



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικού Πάρκου στη θέση
«Πυργουλόψη - Λιάζαρι», συνολικής ισχύος 1,5 MW,
Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας,
Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλιάννα Κ. Κλειάσου

Επιβλέπουσα: Καθηγήτρια Μ. Λοϊζίδου

Επιτροπή Παρακολούθησης:

Καθηγήτρια Μ. Λοϊζίδου

Καθηγήτρια Α. Χαραλάμπους

Αν. Καθηγητής Χ. Κορωναίος

Περιβάλλον
και
Ανάπτυξη

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

**Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικού Πάρκου στη θέση
«Πυργουλόψη - Λιάζαρι», συνολικής ισχύος 1,5 MW,
Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας,
Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλιάνα Κ. Κλειάσου

Επιβλέπουσα: Μ. Λοϊζίδου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Οκτωβρίου 2016.

(Υπογραφή)

.....

Μαρία Λοϊζίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Αικατερίνη Χαραλάμπους
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Χριστοφής Κορωναίος
Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

(Υπογραφή)

.....

ΗΛΙΑΝΑ ΚΛΕΙΑΣΟΥ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2016 – All rights reserved

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Διεπιστημονικού – Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) "Περιβάλλον και Ανάπτυξη", υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Μαρίας Λοϊζίδου, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.) και την οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Κωνσταντζο, με τη βοήθεια του οποίου ολοκληρώθηκε επιτυχώς η εργασία.

Παράλληλα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στη διοίκηση και το προσωπικό της εταιρείας ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ. Α.Ε., για την άμεση ανταπόκριση και την ευγενική συμβολή τους στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Η εν λόγω εταιρεία παρείχε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, οι οποίες συνετέλεσαν στην εμβάθυνση και τη λεπτομερέστερη ανάλυση του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), η οποία και αποτελεί το κεντρικό θέμα της εργασίας.

Εν κατακλείδι, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τους οικείους ανθρώπους μου, για την πολύτιμη στήριξή τους σε όλη μου την πορεία έως τώρα.

Περίληψη

Το θέμα που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία είναι η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) ενός υφιστάμενου αιολικού πάρκου στην Ελλάδα. Η μεθοδολογία ΑΚΖ εφαρμόστηκε για το αιολικό πάρκο στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», συνολικής ισχύος 1,5 MW, της Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας. Για το σκοπό αυτό αναζητήθηκαν στοιχεία για το εν λειτουργία αιολικό πάρκο και πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με κατάλληλες βάσεις δεδομένων και υπολογιστικά εργαλεία. Η επεξεργασία των δεδομένων κατέδειξε τη συνολική συνεισφορά του συγκεκριμένου αιολικού πάρκου στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

Πιο συγκεκριμένα, αναζητήθηκαν και εξετάστηκαν οι ρύποι που σχετίζονται ειδικότερα με την παραγωγή, μεταφορά, λειτουργία και τελική διάθεση των υλικών και επιμέρους τμημάτων που αποτελούν τις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της κατασκευάστριας εταιρείας και των λειτουργικών χαρακτηριστικών του αιολικού πάρκου, υπολογίστηκαν οι ρύποι που παράγονται και συντελούν στα φαινόμενα της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, της οξίνισης, του ευτροφισμού, της ανθρώπινης τοξικότητας, της φωτοχημικής οξείδωσης, της εδαφικής οικοτοξικότητας, της οικοτοξικότητας του γλυκού νερού και της θαλάσσιας οικοτοξικότητας.

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας, η ΑΚΖ αποτελεί ένα εργαλείο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου, παρέχοντας τη δυνατότητα αξιολόγησης της συνεισφοράς στην περιβαλλοντική επιβάρυνση των επιμέρους φάσεων του έργου. Ως εκ τούτου, η ΑΚΖ είναι δυνατό να συνεισφέρει στην αξιολόγηση και μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, μέσω της κατανόησης της κατανομής των ρύπων στα εξεταζόμενα στάδια του έργου και της υιοθέτησης κατάλληλων τεχνικών και μεθόδων για τη βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Λέξεις κλειδιά: «Ανάλυση κύκλου ζωής, ΑΚΖ, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ρύποι, αιολικό πάρκο, ανεμογεννήτριες, αιολική ενέργεια, Περιφερειακή Ενότητα Εύβοιας»

Abstract

The main purpose of the thesis proposal is the Life Cycle Analysis (LCA) of an existing wind farm in Greece. The LCA methodology applied for an onshore wind park 1.5 MW, located in the region of "Pyrgoulopsi - Liazari" in Evia, Central Greece. Relevant information referring to the existing wind park and appropriate databases and software tools were the input of the LCA. The analysis of the wind park by LCA methodology, indicated the overall contribution of the wind park to the mitigation of the environmental impacts, through the production of electricity during its life cycle.

More specifically, the thesis proposal focused on the environmental impacts, which correlate directly with the production, transportation, operation and final disposal phase of the materials and sub-parts of the wind park's turbines. For all the aforementioned life cycle phases and taking into consideration the manufactural and operational specs of the wind park, the below mentioned environmental impacts were examined: global warming, acidification, eutrophication, human toxicity, photochemical oxidant creation, terrestrial ecotoxicity, freshwater aquatic ecotoxicity, marine aquatic ecotoxicity.

The results of the LCA highlighted the contribution of the methodology to the assessment and evaluation of the environmental impacts for each individual life cycle phase of the wind park. The analytical approach of LCA, imprinted the environmental impact distribution, thus revealed the procedure for the reduction of the impacts in future projects. LCA is a valuable tool for the evaluation of the results and a guide for the adoption of appropriate techniques and methods to improve the environmental footprint.

Keywords: *«Life Cycle Analysis, LCA, environmental impacts, emissions, environmental impacts, wind park, wind turbines, wind energy, Prefecture of Evia»*

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	7
Εικόνες.....	10
Πίνακες	10
Σχήματα	10
1. Πρόλογος.....	13
2. Εισαγωγή	14
3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής.....	15
3.1. Γενικά στοιχεία.....	15
3.2. Ιστορική αναδρομή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	15
3.3. Τι είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής.....	17
3.4. Τα στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	20
4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικών Πάρκων	28
4.1. Στάδια εφαρμογής μιας μελέτης ΑΚΖ	31
4.2. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου μελέτης.....	31
4.2.1. Λειτουργική μονάδα	32
4.2.2. Περιγραφή του συστήματος	33
Α. Στάδια κύκλου ζωής.....	33
Α1. Παραγωγή και κατασκευή επιμέρους τμημάτων ανεμογεννητριών	33
Α2. Εγκατάσταση ανεμογεννητριών	34
Α3. Λειτουργία ανεμογεννητριών	34
Α4. Τέλος της διάρκειας ζωής ανεμογεννητριών.....	34
Α5. Μεταφορά ανεμογεννητριών	35
4.2.3. Συλλογή δεδομένων.....	35
4.2.4. Περιορισμοί και θεωρήσεις εργασίας	36
4.3. Απογραφή δεδομένων	38
4.3.1. Μοντελοποίηση των σταδίων του κύκλου ζωής.....	38
4.4. Κατηγορίες επιπτώσεων και σχετικοί δείκτες	39
4.5. Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	41
5. Αιολικό πάρκο στη θέση «Πυργουλόψη – Λιάζαρι».....	43
5.1. Υφιστάμενη κατάσταση.....	43
5.2. Περιγραφή του έργου	45

5.2.1. Γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά αιολικού πάρκου	45
5.2.2. Δρόμος πρόσβασης και οδικό δίκτυο αιολικού πάρκου	47
5.2.3. Έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης αιολικού πάρκου	47
5.3. Αναμενόμενη Διάρκεια Ζωής Έργου	48
5.4. Χρόνος λειτουργίας αιολικού πάρκου	49
6. Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικού Πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι»	50
6.1. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου μελέτης.....	50
6.1.1. Λειτουργική μονάδα	52
6.1.2. Περιγραφή του συστήματος	52
Α. Στάδια του κύκλου ζωής	52
Α1. Παραγωγή και κατασκευή επιμέρους τμημάτων ανεμογεννητριών	52
Α2. Εγκατάσταση ανεμογεννητριών	53
Α3. Λειτουργία ανεμογεννητριών	53
Α4. Τέλος της διάρκειας ζωής ανεμογεννητριών.....	54
Α5. Μεταφορά ανεμογεννητριών	54
6.1.3. Συλλογή δεδομένων.....	56
6.1.4. Περιορισμοί και θεωρήσεις εργασίας	57
6.2. Απογραφή δεδομένων	60
6.3. Εκτίμηση επιπτώσεων - Ταξινόμηση και χαρακτηρισμός.....	60
6.3.1. Κατηγορίες επιπτώσεων και σχετικοί δείκτες	60
6.3.2. Στάδια του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών και υπολογισμοί περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	61
Στάδιο 1Α. Παραγωγή, κατασκευή και εγκατάσταση ανεμογεννητριών – Ανάγκες σε Υλικά	61
Στάδιο 1Β. Παραγωγή, κατασκευή και εγκατάσταση ανεμογεννητριών – Ενεργειακές Ανάγκες.....	70
Στάδιο 2. Μεταφορά ανεμογεννητριών.....	78
Στάδιο 3. Λειτουργία των ανεμογεννητριών	86
Στάδιο 4. Τέλος της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών	94
6.4. Κανονικοποίηση	102
6.5. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.....	103
6.6. Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων	107
6.7. Συμπεράσματα	109
7. Παρατηρήσεις	114
Βιβλιογραφία	117
Ιστοσελίδες.....	121

Εικόνες

Εικόνα 1. Θέση εγκατάστασης αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας, πηγή: ΡΑΕ, 2016.....	43
Εικόνα 2. Θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας, πηγή: Google Earth, 2016.....	44
Εικόνα 3. Τυπική τομή και όψη ανεμογεννήτριας.....	46
Εικόνα 4. Πορεία διαδρομής πλοίου από το εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρείας στην περιοχή Ααρους (Aarhus) της Δανίας μέχρι το λιμάνι του Ασπροπύργου και μετά στο λιμάνι της Χαλκίδας, με μετεπιβίβαση, πηγή: http://www.marinetraffic.com/	55

Πίνακες

Πίνακας 1. Ιστορική αναδρομή της πορείας της ΑΚΖ, πηγές: Γεωργακέλλος, 1999, Ho W.P. L., 2001, EC, 2010.....	15
Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά στοιχεία μελετών ΑΚΖ αιολικών πάρκων, πηγή: Arvesen et als, 2009.	29
Πίνακας 3. Στάδια εφαρμογής μιας μελέτης ΑΚΖ, πηγή: Angelakoglou et als, 2013.	31
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών του εν λειτουργία αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι».....	45
Πίνακας 5. Μεταφορά τμημάτων ανεμογεννητριών από τις εγκαταστάσεις παραγωγής της κατασκευάστριας εταιρείας στη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου (αφορά και στις δύο ανεμογεννήτριες).	56
Πίνακας 6. Ετήσια μεταφορά συνεργείων για τη λειτουργία και συντήρηση του αιολικού πάρκου.	56
Πίνακας 7. Μεταφορά τμημάτων ανεμογεννητριών από τη θέση εγκατάστασης στη θέση τελικής διάθεσης και ανακύκλωσης στο πέρας του κύκλου ζωής τους.....	56
Πίνακας 8. Συγκεντρωτικός πίνακας επιμέρους υλικών ανεμογεννήτριας ΝΜ44/750, της κατασκευάστριας εταιρείας ΝΕG Micon.....	60
Πίνακας 9. Συγκριτικός πίνακας περιβαλλοντικών δεικτών (ανά ΜWη).	109

Σχήματα

Σχήμα 1. Παράδειγμα συστήματος προϊόντος κατά ΑΚΖ, πηγή: Καραμπάτσου, 2013.	18
Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής ενός προϊόντος και των επιπτώσεων της παραγωγικής του διαδικασίας στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, πηγή: Μαρτινόπουλος και συν., 2002.....	19

Σχήμα 3. Το γενικό πλαίσιο της μεθοδολογίας AKZ βάσει ISO, πηγή: JRC, 2010.	20
Σχήμα 4. Επαναληπτική διαδικασία AKZ με έμφαση στην απογραφή των δεδομένων κατά ISO 14044: 2006, τροποποιημένο (JRC, 2010) (όπου LCIA-Life Cycle Impact Assessment: εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής και LCI-Life Cycle emission & resource consumption Inventory: απογραφή κύκλου ζωής των εκπομπών και της κατανάλωσης πόρων).	22
Σχήμα 5. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ένα γενικό πλαίσιο κατά ISO, πηγή: JRC, 2010.	23
Σχήμα 6. Σύνδεση των δεδομένων απογραφής με τις κατηγορίες των επιπτώσεων τελικού σημείου ή με τη βλάβη σε προστατευμένους τομείς κατά τη διαδικασία εκτίμησης των επιπτώσεων, πηγή: Jolliet O. et als, 2016.	24
Σχήμα 7. Κύκλος ζωής αιολικού πάρκου, πηγή: VESTAS, 2013.	28
Σχήμα 8. Στάδια του κύκλου ζωής ενός τυπικού αιολικού πάρκου, πηγή: VESTAS, 2013.	33
Σχήμα 9. Υπολογισμός ενεργειακής κατανάλωσης, εκπομπών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων, πηγή: Kumar et als, 2014.....	42
Σχήμα 10. Διάγραμμα ενεργειακής ροής ενός τυπικού αιολικού πάρκου.	48
Σχήμα 11. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής ανεμογεννητριών NEG Micon NM 44/750, πηγή: VESTAS, 2013.	51
Σχήμα 12. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στον δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 1A	62
Σχήμα 13. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 1A	63
Σχήμα 14. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 1A	64
Σχήμα 15. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 1A	65
Σχήμα 16. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 1A	66
Σχήμα 17. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 1A	67
Σχήμα 18. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 1A	68
Σχήμα 19. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικοτοξικότητας, Στάδιο 1A	69
Σχήμα 20. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 1B	70
Σχήμα 21. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 1B	71
Σχήμα 22. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 1B	72
Σχήμα 23. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 1B	73
Σχήμα 24. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 1B	74
Σχήμα 25. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στον δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 1B	75
Σχήμα 26. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 1B	76
Σχήμα 27. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικοτοξικότητας, Στάδιο 1B	77
Σχήμα 28. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 2	78
Σχήμα 29. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 2	79
Σχήμα 30. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 2	80

Σχήμα 31. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 2	81
Σχήμα 32. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 2	82
Σχήμα 33. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 2.....	83
Σχήμα 34. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 2	84
Σχήμα 35. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικοτοξικότητας, Στάδιο 2	85
Σχήμα 36. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 3.....	86
Σχήμα 37. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 3.....	87
Σχήμα 38. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 3	88
Σχήμα 39. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 3	89
Σχήμα 40. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 3	90
Σχήμα 41. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 3.....	91
Σχήμα 42. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 3	92
Σχήμα 43. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικοτοξικότητας, Στάδιο 3	93
Σχήμα 44. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 4.....	94
Σχήμα 45. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 4.....	95
Σχήμα 46. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 4	96
Σχήμα 47. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 4	97
Σχήμα 48. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 4	98
Σχήμα 49. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 4.....	99
Σχήμα 50. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 4	100
Σχήμα 51. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικοτοξικότητας, Στάδιο 4	101
Σχήμα 52. Κανονικοποίηση των κατηγοριών επιπτώσεων της ΑΚΖ του αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι».....	102
Σχήμα 53. Συνολική συνεισφορά των σταδίων του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι» στους περιβαλλοντικούς δείκτες μέτρησης.....	106

1. Πρόλογος

Τις τελευταίες δεκαετίες, αποτελεί πλέον αδιαμφισβήτητο γεγονός πως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν μια εναλλακτική πρόταση παραγωγής ενέργειας έναντι των συμβατικών καυσίμων και των σημαντικών ζητημάτων που εγείρονται γύρω από αυτά. Οι εκπομπές ρύπων και η συνακόλουθη περιβαλλοντική ρύπανση που προκύπτουν από τα συμβατικά καύσιμα, σε συνδυασμό με τη μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων και τα οικονομικά και πολιτικά ζητήματα, που σχετίζονται με τη διαμόρφωση της τιμής των καυσίμων, καθορίζουν σημαντικά τις προοπτικές των χωρών, ιδιαίτερα αυτών που εξαρτώνται ενεργειακά από έτερες χώρες.

Η αξιοποίηση του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται, ως γνωστόν, μια «καθαρή» και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η λειτουργία των αιολικών πάρκων, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, είναι αδιαμφισβήτητα απαλλαγμένη από τις επιπτώσεις που μελετώνται για άλλα είδη συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Ο άνεμος είναι ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και από τη χρονική στιγμή που θα εγκατασταθεί ένα αιολικό πάρκο, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, όπως επίσης και οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις ελαχιστοποιούνται.

Παρόλα αυτά, η συνεχής αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων, που λαμβάνει χώρα σε παγκόσμιο επίπεδο εδώ και δεκαετίες, εγείρει ζητήματα πλέον, τόσο στο παρόν, όσο και για το μέλλον, που αφορούν στην κατανάλωση της ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή της αντίστοιχης τεχνολογίας, αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη χρήση αυτής. Πλήθος μελετών εστιάζουν πλέον στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) των αιολικών πάρκων, προσπαθώντας να αποτυπώσουν τη ροή ενέργειας, τα υλικά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους στο σύνολο του κύκλου ζωής τους.

2. Εισαγωγή

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ – Life Cycle Assessment, LCA) αποτελεί τη μεθοδολογία, μέσω της οποίας είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθούν τα ενεργειακά ισοζύγια, οι εκπομπές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός έργου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Όσον αφορά στη διάρκεια ζωής ενός αιολικού πάρκου, τα επιμέρους στάδια του αποτελούνται από την εξόρυξη των πρώτων υλών για παραγωγή και κατασκευή των επιμέρους τμημάτων, τη μεταφορά, την εγκατάσταση, τη λειτουργία των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου και την τελική διάθεση των υλικών, στο πέρας του κύκλου ζωής του.

Η μελέτη AKZ ενός αιολικού πάρκου και τα αποτελέσματά της είναι πιθανό να ποικίλουν ιδιαίτερα από περιοχή σε περιοχή, καθώς εξαρτώνται άμεσα από τη βιομηχανική παραγωγή και το ενεργειακό μείγμα των εμπλεκόμενων χωρών προέλευσης και εγκατάστασης, όπως επίσης και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ίδιου του πάρκου. Ως εκ τούτου, η απαιτούμενη ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός αιολικού πάρκου, οι εκπομπές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτελούν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, που αποτυπώνουν τις εκάστοτε ειδικές συνθήκες εγκατάστασης και λειτουργίας του.

Η παρούσα μελέτη AKZ εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Διεπιστημονικού – Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) "Περιβάλλον και Ανάπτυξη" του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και αφορά στο εν λειτουργία αιολικό πάρκο στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι» της Περιφερειακής Ενότητας Εύβοιας, Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας. Το εν λόγω αιολικό πάρκο αποτελείται από δύο ανεμογεννήτριες τύπου NM 44/750 της κατασκευάστριας εταιρείας NEG Micon και η συνολική του ισχύς ανέρχεται στα 1,5 MW. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα που αφορούν στην AKZ (ISO 140040-44:2006), βασίστηκε στη μέθοδο ενδιάμεσου σημείου CML 2001 και η μοντελοποίηση του συστήματος, με τους συνακόλουθους υπολογισμούς, υλοποιήθηκε με τη χρήση βάσεων δεδομένων Ecoinvent και του λογισμικού προγράμματος Excel.

3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

3.1. Γενικά στοιχεία

Η Φιλοσοφία του Κύκλου Ζωής (ΦΚΖ, LCT – Life Cycle Thinking) και η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ, LCA – Life Cycle Assessment) αποτελούν επιστημονικές προσεγγίσεις γύρω από την ιδέα της «βιώσιμης παραγωγής και κατανάλωσης» (SCP – Sustainable Consumption and Production) και είναι αποτελέσματα των σύγχρονων περιβαλλοντικών πολιτικών και επιχειρηματικών αποφάσεων (JRC, 2010).

Η ιδέα της ΦΚΖ και η ΑΚΖ, η οποία αποτελεί το «εργαλείο» ποσοτικοποίησής της, χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα στην ανάπτυξη, την εφαρμογή και έλεγχο των περιβαλλοντικών πολιτικών παγκοσμίως, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και για τη συνεχή βελτίωση της περιβαλλοντικής διαχείρισης και τη στρατηγική λήψης αποφάσεων στον επιχειρηματικό τομέα.

3.2. Ιστορική αναδρομή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Οι πρώτες μελέτες που λειτούργησαν ως πρόδρομοι για την εκτίμηση του κύκλου ζωής χρονολογούνται στις δεκαετίες '60 και '70. Αυτές οι μελέτες επικεντρώθηκαν σε ζητήματα όπως η απόδοση της ενέργειας, η κατανάλωση πρώτων υλών και ως ένα βαθμό η διάθεση των αποβλήτων (Μάντζου και συν., 2006). Σχετικές μελέτες εκπονούνταν τη δεκαετία του '70 στις ΗΠΑ, τη Μεγάλη Βρετανία, τη Γερμανία και τη Σουηδία. Ωστόσο, η χρήση της ΑΚΖ για καθαρά εμπορικούς λόγους από τις μεγάλες επιχειρήσεις είχε ως συνέπεια τα αποτελέσματα των μελετών να διαφέρουν σημαντικά ακόμα και για τα ίδια προϊόντα. Ως εκ τούτου, η μέθοδος δεν μπορούσε να έχει ευρεία αποδοχή. Από το 1990 και μετά έγιναν κάποιες σημαντικές αλλαγές ως προς την εναρμόνιση των διαφόρων μεθόδων, όπως ο συντονισμός μεταξύ SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) και ειδικών στην ΑΚΖ. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στη συγγραφή και έκδοση του αποκαλούμενου κώδικα πρακτικής SETAC για την ΑΚΖ (SETAC, 1993). Από τα μέσα της δεκαετίας '90 και έπειτα, ο ISO ανέλαβε επίσημα την τυποποίηση της μεθοδολογίας με μια σειρά εκδόσεων (ISO 14040:1997, ISO14041:1998, ISO 14042:2000, ISO 14043:2000) (Μαρτινόπουλος και συν., 2002). Τα πιο πρόσφατα εναρμονισμένα πρότυπα είναι τα ISO 14040:2006 (Environmental Management, Life Cycle Assessment, Principles and Framework) και ISO 14044:2006 (Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται συνοπτικά η ιστορική αναδρομή της πορείας της ΑΚΖ.

Πίνακας 1. Ιστορική αναδρομή της πορείας της ΑΚΖ, πηγές: Γεωργακέλλος, 1999, Ho W.P. L., 2001, EC, 2010.

Έτος	Σημαντικά γεγονότα
Αρχές '60	Η ανησυχία για την εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων πυροδοτεί το ενδιαφέρον εύρεσης ορθολογικής χρήσης της ενέργειας και μελλοντικών προβλέψεων των ενεργειακών πόρων και αναγκών.
1963	Ο Η. Smith δημοσιεύει μια από τις πρώτες εκθέσεις τύπου ΑΚΖ για τις ενεργειακές απαιτήσεις παραγωγής χημικών προϊόντων στην Παγκόσμια Συνδιάσκεψη για την Ενέργεια (WEC).

Έτος	Σημαντικά γεγονότα
Τέλη '60	Οι μελέτες "The Limits to Growth" και "A Blueprint for Survival" εκκινούν την τάση για την πρόβλεψη εξάντλησης των αποθεμάτων πόρων/πρώτων υλών παγκοσμίως.
1969	Η εταιρεία Coca-Cola διενεργεί μια μελέτη τύπου AKZ για διάφορα υλικά εμφιάλωσης.
1970-1975	Η US EPA βελτιώνει τη μεθοδολογία της Coca-Cola Company και δημιουργεί τη μέθοδο Resources and Environmental Profile Analysis (REPA) «Ανάλυση χρήσης φυσικών πόρων και επίδρασης στο περιβάλλον», 15 περίπου μελέτες υπό REPA. Πρώτη μελέτη τύπου AKZ στη Μ. Βρετανία, με αντικείμενο τη βιομηχανία γυαλιού.
Τέλη '70 -'80	Στροφή σε ζητήματα διαχείρισης επικίνδυνων/στερεών αποβλήτων. Η λογική του κύκλου ζωής ενσωματώνεται στις αναδυόμενες μεθόδους Εκτίμησης Κινδύνου και Ανάλυσης Περιβαλλοντικών Προβλημάτων. Λεπτομερής ανάλυση απαιτούμενης ενέργειας και α' υλών για την παραγωγή και χρήση ειδών συσκευασίας υγρών από τους Boustead και Hancock, για λογαριασμό του Βρετανικού Συμβουλίου. «Environmental Accounting» (Περιβαλλοντική Λογιστική) για επιχειρήσεις, από τους Mueller-Wenk (1978). «Eco-balance» (Οικολογικό Ισοζύγιο) από το Bundesamt fuer Umweltschutz (1984).
Τέλη '80	Το πρόβλημα των στερεών απορριμμάτων λαμβάνει μεγάλες διαστάσεις παγκοσμίως, φέρνοντας οριστικά στο προσκήνιο τεχνικές ανάλυσης κύκλου ζωής για τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Περιβαλλοντικοί σύμβουλοι και ερευνητές βελτιώνουν, αναπτύσσουν και διαδίδουν τη μεθοδολογία AKZ παγκοσμίως. «Product Line Analysis - PLA» (Ανάλυση γραμμής προϊόντος) από το Projektgruppe Oekologische Wirtschaft (1987).
1991	11 Γενικοί Εισαγγελείς των ΗΠΑ καταγγέλλουν τη χρήση των AKZ αποτελεσμάτων για την προώθηση προϊόντων, έως ότου μια κοινή μεθοδολογία και συναίνεση επιτευχθεί για τον τρόπο που οι περιβαλλοντικές συγκρίσεις προϊόντων μπορούν να διαφημιστούν μη παραπλανητικά. Η Εταιρεία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (SETAC) επιχειρεί να εναρμονίσει τις οδηγίες σε ευρύ, διεθνές επίπεδο και επιμελείται τη συγγραφή και έκδοση του σταδίου Εκτίμησης των Επιπτώσεων της AKZ.
1992	Περιλαμβάνονται στο ISO 14000 οι γενικές απαιτήσεις για τη διενέργεια των AKZ, λόγω της δέσμευσης του ISO για στήριξη του στόχου Αειφόρου Ανάπτυξης, όπως αυτή συζητήθηκε στο Συνέδριο των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, στο Ρίο ντε Τζανέιρο. Ίδρυση της «Society for the Promotion of LCA Development – SPOLD». Το πρώτο ευρωπαϊκό σχέδιο για τα οικολογικά σήματα (eco-labels) από την Ε.Ε.

Έτος	Σημαντικά γεγονότα
1993	Ο ISO εκκινεί την νέα τεχνική επιτροπή ISO/TC 207 Περιβαλλοντική Διαχείριση.
1995	Η SETAC αναπτύσσει τον Κώδικα Πρακτικής για ΑΚΖ. Η πρώτη ΑΚΖ για αυτοκίνητο (VW Golf).
1996	Ο ISO παρουσιάζει τα πρώτα πρότυπα για ΑΚΖ.
2001	Η Ε.Ε. κυκλοφορεί την Πράσινη Βίβλο (Green Paper) για την Ολοκληρωμένη Πολιτική Προϊόντων (Integrated Product Policy).
2002	Εκκίνηση της πρωτοβουλίας για τον Κύκλο Ζωής: Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον (United Nations Environment Programme) και SETAC.
2005-2006	Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για την Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής. Πρώτη διαδικτυακή έκδοση Ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων αναφοράς για τον Κύκλο Ζωής (European Reference Life Cycle Database – ELCD).
2009	Ο ISO ξεκινά την ανάπτυξη διεθνούς προτύπου για το αποτύπωμα άνθρακα προϊόντων. Το Παγκόσμιο Συμβούλιο Επιχειρήσεων για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (World Business Council for Sustainable Development – WBCSD) και το Ινστιτούτο Παγκόσμιων Πόρων (World Resources Institute – WRI) ξεκινούν το πρωτόκολλο αερίων θερμοκηπίου των προϊόντων και το πρότυπο αλυσίδας εφοδιασμού-διανομής και κύκλου ζωής.

3.3. Τι είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής

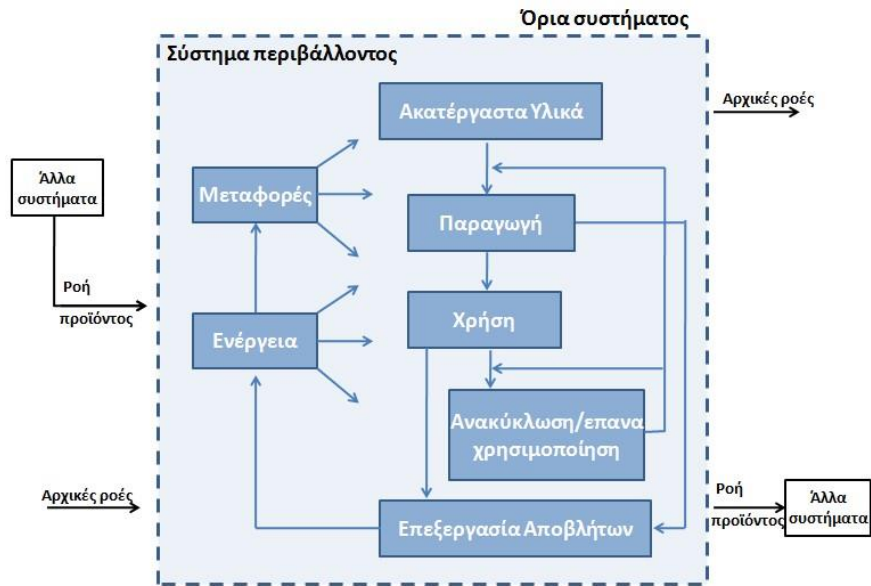
Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) είναι μια σχετικά νέα, συστηματική και αναλυτική επιστημονική μέθοδος που στοχεύει στην αντιμετώπιση των σύγχρονων, οξυμένων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Οι κύριοι ορισμοί που έχουν δοθεί για την ΑΚΖ σύμφωνα με επίσημους φορείς παρουσιάζονται παρακάτω.

Ορισμός ΑΚΖ κατά SETAC (Κορωναίος, 2008):

Η ΑΚΖ είναι μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων.

Ορισμός ΑΚΖ κατά ISO 14040:2006 (Guinee J. et. als, 2001):

Η ΑΚΖ περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων και την εκτίμηση των εισροών, εκροών και δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.



Σχήμα 1. Παράδειγμα συστήματος προϊόντος κατά ΑΚΖ, πηγή: Καραμπάτσου, 2013.

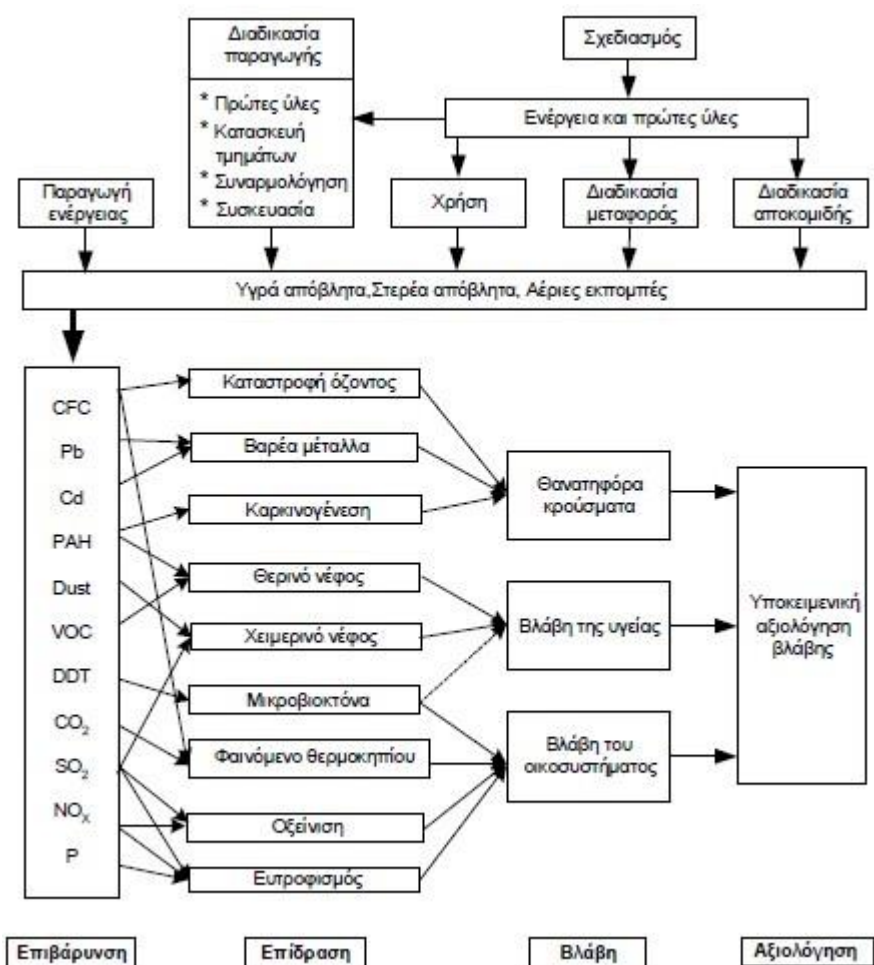
Η μέθοδος ΑΚΖ λοιπόν, χρησιμοποιείται για την καταγραφή και εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (χρήση ενέργειας και πρώτων υλών, ρύπανση ατμόσφαιρας, νερού, εδάφους, κ.ο.κ.) μεμονωμένων δραστηριοτήτων, προϊόντων ή συνολικών διαδικασιών παραγωγής. Η ΑΚΖ εφαρμόζεται από τη «γέννηση έως το θάνατο» της δραστηριότητας, του προϊόντος ή της διαδικασίας, σε όλο δηλαδή τον κύκλο ζωής του (παραγωγή, διανομή, μεταφορά, χρήση και απόρριψη) καθώς και για προτάσεις προς τη βελτίωσή τους. Οι βασικές συνιστώσες της μεθόδου είναι τα ισοζύγια ενέργειας και μάζας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των εκπομπών, τη μείωση των πρώτων υλών και καυσίμων σε όλη τη διαδικασία μετατροπής των υλικών σε προϊόντα, τη χρήση και απόρριψή τους καθώς και την (τελική) εναπόθεση των παραπροϊόντων της διαδικασίας. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν πάντα ως άξονες τη χρήση πόρων/πρώτων υλών, την υγεία του ανθρώπου και τις συνέπειες στο οικοσύστημα.

Εκτός από τον κύριο σκοπό, η ΑΚΖ μπορεί να περιλαμβάνει, κατά περίπτωση, και άλλους στόχους, όπως (Γεωργακέλλος, 1999):

- Λήψη επιστημονικά τεκμηριωμένων περιβαλλοντικών αποφάσεων,
- Θέσπιση περιβαλλοντικών κανόνων και καθορισμό προτεραιοτήτων στη σχεδίαση και παραγωγή διαφόρων προϊόντων,
- Αξιολόγηση υλικού και σύγκριση με άλλα υλικά, προσδιορισμός ρόλου διαφόρων υλικών στις σύγχρονες στρατηγικές διαχείρισης περιβάλλοντος,
- Δημιουργία επιστημονικού υποβάθρου για την ανάδειξη της αναγκαιότητας υιοθέτησης οικονομικών μέτρων εφόσον αναγνωρίζονται οι αρνητικές επιπτώσεις προϊόντων/δραστηριοτήτων στο περιβάλλον,
- Ανάδειξη καλύτερης μεθόδου ανάκτησης υλικών και διαχείρισης αποβλήτων από τις δυνατές εναλλακτικές λύσεις,
- Δημιουργία αξιόπιστης βάσης ανταλλαγής πληροφοριών στον τομέα της περιβαλλοντικής διαχείρισης μεταξύ φορέων,
- Διευκόλυνση επιχειρήσεων στο πεδίο του οικολογικού μάρκετινγκ,

- Δημιουργία βάσης για την εφαρμογή προγραμμάτων «ποιότητας περιβάλλοντος»,
- Θέσπιση επιστημονικών κριτηρίων για την απονομή των οικολογικών σημάτων (eco-labels) στα διάφορα προϊόντα,
- Ενημέρωση του κοινού για τις επιπτώσεις διαφόρων προϊόντων και δραστηριοτήτων στο περιβάλλον,
- Αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων με βάση την επίδρασή τους στο περιβάλλον.

Η ΑΚΖ απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων για τα υλικά, συστατικά, προϊόντα, τις διαδικασίες παραγωγής και τη χρήση ενέργειας όπως επίσης και για την επιβάρυνση του περιβάλλοντος σε κάθε επιμέρους διαδικασία παραγωγής. Το γεγονός αυτό καθιστά τη διαδικασία συλλογής και οργάνωσης των πληροφοριών και των δεδομένων εξαιρετικά χρονοβόρα και με υψηλό κόστος.



Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής ενός προϊόντος και των επιπτώσεων της παραγωγικής του διαδικασίας στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, πηγή: Μαρτινόπουλος και συν., 2002.

Η αξιοπιστία της ΑΚΖ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από (Κορωναίος, 2008):

- τον τρόπο μοντελοποίησης και το βαθμό απλοποίησης των υπό εξέταση συστημάτων,
- το σύνολο των παραδοχών και των υποθέσεων που χρησιμοποιούνται σε κάθε βήμα της ανάλυσης και

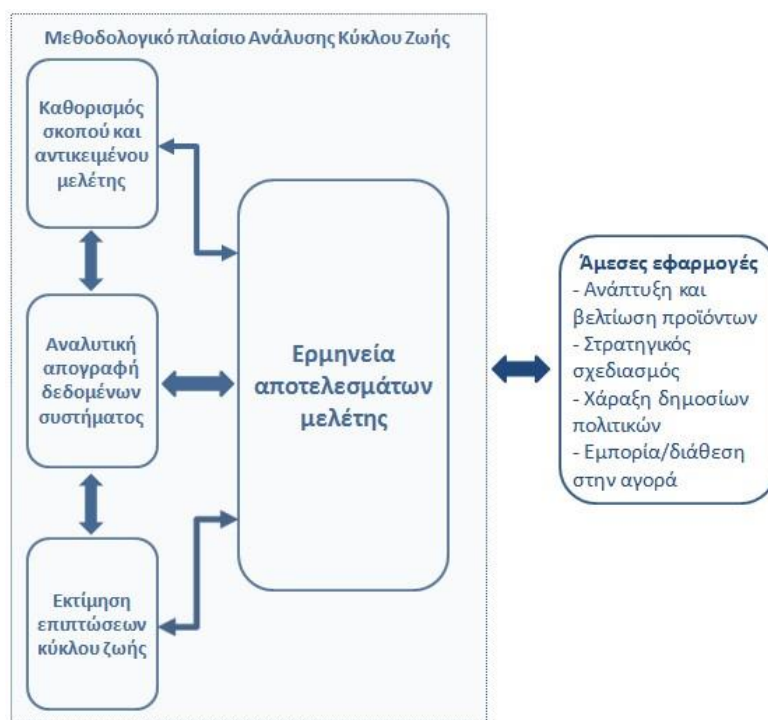
γ) τη διαθεσιμότητα σύγχρονων και αξιόπιστων δεδομένων.

3.4. Τα στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής προϊόντων, διεργασιών ή δραστηριοτήτων αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια, σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό για την Πιστοποίηση (ISO) (ISO 14040-14044: 2006):

1. Καθορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης – Goal and Scope definition (ISO 14040:1997)
2. Αναλυτική απογραφή των δεδομένων του συστήματος – Life Cycle Inventory - LCI (ISO 14041:1998)
3. Εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής – Life Cycle Impact Assessment – LCIA (ISO 14042:2000)
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μελέτης – Life Cycle Interpretation (ISO 14043:2000)

Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, τα στάδια της ΑΚΖ δε διατρέχονται διαδοχικά, αλλά υπόκεινται σε επαναληπτική επεξεργασία, όταν προκύψει η ανάγκη βελτίωσης των υπολογισμών ή όταν οι διαδικασίες αποδειχθούν δυσχερείς κατά το στάδιο της ερμηνείας των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3. Το γενικό πλαίσιο της μεθοδολογίας ΑΚΖ βάσει ISO, πηγή: JRC, 2010.

Στάδιο 1: Καθορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης

Είναι το πρώτο και ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο στη μεθοδολογία της ΑΚΖ. Περιλαμβάνει μια ακριβή και σαφή διατύπωση του σκοπού και του αντικειμένου για τον οποίο γίνεται η ΑΚΖ, την προοριζόμενη(νες) εφαρμογή(γές) των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ, καθώς και τις παραδοχές και

τους περιορισμούς που η μελέτη αναπόφευκτα περιλαμβάνει (JRC, 2010). Τα ζητήματα που συνδέονται κυρίως με αυτό το στάδιο είναι:

- Η ακριβής διατύπωση του σκοπού της ΑΚΖ,
- Ο λεπτομερής καθορισμός του κύκλου ζωής και χρήσης του προϊόντος,
- Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας ("*functional unit*"),
- Ο ορισμός και η περιγραφή των ορίων του συστήματος,
- Ο καθορισμός των ποιοτικών προδιαγραφών για τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν,
- Οι υποθέσεις, οι περιορισμοί και οι απαιτήσεις για την επακόλουθη ερμηνεία.

Το πλαίσιο της μελέτης βασίζεται στο βαθμό λεπτομέρειας που απαιτείται για την εφαρμογή των αποτελεσμάτων. Το τελικό αποτέλεσμα της μελέτης εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια των στοιχείων που εισάγονται.

Η λειτουργική μονάδα: είναι το βασικότερο μέτρο λειτουργίας του συστήματος και παρέχει μια κοινή μονάδα αναφοράς, επιτρέποντας τη σύγκριση δυο διαφορετικών ή περισσότερων συστημάτων.

Τα όρια του συστήματος: καθορίζουν ποιες διεργασίες θα πρέπει να συμπεριληφθούν στη μελέτη. Ο καθορισμός των ορίων του συστήματος γίνεται κατά τον ορισμό του πλαισίου της ανάλυσης.

Το διάγραμμα ροής: των διαδικασιών διαμορφώνει μια ποιοτική γραφική απεικόνιση όλων των σχετικών διεργασιών που περιλαμβάνονται στον κύκλο ζωής του υπό μελέτη συστήματος. Το διάγραμμα πρέπει να περιλαμβάνει μόνο τα υπό ανάλυση στάδια του κύκλου ζωής, αυτά δηλαδή που βρίσκονται εντός των ορίων του συστήματος.

Η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων: εξαρτάται από το δεδομένα που εισάγονται. Γενικά, για κάθε στοιχείο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η χρονική και γεωγραφική κάλυψη, η ακρίβεια, η επαναληψιμότητα και όσο το δυνατόν η αντιπροσωπευτικότητά του στο γεωγραφικό και χρονικό ορισθέν πλαίσιο.

Στάδιο 2: Αναλυτική απογραφή των δεδομένων του συστήματος

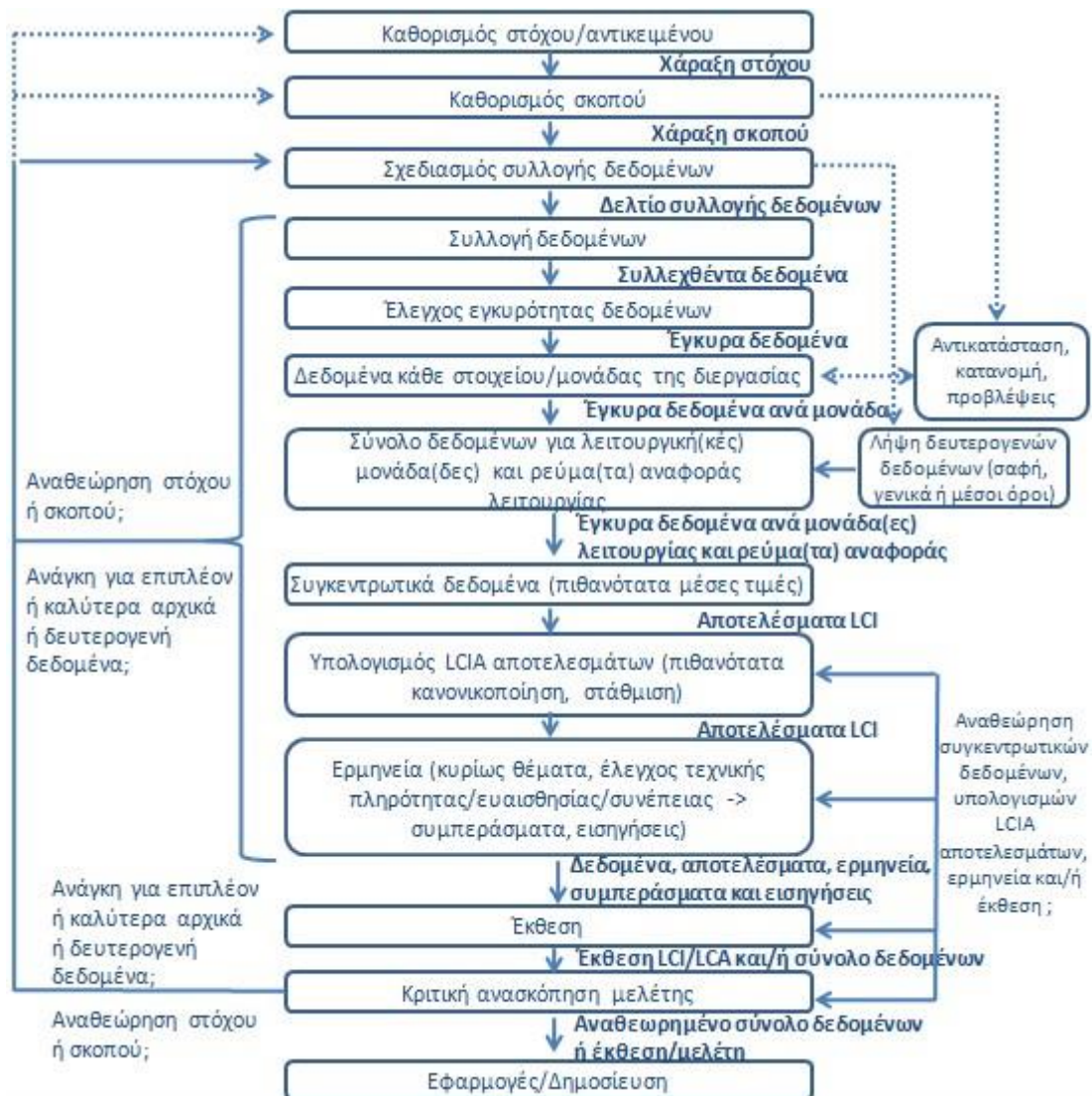
Σε αυτό το στάδιο γίνεται η εκτίμηση και η αναλυτική απογραφή των δεδομένων του συστήματος. Κάθε υποπροϊόν παρουσιάζεται ως ένα (υπο)σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο των διεργασιών που συνδέονται με τη ροή μάζας ή/και ενέργειας. Το σύστημα μπορεί να παρουσιαστεί ως ένα «μαύρο κουτί – black box». Σε αυτήν την περίπτωση, η φύση των διαφόρων διεργασιών που περικλείονται στο σύστημα δε λαμβάνονται υπόψη.

Η απογραφή των δεδομένων είναι μια ποσοτική περιγραφή της συνολικής ροής μάζας και ενέργειας μέσα στα όρια του συστήματος ή των υποσυστημάτων. Κάθε ένα από τα υποσυστήματα έχει ως είσοδο την έξοδο μιας προηγούμενης διεργασίας, ενώ η έξοδος του υπολογίζεται ως είσοδος για την επόμενη διεργασία που ακολουθεί. Κατ' αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται όλες οι εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές.

Οι πηγές των δεδομένων μπορεί να είναι πρωτογενείς, από δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών ή μετρήσεις. Συμβαίνει συχνά, αυτά να μην είναι διαθέσιμα. Σ' αυτήν την περίπτωση γίνονται ορθές εκτιμήσεις βάσει μοντέλων ή βιβλιογραφίας, δημοσιεύσεων, βάσεων δεδομένων, παρόμοιων μελετών ΑΚΖ, κ.λπ. που ανταποκρίνονται κατά το δυνατόν στα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος.

Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει διακυμάνσεις, αβεβαιότητες και πιθανά κενά. Οι παράμετροι πρέπει να παρουσιάζονται στο στάδιο καθορισμού του σκοπού της μελέτης και να αναλύονται στο στάδιο της ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι διαδικασίες κατά την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου AKZ βάσει των προδιαγραφών ISO 14044. Η διαδικασία είναι επαναληπτική και δίνεται έμφαση στην απογραφή των δεδομένων. Η συλλογή/βάση των δεδομένων της μελέτης μπορεί να διαιρεθεί σε ένα βασικό μέρος, το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες από γενικές πηγές και ένα δεύτερο κομμάτι, όπου συγκεντρώνονται οι πληροφορίες για το συγκεκριμένο προϊόν ή τη διαδικασία. Στο σχήμα παρουσιάζεται επίσης η δυνατότητα ομαδοποίησης (ιδίως όσον αφορά στο βασικό μέρος δεδομένων) διαδικασιών ή παρόμοιων υλικών σε λιγότερες κατηγορίες. Επίσης, φαίνεται η δυνατότητα ενός ή περισσότερων επαναλήψεων βάσει της κριτικής αναθεώρησης. Η αναθεώρηση αυτή αφορά σε μέρος ή επί συνόλω την ανάλυση και αξιολόγηση της μελέτης.



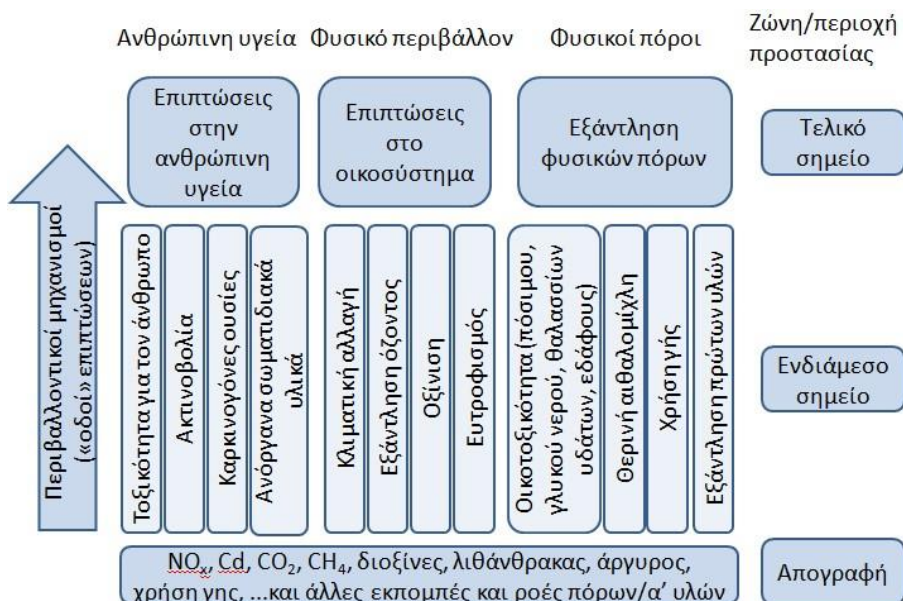
Σχήμα 4. Επαναληπτική διαδικασία AKZ με έμφαση στην απογραφή των δεδομένων κατά ISO 14044: 2006, τροποποιημένο (JRC, 2010) (όπου LCIA-Life Cycle Impact Assessment: εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής και LCI-Life Cycle emission & resource consumption Inventory: απογραφή κύκλου ζωής των εκπομπών και της κατανάλωσης πόρων).

Στάδιο 3: Εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής

Η εκτίμηση των επιπτώσεων είναι μια ποιοτική ή/και ποσοτική διεργασία για την εκτίμηση των πιθανών (αρνητικών ή συγκριτικά θετικότερων) περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προσδιορίζονται στο στάδιο της απογραφής των δεδομένων. Η εκτίμηση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Συνήθως καταλήγει στον υπολογισμό της επίπτωσης του προϊόντος εξετάζοντας τις εξόδους/εκροές, τις επιπτώσεις ή καταστροφές που προκαλούνται σε μια ή περισσότερες φάσεις του κύκλου ζωής με αποτέλεσμα να εντοπίζονται τα στάδια ζωής του προϊόντος που εμφανίζουν τα σημαντικότερα προβλήματα.

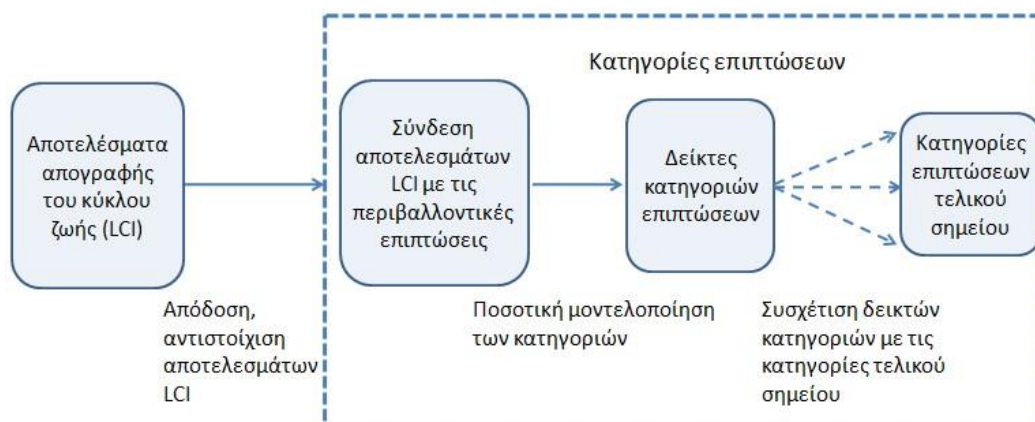
Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040 και ISO 14044, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών των προϊόντων μπορεί να αφορά επιπτώσεις ενδιάμεσου (midpoint) ή/και τελικού σημείου (endpoint) (Σχήμα 5). Οι επιπτώσεις ενδιάμεσου σημείου περιλαμβάνουν την αλλαγή κλίματος, τη μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος, τη δημιουργία τροποσφαιρικού όζοντος, τον ευτροφισμό, την οξίνιση, τις τοξικολογικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα, τη μείωση των μη ανανεώσιμων ορυκτών πόρων, τη χρήση ύδατος και εδάφους, την πρόκληση θορύβου κ.α. Οι επιπτώσεις τελικού σημείου ταξινομούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- *εξάντληση φυσικών πόρων (resource scarcity)*: οι φυσικοί πόροι διακρίνονται σε μη ανανεώσιμους (ένα πεπερασμένο απόθεμα αυτών είναι διαθέσιμο), σε ανανεώσιμους (ήλιος, ανακυκλωμένα υλικά κ.α.) και σε βιοτικούς πόρους (πόρους χλωρίδας και πανίδας),
- *επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (damage to human health)*: χωρίζονται είτε σε οξείες επιπτώσεις (από πυρκαγιές, εκρήξεις κ.ά.) είτε σε μακροπρόθεσμες λόγω χρόνιας έκθεσης των ανθρώπων σε τοξικές ουσίες (π.χ. βενζόλιο, εντομοκτόνα κ.ά.),
- *επιπτώσεις στο οικοσύστημα (damage to ecosystem diversity)*: αφορούν στη δομή (πληθυσμός, επίπεδα διατροφής, φυσικό περιβάλλον) και στη λειτουργία (παραγωγικότητα, διεργασία).



Σχήμα 5. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ένα γενικό πλαίσιο κατά ISO, πηγή: JRC, 2010.

Στο στάδιο αυτό μοντελοποιούνται οι «οδοί» επιπτώσεων διαφόρων ουσιών, όσο το δυνατόν πληρέστερα. Αυτό γίνεται με σκοπό τη σύνδεση των δεδομένων απογραφής με τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις βάσει των «οδών». Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαδικασία εκτίμησης των επιπτώσεων τελικού σημείου ή βλαβών σε προστατευμένους τομείς.



Σχήμα 6. Σύνδεση των δεδομένων απογραφής με τις κατηγορίες των επιπτώσεων τελικού σημείου ή με τη βλάβη σε προστατευμένους τομείς κατά τη διαδικασία εκτίμησης των επιπτώσεων, πηγή: Jolliet O. et als, 2016.

Τα βασικότερα στάδια της εκτίμησης των επιπτώσεων, ανεξαρτήτως προσέγγισης, είναι τα εξής (Καραμπάτσου, 2013; Κωνσταντζος, 2014):

1. Επιλογή της μεθόδου και των κατηγοριών των επιπτώσεων που θα χρησιμοποιηθούν

Οι κατηγορίες των επιπτώσεων είναι κυρίως οι εξής:

- εξάντληση των αβιοτικών πόρων (abiotic depletion - ADP), μετριέται σε σχέση με τα αποθέματα σε παγκόσμιο επίπεδο,
- παγκόσμια υπερθέρμανση (global warming - GWP), μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg CO₂,
- εξασθένιση της στοιβάδας όζοντος (ozone layer depletion - ODP), μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg CFC-11,
- ανθρώπινη τοξικότητα (human toxicity - HT), επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό κατά την έκθεση σε τοξικές (καρκινογόνες και μη καρκινογόνες) ουσίες, μετριέται σε kg ανά 1,4 DCB_{eq},
- οικοτοξικότητα γλυκού νερού (fresh water aquatic ecotoxicity - FAEC),
- θαλάσσια οικοτοξικότητα (marine aquatic ecotoxicity - ECA), αφορά την ποσότητα του νερού που θα μολυνθεί ως ένα κρίσιμο σημείο από 1 kg της ουσίας,
- εδαφική οικοτοξικότητα (terrestrial ecotoxicity - ECT), αφορά την επιβάρυνση του εδάφους ως ένα κρίσιμο επίπεδο από 1 kg της ουσίας,
- φωτοχημική οξείδωση (photochemical oxidation), μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg C₂H₄,
- οξίνιση (acidification - AP), μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg SO₄⁻²,
- ευτροφισμός (eutrophication - NP), μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg PO₄⁻³.

2. Ταξινόμηση (classification) των στοιχείων της απογραφής των δεδομένων στις επιλεγμένες κατηγορίες των επιπτώσεων

Οι πληροφορίες από την απογραφή δεδομένων, τα περιβαλλοντικά φορτία δηλαδή, αντιστοιχίζονται στις διάφορες δυνατές κατηγορίες επιπτώσεων, ανάλογα με την επιλεχθείσα μέθοδο. Αυτό που συνήθως συμβαίνει, είναι οι υπολογισθείσες εκπομπές να συνεισφέρουν σε περισσότερες από μια κατηγορίες επιπτώσεων (π.χ. οι εκπομπές NO₂ συντελούν τόσο στο φαινόμενο ευτροφισμού, όσο και στα φαινόμενα τοξικότητας και οξίνισης).

3. Χαρακτηρισμός (characterization)

Μετά την ταξινόμηση των περιβαλλοντικών φορτίων στις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων ακολουθεί ο χαρακτηρισμός. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται ανάλυση, ποσοτικοποίηση και άθροιση των περιβαλλοντικών φορτίων και επιπτώσεων που ανήκουν στις επιμέρους κατηγορίες.

Ο χαρακτηρισμός μπορεί να προσεγγιστεί μέσω της συσχέτισης των πληροφοριών από πίνακες απογραφής δεδομένων με όποια μέθοδο χρησιμοποιηθεί. Υπάρχουν προσεγγίσεις που προσπαθούν να μοντελοποιήσουν την έκθεση και τις επιδράσεις. Από αυτό το στάδιο προκύπτουν μετρήσεις και περιγραφές επιπτώσεων, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως «προφίλ επιπτώσεων».

Οι δείκτες για κάθε κατηγορία επιπτώσεων με βάση τα στοιχεία της απογραφής δεδομένων μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας διάφορες εξισώσεις, συντελεστές ή βάσεις δεδομένων. Οι συντελεστές προκύπτουν από τους υπολογισμούς μοντέλων χαρακτηρισμού και εξαρτώνται από τη μέθοδο που ακολουθείται.

Τα στοιχεία της απογραφής δεδομένων εκφράζονται τελικά με όρους ισοδύναμης μονάδας, η οποία είναι μοναδική για κάθε κατηγορία. Για παράδειγμα, οι σχετικές συνεισφορές των διαφορετικών αερίων στην κατηγορία επίπτωσης «κλιματική αλλαγή» αποτιμώνται με βάση τα ισοδύναμα παραγόμενα CO₂ kg, χρησιμοποιώντας τα σχετικά δυναμικά κλιματικής αλλαγής (GWPs) σε ορίζοντα 100 ή 500 χρόνων. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε ρύπος που συνεισφέρει στην επίπτωση «κλιματικής αλλαγής» μπορεί να μετατραπεί σε ισοδύναμα παραγόμενα CO₂ kg, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους συντελεστές.

Επί παραδείγματι, για μια τιμή GWP₁₀₀=21 CO_{2eq} συμπεραίνουμε ότι 1 Kg της ουσίας αυτής έχει την ίδια επίπτωση κλιματικής αλλαγής με 21 kg CO₂ σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών. Σημειώνεται ότι οι συντελεστές είναι μοναδικοί ανά κατηγορία, ρύπο, μέσο (αέρας, νερό, κ.ά.), χρονικό ορίζοντα, χωρικό περιβάλλον κ.λπ..

Για όλους τους ρύπους που συνεισφέρουν σε μια κατηγορία επιπτώσεων, η τελική αθροιστική τιμή της κατηγορίας σε ισοδύναμη μονάδα προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους γινομένων των συντελεστών με τους αντίστοιχους ρύπους.

Στην περίπτωση της «κλιματικής αλλαγής» για παράδειγμα η εξίσωση είναι:

$$GWP = \sum_i GWP_{a,i} \cdot m_i$$

$GWP_{a,i}$: συντελεστής Global Warming Potential για την ουσία/μέσο i σε χρονικό ορίζοντα a

m_i : η ποσότητα σε kg του ρύπου i που εκπέμπεται στο μέσο

Η τελική τιμή προκύπτει σε ισοδύναμα Kg CO₂ (CO₂-eq). Ανάλογες εξισώσεις υπάρχουν και για τις υπόλοιπες κατηγορίες.

4. Κανονικοποίηση (Normalization)

Δεν είναι υποχρεωτικό στάδιο κατά ISO, αλλά είναι άκρως διαφωτιστικό για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφόρων επιπτώσεων ή ακόμα και μεταξύ των εξεταζόμενων τομέων. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται προτεραιότητα ή επιλύονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εναλλακτικών προϊόντων (π.χ. μπορεί για μια επιλογή να υπολογιστούν χαμηλότεροι δείκτες κλιματικής αλλαγής και για μια άλλη επιλογή υψηλότεροι δείκτες τοξικότητας). Η σύγκριση μεταξύ των δεικτών κατηγορίας επιπτώσεων είναι ένα προαιρετικό βήμα σε μερικές εφαρμογές AKZ, όπως αναφέρεται στο ISO 14040 και υλοποιείται σε αυτό το στάδιο, της κανονικοποίησης.

Οι μέθοδοι της κανονικοποίησης επιτρέπουν τη σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων κατηγοριών με μια πρότυπη τιμή. Η κατηγορία επιπτώσεων διαιρείται με μια τιμή αναφοράς. Συνήθεις τιμές αναφοράς είναι οι ετήσιες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις σε μια χώρα ή ήπειρο, διαιρεμένες με τον αντίστοιχο αριθμό κατοίκων. Η εξίσωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η εξής:

$$N_k = \frac{P_k}{R_k}$$

k: δείκτης που δηλώνει την κατηγορία επίπτωσης

N: δείκτης κανονικοποίησης

P: άθροισμα από τη φάση χαρακτηρισμού

R: τιμή αναφοράς

Μετά την κανονικοποίηση, όλες οι κατηγορίες έχουν την ίδια μονάδα, π.χ. ανά έτος ή ανά κάτοικο χώρας ή ηπείρου, γεγονός που επιτρέπει την ευκολότερη σύγκρισή τους. Τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την ανάδειξη της σπουδαιότητας των διαφόρων κατηγοριών επιπτώσεων. Σημειώνεται ότι σε αυτήν την φάση γίνεται η παραδοχή ότι όλες οι κατηγορίες είναι ισοδύναμες, π.χ. η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και οι οικοτοξικολογικές επιπτώσεις στην Ευρώπη είναι ισοδύναμης σπουδαιότητας. Αυτό το θέμα μπορεί να επιλυθεί με την εισαγωγή συντελεστών στάθμισης, η αξιοπιστία των οποίων όμως βάλλεται από την υποκειμενική τους φύση.

Στάδιο 4: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μελέτης

Σε αυτό το στάδιο εξετάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων καθώς και οι παραδοχές που περιλαμβάνονται σε αυτά, προκειμένου να καταλήξει η μελέτη στα τελικά συμπεράσματα, βάσει του αρχικού σκοπού της (στάδιο 1).

Έχουν προσδιοριστεί στα πρότυπα ISO 14040-14044 τρεις δραστηριότητες που αφορούν σε αυτό το στάδιο:

- Η ανάλυση των αποτελεσμάτων,
- Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων,
- Η εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων και η διατύπωση προτάσεων.

Σε αυτό το στάδιο είναι σκόπιμο να υλοποιείται και μία ανάλυση ευαισθησίας. Στην ανάλυση ευαισθησίας εισάγονται σκόπιμα διάφορες εναλλακτικές δεδομένων προκειμένου να καθοριστεί η επίδραση που έχουν αυτές στα αποτελέσματα. Με βάση το εύρος της αβεβαιότητας των συγκεκριμένων δεδομένων που εισάγονται, μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό εύρος σφάλματος των αποτελεσμάτων. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα δεν

προέρχονται από συγκεκριμένες μετρήσεις, όπου δηλαδή η αβεβαιότητα είναι σχετικά μεγάλη, η ανάλυση ευαισθησίας παίζει σημαντικό ρόλο.

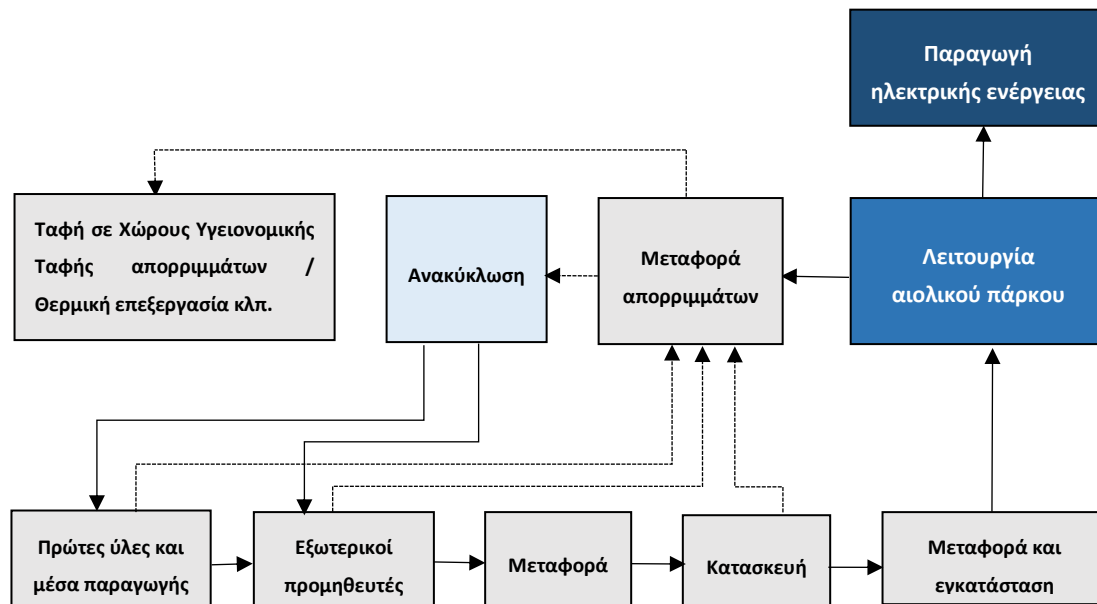
Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων εκτελείται παράλληλα με τις άλλες φάσεις της ΑΚΖ. Εάν τα αποτελέσματα της απογραφής των δεδομένων ή του σταδίου εκτίμησης των επιπτώσεων δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις που καθορίστηκαν στο στάδιο καθορισμού του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης, το στάδιο της απογραφής πρέπει να βελτιωθεί (π.χ. με την επιθεώρηση των ορίων του συστήματος, με μια πιο εκτενή συλλογή δεδομένων, κ.λπ.). Στη συνέχεια, ακολουθεί και μια πιο βελτιωμένη εκτίμηση των επιπτώσεων. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του σταδίου καθορισμού του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης.

Τέλος, η ΑΚΖ πρέπει να περιλαμβάνει προτάσεις για βελτιώσεις του προϊόντος ή της δραστηριότητας.

4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικών Πάρκων

Η ΑΚΖ αιολικών πάρκων ακολουθεί τις γενικές αρχές των μελετών ΑΚΖ, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, και εξετάζει τα περιβαλλοντικά θέματα και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Ειδικότερα, για όλα τα επιμέρους υλικά και τμήματα από τα οποία αποτελείται ένα αιολικό πάρκο, υπολογίζονται η απαιτούμενη ενέργεια και οι παραγόμενοι περιβαλλοντικοί ρύποι, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο του κύκλου ζωής τους. Με αυτόν τον τρόπο, το «ενεργειακό περιεχόμενο» των υλικών που εξετάζονται, αποτελεί το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται σε όλα τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής τους (Schleisner, 1999). Στην περίπτωση των αιολικών πάρκων, τα στάδια αυτά αφορούν στην αρχική παραγωγή πρώτων υλών, την κατασκευή και συναρμολόγηση των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών, τη λειτουργία και συντήρησή τους, την τελική διαχείριση των υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους και τη μεταφορά σε όλα τα επιμέρους στάδια.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ο πλήρης κύκλος ζωής ενός αιολικού πάρκου.



Σχήμα 7. Κύκλος ζωής αιολικού πάρκου, πηγή: VESTAS, 2013.

Τα αποτελέσματα της μελέτης ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου – και ενός ενεργειακού έργου ευρύτερα – μπορούν να βοηθήσουν στην επίτευξη πολλαπλών στόχων που έχουν να κάνουν με (Ardente et als, 2006):

- Τη σύγκριση της λειτουργίας διαφορετικών συστημάτων ή τεχνολογιών,
- Τον εντοπισμό των επιμέρους τμημάτων ή διαδικασιών, που είναι υπεύθυνα για τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (“hot spots”),
- Την απόκτηση χρήσιμων γνώσεων, με σκοπό τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη βελτίωση της λειτουργίας του έργου,
- Την τεκμηρίωση και αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της πράσινης «αγοράς».

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν εκπονηθεί σχετικά με την ΑΚΖ αιολικών πάρκων, φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που απαιτείται και οι μεγαλύτερες παραγόμενες ποσότητες εκπομπών CO₂ σχετίζονται με την κατασκευή και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών (Πίνακας 2). Βέβαια, όσο μεγαλύτερη είναι η εγκατεστημένη ισχύς ενός αιολικού πάρκου, τόσο περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από αυτό, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο δείκτης

ενεργειακής έντασης (energy intensity) και οι εκπομπές (ισοδύναμων) ρύπων CO₂, ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πραγματικότητα, οι τελικές τιμές των παραπάνω δεικτών επηρεάζονται από ένα εύρος παραγόντων, όπως είναι η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό τους, η διάρκεια ζωής του έργου, ο συντελεστής διαθεσιμότητας των ανεμογεννητριών και οι εφαρμογές ανάκτησης υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής του (Nies et als, 2012).

Πολλές μελέτες έχουν υλοποιηθεί γύρω από την ΑΚΖ αιολικών πάρκων. Ενδεικτικά αποτελέσματα των μελετών συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα (Arvesen et als, 2009).

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά στοιχεία μελετών ΑΚΖ αιολικών πάρκων, πηγή: Arvesen et als, 2009.

Έτος εκπόνησης μελέτης	Περιοχή μελέτης	Εγκατεστημένη ισχύς αιολικού πάρκου (kW)	Διάρκεια ζωής (έτη)	Συντελεστής διαθεσιμότητας (CF, %)	Ενεργειακή Ένταση (kWh _{in} /kWh _{el})	Εκπομπές ρύπων CO ₂ (g/kWh)
2009	Αυστραλία	3.000	20	33,0	0,043	9,3 ¹
2009	Αυστραλία	650	20	34,0	0,048	10,3 ¹
2009	Γαλλία	4.500	20	30,0	0,082	16,0 ¹
2009	Νορβηγία	5.000	20	53,0	0,054	11,5 ¹
2009	Ισπανία	2.000	20	22,8	0,021	;
2009	Ισπανία	2.000	20	22,8	0,029	6,6 ¹
2008	Γερμανία	5.000	;	;	;	22,0 ¹
2008	Ιταλία	660	20	19,0	0,052	14,8 ¹
2008	Ταϊβάν	660 – 1.750	20	30,2	0,014	3,6
2007	Ευρώπη	2.000	20 ²	30,0	0,049	14,7 ¹
2007	Ευρώπη	800	20 ²	20,0	0,042	11,7 ¹
2006	Δανία	3.000	20 ²	54,2	0,030	5,2
2006	Δανία	3.000	20	30,0	0,027	4,6
2006	Γερμανία	2.500	;	;	0,031	9,0 ¹
2006	Γερμανία	1.500	;	;	0,033	11,0 ¹
2004	Ευρώπη	600	20	28,5	;	7,5 ¹
2004	Ευρώπη	1.500	20	28,5	;	12,2 ¹
2004	Ευρώπη	2.500	20	45,7	;	9,2 ¹
2004	Ευρώπη	4.500	20	45,7	;	8,9 ¹
2004	Γερμανία/ Βραζιλία	500 – 600	;	;	0,070 ³	19,8 ³
2004	Δανία	2.000	20 ²	46,2	0,038	7,6
2004	Δανία	2.000	20 ²	32,2	0,032	6,8
2004	Γερμανία	1.500	20	24,7	0,020	;
2004	Γερμανία	500	20	24,7	0,020	;
2003	Αυστραλία	;	;	;	0,020	6,1 ¹
2000	Δανία	500	20	25,1	0,033	9,7

Έτος εκπόνησης μελέτης	Περιοχή μελέτης	Εγκατεστημένη ισχύς αιολικού πάρκου (kW)	Διάρκεια ζωής (έτη)	Συντελεστής διαθεσιμότητας (CF, %)	Ενεργειακή Ένταση (kWh _{in} /kWh _{el})	Εκπομπές ρύπων CO ₂ (g/kWh)
2000	Δανία	500	20	28,5	0,049	16,5
2000	Βέλγιο	600	20	34,2	0,035	8,6

Ο **συντελεστής διαθεσιμότητας (CF) %** εκφράζει το λόγο της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας προς αυτήν που θα παράγονταν αν η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε στην ονομαστική ισχύ της συνεχώς κατά τη διάρκεια του έτους

$$CF = E / (8760 \times P), \text{ όπου}$$

E η ετήσια παραγόμενη ενέργεια MWh (του αιολικού πάρκου ή της ανεμογεννήτριας) και

P η συνολική ισχύς MW (του αιολικού πάρκου ή της ανεμογεννήτριας)

Ο δείκτης **ενεργειακής έντασης** εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στις ενεργειακές απαιτήσεις του αιολικού πάρκου προς τη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

Παρατηρήσεις:

1. CO_{2equivalents}: Ισοδύναμες ποσότητες εκπομπών CO₂, συμπεριλαμβανομένων και έτερων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (εκτός CO₂).
2. Επιμέρους τμήματα του συστήματος θεωρείται πως έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
3. Τιμές για μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή/και ανεμολογικά δεδομένα.

Από τον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα, φαίνεται πως το εύρος τιμών του δείκτη της ενεργειακής έντασης κυμαίνεται από 0,014 έως 0,082 kWh_{in}/kWh_{el}, ενώ οι εκπομπές ρύπων ισοδύναμου CO₂ από 3,6 έως 22,0 g/kWh. Εύκολα γίνεται αντιληπτό, πως όσο πιο μεγάλη τιμή έχει ο δείκτης της ενεργειακής έντασης, τόσο μεγαλώνει και η τιμή των εκπομπών ρύπων ισοδύναμου CO₂. Το γεγονός αυτό φαίνεται εύλογο, καθώς όσο μεγαλώνουν οι ενεργειακές ανάγκες στο σύνολο του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου ανά αποδιδόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο μεγαλύτερες ποσότητες ρύπων ισοδύναμου CO₂ εκπέμπονται για το ίδιο ποσό ενέργειας. Παρά του ότι οι τιμές φαίνεται να έχουν αποκλίσεις ανάλογα με την εκάστοτε μελέτη, παραμένει γεγονός πως οι δείκτες που αντιστοιχούν στην αιολική ενέργεια, παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές, συγκριτικά με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας, συμβατικές και μη – συμβατικές (Arvesen et als, 2009).

Αξίζει να σημειωθεί, πως σε μελέτες AKZ αιολικών πάρκων, ακόμα και του ίδιου τύπου ανεμογεννητριών, τα αποτελέσματα δεν καταλήγουν πάντα στα ίδια συμπεράσματα. Δεδομένου πως βασικές παράμετροι είναι δυνατό να διαφοροποιούνται έντονα, η σύγκριση των αποτελεσμάτων επηρεάζεται από (Kumar et als, 2014):

- Τον τύπο της ανεμογεννήτριας, τα τεχνικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της,
- Τα υλικά κατασκευής της ανεμογεννήτριας,
- Την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σύμφωνα με το συντελεστή διαθεσιμότητας των ανεμογεννητριών),
- Τα χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης του αιολικού πάρκου (ταχύτητα ανέμου και τοπογραφία περιοχής),
- Το ενεργειακό μείγμα των χωρών παραγωγής και εγκατάστασης του αιολικού πάρκου,
- Τη μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών και της απαιτούμενης ενέργειας,
- Την πολιτική διαχείρισης των υφιστάμενων υποδομών και των μελλοντικών προοπτικών (policy) των εμπλεκόμενων χωρών.

Σκόπιμο είναι επίσης να αναφερθεί, πως οι κατασκευάστριες εταιρείες ανεμογεννητριών σχεδιάζουν μοντέλα διαφορετικών προδιαγραφών και απαιτήσεων, βάσει πολλαπλών κριτηρίων. Ο τύπος της ανεμογεννήτριας προς εγκατάσταση καθορίζεται πρωτίστως από τα χαρακτηριστικά του ανέμου της εκάστοτε περιοχής, τα οποία επηρεάζουν τελικά το ποσό της παραγόμενης ενέργειας από την ανεμογεννήτρια. Άλλοι παράγοντες που είναι εξίσου σημαντικοί για τη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου είναι το μέγεθός του (συνολική εγκατεστημένη ισχύς), το τελικό ποσό ενέργειας που καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο, η απόσταση από το δίκτυο και η διαθεσιμότητά του.

4.1. Στάδια εφαρμογής μιας μελέτης ΑΚΖ

Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) και τα σχετικά πρότυπα 14040/44, η μελέτη ΑΚΖ των αιολικών πάρκων, όπως και κάθε μελέτη ΑΚΖ, αποτελείται από τέσσερα (4) στάδια:

1. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου της μελέτης (Goal and scope definition)
2. Απογραφή δεδομένων (Inventory analysis)
3. Εκτίμηση επιπτώσεων (Impact assessment)
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation)

Πίνακας 3. Στάδια εφαρμογής μιας μελέτης ΑΚΖ, πηγή: Angelakoglou et als, 2013.

Στάδιο	
Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου μελέτης	Περιγραφή του σκοπού της μελέτης, της λειτουργικής μονάδας, των ορίων του συστήματος και της ποιότητας των δεδομένων
Απογραφή δεδομένων	Συλλογή δεδομένων, δημιουργία διαγράμματος ροής υλικών και ενέργειας και κατανομής περιβαλλοντικών επιπτώσεων
Εκτίμηση επιπτώσεων	Κατηγοριοποίηση και χαρακτηρισμός των δεδομένων (υποχρεωτικό βήμα), κανονικοποίηση και στάθμιση (προαιρετικό βήμα)
Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	Ανάλυση και υπολογισμοί, αποτελέσματα, επανάληψη και βελτίωση των παραπάνω σταδίων

4.2. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου μελέτης

Ο καθορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου περιγράφει τη δομή της μελέτης, τα όρια του συστήματος μελέτης, τις απαιτήσεις σε δεδομένα εισόδου και τις υποθέσεις εργασίας για το εξεταζόμενο κάθε φορά έργο.

Ο καθορισμός του σκοπού της μελέτης είναι να απαντήσει σε συγκεκριμένα ερωτήματα που τίθενται από τα εμπλεκόμενα μέρη, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές μελλοντικές χρήσεις των αποτελεσμάτων της μελέτης. Ο καθορισμός του αντικειμένου της μελέτης αποτυπώνει τα όρια της μελέτης σε τεχνολογικό, γεωγραφικό και κάθε άλλο επίπεδο που αφορά στο σύστημα του εξεταζόμενου έργου, καθώς επίσης και την ακρίβεια και πολυπλοκότητα του έργου.

Ειδικότερα, σκοπός της μελέτης ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου είναι ο υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Με αυτό τον τρόπο, λαμβάνονται υπόψη η παραγωγή και εξόρυξη πρώτων υλών, η κατασκευή και συναρμολόγηση

των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών (είτε από την κατασκευάστρια εταιρεία, είτε από τρίτα μέρη), η συντήρηση και λειτουργία του, οι απαραίτητες αντικαταστάσεις/επιδιορθώσεις, οι απώλειες κατά τη λειτουργία του, η διαχείριση των τελικών υλικών και απορριμμάτων στο τέλος του κύκλου ζωής και η διαδικασία μεταφοράς, κατά τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής.

Οι μελέτες ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου είναι πιθανό να αφορούν είτε σε ένα υφιστάμενο αιολικό πάρκο, με δεδομένο τύπο ανεμογεννητριών και χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης, είτε σε ένα μη-εγκατεστημένο (προτεινόμενο) αιολικό πάρκο, με σκοπό τον υπολογισμό συγκρίσιμων αποτελεσμάτων για την καλύτερη εφαρμογή και εγκατάστασή του. Σε αυτή την περίπτωση, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ο τελικός αποδέκτης των αποτελεσμάτων προς αξιολόγηση.

Τα αποτελέσματα των μελετών μπορούν να χρησιμοποιηθούν (VESTAS, 2013):

- για τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων,
- για τη βελτίωση και βελτιστοποίηση της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας,
- για την εκπόνηση περιβαλλοντικών μελετών,
- για την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών δεσμεύσεων στο σχεδιασμό των προϊόντων,
- για την ανάπτυξη εμπορικών και διαφημιστικών υλικών και προϊόντων, με σκοπό την προώθηση της περιβαλλοντικής πολιτικής.

Ως εκ τούτου, οι αποδέκτες των μελετών ΑΚΖ αιολικών πάρκων δύναται να είναι:

- οι πελάτες των κατασκευαστριών εταιρειών,
- οι έτεροι κατασκευαστές των επιμέρους τμημάτων των έργων,
- οι επενδυτές των κατασκευαστριών εταιρειών,
- έτερα ενδιαφερόμενα μέρη και δημόσιοι φορείς, που εμπλέκονται άμεσα με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις πιθανές επιπτώσεις τους.

4.2.1. Λειτουργική μονάδα

Η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, με σκοπό την έγχυσή του στο ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, στόχος της ΑΚΖ είναι ο καθορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου, καθώς και η ποσοτικοποίησή τους. Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των επιπτώσεων και της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, ώστε να καθίσταται δυνατή μια συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (Blanco et als, 2008).

Η «λειτουργική μονάδα» αποτελεί τη μονάδα αναφοράς, η οποία χρησιμοποιείται για την περιβαλλοντική αποτίμηση της λειτουργίας του αιολικού πάρκου.

Ως λειτουργική μονάδα στην ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου, λαμβάνεται το ποσό που είναι ίσο με 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο από τη λειτουργία του συγκεκριμένου πάρκου.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τις σχετικές μελέτες ΑΚΖ σε αιολικά πάρκα, η λειτουργική μονάδα βασίζεται στην προβλεπόμενη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών, η οποία ανέρχεται στα είκοσι (20) έτη, και το συνολικό ποσό ενέργειας που αποδίδεται στο δίκτυο, σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα στοιχεία από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, όπου αυτά υπάρχουν.

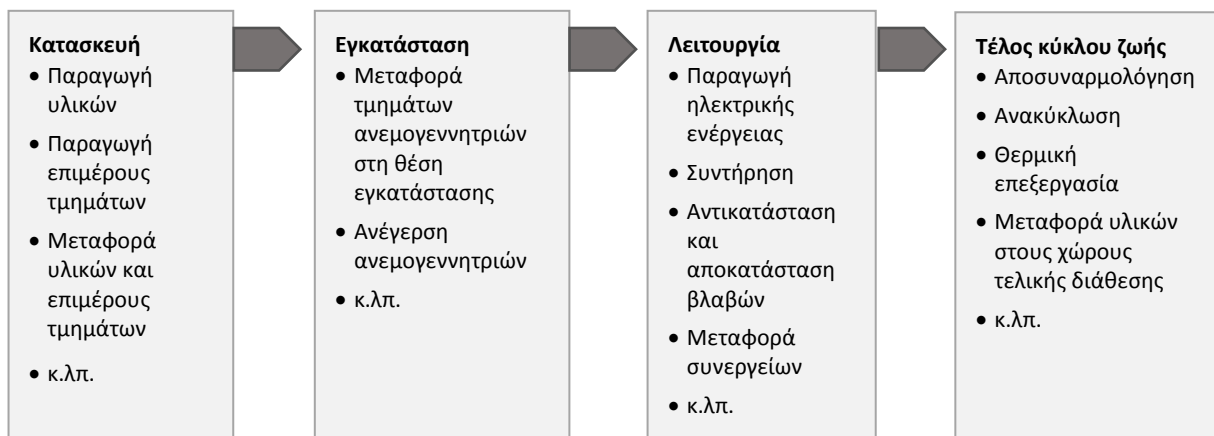
4.2.2. Περιγραφή του συστήματος

Ένα αιολικό πάρκο είναι ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από διαφορετικά επιμέρους τμήματα. Τα τμήματα αυτά είναι οι μηχανές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή οι ανεμογεννήτριες, τα θεμέλιά τους, τα έργα πρόσβασης/οδοποιίας και τα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης, όπως καλώδια, οικίσκοι ελέγχου, υποσταθμοί ανύψωσης τάσης κ.ά..

Παρακάτω, περιγράφεται ο κύκλος ζωής των τμημάτων αυτών, βάσει των επιμέρους σταδίων που εξετάζονται.

A. Στάδια κύκλου ζωής

Ο κύκλος ζωής ενός αιολικού πάρκου μπορεί να διαχωριστεί σε ανεξάρτητα επιμέρους στάδια, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, ως εξής:



Σχήμα 8. Στάδια του κύκλου ζωής ενός τυπικού αιολικού πάρκου, πηγή: VESTAS, 2013.

Σύμφωνα με τον κύκλο ζωής ενός αιολικού πάρκου και τα επιμέρους στάδια στα οποία αναλύεται, πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του συστήματος, για την επιμέρους ανάλυση των υλικών, των διεργασιών και των επιπτώσεων που λαμβάνουν χώρα στα όρια του συστήματος.

Παρακάτω, περιγράφονται αναλυτικότερα τα στάδια του κύκλου ζωής των αιολικών πάρκων.

A1. Παραγωγή και κατασκευή επιμέρους τμημάτων ανεμογεννητριών

- Παραγωγή πρώτων υλών και κατασκευή επιμέρους τμημάτων ανεμογεννήτριας
- Παραγωγή επιμέρους τμημάτων θεμελίων ανεμογεννήτριας
- Παραγωγή πρώτων υλικών και κατασκευή επιμέρους τμημάτων έργων ηλεκτρικής διασύνδεσης
- Παραγωγή υλικών και κατασκευή επιμέρους τμημάτων έργων οδοποιίας

Σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνεται η παραγωγή πρώτων υλών και η κατασκευή των επιμέρους τμημάτων που θα αποτελέσουν το σύνολο της ανεμογεννήτριας, όπως ο πυλώνας, το κέλυφος της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια, τα θεμέλια, τα καλώδια, οι μετασχηματιστές κ.λπ.. Τα παραπάνω υλικά και επιμέρους τμήματα μεταφέρονται αρχικά στους χώρους της κατασκευάστριας εταιρείας με σκοπό την παραγωγή των ενδιάμεσων προϊόντων/τμημάτων των ανεμογεννητριών που πρόκειται να μεταφερθούν στο χώρο τελικής εγκατάστασης.

A2. Εγκατάσταση ανεμογεννητριών

- Κατασκευή έργων οδοποιίας πρόσβασης
- Κατασκευή έργων ηλεκτρικής διασύνδεσης
- Κατασκευή συνοδευτικών έργων θεμελίωσης
- Μεταφορά επιμέρους τμημάτων ανεμογεννητριών στη θέση εγκατάστασης
- Εγκατάσταση και συναρμολόγηση επιμέρους τμημάτων ανεμογεννητριών

Σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνεται η μεταφορά των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών, όπως επίσης και η συναρμολόγηση, ανέγερση και εγκατάστασή τους στη θέση χωροθέτησης του αιολικού πάρκου. Επίσης, περιλαμβάνονται και όλες οι εργασίες διαμόρφωσης κατάλληλων χώρων και θεμελίωσης για την ανέγερση των ανεμογεννητριών, όπως και τα έργα οδοποιίας πρόσβασης και ηλεκτρικής διασύνδεσης με το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο. Εδώ, λαμβάνεται υπόψη η τοποθέτηση των καλωδίων εσωτερικής ηλεκτρικής διασύνδεσης του πάρκου, όπως και η ανέγερση υποσταθμού ανύψωσης τάσης και οικίσκου ελέγχου.

A3. Λειτουργία ανεμογεννητριών

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Τακτική συντήρηση ανεμογεννητριών (λάδια, φίλτρα κ.λπ.)
- Αντικατάσταση εξαρτημάτων σε περιπτώσεις βλαβών και απρόοπτων καταστάσεων (καταστροφή εξαρτημάτων, κεραυνοί κ.λπ.)

Το στάδιο της λειτουργίας των ανεμογεννητριών περιλαμβάνει τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο, και όλες τις απαραίτητες ενέργειες συντήρησης των ανεμογεννητριών. Εδώ περιλαμβάνονται η αλλαγή των λαδιών και φίλτρων των ανεμογεννητριών, η αναβάθμιση/αντικατάσταση κατεστραμμένων ή καταπονημένων τμημάτων, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων κ.λπ..

A4. Τέλος της διάρκειας ζωής ανεμογεννητριών

- Αποσυναρμολόγηση ανεμογεννητριών
- Απόθεση σε κατάλληλους χώρους απόθεσης
- Αξιοποίηση υλικών
- Αποκατάσταση περιοχής

Στο τέλος του κύκλου ζωής, οι ανεμογεννήτριες αποσυναρμολογούνται στα επιμέρους τμήματά τους, απομακρύνονται από τη θέση εγκατάστασής τους και η περιοχή επανέρχεται στην πρότερη κατάσταση πριν την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, με τις αναγκαίες αποκαταστάσεις.

Η διαχείριση των υλικών που προκύπτουν από την αποσυναρμολόγηση και απομάκρυνση των ανεμογεννητριών λαμβάνεται υπόψη σε αυτό το στάδιο και δύναται να περιλαμβάνει:

- Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών, κυρίως των μετάλλων,
- Θερμική επεξεργασία των υλικών (με τη δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας),
- Απόθεση σε κατάλληλους χώρους ταφής υγειονομικού ενδιαφέροντος, κυρίως των σύνθετων υλικών.

Ο βαθμός αξιοποίησης των υλικών που προκύπτουν στο τέλος της διάρκειας ζωής του αιολικού πάρκου εξαρτάται τόσο από τα επιμέρους υλικά και την καθαρότητα στη σύνθεσή τους, όσο και από τη δυνατότητα αποσυναρμολόγησής τους. Έτσι, προκύπτουν διαφορετικοί βαθμοί συνολικής ανακύκλωσης υλικών, ακόμα και για τον ίδιο τύπο εγκατεστημένης ανεμογεννήτριας, σε διαφορετικές θέσεις αιολικών πάρκων.

Η διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, καθώς καθορίζει έντονα το περιβαλλοντικό «προφίλ» του έργου, αφού μπορεί να συμβάλλει θετικά ή αρνητικά στην επίδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της μεταφοράς των υλικών για την τελική διάθεσή τους σε κατάλληλους χώρους, αυξάνει τις ενεργειακές ανάγκες (δεδομένα εισόδου), με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνολικά. Αντίθετα, μέσω της ανακύκλωσης, της επαναχρησιμοποίησης ή της θερμικής επεξεργασίας, το σύστημα μπορεί να επωφεληθεί, μέσω αξιοποιήσιμων υλικών όπως είναι τα επιμέρους τμήματα των ανεμογεννητριών, τα υλικά και η θερμότητα.

A5. Μεταφορά ανεμογεννητριών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε επιμέρους στάδιο του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου περιλαμβάνει και τη διαδικασία της μεταφοράς, μέσω της οποίας καταλήγουν τα υλικά ή τμήματα του έργου στις τοποθεσίες του σταδίου που αντιστοιχούν.

Ειδικότερα, στο στάδιο της παραγωγής και κατασκευής των υλικών και των επιμέρους τμημάτων λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά των πρώτων υλών (χάλυβας, χαλκός, εποξικές ρητίνες κ.λπ.) στις εγκαταστάσεις κατασκευής της κατασκευάστριας εταιρείας.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η μεταφορά των επιμέρους τμημάτων από τους εργοστασιακούς χώρους παραγωγής, στο χώρο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Έτσι, είναι πιθανό να απαιτείται η κάλυψη μεγάλων αποστάσεων και η χρήση εξειδικευμένων μέσων μεταφοράς, όπως ειδικά φορτηγά οχήματα μεγάλων διαστάσεων και πλοία, για την πρόσβαση στην τελική θέση εγκατάστασης του πάρκου.

Παράλληλα, λαμβάνεται υπόψη και η μεταφορά που σχετίζεται με την πραγματοποίηση των απαραίτητων τεχνικών ελέγχων και επισκευών κατά το στάδιο της λειτουργίας και συντήρησης του πάρκου. Εδώ, η χρήση συμβατικών οχημάτων για την τακτική συντήρηση του αιολικού πάρκου θεωρείται επαρκής, εκτός των περιπτώσεων όπου απαιτείται η εξειδικευμένη χρήση οχημάτων, λόγω ειδικών περιπτώσεων και βλαβών, που περιλαμβάνουν τη μεταφορά ανταλλακτικών και εξαρτημάτων μεγάλων διαστάσεων.

Τέλος, η οριστική διάθεση των υλικών με το πέρας του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου, απαιτεί την κάλυψη αποστάσεων μέχρι τους χώρους απόθεσης ή αξιοποίησής τους.

Η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία της μεταφοράς ισούται με $1t \cdot km$ (τονοχιλιόμετρο), το οποίο αναφέρεται στη μεταφορά 1.000 kg υλικών, σε απόσταση 1 km (Blanco et als, 2008).

4.2.3. Συλλογή δεδομένων

Για την ανάλυση του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου απαιτούνται ακριβή δεδομένα, ώστε να καταστεί όσο τον δυνατόν πιο ακριβής η μελέτη και να αποφευχθούν οι αβεβαιότητες. Έτσι, χρησιμοποιούνται τόσο πρωτογενή, όσο και δευτερογενή δεδομένα από την κατασκευάστρια εταιρεία, το φορέα του έργου, αλλά και τους σχετικούς δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς που αφορούν στους τομείς κατασκευής των έργων και παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων περιλαμβάνει συνήθως:

- Τη σύνθεση των υλικών των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών,
- Τις διαδικασίες παραγωγής των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών στις εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας,

- Την κατανάλωση ενέργειας και ενδιάμεσων υλικών στις εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας,
- Τη μεταφορά των επιμέρους υλικών στο χώρο εγκατάστασης των ανεμογεννητριών (χρήση κατάλληλων οχημάτων μεταφοράς και κατανάλωση καυσίμων),
- Την κατανάλωση μέσω και ενδιάμεσων υλικών για τη διαμόρφωση του χώρου εγκατάστασης,
- Τη λειτουργία και συντήρηση των ανεμογεννητριών,
- Την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο,
- Τη διαθεσιμότητα και τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας των ανεμογεννητριών,
- Το τελικό ποσοστό ανακύκλωσης των υλικών, από τα οποία αποτελείται ένα αιολικό πάρκο.

Όπου δεν είναι δυνατό να συγκεντρωθούν πρωτογενή δεδομένα, αξιοποιούνται δευτερογενή δεδομένα, που προκύπτουν από:

- Το ενεργειακό μείγμα της χώρας αναφοράς,
- Την παραγωγή των πρώτων υλών,
- Τη μεταφορά των πρώτων υλών,
- Τις διαδικασίες στο τέλος του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών και το σενάριο διαχείρισης των υλικών,
- Αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές.

4.2.4. Περιορισμοί και θεωρήσεις εργασίας

Σύμφωνα με τα πρότυπα εκπόνησης μιας ΑΚΖ, απαιτείται ο απαραίτητος καθορισμός των ορίων και των θεωρήσεων που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη. Τα συγκεκριμένα όρια στοχεύουν στην ορθή αποτύπωση και συσχέτιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν, με τη λειτουργία του εξεταζόμενου έργου.

Έτσι, τέτοια όρια είναι πιθανό να αφορούν σε (VESTAS, 2013):

- **Μάζα:** αν κάποια ροή υλικού είναι μικρότερη από ένα καθορισμένο ποσό της συνολικής μάζας σε επίπεδο προϊόντος ή επιμέρους διεργασίας, π.χ. 1%, τότε μπορεί να εξαιρεθεί, δεδομένου πως παρά τη μικρή ποσοστιαία συμμετοχή του, δεν προκαλεί δυσανάλογες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- **Ενέργεια:** αν κάποια ροή ενέργειας είναι μικρότερη από ένα καθορισμένο ποσό της συνολικής ενέργειας σε επίπεδο προϊόντος ή επιμέρους διεργασίας, π.χ. 1%, τότε μπορεί να εξαιρεθεί, δεδομένου πως παρά τη μικρή ποσοστιαία συμμετοχή του, δεν προκαλεί δυσανάλογες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- **Περιβαλλοντική συσχέτιση:** αν κάποια ροή είναι επαρκώς μικρή, ώστε να ανήκει στις ανωτέρω κατηγορίες, αλλά η περιβαλλοντική επιβάρυνση που πιθανώς να προκαλέσει είναι σημαντική, τότε εξετάζεται στο πλαίσιο της ΑΚΖ.
- **Το σύνολο του ποσού των υλικών** που δε λαμβάνονται υπόψη, να μην ξεπερνά ένα συγκεκριμένο ποσοστό επί της συνολικής μάζας, ενέργειας ή περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο προϊόντος ή επιμέρους διεργασίας, π.χ. 5%.

Οι συνήθεις περιορισμοί και θεωρήσεις στην ΑΚΖ των αιολικών πάρκων αφορούν:

1) Στη διάρκεια ζωής

Η διάρκεια ζωής των αιολικών πάρκων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της περιβαλλοντικής αποτίμησης του έργου, καθώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ορίζονται ανά αποδιδόμενη

μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, για το σύνολο της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Συνήθως, η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής των αιολικών πάρκων ανέρχεται στα είκοσι (20) έτη.

2) Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από τη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Επίσης, εδώ λαμβάνονται υπόψη και οι ηλεκτρικές απώλειες, λόγω αποστάσεων από το ηλεκτρικό δίκτυο, εσωτερικών απωλειών των καλωδίων, διαθεσιμότητας των ανεμογεννητριών κ.λπ..

Το συνολικό ποσό ενέργειας που παράγεται στο σύνολο του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου είναι καθοριστικό για το περιβαλλοντικό «προφίλ» της μονάδας αναφοράς (kWh) του πάρκου.

3) Στην ανάλυση των επιμέρους μερών του αιολικού πάρκου

Ένα αιολικό πάρκο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελείται από το σύνολο των ανεμογεννητριών, τα έργα οδοποιίας πρόσβασης στη θέση εγκατάστασης και τα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης με το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο.

4) Στις επιπτώσεις από την παραγωγή μετάλλων και την τελική ανακύκλωση των υλικών

Το μεγαλύτερο μέρος των ανεμογεννητριών αποτελείται κυρίως από μέταλλα (σίδηρο, χάλυβα, αλουμίνιο και χαλκό), τα οποία σχετίζονται άμεσα με τις επιπτώσεις κατά την αρχική φάση παραγωγής και το τελικό στάδιο διαχείρισης των υλικών. Ως εκ τούτου, η χρησιμοποίηση υλικών κατά την κατασκευή των επιμέρους τμημάτων του έργου, που απαιτούν την εξαρχής παραγωγή των υλικών, για παράδειγμα μέσω της εξόρυξης πρώτων υλών, ή προέρχονται από ανακύκλωση διαφοροποιεί έντονα τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αποτίμησης. Αντίστοιχα, η τελική διάθεση των υλικών προς ανακύκλωση στο τέλος του κύκλου ζωής συμβάλλει θετικά στη μείωση των συνολικών επιπτώσεων.

5) Στον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Μία ανεμογεννήτρια απαρτίζεται από πλήθος επιμέρους τμημάτων και αντίστοιχα υλικών, τα οποία ποικίλουν σε βάρος και σύσταση. Ως εκ τούτου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε πολλές μελέτες θεωρείται σκόπιμο να μη λαμβάνονται υπόψη υλικά των οποίων το βάρος δεν ξεπερνά ένα ποσοστό του συνολικού βάρους της ανεμογεννήτριας, της τάξεως 1%-5%, καθώς θεωρείται πως είναι αντίστοιχες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και επομένως μικρής έκτασης, χωρίς να διαφοροποιούν σημαντικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Βέβαια, υπάρχουν και υλικά, τα οποία ενώ χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες συγκριτικά με το σύνολο του έργου, είναι πιθανό να προκαλέσουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ως εκ τούτου, κρίνεται σκόπιμο να εξετάζεται κάθε φορά, πριν τον τελικό καθορισμό των προς εξέταση υλικών, η σημασία του καθενός στο σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

6) Στη διαδικασία της μεταφοράς

Η διαδικασία της μεταφοράς επιμερίζεται στα εξής στάδια:

- Μεταφορά που σχετίζεται με τις εισερχόμενες πρώτες ύλες και τα έτοιμα τμήματα των ανεμογεννητριών στις εγκαταστάσεις παραγωγής της κατασκευάστριας εταιρείας,
- Μεταφορά που σχετίζεται με την πρόσβαση των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών από τις εγκαταστάσεις παραγωγής στη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου,
- Μεταφορά υλικών και μέσων για την κατασκευή των θεμελίων των ανεμογεννητριών,
- Μεταφορά υλικών και μέσων για τα έργα οδοποιίας,
- Μεταφορά υλικών και μέσων για τα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης,

- Μεταφορά υλικών στους χώρους απόθεσης και αξιοποίησης στο τέλος του κύκλου ζωής,
- Μεταφορά των συνεργείων από και προς τη θέση του αιολικού πάρκου για τη συντήρηση κατά τη διάρκεια ζωής του.

7) Σε έτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη λειτουργία του αιολικού πάρκου (“external costs”)

Οι συνήθεις έτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με ένα αιολικό πάρκο αφορούν στο θόρυβο, την οπτική όχληση, την υποβάθμιση της χλωρίδας και πανίδας της περιοχής, τις συγκρούσεις πτηνών στις ανεμογεννήτριες κ.ά.. Πέραν των ανωτέρω, υπάρχουν και οι μη-περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αφορούν στη συνεισφορά στην προσφορά εργασίας, στη συμμετοχή στο ΑΕΠ της χώρας κ.ά..

4.3. Απογραφή δεδομένων

Το στάδιο απογραφής των δεδομένων (LCI) αναλύει τόσο ποιοτικά, όσο και ποσοτικά, τα επιμέρους τμήματα του έργου που εξετάζεται και αφορά:

- στα υλικά και την ενέργεια που απαιτείται (δεδομένα εισόδου)
- στα προϊόντα και παρα-προϊόντα ή επιμέρους προϊόντα που παράγονται (ενδιάμεσα δεδομένα εισόδου/εξόδου)
- στις τελικές εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον και τα απορρίμματα προς διαχείριση (δεδομένα εξόδου)

Η απογραφή των δεδομένων αποτελεί ουσιαστικά μια αναλυτική περιγραφή όλων των αναγκαίων περιβαλλοντικών δεδομένων εισόδου (υλικά και ενεργειακές ροές) και εξόδου (εκπομπές στον αέρα, νερό και έδαφος και απορρίμματα). Παράλληλα, η εκτίμηση των επιπτώσεων της AKZ (LCIA – Life Cycle Impact Assessment) που ακολουθεί, ποσοτικοποιεί το αποτύπωμα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μέσω κατάλληλων δεικτών. Τα αποτελέσματα από την απογραφή των δεδομένων και την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σύμφωνα με την AKZ ερμηνεύονται με σκοπό να περιγραφούν τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε συστήματος (ενεργειακά και περιβαλλοντικά), να εντοπιστούν εναλλακτικές προσεγγίσεις στα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής και να εφαρμοστούν βελτιωμένες εναλλακτικές, όπου αυτό είναι δυνατό (Asdrubali et al, 2014).

4.3.1. Μοντελοποίηση των σταδίων του κύκλου ζωής

Η μοντελοποίηση των σταδίων του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου περιλαμβάνει ένα μεγάλο κατάλογο υλικών, για κάθε ένα από τα επιμέρους τμήματά του. Κάθε ένα από αυτά αναφέρεται στο υλικό κατασκευής, τη μέθοδο παραγωγής του και την περιοχή προέλευσης. Ο κατάλογος των υλικών είναι ιδιαιτέρως μακροσκελής και μπορεί να περιλαμβάνει χιλιάδες επιμέρους στοιχεία.

Η μοντελοποίηση των σταδίων, όπως φαίνονται στο σχήμα 9, πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλων λογισμικών προγραμμάτων, που εξετάζουν την AKZ των αιολικών πάρκων. Κατά τη χρήση των προγραμμάτων, λαμβάνονται υπόψη όλα τα υλικά και τα μέσα που απαιτούνται για την κατασκευή του έργου, καθώς και οι απώλειες των υλικών κατά τις ενδιάμεσες διεργασίες, όπως και οι πιθανές δυνατότητες ανακύκλωσης υλικών στα ενδιάμεσα στάδια.

4.4. Κατηγορίες επιπτώσεων και σχετικοί δείκτες

Η επιλογή των κατηγοριών επιπτώσεων που συνήθως εξετάζονται, προκύπτει από τις επιπτώσεις που σχετίζονται με το σύστημα ενός αιολικού πάρκου. Ως εκ τούτου, μελετώνται οι κατηγορίες επιπτώσεων που σχετίζονται κυρίως με την παραγωγή, κατασκευή και ανακύκλωση μετάλλων, σκυροδέματος, πολυμερών και σύνθετων υλικών.

Οι παρακάτω περιβαλλοντικοί δείκτες επιπτώσεων υπολογίζονται για την ανάλυση του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου:

Κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων:

- Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)
- Οξίνιση (Acidification, AP)
- Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)
- Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)
- Φωτοχημική οξειδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)
- Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)
- Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)

Ειδικότερα, κάθε δείκτης αφορά (Blanco et als, 2008):

Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)

Η κλιματική αλλαγή μπορεί να ερμηνευτεί ως η μεταβολή στην παγκόσμια θερμοκρασία, η οποία προκαλείται από την επίδραση των αερίων του θερμοκηπίου, που προκαλούνται και απελευθερώνονται λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η αύξηση των εκπομπών αυτών φαίνεται να έχει άμεση επίδραση στο κλίμα και να επηρεάζει δυσμενώς την υγεία των οικοσυστημάτων, την υγεία των ανθρώπων και την υλική ευημερία γενικότερα. Ο δείκτης της κλιματικής αλλαγής ορίζεται ως η πιθανότητα παγκόσμιας υπερθέρμανσης, για χρονικό ορίζοντα 100 ετών και εκφράζεται σε παραγόμενα kg ισοδύναμου CO₂.

Οξίνιση (Acidification, AP)

Αυτή η κατηγορία σχετίζεται με τις ουσίες που προκαλούν επιπτώσεις οξίνισης στο έδαφος, τα υπόγεια ύδατα, τα επιφανειακά ύδατα, τους οργανισμούς, τα οικοσυστήματα και τις πρώτες ύλες. Οι κυριότερες ουσίες οξίνισης είναι: SO₂, NH₃, HCl και ευρύτερα SO_x και NO_x. Για τις αέριες εκπομπές, η πιθανότητα οξίνισης ορίζεται βάσει των ιόντων H⁺ που παράγονται ανά kg ουσίας, σε σχέση με τις παραγόμενες ποσότητες SO₂. Η μονάδα αναφοράς της πιθανότητας οξίνισης ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου SO₂.

Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)

Αυτή η κατηγορία σχετίζεται με τις επιπτώσεις που οφείλονται σε υψηλά επίπεδα θρεπτικών ουσιών στο περιβάλλον, τα οποία προκαλούνται από τις εκπομπές θρεπτικών ουσιών στον αέρα, το νερό και το έδαφος. Ο ευτροφισμός οδηγεί σε μη-φυσιολογική ανάπτυξη της άλγης στα ποτάμια και τα «κλειστά» οικοσυστήματα, με αποτέλεσμα τη μείωση της ποιότητας του νερού και των πληθυσμών της πανίδας. Οι κύριες πηγές ευτροφισμού είναι οι υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου (N) και φωσφόρου (P) και η μονάδα αναφοράς ισούται με kg ισοδύναμου PO₄³⁻.

Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)

Η ανθρώπινη τοξικότητα αποτυπώνει τις πιθανές βλάβες από την απελευθέρωση χημικών ουσιών στο περιβάλλον και σχετίζεται τόσο με την τοξικότητα της χημικής ένωσης, όσο και με τη ληφθείσα δόση από τον άνθρωπο. Η έκθεση στις συγκεκριμένες ουσίες είναι εν δυνάμει επικίνδυνη για τον άνθρωπο και πραγματοποιείται μέσω της αναπνοής, της κατάποσης ή της επαφής, σε βάθος χρόνου. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB (διχλωροβενζολίου).

Φωτοχημική οξειδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)

Η παρουσία του όζοντος της ατμόσφαιρας λειτουργεί προστατευτικά στη στρατόσφαιρα, αλλά γίνεται τοξικό για τους ανθρώπους στο επίπεδο του εδάφους και σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Το φωτοχημικό όζον δημιουργείται από την αντίδραση πτητικών οργανικών χημικών ενώσεων και οξειδίων του αζώτου, παρουσία θερμότητας και ηλιακού φωτός. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου C₂H₄.

Οικοτοξικότητα (Ecotoxicity, EP)

Η περιβαλλοντική τοξικότητα αναφέρεται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων, που εξετάζουν τις επιπτώσεις στο γλυκό νερό, τη θάλασσα και το έδαφος. Οι εκπομπές ουσιών, όπως τα βαρέα μέταλλα, δύνανται να έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ο υπολογισμός της τοξικότητας πραγματοποιείται βάσει των ανώτατων ανεκτών ορίων συγκεντρώσεων του νερού των οικοσυστημάτων. Η μονάδα αναφοράς για τις τρεις υποκατηγορίες ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB (διχλωροβενζόλιο).

Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)

Η εδαφική οικοτοξικότητα σχετίζεται με τις επιπτώσεις στα χερσαία οικοσυστήματα. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB (διχλωροβενζολίου).

Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)

Η οικοτοξικότητα του γλυκού νερού σχετίζεται με τις επιπτώσεις στα οικοσυστήματα γλυκού νερού, ως αποτέλεσμα της παρουσίας τοξικών ουσιών στον αέρα, το νερό, και το έδαφος, για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB (διχλωροβενζολίου).

Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)

Η θαλάσσια οικοτοξικότητα σχετίζεται με τις επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB (διχλωροβενζολίου).

Αξίζει να σημειωθεί, πως οι παραπάνω κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων ποικίλουν ως προς τη γεωγραφική επίδρασή τους, η οποία καθορίζεται σημαντικά από το σημείο εκπομπής των ρύπων της εκάστοτε επιμέρους διαδικασίας. Τέτοιες επιδράσεις μπορεί να είναι σημειακές (όπως είναι η πιθανότητα οξίνισης), τοπικές (όπως η πιθανότητα τοξικότητας των υδάτων), αλλά και παγκόσμιες (όπως η έκλυση αερίων του θερμοκηπίου). Όσο πιο τοπική είναι η επίδραση κάποιας περιβαλλοντικής επίπτωσης, τόσο πιο σημαντική είναι και η θέση του σημείου εκπομπής ρύπων.

Επίσης, ορισμένες περιβαλλοντικές συνιστώσες που αφορούν σε ένα αιολικό πάρκο δε λαμβάνονται συνήθως υπόψη κατά την εξέταση μιας ΑΚΖ, όπως για παράδειγμα η ακουστική και οπτική όχληση και οι πιθανές επιπτώσεις στις χρήσεις γης, στην πανίδα και τη χλωρίδα. Οι παραπάνω επιπτώσεις θεωρείται πως εξετάζονται μέσω έτερων εργαλείων, όπως κατά το στάδιο της περιβαλλοντικής αδειοδότησης των έργων, και λειτουργούν συμπληρωματικά με την ΑΚΖ.

Οι μελέτες ΑΚΖ αιολικών πάρκων που έχουν εκπονηθεί μέχρι σήμερα, διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες μελέτες και αποτελέσματα άλλων μορφών ενέργειας.

Έτσι, κάνοντας μια ανασκόπηση σε μια σειρά μελετών που εξετάζουν την ΑΚΖ είκοσι (20) αιολικών πάρκων, καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από κάθε νέα εκπόνηση ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου. Η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς αυτών των πάρκων ποικίλει από 0,25MW έως 6,00 MW. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της ΑΚΖ σε αυτά τα έργα έδειξαν τα εξής (Asdrubali et als, 2014):

- Ο δείκτης φωτοχημικής οξείδωσης φαίνεται να κυμαίνεται μεταξύ μεγάλου εύρους τιμών (0,85 – 16,10 mg C₂H_{4eq}/kWh). Αυτό το εύρος οφείλεται κυρίως στο γεγονός πως τα εξεταζόμενα πάρκα λειτουργούν κάτω από διαφορετικές συνθήκες, καθώς ο συντελεστής διαθεσιμότητας ποικίλει από 19% έως 53%, και επίσης λήφθηκαν υπόψη διαφορετικές θεωρήσεις εργασίας και παραδοχές κατά τη μοντελοποίησή τους.
- Οι δείκτες της οξίνισης, του ευτροφισμού και της παγκόσμιας υπερθέρμανσης παρουσιάζουν μικρότερο εύρος τιμών. Ειδικότερα, το φαινόμενο της οξίνισης παρουσιάζει τιμές από 28,0 – 115, 2 mg SO_{2eq}/kWh, το φαινόμενο του ευτροφισμού 2,7 – 12,2 mg PO_{4eq}³⁻/kWh, ενώ το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης 6,2 – 46,0 g CO_{2eq}/kWh.
- Η πλειοψηφία των μελετών υποστηρίζει πως το στάδιο κατασκευής των έργων κατέχει το μεγαλύτερο μέρος συνεισφοράς στις συνολικά παραγόμενες επιπτώσεις.

Η τελευταία παρατήρηση φαίνεται πως προκύπτει και από αντίστοιχες μελέτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (EWEA)¹, όπου αναφέρεται πως κατά το στάδιο κατασκευής παράγεται το 80% περίπου των συνολικών ρύπων. Σύμφωνα με την ίδια μελέτη, κατά το στάδιο λειτουργίας παράγεται το 7-12% των ρύπων, ενώ η διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής προκαλεί το 3-14% των ρύπων.

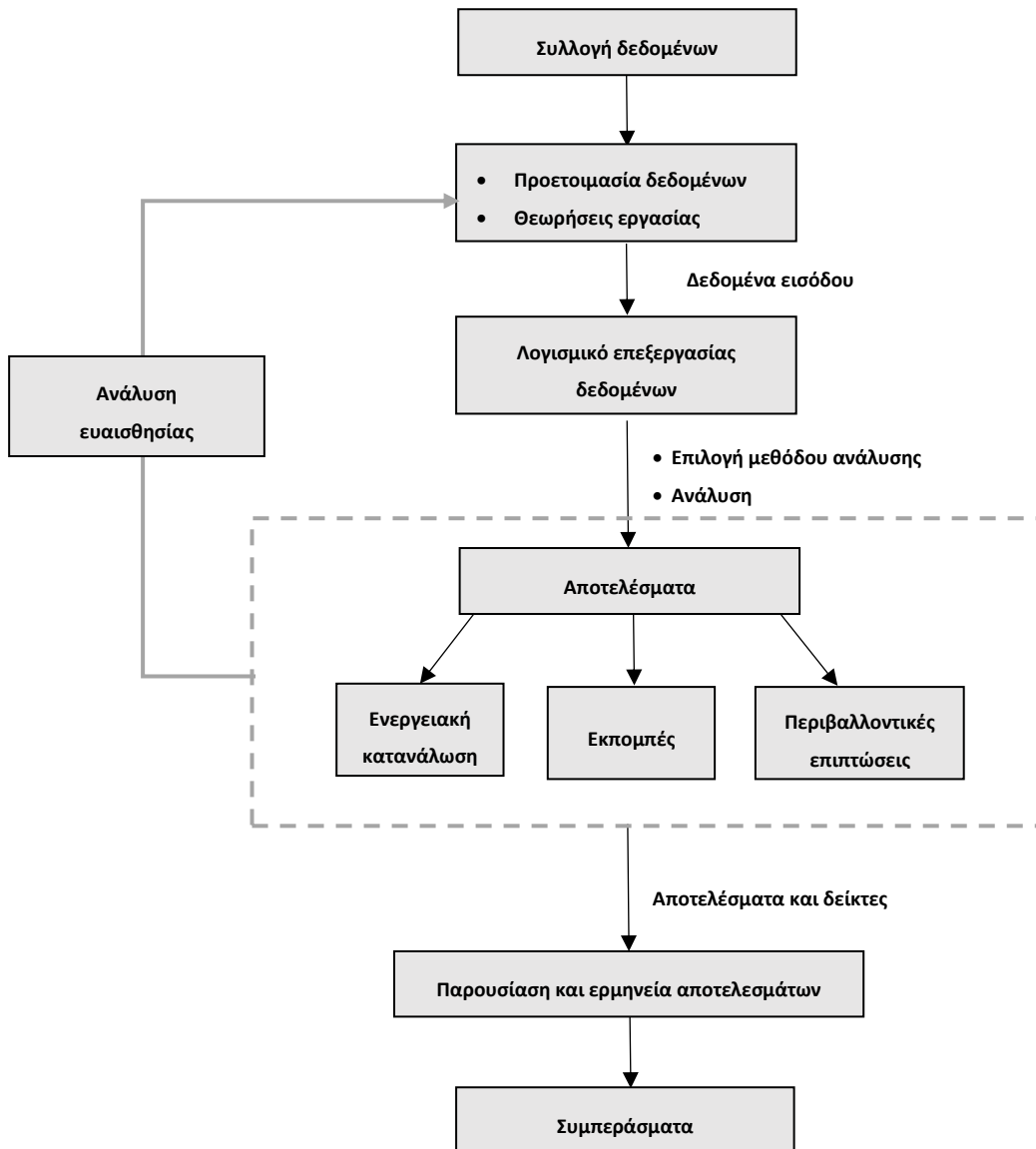
4.5. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων μιας μελέτης ΑΚΖ, διερευνώνται τα αποτελέσματα και εντοπίζονται οι κύριες ροές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Βάσει των αποτελεσμάτων, εντοπίζονται τα τμήματα, οι διεργασίες και οι ροές με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε υλικά και εκπομπές ρύπων προς το περιβάλλον.

Επίσης, κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμο να διενεργείται παράλληλα και μια ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να γίνεται περισσότερο κατανοητό πώς μεταβάλλονται τα αποτελέσματα της μελέτης, με τη μεταβολή κάποιων από τα δεδομένα εισόδου. Με αυτό τον τρόπο, εξετάζονται η κλίμακα και η αβεβαιότητα των δεδομένων στις θεωρήσεις που λήφθηκαν υπόψη κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος. Με την ανάλυση ευαισθησίας φαίνεται πόσο «σταθερό» είναι το σύστημα που εξετάζεται, καθώς και πόσο σημαντικές είναι οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για τα αποτελέσματα της μελέτης.

Τέλος, σε αυτό το στάδιο της μελέτης εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις στα σημεία που εντοπίζονται οι μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

¹ <http://www.wind-energy-the-facts.org/lca-in-wind-energy.html>



Σχήμα 9. Υπολογισμός ενεργειακής κατανάλωσης, εκπομπών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων, πηγή: Kumar et als, 2014.

5. Αιολικό πάρκο στη θέση «Πυργουλόψη – Λιάζαρι»

Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζεται η περίπτωση αιολικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», συνολικής ισχύος 1,5 MW. Ο χώρος εγκατάστασης ανήκει διοικητικά στην Περιφερειακή Ενότητα Ευβοίας, Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας και βρίσκεται στην περιοχή του Πολυποτάμου, του Δήμου Καρύστου.

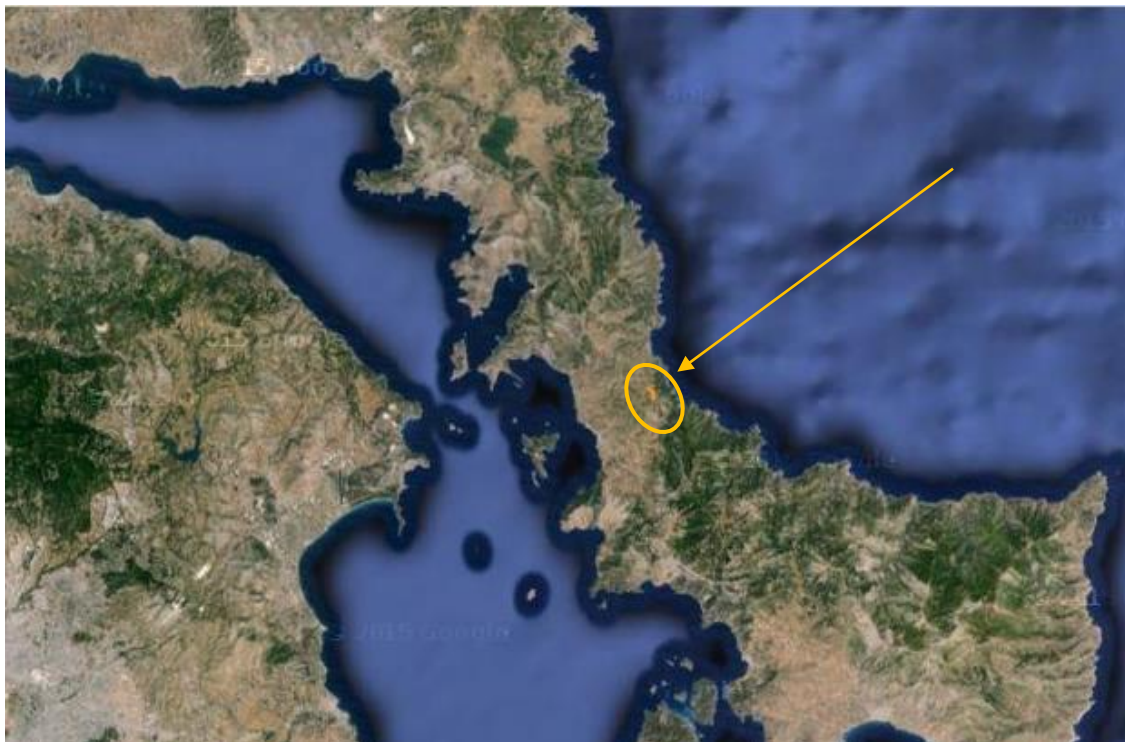
Η θέση εγκατάστασης βρίσκεται μεταξύ των οικισμών του Πολυποτάμου και του Ρεούζι, σε απόσταση περί τα 2 km από αυτούς, και σε μέσο υψόμετρο περίπου 330 m. Η θέση απέχει 5 km από το λιμένα των Νέων Στύρων, που είναι και το κέντρο της περιοχής.

Σύμφωνα με τις σχετικές μελέτες του φορέα του έργου, η επιλογή της θέσης έγινε μετά από σχολαστική εξέταση της περιοχής, ώστε να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς της σχετικής νομοθεσίας, να μην επηρεάζει το περιβάλλον, τους υπάρχοντες οικισμούς και τις εν γένει δραστηριότητες της ευρύτερης περιοχής.

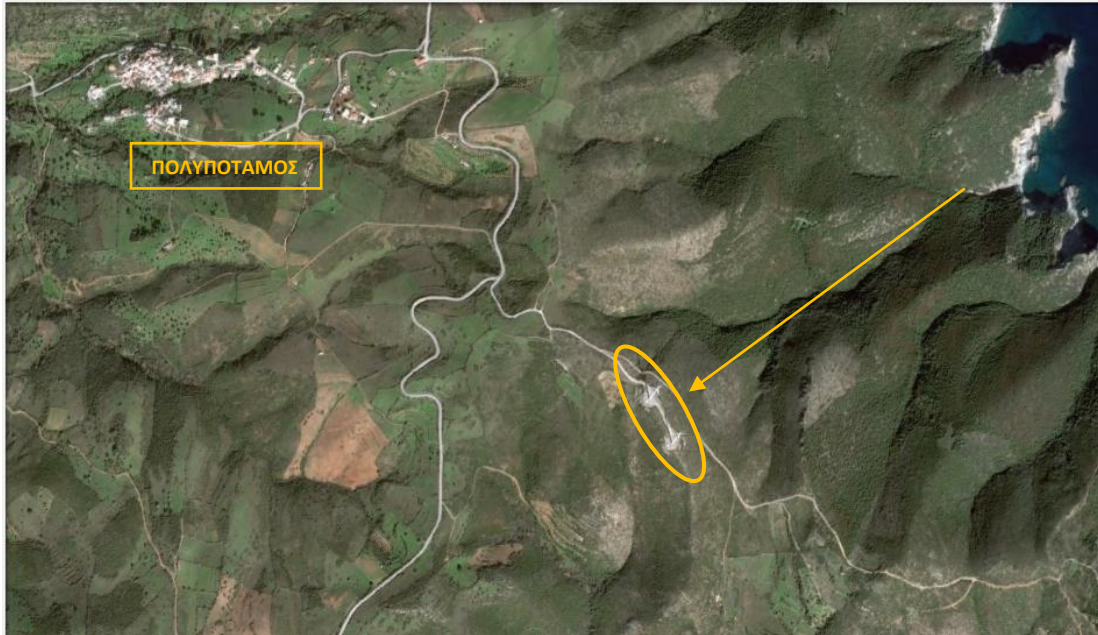
Το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο, αποτελείται από δύο (2) ανεμογεννήτριες, ισχύος 750 kW έκαστη, της κατασκευάστριας εταιρείας NEG Micon. Το υφιστάμενο αιολικό πάρκο λειτουργεί ως ανεξάρτητη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό σύστημα μέσω του παρακείμενου δικτύου μέσης τάσης.

5.1. Υφιστάμενη κατάσταση

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης του αιολικού πάρκου χαρακτηρίζεται από μέτριες κλίσεις με ασθενείς ανθρωπογενείς επιδράσεις. Γενικά, η διαμόρφωση της περιοχής είναι καθαρά λοφώδης. Το αιολικό πάρκο βρίσκεται εγκατεστημένο εντός της ευρύτερης περιοχής της βουνοκορφής, στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι », όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη.



Εικόνα 1. Θέση εγκατάστασης αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας, πηγή: ΡΑΕ, 2016.



Εικόνα 2. Θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας, πηγή: Google Earth, 2016.

Ο χώρος εγκατάστασης του αιολικού πάρκου ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Από γεωτεκτονική άποψη το διαμέρισμα βρίσκεται στις ζώνες Πίνδου, Παρνασσού, Πελαγονική και Κυκλάδων. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στις παραπάνω ενότητες είναι κυρίως μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι, δολομίτες, οφιόλιθοι, μάρμαρα, σχιστόλιθοι, φλύσχης και φλυσχοειδείς σχηματισμοί.

Η γεωγραφική θέση και το ανάγλυφο του υδατικού διαμερίσματος της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας συμβάλλουν στη μεγάλη κλιματική ποικιλία, που περιλαμβάνει από θαλάσσιο μεσογειακό μέχρι ορεινό κλίμα. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 500 mm στη λεκάνη του Ασωπού μέχρι 1200 mm στα ορεινά τμήματα της λεκάνης του Σπερχειού και της Εύβοιας. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16°C μέχρι 18°C ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα.

Η Εύβοια έχει μέση ετήσια βροχόπτωση 774 mm. Πιο βροχερός μήνας είναι ο Δεκέμβριος, ενώ ελάχιστη βροχόπτωση παρατηρείται τον Ιούλιο.

Το αιολικό δυναμικό στην περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου θεωρείται ως ιδιαίτερος ικανοποιητικό και η μέση ετήσια ταχύτητα ανέρχεται σε 8,1 m/s στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών. Υπάρχουν ήδη μετρήσεις από το 1997, οι οποίες τα τρία πρώτα χρόνια ελήφθησαν από μετεωρολογικό ιστό και στη συνέχεια από τη μόνιμη πλέον μετεωρολογική μονάδα του σταθμού.

Η περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου χαρακτηρίζεται από την απουσία ιδιαίτερης μορφής χλωρίδας με την εξαίρεση κάποιων θάμνων. Σε ακτίνα τουλάχιστον ενός χιλιομέτρου από το χώρο εγκατάστασης, η γη χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ως βοσκότοπος, ενώ ελάχιστη έκταση χρησιμοποιείται για καλλιέργειες.

Ο παράγοντας που επιδρά με τη μεγαλύτερη βαρύτητα στα ρυπαντικά φορτία της Εύβοιας εν γένει είναι η κτηνοτροφία. Όσον αφορά στην πανίδα της περιοχής, εξαιτίας ακριβώς του χαρακτήρα της, τα είδη που υπάρχουν περιορίζονται κυρίως σε βοοειδή και αιγοπρόβατα.

Τέλος, στην περιοχή δεν υπάρχει καμία σημαντική βιομηχανική μονάδα. Ακόμη δεν υπάρχουν σημαντικά τεχνικά έργα ή στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

5.2. Περιγραφή του έργου

5.2.1. Γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά αιολικού πάρκου

Το αιολικό πάρκο αποτελείται στο σύνολό του από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτριες) οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρισμό.

Οι ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες εν σειρά κατά μήκος του οικοπέδου και συνδέονται μεταξύ τους μέσω εσωτερικού δρόμου διασύνδεσης, ηλεκτρικά δε διασυνδέονται με υπόγεια γραμμή μέσης τάσεως 20 kV, η οποία έχει κατασκευαστεί μέσα στο αιολικό πάρκο, προκειμένου να μεταφερθεί η παραγόμενη ενέργεια στον κεντρικό πίνακα διανομής και διασύνδεσης με το δίκτυο μέσης τάσης της ΔΕΗ.

Κάθε ανεμογεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσης τάσεως μέσω ενός μετασχηματιστή ανυψώσεως τάσεως 0.7/15-20 kV. Σε κάθε ανεμογεννήτρια αντιστοιχεί ένας μετασχηματιστής. Η ισχύς του κάθε μετασχηματιστή είναι 900 kVA.

Οι υποσταθμοί (μετασχηματιστές) είναι τοποθετημένοι εντός μεταλλικού οικίσκου τύπου «κίόσκι». Ο χώρος του μετασχηματιστή είναι εντελώς απομονωμένος βάσει των ισχυόντων προδιαγραφών.

Ο κεντρικός πίνακας μέσης τάσεως, καθώς και οι λοιπές απαιτούμενες βοηθητικές εγκαταστάσεις στεγάζονται εντός ενός από τους υποσταθμούς ανυψώσεως τάσεως.

Η ηλεκτρική διασύνδεση του αιολικού πάρκου με το ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής έχει πραγματοποιηθεί μέσω της παρακείμενης γραμμής μέσης τάσης.

Το δίκτυο διασύνδεσης, πέραν της εναέριας γραμμής μέσης τάσης περιλαμβάνει επίσης τα απαραίτητα μέσα ζεύξεως και προστασίας της ΔΕΗ και τις μετρητικές διατάξεις της ΔΕΗ.

Οι εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες είναι ισχύος 750 kW έκαστη, διαθέτουν περρωτή 3 πτερυγίων σταθερού βήματος, διαμέτρου 44 m και ο άξονάς τους βρίσκεται σε ύψος 45 m. Η κάθε ανεμογεννήτρια είναι εφοδιασμένη με τον απαραίτητο πολλαπλασιαστή στροφών και με σύγχρονη γεννήτρια για μέγιστη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού, ακόμα και στις μικρές ταχύτητες ανέμου. Η ανεμογεννήτρια διαθέτει ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου και είναι εφοδιασμένη με όλες τις διατάξεις ασφαλείας.

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών του εν λειτουργία αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι».

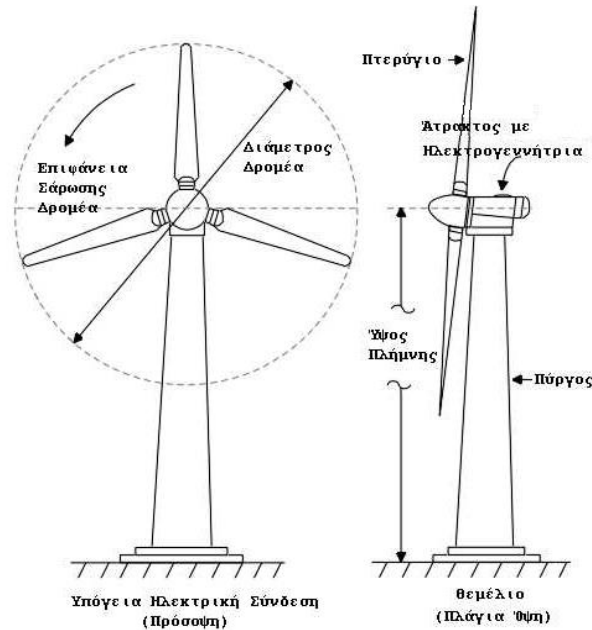
Μοντέλο	NEG Micon NM 44/750
Ονομαστική ισχύς	750 kW
Διάμετρος	44
Ταχύτητα ανέμου έναρξης λειτουργίας	3,5 m/sec
Ταχύτητα ανέμου διακοπής λειτουργίας	25 m/sec
Διάρκεια ζωής	20 έτη

Η ανεμογεννήτρια, αποτελείται επίσης από ένα μεταλλικό πυλώνα ύψους 43,6 m, στην κορυφή του οποίου εδράζεται το μεταλλικό κέλυφος (nacelle). Στο κέλυφος βρίσκεται ο κύριος μηχανισμός της ανεμογεννήτριας, ο οποίος αποτελείται από την περρωτή που είναι κατασκευασμένη από πολυεστερικές ίνες, εντός δε του κελύφους βρίσκεται ο κύριος άξονας, ο οποίος είναι χαλύβδινος, ο πολλαπλασιαστής στροφών, ο οποίος αποτελείται από σύστημα γραναζιών, και η ηλεκτρική γεννήτρια.

Ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας είναι χαλύβδινος, κυλινδρικός με ελαφρά κωνικότητα, κατασκευασμένος από συγκολλημένα ελάσματα. Η διάμετρός του είναι περίπου 3,3 m στη

βάση και 1,7 m στην κορυφή. Ο πυλώνας είναι εντελώς κλειστός προς το εξωτερικό περιβάλλον. Στη βάση του υπάρχει στεγανή μεταλλική πόρτα, η οποία επιτρέπει την πρόσβαση στο εσωτερικό.

Ο πυλώνας φέρει στο εσωτερικό του μεταλλική σκάλα, η οποία επιτρέπει την πρόσβαση στο κέλυφος της ανεμογεννήτριας. Το κέλυφος της ανεμογεννήτριας αποτελείται από ένα χαλύβδινο πλαίσιο και το περίβλημα, το οποίο είναι κατασκευασμένο από γαλβανισμένα ελάσματα πάχους 3 mm. Το κέλυφος είναι επίσης κλειστό προς το εξωτερικό περιβάλλον, είναι μάλιστα στεγανό, ώστε να αποφεύγεται η εισροή υγρασίας στο εσωτερικό και η φθορά των υλικών από διάβρωση. Η ψύξη της γεννήτριας γίνεται με κατάλληλους εναλλάκτες ψύξεως νερού.



Εικόνα 3. Τυπική τομή και όψη ανεμογεννήτριας.

Στη βάση της ανεμογεννήτριας και εσωτερικά του πυλώνα ευρίσκεται ο κεντρικός ηλεκτρικός πίνακας της ανεμογεννήτριας, μέσω του οποίου γίνεται η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το ηλεκτρικό δίκτυο, προκειμένου να μεταφερθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στον κεντρικό ηλεκτρικό πίνακα καταλήγουν αφ' ενός τα καλώδια της γεννήτριας, τα οποία διατρέχουν τη διαδρομή από το κέλυφος μέχρι τη βάση του πύργου, κατάλληλα υποστηριζόμενα, αφ' ετέρου τα υπόγεια καλώδια χαμηλής τάσεως, τα οποία συνδέουν την κάθε ανεμογεννήτρια με τον αντίστοιχο υποσταθμό.

Όλες οι συνδέσεις του ηλεκτρικού πίνακα, τόσο οι κύριες όσο και οι δευτερεύουσες, είναι κατάλληλα προστατευμένες σύμφωνα με τους ισχύοντες ηλεκτρολογικούς κανονισμούς, και συγκεκριμένα με τη χρήση ασφαλειών και αυτομάτων διακοπών, οι οποίοι διακόπτουν τα κυκλώματα τόσο σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, όσο και υπερφορτώσεως.

Πρόσθετα, στο αιολικό πάρκο είναι εγκατεστημένο σύστημα κεντρικού εποπτικού ελέγχου και τηλεπίβλεψης, αποτελούμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή και κατάλληλες διατάξεις και γραμμές επικοινωνίας. Το σύστημα καταγράφει όλα τα στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία του αιολικού πάρκου και επιτρέπει την τηλεπίβλεψη και τον τηλεχειρισμό αυτού.

5.2.2. Δρόμος πρόσβασης και οδικό δίκτυο αιολικού πάρκου

Κατά τη μελέτη εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, προβλέφθηκε όλοι οι δρόμοι να είναι επιφανειακοί και να ακολουθούν κατά το δυνατόν τις υπάρχουσες κλίσεις του φυσικού εδάφους. Κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου έγινε κάθε προσπάθεια για την ελαχιστοποίηση των εκσκαφών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της αλλοίωσης του φυσικού περιβάλλοντος.

α. Εσωτερική οδοποιία αιολικού πάρκου

Η κατασκευή οδικού δικτύου απαιτείται για την πρόσβαση στο χώρο κάθε ανεμογεννήτριας, ώστε να είναι δυνατή αρχικά η διαμόρφωση των πλατωμάτων, η κατασκευή των θεμελιώσεων και η ανέγερση του εξοπλισμού και μελλοντικά η πρόσβαση για όλες τις λειτουργίες συντηρήσεων και επισκευών.

Ο δρόμος που κατασκευάστηκε έχει συνολικό μήκος περίπου 150 m, πλάτος περίπου 5 m και μέγιστη κλίση 12% λόγω των μεγάλων διαστάσεων και του μεγάλου βάρους των μηχανημάτων μεταφοράς και ανύψωσης του εξοπλισμού. Είναι χωμάτινος και έχει επιστρωθεί με κατάλληλο θραυστό υλικό.

β. Δρόμος πρόσβασης προς το αιολικό πάρκο

Το γήπεδο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου συνδέεται, μέσω αγροτικού δρόμου, με την υπάρχουσα επαρχιακή οδό. Πιο συγκεκριμένα, ο χώρος είναι προσβάσιμος μέσω της αγροτικής οδού της χωματερής και σε απόσταση περίπου 500 m από τον επαρχιακό δρόμο που ενώνει το Αλιβέρι με την Κάρυστο.

5.2.3. Έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης αιολικού πάρκου

α. Κανάλια καλωδιώσεων μέσης και χαμηλής τάσης και ασθενών ρευμάτων

Η όδευση των καναλιών μέσης και χαμηλής τάσης και ασθενών ρευμάτων ακολουθεί την εσωτερική οδοποιία.

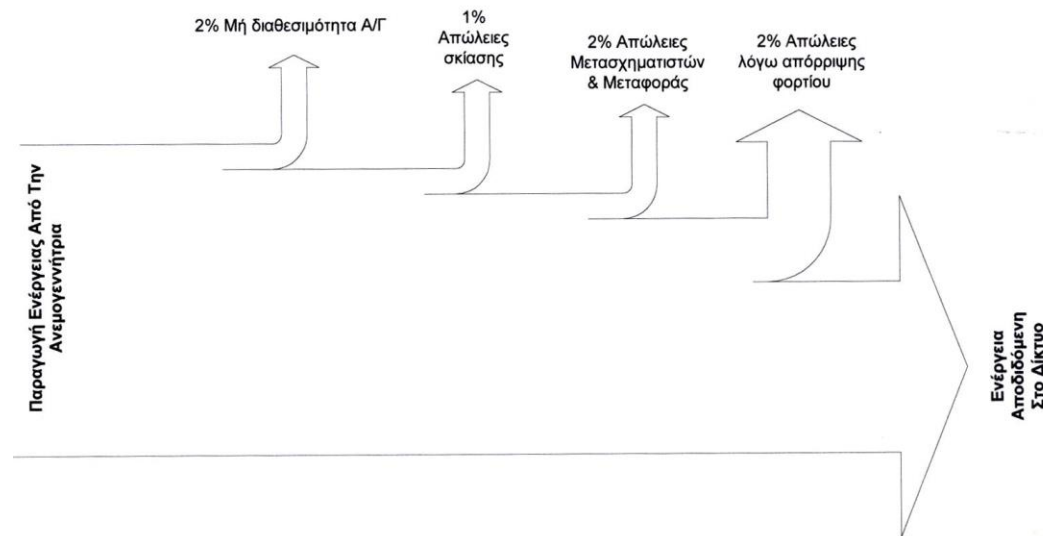
Το πλάτος του καναλιού είναι 0,7 m, ενώ το βάθος της εκσκαφής είναι 1,20 m.

β. Σύνδεση με το δίκτυο

Όσον αφορά στη διασύνδεση του αιολικού πάρκου, έχει υλοποιηθεί μέσω της παρακείμενης γραμμής μέσης τάσης. Το δίκτυο διασύνδεσης, πέραν της εναέριας γραμμής μέσης τάσης περιλαμβάνει επίσης τα απαραίτητα μέσα ζεύξεως και προστασίας, μετρητικές διατάξεις κ.ά..

Το τελικό ποσό ενέργειας που καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο εξαρτάται από το σύνολο των τεχνικών και λοιπών παραγόντων που επηρεάζουν το αιολικό πάρκο. Παρακάτω φαίνεται το ενδεικτικό διάγραμμα ροής ενέργειας ενός αιολικού πάρκου.

Διάγραμμα Ενεργειακής Ροής



Σχήμα 10. Διάγραμμα ενεργειακής ροής ενός τυπικού αιολικού πάρκου.

5.3. Αναμενόμενη Διάρκεια Ζωής Έργου

Η κύρια παράμετρος από την οποία εξαρτάται η διάρκεια ζωής του έργου είναι η διάρκεια ζωής του κυρίως εξοπλισμού, δηλαδή των ανεμογεννητριών και των υποσταθμών ανύψωσης τάσεως.

Όσον αφορά στους υποσταθμούς έκαστης ανεμογεννήτριας, η διάρκεια ζωής τους είναι μεγαλύτερη από 40 χρόνια, όπως αποδεικνύεται τόσο από σχετικά πιστοποιητικά που έχει ο εξοπλισμός μέσης τάσεως (μετασχηματιστές, διακοπτικό υλικό μέσης τάσεως κλπ.), καθώς επίσης και από τη μακροχρόνια εμπειρία σχετικά με τη λειτουργία αντίστοιχων συστημάτων.

Αναφορικά με τις ανεμογεννήτριες, η διαστασιολόγησή τους έχει γίνει ώστε να εξασφαλίζεται διάρκεια ζωής τουλάχιστον για 20-25 χρόνια. Η αντοχή και η διαστασιολόγηση όλων των επί μέρους εξαρτημάτων και κατασκευών, έχει υπολογιστεί με βάση την παραπάνω διάρκεια ζωής και λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες ανεμολογικές κατανομές, όπως επιβάλλουν οι διεθνείς προδιαγραφές. Ειδικότερα, οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες της κατασκευάστριας εταιρείας NEG Micon είναι πιστοποιημένες κατά IEC 61400-1 και σύμφωνα με το πιστοποιητικό τους, η διάρκεια ζωής του συστήματος βάσει του σχεδιασμού του (design life time) είναι τουλάχιστον 20 έτη. Η διαδικασία παραγωγής και ελέγχου τους έχει πιστοποιηθεί με το σύνολο των διεθνών προτύπων διασφάλισης ποιότητας της σειράς ISO 9000. Η τυποποιημένη διαστασιολόγηση τους ακολουθεί τις προδιαγραφές IEC-1400 και για όλους τους κατασκευαζόμενους τύπους. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει τη 20ετή διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, υπό τις ανώτατες πιθανές φορτίσεις.

Συνεπώς, ως αναμενόμενη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης παραγωγής θεωρούνται με ασφάλεια τα 20 χρόνια.

5.4. Χρόνος λειτουργίας αιολικού πάρκου

Η ολοκλήρωση της εγκατάστασης και έναρξη λειτουργίας του αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι» πραγματοποιήθηκε το Φεβρουάριο του 2000.

Έκτοτε, η λειτουργία του αιολικού πάρκου είναι συνεχής και διακόπτεται μόνο από περιόδους νηνεμίας ή πολύ ισχυρής έντασης ανέμου. Η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί όταν ο άνεμος ξεπεράσει μία συγκεκριμένη ταχύτητα (ταχύτητα εκκίνησης), η οποία έχει τιμή 3,5 m/s. Για λόγους προστασίας της από πολύ μεγάλες ταχύτητες ανέμου, η ανεμογεννήτρια ακινητοποιείται για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από 25 m/s (ταχύτητα αποκοπής). Επομένως, το αιολικό πάρκο λειτουργεί μόνο όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεταξύ 3,5 – 25 m/s. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ανεμολογικών δεδομένων έως σήμερα, φαίνεται πως το αιολικό πάρκο λειτουργεί περίπου κατά το 90% του συνολικού χρόνου.

6. Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικού Πάρκου στη Θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι»

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ενός αιολικού πάρκου από την αρχή μέχρι το τέλος του κύκλου ζωής του (cradle-to-grave). Το αιολικό πάρκο που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αποτέλεσε τη βάση για την εφαρμογή της θεωρίας της ΑΚΖ. Είναι προφανές πως η ΑΚΖ του αιολικού πάρκου ταυτίζεται με την ΑΚΖ των ανεμογεννητριών που το αποτελούν. Αξίζει να σημειωθεί, πως τα γενικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αιολικού πάρκου είναι αντιπροσωπευτικά των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων στην ευρύτερη περιοχή, επομένως θα αποτελέσουν και ένα δείκτη αποτίμησης των αιολικών ενεργειακών έργων στην περιοχή της Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, η οποία αποτέλεσε μία από τις πρώτες περιοχές αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας.

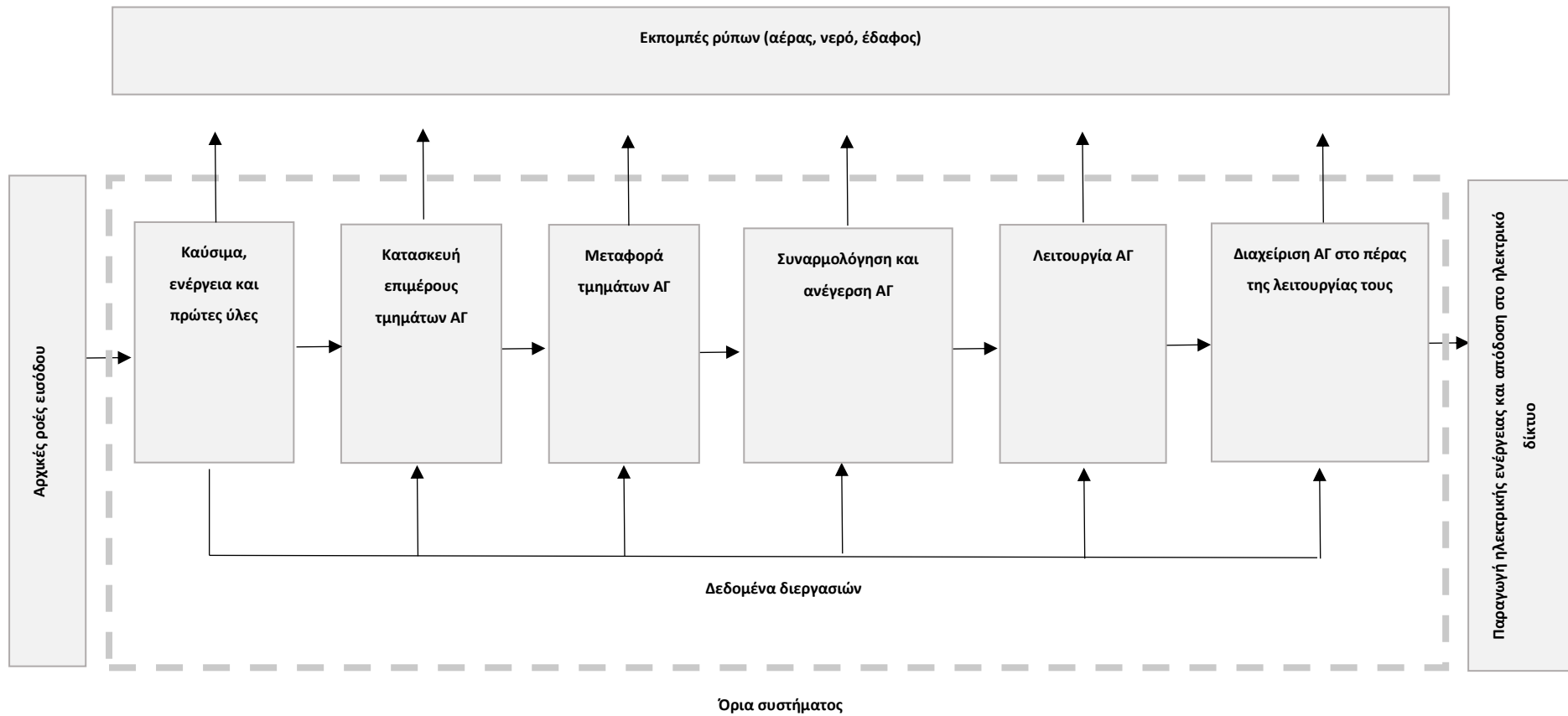
Η μελέτη βασίστηκε στη μέθοδο ενδιάμεσου σημείου CML 2001 και η μοντελοποίηση του συστήματος, με τους συνακόλουθους υπολογισμούς, υλοποιήθηκε με τη χρήση βάσεων δεδομένων Ecoinvent και του λογισμικού προγράμματος Excel.

6.1. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου μελέτης

Σκοπός της εργασίας είναι η αποτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, στο υφιστάμενο αιολικό πάρκο στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», συνολικής ισχύος 1,5 MW. Η εξέταση του εν λόγω πάρκου έγινε μέσω της ΑΚΖ «από το λίκνο μέχρι τον τάφο» (cradle-to-grave), υπολογίζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν για το σύνολο του κύκλου ζωής του πάρκου. Από το σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που υφίστανται και σχετίζονται με την ΑΚΖ, επιλέχθηκαν εκείνες που εξετάζονται συνήθως σε αντίστοιχες ΑΚΖ και αφορούν σε αιολικά πάρκα.

Στο πλαίσιο της μελέτης εξετάστηκαν όλα τα επιμέρους στάδια και διεργασίες του αιολικού πάρκου, όπως η αρχική κατασκευή των τμημάτων των ανεμογεννητριών, η μεταφορά και συναρμολόγησή τους και η διαχείριση των υλικών κατά την αποσυναρμολόγηση του πάρκου στο τέλος του κύκλου ζωής του. Αναλυτικότερα, οι διεργασίες αυτές συμπεριέλαβαν:

- Την παραγωγή και κατασκευή όλων των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών στις εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας,
- Τη μεταφορά των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών στη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, καθώς και κάθε άλλη μεταφορά σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής κατά τη διάρκεια λειτουργίας, συντήρησης και τελικής διάθεσης των υλικών,
- Την εγκατάσταση και ανέγερση των ανεμογεννητριών στη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου,
- Τη λειτουργία και συντήρηση των ανεμογεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προγραμματισμένες και μη διεργασίες (αντικατάσταση λαδιών, φίλτρων, κατεστραμμένων τμημάτων ανεμογεννητριών κ.ά.),
- Το συνολικά παραγόμενο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των ανεμογεννητριών, του δικτύου κ.ά.,
- Την τελική διάθεση των υλικών των ανεμογεννητριών, μετά την αποσυναρμολόγηση και αποξήλωση στο τέλος του κύκλου ζωής τους.



Σχήμα 11. Καθορισμός σκοπού και αντικειμένου μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής ανεμογεννητριών NEG Micon NM 44/750, πηγή: VESTAS, 2013.

6.1.1. Λειτουργική μονάδα

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιείται για την περιβαλλοντική αποτίμηση της λειτουργίας του αιολικού πάρκου, λαμβάνεται ίση με 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, το συνολικό ποσό ενέργειας που καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο για την προβλεπόμενη εικοσαετή λειτουργία των ανεμογεννητριών, ανέρχεται στις **88.257.971,71 kWh**, με υπολογιζόμενη μέση διαθεσιμότητα του πάρκου ίση με 97,5%. Το συγκεκριμένο ποσό ενέργειας υπολογίστηκε σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα στοιχεία από την έως σήμερα λειτουργία των ανεμογεννητριών.

Ο αντίστοιχος συντελεστής διαθεσιμότητας (Capacity Factor) των ανεμογεννητριών του πάρκου ανέρχεται σε 33,5%.

6.1.2. Περιγραφή του συστήματος

Ένα αιολικό πάρκο αποτελείται από το σύνολο των ανεμογεννητριών που το απαρτίζουν και τα συνοδευτικά έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης και οδοποιίας. Για την ΑΚΖ του αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», η περιγραφή του συστήματος επικεντρώνεται στην περιγραφή των ανεμογεννητριών και των εργασιών που σχετίζονται με αυτές. Τα όρια του συστήματος ξεκινούν από το εργοστάσιο παραγωγής των τμημάτων των ανεμογεννητριών της κατασκευάστριας εταιρείας και σταματούν στο σημείο διάθεσης των υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου όπως έλαβαν χώρα, για λόγους κατανόησης της διαδοχής των σταδίων, ενώ για το επόμενο στάδιο της ΑΚΖ (υπολογισμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων) η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά εξεταζόμενο στάδιο ακολουθεί τις απαραίτητες παραδοχές των υπολογιστικών μοντέλων.

A. Στάδια του κύκλου ζωής

Τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου μελετήθηκαν και προσεγγίστηκαν ξεχωριστά, βάσει των στοιχείων που προέκυψαν από τη συλλογή των δεδομένων.

A1. Παραγωγή και κατασκευή επιμέρους τμημάτων ανεμογεννητριών

Σε αυτό το στάδιο λήφθηκαν υπόψη οι επιμέρους πρώτες ύλες και το ποσό της ενέργειας που χρειάστηκε για την κατασκευή των τμημάτων των ανεμογεννητριών, στο εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρείας. Ειδικότερα, για κάθε υλικό αξιοποιήθηκαν αντίστοιχοι δείκτες και παράμετροι για τις ανεμογεννήτριες, σύμφωνα με τα πρότυπα και τους δείκτες του υπολογιστικού μοντέλου που αφορούν στο ενεργειακό μείγμα της χώρας κατασκευής και αποτυπώνουν τις ανάγκες σε ενέργεια και πρώτες ύλες. Οι δείκτες αυτοί αφορούν στην πορεία από την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών μέχρι την είσοδό τους στις εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας προς περαιτέρω επεξεργασία.

A2. Εγκατάσταση ανεμογεννητριών

Σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνεται η ανέγερση/συναρμολόγηση των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών στο χώρο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Εδώ, περιλαμβάνεται επίσης και η κατασκευή των θεμελίων για την ανέγερση των ανεμογεννητριών.

Για την ανέγερση των ανεμογεννητριών απαιτήθηκε διαμόρφωση του περιβάλλοντος χώρου γύρω από τη θέση εγκατάστασης κάθε μηχανής, ώστε να επιτρέπονται οι ελιγμοί των οχημάτων μεταφοράς και ανέγερσης του εξοπλισμού και αντίστοιχα στο μέλλον για την επισκευή ή συντήρηση του. Πιο συγκεκριμένα, απαιτήθηκε γύρω από τη θέση της κάθε ανεμογεννήτριας η κατασκευή ενός πλήρως ισοπεδωμένου πλατώματος διαστάσεων περίπου 40 m x 25 m. Το θεμέλιο της ανεμογεννήτριας βρίσκεται περίπου στο κέντρο του πλατώματος.

Επίσης, για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών απαιτήθηκε και επιφάνεια περίπου 12 m x 12 m για κάθε θέση. Η επιφάνεια αυτή δημιουργήθηκε σε βάθος περίπου 2,5 m από το έδαφος για να εξασφαλισθεί η ασφαλής εγκατάσταση και καλή θεμελίωση των ανεμογεννητριών. Συνολικά εκτιμάται ότι για κάθε θέση ανεμογεννήτριας απαιτήθηκε εκκαφή περίπου 350 μ³ εδάφους.

Οι μηχανές θεμελιώθηκαν στο έδαφος με χρήση οπλισμένου σκυροδέματος. Για τη βάση κάθε μηχανής απαιτήθηκε σκυρόδεμα καθαριότητας περίπου 30 m³ και οπλισμένο σκυρόδεμα περίπου 200 m³. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιήθηκαν με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής, τα χαρακτηριστικά του πύργου της ανεμογεννήτριας και τη σεισμικότητα της περιοχής εγκατάστασης.

Για την ανέγερση του εξοπλισμού στο χώρο της εγκαταστάσεως, απαιτήθηκε να έχουν γίνει ήδη όλες οι απαραίτητες προετοιμασίες (διαμόρφωση χώρου, κατασκευή θεμελίου, χρωματογραφικές εργασίες), αλλά και η απαραίτητη προετοιμασία του βοηθητικού υλικού.

Η διαδικασία ανέγερσης εν συντομία συμπεριέλαβε τα εξής υπο-στάδια :

- Συναρμολόγηση των πτερυγίων επί της πλήμνης σε θέση που να μην παρεμποδίζει τη διέλευση και ελιγμούς των μεταφορικών και ανυψωτικών μέσων
- Εναπόθεση του κελύφους πλησίον της θεμελίωσης
- Ανέγερση πρώτου τμήματος (βάσεως) του πυλώνα
- Προετοιμασία, του δεύτερου κομματιού κάθε πυλώνα και ανέγερσή του
- Προετοιμασία, του τρίτου κομματιού κάθε πυλώνα και ανέγερσή του
- Ανέγερση-σύνδεση της ατράκτου
- Συναρμολόγηση της πτερωτής στο έδαφος
- Ανέγερση-σύνδεση της πτερωτής

A3. Λειτουργία ανεμογεννητριών

Το στάδιο της λειτουργίας των ανεμογεννητριών περιλαμβάνει τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που καταλήγει στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο, και όλες τις απαραίτητες ενέργειες συντήρησης των ανεμογεννητριών. Υπεύθυνος για την πραγματοποίηση των απαραίτητων ελέγχων και συντηρήσεων είναι ο φορέας του έργου.

Σε αυτό το στάδιο, περιλαμβάνονται η αλλαγή των λαδιών και φίλτρων των ανεμογεννητριών, η αναβάθμιση/αντικατάσταση κατεστραμμένων/καταπονημένων τμημάτων, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, κατά τη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών κ.ά..

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία του αιολικού πάρκου έχει υπολογιστεί προσεγγιστικά και ανέρχεται στο 1% της συνολικά

παραγόμενης ενέργειας. Η ενέργεια αυτή απαιτείται κατά την έναρξη λειτουργίας των ανεμογεννητριών, τη λειτουργία του συστήματος πέδησης, προσανατολισμού και ρύθμισης βήματος (Guezuraga et als, 2011).

A4. Τέλος της διάρκειας ζωής ανεμογεννητριών

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης, δεδομένου πως το εξεταζόμενο πάρκο βρίσκεται ακόμα εν λειτουργία, η ανάπτυξη του σεναρίου για διαχείριση των ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους, ακολούθησε τα προτεινόμενα σενάρια ανακύκλωσης/επαναχρησιμοποίησης και ταφής των υλικών που προβλέπονται στη διεθνή βιβλιογραφία, όπως έχουν ενσωματωθεί στα αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα και βάσεις δεδομένων για την εκπόνηση των σχετικών μελετών.

Έτσι, μετά την αποσυναρμολόγηση των ανεμογεννητριών, θεωρήθηκε πως το μεγαλύτερο μέρος τους οδηγείται προς ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Το ποσοστό των υλικών που δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθούν, αποτελεί απορρίμματα και οδηγείται με κατάλληλα φορτηγά οχήματα, σε κατάλληλους χώρους ταφής απορριμμάτων.

Ειδικότερα, τα μεταλλικά τμήματα των ανεμογεννητριών, τα οποία αποτελούν άνω του 84% του συνολικού βάρους της ανεμογεννήτριας, οδηγούνται για ανακύκλωση, μέσω αντίστοιχων φορέων ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης μετάλλων. Τέλος, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών, που είναι πλούσια σε οργανικό φορτίο, οδηγούνται σε κατάλληλους χώρους ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), ενώ τα θεμέλιά των ανεμογεννητριών παραμένουν στη θέση εγκατάστασης και καλύπτονται από βλάστηση, μετά την αποκατάσταση της περιοχής.

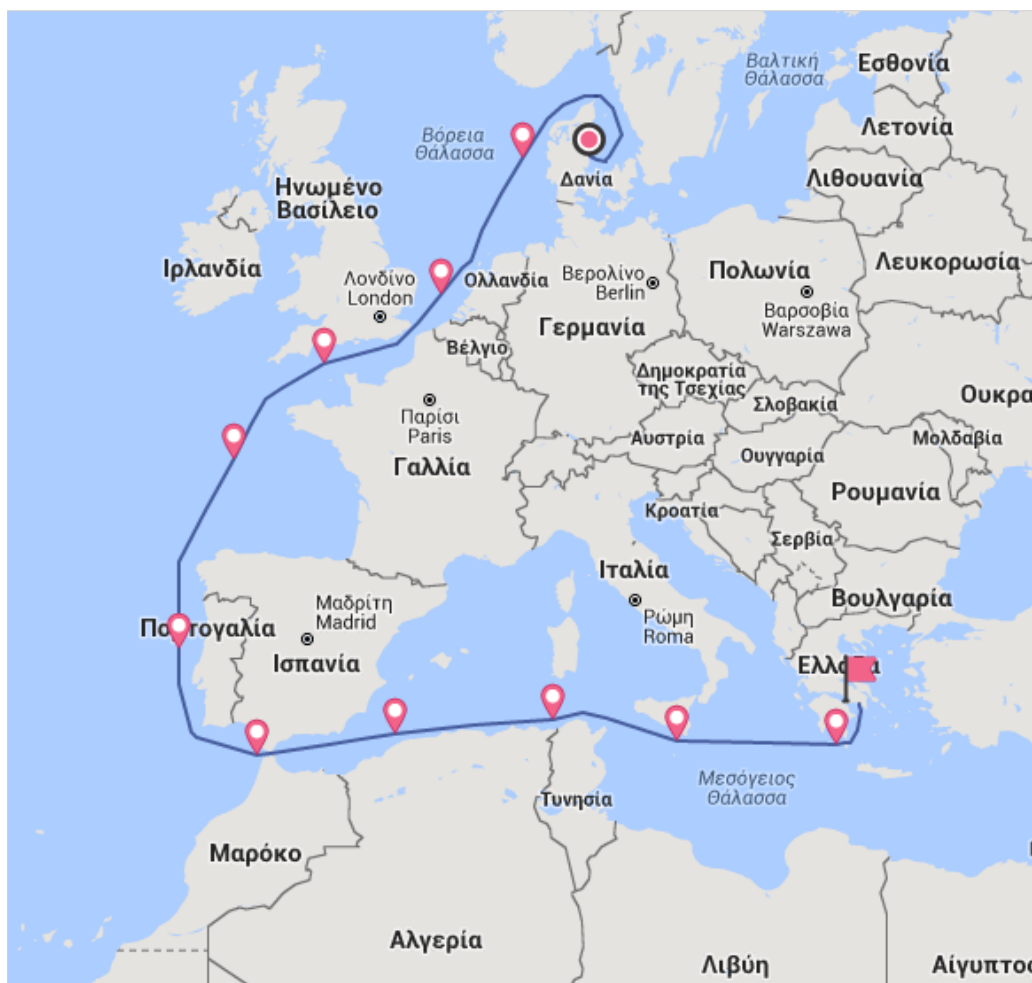
A5. Μεταφορά ανεμογεννητριών

Το στάδιο της μεταφοράς συνήθως εξετάζεται μετά το στάδιο της κατασκευής των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών και πριν τη συναρμολόγηση και ανέγερσή τους στη θέση εγκατάστασης, ακολουθώντας τη λογική σειρά των σταδίων. Παρόλα αυτά, για λόγους πληρότητας και πιο αναλυτικής παρουσίασης του σταδίου της μεταφοράς εξετάζεται εδώ συνολικά στο τέλος.

Αξίζει να σημειωθεί, πως η μεταφορά στο χώρο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, πραγματοποιήθηκε με πλοίο και ειδικά φορτηγά οχήματα. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευμάτων και 12 συνολικά φορτηγά οχήματα για τις δύο ανεμογεννήτριες.

Τα επιμέρους τμήματα των ανεμογεννητριών μεταφέρθηκαν από το εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρείας στην περιοχή Ααρους (Aarhus) της Δανίας μέχρι το λιμάνι του Ασπροπύργου και στη συνέχεια στο λιμάνι της Χαλκίδας με πλοίο και από εκεί οδηγήθηκαν μέσω κατάλληλων οδικών αρτηριών και νέας οδοποιίας στο χώρο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, όπου τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους, μέχρι την έναρξη των εργασιών ανέγερσης και συναρμολόγησής τους.

Το πλοίο διένυσε συνολικά απόσταση 6.725 km (3.631 NM), ενώ τα ειδικά φορτηγά οχήματα διένυσαν απόσταση 84 περίπου km.



Εικόνα 4. Πορεία διαδρομής πλοίου από το εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρείας στην περιοχή Ααρους (Aarhus) της Δανίας μέχρι το λιμάνι του Ασπροπύργου και μετά στο λιμάνι της Χαλκίδας, με μετεπιβίβαση, πηγή: <http://www.marinetraffic.com/>.

Επίσης, η μεταφορά που σχετίζεται με την πραγματοποίηση των απαραίτητων τεχνικών ελέγχων και επισκευών κατά το στάδιο της λειτουργίας υπολογίστηκε σύμφωνα με τα δεδομένα του φορέα του έργου. Έτσι, για την πραγματοποίηση των απαραίτητων ελέγχων και συντηρήσεων, υπολογίστηκε πως διανύονται 576 km ετησίως.

Αναφορικά με τη μεταφορά που σχετίζεται με την τελική διάθεση των μεταλλικών τμημάτων των ανεμογεννητριών προς ανακύκλωση, η απόσταση που διανύεται μέχρι τις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης των αρμόδιων φορέων ανέρχεται στα 100 km περίπου.

Έτσι, για τις επιμέρους μεταφορές που σχετίζονται με το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο, παρατίθενται στους επόμενους πίνακες συνοπτικά:

- οι αποστάσεις που καλύφθηκαν για την πρόσβαση των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών από τις εγκαταστάσεις παραγωγής στη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου,
- οι αποστάσεις που καλύφθηκαν για τη λειτουργία και συντήρηση του αιολικού πάρκου και
- οι αποστάσεις που καλύφθηκαν για την τελική διάθεση των υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Πίνακας 5. Μεταφορά τμημάτων ανεμογεννητριών από τις εγκαταστάσεις παραγωγής της κατασκευάστριας εταιρείας στη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου (αφορά και στις δύο ανεμογεννήτριες).

Τμήμα	Φορητά οχήματα	Χερσαίες αποστάσεις (km)	Θαλάσσιες αποστάσεις (km)
Κέλυφος	2	84	6.725
Ρότορας (χωρίς τα πτερύγια)	1	84	
Πτερύγια	2	84	
Πυλώνας	6	84	
Λοιπά	1	84	

Πίνακας 6. Ετήσια μεταφορά συνεργείων για τη λειτουργία και συντήρηση του αιολικού πάρκου.

	Οχήματα	Απόσταση (km)
Πετρελαιοκίνητα	1	288
Βενζινοκίνητα	1	288

Πίνακας 7. Μεταφορά τμημάτων ανεμογεννητριών από τη θέση εγκατάστασης στη θέση τελικής διάθεσης και ανακύκλωσης στο πέρας του κύκλου ζωής τους.

Τμήμα	Φορητά οχήματα	Απόσταση (km)
Πυλώνας	6	102
Πτερύγια	2	160

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία της μεταφοράς ισούται με $1tn \cdot km$ (τονοχιλιόμετρο), το οποίο αναφέρεται στη μεταφορά 1.000 kg υλικών, σε απόσταση 1 km (Blanco et als, 2008).

6.1.3. Συλλογή δεδομένων

Για την ανάλυση του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», αναζητήθηκαν ακριβή δεδομένα από το φορέα του έργου και την κατασκευάστρια εταιρεία, ώστε να καταστεί όσο το δυνατόν πιο ακριβής η μελέτη και να αποφευχθούν οι αβεβαιότητες.

Η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων περιλαμβάνει:

- Τη σύνθεση των υλικών των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών
- Τις διαδικασίες παραγωγής των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών στις εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας,
- Την κατανάλωση ενέργειας και ενδιάμεσων υλικών στις εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας,
- Την κατανάλωση ενδιάμεσων υλικών για τη διαμόρφωση του χώρου εγκατάστασης, τη λειτουργία και συντήρηση των ανεμογεννητριών,
- Την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο,
- Τη διαθεσιμότητα και τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας των ανεμογεννητριών.

Όπου δεν ήταν δυνατό να συγκεντρωθούν πρωτογενή δεδομένα, αξιοποιήθηκαν δευτερογενή δεδομένα, που προέκυψαν από:

- Την παραγωγή των πρώτων υλών για την κατασκευή των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών μέσω κατάλληλων δεικτών των υπολογιστικών μοντέλων,
- Τις διαδικασίες στο τέλος του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών και το σενάριο διαχείρισης των υλικών,
- Αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές.

6.1.4. Περιορισμοί και θεωρήσεις εργασίας

Σύμφωνα με τα πρότυπα εκπόνησης της εργασίας, πραγματοποιήθηκε ο απαραίτητος καθορισμός των ορίων και των θεωρήσεων που λήφθηκαν υπόψη στη συγκεκριμένη μελέτη.

Έτσι, οι αρχικές θεωρήσεις αφορούν:

1. Στη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών

Η διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ανέρχεται στα είκοσι (20) έτη και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της περιβαλλοντικής αποτίμησης του έργου, καθώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ορίζονται ανά αποδιδόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, για το σύνολο της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου.

2. Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από τη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Δεδομένου πως το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο βρίσκεται εν συνεχή λειτουργία τα τελευταία δεκαέξι (16) έτη και υπάρχουν καταγεγραμμένα στοιχεία μετρήσεων, το σύνολο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας θα υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια και για τα επόμενα τέσσερα (4) έτη.

Έτσι, στη συγκεκριμένη μελέτη, το συνολικό ποσό ενέργειας που καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο για την προβλεπόμενη εικοσαετή λειτουργία των ανεμογεννητριών, ανέρχεται στις 88.257.971,71 kWh.

3. Στην ανάλυση των επιμέρους τμημάτων του αιολικού πάρκου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ένα αιολικό πάρκο αποτελείται από το σύνολο των ανεμογεννητριών, τα έργα οδοποιίας/πρόσβασης στη θέση εγκατάστασης και τα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης με το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης. Στη συγκεκριμένη μελέτη, εξαιτίας του γεγονότος πως τα έργα οδοποιίας και ηλεκτρικής διασύνδεσης είναι ιδιαίτερα μικρής κλίμακας και τα στοιχεία που προέκυψαν για την ανάλυση του κύκλου ζωής τους δεν είναι σαφή και ακριβή, θεωρήθηκε πως το προς εξέταση αιολικό πάρκο απαρτίζεται από τις δύο ανεμογεννήτριες, οι οποίες αποτελούν στο εξής το προς εξέταση σύστημα στη μελέτη ΑΚΖ. Αξίζει να σημειωθεί, πως η συγκεκριμένη θεώρηση λήφθηκε υπόψη, αφενός λόγω της μικρής κλίμακας των έργων και αφετέρου λόγω του γεγονότος πως οι περαιτέρω θεωρήσεις που θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη, θα αύξαναν την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, υπερεκτιμώντας ή υποτιμώντας τις πραγματικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου.

4. Στις επιπτώσεις από την παραγωγή μετάλλων και την τελική αξιοποίηση των υλικών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το μεγαλύτερο μέρος των ανεμογεννητριών αποτελείται κυρίως από μέταλλα (σίδηρο, χάλυβα, αλουμίνιο και χαλκό), τα οποία σχετίζονται άμεσα με τις επιπτώσεις κατά την αρχική φάση παραγωγής έως και το τελικό στάδιο διαχείρισης των υλικών.

Σύμφωνα με το φορέα του έργου, οι ανεμογεννήτριες κατασκευάστηκαν στο εργοστάσιο της εταιρείας NEGΜicon στη Δανία (Άαρους). Ως εκ τούτου, για τον υπολογισμό της ενέργειας και των εκπομπών, αξιοποιήθηκαν τα αντιπροσωπευτικά στοιχεία του μέσου ενεργειακού μείγματος της Ευρώπης μέσω των υπολογιστικών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν, για την παραγωγή και κατασκευή των ανεμογεννητριών, ενώ για τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής του έργου αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία του ενεργειακού μείγματος της Ελλάδας.

Επίσης, στην ανάλυση κύκλου ζωής του συγκεκριμένου αιολικού πάρκου, θεωρήθηκε πως για την κατασκευή των αρχικών υλικών και επιμέρους τμημάτων έχει ληφθεί υπόψη η αξιοποίηση ανακυκλωμένων και επαναχρησιμοποιούμενων υλικών. Ως εκ τούτου, η περιβαλλοντική επιβάρυνση του πρώτου σταδίου είναι περιορισμένη, σε σύγκριση με εκείνη που θα προέκυπτε αν οι ανάγκες σε υλικά καλύπτονταν από την εξαρχής εξόρυξη πρώτων υλών, δεδομένου πως με αυτό τον τρόπο «ενσωματώνεται» στο πρώτο στάδιο της παραγωγής το όφελος που προκύπτει από το τελικό στάδιο της διάθεσης των υλικών.

Κατά το τελευταίο στάδιο θεωρήθηκε επίσης πως το σκυρόδεμα των θεμελίων που αποτελεί μεγάλο μέρος των αρχικών υλικών, καλύφθηκε από την τοπική βλάστηση, μετά την αποκατάσταση της περιοχής, ενώ οι ποσότητες από τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων κατέληξαν σε κατάλληλους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.).

5. Στις ποσότητες των υλικών που λήφθηκαν υπόψη

Τα υλικά που λήφθηκαν υπόψη στη συγκεκριμένη ΑΚΖ ανέρχονται στο 100% του συνολικού βάρους της κάθε ανεμογεννήτριας.

6. Στους ρύπους που λήφθηκαν υπόψη

Σύμφωνα με το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, λαμβάνονται υπόψη οι ρύποι οι οποίοι συμμετέχουν στο 99,5% της συνολικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

7. Σε έτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη λειτουργία του αιολικού πάρκου («external costs»)

Κατά την ΑΚΖ συνήθως δεν εξετάζονται πιθανές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη χρήση γης, την οπτική επαφή, το θόρυβο και τις τοπικές επιδράσεις στη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Οι παραπάνω παράγοντες εξετάζονται στο στάδιο μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, πριν την εγκατάσταση του έργου, που υποβάλλεται για τη σχετική αδειοδότησή του και εγκρίνεται από τις αρμόδιες αρχές.

Αξίζει να σημειωθεί πως το συγκεκριμένο έργο αποτελεί ένα έργο μικρών τεχνικών χαρακτηριστικών και διαστάσεων, ως εκ τούτου σε συνδυασμό με το χαρακτήρα και τη μορφολογία της περιοχής αποτελεί μια περιορισμένη πηγή περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Είναι βέβαιο πως η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου επηρεάζει και διαφοροποιεί το τοπίο σε σχέση με την αρχική του μορφή. Παρόλα αυτά, η ευρύτερη περιοχή δεν έχει χαρακτηριστεί ιδιαίτερης ιστορικής ή αρχαιολογικής σημασίας και οι κοντινότεροι οικισμοί βρίσκονται σε ικανή απόσταση, ώστε η οπτική όχληση που προκαλείται από το αιολικό πάρκο να περιορίζεται στην οπτική επαφή από τον παρακείμενο επαρχιακό δρόμο.

Επίσης, σύμφωνα με τη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων του φορέα του έργου, αναφορικά με τον παραγόμενο θόρυβο, σύμφωνα με το πιστοποιητικό των ανεμογεννητριών δεν υπάρχει τονικότητα στο θόρυβο μετά τα 87 m. Σύμφωνα με τις ισοθρουβικές καμπύλες της σχετικής μελέτης είναι φανερό ότι οι εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες δεν αναμένεται να δημιουργούν ηχητική όχληση σε ζώνη πλάτους μεγαλύτερη των 300-400 m, ως εκ τούτου το έργο δεν προκαλεί καμία έκθεση ανθρώπων

σε υψηλή στάθμη θορύβου. Επίσης, λόγω της ικανής απόστασης του αιολικού πάρκου από τους πιο κοντινούς οικισμούς, δεν υπάρχει αύξηση των επιπέδων θορύβου σε κατοικημένες περιοχές λόγω της παρουσίας του.

Όσον αφορά στο φυσικό περιβάλλον, η περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου δεν προστατεύεται από διεθνείς Συνθήκες ή κάποιο ιδιαίτερο καθεστώς προστασίας της φύσης (π.χ. Natura 2000, Τοπίο Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους, Καταφύγιο Άγριας Ζωής, Συνθήκη Ramsar κλπ.). Επίσης, δεν ανήκει σε κάποιο μεταναστευτικό πέρασμα πτηνών. Οι απώλειες βλάστησης που υπήρξαν κατά τη διάρκεια των κατασκευαστικών έργων, είναι μικρές σε έκταση και μη σημαντικές σε είδη βλάστησης. Οι απώλειες αυτές είναι μικρές, λόγω του άγονου εδάφους στο σημείο εγκατάστασης, καθώς και της ήπιας μορφής της επέμβασης για την κατασκευή του έργου.

Παράλληλα, το έργο δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα της άμεσης περιοχής του έργου, δεδομένου ότι η συνολική έκταση των εκχερσώσεων για την εγκατάστασή του ήταν πολύ μικρή. Η περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου χαρακτηρίζεται από την απουσία ιδιαίτερης μορφής χλωρίδας με την εξαίρεση κάποιων θάμνων, η παρουσία των οποίων δεν επηρεάζει το έργο και επομένως ποτέ δεν υπήρξε λόγος να καταστραφούν.

Όσον αφορά στην πανίδα της περιοχής, πέραν των βοοειδών και των αιγοπροβάτων, είναι ιδιαίτερα φτωχή και η παρουσία του αιολικού πάρκου δε δημιουργεί κάποιο πρόβλημα.

Τέλος, από τη λειτουργία του προτεινόμενου έργου δεν υπάρχουν εκπομπές αερίων, υγρών και στερεών αποβλήτων ώστε να επιδράσουν στη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής.

8. Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στα επόμενα κεφάλαια, ακολουθεί τη δομή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Ως εκ τούτου, το πρώτο στάδιο της «Παραγωγής και κατασκευής επιμέρους τμημάτων ανεμογεννητριών» και το δεύτερο στάδιο της «Εγκατάστασης των ανεμογεννητριών» παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε ένα στάδιο, ενώ γίνεται η διάκριση στις επιπτώσεις που αφορούν στις ανάγκες σε υλικά και στις ανάγκες σε ενέργεια (Στάδιο 1Α και 1Β αντίστοιχα). Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι επιπτώσεις του πρώτου και δεύτερου σταδίου, ανά βασική κατηγορία δεδομένων εισόδου (υλικά – ενέργεια).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το στάδιο της «Μεταφοράς των ανεμογεννητριών», στο οποίο αναπόφευκτα ενσωματώνονται όλες οι επιμέρους μεταφορές που αφορούν σε όλα τα εξεταζόμενα στάδια (Στάδιο 2).

Ακολουθεί το στάδιο της «Λειτουργίας των ανεμογεννητριών» (Στάδιο 3). Να σημειωθεί εδώ, πως οι ρύποι που αφορούν στην παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες, υπολογίστηκαν μέσω των αντίστοιχων ρύπων που θα παράγονταν για το ίδιο ποσό ενέργειας, αν αυτό προερχόταν από το Ελληνικό ενεργειακό σύστημα παραγωγής. Ως εκ τούτου, οι ποσότητες των ρύπων λαμβάνουν αρνητικό πρόσημο, καθώς μέσω της λειτουργίας των ανεμογεννητριών οι ρύποι δεν εκλύονται τελικά στο περιβάλλον.

Κλείνοντας, ακολουθεί η παρουσίαση του σταδίου του «Τέλους της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών» (Στάδιο 4).

6.2. Απογραφή δεδομένων

Η ΑΚΖ του συγκεκριμένου αιολικού πάρκου ακολουθεί μια αναλυτική προσέγγιση, η οποία εστιάζει περισσότερο στην ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών εκπομπών που σχετίζονται με το πάρκο και τις τελικές πιθανές επιπτώσεις τους. Κάθε επιμέρους υλικό των ανεμογεννητριών λαμβάνεται υπόψη βάσει των συνολικών τεχνικών στοιχείων που παρέχονται από την κατασκευάστρια εταιρεία. Η πορεία των υλικών, μέσω της μοντελοποίησης των ενδιάμεσων σταδίων του αιολικού πάρκου, αποτυπώνει και ποσοτικοποιεί τα ποσά της ενέργειας, των υλικών, των απορριμμάτων και των εκπομπών στο σύνολο της διάρκειας ζωής του, αλλά και για κάθε επιμέρους στάδιο του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους τμήματα των ανεμογεννητριών τύπου NM44/750, της κατασκευάστριας εταιρείας NEG Micon και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται.

Πίνακας 8. Συγκεντρωτικός πίνακας επιμέρους υλικών ανεμογεννήτριας NM44/750, της κατασκευάστριας εταιρείας NEG Micon.

Τμήμα ανεμογεννήτριας	Υλικό	Βάρος (ton)
Ρότορας (rotor)		
	Ανθρακονήματα	1,14
	Υαλονήματα	2,34
	Εποξικές ρητίνες	2,28
	Χυτοσίδηρος	2,10
	Βινυλεστέρας	0,04
Κέλυφος (nacelle)		
	Χαλκός	1,51
	Χάλυβας	19,43
	Πυρίτιο	0,10
	Αλουμίνιο	0,73
	Βινυλεστέρας	0,08
	Υαλονήματα	0,16
Πυλώνας (tower)		
Τμήματα πυλώνα	Χάλυβας	45,00
Θεμέλια ανεμογεννήτριας		
	Σκυρόδεμα	606,25
	Σίδηρος	18,75

6.3. Εκτίμηση επιπτώσεων - Ταξινόμηση και χαρακτηρισμός

6.3.1. Κατηγορίες επιπτώσεων και σχετικοί δείκτες

Η επιλογή των κατηγοριών επιπτώσεων που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη ΑΚΖ στηρίχθηκε στις επιπτώσεις ενδιάμεσου σημείου που προκύπτουν από το σύστημα ενός

αιολικού πάρκου, σύμφωνα με τα πρότυπα της μεθόδου CML 2001 (*baseline characterisation factors for mid-point potential impacts*). Ως εκ τούτου, μελετήθηκαν οι κατηγορίες επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή, κατασκευή και ανακύκλωση μετάλλων, σκυροδέματος, πολυμερών και σύνθετων υλικών.

Έτσι επιλέχθηκαν οι παρακάτω περιβαλλοντικοί δείκτες επιπτώσεων για την ανάλυση του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη-Λιάζαρι»:

Κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων:

- Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)
- Οξίνιση (Acidification, AP)
- Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)
- Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)
- Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)
- Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)
- Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)

Κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων εξετάστηκε για κάθε επιμέρους στάδιο του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται παρακάτω.

6.3.2. Στάδια του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών και υπολογισμοί περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι τιμές των περιβαλλοντικών δεικτών που εξετάστηκαν και αναλύονται οι παράγοντες διαμόρφωσής τους. Οι τιμές των δεικτών μέτρησης καθώς και οι τιμές των υπό συμμετοχή χημικών στοιχείων σε κάθε δείκτη αφορούν στη λειτουργική μονάδα και επομένως αναφέρονται σε ρύπους ανά kWh.

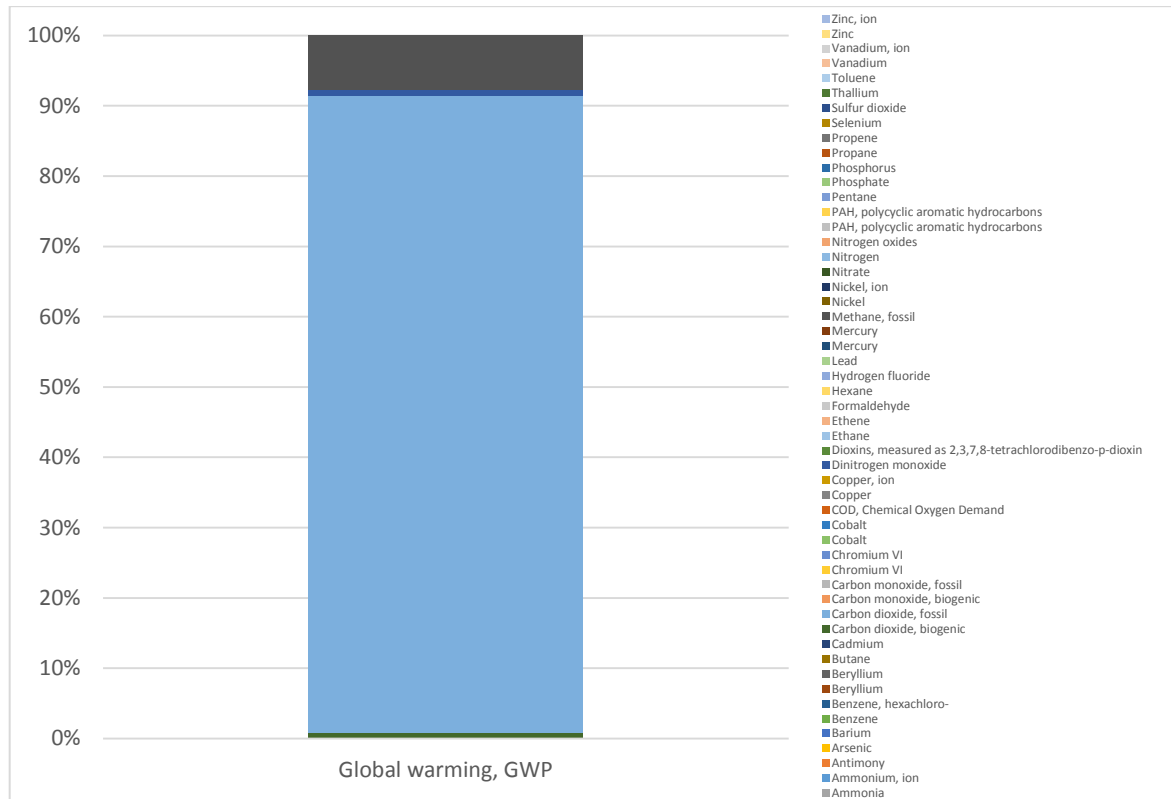
Να σημειωθεί εδώ, πως στην παρακάτω παρουσίαση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνονται τα ενδιάμεσα στάδια της ταξινόμησης και του χαρακτηρισμού, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της ΑΚΖ.

Στάδιο 1Α. Παραγωγή, κατασκευή και εγκατάσταση ανεμογεννητριών – Ανάγκες σε Υλικά

Στο στάδιο 1Α λήφθηκαν υπόψη οι επιμέρους πρώτες ύλες που χρειάστηκαν για την κατασκευή των τμημάτων των ανεμογεννητριών, στο εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρείας, με βάση τις παραδοχές της εργασίας που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη υποενότητα. Ειδικότερα, για κάθε υλικό αξιοποιήθηκαν αντίστοιχοι δείκτες και παράμετροι για τις ανεμογεννήτριες, σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα και τους δείκτες του υπολογιστικού μοντέλου, που αποτυπώνουν τις ανάγκες σε πρώτες ύλες. Οι δείκτες αυτοί αφορούν στην πορεία από την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών μέχρι την είσοδό τους στις εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας προς περαιτέρω επεξεργασία. Αναλυτικότερα στο στάδιο 1Α εντάσσεται η παραγωγή πρώτων υλών και η κατασκευή των επιμέρους τμημάτων που θα αποτελέσουν το σύνολο της ανεμογεννήτριας, όπως ο πυλώνας, το κέλυφος της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια, τα θεμέλια, τα καλώδια, οι μετασχηματιστές κ.λπ..

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως ομαδοποιήθηκαν στους επιμέρους δείκτες αναφοράς.

Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)

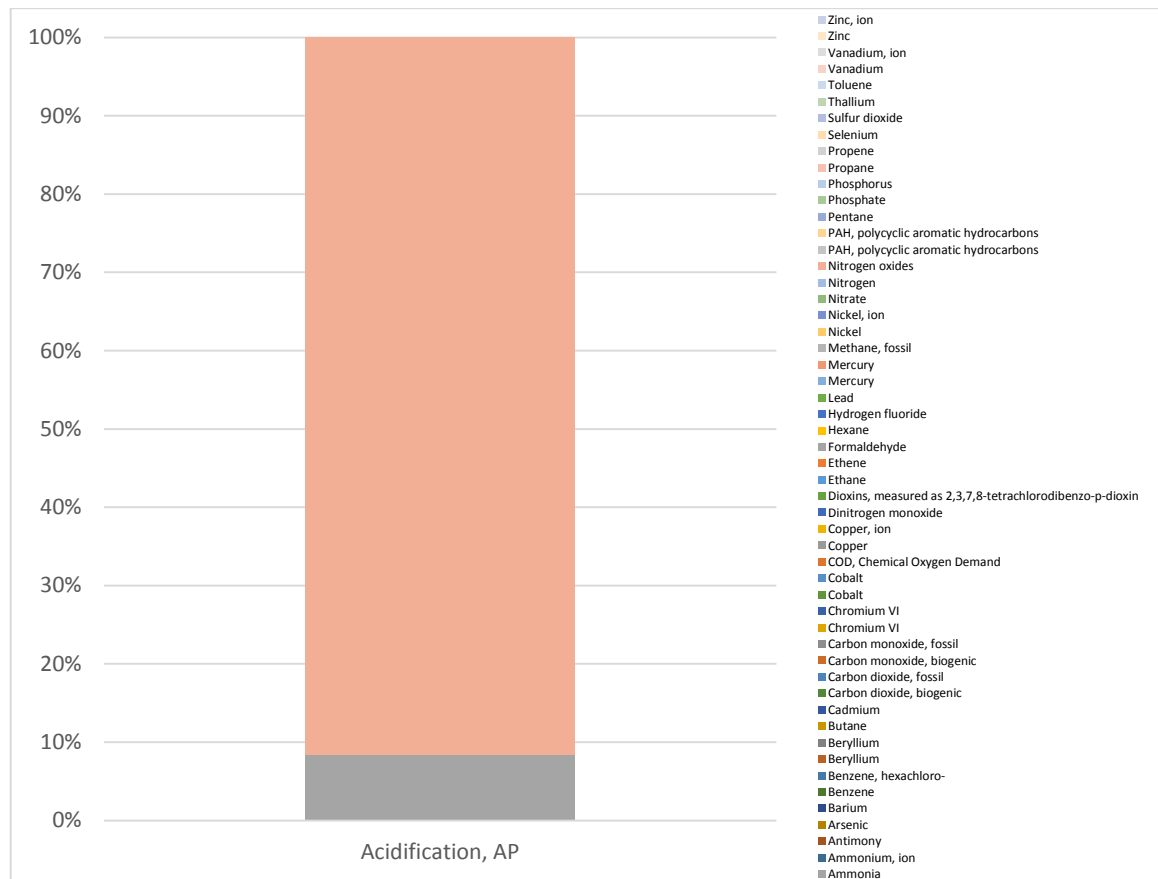


Σχήμα 12. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στον δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 1Α

Στο Στάδιο 1Α, από το σύνολο των επιμέρους χημικών στοιχείων που εξετάστηκαν και παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα, μόνο τέσσερα στοιχεία εμφανίζονται με μη μηδενικές τιμές, σχετικά με την παγκόσμια υπερθέρμανση. Η συνολική συμβολή του σταδίου αυτού στην κλιματική αλλαγή (για το υπό μελέτη αιολικό πάρκο) υπολογίστηκε σε $8,84 \cdot 10^{-3}$ kg CO₂² και προκύπτει από εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (βιογενές διοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα παραγόμενο από ορυκτά καύσιμα), μονοξείδιο του αζώτου και μεθανίου. Πιο συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες εκπομπές αφορούν το διοξείδιο του άνθρακα παραγόμενο από ορυκτά καύσιμα ($8,01 \cdot 10^{-3}$ ήτοι το 91% του συνόλου) και έπονται με μεγάλη διαφορά οι εκπομπές μεθανίου ($0,68 \cdot 10^{-3}$ ήτοι το 8% του συνόλου), οι εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου ($0,08 \cdot 10^{-3}$ ήτοι το 1% του συνόλου) και το βιογενές διοξείδιο του άνθρακα ($0,08 \cdot 10^{-3}$ ήτοι το 1% του συνόλου).

² Τιμή εκφρασμένη σε παραγόμενα kg ισοδύναμου CO₂.

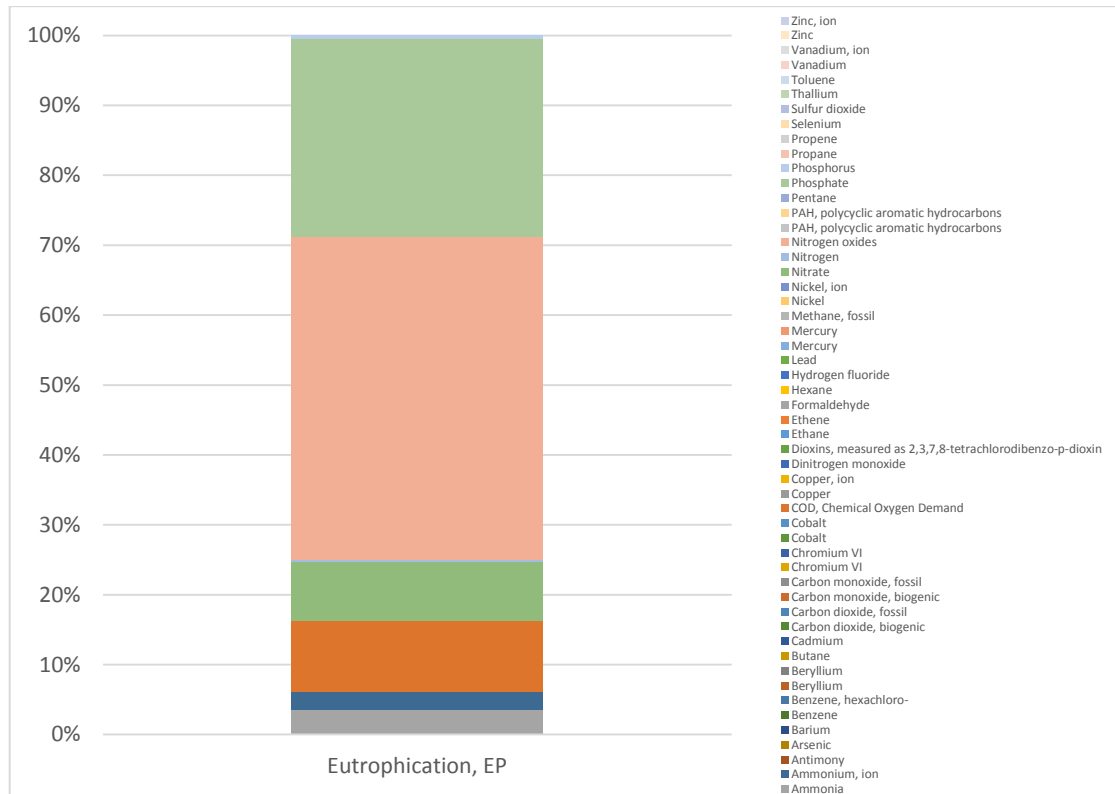
Οξίνιση (Acidification, AP)



Σχήμα 13. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 1A

Οι ουσίες που προκαλούν επιπτώσεις οξίνισης στο έδαφος, τα υπόγεια ύδατα, τα επιφανειακά ύδατα, τους οργανισμούς, τα οικοσυστήματα και τις πρώτες ύλες στο Στάδιο 1A είναι η αμμωνία και τα οξείδια του αζώτου. Πιο συγκεκριμένα, τα οξείδια του αζώτου συμβάλλουν κατά 91% στο φαινόμενο της οξίνισης, με εκπομπές της τάξης του $1 \cdot 10^{-5}$ ισοδύναμων kg SO_2 , με την αμμωνία να συμβάλλει σαφώς σε μικρότερο βαθμό στο συγκεκριμένο φαινόμενο με 9% ή εναλλακτικά με $0,1 \cdot 10^{-5}$ ισοδύναμων kg SO_2 . Οι συνολικές εκπομπές του Σταδίου 1A στο συγκεκριμένο δείκτη ανέρχονται σε $1,1 \cdot 10^{-5}$ ισοδύναμων kg SO_2 .

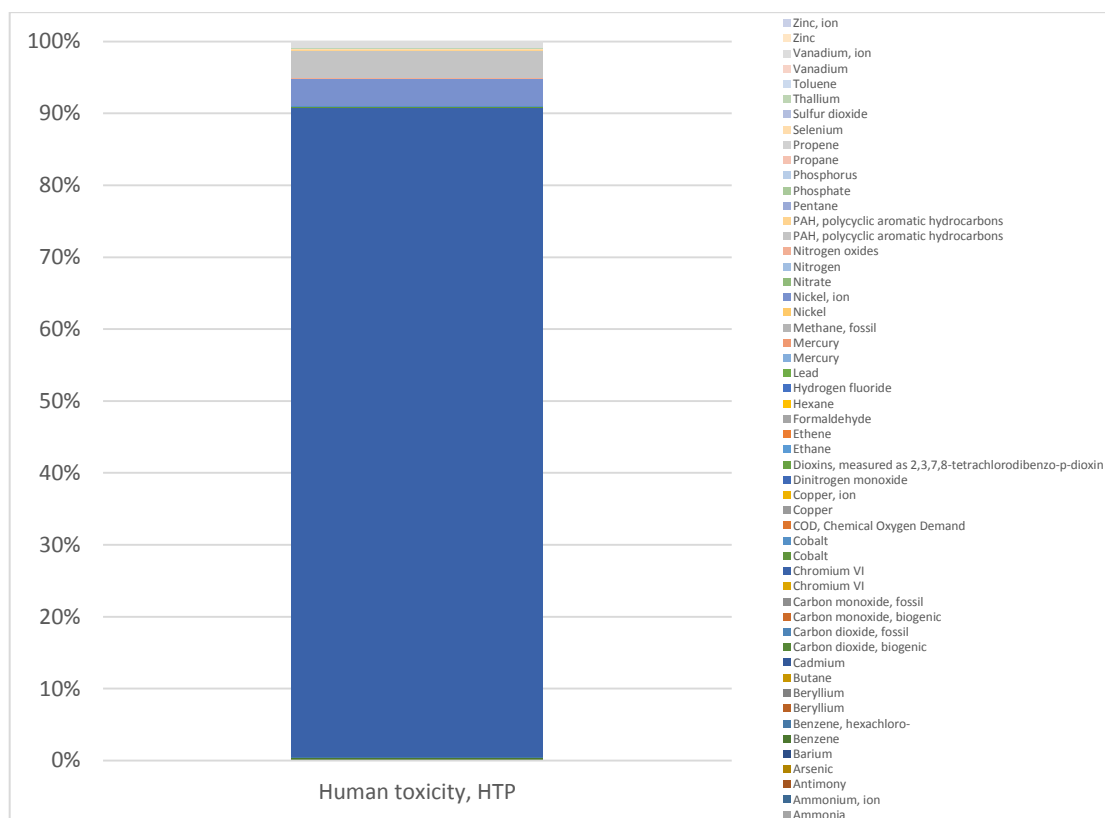
Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)



Σχήμα 14. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 1Α

Κατά το στάδιο 1Α υπάρχουν αρκετές ουσίες που επιδρούν και διαμορφώνουν το δείκτη του ευτροφισμού, ο οποίος συνολικά λαμβάνει την τιμή $5,45 \cdot 10^{-6}$ ισοδύναμων kg PO_4 . Η συγκεκριμένη τιμή διαμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία, κατά κύριο λόγο, οξειδίων του αζώτου και φωσφορικού άλατος. Αναλυτικότερα, τα οξείδια του αζώτου αποτελούν περίπου το 46% των συνολικών εκπομπών που εντάσσονται στο συγκεκριμένο δείκτη, ενώ το φωσφορικό άλας περίπου το 28%. Σε μικρότερες ποσότητες, κατά τις διαδικασίες του Σταδίου 1Α εμφανίζονται τα εξής χημικά στοιχεία: νιτρικό άλας που συμμετέχει στη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη ευτροφισμού κατά 8%, αμμωνία (3%), ιόντα αμμωνίου (2,5%), φώσφορος (0,5%), άζωτο (0,1%) και χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) 10%.

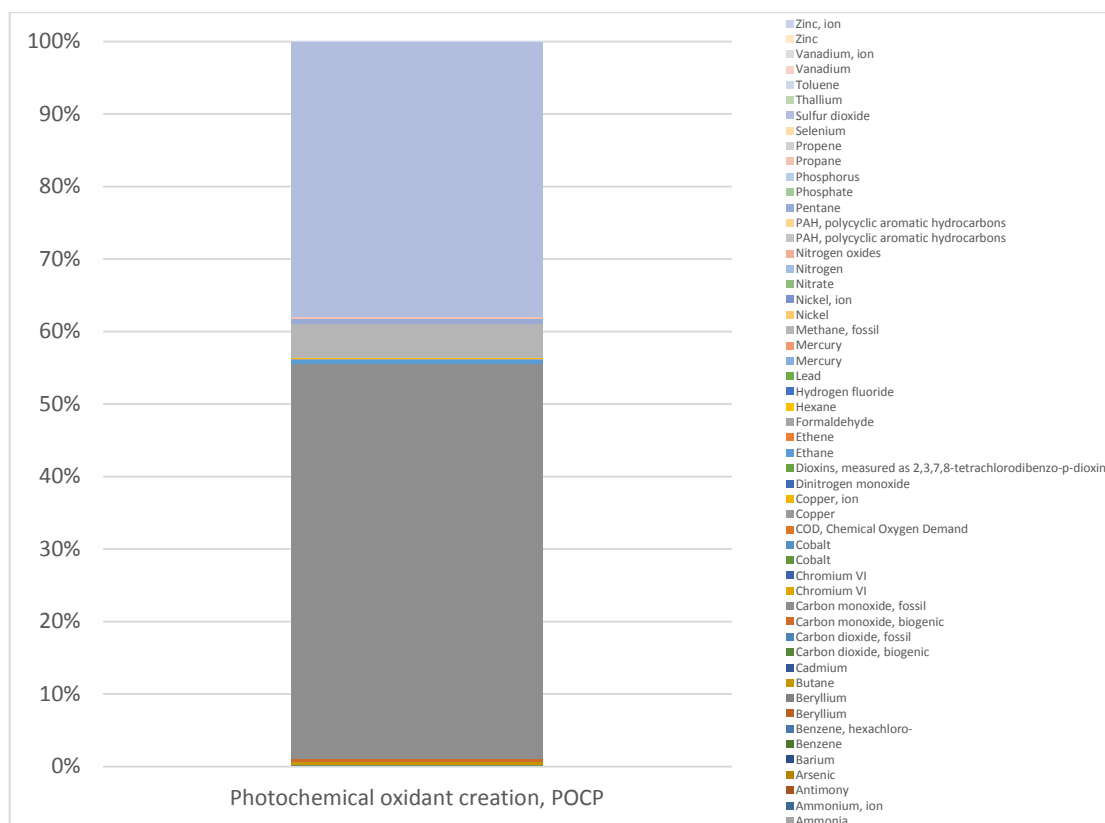
Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)



Σχήμα 15. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 1Α

Ο δείκτης ανθρώπινης τοξικότητας κατά το Στάδιο 1Α σημειώνει αρκετά υψηλή τιμή ($32,55 \cdot 10^{-3}$ kg 1,4-dichlorobenzene). Στη διαμόρφωση της τιμής που λαμβάνει ο δείκτης, κύριο ρόλο έχει η παρουσία του εξασθενούς χρωμίου που διαμορφώνει κατά 90,2% τη συνολική τιμή. Λιγότερο σημαντική παρουσία έχουν τα εξής στοιχεία: οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) που εκλύονται προς τον αέρα (3,86%), τα ιόντα νικελίου (3,72%), τα ιόντα βαναδίου (0,9%), το κοβάλτιο που εκλύεται προς τον αέρα (0,26%), το βενζόλιο (0,22%), το εξαχλωροβενζόλιο (0,2%), το σελήνιο (0,18%), το βάριο (0,13%), οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) που εκλύονται προς το νερό (0,09%), το θάλλιο (0,08%), το κοβάλτιο που εκλύεται προς το νερό (0,7%), τα οξείδια του αζώτου (0,07%) και το αντιμόνιο (0,02%).

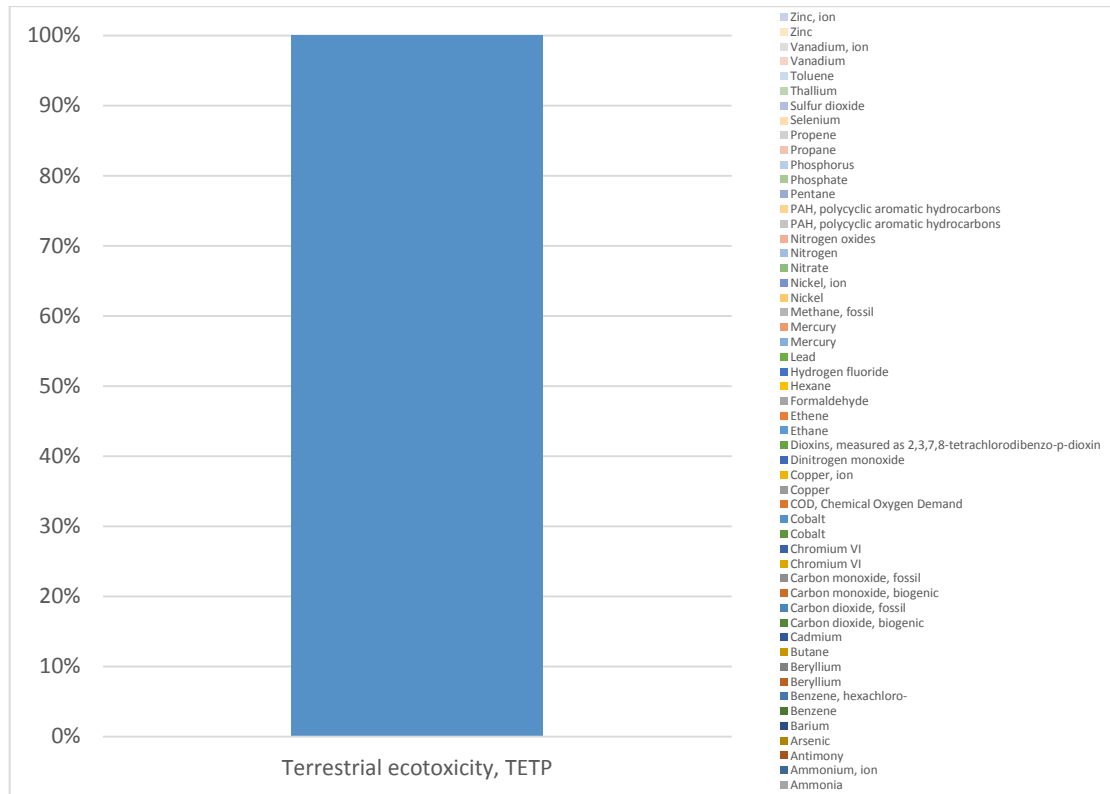
Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)



Σχήμα 16. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 1Α

Ο δείκτης της φωτοχημικής οξείδωσης στο στάδιο 1Α λαμβάνει συνολική τιμή $3,07 \cdot 10^{-6}$ ισοδύναμα kg αιθυλενίου. Η τιμή αυτή διαμορφώνεται εν πολλοίς από την παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα από ορυκτά καύσιμα (συνεισφέρει κατά 54,42% στη διαμόρφωση της τελικής τιμής του δείκτη) και από την παρουσία διοξειδίου του θείου (37,8%). Έπεται σε σημαντικότητα το μεθάνιο (4,8%) ενώ ακολουθούν τα υπόλοιπα στοιχεία που η συμμετοχή τους στη φωτοχημική οξείδωση είναι ήσσονος σημασίας, όπως το πεντάνιο (0,55%), το αιθάνιο (0,54%), το βιογενές μονοξείδιο του άνθρακα (0,44%), το βουτάνιο (0,4%), το προπάνιο (0,37%), το βενζόλιο (0,27%) και το εξάνιο (0,22%).

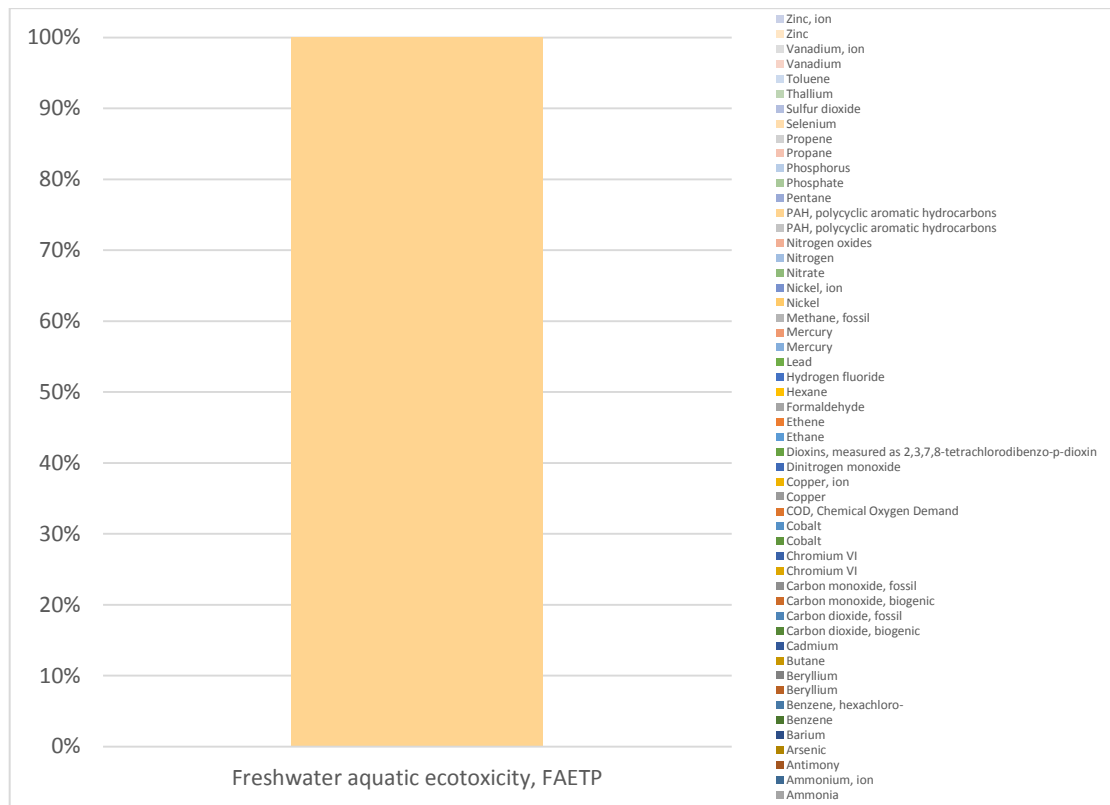
Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)



Σχήμα 17. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 1Α

Σε ότι αφορά το δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας για το πρώτο στάδιο (1Α) εκείνος λαμβάνει την τιμή $0,537 \cdot 10^{-3}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Σημαντικό γεγονός είναι ότι η τιμή του συγκεκριμένου δείκτη διαμορφώνεται αποκλειστικά από την παρουσία κοβαλτίου κατά το συγκεκριμένο στάδιο του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου.

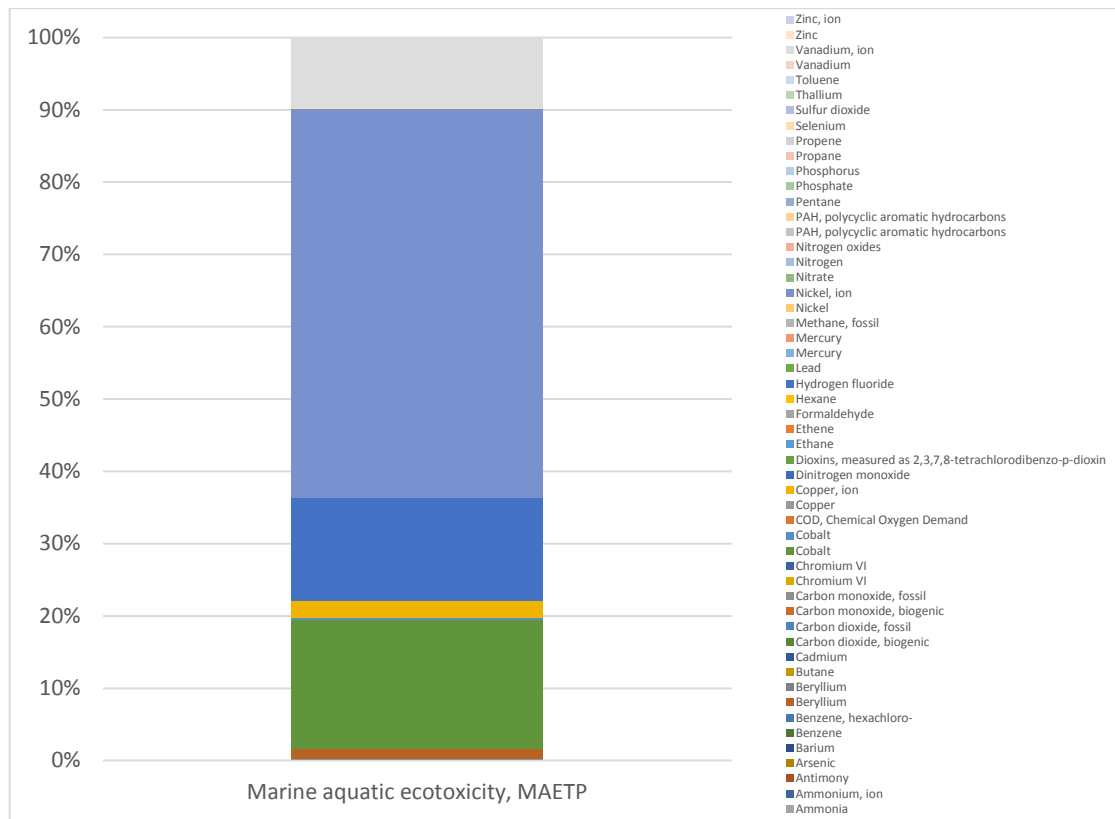
Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)



Σχήμα 18. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 1Α

Η οικοτοξικότητα του γλυκού νερού με βάσει τις παραδοχές που έγιναν και το μοντέλο μέτρησης των τιμών έλαβε τιμή ίση με $1,24 \cdot 10^{-10}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Ο συγκεκριμένος δείκτης επηρεάζεται σχεδόν κατά 100% από την παρουσία των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων κατά το στάδιο 1Α, που επιδρούν στην οικοτοξικότητα του γλυκού νερού. Ήσσονος σημασίας συμμετοχή στη διαμόρφωση του δείκτη έχουν και ορισμένα άλλα στοιχεία που εμφανίζουν πολύ μικρές τιμές - σχεδόν μηδενικές όπως το βηρύλλιο και το βάριο.

Θαλάσσια οικολογική (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)



Σχήμα 19. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικολογικότητας, Στάδιο 1Α

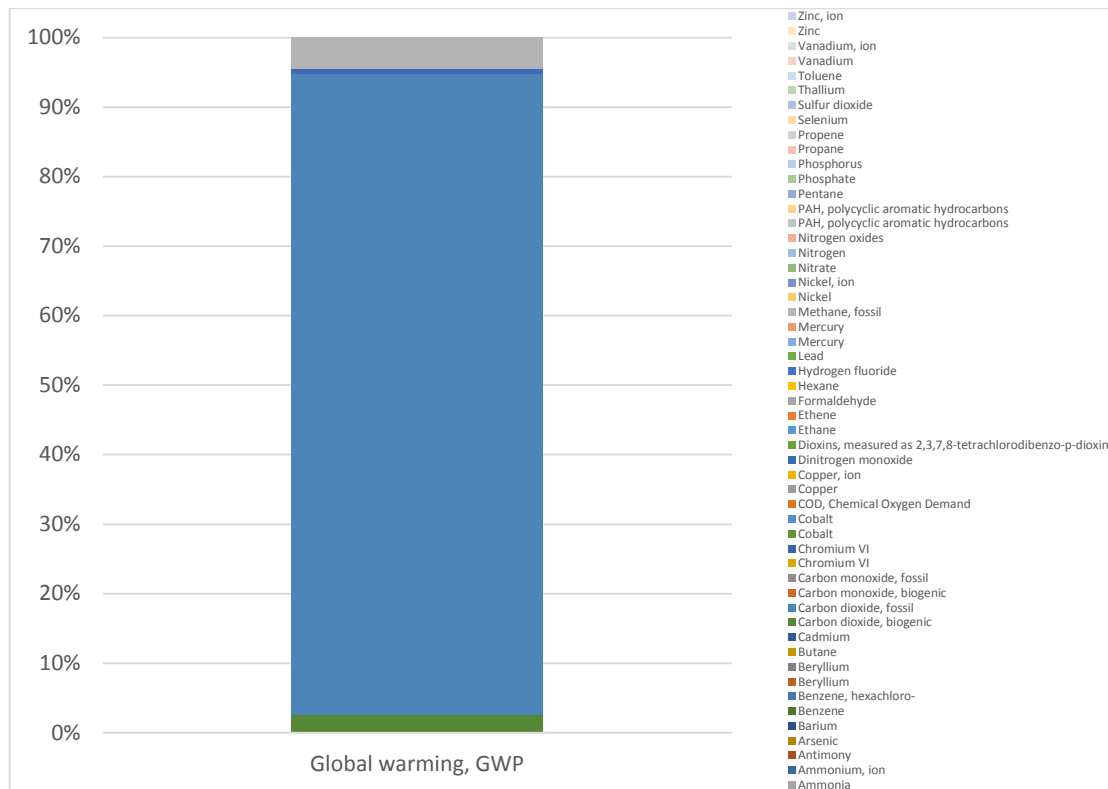
Ο δείκτης για τη θαλάσσια οικολογικότητα λαμβάνει υψηλή τιμή στο συγκεκριμένο στάδιο και ισούται με 17,4 ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Η τιμή αυτή διαμορφώνεται εν πολλοίς από τα ιόντα νικελίου (που αποτελούν περίπου το 54% του συνόλου) και σε δευτερεύοντα βαθμό από το κοβάλτιο (18%), το υδροφθόριο (14%) και τα ιόντα βαναδίου (9,8%). Μικρότερη συνεισφορά στη διαμόρφωση της τελικής τιμής του δείκτη έχουν τα στοιχεία: ιόντα χαλκού (2,3%), βηρύλλιο (1,3%), βάριο (0,3%), κοβάλτιο (0,15%) και σεληνίο (0,15%).

Στάδιο 1B. Παραγωγή, κατασκευή και εγκατάσταση ανεμογεννητριών – Ενεργειακές Ανάγκες

Στο στάδιο 1B περιλαμβάνονται όλες οι ενεργειακές ανάγκες για την παραγωγή, κατασκευή και συναρμολόγηση των επιμέρους τμημάτων της ανεμογεννήτριας και ο ποιοτικός έλεγχος των παραγόμενων τμημάτων. Εδώ λαμβάνονται υπόψη οι ενεργειακές ανάγκες κατά τη διάρκεια παραγωγής στο εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρείας, όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα και τους δείκτες του υπολογιστικού μοντέλου. Οι δείκτες αυτοί αφορούν στην πορεία από την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών μέχρι την είσοδό τους στις εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας προς περαιτέρω επεξεργασία και την τελική εγκατάσταση στη θέση λειτουργίας του αιολικού πάρκου.

Επίσης εδώ, περιλαμβάνονται και όλες οι εργασίες διαμόρφωσης κατάλληλων χώρων και θεμελίωσης για την ανέγερση των ανεμογεννητριών.

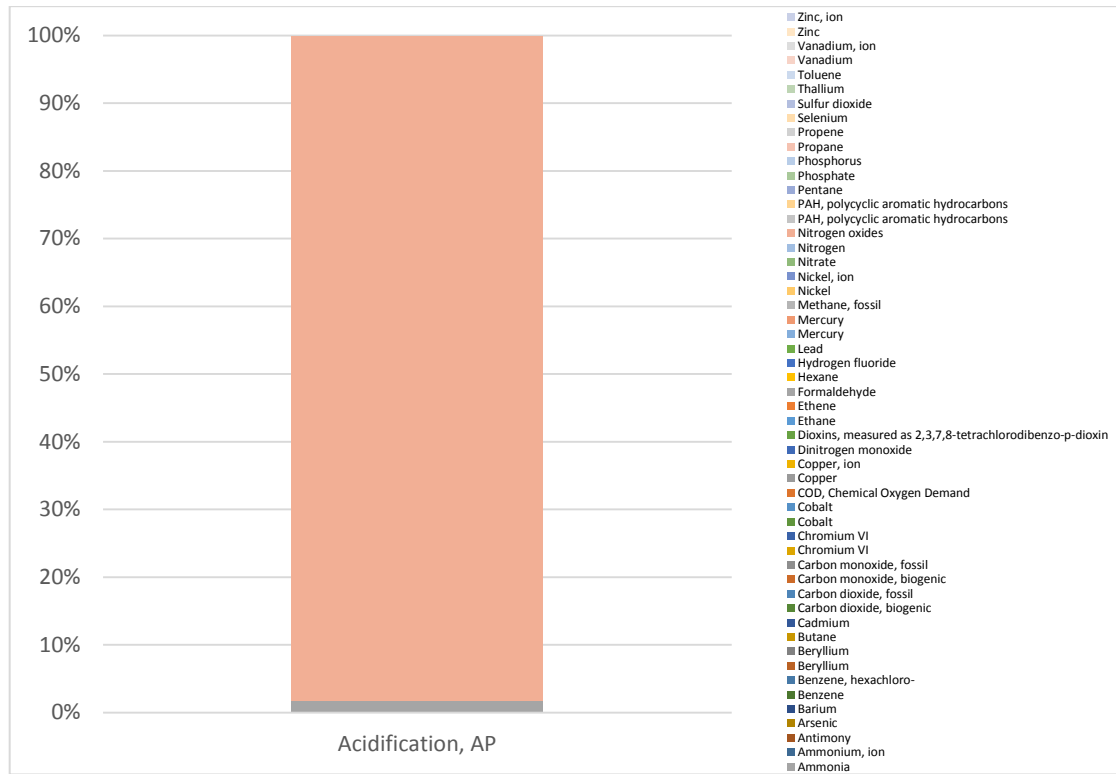
Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)



Σχήμα 20. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 1B

Στο στάδιο 1B ο δείκτης για την παγκόσμια υπερθέρμανση λαμβάνει τιμή ίση με $213,41 \cdot 10^6$ ισοδύναμων kg CO₂. Η συγκεκριμένη τιμή οφείλεται κατά 92% περίπου σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ως αποτέλεσμα της χρήσης ορυκτών καυσίμων στις διάφορες παραγωγικές διαδικασίες (μεταφορά, συναρμολόγηση κλπ.) που περιλαμβάνονται στο συγκεκριμένο στάδιο του κύκλου ζωής της εξεταζόμενης εγκατάστασης. Σε μικρότερο βαθμό, συμμετοχή στα στοιχεία που καθορίζουν το δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης έχουν το μεθάνιο (4,5%), το βιογενές διοξείδιο του άνθρακα (2,6%) και το μονοξείδιο του αζώτου (0,8%).

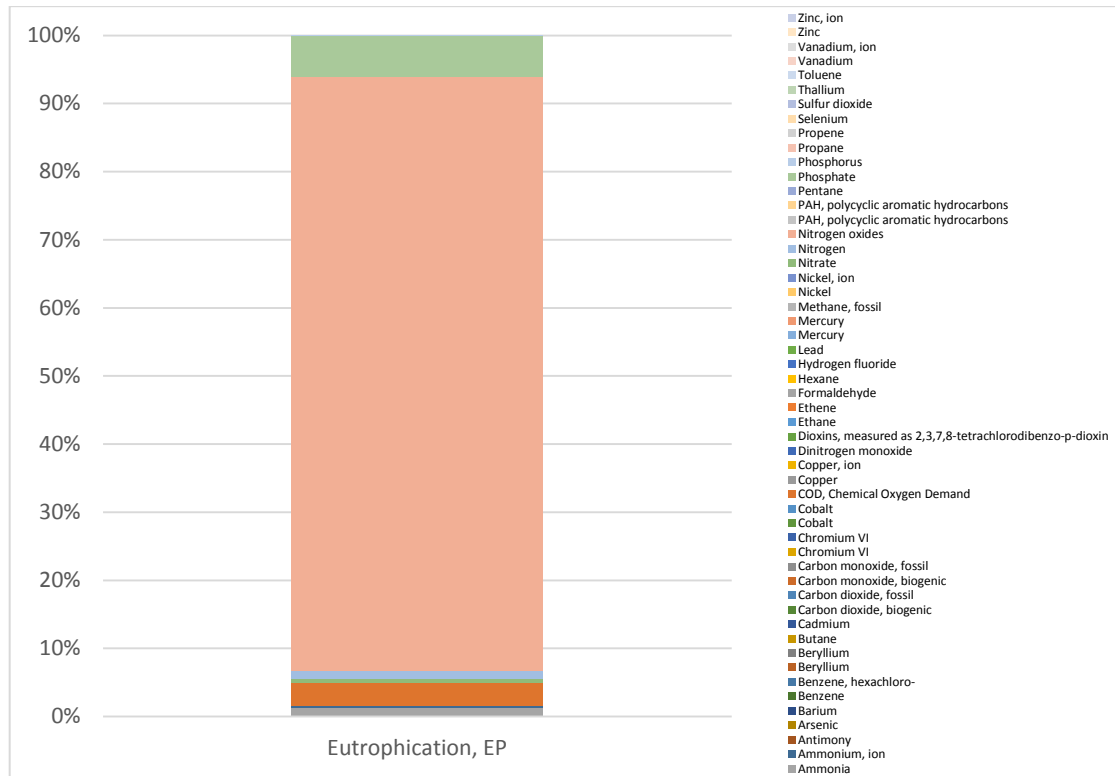
Οξίνιση (Acidification, AP)



Σχήμα 21. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 1B

Στο συγκεκριμένο στάδιο ο δείκτης οξίνισης υπολογίστηκε σε $170 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμων kg SO₂. Η διαμόρφωση της τιμής του δείκτη οφείλεται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα στα οξείδια του αζώτου (98%) και σε πολύ μικρό βαθμό στην παρουσία αμμωνίας.

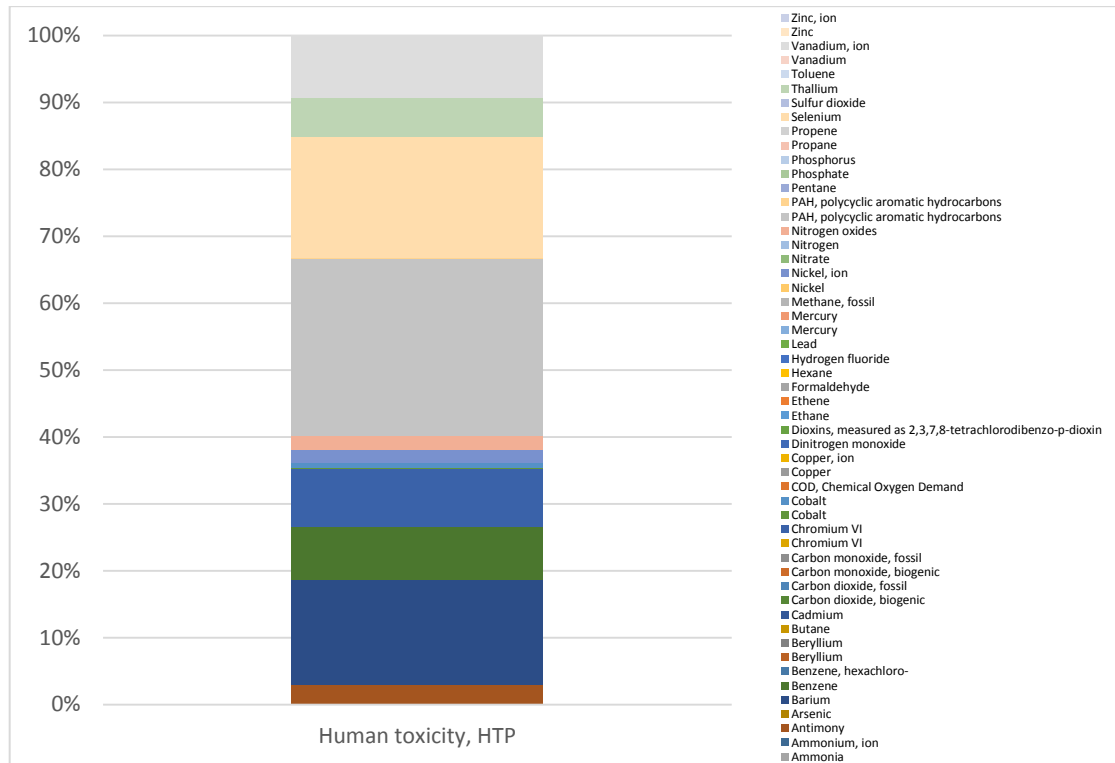
Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)



Σχήμα 22. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 1B

Ο δείκτης ευτροφισμού στο στάδιο 1B ανήλθε σε $47,9 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμων kg PO_4 . Από τις ουσίες που επιδρούν στο δείκτη ευτροφισμού, εκείνη με τη μεγαλύτερη επίπτωση είναι τα οξείδια του αζώτου που συνεισφέρουν κατά 87% στη διαμόρφωση του δείκτη. Μικρότερη επιρροή στην τελική τιμή του δείκτη ευτροφισμού έχουν οι χημικές ουσίες: φωσφορικό άλας (6%), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) (3,4%), η αμμωνία (1,3%), το άζωτο (1,25%), το νιτρικό άλας (0,45%) και τα ιόντα αμμωνίου (0,28%).

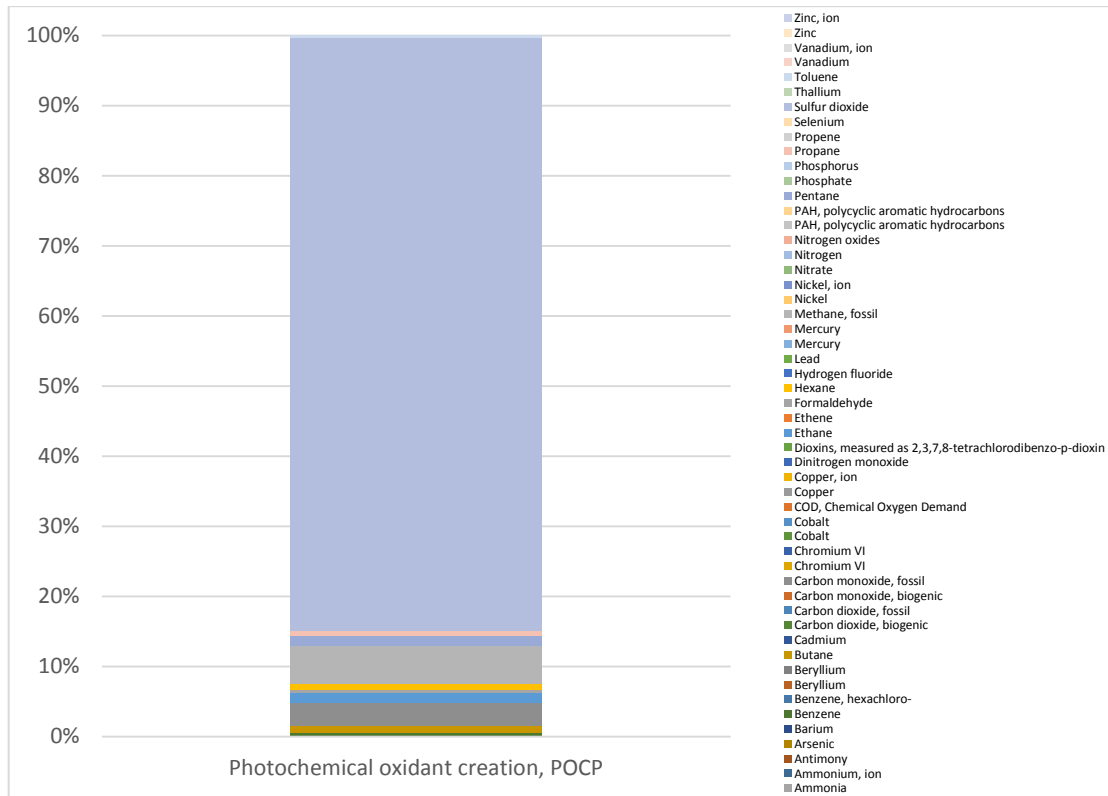
Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)



Σχήμα 23. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 1B

Στον υπολογισμό της ανθρώπινης τοξικότητας στο στάδιο 1B συμβάλλουν δεκατέσσερα χημικά στοιχεία, τα οποία αθροιστικά διαμορφώνουν το δείκτη στα $2,69 \cdot 10^{-5}$ ισοδύναμα kg 1,4-dichlorobenzene. Σε μεγάλο βαθμό επηρεάζουν το δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH) (26%), το σελήνιο (18%) και το βάριο (16%). Μία δεύτερη ομάδα στοιχείων με μικρότερη συνεισφορά στη διαμόρφωση του δείκτη περιλαμβάνει τα ιόντα βαναδίου (9,4%), το εξασθενές χρώμιο (8,6%), το βενζόλιο (8%), το θάλλιο (5,8%), το αντιμόνιο (3%), τα ιόντα νικελίου (2%) και τα οξείδια του αζώτου (1,9%). Ήσσονος σημασίας είναι η επιρροή κάποιων στοιχείων που εισφέρουν λιγότερο από 1%, όπως το κοβάλτιο που εντοπίζεται είτε στον αέρα, είτε στο νερό, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες που επηρεάζουν τους υδατικούς πόρους και το εξαχλωροβενζόλιο.

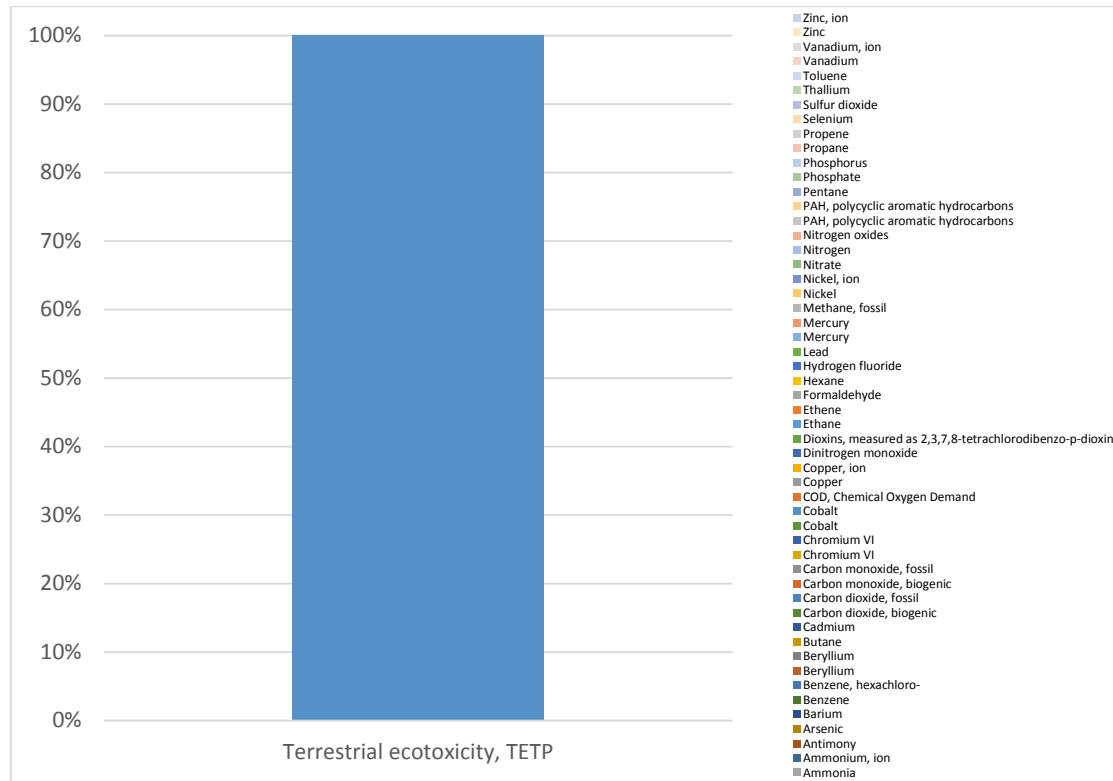
Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)



Σχήμα 24. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 1B

Ο δείκτης φωτοχημικής οξείδωσης υπολογίστηκε σε $37,8 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμα kg αιθυλενίου. Στο Στάδιο 1B, τη μεγαλύτερη τιμή στο δείκτη εμφάνισε το διοξείδιο του θείου, με συνολική συνεισφορά στη διαμόρφωση του δείκτη της τάξεως του 84,5%. Μικρότερης σημασίας στοιχεία για το δείκτη είναι το μεθάνιο (5,4%), το διοξείδιο του άνθρακα (3,3%), το αιθάνιο (1,4%) και το πεντάνιο (1,4%). Μικρή σημασία για τη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος του δείκτη έχουν στοιχεία, όπως το εξάνιο, το βουτάνιο, το προπάνιο και το βενζόλιο.

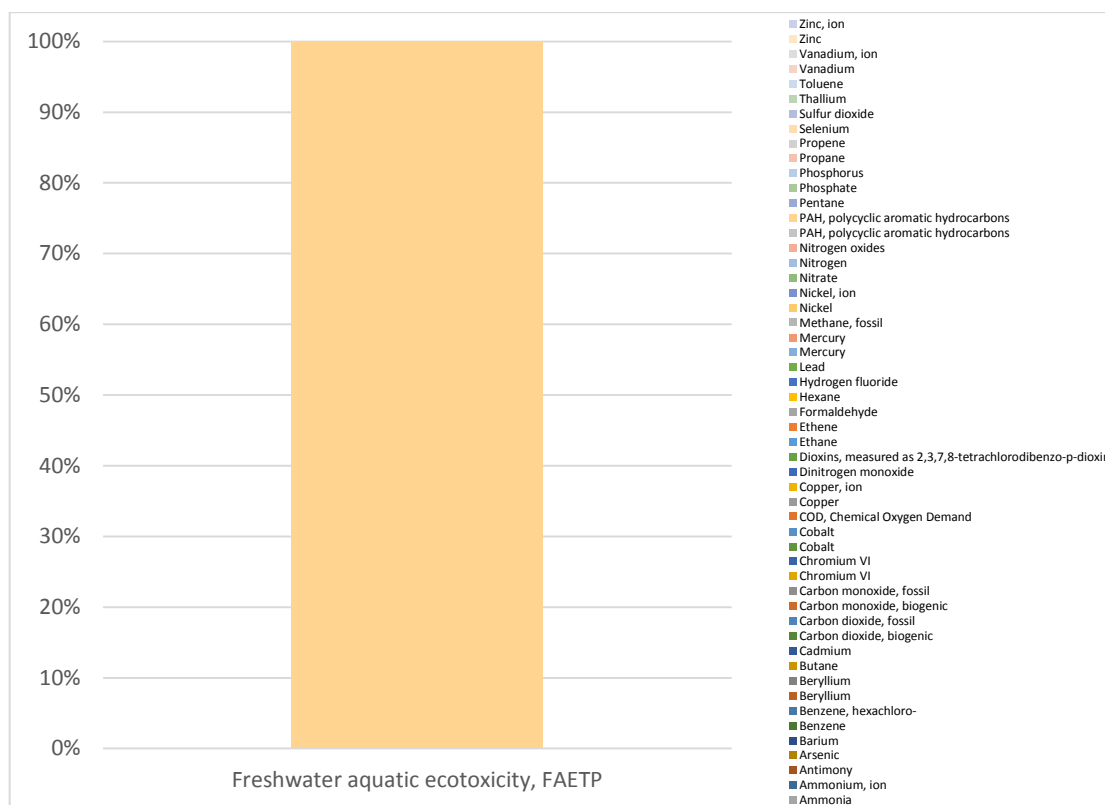
Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)



Σχήμα 25. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στον δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 1B

Η εδαφική οικοτοξικότητα στο συγκεκριμένο στάδιο του κύκλου ζωής του υπό μελέτη αιολικού πάρκου υπολογίζεται σε $1,14 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Όπως και στο στάδιο 1A έτσι και εδώ, ο δείκτης αυτός καθορίζεται κατά 100% από την παρουσία κοβαλτίου.

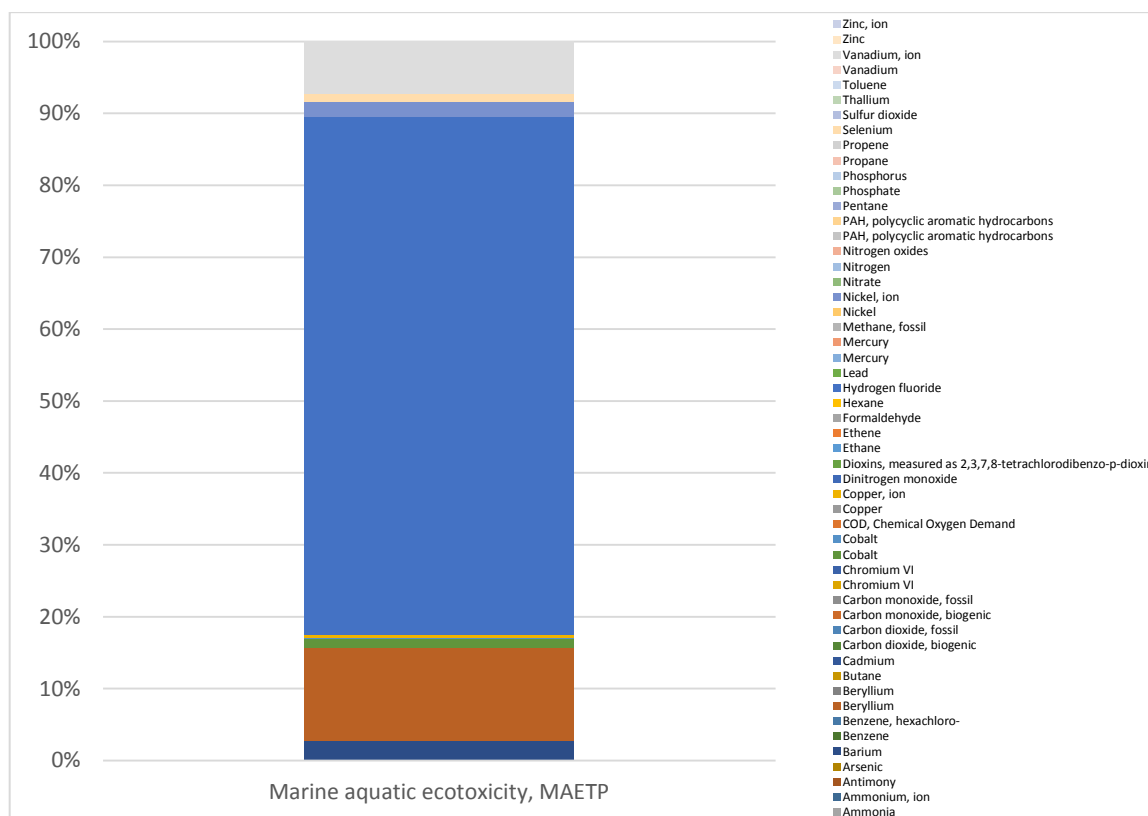
Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)



Σχήμα 26. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 1B

Ο δείκτης οικοτοξικότητας του γλυκού νερού λαμβάνει πολύ χαμηλή τιμή συνολικά ($2,37 \cdot 10^{-13}$ kg 1,4-dichlorobenzene), ενώ επηρεάζεται από ένα σύνολο χημικών στοιχείων. Παρόλα αυτά οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες καθορίζουν την τελική τιμή του δείκτη κατά σχεδόν 100%. Σχεδόν μηδενική συμμετοχή στη διαμόρφωση του δείκτη έχουν τα στοιχεία βάριο, βηρύλλιο, κοβάλτιο, τα ιόντα χαλκού, ιόντα νικελίου και τα ιόντα βαναδίου.

Θαλάσσια οικολογική (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)



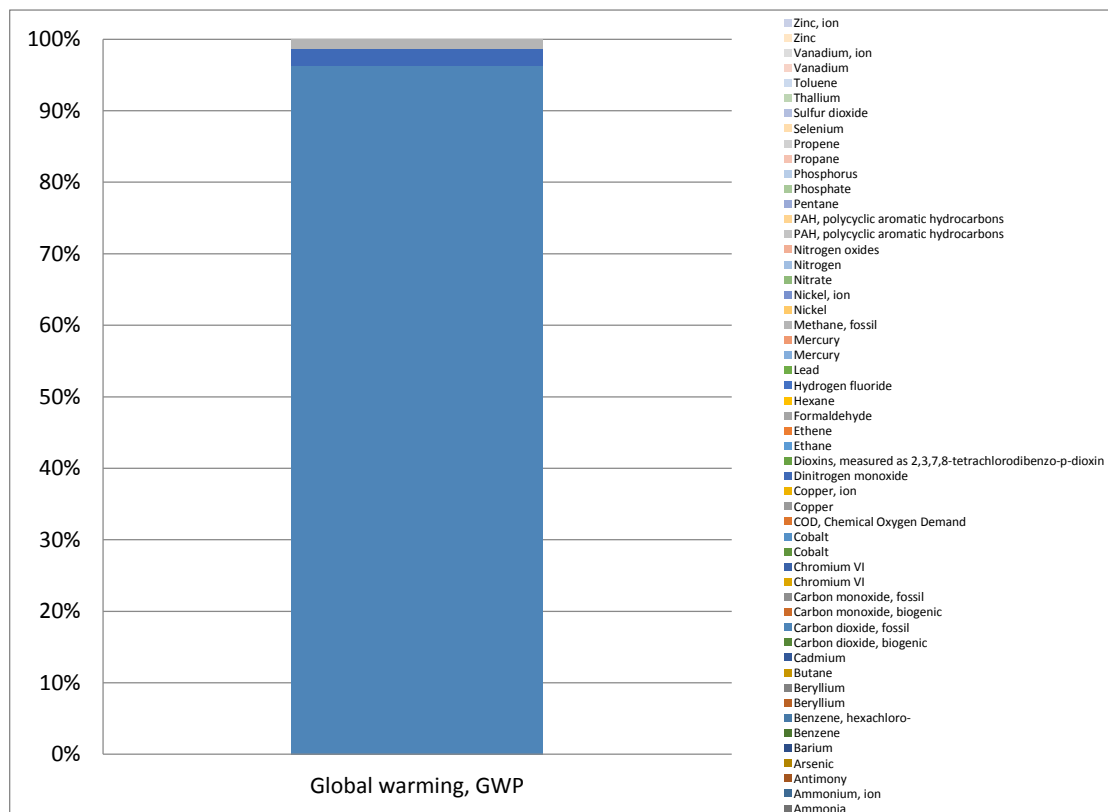
Σχήμα 27. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικολογικότητας, Στάδιο 1B

Ο δείκτης θαλάσσιας οικολογικότητας λαμβάνει την υψηλότερη τιμή, με διαφορά από τους υπόλοιπους, για το στάδιο 1B. Η τιμή του δείκτη ανέρχεται σε 0,155 ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Το στοιχείο που επιδρά σε μεγάλο βαθμό στη διαμόρφωση της συγκεκριμένης τιμής του δείκτη είναι το υδροφθόριο (72%). Σχετικά μεγάλη επιρροή στην τιμή του δείκτη έχουν επίσης το βηρύλλιο (12,8%) και τα ιόντα βαναδίου (7,3%). Μικρό ποσοστό συμμετοχής στη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη έχουν τα στοιχεία: βάριο (2,8%), ιόντα νικελίου (2%), κοβάλτιο (1,3%), σελήνιο (1,1%) και ιόντα χαλκού (0,4%).

Στάδιο 2. Μεταφορά ανεμογεννητριών

Η μεταφορά των ανεμογεννητριών από το εργοστάσιο παραγωγής τους στη Δανία έως το λιμάνι της Χαλκίδας, με ενδιάμεσο σταθμό μεταφόρτωσης το λιμάνι του Ασπροπύργου αφορά αποστάσεις που καλύφθηκαν με πλοία. Το υπόλοιπο τμήμα αφορά χερσαίες μεταφορές με φορτηγά οχήματα. Το συγκεκριμένο στάδιο καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος των μεταφορών που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου, παρόλα αυτά, για λόγους πληρότητας, στους παρακάτω υπολογισμούς ενσωματώνονται και παρουσιάζονται συνολικά και οι ρύποι που προκύπτουν από το σύνολο των μεταφορών των έτερων σταδίων.

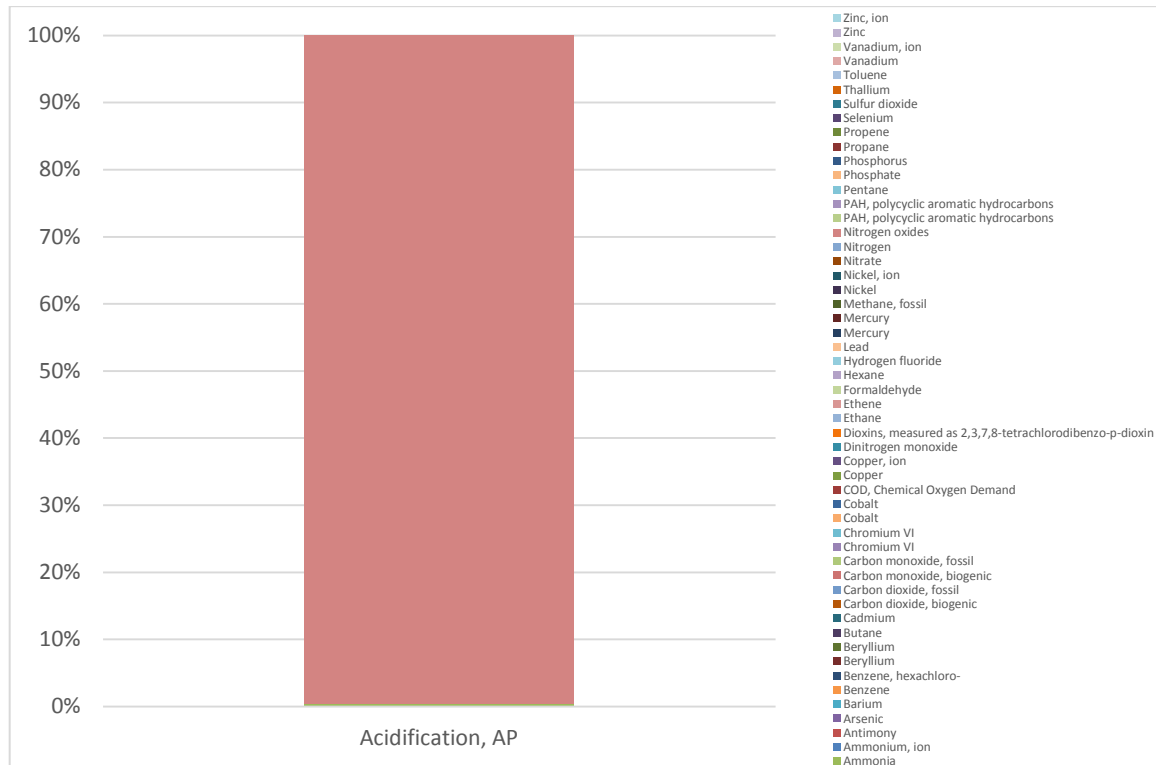
Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)



Σχήμα 28. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 2

Ο δείκτης για την παγκόσμια υπερθέρμανση στο στάδιο αυτό λαμβάνει τιμή $0,44 \cdot 10^{-3}$ ισοδύναμων kg CO₂, που οφείλεται στις εκπομπές των μέσων μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες αποστάσεις αφορούν στη θαλάσσια μεταφορά από το εργοστάσιο της κατασκευάστριας εταιρείας στην περιοχή Ααρους (Aarhus) της Δανίας μέχρι το λιμάνι του Ασπροπύργου και στη συνέχεια μέχρι το λιμάνι της Χαλκίδας. Από το σημείο εκείνο, τα τμήματα των ανεμογεννητριών οδηγήθηκαν με φορτηγά οχήματα ως την περιοχή χωροθέτησης του πάρκου. Όπως είναι αναμενόμενο, τη μεγαλύτερη συμβολή στο δείκτη έχει το διοξείδιο του άνθρακα που αποδίδει περίπου το 96% των εκπομπών, ακολουθούμενο από μικρές εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου (2,4%) και μεθανίου (1,4%).

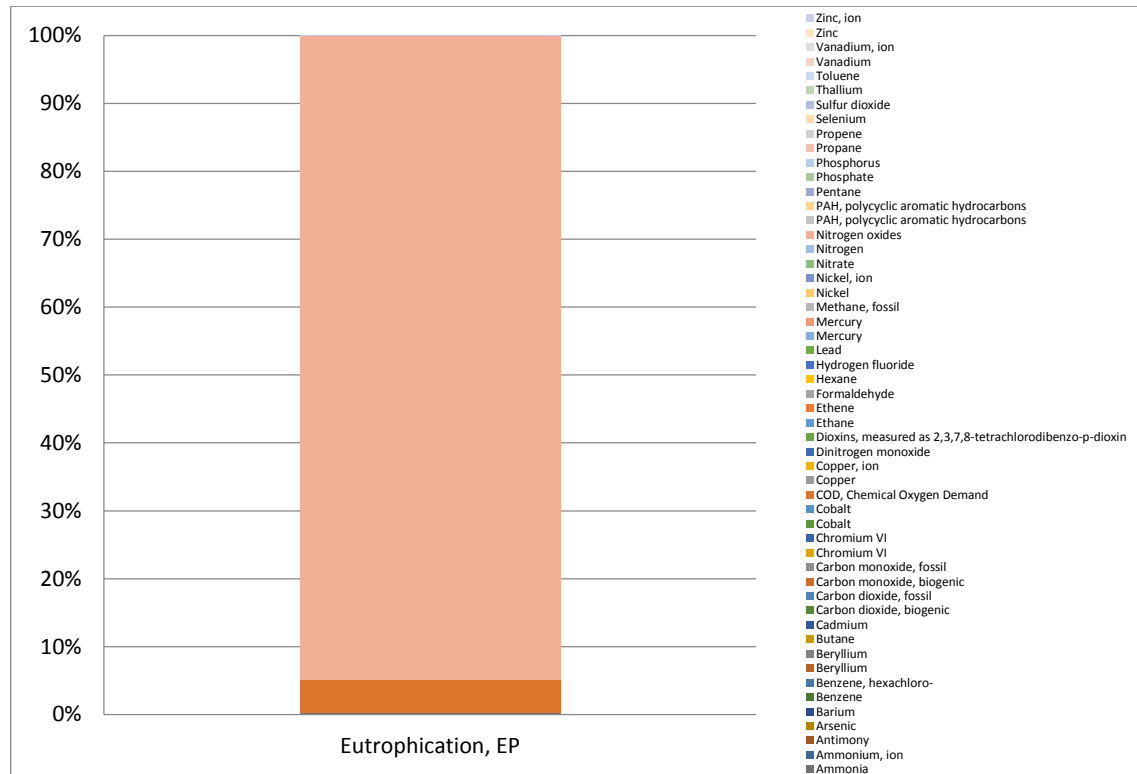
Οξίνιση (Acidification, AP)



Σχήμα 29. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 2

Ο δείκτης για το φαινόμενο της οξίνισης στο Στάδιο 2 λαμβάνει τιμή $3 \cdot 10^{-6}$ ισοδύναμων kg SO₂ που οφείλεται κατά βάση στην παρουσία οξειδίων του αζώτου (99,6%) και σε πολύ μικρότερο βαθμό στην παρουσία αμμωνίας (0,4%).

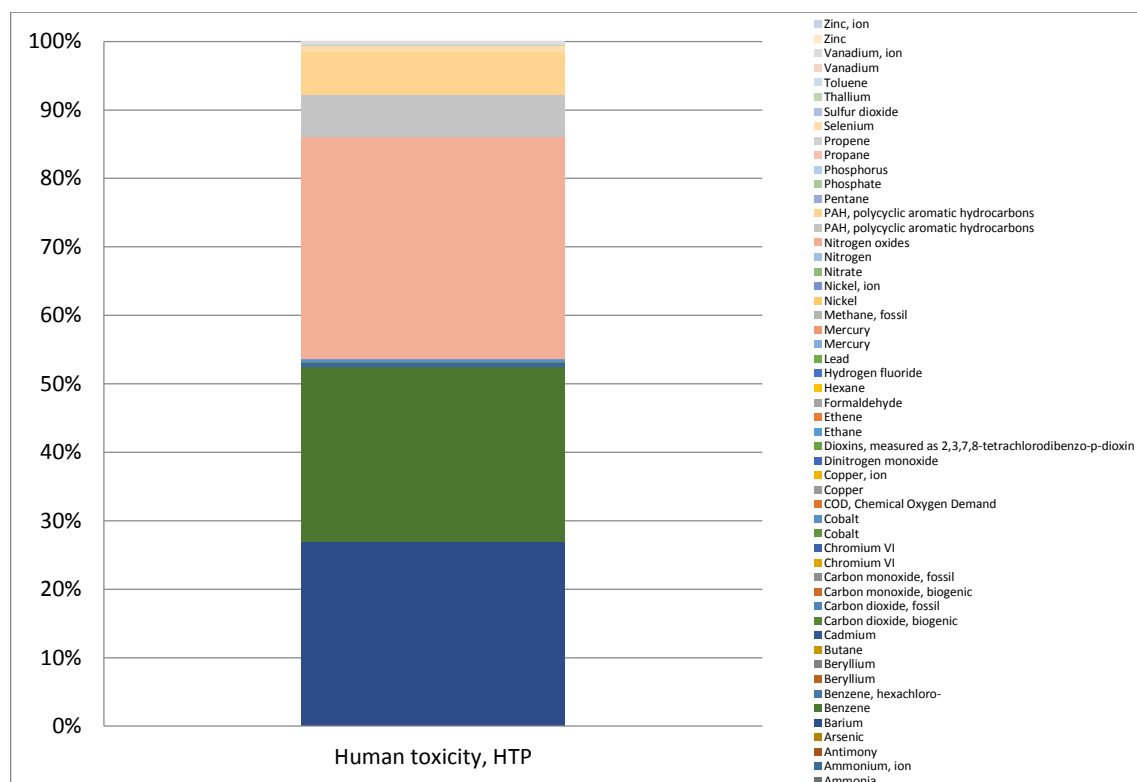
Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)



Σχήμα 30. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 2

Κατά το στάδιο της μεταφοράς των ανεμογεννητριών ο δείκτης ευτροφισμού λαμβάνει τιμή $0,82 \cdot 10^{-6}$ ισοδύναμων kg PO_4 . Εδώ, τη μεγαλύτερη συμβολή έχουν κυρίως τα οξείδια αζώτου (94,8%) και σε μικρότερο βαθμό το COD.

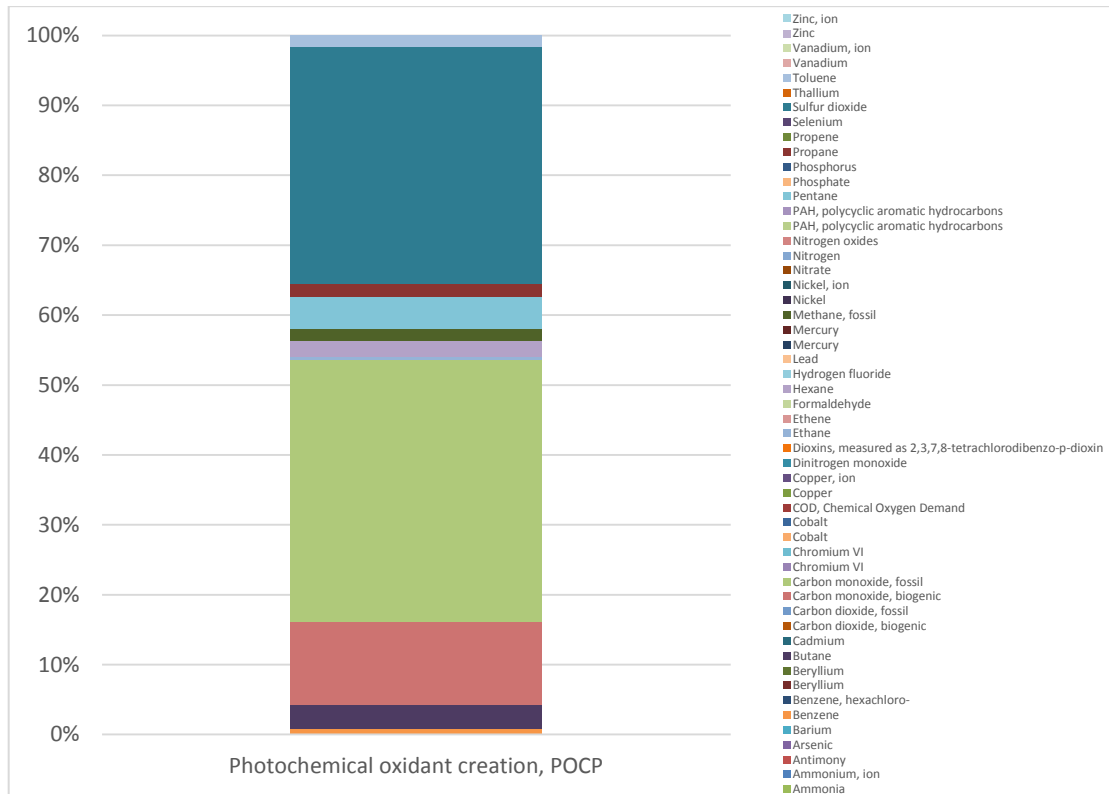
Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)



Σχήμα 31. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 2

Ο δείκτης ανθρώπινης τοξικότητας στο Στάδιο 2 υπολογίστηκε ίσος με $22,2 \cdot 10^{-6}$ ισοδύναμα kg 1,4-dichlorobenzene. Η τιμή του δείκτη καθορίζεται από την ύπαρξη οξειδίων του αζώτου (32,4%), βαρίου (26,8%) και βενζολίου (25,6%). Σε μικρότερο βαθμό στη διαμόρφωση του δείκτη συμβάλλουν οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, είτε προς το αέρα, είτε προς το νερό. Ήσσονος σημασίας είναι η παρουσία στοιχείων όπως το σελήνιο (0,9%), το εξασθενές χρώμιο (0,6%), τα ιόντα βαναδίου (0,5%), το κοβάλτιο (0,4%), το θάλλιο (0,2%) και το αντιμόνιο (0,1%).

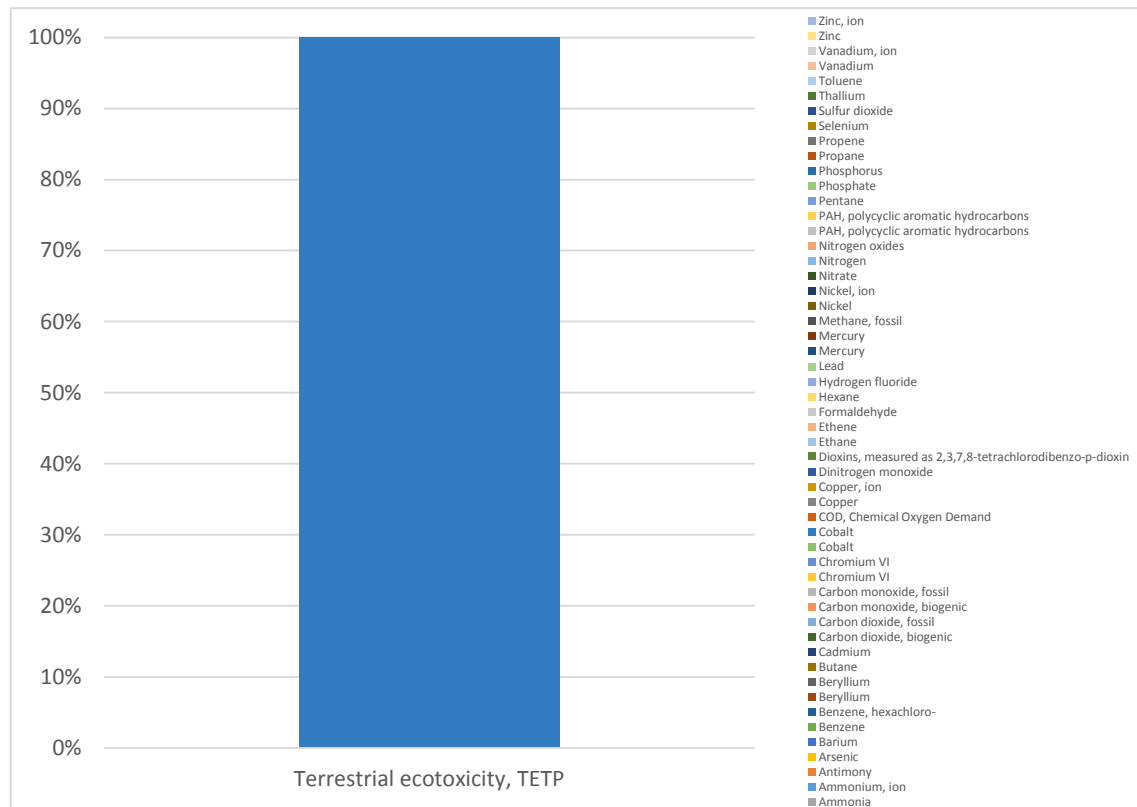
Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)



Σχήμα 32. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 2

Ο δείκτης φωτοχημικής οξείδωσης ανέρχεται σε $78,9 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμων kg αιθυλενίου, που προκύπτει κυρίως από την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα (37,5%) και του διοξειδίου του θείου (33,9%). Αρκετά μεγάλη συμμετοχή στη διαμόρφωση του δείκτη έχει επίσης το βιογενές διοξείδιο του άνθρακα (11,8%), ενώ υπάρχουν και μία σειρά άλλων χημικών στοιχείων με μικρότερη συμβολή όπως το πεντάνιο (4,7%), το βουτάνιο (3,4%), το εξάνιο (2,3%), το προπάνιο (1,7%), το μεθάνιο (1,7%) και η τολουΐνη (1,6%). Τέλος, εμφανίζονται τρία χημικά στοιχεία με μικρή βαρύτητα στη διαμόρφωση του συγκεκριμένου δείκτη, αυτά είναι: το αιθάνιο, τα φορμαλδευγή και το βενζόλιο.

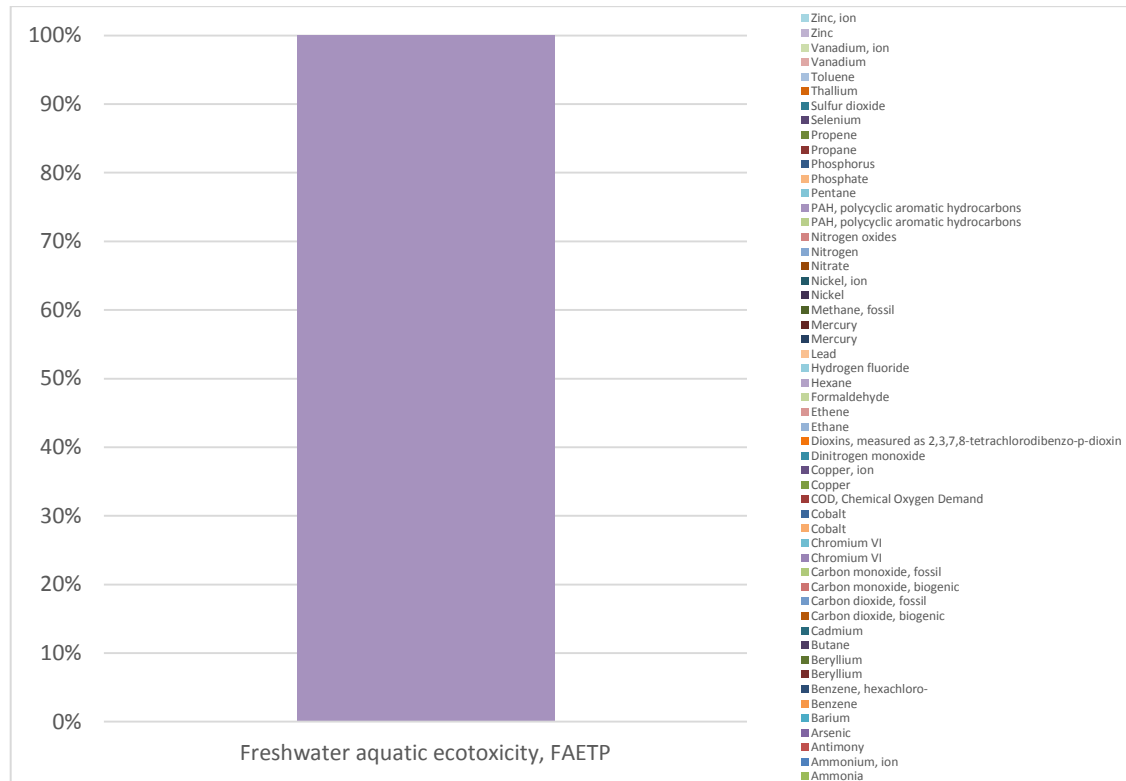
Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)



Σχήμα 33. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 2

Σε ότι αφορά στην εδαφική οικοτοξικότητα, όπως και στα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής της εγκατάστασης, εκείνη επηρεάζεται κατ' αποκλειστικότητα από την παρουσία του κοβαλτίου και ανέρχεται συνολικά σε $0,574 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene.

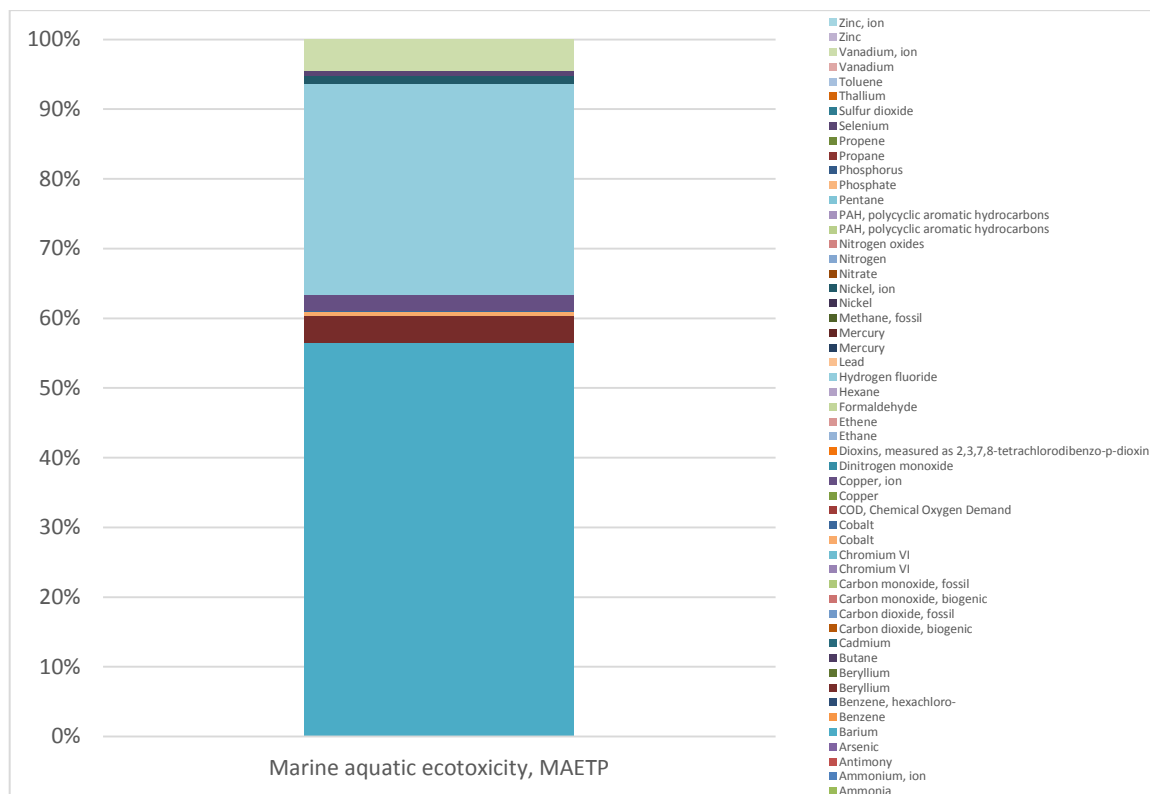
Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)



Σχήμα 34. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 2

Ο δείκτης οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, όπως και στα υπόλοιπα στάδια, επηρεάζεται κατά απόλυτο τρόπο από την ύπαρξη των PAHs. Η συνολική τιμή που λαμβάνει ο δείκτης πάντως είναι σχετικά μικρή και υπολογίστηκε σε $0,569 \cdot 10^{-11}$ ισοδύναμων κιλών 1,4-dichlorobenzene.

Θαλάσσια οικολογική (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)



Σχήμα 35. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικολογικότητας, Στάδιο 2

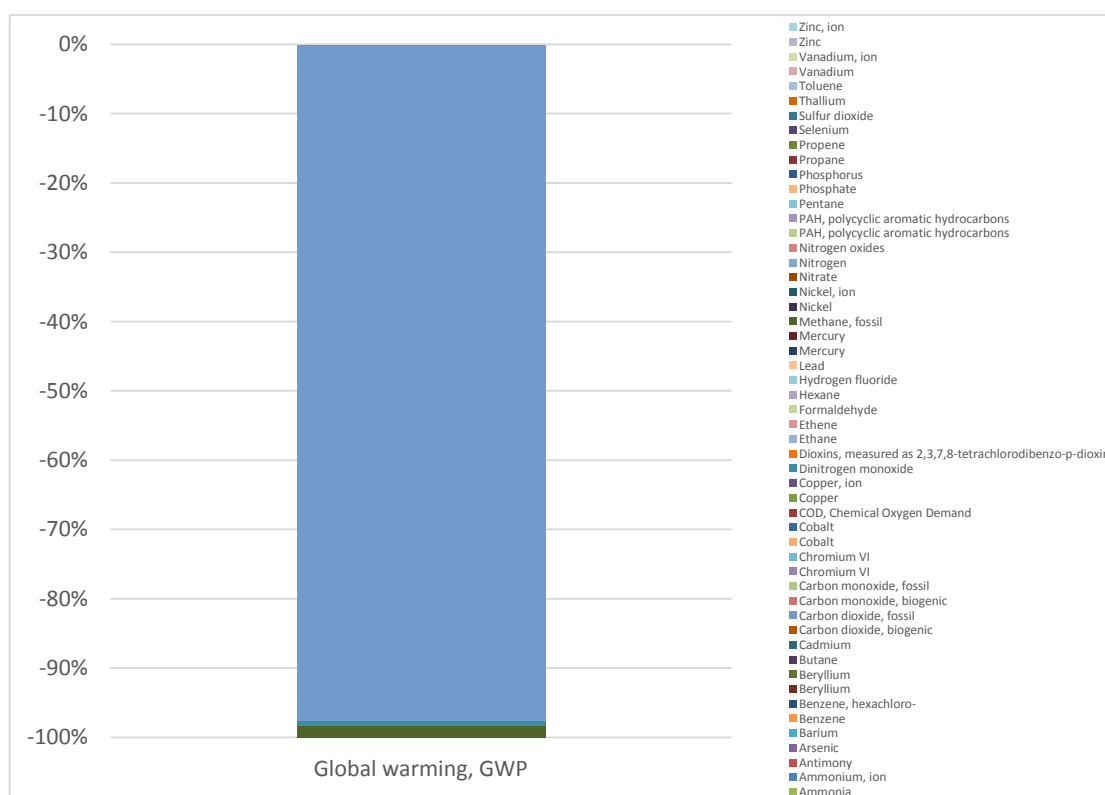
Ο δείκτης θαλάσσιας οικολογικότητας και σε αυτό το στάδιο λαμβάνει υψηλή τιμή (0,014 ισοδύναμων κιλών 1,4-dichlorobenzene), κάτι που σε μεγάλο βαθμό αποδίδεται στη χρήση θαλασσίων μέσω μεταφοράς, τόσο από το εργοστάσιο κατασκευής των ανεμογεννητριών, όσο και από το λιμάνι του Ασπροπύργου προς το λιμάνι της Χαλκίδας. Η ρύποι που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της τιμής αυτού του δείκτη, κατά φθίνουσα σειρά σημασίας είναι: το βάριο (56,5%), το υδροφθόριο (30,3%), το βηρύλλιο (3,9%), τα ιόντα βαναδίου (4,6%), τα ιόντα χαλκού (2,2%), τα ιόντα νικελίου (1,2%), το σελήνιο (0,6%), και το κοβάλτιο είτε σε αέρια είτε σε υγρή μορφή.

Στάδιο 3. Λειτουργία των ανεμογεννητριών

Το στάδιο της λειτουργίας των ανεμογεννητριών περιλαμβάνει τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που καταλήγει στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο, και όλες τις απαραίτητες ενέργειες συντήρησης των ανεμογεννητριών. Υπεύθυνος για την πραγματοποίηση των απαραίτητων ελέγχων και συντηρήσεων είναι ο φορέας του έργου, ο οποίος παρείχε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σχετικά με την παραγωγή ενέργειας, οι ρύποι που υπολογίστηκαν σε αυτό το Στάδιο, προέκυψαν από τον υπολογισμό των ρύπων που θα αντιστοιχούσαν στο ίδιο ποσό παραγόμενης ενέργειας, αν παραγόταν από το Ελληνικό ενεργειακό σύστημα παραγωγής. Ως εκ τούτου, οι ποσότητες των ρύπων λαμβάνουν αρνητικό πρόσημο, καθώς μέσω της λειτουργίας των ανεμογεννητριών οι ρύποι δεν εκλύονται τελικά στο περιβάλλον.

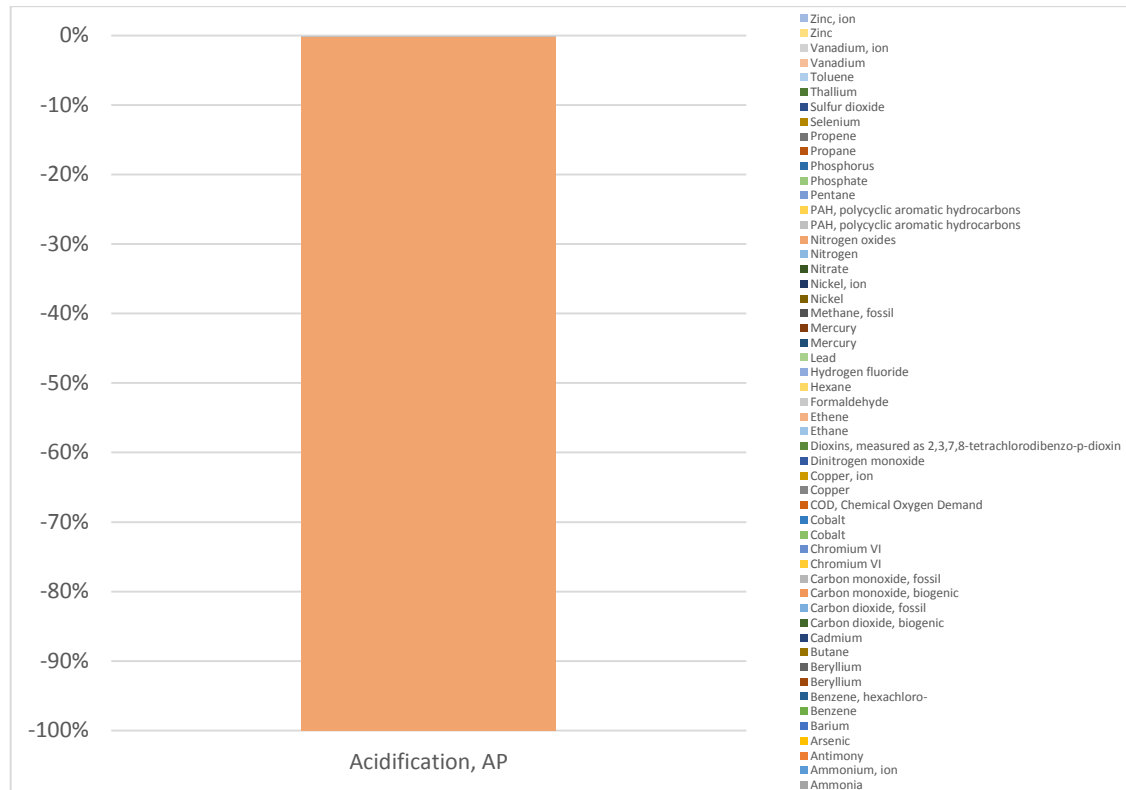
Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)



Σχήμα 36. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 3

Ο δείκτης της παγκόσμιας υπερθέρμανσης για το στάδιο λειτουργίας της ανεμογεννητριάς παρουσιάζει συνολικά αρνητική τιμή ίση με $-1,020 \text{ kg CO}_2$. Το αρνητικό πρόσημο του δείκτη καταδεικνύει τα οφέλη από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία αντισταθμίζουν πλήρως και υπερβαίνουν τους ρύπους που παράγονται σε αυτό το στάδιο του κύκλου ζωής της εγκατάστασης. Σημαντικό στοιχείο είναι επίσης ότι το θετικό πρόσημο για το περιβάλλον διατηρείται για όλες τις εκπομπές αερίων που επηρεάζουν το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης. Η μεγαλύτερη συνιστώσα στο συγκεκριμένο δείκτη και πάλι αφορά στο διοξείδιο του άνθρακα που εκφράζει το 97,5% της τελικής τιμής του δείκτη. Μικρή συνεισφορά στο δείκτη έχουν αέρια όπως το μεθάνιο (1,7%), το μονοξείδιο του αζώτου (0,6%) και το βιογενές διοξείδιο του άνθρακα (0,2%).

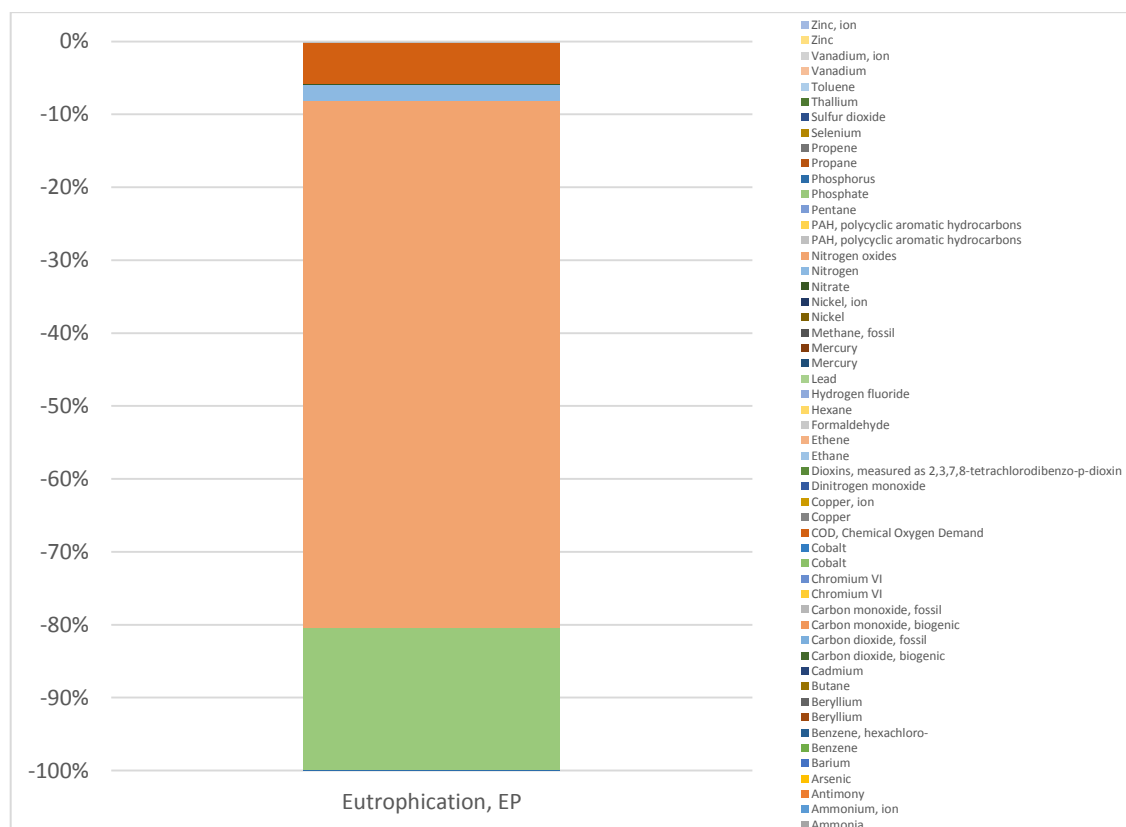
Οξίνιση (Acidification, AP)



Σχήμα 37. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 3

Όπως και στην περίπτωση του δείκτη της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, έτσι και ο δείκτης οξίνισης παρουσιάζει αρνητική τιμή. Αυτό σημαίνει ότι οι επιπτώσεις για το περιβάλλον σε ότι αφορά και σε αυτόν το δείκτη είναι θετικές. Πιο συγκεκριμένα, η συνολική τιμή του δείκτη ανέρχεται σε $-0,58 \cdot 10^{-3} \text{ kg SO}_2$. Το δείκτη διαμορφώνουν κατά 99,7% τα οξείδια του αζώτου, ενώ μικρή επιρροή έχει η αμμωνία.

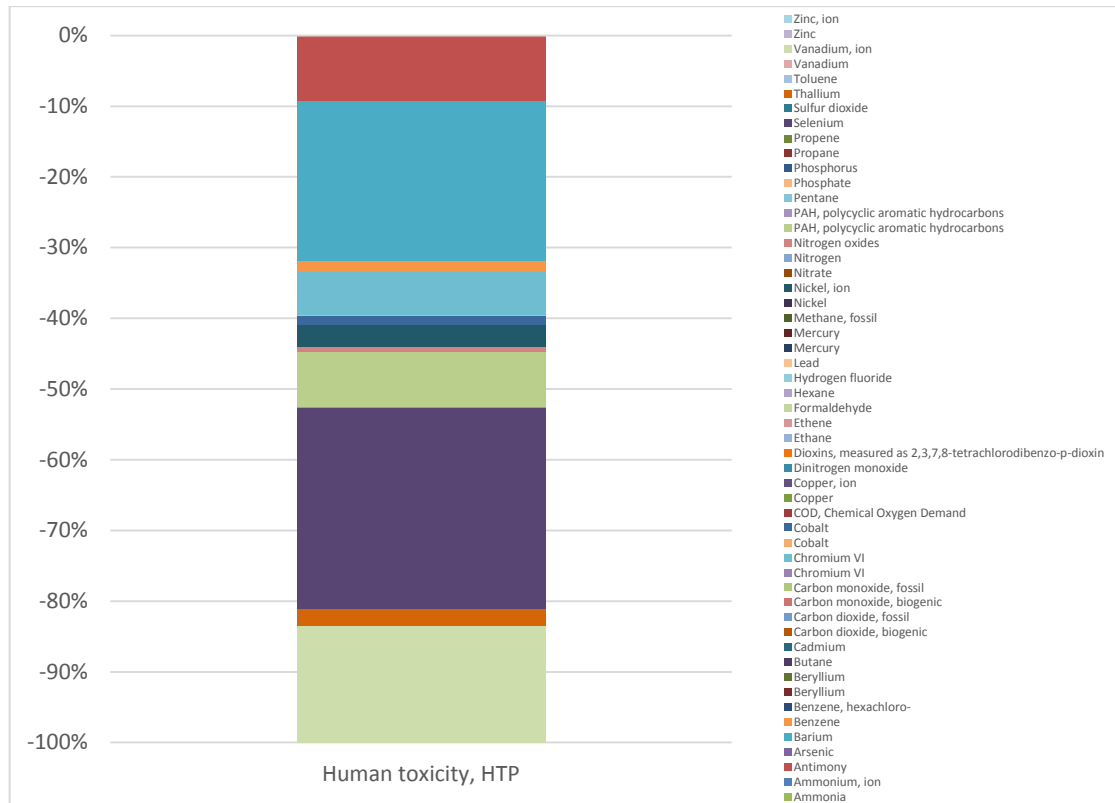
Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)



Σχήμα 38. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 3

Η συνολική συμβολή του Σταδίου 3 στο φαινόμενο του ευτροφισμού είναι επίσης αρνητική, με το δείκτη να λαμβάνει την τιμή $-0,21 \cdot 10^{-3} \text{ kg PO}_4$. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι σε όλα τα χημικά στοιχεία που επηρεάζουν τον ευτροφισμό οι τιμές είναι αρνητικές, κάτι που σημαίνει ότι τα οφέλη από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου ξεπερνούν τις όποιες αρνητικές επιδράσεις. Τα στοιχεία που έχουν μεγάλη συμβολή στη διαμόρφωση του συγκεκριμένου δείκτη είναι τα οξείδια του αζώτου (72%) και το φωσφορικό άλας (19,5%). Μικρότερη συμβολή έχουν το COD (5,7%), το άζωτο (2,3%), αμμωνία (0,2%) και ο φώσφορος (0,1%).

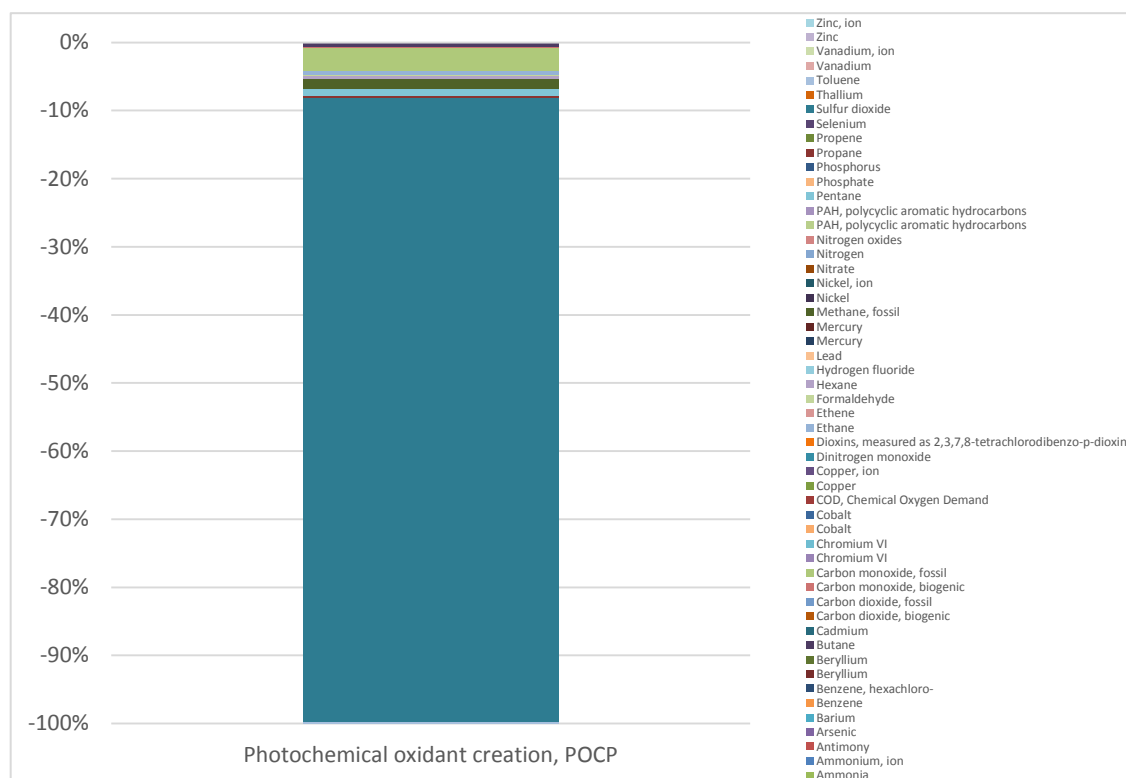
Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)



Σχήμα 39. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 3

Κατά αντιστοιχία, ο δείκτης της ανθρώπινης τοξικότητας λαμβάνει αρνητική τιμή -0,211 ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Στη διαμόρφωση του συγκεκριμένου δείκτη για το Στάδιο 3 μεγάλη συνεισφορά έχουν τα εξής στοιχεία: το σελήνιο (28,4%), το βάριο (22,7%) και τα ιόντα βαναδίου (16,6%). Μεσαία συνεισφορά έχουν τα στοιχεία αντιμόνιο (9,3%), οι PAH (7,7%), το εξασθενές χρώμιο (6%) και τα ιόντα νικελίου (3,2%). Μικρή επίδραση στην τελική τιμή του δείκτη έχουν οι εξής ουσίες: το θάλλιο (2,3%), το βενζόλιο (1,5%), το κοβάλτιο (1,2%), τα οξείδια του αζώτου (0,7%) και το κοβάλτιο (0,2%).

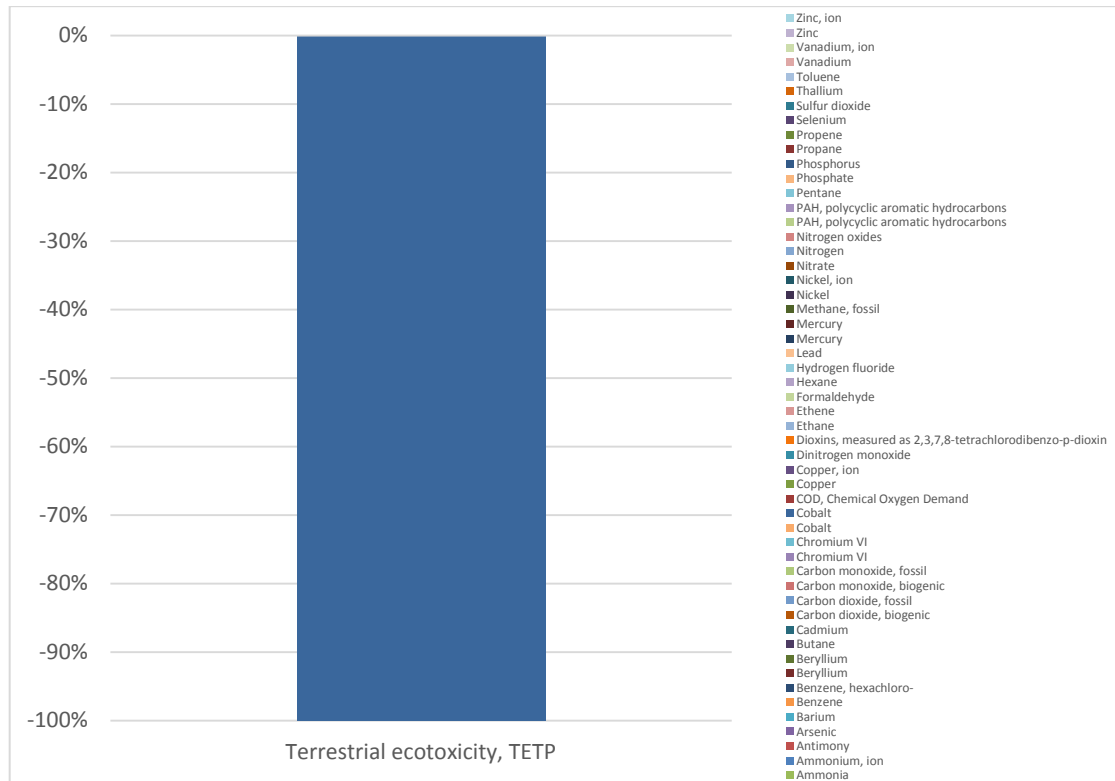
Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)



Σχήμα 40. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 3

Η συνολική επίδραση του Σταδίου 3 στη φωτοχημική οξείδωση είναι επίσης αρνητική, με το δείκτη να λαμβάνει τιμή ίση με $-0,25 \cdot 10^{-3}$ ισοδύναμα kg αιθυλενίου. Άξιο αναφοράς είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος του δείκτη επηρεάζεται από την τιμή του διοξειδίου του θείου. Μικρή συνεισφορά στο δείκτη έχουν στοιχεία όπως το διοξείδιο του άνθρακα (3,4%), το μεθάνιο (1,5%), το πεντάνιο (0,9%), το βουτάνιο (0,6%) και το αιθάνιο (0,5%).

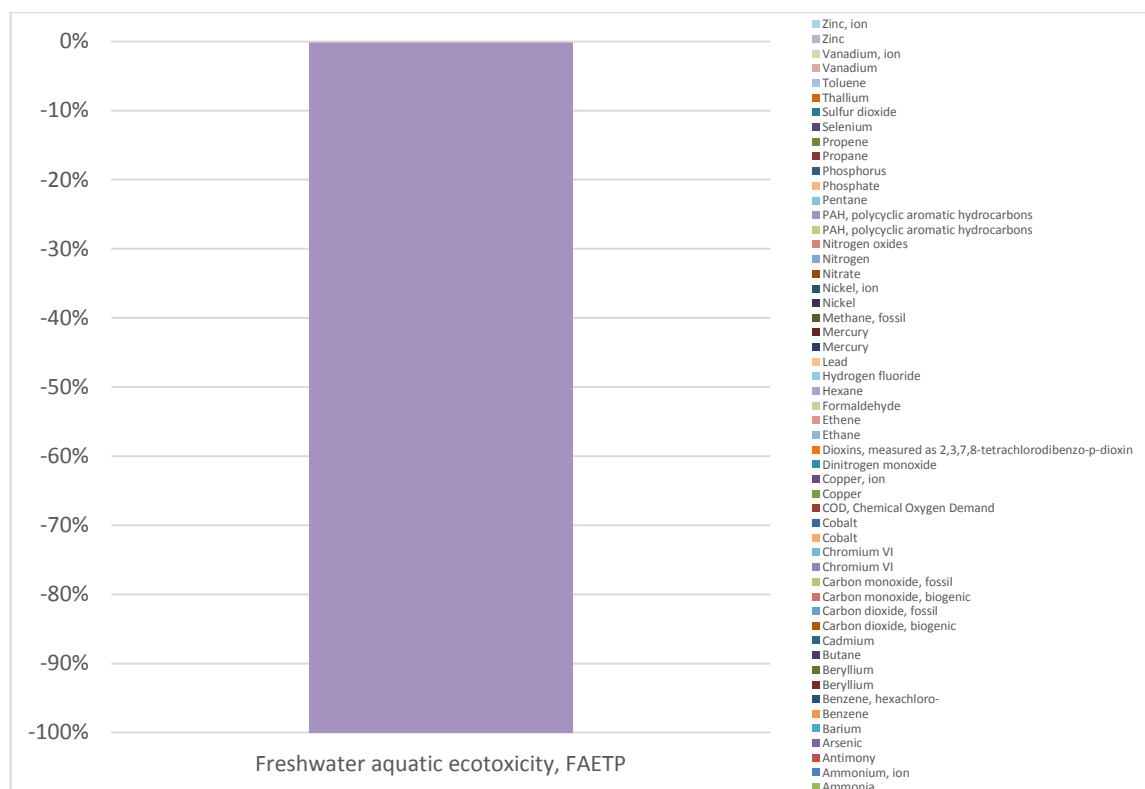
Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)



Σχήμα 41. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 3

Η λειτουργία του αιολικού πάρκου (Στάδιο 3) έχει επίσης αρνητική επίδραση για την εδαφική οικοτοξικότητα και επομένως θετική επίδραση για το περιβάλλον. Ο δείκτης εδαφικής οικοτοξικότητας έχει τιμή $16,5 \cdot 10^{-6}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene, η οποία προκύπτει από την τιμή των εκπομπών κοβαλτίου.

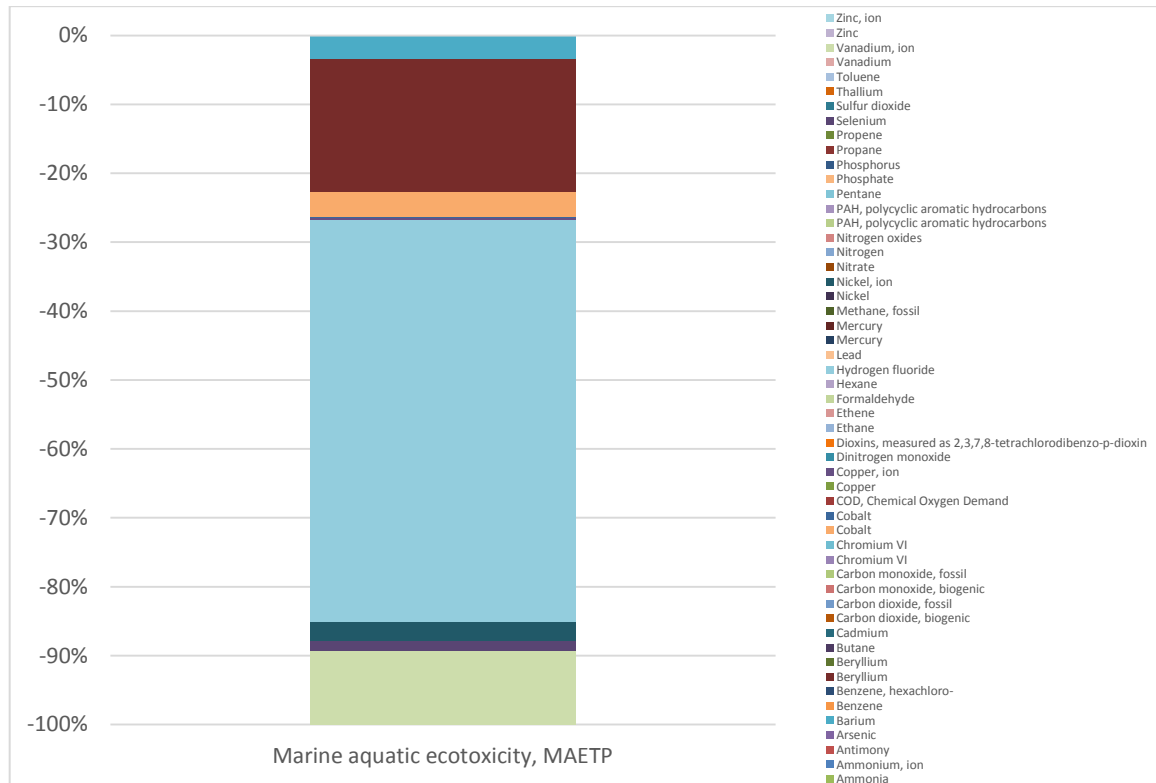
Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)



Σχήμα 42. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 3

Το Στάδιο 3 του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου στην Εύβοια έχει θετικές επιπτώσεις και στο δείκτη της οικοτοξικότητας του γλυκού νερού που λαμβάνει τιμή $-1,6 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απόρροια κυρίως των εκπομπών των PAHs. Ήσσονος σημασίας για το τελικό αποτέλεσμα του δείκτη θεωρείται η μείωση που καταγράφεται και σε μία σειρά άλλων ουσιών (π.χ. κοβάλτιο, ιόντα νικελίου και χαλκού, βηρύλλιο), που επηρεάζουν ελάχιστα το τελικό αποτέλεσμα.

Θαλάσσια οικολογική (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)



Σχήμα 43. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικολογικότητας, Στάδιο 3

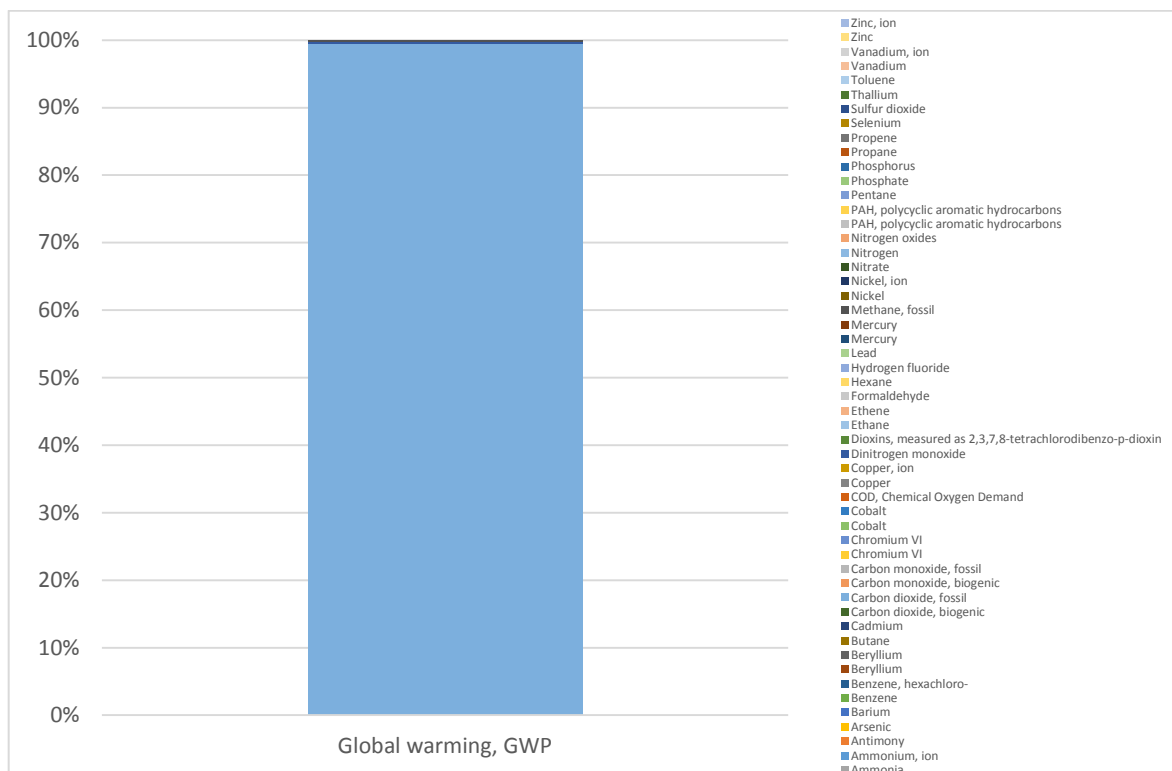
Ο δείκτης για τη θαλάσσια οικολογικότητα είναι εκείνος που εμφάνιζε τις μεγαλύτερες τιμές στα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής του έργου. Στο Στάδιο της λειτουργίας όμως, ο συγκεκριμένος δείκτης λαμβάνει υψηλή αρνητική τιμή, κάτι που σημαίνει ότι συντελείται θετική επίδραση προς το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης εμφανίζει τιμή -1.897,6 ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene, που οφείλεται πρωτίστως στη μείωση της εκπομπής υδροφθορίου στον αέρα. Σημαντικό αντίκτυπο στο δείκτη έχουν επίσης το βηρύλλιο και τα ιόντα βαναδίου. Μικρότερη συμμετοχή στη διαμόρφωση της τελικής τιμής του συγκεκριμένου δείκτη έχουν στοιχεία όπως το κοβάλτιο (3,7%), τα ιόντα νικελίου (2,7%) και το σελήνιο (1,4%).

Στάδιο 4. Τέλος της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών

Στο συγκεκριμένο στάδιο του κύκλου ζωής του έργου και δεδομένου πως το εξεταζόμενο πάρκο βρίσκεται ακόμα εν λειτουργία, η ανάπτυξη του σεναρίου για διαχείριση των ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους, ακολούθησε τα προτεινόμενα σενάρια ανακύκλωσης/επαναχρησιμοποίησης και ταφής των υλικών που προβλέπονται στη διεθνή βιβλιογραφία, όπως έχουν ενσωματωθεί στα αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα και βάσεις δεδομένων για την εκπόνηση της μελέτης.

Έτσι, μετά τη αποσυναρμολόγηση των ανεμογεννητριών, θεωρήθηκε πως το μεγαλύτερο μέρος τους οδηγείται προς ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση. Το ποσοστό των υλικών που δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθούν, αποτελεί απορρίμματα και οδηγείται με κατάλληλα φορτηγά οχήματα, σε κατάλληλους χώρους ταφής απορριμμάτων.

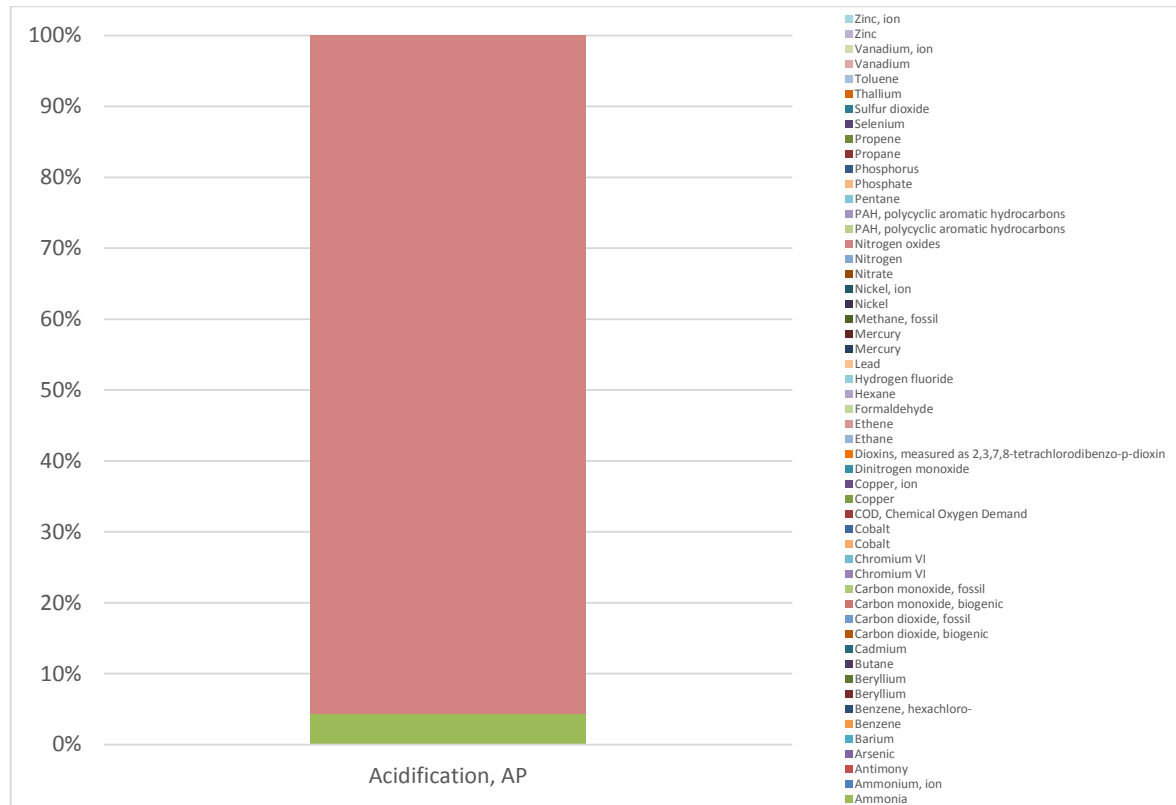
Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)



Σχήμα 44. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης, Στάδιο 4

Στο στάδιο του τέλους της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών παρατηρείται μικρή τιμή στο δείκτη της παγκόσμιας υπερθέρμανσης. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν ο δείκτης ανέρχεται σε $2,67 \cdot 10^{-4}$ kg CO₂. Η τιμή αυτή προκύπτει από την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα κατά 99,3% και σε μικρότερο ποσοστό από εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου (0,3%) και μεθανίου (0,3%). Είναι εύκολα αντιληπτό, ότι η περιβαλλοντική επιβάρυνση λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου στο συγκεκριμένο στάδιο, αποτελεί κυρίως απόρροια της μεταφοράς των υλικών προς ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση, αλλά και εκπομπών από την αποσύνθεση του οργανικού κλάσματος των ανεμογεννητριών, που αφορά κυρίως στα πτερύγια τους.

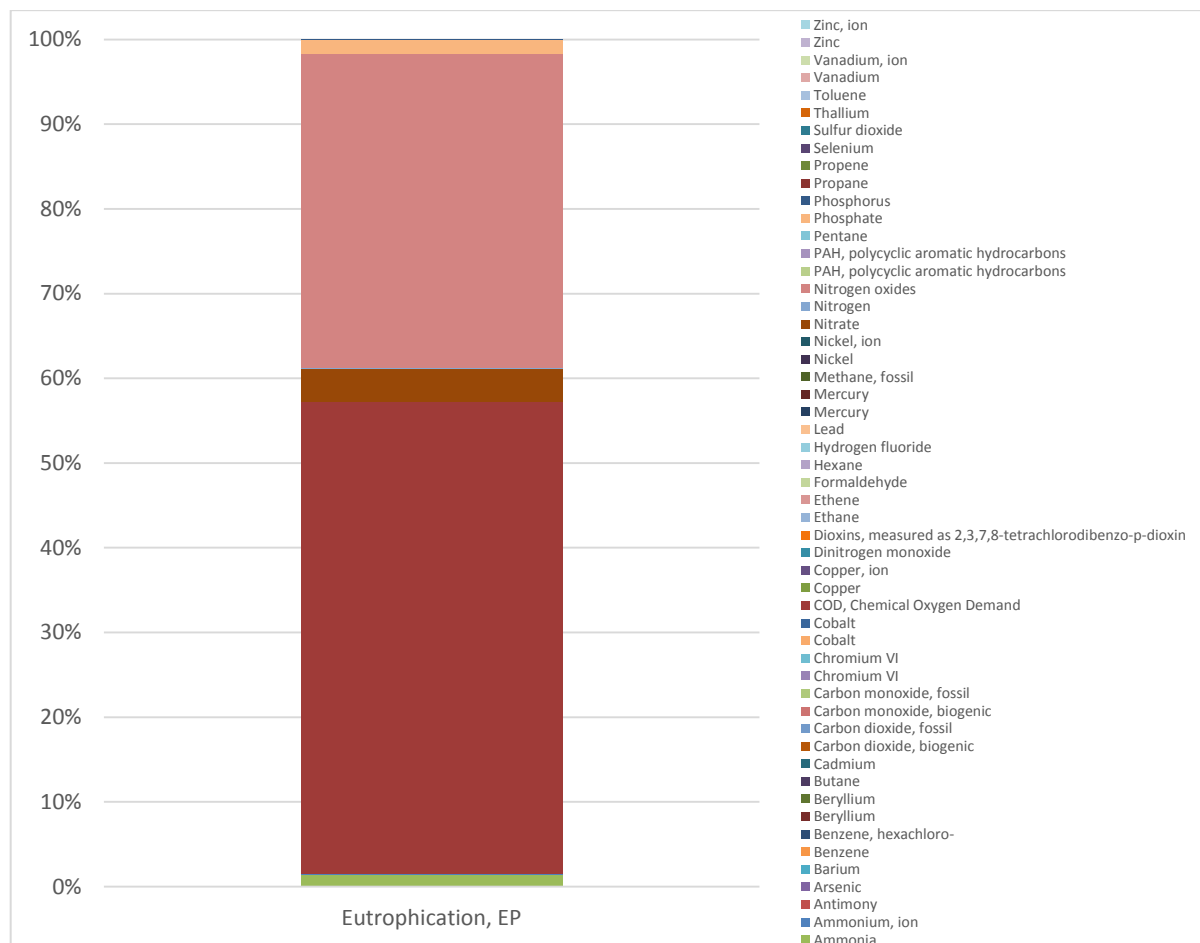
Οξίνιση (Acidification, AP)



Σχήμα 45. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οξίνισης, Στάδιο 4

Ο δείκτης της οξίνισης λαμβάνει τιμή $0,1 \cdot 10^{-6}$ kg SO₂ και οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό από οξείδια του αζώτου, τα οποία συνεισφέρουν κατά 95,7% στην τελική τιμή του δείκτη. Ένα άλλο στοιχείο που έχει επίσης συμβολή στη διαμόρφωση του δείκτη αυτού είναι η αμμωνία (4,3%).

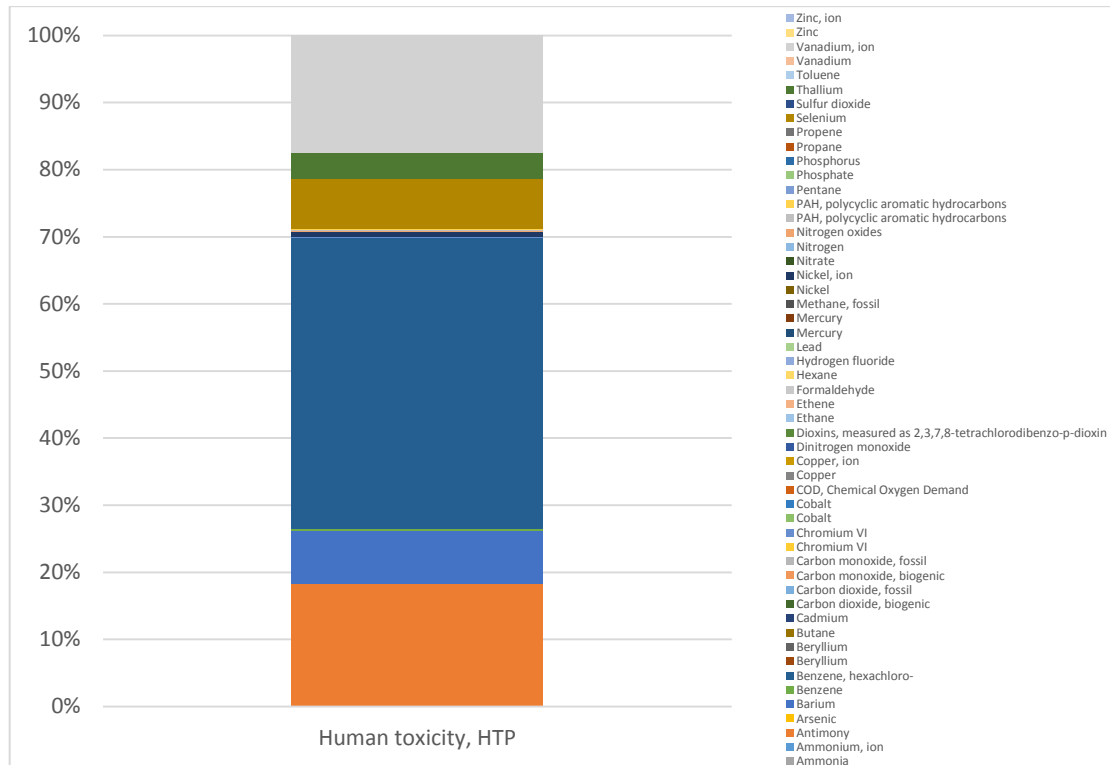
Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)



Σχήμα 46. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ευτροφισμού, Στάδιο 4

Στο τελευταίο στάδιο του κύκλου ζωής της εξεταζόμενης εγκατάστασης, ο δείκτης ευτροφισμού λαμβάνει τιμή ίση με $67,1 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμων kg PO_4 . Η συνολική τιμή του δείκτη στο στάδιο αυτό διαμορφώνεται κυρίως από δύο παράγοντες. Αρχικά από την παρουσία COD (55,7%) και δευτερευόντως από τα οξείδια του αζώτου (37,1%). Σε μικρότερο βαθμό συμβάλλουν η παρουσία νιτρικού άλατος και αζώτου, αμμωνίας, ιόντων αμμωνίου, φωσφορικού άλατος και φωσφόρου.

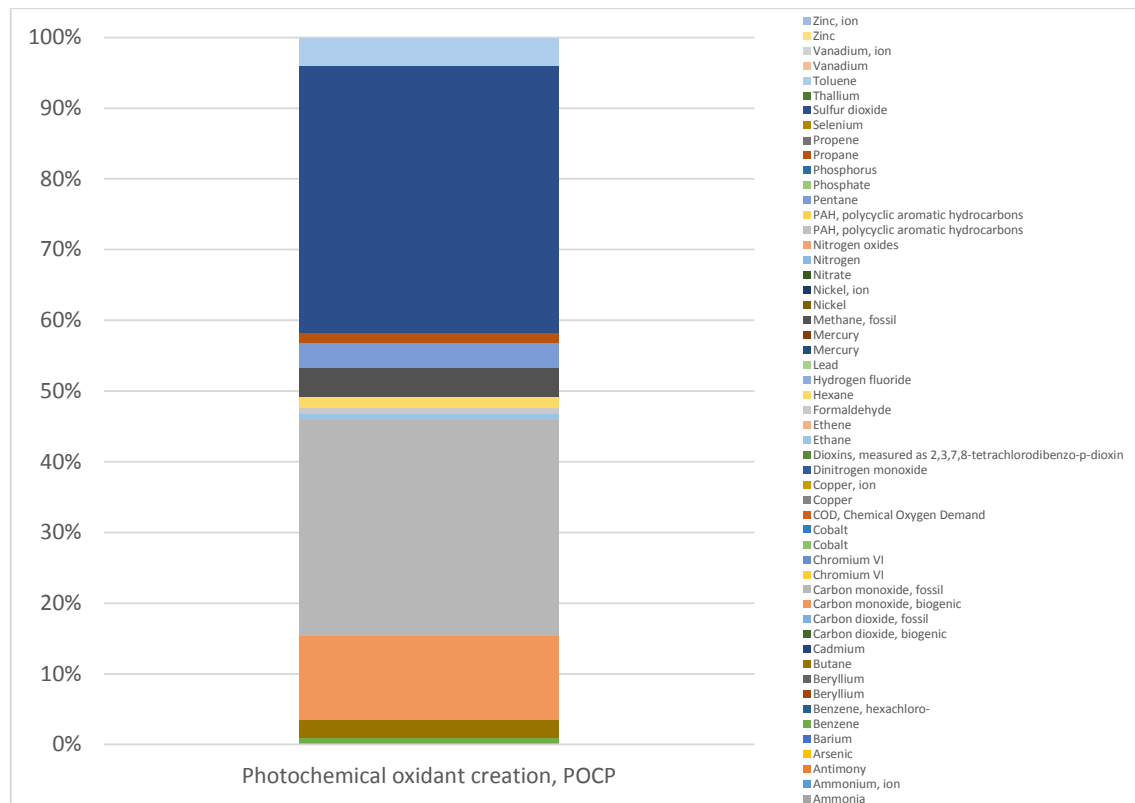
Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)



Σχήμα 47. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας, Στάδιο 4

Ο δείκτης ανθρώπινης τοξικότητας στο Στάδιο 4 λαμβάνει συνολική τιμή $0,175 \cdot 10^{-3}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Ο δείκτης διαμορφώνεται κυρίως υπό την επίδραση του εξαχλωροβενζόλιου (43,5%), του αντιμονίου (18,2%) και των ιόντων βαναδίου (17,5%). Μικρή επίπτωση έχουν στοιχεία όπως το βάριο (8%), το σελήνιο (7,4%) και το θάλλιο (3,9%). Ήσσονος σημασίας ουσίες για τη διαμόρφωση της τελικής τιμής του δείκτη έχουν το βενζόλιο, το εξασθενές χρώμιο, το κοβάλτιο, τα ιόντα νικελίου, οξείδια του αζώτου και τα PAHs.

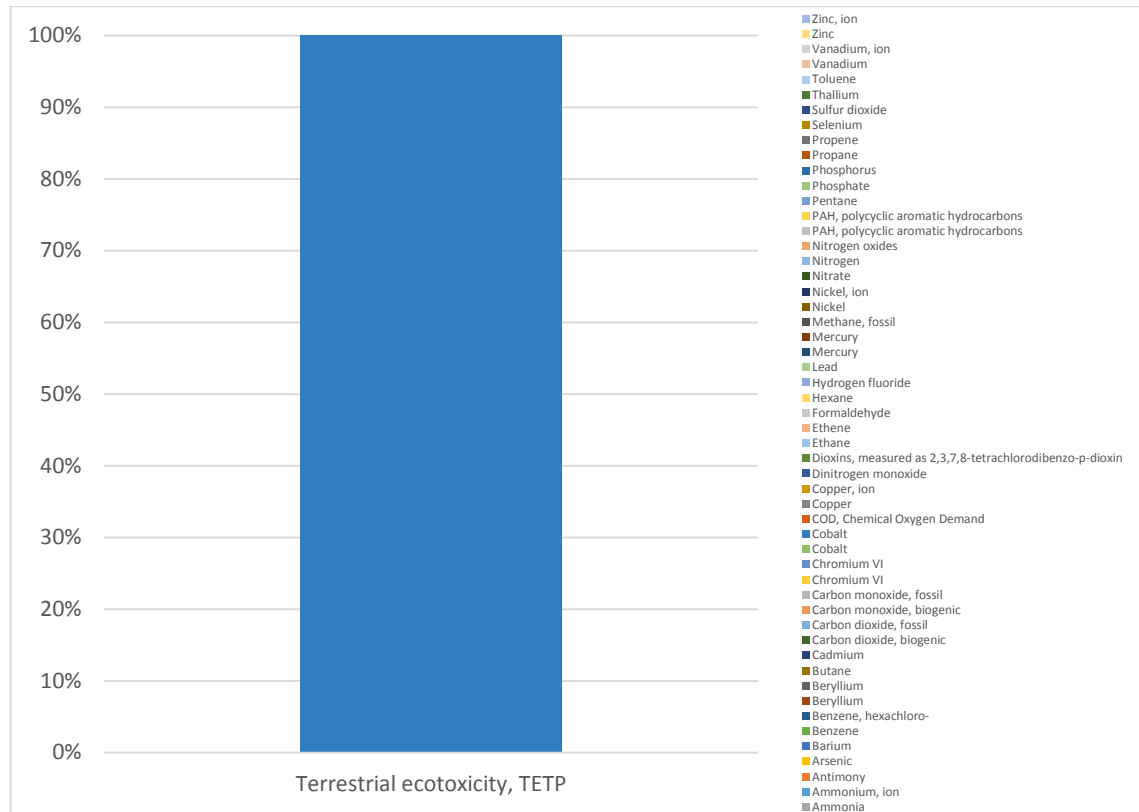
Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)



Σχήμα 48. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη φωτοχημικής οξείδωσης, Στάδιο 4

Ο δείκτης της φωτοχημικής οξείδωσης στο Στάδιο 4 λαμβάνει τιμή $4,34 \cdot 10^{-9}$ ισοδύναμων kg αιθυλενίου. Η τιμή του δείκτη καθορίζεται από δώδεκα επιμέρους ουσίες εκ των οποίων οι δύο έχουν μεγάλη επίπτωση στο τελικό αποτέλεσμα. Αναλυτικότερα, η τιμή καθορίζεται κατά 30,5% από το διοξείδιο του θείου και κατά 30,5% από το διοξείδιο του άνθρακα. Ακολουθούν το βιογενές διοξείδιο του άνθρακα (12%), το μεθάνιο (4%), η τολουίνη (3,9%), το βουτάνιο (2,5%), το πεντάνιο (3,5%), το προπάνιο (1,4%), το εξάνιο (1,7%), το βενζόλιο (0,9%), το αιθάνιο (0,9%) και τα φορμαλδευγή (0,8%).

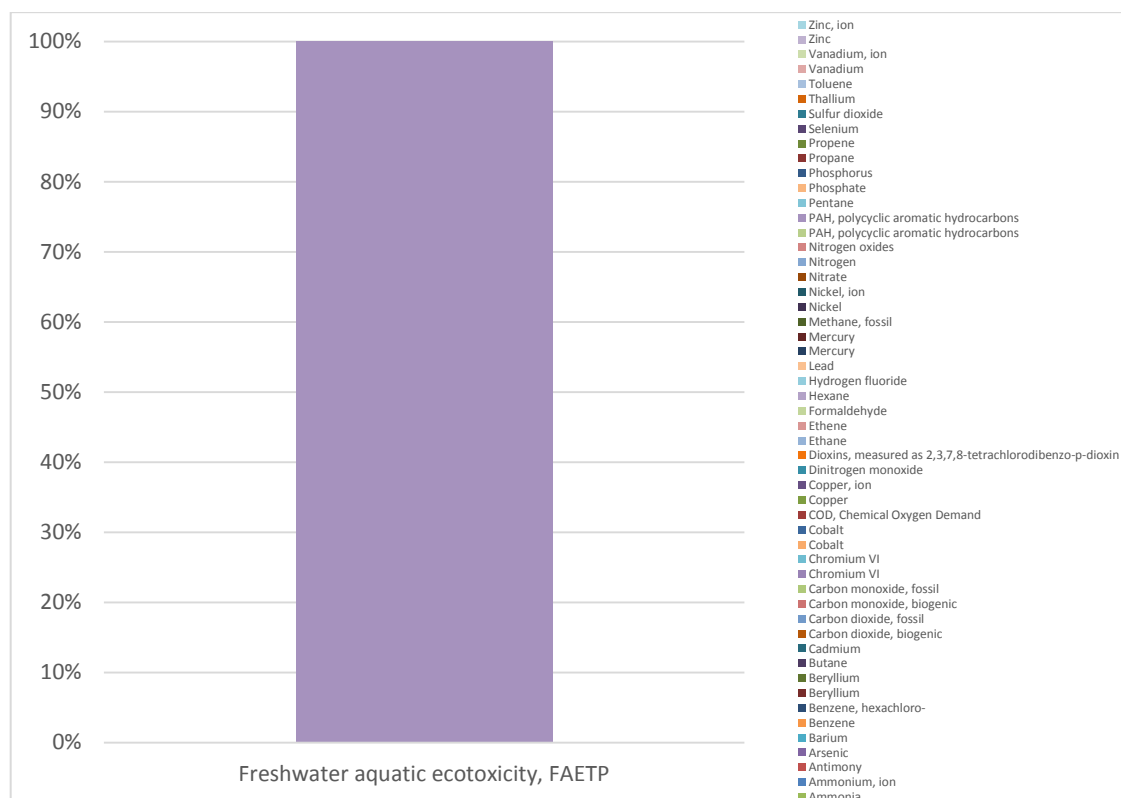
Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)



Σχήμα 49. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη εδαφικής οικοτοξικότητας, Στάδιο 4

Η εδαφική οικοτοξικότητα στο Στάδιο 4 οφείλεται στην παρουσία κοβαλτίου στον αέρα. Η τιμή του δείκτη ανέρχεται σε $6,17 \cdot 10^{-11}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene.

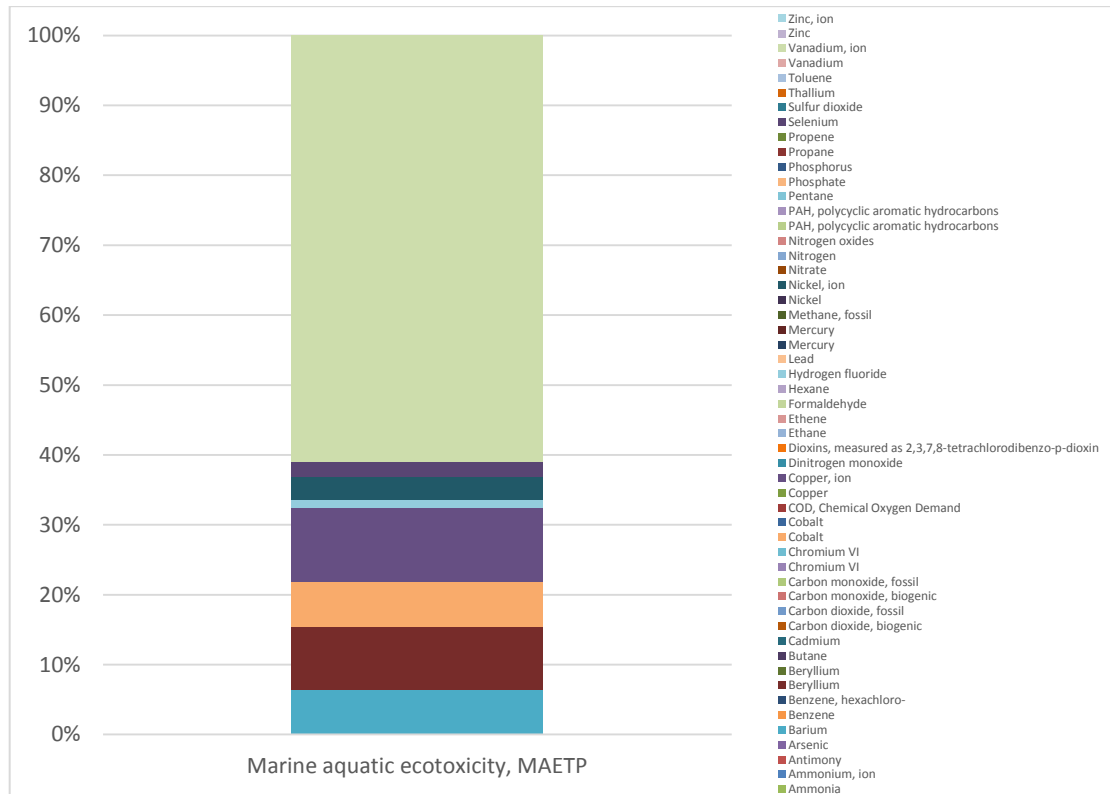
Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)



Σχήμα 50. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, Στάδιο 4

Η οικοτοξικότητα του γλυκού νερού στο Στάδιο 4 λαμβάνει χαμηλή τιμή, η οποία ισούται με $1,68 \cdot 10^{-13}$ ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene. Ο δείκτης στο συγκεκριμένο στάδιο καθορίζεται από την παρουσία PAHs, ενώ η παρουσία άλλων στοιχείων είναι αμελητέα, καθώς καθορίζουν την τελική τιμή του δείκτη σε ποσοστό μικρότερο του 0,1%.

Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)



Σχήμα 51. Συμμετοχή χημικών στοιχείων στο δείκτη θαλάσσιας οικοτοξικότητας, Στάδιο 4

Η θαλάσσια οικοτοξικότητα όπως και στα υπόλοιπα στάδια (πλην του σταδίου της λειτουργίας) λαμβάνει μεγάλη τιμή, κάτι που αποκαλύπτει σημαντικές επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Η τιμή του δείκτη υπολογίστηκε σε 0,291 ισοδύναμων kg 1,4-dichlorobenzene και διαμορφώνεται κυρίως από την παρουσία ιόντων βαναδίου (61%) και σε μικρότερο βαθμό από την παρουσία ιόντων χαλκού (10,5%), βηρυλλίου (8,9%), βαρίου και κοβαλτίου με 6,5%. Μικρότερη επιρροή έχουν στοιχεία όπως τα ιόντα νικελίου (3,3%), το σελήνιο (2%) και το υδροφθόριο (1,2%).

6.4. Κανονικοποίηση

Η κανονικοποίηση είναι ένα στάδιο το οποίο δεν είναι υποχρεωτικό κατά ISO αλλά μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφόρων επιπτώσεων, με σκοπό να καταστεί δυνατή η σύγκριση μεταξύ τους.

Οι μέθοδοι της κανονικοποίησης επιτρέπουν τη σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων κατηγοριών με μια πρότυπη τιμή. Η κατηγορία επιπτώσεων διαιρείται με μια τιμή αναφοράς. Συνήθεις τιμές αναφοράς είναι οι ετήσιες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις σε μια χώρα ή ήπειρο, διαιρεμένες με τον αντίστοιχο αριθμό κατοίκων. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε στην δεδομένη μελέτη είναι η εξής:

$$N_k = \frac{P_k}{R_k}$$

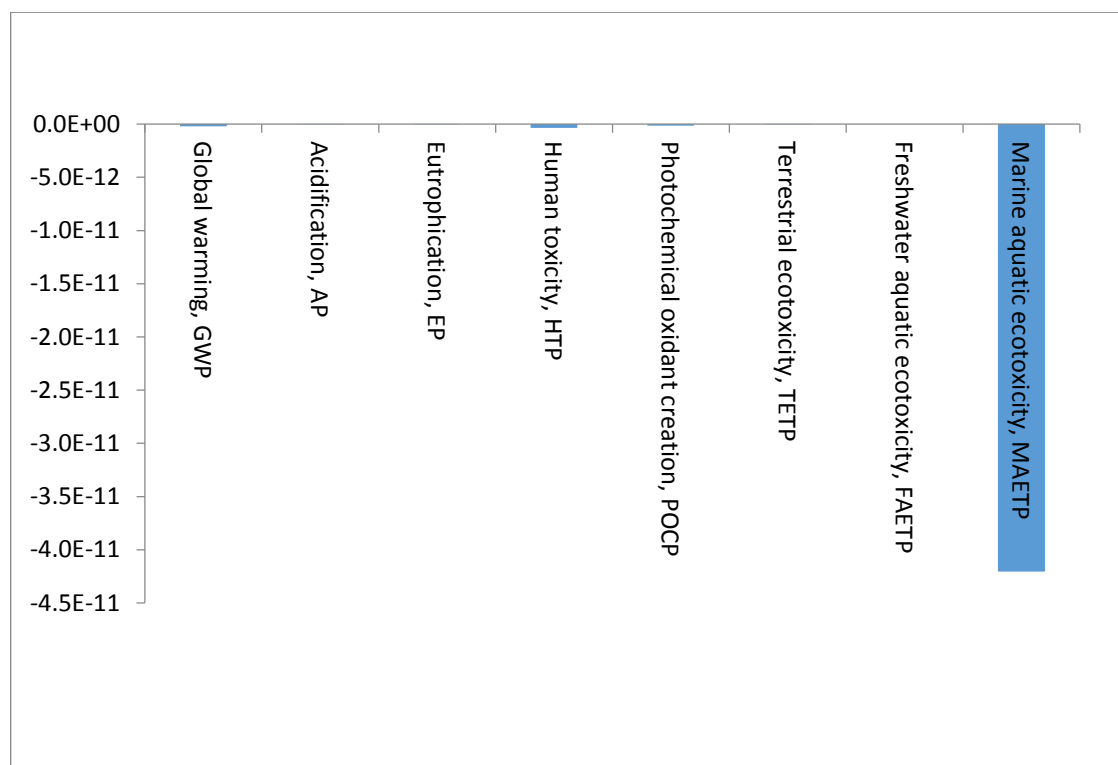
k: δείκτης που δηλώνει την κατηγορία επίπτωσης

N: δείκτης κανονικοποίησης

P: άθροισμα από τη φάση χαρακτηρισμού

R: τιμή αναφοράς

Μετά την κανονικοποίηση, όλες οι κατηγορίες έχουν την ίδια μονάδα, π.χ. ανά έτος ή ανά κάτοικο χώρας ή ηπείρου, γεγονός που επιτρέπει την ευκολότερη σύγκρισή τους. Τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την ανάδειξη της σπουδαιότητας των διαφόρων κατηγοριών επιπτώσεων. Σημειώνεται ότι σε αυτήν την φάση γίνεται η παραδοχή ότι όλες οι κατηγορίες είναι ισοδύναμες, π.χ. η αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και οι οικοτοξικολογικές επιπτώσεις είναι ισοδύναμης σπουδαιότητας.



Σχήμα 52. Κανονικοποίηση των κατηγοριών επιπτώσεων της ΑΚΖ του αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι»

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ως αριθμητής, η συνολική τιμή του κάθε δείκτη επιπτώσεων, όπως προέκυψε μέσα από τους υπολογισμούς και ως παρονομαστής, η τιμή αναφοράς για κάθε δείκτη, από τα δεδομένα του υπολογιστικού μοντέλου για τον Ευρωπαϊκό χώρο. Μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας προέκυψε το Σχήμα 52 που δίνει μία σαφή εικόνα για τη σπουδαιότητα των διαφόρων επιπτώσεων, όπως αυτές προτυποποιήθηκαν μέσω της χρήσης των αντίστοιχων δεικτών.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται καθαρά πως ο δείκτης θαλάσσιας οικοτοξικότητας λαμβάνει μεγαλύτερη αρνητική τιμή, σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες. Σύμφωνα με τον ορισμό της κανονικοποίησης, κάτι τέτοιο σημαίνει πως ο συγκεκριμένος δείκτης παίζει σημαντικότερο ρόλο στη συνολική περιβαλλοντική αποτίμηση του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου, συγκριτικά με τους υπόλοιπους δείκτες.

Για την ερμηνεία του συγκεκριμένου αποτελέσματος θα πρέπει να γίνει ανάλυση των παραγόντων που συμβάλλουν σε μία τέτοια εικόνα. Αρχικά θα μπορούσε να επισημανθεί, ότι η εικόνα αυτή είναι απόρροια μία σειράς από δεδομένων που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο.

Παρόλα αυτά, το πιο σημαντικό σημείο είναι πως η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο κατά το στάδιο λειτουργίας του, οδηγεί στη μη έκλυση των αντίστοιχων ρύπων, οι οποίοι θα παράγονταν, αν το ίδιο ποσό ενέργειας παραγόταν βάσει του ενεργειακού μείγματος της Ελλάδας. Το αρνητικό πρόσημο των δεικτών υποδηλώνει πως μέσω του σταδίου λειτουργίας, το συνολικό ισοζύγιο των κατηγοριών επιπτώσεων κλίνει θετικά προς το περιβάλλον. Παράλληλα, η τιμή της θαλάσσιας οικοτοξικότητας δηλώνει τη μεγαλύτερη θετική συνεισφορά του αιολικού πάρκου, σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων, γεγονός που εκφράζει την αποφυγή έκλυσης μεγάλων ποσοτήτων κυρίως ιόντων βαναδίου.

Από τη διαδικασία της κανονικοποίησης προκύπτει ότι ο δείκτης της θαλάσσιας οικοτοξικότητας στη μελέτη περίπτωσης της παρούσας εργασίας έχει σημαντικά υψηλότερη σημασία από ότι σε άλλες περιπτώσεις. Δεδομένου ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του έργου που αναφέρθηκαν παραπάνω δικαιολογούν την απόκλιση αυτή, δε θεωρείται σκόπιμη η οποιαδήποτε διαφοροποίηση των δεικτών μέτρησης. Αυτό που είναι σημαντικό να επισημανθεί και προέκυψε από τη συγκεκριμένη διαδικασία, είναι ότι τα στοιχεία της παρούσας εργασίας μπορούν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση της περιβαλλοντικής απόδοσης ενός αιολικού πάρκου ή ως βάση σύγκρισης μία άλλης μελέτης περίπτωσης, με την υποσημείωση που ακολουθεί ως ερμηνεία των αποτελεσμάτων του δείκτη θαλάσσιας οικοτοξικότητας.

6.5. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η συνολική ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους υπολογισμούς για κάθε ένα στάδιο του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου πάρκου και για κάθε περιβαλλοντικό δείκτη, αποδίδει και τη συνολική εικόνα του έργου. Σημαντικό είναι να επισημανθεί ότι σε όλα τα στάδια, εξαιρέσει του Σταδίου 3, οι δείκτες λάμβαναν θετικές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι στα τέσσερα από τα πέντε εξεταζόμενα στάδια του κύκλου ζωής του αιολικού υπάρχουν δυσμενείς επιπτώσεις για το περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει διότι στα περισσότερα στάδια παράγονται ρύποι (από τις μεταφορές, την παραγωγή των απαραίτητων υλικών κατασκευής του πάρκου, την εγκατάσταση και συντήρηση της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος τις διαδικασίες ανακύκλωσης των υλικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους κλπ.), χωρίς να παράγεται ενέργεια από το αιολικό πάρκο και επομένως χωρίς τη

θετική επίδραση στο περιβάλλον που προκύπτει από τη λειτουργία του. Από την άλλη πλευρά, στο Στάδιο 3 του έργου, σε όλους του δείκτες εμφανίζονται μεγάλες αρνητικές τιμές, οι οποίες αντιστρέφουν τη συνολική εικόνα απόδοσης της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, η συνολική εικόνα (συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων όλων των σταδίων της ΑΚΖ), όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 53, καταδεικνύει ότι η εγκατάσταση και λειτουργία του αιολικού πάρκου στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει σημαντική θετική συμβολή στο περιβάλλον. Το στάδιο λειτουργίας του αιολικού πάρκου αντισταθμίζει πλήρως τους ρύπους και τις συνέπειές τους από άλλα στάδια και η τελική συνεισφορά του είναι εξόχως σημαντική στη μείωση του συνόλου των φαινομένων που συμπεριλαμβάνονται στους δείκτες μέτρησης.

Ένα άλλο σημείο που είναι άξιο ανάλυσης είναι πως οι μεγαλύτερες αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον εμφανίζονται στο δείκτη της θαλάσσιας οικοτοξικότητας. Οι παράγοντες που πιθανώς συμβάλλουν στο φαινόμενο αναφέρθηκαν παραπάνω και είναι:

- Η περιοχή χωροθέτησης του εργοστασίου κατασκευής των ανεμογεννητριών που βρίσκεται σε παραθαλάσσια περιοχή, με ότι αυτό μπορεί να συνεπάγεται για την επιβάρυνση των θαλάσσιων υδάτων
- Μεγάλο μέρος των πρώτων υλών και των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών ενδεχομένως να προέρχονται από παραθαλάσσιες περιοχές ή και να μεταφέρονται μέσω θαλάσσης στο εργοστάσιο κατασκευής και συναρμολόγησης
- Το εργοστάσιο παραγωγής απέχει μεγάλη απόσταση από την περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και η μεγαλύτερη απόσταση καλύπτεται με πλοία. Από τις θαλάσσιες μεταφορές δύνανται να προκύψουν μία σειρά από περιβαλλοντικές πιέσεις για το θαλάσσιο οικοσύστημα ως αποτέλεσμα της διαχείρισης έρματος και σεντινόνερων, της διαφυγής πετρελαιοειδών, των επιδράσεων από τα υφαλοχρώματα στις γάστρες των πλοίων κλπ.

Η κατηγορία αρνητικών επιπτώσεων που ακολουθεί, είναι η παγκόσμια υπερθέρμανση, μέσω της έκλυσης μεγάλων ποσοτήτων CO₂, και αμέσως επόμενη είναι η κατηγορία της ανθρώπινης τοξικότητας. Αυτό ενδεχομένως είναι απόρροια του γεγονότος ότι ένα μέρος των υλικών κατασκευής των ανεμογεννητριών εμπεριέχει στοιχεία, όπως βαρέα μέταλλα που δύνανται να έχουν αρνητικές επιδράσεις στο συγκεκριμένο δείκτη. Αυτό το συμπέρασμα άλλωστε προκύπτει και από το γεγονός ότι το Στάδιο 1 συμβάλλει κατά περίπου 99% στη θετική τιμή του δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας. Αντίστοιχη ερμηνεία μπορεί να δοθεί και για την τοξικότητα του γλυκού νερού που επηρεάζεται άμεσα από την απόρριψη ή διαφυγή τοξικών ουσιών στα υδατικά οικοσυστήματα, κυρίως κατά τη φάση λειτουργίας και συντήρησης του αιολικού πάρκου, στάδιο κατά το οποίο ο δείκτης σημειώνει και την υψηλότερη τιμή του.

Από μία εκτενέστερη ανάλυση των στοιχείων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 53 προκύπτει ότι για όλους τους δείκτες μέτρησης, το στάδιο 1Α συμβάλλει κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στη δημιουργία ρύπων, που επηρεάζουν κάθε μία από τις περιβαλλοντικές συνιστώσες. Χαρακτηριστική είναι η συνεισφορά του σταδίου 1Α στους συνολικούς ρύπους, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις κυμαίνεται άνω του 90%, με μοναδικές εξαιρέσεις το δείκτη οξίνισης που ανέρχεται σε 76,4% και το δείκτη ευτροφισμού που ανέρχεται σε 85,3%. Το στοιχείο αυτό καταδεικνύει και τον τομέα στον οποίο θα πρέπει να επικεντρωθούν οι προσπάθειες για τη μείωση της συνολικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από την δημιουργία και λειτουργία των αιολικών πάρκων. Σε κάθε περίπτωση το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι μάλλον λογικό, αν συνυπολογιστεί ότι στο στάδιο 1Α συμπεριλαμβάνονται όλες οι ανάγκες σε υλικά για την παραγωγή των επιμέρους υλικών και

τμημάτων της ανεμογεννήτριας (π.χ. μεγάλες ποσότητες αλουμινίου και χάλυβα που αποτελούν βασικά υλικά κατασκευής) και η χρήση σπάνιων ορυκτών πόρων.

Στη συνέχεια δίνεται μία συνολική ερμηνεία για την πηγή προέλευσης των κυριότερων ρύπων, οι οποίοι διαμορφώνουν τους δείκτες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν.

Δείκτης παγκόσμιας υπερθέρμανσης

Ο δείκτης παγκόσμιας υπερθέρμανσης διαμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό από το στάδιο 1Α και από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, που προκύπτουν από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή των πρώτων υλών. Λιγότερο σημαντική είναι η συνεισφορά διοξειδίου του άνθρακα από τις μεταφορές στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής. Δεύτερο σε σημαντικότητα αέριο για το συγκεκριμένο δείκτη συνολικά είναι το μεθάνιο, το οποίο προκύπτει κυρίως κατά την παραγωγή χάλυβα. Μικρής σημασίας είναι η παρουσία άλλων στοιχείων όπως το υποξείδιο του αζώτου από διάφορες παραγωγικές διαδικασίες, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ινών γυαλιού που χρησιμοποιείται σε τμήματα των ανεμογεννητριών.

Δείκτης οξίνισης

Ο δείκτης οξίνισης παρέχει ένα μέτρο της μείωσης της τιμής pH του νερού της βροχής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή του οικοσυστήματος. Το στάδιο της κατασκευής των ανεμογεννητριών παρουσιάζεται πρώτο σε αυτήν την κατηγορία επιπτώσεων, λόγω της παραγωγής κυρίως οξειδίων του αζώτου που σχετίζονται με την παραγωγή σιδήρου και χάλυβα, που χρησιμοποιούνται ως βασικό υλικό κατασκευής σε διάφορα τμήματα της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πύργος, άτρακτος, πτερύγια κλπ.).

Δείκτης ευτροφισμού

Σε γενικές γραμμές, η τιμή του δείκτη ευτροφισμού παρέχει ένα μέτρο του εμπλουτισμού του υδατικού ή χερσαίου περιβάλλοντος, που οδηγεί τα οικοσυστήματα στις θέσεις αυτές σε υποβάθμιση. Στον πλήρη κύκλο ζωής του αιολικού πάρκου, ο δείκτης του ευτροφισμού επηρεάζεται κυρίως από τα οξείδια του αζώτου, που παράγονται κατά την κατασκευή του πύργου και της ατράκτου της ανεμογεννήτριας. Σχετικά σημαντική συνεισφορά στο συγκεκριμένο δείκτη έχουν και οι θαλάσσιες μεταφορές.

Δείκτης ανθρώπινης τοξικότητας

Ο δείκτης ανθρώπινης τοξικότητας επηρεάζεται αντίστοιχα από το στάδιο 1Α και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Arvesen, et al. 2009), κυρίως από την κατασκευή της ατράκτου, των θεμελίων και των καλωδίων και των πύργων. Επίσης μικρές αρνητικές συνέπειες για το δείκτη αυτό προκύπτουν και κατά το τελευταίο στάδιο του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών, μέσω των διεργασιών για την τελική διάθεση των υλικών.

Δείκτης φωτοχημικής οξείδωσης

Αντίστοιχα με τον προηγούμενο δείκτη, έτσι και για τη φωτοχημική οξείδωση οι κύριοι ρύποι σχετίζονται με την κατασκευή του πύργου, της ατράκτου και των θεμελίων. Οι κύριοι ρύποι που συμμετέχουν στη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη αυτού προέρχονται από τις διεργασίες παραγωγής χάλυβα και αλουμινίου.

Εδαφική οικοτοξικότητα

Ο δείκτης εδαφικής οικοτοξικότητας στη συγκεκριμένη περίπτωση καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από την παρουσία κοβαλτίου, σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής. Η ύπαρξη του συγκεκριμένου στοιχείου αποδίδεται κυρίως στην κατασκευή των ηλεκτρικών και μηχανικών τμημάτων, που βρίσκονται στο κέλυφος των ανεμογεννητριών. Μικρότερης

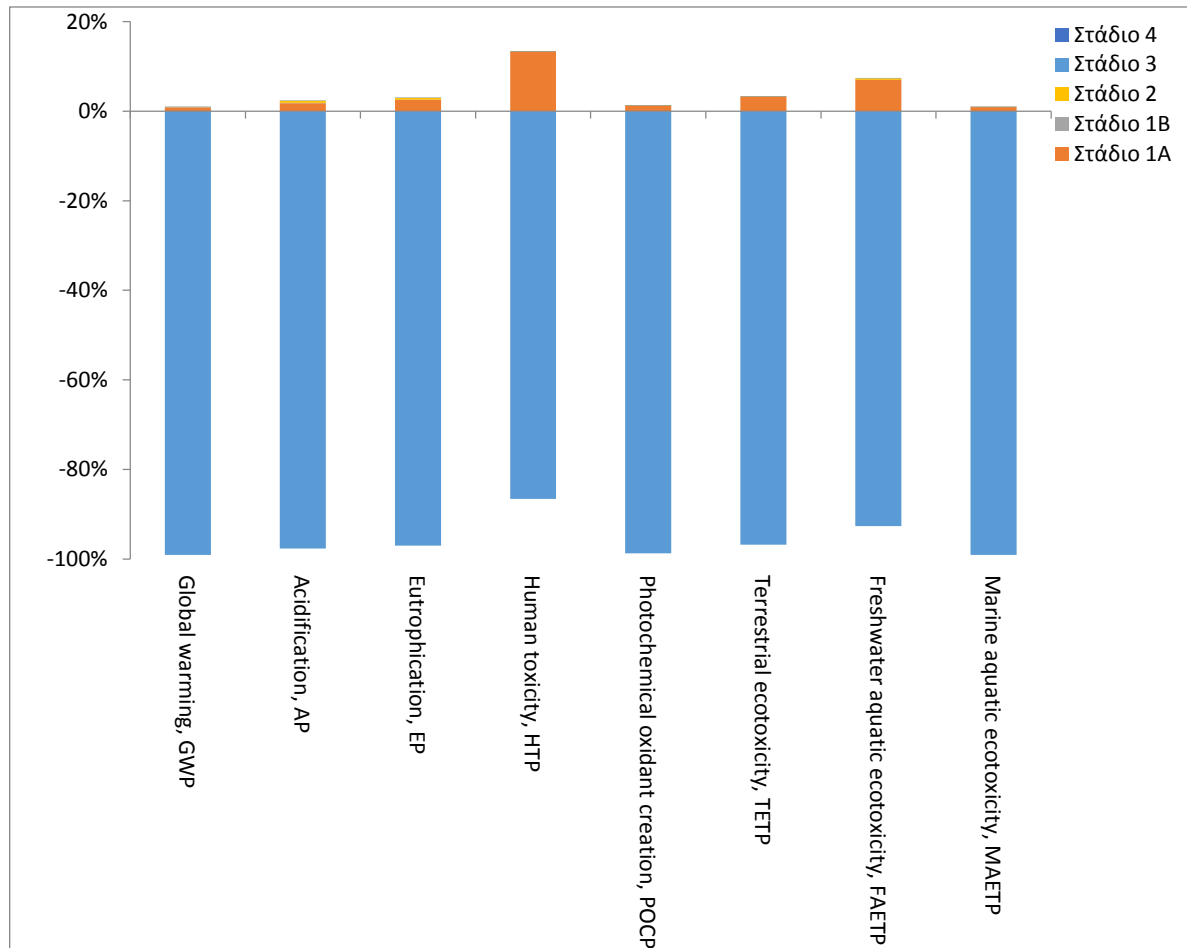
σημασίας ουσίες που συμβάλλουν στο φαινόμενο της εδαφικής οικοτοξικότητας και μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι το χρώμιο, ο υδράργυρος και το αρσενικό που σχετίζονται με την παραγωγή των μετάλλων που χρησιμοποιούνται εντός του κελύφους των ανεμογεννητριών, την άτρακτο (35%), τα θεμέλια (14%) και στο πύργο (10%).

Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού

Ο συγκεκριμένος δείκτης εξαρτάται κατά 90% και πλέον από την ύπαρξη ΡΑΗs. Η παρουσία των αρωματικών πολυκυκλικών υδρογονανθράκων οφείλεται κυρίως στις μεθόδους κατασκευής και παραγωγής των καλωδίων και της ατράκτου των ανεμογεννητριών.

Θαλάσσια οικοτοξικότητα

Η θαλάσσια οικοτοξικότητα επηρεάζεται κυρίως από τις διαδικασίες παραγωγής αλουμινίου και χάλυβα, αλλά και διαφόρων επιμέρους υλικών, όπως ο ανοξειδωτος χάλυβας. Μεγάλη παρουσία ρύπων που επηρεάζουν το συγκεκριμένο δείκτη εμφανίζεται κατά το στάδιο 1Α, όπου καταγράφονται στοιχεία όπως: ιόντα βαναδίου, ιόντα χαλκού (10,5%), βηρύλλιο (8,9%), βάριο, κοβάλτιο, ιόντα νικελίου, σελήνιο και υδροφθόριο.



Σχήμα 53. Συνολική συνεισφορά των σταδίων του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι» στους περιβαλλοντικούς δείκτες μέτρησης

Σημαντική συνεισφορά στους δείκτες της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, της οξίνισης και του ευτροφισμού έχει και το στάδιο των μεταφορών (Στάδιο 2). Πιο συγκεκριμένα, οι μεταφορές συμβάλλουν κατά 21,7% στο φαινόμενο της οξίνισης, κατά 12,8% στο φαινόμενο του ευτροφισμού και κατά 4,5% στην κλιματική αλλαγή. Δεδομένου του

μίγματος των μεταφορών, είναι αναμενόμενες οι επιπτώσεις στη δημιουργία ρύπων που επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή (κυρίως CO₂ από τις μηχανές εσωτερικής καύσης των μεταφορικών μέσων [πλοίων και φορτηγών]). Από την άλλη πλευρά, η επίδραση στο φαινόμενο οξίνισης συνδέεται περισσότερο με τα οξείδια του αζώτου από τις εκπομπές, τόσο κατά τις θαλάσσιες, όσο και κατά τις χερσαίες μεταφορές.

Τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου (Στάδιο 3) επηρεάζονται άμεσα από το χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών, που στη συγκεκριμένη περίπτωση ελήφθη ίσος με 20 χρόνια. Μία αύξηση στη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου θα αύξανε σημαντικά τα θετικά οφέλη στο σύνολο των δεικτών μέτρησης, δεδομένου ότι δε θα διαφοροποιούνταν οι αρνητικές επιδράσεις των υπολοίπων σταδίων, ενώ ταυτόχρονα θα μεταβαλλόταν η συνεισφορά του Σταδίου 3, που είναι ευνοϊκότερη προς το περιβάλλον.

Επιπλέον στοιχείο προς επισήμανση αποτελεί το περιβαλλοντικό ισοζύγιο της υπό μελέτη εγκατάστασης, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από το ενεργειακό μίγμα της χώρας ή της περιοχής απόδοσης της ενέργειας. Δεδομένου ότι το περιβαλλοντικό όφελος από την εγκατάσταση και λειτουργία μίας μονάδας παραγωγής αιολικής ενέργειας προκύπτει από τη μείωση της ζήτησης από άλλα είδη (συμβατικής) ενέργειας, σε περιοχές ή χώρες με περιβαλλοντικά φιλικό μίγμα ενέργειας, το συνολικό όφελος από τη δημιουργία του αιολικού πάρκου δεν καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικό. Το αντίθετο αποτέλεσμα θα ισχύει για χώρες ή περιοχές που παράγουν μεγάλο μέρος της ενέργειας που χρειάζονται, μέσω μονάδων που επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον. Πάνω σε αυτό το ζήτημα προκύπτει και ένας προβληματισμός για το μέτρο σύγκρισης που πρέπει να λαμβάνεται κάθε φορά, αν και συνήθως για τον υπολογισμό της θετικής επίδρασης ενός αιολικού πάρκου λαμβάνεται υπόψη το ενεργειακό μίγμα της περιοχής που αποδίδεται η ενέργεια.

Συγκεντρωτικά, η συνολική συνεισφορά (ανά kWh) του αιολικού πάρκου στο τέλος του κύκλου ζωής του, ανέρχεται σε:

• Δείκτης παγκόσμιας υπερθέρμανσης:	-1,0105 Kg CO ₂ eq
• Δείκτης οξίνισης:	-0,566*10 ⁻³ kg SO ₂ eq
• Δείκτης ευτροφισμού:	-0,202 kg PO ₄ eq
• Δείκτης ανθρώπινης τοξικότητας:	-0,178 kg 1,4-dichlorobenzene eq
• Δείκτης φωτοχημικής οξείδωσης:	-0,242 kg ethylene eq
• Δείκτης εδαφικής οικοτοξικότητας:	-1,547 kg 1,4-dichlorobenzene eq
• Δείκτης οικοτοξικότητας του γλυκού νερού:	-1,513 kg 1,4-dichlorobenzene eq
• Δείκτης θαλάσσιας οικοτοξικότητας:	-1879,753kg 1,4-dichlorobenzene eq

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επισημανθεί, πως τα αποτελέσματα από τη συγκεκριμένη μελέτη AKZ για το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο, είναι δυνατό να διαφοροποιηθούν σημαντικά, αν γίνουν διαφορετικές θεωρήσεις ή αν αλλάξουν τα δεδομένα στα διάφορα στάδια ανάλυσης. Για παράδειγμα μία αλλαγή στο εργοστάσιο παραγωγής θα διαφοροποιήσει έντονα τα αποτελέσματα στα πρώτα στάδια, δεδομένης της ενδεχόμενης χρήσης διαφορετικών τεχνολογικών και μεταφορικών μέσων κλπ.. Επομένως, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προσεγγίζουν την «πραγματικότητα», με βάση τα επιμέρους στοιχεία του έργου, τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τις θεωρήσεις που έγιναν.

6.6. Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με άλλες έρευνες που χρησιμοποίησαν κοινή μεθοδολογική προσέγγιση θα καταδείξει αποκλίσεις, κοινά

στοιχεία και σημεία για προβληματισμό και περαιτέρω διερεύνηση. Μία τέτοια αντιπαραβολή των στοιχείων θα καταδείξει ενδεχομένως διαφορές που σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης, διαφοροποιήσεις στη μεθοδολογία και στις παραδοχές, τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης μελέτης και ενδεχόμενες αδυναμίες ή παραλήψεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν εισροή σε μία μελλοντική διαδικασία περαιτέρω έρευνας.

Ο Πίνακας 2 που παρατίθενται σε προηγούμενο κεφάλαιο αποτελεί μία καλή βάση σύγκρισης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, σε σχέση με αποτελέσματα που προέκυψαν από αντίστοιχες έρευνες το διάστημα 2000-2009. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων ερευνών έχουν διαφορές μεταξύ τους που οφείλονται σε μία σειρά παράγοντες (διαφορές στη μεθοδολογία, στα υλικά κατασκευής των ανεμογεννητριών κλπ.) αλλά μπορούν ενδεχομένως να δώσουν μία συγκριτική εικόνα αυτού του είδους των έργων.

Σχετικά με το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, τα στοιχεία που προκύπτουν από τις μελέτες δίνουν μία μέση τιμή της τάξης των 10,8 g CO₂/kWh, με εύρος τιμών από 4,6 έως 22,0 g CO₂/kWh. Η μέση τιμή της παγκόσμιας υπερθέρμανσης που προκύπτει από τις μελέτες αυτές είναι πολύ κοντά στην τιμή που υπολογίστηκε για το αιολικό πάρκο στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», η οποία ανέρχεται σε 9,72 g CO₂/kWh.

Σε ό,τι αφορά στο μέσο συντελεστή διαθεσιμότητας, ανέρχεται σε 32,3% στις μελέτες περίπτωσης που παρατίθενται στον Πίνακα 2. Η αντίστοιχη τιμή, για το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο στην Εύβοια, ανέρχεται σε 33,5% και σχεδόν συμπίπτει με το μέσο όρο που προαναφέρθηκε. Αυτό σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, ο λόγος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας προς αυτήν που θα παράγονταν αν η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε στην ονομαστική ισχύ της συνεχώς κατά τη διάρκεια του έτους, συμπίπτει με αυτόν που προκύπτει σε σχετικές μελέτες της βιβλιογραφίας.

Από τα στοιχεία των μελετών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 **Error! Reference source not found.**, αλλά και από άλλες βιβλιογραφικές αναφορές (π.χ. Vestas, 2013; Vargas et al., 2015) προκύπτει επίσης ότι η κατασκευή των τμημάτων της ανεμογεννήτριας και ειδικά των τμημάτων που βρίσκονται εντός του κελύφους δημιουργεί το συντριπτικά μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών ρύπων στη διάρκεια του κύκλου ζωής της. Το συγκεκριμένο στοιχείο έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 53 και αφορούν το υπό μελέτη αιολικό πάρκο.

Από τη μελέτη των Martínez et al. (2009), η οποία αφορά στην AKZ μιας ανεμογεννήτριας στην Ισπανία και παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά και μεθοδολογία με το υπό μελέτη αιολικό πάρκο, προκύπτουν τα εξής³:

³ Το σύνολο των τιμών αφορούν την παραγωγή μίας kWh ενέργειας, για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Πίνακας 9. Συγκριτικός πίνακας περιβαλλοντικών δεικτών (ανά MWh).

	Δείκτες μέτρησης							
	Παγκόσμια υπερθέρμανση (kg CO ₂ eq)	Οξίνιση (kg SO ₂ eq)	Ευτροφισμός (kg PO ₄ eq)	Ανθρώπινη τοξικότητα (kg 1,4-dichlorobenzene eq)	Φωτοχημική οξείδωση (kg ethylene eq)	Εδαφική οξυτοξικότητα (kg 1,4-dichlorobenzene eq)	Οξυτοξικότητα του γλυκού νερού (kg 1,4-dichlorobenzene eq)	Θαλάσσια οξυτοξικότητα (kg 1,4-dichlorobenzene eq)
Εξεταζόμενο αιολικό πάρκο, 2016	9,72E-03	1,43E-05	6,44E-06	3,32E-02	3,22E-06	5,42E-07	1,26E-10	17,45
Martínez et al., 2009	6,58E-03	5,43E-05	5,68E-06	1,55E-02	2,13E-06	1,56E-04	2,81E-03	4,41

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των δύο ερευνών σε αρκετά σημεία είναι παραπλήσια, ενώ υπάρχουν και δείκτες με μεγαλύτερες αποκλίσεις. Ο δείκτης ευτροφισμού, φωτοχημικής οξείδωσης και σε μικρότερο βαθμό οι δείκτες της παγκόσμιας υπερθέρμανσης και της ανθρώπινης οξυτοξικότητας φαίνεται να διατηρούν μία τάξη μεγέθους. Στον αντίποδα, μεγάλη σχετικά απόκλιση εμφανίζεται στο δείκτη της οξίνισης. Οι δείκτες όμως που διατηρούν πολύ μεγάλες διαφορές είναι εκείνοι της οξυτοξικότητας του γλυκού και θαλασσινού νερού. Αυτές οι μεγάλες διαφοροποιήσεις μπορεί να οφείλονται στο γεγονός, πως οι εκάστοτε επιδράσεις μπορεί να συμπεριληφθούν είτε στον ένα, είτε στον άλλο δείκτη, σύμφωνα με τις παραδοχές και τις θεωρήσεις, κατά τη μεθοδολογία. Τέλος, σημαντικό ρόλο στις διαφοροποιήσεις αυτές σίγουρα διαδραματίζουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε εγκατάστασης, όπως επισημαίνονται και σε άλλα σημεία του κειμένου.

6.7. Συμπεράσματα

Αδιαμφισβήτητα η αιολική ενέργεια προβάλλει ως μία από τις πλέον ελπιδοφόρες λύσεις στο ολόένα και εντεινόμενο πρόβλημα της ενεργειακής επάρκειας, λόγω των αυξημένων ενεργειακών αναγκών και του προτύπου ζωής, σε παγκόσμια κλίμακα. Η αιολική ενέργεια, ως μία από τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ), αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική πρόταση παραγωγής ενέργειας, τόσο έναντι άλλων μορφών ΑΠΕ, όσο και έναντι των συμβατικών καυσίμων ακόμα περισσότερο. Οι εκπομπές ρύπων και η συνακόλουθη περιβαλλοντική ρύπανση που προκύπτουν από τα συμβατικά καύσιμα, σε συνδυασμό με τη μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων και τα οικονομικά και πολιτικά ζητήματα, που σχετίζονται με τη διαμόρφωση της τιμής των καυσίμων, καθορίζουν σημαντικά τις προοπτικές των χωρών, ιδιαίτερα αυτών που εξαρτώνται ενεργειακά από έτερες χώρες.

Η λειτουργία των αιολικών πάρκων, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, είναι αδιαμφισβήτητα απαλλαγμένη από τις επιπτώσεις που

μελετώνται για άλλα είδη συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Ο άνεμος είναι ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και από τη χρονική στιγμή που θα εγκατασταθεί και θα ξεκινήσει η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, όπως επίσης και οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις ελαχιστοποιούνται. Επίσης η αιολική ενέργεια προβάλλει ως μία από τις πλέον οικονομικά συμφέρουσες ΑΠΕ, δεδομένου ότι εξασφαλίζει μικρό κόστος παραγωγής ανά παραγόμενη kWh, στο σύνολο του κύκλου ζωής.

Παρόλα αυτά, η συνεχής αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων, που λαμβάνει χώρα σε παγκόσμιο επίπεδο εδώ και δεκαετίες, εγείρει ζητήματα πλέον, τόσο στο παρόν, όσο και για το μέλλον, που αφορούν στην κατανάλωση της ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή της αντίστοιχης τεχνολογίας, αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη χρήση αυτής. Πλήθος μελετών εστιάζουν πλέον στην ΑΚΖ των αιολικών πάρκων, προσπαθώντας να αποτυπώσουν τη ροή ενέργειας, υλικών και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο σύνολο του κύκλου ζωής τους.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από μεθοδολογίες και έχουν προταθεί πλήθος επιμέρους τροποποιήσεων για τη συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση, τόσο των αιολικών πάρκων, όσο και έτερων ενεργειακών έργων. Όπως έχει αναφερθεί, η ΑΚΖ αποτελεί τη μεθοδολογία, μέσω της οποίας είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθούν η ενεργειακή κατανάλωση, οι εκπομπές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός έργου, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Η μέθοδος αυτή συγκεντρώνει μία πληθώρα θετικών στοιχείων, αλλά και μειονεκτημάτων, τα οποία θα πρέπει να συνηπολογίζονται κάθε φορά με κατάλληλο τρόπο. Σε κάθε περίπτωση θεωρείται μία μέθοδος με ευρεία εφαρμογή, ειδικά στα αιολικά πάρκα και κρίθηκε απολύτως κατάλληλη για την επίτευξη του βασικού στόχου της παρούσας εργασίας.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, μελετήθηκε ένα εν λειτουργία αιολικό πάρκο στη θέση «Πυργουλόψη - Λιάζαρι», Περιφερειακής Ενότητας Εύβοιας, Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας, αποτελούμενο από δύο ανεμογεννήτριες τύπου NM 44/750 της κατασκευάστριας εταιρείας NEG Micon και συνολικής ισχύος 1,5 MW. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα που αφορούν στην ΑΚΖ (ISO 140040-44:2006), βασίστηκε στη μέθοδο ενδιάμεσου σημείου CML 2001 και η μοντελοποίηση του συστήματος, με τους συνακόλουθους υπολογισμούς, υλοποιήθηκε με τη χρήση βάσεων δεδομένων Ecoinvent και του λογισμικού προγράμματος Excel.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αποτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, στο προαναφερόμενο εν λειτουργία αιολικό πάρκο. Η εξέταση του πάρκου έγινε μέσω της ΑΚΖ «από το λίκνο μέχρι τον τάφο» (cradle-to-grave), υπολογίζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν για το σύνολο των σταδίων του κύκλου ζωής του. Από το σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που υφίστανται και σχετίζονται με την ΑΚΖ, επιλέχθηκαν εκείνες που εξετάζονται συνήθως σε αντίστοιχες ΑΚΖ και αφορούν σε αιολικά πάρκα.

Στο πλαίσιο της μελέτης εξετάστηκαν επίσης όλα τα επιμέρους στάδια και διεργασίες του αιολικού πάρκου, όπως η αρχική κατασκευή των τμημάτων των ανεμογεννητριών, η μεταφορά και συναρμολόγησή τους, η διαχείριση των υλικών κατά την αποσυναρμολόγηση του πάρκου στο τέλος του κύκλου ζωής του.

Με βάση και την εμπειρία που προκύπτει από τη βιβλιογραφία για την ανάλυση του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου, επιλέχθηκαν οι εξής δείκτες, που αντιπροσωπεύουν αντίστοιχες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων:

- Παγκόσμια υπερθέρμανση (Global warming, GWP)
- Οξίνιση (Acidification, AP)
- Ευτροφισμός (Eutrophication, EP)
- Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity, HTP)
- Φωτοχημική οξειδωση (Photochemical oxidant creation, POCP)
- Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity, TETP)
- Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater aquatic ecotoxicity, FAETP)
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)

Στη συγκεκριμένη μελέτη, το συνολικό ποσό ενέργειας που θα καταλήξει στο ηλεκτρικό δίκτυο για την προβλεπόμενη εικοσαετή λειτουργία των ανεμογεννητριών, ανέρχεται στις 88.257.971,71 kWh, με υπολογιζόμενη μέση διαθεσιμότητα του αιολικού πάρκου ίση με 97,5%. Το συγκεκριμένο ποσό ενέργειας υπολογίστηκε σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα στοιχεία από την έως σήμερα λειτουργία των ανεμογεννητριών.

Από τα στοιχεία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο μέρος των ρύπων που διαμορφώνουν τους δείκτες μέτρησης παράγεται κατά το πρώτο στάδιο (στάδιο 1A) του κύκλου ζωής του έργου, κατά το οποίο παράγονται όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα και οι πρώτες ύλες για τις ανεμογεννήτριες. Η συγκεκριμένη διαπίστωση συμβαδίζει με το γεγονός ότι για την παραγωγή μία ανεμογεννήτριας απαιτείται πληθώρα υλικών, μερικά εκ των οποίων εμφανίζουν μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την εξόρυξη και επεξεργασία τους (αλουμίνιο, ανοξείδωτος χάλυβας κλπ.).

Αξίζει να επισημανθεί, πως το πρώτο στάδιο του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου πάρκου εμφανίζει υψηλές τιμές στους δείκτες περιβαλλοντικής υποβάθμισης, παρότι έγινε η θεώρηση ότι μέρος των χρησιμοποιούμενων υλικών κατασκευής προέρχεται από ανακυκλωμένα υλικά. Αναλυτικότερα, η συνεισφορά του σταδίου 1A στους συνολικούς ρύπους στις περισσότερες περιπτώσεις κυμαίνεται άνω του 90 %, με μοναδικές εξαιρέσεις στο δείκτη οξίνισης που ανέρχεται σε 76,4 % και στο δείκτη ευτροφισμού που ανέρχεται σε 85,3%. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε πλήρη συμφωνία με αντίστοιχες μελέτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (EWEA)⁴, όπου αναφέρεται, πως κατά το στάδιο κατασκευής παράγεται το 80 % περίπου των συνολικών ρύπων. Σύμφωνα με τις μελέτες αυτές, κατά το στάδιο λειτουργίας παράγεται το 7-12 % των ρύπων, ενώ η διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής προκαλεί το 3-14 % των ρύπων.

Γεγονός είναι επίσης, πως σε όλα τα στάδια του αιολικού πάρκου, εκτός από το στάδιο λειτουργίας, προκύπτει αρνητικό περιβαλλοντικό ισοζύγιο. Αυτό συμβαίνει διότι στα περισσότερα στάδια παράγονται ρύποι (από τις μεταφορές, από την παραγωγή των απαραίτητων υλικών κατασκευής, από την εγκατάσταση και συντήρηση, από την ανακύκλωση των υλικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής), χωρίς να παράγεται ενέργεια (θετικό ισοζύγιο) και επομένως χωρίς οποιαδήποτε θετική επίδραση στο περιβάλλον. Πάντως, το στάδιο λειτουργίας αντισταθμίζει πλήρως τους ρύπους και τις συνέπειές τους από τα υπόλοιπα στάδια και η τελική συνεισφορά του έργου είναι ιδιαιτέρως σημαντική στη μείωση του συνόλου των φαινομένων.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που προέκυψε από την ανάλυση των στοιχείων του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου είναι ότι εμφανίζονται μεγάλες αρνητικές επιδράσεις στους δείκτες οικοτοξικότητας. Αυτό ερμηνεύεται από την παρουσία στοιχείων όπως το χρώμιο, ο υδράργυρος και το αρσενικό που σχετίζονται με την παραγωγή των μετάλλων, όπως το

⁴ <http://www.wind-energy-the-facts.org/lca-in-wind-energy.html>

αλουμίνιο και ο χάλυβας ή ο ανοξείδωτος χάλυβας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας (άτρακτος, πύργος, κέλυφος, θεμέλια κ.ά.).

Από την άλλη πλευρά, ο δείκτης παγκόσμιας υπερθέρμανσης επηρεάζεται πρωτίστως από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, που προκύπτουν από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή των πρώτων υλών της μονάδας και δευτερευόντως, ως απόρροια των μεταφορών. Οι μεταφορές είναι το στάδιο με την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη επιρροή, αρκετά μικρότερη βέβαια συγκριτικά με το στάδιο της παραγωγής των πρώτων υλών (στάδιο 1Α). Πιο συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες τιμές που εμφανίζουν οι μεταφορές εντοπίζονται στη διαμόρφωση του δείκτη οξίνισης (κατά 21,7%), στο δείκτη ευτροφισμού (κατά 12,8%) και στη διαμόρφωση του δείκτη της παγκόσμια υπερθέρμανσης (κατά 4,5%). Δεδομένου του μίγματος των μεταφορών, είναι αναμενόμενες οι επιπτώσεις στη δημιουργία ρύπων που επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή (κυρίως CO₂ από τις μηχανές εσωτερικής καύσης των μεταφορικών μέσων [πλοίων και φορτηγών]). Από την άλλη πλευρά η επίδραση στο φαινόμενο οξίνισης συνδέεται περισσότερο με τα οξείδια του αζώτου από τις εκπομπές τόσο κατά τις θαλάσσιες, όσο και κατά τις χερσαίες μεταφορές.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί, πως τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου (Στάδιο 3) επηρεάζονται άμεσα από τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, που στη συγκεκριμένη περίπτωση ανέρχεται σε 20 χρόνια. Μία αύξηση στη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου θα αύξανε σημαντικά τα θετικά οφέλη στο σύνολο των δεικτών μέτρησης, δεδομένου πως δε θα διαφοροποιούνταν οι αρνητικές επιδράσεις των υπολοίπων σταδίων, ενώ ταυτόχρονα θα μεταβάλλονταν οι επιδράσεις του Σταδίου 3, που συμβάλλει ιδιαίτερα στο θετικό περιβαλλοντικά ισοζύγιο.

Από τη διαδικασία της κανονικοποίησης προέκυψε ότι ο δείκτης της θαλάσσιας οικοτοξικότητας έχει μεγαλύτερη βαρύτητα και αρνητικές τιμές, εν αντιθέσει με τους υπόλοιπους δείκτες. Μικρή εξαίρεση αποτελεί επίσης ο δείκτης ανθρώπινης τοξικότητας, ο οποίος όμως σε καμία περίπτωση δεν εμφανίζει τόσο σημαντική διαφοροποίηση από τους υπόλοιπους δείκτες.

Από τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με άλλες εργασίες της βιβλιογραφίας που ακολουθούν αντίστοιχη μεθοδολογία, προκύπτουν τα εξής:

- Η μέση τιμή του δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης που προκύπτει από μία σειρά μελετών που έγιναν το διάστημα 2000-2009 είναι 10,8 g CO₂/kWh, τιμή πολύ κοντά σε αυτήν που υπολογίστηκε για το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο, η οποία ανέρχεται σε 9,72 g CO₂/kWh.
- Ο αντίστοιχος μέσος συντελεστής χρησιμοποίησης (Capacity Factor) που προκύπτει από τις ίδιες μελέτες είναι 32,3%, με το συντελεστή χρησιμοποίησης του εξεταζόμενου αιολικού πάρκου να εμφανίζει παραπλήσιο ποσοστό, το οποίο ανέρχεται σε 33,5%.
- Οι δείκτες μέτρησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μελετών είναι δυνατό να έχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, εξαιτίας της διαφορετικής μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται, αλλά και λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε περίπτωσης. Από την σύγκριση των στοιχείων της παρούσας εργασίας με τα στοιχεία που παραθέτουν οι Martínez et al. (2009), σε μία μελέτη με κοινή μεθοδολογία και αρκετές ομοιότητες προκύπτει ότι:
 - Τα στοιχεία στους περισσότερους δείκτες δεν εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις και κινούνται σε ένα λογικό εύρος. Μεγαλύτερες διαφορές υπάρχουν στους δείκτες οικοτοξικότητας για το γλυκό και θαλασσινό νερό, όπου στη μία περίπτωση η μελέτη των Martínez et al. (2009) δίνει σημαντικά υψηλότερες τιμές και στην άλλη δίνει σημαντικά χαμηλότερες τιμές από εκείνες της παρούσας εργασίας. Αυτό ενδεχομένως

μπορεί να οφείλεται στη διάκριση των συνεπειών μεταξύ του γλυκού και θαλάσσιου οικοσυστήματος, αλλά και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δύο αιολικών πάρκων.

Είναι ιδιαίτερος σημαντικό να επισημανθεί ότι τα αποτελέσματα από την ανάλυση κύκλου ζωής για το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο είναι δυνατό να διαφοροποιηθούν σημαντικά, αν γίνουν διαφορετικές θεωρήσεις ή αν αλλάξουν τα δεδομένα στα διάφορα στάδια ανάλυσης. Για παράδειγμα μία αλλαγή στο εργοστάσιο παραγωγής θα διαφοροποιήσει έντονα τα αποτελέσματα στα πρώτα στάδια, δεδομένης της ενδεχόμενης χρήσης διαφορετικών τεχνολογικών και μεταφορικών μέσων και τη χρήση διαφορετικού ενεργειακού μίγματος. Επομένως, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προσεγγίζουν την πραγματικότητα με βάση τα δεδομένα στοιχεία του έργου, τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, καθώς και τις θεωρήσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία.

Εν κατακλείδι, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι τα στοιχεία της συγκεκριμένης εργασίας εμπεριέχουν μία προστιθέμενη αξία, η οποία είναι μεγαλύτερη για τα αιολικά πάρκα που χωροθετούνται στις γύρω περιοχές. Δεδομένου ότι η περιοχή της Ευβοίας διαθέτει μεγάλο αιολικό δυναμικό, μεγάλο μέρος του οποίου ήδη αξιοποιείται ενεργειακά, η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να αποτελέσει ένα οδηγό για την αξιολόγηση των υφιστάμενων, αλλά και των μελλοντικών εγκαταστάσεων. Σε αυτή την κατεύθυνση συμβάλλει και η αντιπροσωπευτικότητα των χαρακτηριστικών του υπό μελέτη πάρκου. Επίσης μεγάλης σημασίας για την εγκυρότητα των στοιχείων, αλλά και την αξία μελλοντικής χρήσης της παρούσας εργασίας, αποτελεί το γεγονός ότι τα στοιχεία που αναλύθηκαν, αξιοποίησαν πραγματικές καταγραφές από το φορέα του έργου.

7. Παρατηρήσεις

Τα στοιχεία των μελετών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, αποτυπώνουν συνολικά πως οι εκπομπές ρύπων και ιδίως διοξειδίου του άνθρακα επηρεάζονται άμεσα από το υλικό κατασκευής του πύργου. Η κύρια διαπίστωση είναι ότι οι πύργοι από σκυρόδεμα έχουν ενεργειακές απαιτήσεις ίσες με το 20-50 % των αντίστοιχων από χάλυβα. Επίσης, προκύπτει ότι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, αν και απαιτούν μεγαλύτερες εισροές ενέργειας και υλικών κατά τα πρώτα στάδια (επομένως συνεπάγονται μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα), η συνολική περιβαλλοντική απόδοση τους συνήθως είναι καλύτερη των αιολικών πάρκων στην ξηρά. Ως γενική διαπίστωση, και δεδομένης της μεγάλης συμμετοχής του σταδίου κατασκευής στις αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες των αιολικών πάρκων, θα μπορούσε να ειπωθεί πως μία αλλαγή στα υλικά κατασκευής των ανεμογεννητριών θα μπορούσε να εισφέρει σε μεγάλο βαθμό στη βελτίωση της συνολικής περιβαλλοντικής αξιολόγησης των εγκαταστάσεων αυτών. Επίσης ζήτημα προς περαιτέρω διερεύνηση αποτελεί το κατά πόσο τα υπεράκτια αιολικά πάρκα θα μπορούσαν να είναι προτιμητέα επιλογή από περιβαλλοντικής άποψης, έναντι των χερσαίων.

Στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, ότι έγινε μία βασική θεώρηση που ακολουθείται βέβαια και στο μεγαλύτερο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας. Η θεώρηση αυτή είναι πως μελετήθηκαν τα υλικά, το βάρος των οποίων δεν ξεπερνά ένα ποσοστό του συνολικού βάρους της ανεμογεννήτριας, καθώς θεωρείται πως είναι αντίστοιχες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και επομένως μικρής έκτασης, χωρίς να διαφοροποιούνται σημαντικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα αποτελεί η διαχείριση κατά το τελευταίο στάδιο του κύκλου ζωής κάθε έργου. Το στάδιο αυτό μπορεί να παρουσιάσει είτε θετικές, είτε αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Σίγουρα η απομάκρυνση και μεταφορά των μονάδων από την περιοχή χωροθέτησης, συνεπάγεται αρνητικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Από την άλλη πλευρά όμως, η επιλογή της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης των υλικών των αιολικών πάρκων είναι δυνατό να συνεισφέρει θετικά στη συνολική αξιολόγηση του κύκλου ζωής. Βέβαια, το ζήτημα της εναλλακτικής αξιοποίησης μετά το πέρας του χρόνου ζωής του πάρκου έχει πολλαπλές διαστάσεις που πηγάζουν από τον τρόπο και τα υλικά κατασκευής (που προσδιορίζουν εν πολλοίς τις δυνατότητες ανακύκλωσης/εναλλακτικής αξιοποίησης), έως τις δυνατότητες που παρέχει η ευρύτερη περιοχή χωροθέτησης της εγκατάστασης, σχετικά με τα συστήματα ανακύκλωσης/αξιοποίησης διαφόρων ροών αποβλήτων. Σε κάθε περίπτωση η ανακύκλωση μεγάλου μέρους των υλικών κατασκευής θεωρείται ως μια επιλογή με μεγάλο θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ενώ το είδος των υλικών (κυρίως μέταλλα, όπως ο σίδηρος, ο χάλυβας, το αλουμίνιο και ο χαλκός) καταδεικνύει τις μεγάλες δυνατότητες ανακύκλωσης, που συχνά συνδυάζουν και το οικονομικό όφελος για τον φορέα.

Παράλληλα, η τοποθεσία χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου καθορίζει σημαντικά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμά του. Αρχικά, το αιολικό δυναμικό της περιοχής επηρεάζει άμεσα τη συνολικά παραγόμενη ενέργεια, επομένως και τη θετική περιβαλλοντική συνεισφορά του έργου και ταυτόχρονα είναι δυνατό να δημιουργεί συνθήκες με έμμεσο αντίκτυπο. Το αιολικό πάρκο στην Εύβοια λόγω της μεγάλης απόστασης που το χωρίζει από το εργοστάσιο κατασκευής των ανεμογεννητριών, εμφανίζει μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα στις μεταφορές. Αν και η μεταφορά των ανεμογεννητριών έγινε με πλοία, τα οποία εξασφαλίζουν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, έναντι άλλων μέσων μεταφοράς για μεγάλες αποστάσεις, οι συνέπειες από τις μεταφορές είναι αρκετά σημαντικές στη συγκεκριμένη περίπτωση. Οι συνέπειες αυτές

φαίνονται κυρίως στο δείκτη θαλάσσιας οικοτοξικότητας, που είναι μεγαλύτερος από ότι σε άλλα παρόμοια έργα. Επιμέρους επιπτώσεις των μεταφορών επίσης επηρεάζουν και άλλους δείκτες, όπως το δείκτη παγκόσμιας υπερθέρμανσης. Η εγγύτητα επομένως της εργοστασιακής μονάδας παραγωγής και της περιοχής χωροθέτησης των ανεμογεννητριών είναι ένας παράγοντας που χρήζει προσοχής και επηρεάζει την ΑΚΖ.

Ένας άλλος παράγοντας στη συνολική εκτίμηση της ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου είναι η περιοχή παραγωγής και κατασκευής των ανεμογεννητριών, αλλά και οι περιοχές εξόρυξης και επεξεργασίας των βασικών πρώτων υλών. Για παράδειγμα, αν οι μονάδες παραγωγής των πρώτων υλών ή το εργοστάσιο παραγωγής των ανεμογεννητριών εφαρμόζουν συστήματα ορθής περιβαλλοντικής πρακτικής ή εξοικονόμησης ενέργειας, οι συνολικές περιβαλλοντικές συνέπειες μειώνονται άρδην. Επίσης σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται από τις μονάδες αυτές. Για παράδειγμα μία μονάδα παραγωγής σε μία χώρα, με ενεργειακό μίγμα που προκύπτει σε μεγάλο βαθμό από ΑΠΕ, παράγει δυναμικά πιο καθαρά προϊόντα, από μία μονάδα εγκατεστημένη σε μία περιοχή, όπου το ενεργειακό μίγμα χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη συμμετοχή συμβατικών καυσίμων.

Αντίστοιχα, η απόδοση της παραγόμενης ενέργειας ενός αιολικού πάρκου σε ένα σύστημα που χαρακτηρίζεται από τη συμμετοχή ΑΠΕ, επιφέρει μικρότερη θετική περιβαλλοντική συνεισφορά, σε σχέση με την απόδοση του ίδιου ποσού ενέργειας σε ένα σύστημα που χαρακτηρίζεται από την παραγωγή ενέργειας μέσω συμβατικών καυσίμων.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ, πως πέρα από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης, που αποτυπώνουν το «ενεργειακό ισοζύγιο» του αιολικού πάρκου στην περιοχή της Εύβοιας, θα ήταν χρήσιμο να αναφερθούν τα ζητήματα που εγείρονται από την εξέταση αυτού του θέματος. Έτσι, το γεγονός πως αρκετές μελέτες μέχρι πρόσφατα δε λάμβαναν υπόψη το στάδιο διαχείρισης των υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής των αιολικών πάρκων σε μία ΑΚΖ, περιόριζε το σκοπό και το αντικείμενο της μελέτης και παρέβλεπε τη συνεισφορά που δύναται να έχει στο σύνολο του κύκλου ζωής. Σημαντικά θέματα που σχετίζονται με αυτό το στάδιο των ανεμογεννητριών αναφέρονται κυρίως (Nies et als, 2012):

- Στις δυνατότητες μελλοντικής διαχείρισης των υλικών των ανεμογεννητριών στο πέρας του κύκλου ζωής τους, δεδομένης της αυξανόμενης τάσης εφαρμογής αιολικής ενέργειας, ως ανανεώσιμη, καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, καθώς και του μεγάλου αριθμού εγκατεστημένων ανεμογεννητριών υφιστάμενων πάρκων,
- Στις εναλλακτικές διαχείρισης των υλικών των ανεμογεννητριών στο πέρας του κύκλου ζωής τους, μέσω της ανακύκλωσης ή ανακατασκευής, με σκοπό την ανάκτηση μέρους της αξίας των υλικών και των λειτουργιών τους αντίστοιχα. Τέτοιες εναλλακτικές, ειδικότερα, περιλαμβάνουν την ανακύκλωση για την ανάκτηση υλικών, την επιδιόρθωση και αποκατάσταση για την επέκταση του χρόνου λειτουργίας, την επαναχρησιμοποίηση ολόκληρων τμημάτων και ακόμη την επισκευή και αποκατάσταση για επαναχρησιμοποίηση ολόκληρης της ανεμογεννήτριας,
- Στις κρίσιμες δραστηριότητες που αφορούν στην «αντίστροφη» εφοδιαστική αλυσίδα, όπως είναι οι μέθοδοι ανάκτησης των υλικών, η εφοδιαστική (logistics) των μεταφορών, η ποιότητα των επιστρεφόμενων υλικών και η ποιότητα των επανα-επεξεργασμένων ανεμογεννητριών,
- Στα ειδικότερα οικονομικά και επιχειρηματικά θέματα που σχετίζονται άμεσα με τις προοπτικές αξιοποίησης των ανεμογεννητριών στο πέρας του κύκλου ζωής τους.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις έχουν εξεταστεί ενδελεχώς σε άλλους τομείς, όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, τα ελαστικά, οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, αλλά απαιτούν περαιτέρω ανάλυση για την εφαρμογή τους στον τομέα των ανεμογεννητριών. Η οικονομική αξία μιας αποκατεστημένης, πλήρως λειτουργικής ανεμογεννήτριας είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αξία των επιμέρους ανακτημένων υλικών της (Nies et als, 2012). Επίσης, πρέπει να προστεθεί εδώ πως, η συνεισφορά της ανακύκλωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η συμμετοχή υλικών από ανακύκλωση στην κατασκευή νέων ανεμογεννητριών περιορίζει τις απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας, νερού και εκπομπών CO₂, ως εκ τούτου περιορίζει σημαντικά το περιβαλλοντικό της «αποτύπωμα».

Παράλειψη θα συνιστούσε, αν δεν επισημαίνονταν επίσης ότι ορισμένες περιβαλλοντικές συνιστώσες που αφορούν ένα αιολικό πάρκο δε λαμβάνονται συνήθως υπόψη κατά την εξέταση μιας ΑΚΖ. Τέτοια παραδείγματα επιπτώσεων μπορεί να είναι η ακουστική και οπτική όχληση, οι πιθανές επιπτώσεις στις χρήσεις γης, στην πανίδα και τη χλωρίδα. Οι παραπάνω επιπτώσεις θεωρείται πως εξετάζονται μέσω έτερων εργαλείων, όπως κατά το στάδιο της περιβαλλοντικής αδειοδότησης των έργων, και λειτουργούν συμπληρωματικά με την ΑΚΖ. Μπορεί οι επιπτώσεις αυτές να είναι ήσσονος σημασίας στο υπό μελέτη πάρκο, λόγω της περιοχής χωροθέτησης του έργου (μακριά από οικισμούς και προστατευόμενες περιοχές), αλλά αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι κάτι αντίστοιχο ισχύει και σε άλλες περιπτώσεις. Υπάρχουν μάλιστα αρκετά παραδείγματα όπου οι συγκεκριμένες επιπτώσεις μπορεί να είναι μείζονος και κομβικής σημασίας για την περιβαλλοντική και λειτουργική απόδοση του έργου.

Κλείνοντας, μία επιπλέον κοινή διαπίστωση από μελέτες ΑΚΖ για αιολικά πάρκα, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, είναι η μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα της όλο και μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύς των έργων. Είναι παραδεκτό από πολλούς συγγραφείς ότι όσο μεγαλύτερη είναι η εγκατεστημένη ισχύς ενός αιολικού πάρκου, τόσο περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από αυτό, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο δείκτης ενεργειακής έντασης (energy intensity) και οι εκπομπές (ισοδύναμων) ρύπων CO₂, ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πραγματικότητα, οι τελικές τιμές των παραπάνω δεικτών επηρεάζονται από ένα εύρος παραγόντων, όπως είναι η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό τους, η διάρκεια ζωής του έργου, ο συντελεστής διαθεσιμότητας των ανεμογεννητριών και οι εφαρμογές ανάκτησης υλικών και τμημάτων των ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής του (Nies et als, 2012).

Βιβλιογραφία

- Abeliotis K., Pactiti D. (2014), Assessment of the Environmental Impacts of a Wind Farm in Central Greece during its Life Cycle, *International Journal Of Renewable Energy Research*, Vol.4, No.3.
- Angelakoglou K., Botsaris P., Gaidajis G. (2013), Issues regarding wind turbines positioning: A benchmark study with the application of the life cycle assessment approach, *ScienceDirect, Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5 (2014): 7–18.
- Ardente F., Beccali M., Cellura M., Brano L. V. (2006), Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm, *ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (2008) : 200–217.
- Arvesen A., Tveten Å. G., Hertwich E., Strømman A. (2009), Life-cycle assessments of wind energy systems, *Industrial Ecology Programme (IndEcol) and Department of Energy and Process Engineering*, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), NO-7491 Trondheim, Norway.
- Asdrubali F., Baldinelli G., D’Alessandro F., Scrucca F. (2014), Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization, *ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 (2015) : 1113–1122.
- Astrup A., Boldrin A., Turconi R. (2013), Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations, *ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28 (2013) : 555–565.
- Barlow C., Liu P. (2015), An update for Wind Turbine Blade Waste Inventory, *EWEA 2015, Paris*, University of Cambridge.
- Bauer C., , Dones R., Frischknecht R., Jungbluth N. (2004), Life Cycle Assessment for Emerging Technologies: Case Studies for Photovoltaic and Wind Power, *Theecoinvent Database, Energy Supply*, Int J LCA 2004 (OnlineFirst) : 1 – 11.
- Bidstrup M. (2015), Life cycle thinking in impact assessment—Current practice and LCA gains, *ScienceDirect, Environmental Impact Assessment Review*, 54 (2015) : 72–79.
- Blanco J., Jiménez E., Martínez E., Félix S., Pellegrini S. (2008), Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method, *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, 14 (2009) : 52-63.
- Blanco J., Jimenez E., Martinez E., Pellegrini S., Sanz F. (2008), Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine, *ScienceDirect, Renewable Energy*, 34 (2009) : 667–673.
- Bonou A., Olsen S., Hauschild M. (2015), Introducing life cycle thinking in product development – A case from Siemens Wind Power, *ScienceDirect, CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64 (2015) : 45–48.

- Cherrington R., Coles S.R., Feito-Boirac A., Goodship V., Kirwan K., Meredith J., Spee F., Vuillaume A., Wooda B.M. (2012), Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe, *ScienceDirect, Energy Policy*, 47 (2012) : 13–21.
- Crawford R.H. (2009), Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield, *ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009): 2653–2660.
- European Commission (EC) (2010), Making sustainable consumption and production a reality, A guide for business and policy makers to Life Cycle Thinking and Assessment.
- Fernandes A. J., Sousa de Oliveira W. (2012), Cost analysis of the material composition of the wind turbine blades for Wobben Wind power/ENERCON GmbH model E-82, Department of Economics, Management and Industrial Engineering, University of Aveiro, *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Renewable Energy (JRSE)*.
- Guezuraga B., Zauner R., Pölz W. (2011), Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines, *ScienceDirect, Renewable Energy*, 37 (2012) : 37-44.
- Guinee J.B., Gorree M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R, Koning A., Oers L., Sleeswijk A. W., Suh S., Haes H. A., Bruijn H., Duin R., Huijbregts M., Lindeijer E., Roorda A., Bernhard L., Weidema B. (2001), Life Cycle Assessment, An operational guide to the ISO standards, *The New Dutch Guide*, Final Report 2001.
- Gunn’s Hill Windfarm Inc. (2013), Decommissioning Plan Report, Prowind Canada, Hamilton, Ontario.
- Ho W.P. L. (2001), Life Cycle Assessment and Green Purchasing, Green Council.
- Joint Research Centre (JRC, European Commission) (2010), ILCD Handbook: Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment, First edition, *International Reference Life Cycle Data System*.
- Joint Research Centre (JRC, European Commission) (2010), ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance, First edition, *International Reference Life Cycle Data System*.
- Joint Research Centre (JRC, European Commission) (2010), Making sustainable consumption and production a reality, A guide for business and policy makers to Life Cycle Thinking and Assessment.
- Jolliet O., Jolliet A ., Crettaz P., Saade - Sbeih M., Shaked S. (2016), Environmental Life Cycle Assessment, *CRC Press*.
- Koroneos C., Stylos N., Theodosiou G. (2013), Environmental impacts of the Greek electricity generation sector, *ScienceDirect, Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5 (2014) : 19–27.

- Kumar S., Uddin Md. S. (2014), Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique, *ScienceDirect, Journal of Cleaner Production*, 69 (2014) : 153-164.
- Martínez E., Sanz F., Pellegrini S., Jiménez E., Blanco J. (2009), Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method, *Life Cycle Assess*, 14 (2009): 52-63.
- Meunier F., Tremeac B. (2009), Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines, *ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009) : 2104–2110.
- Nies L. F., Ortegon K., Sutherland J. W. (2012), Preparing for end of service life of wind turbines, *SciVerse ScienceDirect, Journal of Cleaner Production*, 39 (2013) : 191-199.
- Rahnama B. (2011), Reduction of Environmental Impact Effect of Disposing Wind Turbine Blades, *Master Thesis written at Gotland University, Department of Wind Power Project Management (WPPM), Gotland*.
- Rashedi A., Sridhar I., Tseng K.J. (2012), Life cycle assessment of 50 MW wind farms and strategies for impact reduction, *SciVerse ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21 (2013) : 89–101.
- SETAC (1993), Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice.
- Schleisner L. (1999), Life cycle assessment of a wind farm and related externalities, *Renewable Energy*, 20 (2000) : 279-288.
- Sun T., Wang Y. (2011), Life cycle assessment of CO₂ emissions from wind power plants: Methodology and case studies, *SciVerse ScienceDirect, Renewable Energy*, 43 (2012) : 30-36.
- Vargas A. V., Zenon E., Oswald U., Islas J. M., Güereca L. P., Manzini F. L. (2015), Life cycle assessment: A case study of two wind turbines used in Mexico, *Applied Thermal Engineering*, 75 (2015) : 1210-1216.
- Vestas (2013), Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V90-3.0MW Wind Plant, Version 1.1, Vestas Wind Systems A/S, Denmark.
- Γεωργακέλλος Α. Δ., (1999), Ανάλυση Κύκλου Ζωής: Ένα συστηματικό όργανο στη διαχείριση του περιβάλλοντος, *Περιοδικό Σπουδαί, Τόμος 49, Τεύχος 1-4, σελ. 126-158, Πανεπιστήμιο Πειραιώς*.
- Καραμπάτσου Χ. (2013), Συγκριτική μελέτη θερμικών ηλιακών συστημάτων για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης στην περιοχή των Χανίων: Ανάλυση κύκλου ζωής, *Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά*.
- Κορωναίος Χρ. (2008), Ανάλυση Κύκλου Ζωής: Η ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Προσέγγιση στην Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη, *Σημειώσεις, Διεπιστημονικό*

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ», ΕΜΠ.

- Κωνσταντίνος Γ. (2014), Εισαγωγή στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής, *Πρόχειρες Σημειώσεις Μαθήματος*, Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ», ΕΜΠ.
- Μάντζου Γ., Μπενέτου Π., Χαρίτου Α. (2006), Εκτίμηση Κύκλου Ζωής (LCA), *Εργασία στο μάθημα «Χημεία και Καθημερινή Ζωή. Η Πράσινη Προσέγγιση»*, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ», ΕΚΠΑ-ΑΠΘ.
- Μαρτινόπουλος Γ., Ekhrawat M., Τσιλιγκιρίδης Γ., Τσιπάς Δ. (2002), Λογισμικά εργαλεία (eco tools) για την ανάλυση κύκλου ζωής, Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Ιστοσελίδες

- ΡΑΕ, Γεωπληροφοριακός Χάρτης
<http://www.rae.gr/geo/>
- Υπηρεσία Εξυπηρέτησης Επενδυτών για Έργα ΑΠΕ
<http://www.resoffice.gr/file/reg/view.jsp?mas=20010716025>
- EWEA, 2011, Life Cycle Assessment of the Wind Turbines
<http://www.scribd.com/doc/82064570/EWEA-2011-PO-038-Life-Cycle-Assessment-of-the-Wind-Turbines#scribd>
- EWEA, 2015, LCA in Wind Energy: Environmental Impacts through the Whole Chain,
<http://www.wind-energy-the-facts.org/lca-in-wind-energy.html>
- Marine Traffic, Voyage Planner
<http://www.marinetraffic.com/>
- OpenLCA (Free, professional Life Cycle Assessment (LCA) and footprint software)
<http://www.openlca.org/>
- VESTAS, Sustainability
<https://www.vestas.com/en/about/sustainability>
- Wind Energy, The Facts
<http://www.wind-energy-the-facts.org/lca-in-wind-energy.html>
- Wind Turbine Models, NEG Micon NM 44/750
<http://en.wind-turbine-models.com/turbines/1299-neg-micon-nm-44-750>