). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση της προαναφερθέντας μεθοδολογίας, υποδεικνύουν την ποσότητα της ενέργειας που έχει δαπανηθεί σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής αλλά και τη προέλευση αυτής της ενέργειας, δηλαδή τις πηγές (ανανεώσιμες ή μη) από τις οποίες έχει παραχθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια (Εικόνα 34).



Εικόνα 33. Επιλογή μεθοδολογίας εντός του λογισμικού OpenLCA για τον υπολογισμό της πρωτογενούς ενέργειας που καταναλώνεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.



Εικόνα 34. Η πρωτογενής ενέργεια που καταναλώνεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου και η οποία παρήχθη από τη χρήση ορυκτών καυσίμων.

