

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών *‘Διαχείριση και
Προστασία Περιβάλλοντος’*

Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικών Σταθμών παραγωγής
ηλεκτρικής ενέργειας. Περιπτωσιακή μελέτη
εγκαταστάσεων Αιολικών Σταθμών στην Ελληνική
επικράτεια**

Χριστόφορος Καρράς

**Επιβλέπων Καθηγητής
Σίσσυ Ευθυμιάδου**

Ιούνιος 2018

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών 'Διαχείριση και
Προστασία Περιβάλλοντος'**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικών Σταθμών παραγωγής
ηλεκτρικής ενέργειας. Περιπτωσιακή μελέτη
εγκαταστάσεων Αιολικών Σταθμών στην Ελληνική
επικράτεια**

Χριστόφορος Καρράς

**Επιβλέπων Καθηγητής
Σίσσυ Ευθυμιάδου**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη διαχείριση και προστασία περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μάιος 2018

Περίληψη

Η AKZ των αιολικών σταθμών στην Ελληνική επικράτεια στοχεύει στην παρακολούθηση και την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας που εγκαθίστανται στην Ελλάδα.

Ο σκοπός της ανάλυσης κύκλου ζωής ενός αιολικού σταθμού παραγωγής, είναι η μελέτη όλων των παραμέτρων, διεργασιών και μεθόδων οι οποίες συνιστούν το υπό μελέτη προϊόν ή σύστημα. Διακρίνονται πέντε κομβικά σημεία τα οποία είναι η εξαγωγή πρώτων υλών για την κατασκευή των εξαρτημάτων, η κατασκευή της εγκατάστασης, η φάση μεταφοράς και ανέγερσης των Α/Γ, η λειτουργία και το τέλος της ωφέλιμης ζωής. Για την κάθε διεργασία γίνεται εκτίμηση των περιβαλλοντικών φορτίων που αυτές συνεισφέρουν στο σύστημα. Η AKZ έγινε με βάση το πρότυπο ISO (14040, 2006α) το οποίο περιλαμβάνει την αξιολόγηση των σημαντικών περιβαλλοντικών ροών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η φάση της παραγωγής και κατασκευής των βασικών μερών και εξαρτημάτων δεσπόζει ως προς τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις ροές των υλικών του αιολικού σταθμού. Η αποφυγή των επιπτώσεων κατά το τέλος του κύκλου ζωής, λόγω της ανακύκλωσης υλικών παρέχει σημαντικές περιβαλλοντικές πιστώσεις. Η λειτουργία και συντήρηση της εγκατάστασης και η ανέγερση αποτελούν πολύ λιγότερο σημαντικά στάδια του κύκλου ζωής. Οι επιπτώσεις των μεταφορών των ανεμογεννητριών από τις τοποθεσίες παραγωγής τους προς το χώρο ανέγερσης του αιολικού πάρκου είναι επίσης αρκετά σημαντική. Τα μέρη της ανεμογεννήτριας που συμβάλλουν πιο ουσιαστικά στις επιπτώσεις του κύκλου ζωής είναι κυρίως τα μεγαλύτερα μεταλλικά μέρη του σταθμού, όπως τα τμήματα του πύργου, η νασέλα, τα φτερά, τμήματα του χώρου εγκατάστασης όπως τα θεμέλια, ο μετασχηματιστής κ.α.. Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου γίνεται η κατασκευή των ανεμογεννητριών συνεισφέρουν σημαντικά σε όλες τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των καυσίμων, της ηλεκτρικής ενέργειας και των υλικών που καταναλώνεται σε αυτές. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του κύκλου ζωής δείχνουν επίσης τη σημασία της σωστής χωροθέτησης των αιολικών εγκαταστάσεων ως προς τις ανεμολογικές συνθήκες όπου οι ανεμογεννήτριες θα λειτουργήσουν. Η διάρκεια ζωής του αιολικού σταθμού είναι επίσης ένας κυρίαρχος παράγοντας κατά τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της παραγωγής ηλεκτρισμού ανά kWh από το αιολικό πάρκο

Summary

The life cycle analysis of the wind turbine power plants in Greece aims to study and validate the environmental performance of these plants which are going to be installed in the country.

The scope of the life cycle analysis of a wind turbine power plant is the detailed examination of all parameters, processes and methods the system of product consists of. Five main key points are considered. These are the extraction and consumption of the resources for the manufacturing of the equipment of the plant, the construction of the plant, the transportation and erection of the wind turbines, the operation and maintenance phase, and the end of life phase with the decommissioning of the plant and the recycling of its parts. Within the LCA, an assessment of the environmental impacts each phase contributes to the whole system of the power plant is performed. The LCA has been executed based to the international standards according to ISO (14040, 2006α), which includes the study of the main environmental flows and impacts of the whole life cycle.

The results of the LCA show that the production phase dominates all potential environmental impacts and the inventory flows the wind plant. Additionally, the avoided potential impacts associated with end-of-life recycling also provide substantial environmental credits. Operation, maintenance, installation and servicing are much less significant stages in the life cycle. The impacts of transport of the turbine from production locations to the wind plant erection site are also reasonably significant. The parts of the turbine that contribute most significantly to the life cycle impacts are the largest metal parts within the power plant in particular this relates to the turbine tower, nacelle, blades, site parts, transformer and foundations. When considering the wind turbine production facilities, the results show that the impacts of fuels, electricity and consumables contribute significantly to all potential environmental impacts. The results of the life cycle assessment also indicate the importance of wind plant siting and wind conditions that the turbines operates. The power plant lifetime is also a dominant factor when determining the impacts of the electricity production per kWh from the wind plant.

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στη σύζυγό μου και στους γιούς μας Δημήτρη και Άγγελο.

Ιδιαιτέρως θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τη σύζυγό μου Γιώτα για την αμέριστη συμπαράσταση, και την ουσιαστική, ηθική και ψυχολογική βοήθεια που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση του προγράμματος σπουδών.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Πόσο περιβαλλοντικά καθαρή είναι η ενέργεια που παράγεται από αιολικούς σταθμούς	2
1.2	Σημασία και αναγκαιότητα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ)	4
1.3	Σκοπός και Στόχοι της AKZ	5
1.3.1	Στόχος της AKZ των αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	6
1.3.2	Σκοπός της AKZ των αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	6
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	10
2.1	Εισαγωγή	10
2.1.1	Χαρακτηριστικά της βιβλιογραφικής ανασκόπησης	10
2.2	Ιστορική αναδρομή	13
2.3	Θεωρητικό πλαίσιο	16
2.3.1	Γενική εκτίμηση του θεωρητικού πλαισίου	16
2.4	Βιβλιογραφική ανασκόπηση πηγών	17
2.4.1	Πηγές δεδομένων	17
2.4.2	Πηγές μεθοδολογικής ανάλυσης	17
2.5	Διεθνής πραγματικότητα	18
2.6	Ελληνική πραγματικότητα	19
2.7	Συμπεράσματα	19
3	Μεθοδολογία	21
3.1	Σκοπός- Στόχοι	21
3.1.1	Στόχος της AKZ	21
3.1.2	Σκοπός της AKZ	22
3.2	Προσδιορισμός του υπό μελέτη συστήματος	24
3.2.1	Μονάδα λειτουργίας – Α/Γ	25
3.2.2	Περιγραφή του συστήματος	26
3.3	Στάδια κύκλου ζωής	27
3.3.1	Κατασκευή	28
3.3.2	Ανέγερση εγκατάστασης	28
3.3.3	Φάση λειτουργίας της εγκατάστασης	29
3.3.4	Τέλος ωφέλιμου χρόνου ζωής	30
3.4	Τεχνολογική κάλυψη	30
3.5	Χρονική κάλυψη	31
3.6	Γεωγραφική Κάλυψη	31
3.7	Συλλογή και πληρότητα των δεδομένων	32
3.8	Κριτήρια αποκλεισμού	34
3.9	Υποθέσεις	35
3.9.1	Χρόνος ζωής των Α/Γ και των λοιπών μερών της εγκατάστασης	36
3.9.2	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	36
3.9.3	Εισροές πρώτων υλών	37
3.9.4	Διαχείριση τέλους ζωής	38
3.9.5	Αέριο εξαφθοριούχο θείο (SF ₆)	40
3.9.6	Θεμελιώσεις	41
3.9.7	Ηλεκτρικά/Ηλεκτρονικά εξαρτήματα στην Α/Γ	41
3.9.8	Μεταφορές	42
3.9.9	Ιδιόκτητοι αιολικοί σταθμοί από κατασκευαστές Α/Γ	43
3.10	Κατανομή των δεδομένων	44
3.11	Ανάλυση των δεδομένων	45
3.12	Μοντελοποίηση των σταδίων του κύκλου ζωής	45

3.13	Κατηγορίες εκτίμησης των επιπτώσεων και αντίστοιχες μετρήσεις.....	46
3.14	Ερμηνεία της ΑΚΖ.....	50
3.15	Κριτική επισκόπηση.....	52
4	Αποτελέσματα	54
4.1	Ανάλυση υλικών αιολικού σταθμού αποτελούμενο από Α/Γ ισχύος 2 MW.....	54
4.2	Εκτίμηση των επιπτώσεων.....	60
4.2.1	Σύνοψη των αποτελεσμάτων.....	60
4.2.2	Ανάλυση αποτελεσμάτων: κατηγορίες επιπτώσεων.....	61
4.2.2.1	Εξάντληση των αβιοτικών πόρων (Στοιχείων).....	63
4.2.2.2	Εξάντληση Αβιοτικών πόρων (ορυκτά καύσιμα).....	64
4.2.2.3	Δυναμικό Οξίνησης.....	65
4.2.2.4	Δυναμικό ευτροφισμού.....	66
4.2.2.5	Δυναμικό οικοτοξικότητας αποθεμάτων γλυκού νερού.....	68
4.2.2.6	Δυναμικό παγκόσμιας υπερθέρμανσης.....	69
4.2.2.7	Δυναμικό ανθρώπινης τοξικότητας.....	70
4.2.2.8	Δυναμικό οικοτοξικότητας θαλασσίων υδάτων.....	71
4.2.2.9	Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικής οξείδωσης.....	73
4.2.2.10	Δυναμικό οικοτοξικότητας χερσαίων οικοσυστημάτων.....	74
4.2.3	Ανάλυση αποτελεσμάτων: Δείκτες μη περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	75
4.2.3.1	Κατανάλωση νερού.....	75
4.2.3.2	Πρωτογενής ενέργεια από ανανεώσιμες πρώτες ύλες (απόλυτη θερμική αξία)...	76
4.2.3.3	Πρωτογενής ενέργεια από ορυκτούς πόρους (απόλυτη θερμική αξία).....	77
4.2.3.4	Ανακυκλωσιμότητα.....	78
4.3	Αποσβέσεις ενέργειας αιολικού σταθμού παραγωγής.....	79
5	Ανάλυση - σχολιασμός αποτελεσμάτων	82
5.1	Αποτελέσματα και σημαντικά ευρήματα.....	82
5.2	Ανάλυση ευαισθησίας της ΑΚΖ.....	88
5.2.1	Χρόνος ζωής του αιολικού σταθμού.....	88
5.2.2	Ύψος πλήμνης 95 μέτρων.....	90
5.2.3	Εξαρτήματα που αντικαθίστανται στη διάρκεια ζωής του σταθμού.....	91
5.2.4	Λειτουργία των Α/Γ του αιολικού σταθμού με αυξημένη ισχύ στα 2,2 MW.....	92
5.2.5	Αποστάσεις μεταφορών από το χώρο παραγωγής έως το χώρο εγκατάστασης...	94
5.2.6	Απόσταση του χώρου ανέγερσης του αιολικού σταθμού από το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	96
5.2.7	Θεμελιώσεις υψηλής στάθμης υπογείων υδάτων.....	97
5.2.8	Πιθανό περιστατικό έκρηξης ηλεκτρικού διακόπτη ισχύος (περιέχει SF6).....	98
5.2.9	Πιθανές επιδράσεις από τη μέθοδο ανακύκλωσης.....	99
5.2.10	Πιθανές επιδράσεις από την κατανάλωση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας στο χρόνο ζωής.....	100
5.3	Έλεγχοι ποιότητας των δεδομένων.....	101
5.4	Συμπεράσματα και προτάσεις.....	105
	Βιβλιογραφία	106

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες τα ενεργειακά ζητήματα γίνονται όλο και πιο σημαντικά και αφορούν την ορθολογική χρήση των διαθέσιμων πηγών, τις επιπτώσεις στο περιβάλλον λόγω της έκλυσης ρύπων και την σπατάλη μη ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων (Sherwani et al., 2010). Η εξέλιξη των συστημάτων παραγωγής ενέργειας στοχεύει στην αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών και καλύπτουν τους όλο και πιο αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς (Sherwani et al., 2010). Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των συστημάτων διανομής και των συστημάτων παραγωγής με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), οι απαιτήσεις περιορισμού των αερίων ρύπων και η περιορισμένη χωρητικότητα των υφιστάμενων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και η αναδόμηση και απορρύθμιση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχουν οδηγήσει σε αυξημένο ενδιαφέρον για καινοτόμες ενεργειακές τεχνολογίες (Pehnt, 2006). Η παραγωγή ενέργειας με ΑΠΕ, και κυρίως η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, καθίσταται συνεχώς αυξανόμενη και χρήσιμη στην παγκόσμια αγορά ενέργειας (Martinez et al., 2009, Smoucha et al., 2016). Τα τελευταία χρόνια οι ΑΠΕ έχουν κερδίσει την νομική υποστήριξη πολλών κυβερνήσεων, κυρίως με την μορφή σταθερών και διαρκών οικονομικών ενισχύσεων (Martinez et al., 2009). Πολλές χώρες έχουν θεσπίσει πολιτικές προώθησης των ΑΠΕ με σκοπό να καλύψουν τους στόχους που απορρέουν από διεθνείς συμβάσεις όπως οι διεθνείς συμβάσεις για το κλίμα Kyoto Protocol (1998) και Paris Agreement (2015) ή οι ευρωπαϊκές συμβάσεις EU 2020, EU 2030 και EU2050. (Sherwani et al., 2010). Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη των εγκαταστάσεων αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και την αξιοσημείωτη συμμετοχή τους στη παραγωγή ενέργειας σε αρκετές χώρες (Martinez et al., 2009). Σε επίπεδο ευρωπαϊκής ένωσης το ποσοστό της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος αυξήθηκε από 2,4% το 2000 σε 15,6 % το 2015 αποτελώντας την τρίτη μεγαλύτερη εγκατεστημένη μορφή ενέργειας μετά τις μονάδες φυσικού αερίου και άνθρακα (EWEA, 2015). Την τελευταία εικοσαετία (περίοδος 1995-2015), οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας έχουν αυξηθεί κατά 37,5 GW καθιστώντας την αιολική ενέργεια σε ηγέτη των νέων εγκαταστάσεων (EWEA, 2015).

1.1 Πόσο περιβαλλοντικά καθαρή είναι η ενέργεια που παράγεται από αιολικούς σταθμούς

Η μεγάλη ανάπτυξη των εγκαταστάσεων και οι πολύ αισιόδοξες προβλέψεις που γνωρίζει ο κλάδος της αιολικής ενέργειας καθιστά επιτακτική την ανάγκη να αυξηθεί η κατανόηση των πολιτών στη συγκεκριμένη ενεργειακή πηγή και τον τρόπο εκμετάλλευσής της (Martinez et al., 2009). Εν γένει οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζονται σαν «καθαρή» ενέργεια, μη λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη κατασκευή των εγκαταστάσεων (Ardente et al., 2008). Η διαδικασία της κατασκευής εγκαταστάσεων ΑΠΕ, όπως και κάθε κατασκευαστική διαδικασία, εμπεριέχει κατανάλωση ενέργειας και φυσικών πόρων όπως και εκλύει απόβλητα και ρύπους στο περιβάλλον (Ardente et al., 2008). Οι υφιστάμενες τεχνολογίες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας (ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα) έχουν σημαντικά μικρότερη επίπτωση στο περιβάλλον σε σχέση με τις παραδοσιακές μονάδες παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Παρόλο που οι αιολικοί σταθμοί ουσιαστικά δεν εκλύουν ρύπους στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις κατά τις φάσεις πριν και μετά το τέλος της λειτουργικής τους ζωής (Guezuraga et al., 2012, Ardente et al., 2008). Το πρόβλημα που ανακύπτει είναι το να ποσοτικοποιηθεί σε τι βαθμό είναι μια καθαρή πηγή ενέργειας (Martinez et al., 2009). Ως εκ τούτου είναι σημαντική μια εκτίμηση των επιπτώσεων προκειμένου να γίνουν αντιληπτές οι επιβαρύνσεις που προκαλούνται στο περιβάλλον και σχετίζονται με τον κύκλο ζωής των αιολικών σταθμών, από την εξαγωγή των πρώτων υλών από τα ορυκτά αποθέματα της γης προκειμένου να κατασκευαστούν τα διάφορα μέρη τα οποία αποτελούν την ανεμογεννήτρια (Α/Γ), μέχρι την φάση του παροπλισμού του αιολικού σταθμού (Guezuraga et al., 2012).

Η θεώρηση των ενεργειακών απαιτήσεων για την κατασκευή των συστημάτων παραγωγής ενέργειας είναι απαραίτητη στο στρατηγικό σχεδιασμό και στη χάραξη πολιτικών (κυρίως για τον υπολογισμό και σύγκριση κινδύνων και την εκτίμηση της βιωσιμότητας) (Ardente et al., 2008). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση για υποκατάσταση μονάδων παραγωγής, ενεργοποίηση / μεταγωγή ενεργειακών πηγών ή για σενάρια αύξησης της ενεργειακής ζήτησης ενός ενεργειακού συστήματος (Ardente et al., 2008).

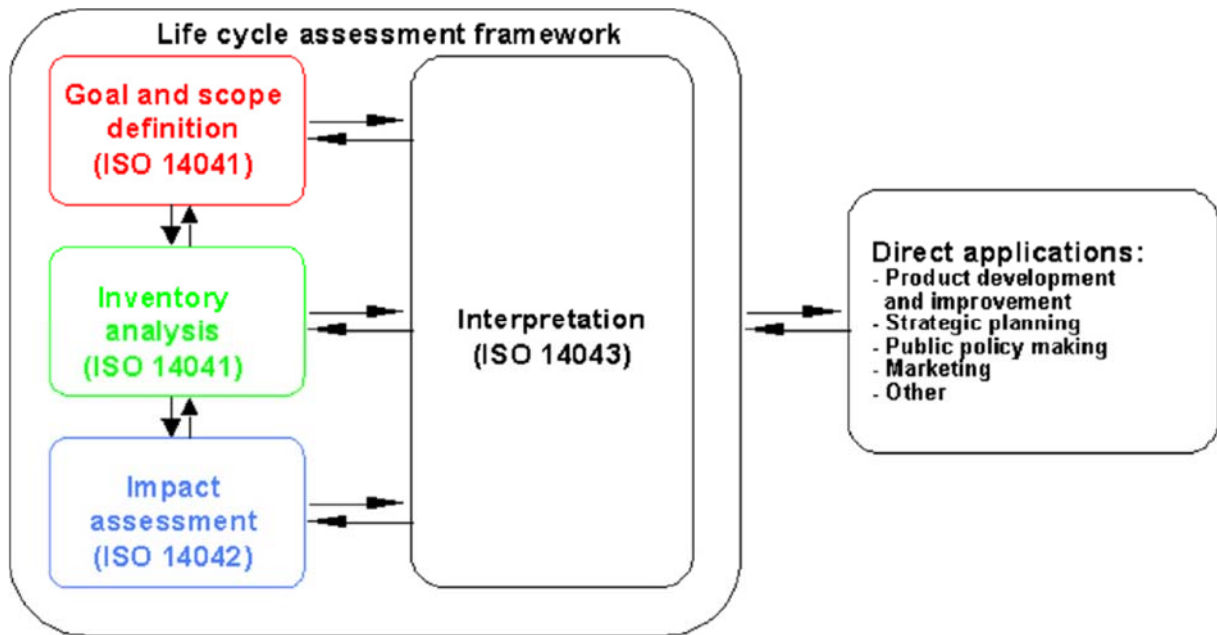
Η περιβαλλοντική ανάλυση των αιολικών σταθμών αντιπροσωπεύει έναν οδηγό για την υιοθέτηση αντίστοιχης τεχνολογίας εγκαταστάσεων σε μεγάλη κλίμακα. Επιπλέον, γίνονται αντιληπτοί ποιοι τομείς έχουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις και ποιοι τις μεγαλύτερες δυνατότητες εξέλιξης (Ardente et al., 2008).

Προκειμένου να κατευθυνθούν σωστά οι μελλοντικές επενδύσεις είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητό το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της προβλεπόμενης ενεργειακής ζήτησης, δίνοντας έμφαση σε βιώσιμες λύσεις παραγωγής ενέργειας (Evans et al., 2009). Το πλήρες περιβαλλοντικό αποτύπωμα υπολογίζεται για ολόκληρο το χρόνο ζωής της ενεργειακής αλυσίδας, από την εξόρυξη και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, τις άμεσες και έμμεσες εκπομπές ρύπων που απαιτούνται, τη διάθεση των αποβλήτων και την ανακύκλωση (Yang and Chen, 2016). Στην εκτίμηση, ανά τμήμα της αλυσίδας, κατάλληλοι δείκτες θα πρέπει να υιοθετηθούν ώστε να επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων. Οι δείκτες θα πρέπει να μετρούν περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις, τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, την απομείωση των ορυκτών πόρων, τη διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την προστιθέμενη αξία που προσδίδουν στην οικονομία (Evans et al., 2009; Savino et al., 2017).

Σημαντική έρευνα έχει γίνει από την επιστημονική κοινότητα για να γίνουν κατανοητές οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και την οικονομία από την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η πλειονότητα των ερευνών σκοπεύει στην ποσοτικοποίηση παραμέτρων όπως οι εκπομπές ρύπων, η περίοδος ενεργειακής απόσβεσης και το κόστος. Πολλοί ερευνητές στρέφονται στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) για συγκεκριμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η AKZ είναι ένα διεθνώς αναγνωρισμένο εργαλείο για την εκτίμηση των επιπτώσεων ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας. Η AKZ των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπει την απευθείας σύγκριση ενός φάσματος επιπτώσεων αναλύοντας αυτές σε σχετικές συνέπειες. Υπάρχουν μέθοδοι που ελέγχουν την βιωσιμότητα όπως ανάλυση εισροών - εκροών, ισοζύγια μάζας και ενέργειας και μέτρηση της ενσωματωμένης ενέργειας. Πάντως η AKZ είναι συνδυασμός αυτών των μεθόδων και θεωρείται η πιο αναλυτική διαθέσιμη μέθοδος (Evans et al., 2009).

1.2 Σημασία και αναγκαιότητα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ)

Η AKZ είναι μια τεχνική εκτίμησης διαφόρων θεμάτων που σχετίζονται με την ανάπτυξη ενός προϊόντος και τις πιθανές επιπτώσεις του σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Οι μελέτες που εφαρμόζουν την AKZ θα πρέπει συστηματικά και αποτελεσματικά να αναγνωρίζουν όλα τα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν από τη χρήση ενός προϊόντος ή τη λειτουργία ενός συστήματος. Το βάθος της έρευνας, οι λεπτομέρειες που αναλύονται και ο χρονικός ορίζοντας που στοχεύει μια AKZ μπορούν να ποικίλουν σε μεγάλο εύρος, ανάλογα με τους στόχους και τους σκοπούς της μελέτης. Ο σκοπός, οι παραδοχές, η ποιοτική ανάλυση των δεδομένων, η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της AKZ πρέπει να είναι ξεκάθαρα. Η μεθοδολογία της AKZ πρέπει να επιδέχεται την ενσωμάτωση νέων επιστημονικών ευρημάτων και βελτιώσεων στην αιχμή της τεχνολογίας. Το ισχυρό σημείο μιας AKZ είναι το ότι προσεγγίζει με ένα ολιστικό τρόπο το υπό μελέτη προϊόν ή σύστημα και δίνει τη δυνατότητα στο μελετητή να αποφύγει παραπλανητικά αποτελέσματα λόγω αδυναμίας εκτίμησης όλων των παραμέτρων (Varun et al., 2009). Τα αποτελέσματα σχετίζονται με τη χρήση ενός προϊόντος και η μέθοδος επιτρέπει επίσης τη σύγκριση μεταξύ εναλλακτικών επιλογών. Η AKZ αποτελείται από τέσσερα θεμελιώδη στάδια. Το πρώτο περιλαμβάνει τη διατύπωση του στόχου και του σκοπού της ανάλυσης. Το επόμενο στάδιο είναι η απογραφή των δεδομένων, η εκτίμηση των επιπτώσεων και η εξαγωγή αποτελεσμάτων όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1 (Tremeac and Meunier, 2009, Varun et al., 2009).



Διάγραμμα 1:Στάδια της Ανάλυσης κύκλου ζωής

1.3 Σκοπός και Στόχοι της ΑΚΖ

Ο στόχος της ΑΚΖ θα πρέπει να δηλώνει απερίφραστα την προβλεπόμενη εφαρμογή, τους λόγους για τους οποίους γίνεται η ΑΚΖ και το κοινό στο οποίο απευθύνεται η μελέτη. Το επόμενο στάδιο της ΑΚΖ είναι ο καθορισμός του σκοπού της ανάλυσης. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040 (ISO, 2006), για να καθοριστεί ο σκοπός της ΑΚΖ πρέπει να διερευνηθούν οι παρακάτω παράμετροι:

- Οι λειτουργίες και παράμετροι του υπό μελέτη συστήματος ή προϊόντος.
- Καθορισμός της μονάδας αναφοράς. Αυτό περιλαμβάνει τον καθορισμό μιας μονάδας αναφοράς με την οποία όλες οι εισροές και εκροές του συστήματος θα είναι συσχετισμένες. Αυτή η μονάδα αναφοράς ονομάζεται λειτουργική μονάδα και παρέχει ξεκάθαρη, πλήρη και ακριβή περιγραφή του προϊόντος ή της υπηρεσίας που μελετάται. Η υιοθέτηση της μονάδας επιτρέπει τη σωστή ερμηνεία διαδοχικών αποτελεσμάτων (Tremeac, and Meunier, 2009).
- Το προϊόν ή το σύστημα που θα μελετηθεί και τα όρια αυτού.
- Κατανομή των διαφορετικών διαδικασιών/ διεργασιών που απαρτίζουν το υπό μελέτη προϊόν ή σύστημα.
- Ο τύπος των επιπτώσεων και η μεθοδολογία εκτίμησης των επιπτώσεων στο περιβάλλον.

- Τα δεδομένα που απαιτούνται για την ανάλυση, τους υφιστάμενους περιορισμούς και τις απαραίτητες υποθέσεις.
- Καθορισμός του είδους και της ποιότητας των δεδομένων που θα αναζητηθούν.
- Η κριτική επισκόπηση και ο τύπος της τελικής αναφοράς της ανάλυσης.

Ο σκοπός της ΑΚΖ θα πρέπει να είναι επαρκώς προκαθορισμένος, ώστε να εξασφαλίζει ότι το εύρος, το βάθος και η λεπτομέρεια της μελέτης είναι συμβατά και ικανά να οδηγήσουν προς τον προκαθορισμένο στόχο (ISO, 2006; Pennington et al., 2004).

1.3.1 Στόχος της ΑΚΖ των αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ΑΚΖ των αιολικών σταθμών στην Ελληνική επικράτεια στοχεύει στην παρακολούθηση και την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας που εγκαθίστανται στην Ελλάδα. Οι εγκαταστάσεις αυτές παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες αλλά και ουσιαστικές διαφορές με αντίστοιχες εγκαταστάσεις ανά την υφήλιο. Οι διαφορές εντοπίζονται κυρίως στον τρόπο χωροθέτησής τους, το μέγεθος και τη διασπορά των εγκαταστάσεων αλλά και στους περιορισμούς από το ανάγλυφο της Ελλάδας. Μέσα από την ΑΚΖ θα αναδειχθούν τα περιθώρια βελτίωσης των εγκαταστάσεων, που θα στοχεύουν στην ορθή λήψη αποφάσεων από τον αντίστοιχο βιομηχανικό τομέα, όσο και στη χάραξη βέλτιστης πολιτικής από κυβερνητικούς φορείς αλλά και μη κυβερνητικές οργανώσεις (τοπικοί φορείς πολιτών, περιβαλλοντικές οργανώσεις κ.α.) (Τσουκαλάς, 2009). Τέλος, από την ΑΚΖ γίνεται ξεκάθαρη η οικολογική ταυτότητα των αιολικών σταθμών σε σύγκριση με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας, πράγμα που συμβάλλει στην βελτίωση της εικόνας των εταιρειών που εκμεταλλεύονται έργα αντίστοιχης τεχνολογίας όσο και στην κατάρριψη μύθων και στερεοτύπων που διαδίδονται στις τοπικές κοινωνίες και αποτελούν τροχοπέδη στην περεταίρω ανάπτυξη τέτοιων έργων.

1.3.2 Σκοπός της ΑΚΖ των αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο σκοπός της ανάλυσης κύκλου ζωής ενός αιολικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι η ενδεδειγμένη και αναλυτική μελέτη όλων των παραμέτρων, διεργασιών και μεθόδων οι οποίες συνιστούν το υπό μελέτη

προϊόν ή σύστημα. Στην περίπτωση της μελέτης ενός αιολικού σταθμού θα πρέπει να διερευνήσουμε όλες τις φάσεις του συστήματος για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής. Μπορούμε να διακρίνουμε πέντε κομβικά σημεία τα οποία είναι η φάση των μελετών, η φάση της κατασκευής της εγκατάστασης και των συνοδών έργων υποδομής, η φάση της κατασκευής, μεταφοράς και ανέγερσης των Α/Γ στο χώρο εγκατάστασης, η φάση της λειτουργίας και η φάση του τέλους της ωφέλιμης ζωής και απεγκατάστασης του εξοπλισμού. Η κατανομή του συνόλου των δραστηριοτήτων στις πέντε αυτές διακριτές φάσεις διευκολύνει την ΑΚΖ, καθώς οι επιμέρους διεργασίες μελετώνται ξεχωριστά και αποφεύγεται ο κίνδυνος να γίνει παράβλεψη κάποιας από τις διεργασίες (με μικρή ή περιορισμένη συμμετοχή στο όλο σύστημα). Επίσης οι επιμέρους διεργασίες (φάσεις) ταυτίζονται με αντίστοιχες φάσεις από μελέτες άλλων συστημάτων, όπου έχουν μελετηθεί διεξοδικά στο παρελθόν από την επιστημονική κοινότητα, και υπάρχει επαρκής πληροφορία για την ΑΚΖ. Για παράδειγμα, η φάση των μελετών ενός αιολικού σταθμού δεν διαφοροποιείται αρκετά από την αντίστοιχη φάση μελέτης ενός χιονοδρομικού κέντρου ή μιας μελέτης για κατασκευή νέας οδοποιίας σε ένα ορεινό περιβάλλον. Επίσης η κάθε επιμέρους διεργασία αποτελεί από μόνη της και ένα αυτόνομο σύστημα. Παράδειγμα, η κατασκευή, μεταφορά και ανέγερση της Α/Γ, είναι μια διεργασία η οποία έχει διεξοδικά μελετηθεί και υπάρχει σχετική διεθνής βιβλιογραφία. Η διεργασία αυτή είναι σχετικά κοινή οπουδήποτε και αν γίνει η εγκατάσταση (χώρες με έντονο ανάγλυφο, νησιωτικές περιοχές κ.α.).

Για την κάθε επιμέρους διεργασία που αναλύεται γίνεται εκτίμηση των περιβαλλοντικών φορτίων που αυτές συνεισφέρουν στο σύστημα. Γίνεται εκτίμηση των πρώτων υλών που απαιτούνται για την κάθε διεργασία, καθώς επίσης και για την ενέργεια που το σύστημα απορροφά. Επίσης γίνεται εκτίμηση των εκπομπών ρύπων προς το περιβάλλον από κάθε φάση. Από τη φάση της λειτουργίας γίνεται εκτίμηση της ενέργειας που εκτιμάται ότι θα παράγει το αιολικό πάρκο στον ωφέλιμο χρόνο ζωής του και των αποβλήτων που θα παραχθούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Τέλος, κατά τη φάση της αποσυναρμολόγησης και αποκατάστασης γίνεται εκτίμηση της ενέργειας που απαιτεί η διεργασία, των πρώτων υλών που μπορούν να ανακυκλωθούν αλλά και των αποβλήτων που θα προκύψουν. Συνολικά στην ΑΚΖ ενός αιολικού πάρκου μελετάμε τις εξής εισροές/εκροές στο σύστημα.

Ενέργεια: Το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας προκύπτει από την ενέργεια που καταναλώνεται (εισροή) σε όλες τις φάσεις του υπό μελέτη συστήματος αφαιρώντας την

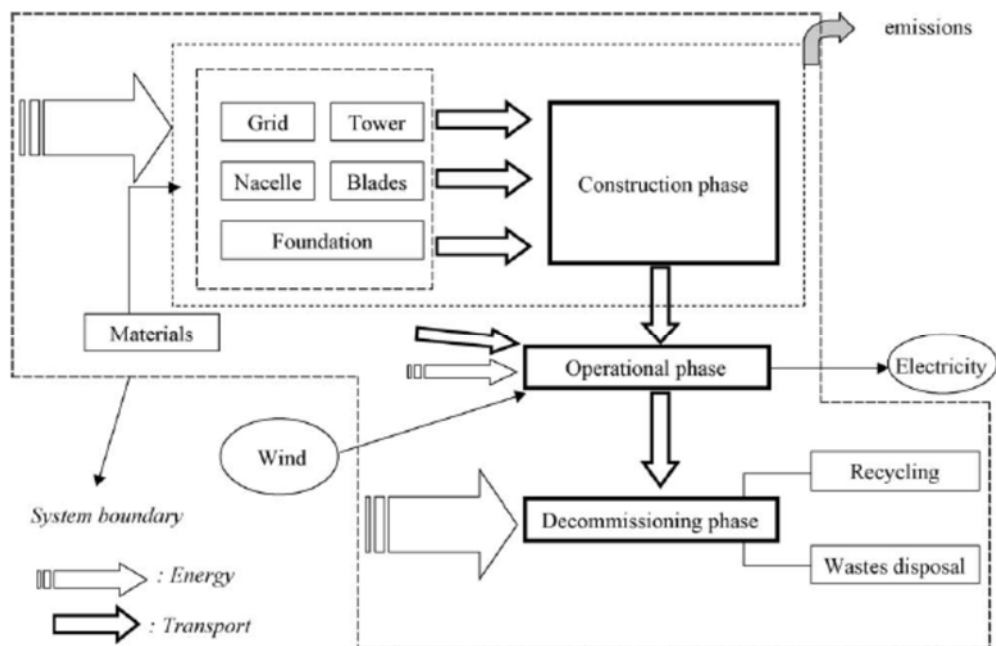
ενέργεια που παράγεται κατά το χρόνο ζωής (λειτουργία) του αιολικού σταθμού (εκροή). Ως εισροή ενέργειας εννοούμε την ενέργεια που καταναλώνεται κατά την κατασκευή των μερών και εξαρτημάτων των Α/Γ, την ενέργεια που καταναλώνεται για την κατασκευή των δρόμων, των ηλεκτρικών δικτύων διασύνδεσης, και λοιπών συνοδών έργων ενός αιολικού σταθμού, την ενέργεια που καταναλώνεται κατά την ανέγερση των Α/Γ, την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη φάση λειτουργίας του αιολικού σταθμού και τέλος την ενέργεια που απαιτεί η αποσυναρμολόγηση, ανακύκλωση και αποκατάσταση του χώρου εγκατάστασης του αιολικού σταθμού.

Πρώτες ύλες: Σαν εισροή πρώτων υλών υπολογίζουμε αυτές τις πρώτες ύλες που απαιτούνται στην κατασκευή των Α/Γ, των έργων υποδομής και των συνοδών έργων, αλλά και τις πρώτες ύλες που απαιτούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αιολικού σταθμού. Σαν εκροές του συστήματος λογίζονται οι πρώτες ύλες που θα προκύψουν από την ανακύκλωση των εξαρτημάτων μετά το τέλος της ωφέλιμης ζωής του αιολικού πάρκου.

Απόβλητα: Τα απόβλητα είναι εκροές του συστήματος, και είναι τα απόβλητα που προκύπτουν από όλες τις επιμέρους φάσεις του συστήματος. Ως απόβλητα θεωρούνται τα στερεά ή υγρά υπολείμματα από όλες τις επιμέρους διεργασίες τα οποία δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν.

Ρύποι: Οι ρύποι προέρχονται από την καύση υγρών, αέριων ή στερεών καυσίμων από όλες τις φάσεις του συστήματος. Μπορεί να υπάρχουν ρύποι από την κατασκευή των εξαρτημάτων των Α/Γ, από τη καύση πετρελαίου κατά τη μεταφορά των εξαρτημάτων των Α/Γ στο χώρο εγκατάστασης, από τα καύσιμα που καταναλώνονται από τα μηχανήματα στις διανοίξεις των οδών, στην προετοιμασία των βάσεων των Α/Γ ή τα μηχανήματα ανέγερσης. Ομοίως και κατά τη φάση της αποσυναρμολόγησης και αποκατάστασης έχουμε την παραγωγή αερίων ρύπων.

Στο διάγραμμα 2 φαίνεται η απεικόνιση των επιμέρους φάσεων που αποτελούν ένα αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 2: απεικόνιση των επιμέρους φάσεων που αποτελούν ένα αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Όλες οι παραπάνω φάσεις που συνθέτουν ένα αιολικό σταθμό δεν έχουν την ίδια βαρύτητα και την ίδια συμμετοχή στην συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση του συστήματος.

Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη φάση της λειτουργίας είναι μηδαμινή σε σύγκριση με την ενέργεια που παράγεται κατά την ίδια φάση. Ομοίως στη φάση της κατασκευής των εξαρτημάτων των Α/Γ η χρήση των πρώτων υλών είναι ουσιώδης και αποτελεί ουσιαστικά τη βασική φάση που απαιτεί πρώτες ύλες. Έτσι κάθε στάδιο της ΑΚΖ έχει συγκεκριμένη βαρύτητα στις επιμέρους εισροές/ εκροές. Κατά την ΑΚΖ βαθμολογούνται οι σχετικές συνεισφορές των σταδίων (Τσουκαλάς, 2009).

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Σκοπός της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι να παρουσιαστούν τα κρίσιμα σημεία της υπάρχουσας επιστημονικής γνώσης σχετικά με την AKZ ενός αιολικού σταθμού (βιβλιογραφική ανασκόπηση, 2018). Η βιβλιογραφία αποτελεί δευτερεύουσα πηγή, και συνεπώς δεν παρουσιάζει κάποια νέα αποτελέσματα ή κάποια πρωτότυπη έρευνα στο υπό μελέτη πεδίο. Η AKZ της παρούσας διατριβής, μέσα από την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση πλαισιώνεται κατάλληλα στο σώμα της σχετικής βιβλιογραφίας, αιτιολογούνται επιστημονικά η μεθοδολογία και τα συμπεράσματα της διατριβής και κάνοντας χρήση των βιβλιογραφικών αναφορών θεμελιώνει και θωρακίζει επιστημονικά τη μέθοδο και τα αποτελέσματα αυτής (Review of literature, 2018).

2.1.1 Χαρακτηριστικά της βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση σκιαγραφείται η οπτική γωνία της AKZ των αιολικών σταθμών, και αναλύεται με κριτικό τρόπο η διεθνής και ελληνική βιβλιογραφία μέσω σύνοψης, ταξινόμησης/ ομαδοποίησης και σύγκρισης (The writing center, 2018).

Η αναζήτηση της σχετικής βιβλιογραφίας έγινε με βάση το θέμα της διατριβής. Η AKZ αιολικών σταθμών αναλύεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, την AKZ και την έννοια του αιολικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η AKZ είναι μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται ευρέως για κάθε διεργασία ή προϊόν όταν θέλουμε να αναλύσουμε τις επιπτώσεις που προκαλούνται από όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος ή συστήματος. Αποτελεί μια από τις πληρέστερες και επιστημονικά αποδεκτές μεθοδολογίες ως προς την εκτίμηση των επιπτώσεων.

Υπάρχει μεγάλος αριθμός σχετικής βιβλιογραφίας που αφορά την AKZ ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας, υπάρχουν βιβλιογραφικές πηγές που αναλύουν τα πρότυπα της AKZ, και επίσης τις διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις. Από το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε περίπου το 20% αφορά τις διάφορες μεθόδους, προδιαγραφές και εφαρμογές της AKZ ενός προϊόντος. Η βιβλιογραφία στον συγκεκριμένο τομέα ποικίλει τόσο ως προς τα διαφορετικά πεδία εφαρμογής όσο και ως προς την ηλικία των

δημοσιευμένων επιστημονικών εργασιών. Στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκαν βιβλιογραφίες που έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σχέση με το υπό μελέτη αντικείμενο (αιολικός Σταθμός, Ανεμογεννήτρια, ΑΠΕ, βιώσιμη ανάπτυξη).

Οι βιβλιογραφικές αναφορές που πληρούν αυτά τα κριτήρια εντοπίζονται ως επί το πλείστο μετά το 2003, και υπάρχουν αρκετές νέες βιβλιογραφικές αναφορές έως το 2011-2012.

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία βιβλιογραφικής αναζήτησης είναι η εφαρμογή της ΑΚΖ σε αιολικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την κατηγορία υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες βιβλιογραφικές αναφορές. Στις βιβλιογραφικές αναφορές που επιλέχθηκαν έχουμε περιπτώσεις ΑΚΖ σε εν γένει σταθμούς ΑΠΕ, ΑΚΖ που συγκρίνει διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επιστημονικά συγγράμματα που συγκρίνουν διαφορετικά μεγέθη Α/Γ, εργασίες που αφορούν την Ελληνική, Μεσογειακή, Ευρωπαϊκή αλλά και την διεθνή πραγματικότητα. Οι αναφορές αυτές αποτελούν πάνω από τα δυο τρίτα των συνολικών αναφορών. Ο αρκετά μεγάλος όγκος αναφορών σε αυτή την κατηγορία συντελεί στο να παρουσιαστούν πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες πάνω στη διατριβή για να γίνει ξεκάθαρη η επικρατούσα μεθοδολογία ως προς της ΑΚΖ των αιολικών σταθμών, να υπάρχουν συγκριτικά δεδομένα τόσο μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, όσο και μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών της ίδιας τεχνολογίας. Η ποικιλία τέτοιων βιβλιογραφικών αναφορών στη διατριβή δίνει τη δυνατότητα να συγκρίνουμε επίσης ΑΚΖ σε αιολικούς σταθμούς εγκατεστημένους σε κράτη ευρωπαϊκά αλλά και εκτός Ευρώπης. Το γεγονός ότι οι Α/Γ την τελευταία δεκαετία έχουν διαφοροποιηθεί σε μέγεθος και τεχνολογία από ότι ήταν την περίοδο του 2000 (Fingersh, 2006), όπως επίσης και το γεγονός ότι ο χρόνος ζωής των αιολικών πάρκων έχει αυξηθεί από τα 20 στα 25 χρόνια (Simons, 2016, Hughes, 2012), μας υποχρεώνει να κάνουμε εκτιμήσεις σε σχέση με την ΑΚΖ των πάρκων αυτών. Η επέκταση του χρόνου ζωής αλλάζει άρδην την ΑΚΖ. Η αλλαγή της τεχνολογίας τόσο ως προς τη μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο ως προς τα χρησιμοποιούμενα υλικά (σύνθετα υλικά) επηρεάζει κατά πολύ την ΑΚΖ, καθιστώντας τις παλαιότερες βιβλιογραφικές αναφορές παραπλανητικές ή και αναχρονιστικές.

Ένας μικρός αριθμός εργασιών είναι από την δεκαετία 2000, ενώ η πλειονότητα των πηγών κυμαίνεται μεταξύ του 2005 και του 2016. Το γεγονός ότι οι διαθέσιμες πηγές είναι της τελευταίας δεκαετίας έχει το μειονέκτημα ότι δεν υπάρχει αρκετή ιστορική

γνώση επί του θέματος, και πολλά συμπεράσματα βασίζονται σε θεωρητικά μοντέλα που δεν έχουν επιβεβαιωθεί στην πράξη. Ο περιορισμός αυτός ήταν αναμενόμενος καθότι η τεχνολογία των Α/Γ και εν γένει των ΑΠΕ είναι σχετικά πρόσφατη. Επίσης, μέσα στη τελευταία δεκαετία η εξέλιξη των Α/Γ (σε μέγεθος και τεχνολογία) είναι ραγδαία (Savino, 2017) με αποτέλεσμα οι πρόσφατες επιστημονικές βιβλιογραφικές αναφορές να είναι πιο κοντά στο θέμα της διατριβής.

Η ΑΚΖ ενός προϊόντος περιλαμβάνει όλες τις φάσεις της ανάπτυξης του προϊόντος από τη συγκέντρωση των πρώτων υλών μέχρι την κατασκευή, τη μεταφορά χρήσης έως το τέλος της ζωής του και τέλος, τις διεργασίες που συντελούνται μετά το πέρας της ωφέλιμης ζωής αυτού. Έτσι στην ΑΚΖ των Α/Γ που απαρτίζουν το Α/Π λαμβάνουμε υπ' όψη και τη φάση της αποξήλωσης των Α/Γ από το Α/Π, τη πιθανή επαναχρησιμοποίηση ορισμένων μηχανικών μερών, την ανακύκλωση των πρώτων υλών καθώς και τα απόβλητα που θα διατεθούν. Η διεργασία αυτή συνήθως παραγνωρίζεται τόσο ως προς τη σπουδαιότητά της και τη σημαντικότητά της όσο και στη συμμετοχή της στην ΑΚΖ. Ένα μέρος της βιβλιογραφικής ανασκόπησης περιλαμβάνει επιστημονικές αναφορές που αφορούν το τέλος του κύκλου ζωής των αιολικών σταθμών και των επιμέρους αυτών εξαρτημάτων. Οι επιστημονικές αυτές δημοσιεύσεις επικεντρώνονται κυρίως στην διαχείριση των επιμέρους εξαρτημάτων (ανακύκλωση, χρησιμοποίηση), και στη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τους αιολικούς σταθμούς.

Εφόσον η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας είναι μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογία και ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των αιολικών σταθμών είναι από 20 έως 25 έτη, τα πρώτα Α/Π που λειτούργησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και αρχές του 2000 σιγά σιγά βρίσκονται ή πλησιάζουν στο τέλος της ζωής τους (Goncalves da Silva, 2010). Η επιστημονική γνώση και εμπειρία πάνω στο συγκεκριμένο τομέα δεν είναι αρκετά μεγάλη και για πολλές χώρες είναι παντελώς άγνωστη. Επίσης η αλλαγή της τεχνολογίας και των υλικών κατασκευής που συντέλεσε στην αύξηση του μεγέθους των Α/Γ τα τελευταία χρόνια απαιτούν διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης από αυτές που συνήθως χρησιμοποιούνται. Οι διαθέσιμες βιβλιογραφικές πηγές ως προς το παραπάνω θέμα είναι περιορισμένες και όλες είναι της τελευταίας πενταετίας.

Εν γένει η επιλογή της βιβλιογραφίας σκοπεύει να επισημάνει τις κεντρικές τάσεις που επικρατούν στη διεθνή επιστημονική κοινότητα ως προς τη διεξαγωγή μιας ΑΚΖ ενός αιολικού σταθμού παραγωγής. Μέσα από τη πολύπλευρη και ενδελεχή έρευνα και μελέτη των βιβλιογραφικών αναφορών αναγνωρίζονται ενδεχόμενες συγκρούσεις στη θεωρία,

στη μεθοδολογία, στα στοιχεία και στα συμπεράσματα των σχετικών μελετών. Συμπληρώνονται πιθανά κενά στην έρευνα και στη σχετική γνώση και γίνεται έγκαιρη αντιμετώπιση ενδεχόμενων προβλημάτων ή ζητημάτων άμεσου ενδιαφέροντος.

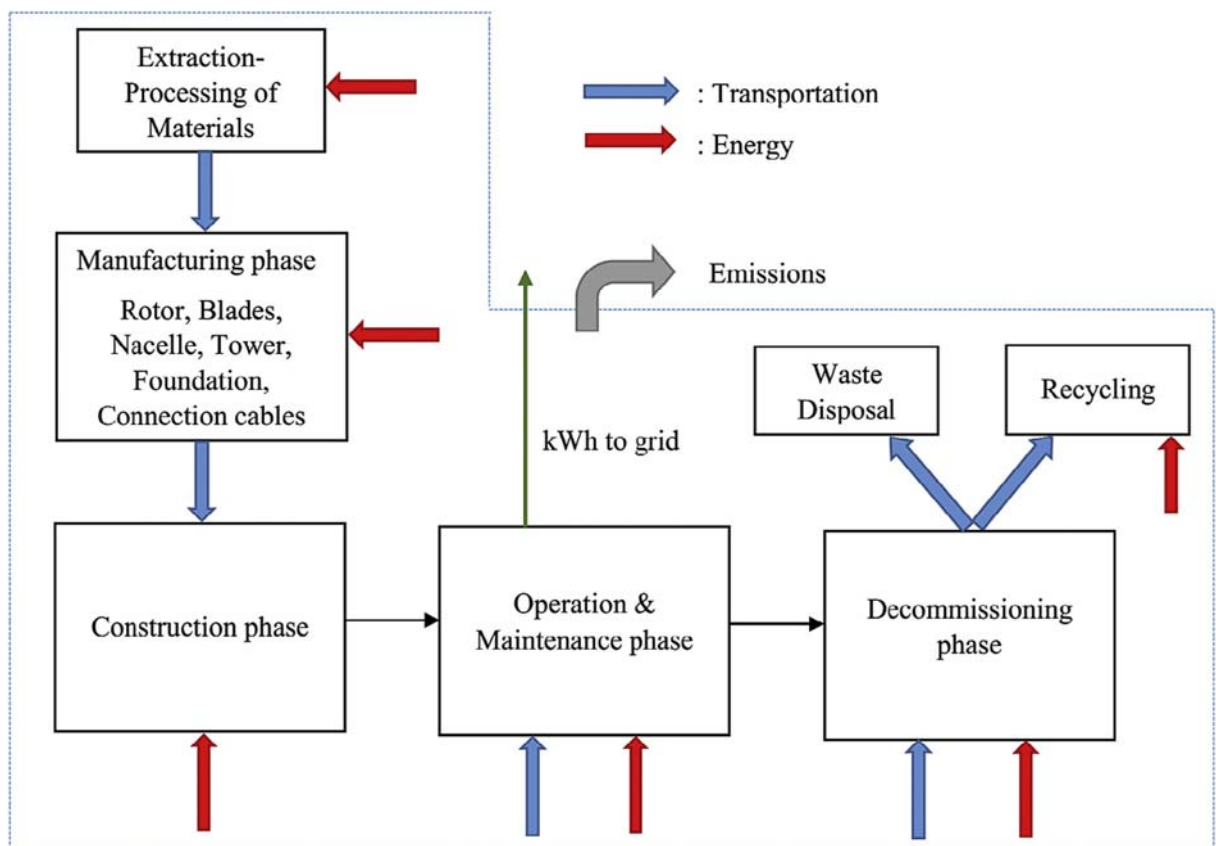
2.2 Ιστορική αναδρομή

Όλες οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται με κατανάλωση ενέργειας και παραγωγή ρύπων αερίων του θερμοκηπίου όταν αναλυθούν με την προοπτική της Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Η έρευνα των εισερχομένων και εξερχομένων διεργασιών στην AKZ μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κρίνεται απαραίτητη ώστε να εκτιμηθεί το μέγεθος της ενέργειας και του περιβαλλοντικού ανθρακικού αποτυπώματος. Οι εισερχόμενες διεργασίες θεωρούνται η εξαγωγή των πρώτων υλών, η μεταφορά και οι διεργασίες των πρώτων υλών κατά την κατασκευή της μονάδας, ενώ οι εξερχόμενες διεργασίες θεωρούνται αυτές που συντελούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μονάδας παραγωγής, η διαχείριση των αποβλήτων και ο παροπλισμός αυτής (Kaldellis and Apostolou, 2017, Raadal et al. 2014, Weisser, 2007). Οι περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές περιλαμβάνουν κατανάλωση ενέργειας και εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου τόσο στις εισερχόμενες όσο και στις εξερχόμενες διεργασίες όσες από αυτές βασίζονται σε κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Ομοίως, παρόλο που οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, και εν γένει των ΑΠΕ, προσφέρουν σημαντική δυναμική στο να επιτευχθεί ο στόχος περιορισμού των ρύπων Ατθ, στην AKZ η χρήση ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές σε συνδυασμό με την χρήση αιολικής ενέργειας (στη βάση του υφιστάμενου ενεργειακού μίγματος σε κάθε περίπτωση) ενισχύουν το ανθρακικό αποτύπωμα των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ (IPCC,2012). Η αιολική ενέργεια θεωρείται στις μέρες μας μια από τις πλέον ανταγωνιστικές και ώριμες βιώσιμες τεχνολογίες με 432,9 GW συνολική εγκατεστημένη ισχύ στο τέλος του 2015 (GWEC,2016).

Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου το οποίο περιλαμβάνει την κατασκευή, μεταφορά στο χώρο εγκατάστασης, την ανέγερση, λειτουργία και συντήρηση, καθώς και τη φάση του παροπλισμού. Στη διαδικασία της κατασκευής συμπεριλαμβάνεται η εξόρυξη και διαλογή των πρώτων υλών μαζί με τη κατασκευή των κυρίων μερών του αιολικού πάρκου (π.χ. ο ρότορας, η

νασέλα, πύργος, θεμελιώσεις, καλώδια διασύνδεσης). Η μεταφορά των εξαρτημάτων και οι κατασκευαστικές εργασίες απαιτούν κυρίως κατανάλωση ορυκτών καυσίμων από άνθρακα, για τη λειτουργία των μηχανημάτων. Επιπρόσθετα, έχουμε κατανάλωση ορυκτών καυσίμων στη φάση της λειτουργίας και συντήρησης του αιολικού πάρκου που οφείλεται είτε στη μεταφορά του προσωπικού και των ανταλλακτικών στο χώρο εγκατάστασης είτε στην χρήση ελαίων και λιπαντικών από τις Α/Γ. Κατά τη φάση του παροπλισμού της εγκατάστασης, η αποσυναρμολόγηση των Α/Γ και η μεταφορά των υλικών στο χώρο τελικής απόθεσης ή χώρο ανακύκλωσης απαιτούν τη λειτουργία μηχανημάτων και οχημάτων και κατ' επέκταση την κατανάλωση ενέργειας (Guezuraga et al., 2012). Ως εκ τούτου, η ανέγερση ενός αιολικού πάρκου εμπεριέχει μια ποσότητα ενέργειας η οποία ονομάζεται ενσωματωμένη ενέργεια του συστήματος και η οποία προκαλεί έμμεσα έκλυση Ατθ.

Το παρόν κομμάτι της διατριβής αποσκοπεί να μεταφέρει μια αναλυτική επισκόπηση της ΑΚΖ των αιολικών σταθμών μέσω της παρουσίασης των σημαντικότερων ευρημάτων και τάσεων που περιγράφονται στην διεθνή βιβλιογραφία (Kaldellis and Apostolou, 2017).



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα ροής του κύκλου ζωής ενός αιολικού πάρκου

Τα ισοζύγια ενέργειας και άνθρακα συνδέονται μεταξύ τους και τα μεγέθη αυτά διερευνώνται στην AKZ. Σε πολλές μελέτες έχει εφαρμοστεί η AKZ αιολικών σταθμών μελετώντας τα ισοζύγια ενέργειας (συνήθως ενσωματωμένης ενέργειας του συστήματος) όσο και εκπομπών άνθρακα (Crawford,2009, Walmsley, 2017). Οι Lenzen και Munksgaard (2002) διεξήγαγαν μια εκτενή επισκόπηση με AKZ πολλών Α/Γ που υπήρχαν διαθέσιμες στην εποχή τους. Την μελέτη αυτή συνέχισε ο Kubiszewski et al. (2010) ώστε να περιλαμβάνει και νεότερες μελέτες, και καθόρισε το ποσό της ενέργειας ως επιστροφή της επένδυσης (RoI) από 119 Α/Γ που προέρχονται από 50 διαφορετικές πηγές. Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει μεγέθη Α/Γ με ισχύ κάτω του 1 MW. Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες επικεντρώνονται σε παλαιότερες τεχνολογίες Α/Γ από εγκαταστάσεις κυρίως της Ευρώπης και των ΗΠΑ. Ο Fernando (2010) υπολόγισε μέσα από την AKZ την ενσωματωμένη ενέργεια διαφόρων κοινών μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συμπεριλαμβανομένης και της αιολικής. Ο Rule et al. (2009) παρουσίασε το ανθρακικό αποτύπωμα και την ενσωματωμένη ενέργεια τεσσάρων αιολικών πάρκων στη Νέα Ζηλανδία. Άλλες επιστημονικές εργασίες κάνουν σύγκριση ως προς το κόστος παραγωγής ενέργειας μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών ΑΠΕ. Για παράδειγμα ο Dale (2013) ερεύνησε και συνέκρινε το ενεργειακό κόστος παραγωγής μεταξύ αιολικής, φωτοβολταϊκής και ηλιοθερμικής ενέργειας. Το αποτέλεσμα ήταν η αιολική ενέργεια να έχει μικρότερο κόστος παραγωγής από τις άλλες δύο τεχνολογίες (Nagashima et al., 2017).

Αυτές οι μελέτες AKZ, μερικές από τις οποίες βασίζονται στην ανάλυση του ισοζυγίου ενέργειας, ή/και το ίχνος εκπομπών άνθρακα, ερεύνησαν διαφορετικές τεχνολογίες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, αλλά απουσιάζει η σύνδεση μεταξύ των διαφόρων αυτών τεχνολογιών (π.χ. αριθμός φτερών, διάμετρος ρότορα) και των χαρακτηριστικών του ανέμου ως φυσικού πόρου, είτε με τη χρήση της μεθόδου EROI (απόσβεση της ενέργειας) είτε με τη μέθοδο EROC (απόσβεση των εκπομπών άνθρακα). Η έρευνα και ο συσχετισμός της σύνδεσης μεταξύ κάθε ενός από αυτά τα στοιχεία αντιπροσωπεύουν το χάσμα στη βιβλιογραφία στο οποίο στοχεύει σε αυτήν την μελέτη. Ο στόχος της παρούσας AKZ είναι να αναπτυχθεί ένα απλό εργαλείο υπολογισμού για να αξιολογήσει τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών του αέρα σαν φυσικού πόρου και την επιλογή των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού των αιολικών εγκαταστάσεων που εγκαθίστανται στην Ελληνική επικράτεια.

2.3 Θεωρητικό πλαίσιο

Η παρούσα AKZ βασίστηκε στα διεθνή πρότυπα κατά ISO 14040 και ISO 14044. Συνεπώς κατά τη διεξαγωγή της μελέτης θα πρέπει να διασφαλιστούν οι παρακάτω σημαντικές παράμετροι:

- Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή της AKZ είναι σύμφωνες με τα διεθνή πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044
- Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή της AKZ είναι επιστημονικά και τεχνικά έγκυρες, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι κατάλληλα και εύλογα σε σχέση με το στόχο της μελέτης
- Οι ερμηνείες αντικατοπτρίζουν τους περιορισμούς που εντοπίστηκαν στο στόχο της μελέτης
- Η έκθεση της μελέτης είναι διαφανής και συνεπής.

2.3.1 Γενική εκτίμηση του θεωρητικού πλαισίου

Η τρέχουσα AKZ ανατρέπει βιβλιογραφικά σε μια σειρά από AKZ που έχουν διεξαχθεί από κατασκευαστές ανεμογεννητριών (Vestas) αλλά και από άλλους επιστημονικούς φορείς και ερευνητικά ιδρύματα. Η AKZ των χρησιμοποιούμενων πηγών θα πρέπει να έχει διεξαχθεί με βάση τα διεθνή πρότυπα κατά ISO 14040 και ISO 14044. Αυτή είναι η βασική προϋπόθεση για να πιστοποιηθεί η αξιοπιστία των στοιχείων που εμφανίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η μεθοδολογία έχει φτάσει σε ένα υψηλό επίπεδο ωριμότητας και η μελέτη γίνεται με επαγγελματικό τρόπο χρησιμοποιώντας αξιόπιστες μεθόδους στην επιτομή της τεχνικής γνώσης. Η μοντελοποίηση της AKZ που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη είναι εξαιρετική σε σχέση με το επίπεδο λεπτομέρειας και το ποσό των πρωτογενών στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Καλύπτει περίπου 25.000 εξαρτήματα που αντιστοιχούν σε άνω του 99,9% της συνολικής μάζας των υλικών που χρησιμοποιούνται σε έναν αιολικό σταθμό. Για το τμήμα της παραγωγής, η μελέτη περιλαμβάνει στοιχεία που συλλέχθηκαν από πάνω από 100 τοποθεσίες εργοστασίων παραγωγής εξαρτημάτων Α/Γ. Για τη φάση της λειτουργίας, οι μελέτες βασίστηκαν σε πραγματικά δεδομένα ως προς την απόδοση των ανεμογεννητριών για περισσότερες από 27,500 ανεμογεννήτριες από όλο τον κόσμο, ποσό το οποίο αποτελεί το 16% της τρέχουσας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος

παγκοσμίως. Ως εκ τούτου, η μελέτη θεωρείται αντιπροσωπευτική για εγκαταστάσεις με Α/Γ ισχύος των 2.0 MW.

2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση πηγών

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την ΑΚΖ περιλαμβάνει τις παρακάτω ομάδες πηγών.

2.4.1 Πηγές δεδομένων

Οι πηγές των δεδομένων είναι οι πηγές από τις οποίες αποκτήθηκαν τα πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα των αιολικών σταθμών και εν γένει των μονάδων παραγωγής. Με βάση τα δεδομένα αυτά έγινε η μοντελοποίηση της ΑΚΖ του σταθμού, εκτιμήθηκε ο χρόνος ζωής και η δυναμικότητα παραγωγής του σταθμού. Επίσης εκτιμήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη κάθε φάση της παραγωγής των πρώτων υλών, της κατασκευής των εξαρτημάτων, της ανέγερσης του σταθμού, της λειτουργίας και του τέλους ζωής. Τέτοιες πηγές δεδομένων προέρχονται από κατασκευαστές Α/Γ (δεδομένα υλικών, δεδομένα μεταφοράς, ανέγερσης, λειτουργίας), από κατασκευαστές και λειτουργούς αιολικών εγκαταστάσεων (δεδομένα που αφορούν τα συνοδά έργα των εγκαταστάσεων, υποσταθμούς ανύψωσης, συνολική ετήσια παραγωγή των εγκαταστάσεων, παραγωγή αποβλήτων κατά την κατασκευή και τη λειτουργία κ.α.), από μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων τέτοιων εγκαταστάσεων (περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χρήσεις γης, χωροθετήσεις αιολικών σταθμών, δεδομένα πρόσβασης). Επίσης τα δευτερογενή δεδομένα προέρχονται από κρατικούς και ευρωπαϊκούς φορείς και βιομηχανικούς συνδέσμους και αφορούν στατιστικά δεδομένα για τα ποσοστά ανακύκλωσης των μετάλλων, για το ενεργειακό μείγμα στα υπό μελέτη περιβάλλοντα, για τις μεταφορές και το αποτύπωμα άνθρακα των διεργασιών όλου του συστήματος που μελετάται.

2.4.2 Πηγές μεθοδολογικής ανάλυσης

Η μεθοδολογική ανάλυση βασίστηκε βιβλιογραφικά στα διεθνή πρότυπα κατά ISO. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν, εκτός από τα ίδια τα πρότυπα, προέρχονται κυρίως από επιστημονικές μελέτες ΑΚΖ διαφόρων ενεργειακών συστημάτων, τόσο αιολικών σταθμών όσο και άλλων μονάδων παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά και συγκριτικές ΑΚΖ μεταξύ των διαφόρων μεθόδων παραγωγής ενέργειας (Rebitzer et

al., 2004). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό μελέτες AKZ από τους ίδιους τους κατασκευαστές των Α/Γ. Η χρονική κάλυψη των μελετών αυτών ποικίλει αλλά προτιμήθηκαν AKZ της τελευταίας πενταετίας. Τέλος, έμφαση δόθηκε στις συγκριτικές διαφορές AKZ μεταξύ Α/Γ διαφορετικού μεγέθους ως προς την εγκατεστημένη ισχύ αλλά και διαφορετικών τεχνολογιών.

2.5 Διεθνής πραγματικότητα

Η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε παγκόσμιο επίπεδο έχει ανέλθει σε 539GW στο τέλος του 2017 (WWEA,2017). Μέσα στο 2017 η παγκόσμια αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών εγκαταστάσεων με ρυθμό 10,8% αποτελεί την τρίτη καλύτερη επίδοση από το 2000 και μετά. Σε παγκόσμιο επίπεδο η αιολική ενέργεια καλύπτει το 5% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας (WWEA). Σε ευρωπαϊκό επίπεδο οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας αποτελούν το 55,2 % από τις νέες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που υλοποιήθηκαν μέσα στο 2017. Επίσης για την Ευρώπη το 2017 αποτελεί έτος ρεκόρ για την υλοποίηση νέων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας τόσο στην ευρωπαϊκή ενδοχώρα όσο και για τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις (EWEA,2017). Από τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία συμπεραίνουμε ότι υπάρχει μια μεγάλη δυναμική στις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας παγκοσμίως. Ακόμα και στην Ευρώπη, όπου πολλές χώρες επιτυγχάνουν διψήφια ποσοστά εισχώρησης της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό τους μείγμα, παρατηρείται μια τάση αύξησης των αιολικών εγκαταστάσεων οι οποίες υποκαθιστούν στις περισσότερες περιπτώσεις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (μονάδες άνθρακα ή πυρηνικές εγκαταστάσεις).

Όσον αφορά τις βιβλιογραφικές αναφορές, υπάρχουν πολλές πηγές με πεδία εφαρμογής εγκαταστάσεων ανά τον κόσμο, αλλά η μεγαλύτερη πλειοψηφία των πηγών προέρχεται από την Ευρώπη. Στην παρούσα AKZ έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην αξιοποίηση στοιχείων και δεδομένων που αφορούν εγκαταστάσεις στην νότια και ανατολική Ευρώπη οι οποίες παρουσιάζουν αντίστοιχα χαρακτηριστικά περιβάλλοντος με την ελληνική επικράτεια.

2.6 Ελληνική πραγματικότητα

Με βάση τα τελευταία στατιστικά στοιχεία του HWEA (HWEA,2017), στην Ελλάδα εγκαταστάθηκαν 282 MW αιολικών σταθμών μέσα στο 2017 με το σύνολο της αιολικής εγκατεστημένης ισχύος να είναι 2.652 MW. Η επίδοση αυτή αποτελεί τη δεύτερη καλύτερη επίδοση στην ιστορία της ελληνικής αιολικής ενέργειας. Όσον αφορά τα μεγέθη των Α/Γ που εγκαταστάθηκαν μέσα στο 2017, σύμφωνα με το EWEA στην Ελλάδα οι ανεμογεννήτριες που έχουν εγκατασταθεί έχουν μέση ονομαστική ισχύ 2MW, ενώ τα μεγέθη του ρότορα τους από το 2005 και μετά υπερβαίνουν σε μέση τιμή τα 60μ. διάμετρο, ενώ το 2016 και 2017 πλησιάζουν σε μέση τιμή τη διάμετρο των 90μ (HWEA,2017).

Σχετικά με τους κατασκευαστές των Α/Γ, η Vestas αποτελεί τον κατασκευαστή με το 50,6 % των εγκατεστημένων MW αιολικών σταθμών στην Ελληνική επικράτεια, ενώ την τελευταία πενταετία έχει προμηθεύσει το 54% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος (HWEA,2017).

Από τα παραπάνω στατιστικά δεδομένα παρατηρούμε ότι στην Ελλάδα η αιολική ενέργεια ακολουθεί τις Ευρωπαϊκές και παγκόσμιες αυξητικές τάσεις. Από το σύνολο των αιολικών σταθμών το 87,8% της εγκατεστημένης ισχύος βρίσκεται στην ενδοχώρα και τα Ιόνια νησιά (διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας) (ΑΔΜΗΕ, 2017) ενώ το 12,2% είναι εγκατεστημένο στη νησιωτική επικράτεια (μη διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο). Η μελλοντική ανάπτυξη των αιολικών σταθμών αναμένεται να συνεχιστεί με αμείωτους ρυθμούς στην ενδοχώρα κυρίως λόγω των περιορισμών που συνεπάγεται η έλλειψη διασυνδέσεων των νησιών με την ηπειρωτική Ελλάδα, και την έλλειψη συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τα νησιά προς την ηπειρωτική χώρα (Oikonomou et al., 2009).

2.7 Συμπεράσματα

Η μελέτη της AKZ έχει διεξαχθεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές κατά ISO 14040 και ISO 14044. Ο σκοπός είναι να διεξαχθεί μια ανάλυση που να έχει συνολικά υψηλή ποιότητα για τη χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία και η εκτέλεσή της να είναι υψηλών προδιαγραφών ώστε να αντανακλώνται όσο το δυνατόν πληρέστερα οι σκοποί της μελέτης. Επίσης η μελέτη πρέπει να παρουσιαστεί με ολοκληρωμένο τρόπο

συμπεριλαμβανομένης μιας διαφανούς τεκμηρίωσης του εύρους της και των μεθοδολογικών της επιλογών.

Οι βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιούνται προσδίδουν αξιοπιστία και την απαραίτητη τεχνική και επιστημονική τεκμηρίωση. Επίσης, εμβαθύνουν την ανάλυση της μεθοδολογίας και υποστηρίζουν την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία

3.1 Σκοπός- Στόχοι

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι στόχοι στους οποίους αποσκοπεί η AKZ και οι σκοποί που εξυπηρετεί η AKZ.

3.1.1 Στόχος της AKZ

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι να αξιολογηθούν οι πιθανές περιβαλλοντικές επιδράσεις που συνδέονται με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από 50MW χερσαίες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας που αποτελούνται από είκοσι πέντε ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 2.0 MW η κάθε μία, μέσα από την οπτική της AKZ. Οι εγκαταστάσεις ισχύος των 50MW αντιπροσωπεύουν ένα χαρακτηριστικό μέγεθος εγκαταστάσεων για τα δεδομένα του ελληνικού ενεργειακού συστήματος από το 2010 και μετά και τα μεγέθη των Α/Γ κυμαίνονται από ονομαστική ισχύ από 2 έως 3,5 MW. Αυτή η αξιολόγηση περιλαμβάνει την παραγωγή των πρώτων υλών, την επεξεργασία και την κατασκευή της ανεμογεννήτριας από το εργοστάσιο και τους προμηθευτές της, τα επιμέρους κύρια εξαρτήματα (π.χ. μετασχηματιστές, ηλεκτρικές διασυνδέσεις, καλωδιώσεις, κ.λπ.), επισκευές κατά τη φάση της λειτουργίας, συντήρηση και απώλειες (π.χ. απώλειες μετασχηματιστή), διαχείριση τέλους κύκλου ζωής και μεταφορά των τελικών προϊόντων. Η μελέτη αξιολογεί μία «τυπική εγκατάσταση» και δεν κάνει οποιεσδήποτε συγκριτικές αξιολογήσεις μεταξύ διαφόρων κατασκευαστών Α/Γ ή διαφορετικών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Εν τούτοις, δεδομένου ότι από την εμφάνιση στην παγκόσμια αγορά των πρώτων Α/Γ μεγέθους των 2 MW έως σήμερα, έχουν υπάρξει βελτιώσεις στο σχεδιασμό και έχει επιτευχθεί βελτιστοποίηση των Α/Γ ως προς την απόδοση με συνέπεια την υψηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βελτιώσεις στην μέγιστη ικανότητα παραγωγής, έχει συντελέσει την μείωση του κόστους και τον περιορισμό της χρήσης ορυκτών πόρων. Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις που αξιολογούνται σε αυτήν την μελέτη περιλαμβάνουν μια σειρά των συνήθως εφαρμοσμένων σε μια AKZ παραγόντων, όπως η συνεισφορά

στην υπερθέρμανση του περιβάλλοντος, η απομείωση (εξάντληση) των αβιοτικών πόρων, καθώς επίσης δείκτες αξιολόγησης που δεν αποτελούν επιπτώσεις σε μια ΑΚΖ, όπως η ανακυκλωσιμότητα και η χρήση ύδατος. Αυτοί οι δείκτες παρατίθενται στην παράγραφο 4.2.3.

Το μέγεθος των αιολικών εγκαταστάσεων, η μέγιστη παραγωγή και άλλες παράμετροι της τοπολογίας των αιολικών σταθμών (π.χ. η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο διασύνδεσης, κ.λπ.) επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιπροσωπεύσει μία «τυπική» χειραία εγκατάσταση αιολικού σταθμού που αποτελείται από τους Α/Γ «τυπικού» μεγέθους 2.0 MW.

Τα αποτελέσματα της μελέτης δύναται να χρησιμοποιηθούν με σκοπό:

- Τη λήψη αποφάσεων και τη σύνταξη διαδικασιών.
- Τον προσδιορισμό των περιοχών βελτιστοποίησης και βελτίωσης της τεχνολογίας και της ανάπτυξης των προϊόντων.
- Την υποστήριξη της περιβαλλοντικής αδειοδότησης.
- Να αναπτυχθεί ένα πλαίσιο για την ΑΚΖ που να ενσωματώσει τις περιβαλλοντικές εκτιμήσεις στο σχέδιο προϊόντων.
- Να αναπτυχθούν κατάλληλα εμπορικά εργαλεία ώστε να προωθείται και να γνωστοποιείται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εγκαταστάσεων προς όλους τους ενδιαφερόμενους.

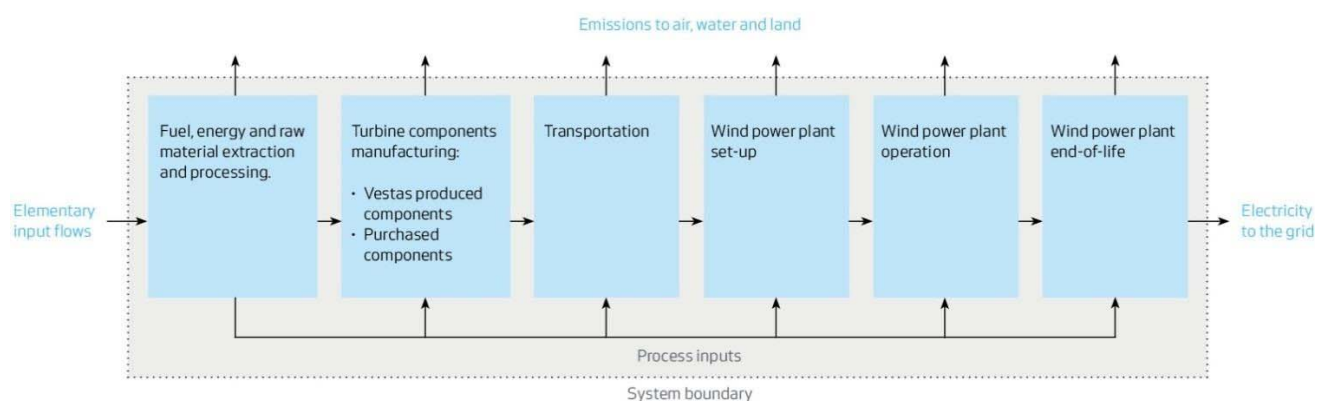
Ως εκ τούτου, το κύριο ακροατήριο για τα αποτελέσματα μελέτης θα είναι:

- Υποψήφιοι επενδυτές σε εγκαταστάσεις Α/Π
- Εργαζόμενοι στον τομέα των Α/Γ και εν γενεί των ΑΠΕ
- Εργολάβοι, μελετητές έργων Αιολικών Σταθμών
- Λοιπά ενδιαφερόμενα πρόσωπα, δημόσιες υπηρεσίες, τοπικές κοινωνίες και τοπική αυτοδιοίκηση.

3.1.2 Σκοπός της ΑΚΖ

Η μελέτη της ΑΚΖ είναι μια καινοτόμος μελέτη που πραγματεύεται τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με της παραγωγή ενέργειας από ένα αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εγκατεστημένης ισχύος 50MW, ο οποίος αποτελείται από 25 Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2MW. Η ΑΚΖ μελετά όλο τον χρόνο ζωής ενός τέτοιου σταθμού.

Αυτό περιλαμβάνει την εξαγωγή των πρώτων υλών κατευθείαν από το περιβάλλον για την κατασκευή των εξαρτημάτων των Α/Γ, την ανέγερση των Α/Γ, τις διοικητικές μέριμνες που αφορούν τη μεταφορά, αδειοδότηση υλοποίηση των εγκαταστάσεων και των συνοδών έργων που απαιτούνται, τη συντήρηση εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, και τη διαχείριση τέλους - ζωής έως το χρονικό σημείο στο οποίο οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας διατίθενται και επιστρέφονται στο περιβάλλον (ή επαναχρησιμοποιείται ή ανακυκλώνεται). Η παραγωγή και συντήρηση των κύριων αγαθών (δηλ. των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μερών της Α/Γ) έχουν αποκλειστεί από το πεδίο αυτής της μελέτης. Εντούτοις, η υποδομή των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας συμπεριλαμβάνεται στη μελέτη, δηλ. εκείνα τα μέρη τα οποία είναι σχετικά με την κατασκευή των διασυνδέσεων, τους δρόμους, κ.λπ. που απαιτούνται για να κατασκευαστούν οι πλήρεις εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας. Το διάγραμμα 4 παρουσιάζει τα όρια συστημάτων για την εγκατάσταση παραγωγής αιολικής ενέργειας.



Διάγραμμα 4: Όρια Συστήματος AKZ για αιολικό σταθμό 50MW αποτελούμενο από Α/Γ 2MW

Την AKZ απαρτίζουν οι ακόλουθες διεργασίες

- Παραγωγή όλων των μερών των εγκαταστάσεων της Α/Γ και του αιολικού σταθμού (μια περιγραφή των κύριων συστατικών μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα Β). Η παραγωγή περιλαμβάνει τα μέρη που κατασκευάζονται από τα εργοστάσια των Α/Γ καθώς επίσης και μέρη κατασκευασμένα από προμηθευτές. Οι περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα επιμέρους εξαρτήματα των Α/Γ (υλικά, βάρη, διαστάσεις, διεργασίες παραγωγής, ποσοστά φύρας που αποκτήθηκαν από διάφορους κατασκευαστές).

- Κατασκευαστικές διεργασίες σε επίπεδο κατασκευαστή Α/Γ οι οποίες είναι σε διεσπαρμένες ανά τον κόσμο τοποθεσίες: που περιλαμβάνουν τόσο τα εργοστάσια παγκόσμιας παραγωγής (δηλ. για χύτευση, κατεργασία, παραγωγή πύργων, συναρμολόγηση νασέλας, κατασκευή φτερών), καθώς και άλλες δραστηριότητες των προμηθευτών Α/Γ (π.χ. πωλήσεις, συντήρηση, κλπ.).
- Μεταφορές: εξαρτήματα ανεμογεννητριών τόσο για την περάτωση της εγκατάστασης όσο και σε άλλα στάδια του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένων των εισερχόμενων πρώτων υλών για την παραγωγή και μεταφορά από τη θέση εγκατάστασης του σταθμού προς το χώρο της τελικής διάθεσης στο τέλος του κύκλου ζωής.
- Εγκατάσταση και ανέγερση των ανεμογεννητριών στον αιολικό σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης των γερανών, οχημάτων, εκσκαφείς και Α/Γ.
- Δράσεις (συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς) στο χώρο συντήρησης. Συντηρούμενα μέρη, αναλώσιμα όπως το λάδι και φίλτρα, και εξοπλισμός που αντικαθίσταται (λόγω φθοράς των κινητών μερών κατά τη διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας).
- Η φάση της χρήσης/λειτουργίας ενός αιολικού σταθμού ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: συμπεριλαμβανομένης της διαθεσιμότητας ανεμοστροβίλου (την ικανότητα της τουρμπίνας να λειτουργεί όταν φυσάει άνεμος), τις απώλειες σκιάσεων (που προκύπτουν από το μειωμένο αιολικό δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μια ορισμένη απόσταση από γειτονικό στρόβιλο που χωροθετείται στην διεύθυνση του αιολικού δυναμικού) και τις απώλειες μεταφοράς
- Τέλος χρόνου ωφέλιμης ζωής - αποξήλωση και αποκατάσταση: από ολόκληρο το σταθμό παραγωγής ενέργειας συμπεριλαμβανομένων των δραστηριοτήτων παροπλισμού.

3.2 Προσδιορισμός του υπό μελέτη συστήματος

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται το σύστημα για το οποίο θα γίνει η ΑΚΖ. Όπως περιγράφεται παραπάνω το σύστημα αποτελείτε τη βασική μονάδα παραγωγής που είναι η Α/Γ. Πολλές Α/Γ συνδεδεμένες μεταξύ τους, και εν συνεχεία με τον υποσταθμό

ανύψωσης και τα υπόλοιπα συνοδά έργα υποδομής (Δρόμοι, καλώδια) αποτελούν τον αιολικό σταθμό παραγωγής.

3.2.1 Μονάδα λειτουργίας – Α/Γ

Η λειτουργία της μονάδας παραγωγής αιολικής ενέργειας ουσιαστικά είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης και της σύνδεσης και διάθεσης της παραγόμενης ενέργειας στο υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο. Είναι σημαντικό να έχουν εξεταστεί επιτόπου οι επικρατούσες συνθήκες ανέμου κατά την εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας. Οι διάφορες Α/Γ έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε διάφορες συνθήκες ανέμου και για αυτή τη μελέτη, ως επικρατούσες συνθήκες χαμηλού μέσου ανέμου (IEC 3α) έχουν επιλεγεί ως το βασικό σενάριο. Ανατρέξτε στην ενότητα 4.3 για περαιτέρω λεπτομέρειες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανεμογεννητριών.

Η λειτουργική μονάδα για την παρούσα ανάλυση κύκλου ζωής διευκρινίζεται ως: η 1KWh ηλεκτρικής ενέργειας που διαχέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο από έναν αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 50 MW που αποτελείται από 25 Α/Γ ισχύος 2 MW εκάστη.

Η λειτουργική μονάδα προέκυψε από τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού μιας Α/Γ (των 20 ετών), καθώς και η συνολική ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια ζωής βασίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνθήκες χαμηλού ανέμου (χαμηλός ετήσιος μέσος όρος ταχυτήτων ανέμου). Για περισσότερες λεπτομέρειες, ανατρέξτε στην ενότητα 4.3.

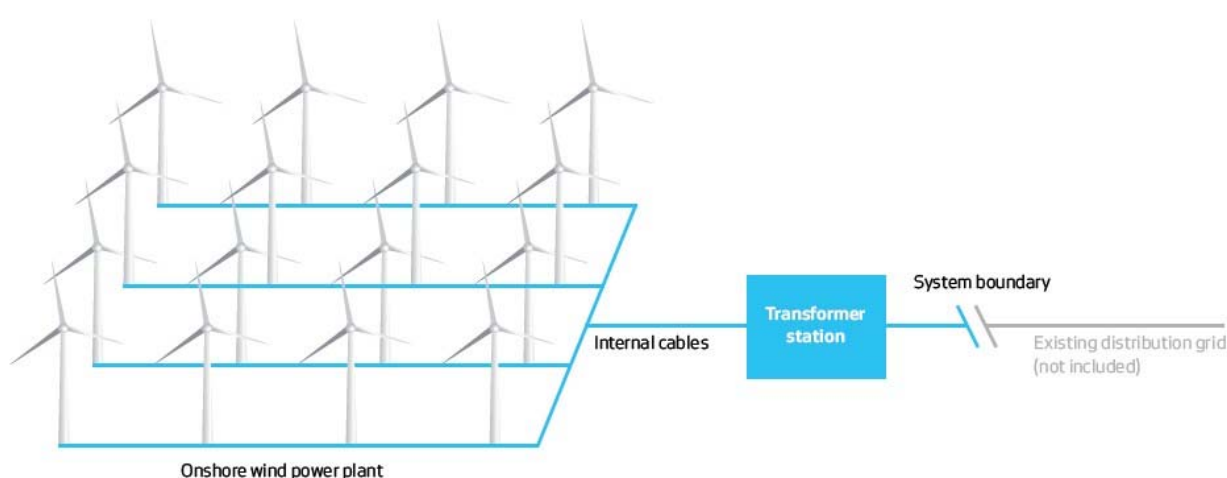
Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η λειτουργική μονάδα θα μπορούσε να έχει προέλθει στη βάση της «συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας» (δηλαδή τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης), αλλά έχει επιλεγεί για να οριστεί η λειτουργική μονάδα σε αυτήν την μελέτη ως μια «μονάδα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας» (δηλαδή ανά μία kWh).

Να σημειωθεί επίσης ότι η λειτουργική μονάδα αφορά την ηλεκτρική ενέργεια που παραδίδεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και σε άλλες σχετικές ΑΚΖ και όχι η ενέργεια που τελικώς παραδίδεται στον καταναλωτή. Αν η μελέτη αυτή πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση με την ηλεκτρική ενέργεια που παραδίδεται στον

καταναλωτή, τότε θα πρέπει να συνυπολογιστούν οι απώλειες του δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2.2 Περιγραφή του συστήματος

Η εγκατάσταση ενός σταθμού αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει τις ανεμογεννήτριες, θεμέλια, καλωδίωση (που συνδέει τις μεμονωμένες ανεμογεννήτριες στο σταθμό μετασχηματιστών) και το σταθμό μετασχηματιστών, μέχρι το σημείο σύνδεσης με το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5. Το όριο του αιολικού πάρκου είναι το σημείο στο οποίο η ηλεκτρική ενέργεια παραδίδεται στο υπάρχον δίκτυο μεταφοράς ή διανομής.



Διάγραμμα 5: Σχηματικό διάγραμμα ενός αιολικού πάρκου

Ο πίνακας 1 μας δίνει μια προεπισκόπηση των βασικών στοιχείων ενός μέσου αιολικού πάρκου όπως μελετάται στην παρούσα διατριβή.

Description	Unit	Quantity
Lifetime	years	20
Rating per turbine	MW	2
Generator type	-	Induction
Turbines per power plant	pieces	25
Plant size	MW	50

Hub height	metres	80
Rotor diameter	metres	110
Wind class	-	Low (IEC3A)
Tower type	-	Standard steel
Foundation type	Low ground water level (LGWL)	
Production @ 7.0 m/s (low wind)	MWh per year	7567
Production @ 8.0 m/s (medium wind)	MWh per year	-
Production @ 9.25 m/s (high wind)	MWh per year	-
Grid distance	km	20
Plant location	-	Europe
WTG production location	-	Global average

Note: The above figure for electricity production includes all losses, assuming an availability of 97%, total plant electrical losses up to grid of 2.5% and average plant wake losses of 6.0%.

Πίνακας 1: Προεπισκόπηση του υπό μελέτη αιολικού Σταθμού

3.3 Στάδια κύκλου ζωής

Ολόκληρος ο κύκλος ζωής ενός αιολικού σταθμού μπορεί να χωριστεί σε αυτόνομα στάδια κύκλου ζωής, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6 τα οποία και χρησιμοποιούνται για αυτήν την μελέτη (Rebitzer et al., 2004).



Διάγραμμα 6: Τα στάδια του κύκλου ζωής ενός τυπικού αιολικού σταθμού και οι τυπικές λειτουργικές δραστηριότητες.

Ο κύκλος ζωής του αιολικού σταθμού έχει διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας μια αρθρωτή προσέγγιση που αντιστοιχούν στα στάδια του κύκλου ζωής που φαίνεται στο διάγραμμα 6. Αυτό επιτρέπει τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής του αιολικού σταθμού να αναλυθούν ξεχωριστά.

Μια επισκόπηση της μοντελοποιημένης προσέγγισης του καθενός από τα στάδια του κύκλου ζωής παρουσιάζονται στην ενότητα 3.12.

3.3.1 Κατασκευή

Αυτή η φάση περιλαμβάνει την παραγωγή των πρώτων υλών για την κατασκευή των συστατικών των ανεμογεννητριών όπως τα θεμέλια, πύργους, ατράκτων, φτερά, καλώδια και μετασχηματιστή του σταθμού. Μεταφορά πρώτων υλών (π.χ. χάλυβας, χαλκός, εποξικά υλικά, κ.λπ.) στους χώρους ειδικής παραγωγής (εργοστάσια) περιλαμβάνεται στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας μελέτης.

3.3.2 Ανέγερση εγκατάστασης

Αυτή η φάση περιλαμβάνει τις μεταφορές επιμέρους συστατικών που απαρτίζουν έναν αιολικό σταθμό στον χώρο εγκατάστασης, την εγκατάσταση και ανέγερση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Κατασκευαστικές εργασίες στο χώρο, όπως η διάνοιξη των δρόμων, τις πλατείες ανέγερσης και περιοχές όπου θα τοποθετηθούν οι γερανοί, εμπίπτουν επίσης σε αυτή τη φάση. Διεργασίες που σχετίζονται με τα θεμέλια, την ανέγερση των ανεμογεννητριών, την κατασκευή του δικτύου εσωτερικών καλωδίων, την

εγκατάσταση/συναρμολόγηση του υποσταθμού του μετασχηματιστή και τη σύνδεση με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο περιλαμβάνονται στο πεδίο εφαρμογής της μελέτης.

Στη μελέτη παρουσιάζεται η αναλυτική διάταξη του σταθμού (δηλαδή τα μήκη των καλωδίων) και η προδιαγραφή των καλωδίων υψηλής τάσης που χρησιμοποιούνται για να συνδέουν τις ανεμογεννήτριες στο αιολικό πάρκο και εν συνεχεία με τον υποσταθμό ανύψωσης μέχρι το όριο του δικτύου μεταφοράς.

Η μεταφορά στην τοποθεσία εγκατάστασης της Α/Γ για την εγκατάσταση της μονάδας παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνει μεταφορά με φορτηγό και με σκάφος από τη θάλασσα. Οι περισσότεροι κατασκευαστές Α/Γ έχουν καθιερώσει εγκαταστάσεις παγκόσμιας παραγωγής που λειτουργούν μέσα σε μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή, προκειμένου να εξυπηρετήσουν την συγκεκριμένη περιοχή. Ως εκ τούτου, οι μεταφορές αποτελούν μία κομβική δραστηριότητα της τρέχουσας εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η τρέχουσα ΑΚΖ λαμβάνει υπόψη την χρήση φορτηγού πλοίου και κατανάλωση καυσίμων πλοίου στη θάλασσα, όπως και οδική μεταφορά στην ξηρά (και χρησιμοποίηση οχημάτων) με συγκεκριμένα δεδομένα για τη μεταφορά των βασικών μερών από τα οποία συναρμολογείται η Α/Γ (όπως, τμήματα του πύργου, φτερά, νασέλα κ.α.).

Ως μέρος της (βλέπε ενότητα 5.2.5) λεπτομερούς ανάλυσης, έχει υποτεθεί η βέλτιστη και η χειρίστη προσέγγιση.

3.3.3 Φάση λειτουργίας της εγκατάστασης

Η φάση της λειτουργίας του αιολικού σταθμού μετά την ολοκλήρωση των εργασιών για την εγκατάσταση, ασχολείται με τη γενική λειτουργία της Α/Γ προκειμένου να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Εδώ οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν αλλαγή λαδιών και φίλτρων, και ανακαίνιση/αντικατάσταση των φθαρμένων τμημάτων (π.χ. το κιβώτιο ταχυτήτων, ηλεκτρική γεννήτρια, μετασχηματιστές) κατά τη διάρκεια ζωής του αιολικού σταθμού. Οι μεταφορές που συνδέονται με τη λειτουργία και τη συντήρηση, προς και από τις ανεμογεννήτριες, αλλά και του υποσταθμού που τοποθετείται ο μετασχηματιστής ανύψωσης, περιλαμβάνεται σε αυτή τη φάση και έχει ενημερωθεί ώστε να απεικονίζει τα τυπικά οχήματα συντήρησης αλλά και ειδικά μηχανήματα που ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν στο χρόνο ζωής της εγκατάστασης (Γερανοί, φορτηγά κ.α.).

3.3.4 Τέλος ωφέλιμου χρόνου ζωής

Στο τέλος της χρήσιμης ζωής, αποσυναρμολογούνται τα συστατικά του αιολικού σταθμού και ο χώρος όπου υπήρχαν περιβαλλοντικές επεμβάσεις θα πρέπει να αποκατασταθεί σύμφωνα με τις σχετικές εγκρίσεις περιβαλλοντικών όρων που έχουν ληφθεί από το κράτος (όρος ο οποίος ορίζεται συνήθως ως προϋπόθεση για τη χορήγηση της έγκρισης επέμβασης). Στην AKZ έχει υποτεθεί ότι οποιεσδήποτε μεταβολές χρήσεων γης (π.χ. με αποτέλεσμα την απομάκρυνση/ καταστροφή της βλάστησης για την υλοποίηση της εγκατάστασης) επανέρχονται σε αρχικές συνθήκες της τοποθεσίας. Η θεραπεία του τέλους του κύκλου ζωής των υλικών θεωρείται επίσης σε αυτή τη φάση. Επιλογές διαχείρισης αποβλήτων περιλαμβάνουν: ανακύκλωση, αποτέφρωση με ανάκτηση ενέργειας, επαναχρησιμοποίηση επιμέρους ανταλλακτικών και εναπόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής (Andersen et al., 2016). Το μοντέλο της AKZ όσων αφορά στη διάθεση των επιμέρους υλικών και συστατικών που προέρχονται από τις Α/Γ και τις συνοδές εγκαταστάσεις, βασίζεται σε δεδομένα του κλάδου. Η επίτευξη συγκεκριμένων ποσοστών ανακύκλωσης των διαφόρων συνιστωσών που αντιπροσωπεύουν την εγκατάσταση είναι ανάλογα με την καθαρότητα του εκάστοτε υλικού και την ευκολία αποσυναρμολόγησης. Η ενότητα 3.9.4 παρέχει περαιτέρω λεπτομέρειες της διαχείρισης του τέλους του κύκλου ζωής και στην ενότητα 5.2.9 παρουσιάζεται μια ανάλυση της ευαισθησίας της AKZ ως προς αυτό το θέμα.

3.4 Τεχνολογική κάλυψη

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η παραγωγή μία μέσης Α/Γ ανεμογεννήτριας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος τα 2.0 MW, η διαδικασία της μεταφοράς των εξαρτημάτων για την ανέγερση των εγκαταστάσεων του αιολικού σταθμού, την κατασκευή των θεμελιώσεων, τη λειτουργία και συντήρηση, καθώς και τη φάση της αποσυναρμολόγησης και διάλυσης του αιολικού σταθμού και των επιμέρους συστατικών και εξαρτημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής. Οι διαδικασίες αυτές διαφέρουν ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται από τους εκάστοτε κατασκευαστές Α/Γ.

3.5 Χρονική κάλυψη

Το έτος αναφοράς για αυτή τη μελέτη είναι το 2014, καθώς είναι το πιο αντιπροσωπευτικό και το πλέον πρόσφατο έτος για ετήσια εγκατάσταση και λειτουργία αιολικών σταθμών. Η χρονική περίοδος για τη λειτουργία και συντήρηση αντιπροσωπεύει τον τυπικό χρόνο ζωής των 20 ετών με βάση τον οποίο γίνεται ο σχεδιασμός ενός αιολικού σταθμού. Η ανεμογεννήτρια ισχύος των 2.0 MW αντιπροσωπεύει τα πλέον πρόσφατα μοντέλα Α/Γ των περισσότερων κατασκευαστών αλλά και τις επιλογές των επενδυτών που λειτουργούν αιολικούς σταθμούς στην Ελλάδα.

3.6 Γεωγραφική Κάλυψη

Για τους σκοπούς της μελέτης αυτής έχει αξιολογηθεί και αναλυθεί ένα τυπικό «εικονικό» αιολικό πάρκο. Ο στόχος είναι να εκτιμηθεί μια συνολική εικόνα της παραγωγής αιολικής ενέργειας, αντί να αξιολογηθεί οποιαδήποτε εγκατάσταση σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η πραγματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε κλάσεις ανέμου με βάση το πρότυπο IEC 61400. Παρόλα αυτά, έχει διεξαχθεί ειδική ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να αξιολογηθεί η σημασία σχετικά με τις συνολικές επιπτώσεις για τους δύο παρακάτω παράγοντες:

- Αποστάσεις των μεταφορών μέχρι το χώρο εγκατάστασης, και
- Απόσταση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο θα διαχέεται η παραγόμενη ενέργεια.

Η γεωγραφική κάλυψη του «εικονικού» αιολικού σταθμού βασίζεται σε ένα σενάριο σταθμού της Ευρώπης για παράδειγμα, όσον αφορά τα εξής:

- η παραγωγή των μετάλλων (σίδηρο, χάλυβα, χαλκού και αλουμινίου) από τα οποία αποτελείται η ανεμογεννήτρια κατά περίπου 87%. Γίνεται χρήση δεδομένων (από worldsteel, PE, Διεθνής Ένωση χαλκού),
- δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολυμερών και σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν εκείνων που προέρχονται από Plastics Europe.
- PE σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη χρήση σκυροδέματος και

- Την ανακύκλωση στο τέλος του κύκλου ζωής επίσης χρησιμοποιούνται δεδομένα (όμοια με αυτά από worldsteel) για τις ποσότητες των μετάλλων που πιστώνονται.

Για τη δραστηριότητα ενός προμηθευτή ανεμογεννητριών, λαμβάνονται υπ' όψη τα ακόλουθα:

- Η κατασκευή των Α/Γ του κατασκευαστή «Vestas» αντιπροσωπεύει το σταθμισμένο μέσο όρο όλων των εγκαταστάσεων παγκοσμίως για το έτος παραγωγής 2012.
- Οι μεταφορές των Α/Γ αντιπροσωπεύει το παγκόσμιο αποτύπωμα για τη μεταφορά – η οποία βασίζεται στην προσέγγιση της Vestas η οποία «είναι στην περιοχή για την περιοχή», προσφέροντας σε κάθε περιοχή που δραστηριοποιείται μια τοπική εφοδιαστική αλυσίδα.

Τα παραπάνω δεδομένα καλύπτουν την πλειοψηφία των ροών με περιβαλλοντική σημασία. Τα επιλεγμένα σύνολα δεδομένων θεωρούνται από τα πιο ολοκληρωμένα και αντιπροσωπεύουν την εφοδιαστική αλυσίδα καθώς και τα δεδομένα που επιλέχθηκαν αποτελούν μια συντηρητική προσέγγιση για την εκτίμηση των επιπτώσεων.

3.7 Συλλογή και πληρότητα των δεδομένων

Πολλές ΑΚΖ δείχνουν ότι οι πιο σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνήθως θα προκύψουν κατά τη διάρκεια κατασκευής των ανεμογεννητριών και κατά τη φάση της τελικής διάθεσης των ανεμογεννητριών. Αντίθετα, η λειτουργία της Α/Γ κατά την παραγωγική ζωή της, δεν συνεισφέρει άμεσα με σημαντικό τρόπο στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εκτός από το ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας είναι σημαντικοί παράγοντες κατά την αξιολόγηση των επιπτώσεων ανά kWh της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται (PE, 2011 και Vestas, 2006, 2011a, 2011b, 2011 γ, 2013a, 2013b, 2014a, 2014b, 2014c, 2014d, 2015). Ως εκ τούτου, η αναζήτηση έχει επικεντρωθεί στην συλλογή όσο το δυνατόν πιο κατάλληλων και ικανών δεδομένων που να αφορούν τις φάσεις του κύκλου ζωής, της παραγωγής και τελικής διάθεσης στο τέλος του κύκλου ζωής. Επιπλέον, άλλες περιοχές δεδομένων έχουν ενημερωθεί με βάση την ΑΚΖ ως προς το σχεδιασμό των αιολικών σταθμών, τη σύνθεση των ηλεκτρονικών συστημάτων και οι έλεγχοι που

χρησιμοποιούνται για το στρόβιλο και τις προσδοκώμενες αποδόσεις από την ανακύκλωση πρώτων υλών στο τέλος του κύκλου ζωής.

Τα πρωτογενή δεδομένα έχουν συλλεχθεί από τους κατασκευαστές των Α/Γ (Vestas), από τους προμηθευτές τους και από τους κατασκευαστές των αιολικών σταθμών, υποσταθμών και εν γένει εταιρείες που εμπλέκονται στην κατασκευή αντίστοιχων εγκαταστάσεων. Αυτά τα πρωτογενή δεδομένα πηγάζουν από τα επιμέρους τμήματα που εμπλέκονται στην παραγωγική διαδικασία, και λαμβάνονται από τους καταλόγους των υλικών που χρησιμοποιούνται, μέσω των τεχνικών σχεδίων, καθώς και από τις δηλώσεις από τους προμηθευτές με τη μορφή των εγγράφων τεχνικών προδιαγραφών.

Οι περιπτώσεις όπου έχουν χρησιμοποιηθεί πρωτογενή δεδομένα σε αυτή τη μελέτη περιλαμβάνουν:

- Τη σύνθεση των υλικών των εξαρτημάτων των Α/Γ και εν γένει του αιολικού σταθμού
- Την παραγωγική διαδικασία των βασικών εξαρτημάτων των Α/Γ (π.χ. χύτευση και κατεργασία).
- Την κατανάλωση πρώτων υλών και πόρων στις εγκαταστάσεις παραγωγής Α/Γ.
- Τη σύνθεση των υλικών των μεγάλων εξαρτημάτων που προέρχονται από τρίτους προμηθευτές, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων τον μετασχηματιστή, κλπ. (απευθείας από τους προμηθευτές).
- Τη μεταφορά των τμημάτων των Α/Γ στο χώρο εγκατάστασης και την ανέγερση αυτών (δεδομένα για τα καύσιμα και τη χρησιμοποίηση των οχημάτων από τους προμηθευτές).
- Την κατανάλωση υλικών και πόρων για την προετοιμασία τη λειτουργία και την συντήρηση του αιολικού σταθμού.
- Την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού η οποία βασίζεται σε στοιχεία μετρήσεων απόδοσης των ανεμογεννητριών μέσω του λογισμικού παρακολούθησης και τηλεελέγχου αυτών και τις προβλέψεις παραγόμενης ισχύος.
- Τις ηλεκτρικές απώλειες σε ολόκληρη την εγκατάσταση (στους μετασχηματιστές, καλώδια και δίκτυα διασύνδεσης, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των ανεμογεννητριών, κ.λπ.) από παραγωγούς αιολικής ενέργειας.

- Τα ποσοστά ανακύκλωσης των συγκεκριμένων συστατικών που χρησιμοποιούνται στις Α/Γ.

Όπου τα κύρια δεδομένα δεν είναι άμεσα διαθέσιμα από τους κατασκευαστές των αιολικών σταθμών ή τους προμηθευτές των εξαρτημάτων, δευτερογενή δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη αυτών των κενών. Δευτερογενή στοιχεία έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για δευτερεύουσες διεργασίες που βρίσκονται την αλυσίδα εφοδιασμού.

Περιπτώσεις όπου δευτερεύοντα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη περιλαμβάνουν:

- στις πληροφορίες που αφορούν το μίγμα ηλεκτρικής παραγωγής της χώρας
- στην παραγωγή των πρωτογενών υλικών (π.χ. χάλυβας, σίδηρος, αλουμίνιο, ίνες υάλου, πλαστικό)
- στις διαδικασίες μεταφορών για τις εισροές πρώτων υλών
- σύνθεση των υλικών των μικρότερων ειδών (π.χ. μονωτικά, ροδέλες, βίδες και μπουλόνια)
- κατασκευαστικές διεργασίες των μικρότερων ειδών (π.χ. παραγωγή των πλαστικών)
- τις διεργασίες τέλους ζωής, για παράδειγμα, την υγειονομική ταφή, αποτέφρωση και την ανακύκλωση του χάλυβα.

Τα περισσότερα δευτερεύοντα τεχνικά δεδομένων προέρχονται από το thinkstep (2014) και περιλαμβάνουν επίσης δευτερογενείς πηγές από την ενώσεις της βιομηχανίας, όπως:

- worldsteel
- Eurofer
- Ευρωπαϊκή Ένωση αλουμινίου
- Πλαστικά της Ευρώπης.

3.8 Κριτήρια αποκλεισμού

Τα ακόλουθα κριτήρια αποκοπής χρησιμοποιήθηκαν για να διασφαλιστεί ότι εκπροσωπήθηκαν και αναλύθηκαν κατάλληλα όλες τις σχετικές πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις:

- Κριτήριο μάζας – αν μια ροή είναι λιγότερο από το 1% της μάζας σε επίπεδο προϊόντος, τότε μπορεί να αποκλειστεί, εφόσον η περιβαλλοντική σημασία της δεν προκαλεί ανησυχία.
- Κριτήριο ενέργειας – αν μια ροή είναι λιγότερη από το 1% της ενέργειας σε επίπεδο προϊόντος, τότε μπορεί να αποκλειστεί, υπό τον όρο ότι η περιβαλλοντική της σημασία δεν εμπνέει ανησυχία.
- Κριτήριο περιβάλλοντος – εάν μια ροή πληρεί τα παραπάνω κριτήρια αποκλεισμού, αλλά θεωρείται ότι έχει δυνητικά σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, έχει συμπεριληφθεί. Όλες οι ροές υλικών που αποβάλλονται το σύστημα (εκπομπές) και των οποίων οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι υψηλότερες από το 1% των ολόκληρο επιπτώσεων μιας κατηγορίας επιπτώσεων που έχει ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση, πρέπει να περιλαμβάνονται.
- Το σύνολο των ροών των υλικών που δεν λαμβάνεται υπ' όψη δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 5% της συνολικής μάζας, ενέργειας ή περιβάλλοντος.

Πάνω από το 99,9% της συνολικής μάζας των υλικών σε μια Α/Γ των 2.0 MW (δηλαδή καλύπτοντας όλα τα μέρη της Α/Γ, εκτός των θεμελίων της, τα καλώδια διασύνδεσης και τις εγκαταστάσεις του χώρου εγκατάστασης), καλύπτεται από περίπου 25.000 εξαρτήματα που τη συνθέτουν. Επιπλέον, όλα τα μέρη του σταθμού, βάσεις και καλώδια περιλαμβάνονται επίσης στο σύνολό τους για την πλήρη εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Ως εκ τούτου, η ΑΚΖ περιλαμβάνει όλα τα υλικά και όλα τα εξαρτήματα με περιβαλλοντική σημασία. Σε έκταση περίπου το 99,95% της συνολικής εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας αντιπροσωπεύεται από την ροή κατά μάζα. Τα κριτήρια αποκοπής που εφαρμόζονται στις ροές των δευτερευόντων δεδομένων αναλύονται στην αντίστοιχη τεκμηρίωση (thinkstep, 2014).

3.9 Υποθέσεις

Αυτή η ενότητα περιγράφει τις πρωτεύουσες παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για την ΑΚΖ που επηρεάζουν τις περιβαλλοντικές επιδόσεις της αιολικής μονάδας παραγωγής ενέργειας.

3.9.1 Χρόνος ζωής των Α/Γ και των λοιπών μερών της εγκατάστασης

Η διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου θεωρείται να είναι τα 20 χρόνια. Αυτό αντιστοιχεί στη διάρκεια ζωής του σχεδιασμού της Α/Γ και εφαρμόζεται σε όλα τα εξαρτήματα ενός αιολικού σταθμού, εκτός από ορισμένα ανταλλακτικά. Ωστόσο η αιολική βιομηχανία στροβίλων είναι ακόμα σχετικά νέα (εκκίνησε το 1979) οπότε η πραγματική διάρκεια ζωής ενός αιολικού σταθμού είναι αβέβαιη και αναμένεται κάποια διακύμανση γύρω από το χρόνο των 20 ετών. Για παράδειγμα, οι κατασκευαστές Α/Γ (Vestas) έχει σε άμεση γνώση μια σειρά από ανεμογεννήτριες που υπερβαίνουν τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού των 20 ετών. Επιπλέον, άλλα στοιχεία της εγκατάστασης, όπως τα καλώδια διασύνδεσης και οι βάσεις μπορεί να έχουν μια σημαντικά μεγαλύτερη ωφέλιμη διάρκεια ζωής (περίπου 50 χρόνια). Οι επιδράσεις του εύρους της διάρκειας ζωής ενός αιολικού σταθμού στις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις συζητούνται στην ενότητα 5.

3.9.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Μια χαρακτηριστική χωροθέτηση για Α/Γ των 2.0 MW με μέση ταχύτητα ανέμου 7,0 m/s και ύψος πύργου 80m εκτιμάται στην ΑΚΖ, που αντιπροσωπεύει, για παράδειγμα, μια ρεαλιστική τοποθεσία αιολικού σταθμού στην νότια Ευρώπη και τη βόρεια Αμερική. Ο πίνακας 2 δείχνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Turbine	Wind class	Wind speed	Location	Grid distance	Per turbine per year (AEP)	Per 50MW plant per 20 years
2.0 MW		ms-1		km	MWh	GWh
	Low	7.0	Onshore	20	7567	3783

Πίνακας 2: Παραγωγή ηλεκτρικής Ενέργειας του αιολικού σταθμού ανά έτος και σε όλο το χρόνο ζωής του.

Με βάση την τυπικές καμπύλες ισχύος για τη συγκεκριμένη μέση ταχύτητα ανέμου, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικούς σταθμούς ισχύος 50MW είναι 3783 GWh σε 20 χρόνια λειτουργίας (ισοδύναμος σε 7567 MWh ανά ανεμογεννήτρια ανά έτος).

Στην παραγωγή αυτή περιλαμβάνονται όλες οι ηλεκτρικές απώλειες έως και το ηλεκτρικό δίκτυο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών της Α/Γ, του μετασχηματιστή του υποσταθμού και των καλωδίων διασύνδεσης. Αυτά εκτιμώνται σε 2,5% για ένα αιολικό σταθμό του οποίου οι Α/Γ συνδέονται μεταξύ τους με μεση τάση (MV) και σε απόσταση 20 χιλιομέτρων από το δίκτυο μεταφοράς το οποίο λειτουργεί σε υψηλή τάση 150kV. Οι απώλειες σκιάσεων των Α/Γ (οι οποίες προκύπτουν από τη σκίαση που προκαλεί μια Α/Γ σε άλλη που βρίσκεται πίσω της για συγκεκριμένη διεύθυνση ανέμου) συμπεριλαμβάνονται επίσης στα πιο πάνω στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Vestas, 2012).

Δεδομένου ότι το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια ζωής του αιολικού σταθμού παραγωγής ενέργειας είναι καθοριστικής σημασίας για το περιβαλλοντικό προφίλ της παραγόμενης kWh, έχει εφαρμοστεί ανάλυση ευαισθησίας, μελετώντας εναλλακτικές ταχύτητες ανέμου, όπως φαίνεται στην ενότητα 5.

3.9.3 Εισροές πρώτων υλών

Τη στιγμή που αυτή η μελέτη διενεργήθηκε, δεν ήταν δυνατή η απόκτηση αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με το βαθμό της ανακυκλωμένης ύλης από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Ως εκ τούτου, έχει υποτεθεί ότι όλα τα υλικά που εισέρχονται στο σύστημα παραγωγής προέρχονται από πρωτογενές υλικό. Ωστόσο, για τον σίδηρο, τον χάλυβα, το αλουμίνιο και το χαλκό, η δευτεροβάθμια (υπό μορφή παλαιοσίδηρων) εισροή για την πρωτογενή παραγωγή έχει προσαρμοστεί για να αντιστοιχιστεί μια επιβάρυνση σε όλες τις δευτερεύουσες εισαγωγές μετάλλων (χρησιμοποιώντας πρωτογενούς παραγωγής ή worldsteel «τιμή σκραπ» για αυτά τα βάρη). Αυτό παρέχει μια δίκαια και αντιπροσωπευτική προσέγγιση ώστε να αξιολογήσει τις επιπτώσεις της παραγωγής μετάλλων και την ανακύκλωση. Μεγαλύτερη ανάλυση γίνεται στην 3.12 για περαιτέρω λεπτομέρειες τις προσεγγίσεις ανακύκλωσης που υιοθετήθηκαν για την AKZ

Ως επί το πλείστον στην Α/Γ δεν χρησιμοποιούνται σπάνιες γαίες για τη γεννήτρια (δηλαδή νεόδμιο και Δυσπρόσιο) αλλά χρησιμοποιείται μια διπλής ανατροφοδότησης επαγωγική γεννήτρια (SFIG) που κατασκευάζεται κυρίως από σιδήρο/χάλυβα και χαλκό. Υπάρχει κάποια χρήση των σπάνιων γαιών στον πύργο της Α/Γ για την τοποθέτηση

εσωτερικών φωτιστικών. Η παραγωγή των υλικών αυτών βασίζεται σε συγκεκριμένα τεχνικά δεδομένα και οι φυσικοί πόροι αντλούνται από την Ευρώπη και την Ασία.

3.9.4 Διαχείριση τέλους ζωής

Η διαχείριση του τέλους του κύκλου ζωής της Α/Γ είναι εκτενής και λεπτομερή. Υποτίθεται ότι η Α/Γ ολόκληρη «συλλέγεται» κατά το τέλος της ζωής της. Ωστόσο, η ολόκληρη Α/Γ δεν είναι ανακυκλώσιμη ομοιογενώς όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Όλα τα μεγάλα μεταλλικά στοιχεία που είναι κατά κύριο λόγο μόνο υλικό (π.χ. τμήματα πύργου, το πλαίσιο της νασέλας από χυτοσίδηρο, κ.λπ.) θεωρούνται ότι είναι κατά 98% ανακυκλώσιμα. Άλλα σημαντικά στοιχεία, όπως γεννήτρια, κιβώτιο ταχυτήτων, καλώδια και σύστημα προσανεμισμού είναι 95% ανακυκλώσιμα και όλα τα άλλα μέρη της τουρμπίνας αντιμετωπίζονται όπως φαίνεται στον πίνακα 3.

Material	Treatment	Credited material datasets*
Steel	92% recycled + 8% landfilled	Value of scrap from worldsteel. No further distinction made between
Aluminium	92% recycled + 8% landfilled	Aluminium ingot mix (2010). No further distinction made between
Copper	92% recycled + 8% landfilled	Copper mix (global) from PE International.
Polymers	50% incinerated + 50% landfilled	No further distinction made between No credit assigned.
Lubricants	100% incinerated (no energy	No credit assigned.
All other materials (including concrete)	100% landfilled	No credit assigned.

**Refers to the general datasets used for end-of-life crediting for these material groups for the entire turbine and wind plant*

Πίνακας 3: διαχείριση τέλους ζωής εξαρτημάτων Α/Γ που δεν περιλαμβάνονται στο κείμενο

Οι πληροφορίες για τα ποσοστά ανακύκλωσης των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών προέρχεται από την πλήρη ανακύκλωση μια νασέλας μίας Α/Γ του οίκου Vestas (Vestas και Averbhoff, 2012), σε συνάρτηση με την κρίση των εμπειρογνομόνων αλλά και δεδομένα που λαμβάνονται από προηγούμενες μελέτες AKZ της Vestas. Αυτή η μελέτη αντιπροσωπεύει μια ενημερωμένη έκδοση από τις προηγούμενες μελέτες AKZ αυτής της

A/Γ. Απώλειες υλικών από η διαδικασία ανακύκλωσης υπολογίζονται πάνω από αυτά τα ποσοστά ανακύκλωσης.

Στο τέλος του κύκλου ζωής, δίνονται πλήρης κίνητρα για τα υλικά που έχουν ανακτηθεί (αφορά μόνο μεταλλικά μέρη, κατασκευασμένα από χάλυβα, σιδήρο, χαλκό και αλουμίνιο), τακτική που βασίζεται σε μία «προσέγγιση του να αποφευχθούν οι επιπτώσεις» με την παροχή πιστώσεων για ανακύκλωση. Η «προσέγγιση του να αποφευχθούν οι επιπτώσεις» (ονομάζεται επίσης προσέγγιση κλειστού βρόχου) και υποστηρίζεται από τη βιομηχανία μετάλλων (Atherton, 2007 · PE, 2014), και είναι σύμφωνη με το πρότυπο ISO 14044 και εξυπηρετεί τους στόχους της περιβαλλοντικής μοντελοποίησης, της λήψης αποφάσεων και τις αναζητήσεις κατάλληλης πολιτικής που αφορά την ανακύκλωση μετάλλων.

Επιπλέον, η χρήση μιας προσέγγισης αποφυγής επιπτώσεων αποτελεί ένα επιχειρηματικό μέτρο να ωθήσει την πλήρη ανακυκλωσιμότητα της ανεμογεννήτριας, η οποία μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τα μοντέλα AKZ, επιτρέποντας στους κατασκευαστές/εμπλεκόμενους την προώθηση των επιχειρηματικών δραστηριοτήτων στον τομέα αυτό, για παράδειγμα εστιάζοντας στην ανακύκλωση/επαναχρησιμοποίηση των μη μεταλλικών μερών, όπως τα σύνθετα υλικά των φτερών, τους ηλεκτρονικούς επεξεργαστές και τα πολυμερή υλικά (Larsen, 2009). Λεπτομέρειες για την ανακυκλωσιμότητα των A/Γ βρίσκονται στο τμήμα 4.2.3.4.

Ωστόσο, αναγνωρίζεται επίσης από επιστημονική άποψη, ότι μια προσέγγιση «ανακυκλωμένου περιεχομένου» για την αποτίμηση της ανακύκλωσης θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί σε ανεμογεννήτριες (Garrett, 2012). Ως εκ τούτου, στην ενότητα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της AKZ, αν εφαρμοζόταν μια προσέγγιση «ανακυκλωμένου περιεχομένου» για την αποτίμηση. Αυτό βασίζεται στα βασικά βιομηχανικά τεχνικά φυλλάδια (όπως worldsteel) που περιέχουν το μέσο ανακυκλωμένο περιεχόμενο των μεταλλικών υλικών και, επομένως, αντιπροσωπεύουν μια εκτίμηση για την πραγματική κατάσταση για μια A/Γ, καθώς το ακριβές ανακυκλωμένο περιεχόμενο όλων των μερών δεν είναι γνωστό.

Τα τεχνικά φυλλάδια δεδομένων που αφορούν την απόρριψη σε χωματερές συσχετίζονται με τον τύπο υλικού που είναι προς διάθεση σε ΧΥΤΑ, για παράδειγμα, τα γενικά πολυμερή ή ο χάλυβας και το αλουμίνιο για τα μέταλλα. Τα τεχνικά φυλλάδια

δεδομένων για την αποτέφρωση των λιπαντικών δεν περιλαμβάνουν πιστώσεις για ανάκτηση θερμικής ενέργειας, ενώ η αποτέφρωση των πλαστικών που σχετίζεται με έναν τύπο πολυμερούς νάιλον γεμισμένο με γυαλί, περιέχει πιστώσεις για την ανάκτηση ενέργειας.

3.9.5 Αέριο εξαφθοριούχο θείο (SF₆)

Το εξαφθοριούχο θείο είναι ένα πολύ δραστικό αέριο του θερμοκηπίου που χρησιμοποιείται σε διακοπτικά στοιχεία για εφαρμογές μέσης και υψηλής τάσης. Το αέριο λειτουργεί σαν ένας ηλεκτρικός μονωτής για τη λειτουργία των διακοπών. Κάθε ανεμογεννήτρια περιέχει διακόπτες και επίσης αντίστοιχοι διακόπτες χρησιμοποιούνται σε όλη την εγκατάσταση στα σημεία σύνδεσης των Α/Γ και των μετασχηματιστών του υποσταθμού ανύψωσης τάσης.

Η απελευθέρωση του εξαφθοριούχου θείου στην ατμόσφαιρα κατά τη χρήση και εφαρμογή των διακοπών αυτών, γίνεται μόνο κατά τη διάρκεια έκρηξης του διακόπτη. Εμφανίσεις τέτοιων εκρήξεων είναι εξαιρετικά σπάνιες και δεν έχουν ληφθεί υπόψη σε αυτή τη μελέτη. Κατά την κανονική λειτουργία των διακοπών μπορεί δυνητικά να διαρρεύσει μέχρι ένα ποσοστό της τάξης του 0.1% w/w του εξαφθοριούχου θείου ανά έτος, και άρα αθροιστικά για ένα πιθανό ποσοστό 2% w/w να απελευθερώνεται στα 20 χρόνια λειτουργίας του αιολικού σταθμού. Η δυνητική επίδραση μίας έκρηξης διακόπτη εκτιμάται στην ανάλυση ευαισθησίας, όπως φαίνεται στην ενότητα 5.2.8.

Στο τέλος του κύκλου ζωής, συλλέγονται οι διακόπτες και το αέριο εξαφθοριούχο θείο ανακτάται για να επαναχρησιμοποιηθεί σε νέο εξοπλισμό. Πολλοί κατασκευαστές έχουν καθιερώσει διαδικασίες και εργάζονται σε συνεργασία με πελάτες και προμηθευτές, για να εξασφαλίσουν την ασφαλή διάθεση των διακοπτικών μέσων που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες. Βάση των δεδομένων πολλών προμηθευτών εκτιμάται ότι σε ένα ανώτατο όριο του 1% w/w το αέριο SF₆ μπορεί να ελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα κατά τη διαδικασία της ανάκτησης και της ανακύκλωσης του στο τέλος του κύκλου ζωής. Εκτιμάται ότι το 95% των διακοπτικών μέσων θα επιστραφούν για ανάκτηση στο τέλος του κύκλου ζωής. Για το υπόλοιπο 5% υποτίθεται ότι όλο το αέριο του εξαφθοριούχου θείου απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα στο τέλος του κύκλου ζωής.

3.9.6 Θεμελιώσεις

Υπάρχουν δύο βασικά είδη θεμελίων πύργων ανεμογεννητριών οι οποίες πρόκειται να εγκατασταθούν στην ξηρά (onshore) και επιλέγονται ανάλογα με το επίπεδο νερού του εδάφους, ως εξής:

- υψηλού υδροφόρου ορίζοντα (HGWL): υποδεικνύει ένα μέγιστο επίπεδο υπόγειων υδάτων ίσο με το επίπεδο του εδάφους, η οποία απαιτεί περισσότερο σκυρόδεμα και οπλισμό.
- χαμηλή στάθμη των υπόγειων υδάτων (LGWL): στο σενάριο που υπάρχει χαμηλός υδροφόρος ορίζοντας (απαιτείται λιγότερο σκυρόδεμα και οπλισμός σιδήρου).

Έχει επιλεγεί ως βασική περίπτωση για την παρούσα διατριβή η υπόθεση χαμηλού επιπέδου των υπόγειων υδάτων καθώς είναι πιο αντιπροσωπευτική της πλειοψηφίας των αιολικών εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και στην ελληνική επικράτεια. Το μέγεθος της θεμελίωσης διαφέρει επίσης ανάλογα με το ύψος του Πύργου της Α/Γ και την ανεμολογική κλάση για το την Α/Γ των 2.0 MW, η οποία επηρεάζει τις μηχανικές καταπονήσεις των θεμελίων. Οι διακυμάνσεις αυτές λογίζονται επίσης στη μελέτη.

3.9.7 Ηλεκτρικά/Ηλεκτρονικά εξαρτήματα στην Α/Γ

Όσο νεότερο και πιο εξελιγμένο τεχνολογικά είναι το μοντέλο της Α/Γ που χρησιμοποιείται σαν βάση για τη μελέτη της ΑΚΖ τόσο πιο πιθανό είναι αυτή η μελέτη να παρέχει μια ενημερωμένη έκδοση σε προηγούμενες μελέτες ΑΚΖ. Αυτό συνίσταται στο γεγονός ότι όλα τα επιμέρους εξαρτήματα ηλεκτρονικών και τυπωμένοι πίνακες κυκλωμάτων έχουν χαρτογραφηθεί με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια σε ατομική βάση ανά τεμάχιο. Όλοι οι ελεγκτές στην Α/Γ χαρτογραφούνται ειδικά για τους επιμέρους τύπους στοιχείων, όπως τις αντιστάσεις, τους πυκνωτές, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, κλπ. σύμφωνα με το μέγεθος του συστατικού και τις προδιαγραφές αυτών. Οι κατασκευαστές των Α/Γ και οι εργολάβοι τους σχεδιάζουν τους ηλεκτρονικούς ελεγκτές και τα

εξαρτήματα στην Α/Γ και ως εκ τούτου είναι δυνατόν να χαρτογραφηθούν όλους τους τύπους στοιχείων στην Α/Γ, τα οποία καλύπτουν περίπου 12000 μέρη σε μια πλήρη Α/Γ.

3.9.8 Μεταφορές

Τα επιμέρους βήματα που αφορούν τις μεταφορές σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός αιολικού σταθμού και έχουν συμπεριληφθεί στη μελέτη αυτή περιγράφονται παρακάτω:

- Οι μεταφορές που συνδέονται με εισερχόμενες πρώτες ύλες στους προμηθευτές των Α/Γ υποτίθεται ότι είναι 600 χλμ με χρήση φορτηγών, εκτός από τα θεμέλια όπου υποτίθεται 50 χλμ για τα υλικά του σκυροδέματος. Αυτή η υπόθεση καλύπτει την μεταφορά των πρώτων υλών προς τους προμηθευτές των εργοστασίων των Α/Γ.
- Οι μεταφορές που συνδέονται με την εισαγωγή των μεγάλων εξαρτημάτων από τους προμηθευτές έως τα εργοστάσια παραγωγής των Α/Γ υποτίθεται ότι είναι 600 χλμ με χρήση φορτηγών. Αυτό αντιπροσωπεύει το 90% της μάζας στροβίλων (εκτός των θεμελίων) και καλύπτει τη μεταφορά των επιμέρους εξαρτημάτων από τον προμηθευτή σε εργοστάσια Α/Γ.
- Οι μεταφορές που συνδέονται με την μετακίνηση των κυρίως εξαρτημάτων του αιολικού σταθμού από τα εργοστάσια προς το χώρο εγκατάστασης δίνονται στον πίνακα 4 παρακάτω.

Component	Truck (km)	Ship (km)
Nacelle	785	8575
Hub	785	8575
Blades	2200	1570
Tower	2065	2125
Foundation	50	0
Other site parts	600	0

Πίνακας 4: Αποστάσεις μεταφοράς των επιμέρους εξαρτημάτων των Α/Γ στο χώρο εγκατάστασης

- Οι μεταφορές που συνδέονται με το τέλος του κύκλου ζωής, την ανακύκλωση ή την τελική διάθεση υποτίθεται ότι είναι 200 χλμ σε μια περιφερειακή

ανακύκλωση ή διάθεση από τον παραγωγό, εκτός από τα υλικά σκυροδέματος των θεμελίων για τα οποία υποτίθενται τα 50 χλμ.

- Οι Μεταφορές του πληρώματος συντήρησης προς και από την εγκατάσταση κατά τη λειτουργία και διεξαγωγή των υπηρεσιών συντήρησης, ενημερώνεται βάσει των υπάρχουσών δεδομένων από τη συντήρηση των Α/Γ και εκτιμάται σε 1500 χιλιόμετρα ανά αιολικό σταθμό το χρόνο.

Στην τρέχουσα μελέτη ΑΚΖ υποτίθεται η χρήση φορτηγού και κατανάλωση καυσίμων πλοίου στη θάλασσα (και χρησιμοποίηση οχημάτων) με συγκεκριμένα δεδομένα για τη μεταφορά των διαφόρων εξαρτημάτων της Α/Γ (όπως τα τμήματα του πύργου, τα φτερά και τη νασέλα). Αυτά βασίζονται σε στοιχεία μετρήσεων και συγκεκριμένες αποστάσεις από μια πραγματική μεταφορά ανεμογεννήτριας. Μια ανάλυση σεναρίου για τη μεταφορά των επιμέρους στοιχείων στον αιολικό σταθμό έχει διεξαχθεί για να προσδιοριστεί η σημασία αυτών των δραστηριοτήτων στο πλαίσιο ενός πλήρους κύκλου ζωής, υποθέτοντας μια πιθανή βέλτιστη και χερίστη προσέγγιση.

3.9.9 Ιδιόκτητοι αιολικοί σταθμοί από κατασκευαστές Α/Γ

Ως μέρος του εταιρικού προφίλ και ως μέσο για την επίτευξη συγκεκριμένων περιβαλλοντικών στόχων τόσο για την εταιρεία όσο και για το προϊόν, η Vestas το 2014 πέτυχε τη διαπίστευση 100% WindMade (2015). Ως προϋπόθεση της επίτευξης της διαπίστευσης WindMade 100% γίνονται από τη Vestas σημαντικές επενδύσεις σε ιδιόκτητο από τον κατασκευαστή αιολικό σταθμό ο οποίος βρίσκεται στη Βουλγαρία με σκοπό την εξισορρόπηση μη - ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται αλλού σε εργοστάσια και εγκαταστάσεις της ίδιας εταιρείας, αλλά και τη παρακράτηση του κέρδους από την παραγωγή.

Από επιχειρηματικής πλευράς, αυτή η ΑΚΖ στοχεύει στο να παρέχει ένα σημαντικό εργαλείο τόσο ώστε να μετρήσει αλλά και να κινητοποιήσει τους περιβαλλοντικούς στόχους τόσο σε επίπεδο προϊόντος όσο και σε επίπεδο επιχειρηματικής μονάδας αλλά και για να αναδείξει την ιχνηλασιμότητα μεταξύ των επιπέδων αυτών για τις βελτιώσεις που επιτεύχθηκαν.

Ως εκ τούτου, ο εκάστοτε κατασκευαστής που προχωρά σε μια αντίστοιχη κίνηση, έχει σκοπό να δείξει πώς οι φιλόδοξοι εταιρικοί περιβαλλοντικοί στόχοι (π.χ. εσωτερική

κατανάλωση ενέργειας μέσω της προμήθειας 100% ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας) επεκτείνεται ως αντίκτυπο και στην απόδοση των προϊόντων του, από μια προοπτική κύκλου ζωής όπως παρουσιάζεται στην τρέχουσα μελέτη AKZ. Ωστόσο, σύμφωνα με τους ορισμούς στη προδιαγραφή κατά ISO -14000 (π.χ. 14040 και 14067) αυτή η ενεργειακή πίστωση ουσιαστικά θεωρείται ως «αντιστάθμισμα» που, υπό το πρότυπο 14067 όσον αφορά το αποτύπωμα άνθρακα, αυτό είναι ένας «μηχανισμός αντιστάθμισης για όλο ή για μέρος του αποτυπώματος άνθρακα, μέσω της αποφυγής της απελευθέρωσης του, ή της μείωσης των εκπομπών αερίων ρύπων ή απομάκρυνσης ενός ποσού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε μια διαδικασία έξω από τα όρια του συστήματος του προϊόντος.» Το πρότυπο ISO-14067 που αφορά το αποτύπωμα άνθρακα δηλώνει σαφώς ότι αυτά τα αντισταθμιστικά οφέλη δεν μπορεί να λογίζονται στα βασικά αποτελέσματα, αλλά μόνο μπορούν να αναφέρονται χωριστά.

Από τη σκοπιά του ISO 14040, στην οποία η AKZ αναθεωρείται ως προς τη συμμόρφωση με το πρότυπο ISO, ισχύει ένας παρόμοιος περιορισμός, που απαιτεί ότι "διπλός υπολογισμός πρέπει να αποφευχθεί», στοιχείο που αναγνωρίζεται σαφώς από τους συγγραφείς ως βασική προϋπόθεση για τη διενέργεια οποιασδήποτε αξιολόγησης.

Παρόλα αυτά, λαμβάνεται μια αυστηρή και διαφανή προσέγγιση για τη διεξαγωγή της αξιολόγησης του κύκλου ζωής και η πίστωση ενέργειας από μια επένδυση σε εγκαταστάσεις αιολικών σταθμών που ανήκουν στον εκάστοτε κατασκευαστή δεν περιλαμβάνεται στα βασικά αποτελέσματα της AKZ. Ωστόσο, σε μια ανάλυση ευαισθησίας η οποία παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.2, περιλαμβάνει αυτή την πιθανή πίστωση.

3.10 Κατανομή των δεδομένων

Οι ανεμογεννήτριες έχουν την ηλεκτρική ενέργεια ως το μόνο αξιόλογο αποτέλεσμα. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι διάφοροι κατασκευαστές παράγουν διάφορα μοντέλα Α/Γ και η συλλογή των δεδομένων παραγωγής γίνεται σε επίπεδο εργοστασίου για όλες τις εγκαταστάσεις της παγκόσμιας παραγωγής, η κατασκευή μίας κατανομής κρίθηκε απαραίτητη για να αντιστοιχιστούν τα σωστά βάρη σε κάθε μία παραγωγή (από τις διαφορετικές κατασκευαστικές θέσεις) για το εκάστοτε μοντέλο ανεμογεννητριών του αιολικού σταθμού. Ομοίως, αντίστοιχη κατανομή χρησιμοποιείται για να αντιστοιχιστεί

το ποσοστό των πιστώσεων ενέργειας από εγκαταστάσεις που ανήκουν στον κατασκευαστή για το συγκεκριμένο μοντέλο A/Γ, στη βάση MJ προς MJ.

3.11 Ανάλυση των δεδομένων

Αυτή η μελέτη AKZ ακολουθεί μια θεωρητική διαδικαστική προσέγγιση, η οποία επικεντρώνεται στην ποσοτικοποίηση των σχετικών περιβαλλοντικών ροών που αφορούν τον αιολικό σταθμό παραγωγής ενέργειας και να περιγράφει τις πιθανές επιπτώσεις της μονάδας παραγωγής ενέργειας βασιζόμενη στις ροές ενέργειας τις ροές των φυσικών υλικών.

Τα αρχεία για τον κύκλο ζωής που δημιουργούνται για κάθε προϊόν, καταρτίζονται από τις εισροές και εκροές σε κάθε μια από τις διεργασίες παραγωγής του προϊόντος. Όλες οι περιβαλλοντικά σημαντικές ροές ενέργειας και υλικών που διασχίζουν τα όρια του συστήματος έχουν ληφθεί υπ' όψη (π.χ. ροές ενέργειας, υλικών πόρων, αποβλήτων και εκπομπών αερίων). Αυτές οι ροές καταγράφονται για κάθε επιμέρους διαδικασία και συνοψίζονται σε ολόκληρο το σύστημα της ηλεκτροπαραγωγής από ολόκληρο τον αιολικό σταθμό. Το λογισμικό και οι βάσεις δεδομένων GaBi LCA μαζί με το GaBi DfX χρησιμοποιήθηκαν ώστε να μοντελοποιηθούν τα σενάρια και να δημιουργηθούν τα πρωτεύοντα αρχεία κύκλου ζωής και οι εκτιμήσεις επιπτώσεων στα οποία βασίζονται τα συμπεράσματα της μελέτης. Οι επεκτάσεις του λογισμικού DfX επιτρέπουν την εισαγωγή ενός πλήρους καταλόγου υλικών του προϊόντος σε ένα μοντέλο AKZ, η οποία αντιπροσωπεύει ένα καινοτόμο εργαλείο για τη διεξαγωγή της AKZ (thinkstep, 2014).

3.12 Μοντελοποίηση των σταδίων του κύκλου ζωής

Η μοντελοποίηση του κύκλου ζωής αρχίζει με ένα αναλυτικό κατάλογο των χρησιμοποιούμενων υλικών (που περιέχει ένα υπό-δέντρο ολόκληρης της A/Γ). Κάθε μέρος έχει συσχετιστεί με ένα υλικό, τη διεργασία παραγωγής του και την χώρα προέλευσης του. Αυτή η διαδικασία είναι εξαιρετικά εκτεταμένη, όπου μια επιλεγμένη λίστα υλικών για μια A/Γ ισχύος 2.0 MW αποτελείται περίπου από 25,000 μέρη. Η μοντελοποίηση αυτή όλων των κυρίων εξαρτημάτων «συμβατικά» σε μια AKZ δεν είναι εφικτή. Ωστόσο, η χρήση του GaBi DfX επιτρέπει αυτή την τεχνική ανάλυση που θα

εισαχθεί εν συνεχεία στο το λογισμικό της AKZ στο οποίο όλα τα υλικά και οι διαδικασίες κατασκευής αντιστοιχίζονται για τα επιμέρους εξαρτήματα στην πλήρη ανάλυση υλικών.

Τα μοντέλα των διεργασιών κατασκευής που δημιουργήθηκαν έχουν παραμέτρους μόνο την ενέργεια και τα αναλώσιμα που συνδέονται με τον κύκλο ζωής των υλικών που περιέχονται στα αρχεία κύκλου ζωής (καθώς επιμέρους μέρη ανεμογεννητριών περιλαμβάνονται ήδη στην ανάλυση υλικών). Ομοίως μοντελοποιούνται και οι υπηρεσίες και οι λειτουργίες στο χώρο τελικής εγκατάστασης.

Το λογισμικό AKZ δημιουργεί ένα «μοντέλο προϊόντος» που περιλαμβάνει όλα τα υλικά και τους ενεργειακούς πόρους που εμπλέκονται στην παραγωγή της Α/Γ, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών υλικού από τις διαδικασίες παραγωγής και πιθανούς εσωτερικούς βρόχους ανακύκλωσης.

Το DfX λογισμικό παρέχει επίσης τη λειτουργία της αποσυναρμολόγησης ολόκληρης της Α/Γ (ή τμήματά αυτής) στα συστατικά της. Αυτό επιτρέπει τη δυνατότητα κατασκευής για ένα εξαιρετικά λεπτομερές μοντέλο τέλος του κύκλου ζωής το οποίο είναι συγκεκριμένο για κάθε μέρος της Α/Γ. Αυτό το χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται για τη διαχείριση κατά το τέλος του κύκλου ζωής της Α/Γ όπου ορισμένα μέρη της μπορεί να διαλύονται και ανακυκλώνονται πιο εύκολα, και τα οποία θα λάβουν υψηλότερες αποδόσεις από το υπόλοιπο μέρος του στροβίλου.

3.13 Κατηγορίες εκτίμησης των επιπτώσεων και αντίστοιχες μετρήσεις

Η επιλογή των κατηγοριών των επιπτώσεων που αξιολογούνται σε αυτή τη μελέτη είναι αντιπροσωπευτική των επιπτώσεων που ενδέχεται να προκύψουν από ένα σύστημα αιολικού σταθμού παραγωγής ενέργειας, βάσει των CML (2013) βασικών παραγόντων χαρακτηρισμού για τις ενδιάμεσου σημείου πιθανές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, οι επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων καλύπτουν εκείνες που συνδέονται με την παραγωγή μετάλλων, την κατασκευή και την ανακύκλωση (εκ των οποίων η Α/Γ αποτελείται από περίπου 87% μέταλλα), καθώς και άλλα υλικά που συμπεριλαμβάνονται τόσο στο στρόβιλο όσο και στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα το σκυρόδεμα, τα πολυμερή και άλλα σύνθετα υλικά. Η παρουσία δυναμικού εξάντλησης του όζοντος (ODP) έχει παραλειφθεί από τις κατηγορίες των επιλεγμένων

επιπτώσεων καθώς αυτό δεν θεωρείται να είναι ένα σημαντικό ζήτημα από την εφαρμογή του πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ το 1987 (UNEP,1987) η οποία έχει μειώσει δραστικά τόσο την χρήση αλλά και τις εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος (UNEP, 2007). Οι ακόλουθες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οι δείκτες μη επιπτώσεων αξιολογούνται στην AKZ:

Κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Βάσει CML):

- Μείωση των αβιωτικών πόρων (ADP στοιχεία)
- Μείωση αβιοτικών πόρων (ADP ορυκτά)
- Δυναμικό οξίνισης (AP)
- Δυναμικό ευτροφισμού (EP)
- Δυναμικό υδατικής οικοτοξικότητας του γλυκού νερού (FAETP)
- Δυναμικό παγκόσμιας υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP)
- Δυναμικό τοξικότητας για τον άνθρωπο (HTP)
- Δυναμικό οικοτοξικότητας αλμυρού νερού (MAETP)
- Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικών οξειδωτικών (POCP)
- Δυναμικό επίγειας οικοτοξικότητας (TETP)

Δείκτες μη επιπτώσεων (όχι βάσει CML):

- Πρωτογενής ενέργεια από ανανεώσιμες πρώτες ύλες (καθαρή θερμογόνος αξία)
- Πρωτογενούς ενέργειας από πόρους (καθαρή θερμογόνος αξία)
- Νερό που καταναλώνεται
- Ικανότητα ανακύκλωσης των εξαρτημάτων

Η μέθοδος μοντελοποίησης του αντικτύπου που χρησιμοποιείται είναι αυτή που αναπτύσσεται από το κέντρο περιβαλλοντικών επιστημών, Πανεπιστήμιο του Λέιντεν (CML, 2013) η οποία ενσωματώνεται στο εργαλείο λογισμικού GaBi LCA. Η επιλεχθείσα CML-μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την τρέχουσα αλλά και αντίστοιχες AKZ από πολλούς κατασκευαστές όπως η Vestas και δίνει ισχυρά αποτελέσματα για τις μεσοπρόθεσμες πιθανές επιπτώσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος CML συνεισφέρει και στην πιο πρόσφατη ReCiPe (PE, 2014) μέθοδο εκτίμησης επιπτώσεων, και είναι αναγνωρισμένο ότι άλλες μέθοδοι εκτίμησης επιπτώσεων μπορεί να είναι ευεργετικές, καθώς εξελίσσονται ή καθίστανται κατάλληλες. Ωστόσο, μια πρόσφατη

εναρμόνιση από 16 συνδέσμους βιομηχανίας εξακολουθεί να συνιστά τη CML ως μια εξίσου καλή επιλογή, καθώς και τη ReCipE (PE, 2014).

Παρουσιάζονται κάποια επιπλέον αποτελέσματα που στοχεύουν να παρουσιάσουν μια ενημερωμένη βάση ώστε να εκτιμηθεί η απόδοση της Α/Γ βάσει των τελευταίων δεδομένων και μεθόδους επιπτώσεων, καθώς και ενημερώσεις στη διαμόρφωση των Α/Γ ώστε να κάνει ένα νέο σημείο αναφοράς το οποίο ευθυγραμμίζεται περισσότερο με την εμπορική προσφορά του προϊόντος. Αυτό το σημείο αναφοράς έχει ως στόχο να δώσει πρόσθετα αποτελέσματα τα οποία βοηθούν να αξιολογηθούν τα τρέχοντα και μελλοντικά σχέδια των Α/Γ. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν τις ακόλουθες ενημερώσεις:

- μέθοδοι εκτίμησης επιπτώσεων για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του προϊόντος (EC, 2012)·
- ενημερώσεις ρύθμισης παραμέτρων της Α/Γ και αποτελέσματα ανά κατηγορία αιολικού δυναμικού σύμφωνα με το IEC.

Οι κατηγορίες επιπτώσεων σύμφωνα με το CML εστιάζουν στο λεγόμενο «ενδιάμεσο σημείο» της αλυσίδας αιτίας-αποτελέσματος. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα για τις εκπομπές υπολογίζονται συγκεντρωτικά (τα σημεία εκκίνησης της αλυσίδας αιτίας-αποτελέσματος) και ερμηνεύονται ως προς τις πιθανές τους επιπτώσεις σε διάφορες κατηγορίες (π.χ. παγκόσμια υπερθέρμανση του πλανήτη, οξίνιση, κλπ.), αλλά δεν επεκτείνεται η ερμηνεία τους τόσο μακριά ώστε να αξιολογηθούν τα τελικά σημεία, όπως η απώλεια της βιοποικιλότητας, η βλάβη στην ανθρώπινη υγεία, κλπ. που προκαλούνται από αυτές τις επιπτώσεις. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που δημιουργούνται είναι σχετικές εκφράσεις και δεν προβλέπουν επιπτώσεις στην κατηγορία τελικών σημείων, την υπέρβαση των κατωφλίων ασφαλείας, των περιθώρια ασφαλείας ή τους πιθανούς κινδύνους.

Αυτές τις κατηγορίες επιπτώσεων προκύπτουν σε διαφορετικές γεωγραφικές κλίμακες, που κυμαίνονται από τις παγκόσμιες εμβέλειες επιπτώσεις (όπως GWP), τις περιφερειακές επιπτώσεις (όπως οξίνιση) και τις τοπικές επιπτώσεις (όπως, υδρόβια τοξικότητα ή τοξικότητα για τον άνθρωπο), και το σημείο της εκπομπής γίνεται πιο σημαντικό όσο περισσότερο τοπική είναι η επίδραση που εξετάζεται. Για παράδειγμα, ένα κιλό διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται οπουδήποτε στη Δανία θα έχει την ίδια

συμβολή στην υπερθέρμανση του πλανήτη όπως ένα κιλό διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται οπουδήποτε αλλού στον κόσμο. ενώ για πιο περιφερειακά περιορισμένη επίπτωση, μόνο οι εκπομπές που εμφανίζονται σε αυτήν την τοποθεσία θα έχουν ένα μετρήσιμο αντίκτυπο. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας αυτές τις κατηγορίες επιπτώσεων θα πρέπει να θεωρούνται ως οι χειρίστες πιθανές επιπτώσεις και όχι οι πραγματικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Για τους δείκτες «χωρίς-αντίκτυπο», οι οποίοι αξιολογούνται στην AKZ ορισμένες επιπλέον παρατηρήσεις, πρέπει επίσης να σημειωθούν σε σχέση με την κατανάλωση νερού και το υδατικό αποτύπωμα. Υπάρχει ένα νέο πρότυπο το οποίο θεσπίζει το πλαίσιο για διεθνώς εναρμονισμένες μετρήσεις για το υδατικό αποτύπωμα: ISO 14046, υδατικό αποτύπωμα – απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές (ISO, 2014). Αυτό συμπληρώνει υφιστάμενα πρότυπα για την ανάλυση κύκλου ζωής (δηλαδή ISO 14040/44), καθώς και άλλα πρότυπα που αφορούν το αποτύπωμα άνθρακα του προϊόντος και τη ποσοτικοποίηση και επαλήθευση των ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου.

Προς το παρόν, μια μελέτη AKZ υπολογίζει την κατανάλωση γλυκού νερού – με την έννοια του ισοζυγίου εισροών καθαρού νερού και των εκροών του γλυκού νερού που προκύπτει από τις διαδικασίες παραγωγής καθώς και τις διαδικασίες τελικής διάθεσης. Ωστόσο, για να διερευνηθεί αυτό πιο σχολαστικά πρέπει να γίνεται περαιτέρω εξέταση σχετικά με τον τύπο του νερού που χρησιμοποιείται, να ληφθούν υπ' όψη παράμετροι όπως τοπικά φαινόμενα λειψυδρίας, καθώς και διαφοροποίηση μεταξύ των υδατορευμάτων και άλλες ποιοτικές πτυχές (Berger, 2010), οι οποίες θα βοηθήσουν στην πιο ακριβή λήψη αποφάσεων.

Επίσης, σε γενικές γραμμές, μια ανάλυση του κύκλου ζωής δεν εξετάζει κάποια άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως οι πιθανές επιπτώσεις από τη χρήση γης, θόρυβος και τοπικές επιπτώσεις στην χλωρίδα και πανίδα. Σε γενικές γραμμές, μια AKZ δεν πρέπει να στέκεται μόνο στην αξιολόγηση των τεχνολογιών, αλλά και σε άλλες τεχνικές περιβαλλοντικής διαχείρισης, όπως η αξιολόγηση των κινδύνων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΜΠΕ), τα οποία είναι πολύτιμα εργαλεία που αντιμετωπίζουν αυτές οι περιβαλλοντικές ανησυχίες. Τέτοιου είδους αξιολογήσεις διενεργούνται συνήθως ως μέρος της τοπικής αδειοδότησης και σχεδιασμού της διαδικασίας για την εγκατάσταση της αιολικής μονάδας παραγωγής ενέργειας.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι σε επίπεδο προϊόντος έχουν ήδη δοθεί ή ακολουθηθεί οι κατευθυντήριες γραμμές για την προετοιμασία μιας περιβαλλοντικής δήλωσης προϊόντος (EPD- Environmental Product Declaration) βάσει του προτύπου ISO 14025 (2006β) για την ηλεκτρική ενέργεια μέσω των Κανόνων Κατηγοριοποίησης Προϊόντος (Envirodec, 2007, 2011) για την παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε γενικές γραμμές, οι κανόνες αυτοί ευθυγραμμίζονται με την τρέχουσα LCA όσον αφορά τους αιολικούς σταθμούς, ως προς τα όρια του συστήματος και τα γενικά στοιχεία για τις ποιοτικές απαιτήσεις. Παρόλο που η τρέχουσα AKZ δεν υιοθέτησε την προσέγγιση EPD, αλλά είναι σύμφωνη με το πρότυπο ISO 14040/44 (2006). Ως εκ τούτου προκύπτουν κάποιες διαφορές στην προσέγγιση, όπου το τέλος-ζωής και οι πιστώσεις ανακύκλωσης εξαιρούνται από τα όρια του EPD (αλλά έχει υιοθετηθεί μια προσέγγιση ανακυκλωμένου περιεχομένου από το EPD), καθώς και την υποβολή εκθέσεων των αποτελεσμάτων, για παράδειγμα, το EPD περιλαμβάνει αναφορά των πιθανών επιπτώσεων τόσο για το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (όπως και στην AKZ), καθώς και στο σημείο του τελικού καταναλωτή. Μερικοί πρόσθετοι δείκτες αναφέρονται επίσης στο πλαίσιο του EPD, όπως η παραγωγή αποβλήτων, ο θόρυβος, οι χρήσεις γης, οι επιπτώσεις για τη βιοποικιλότητα, καθώς και η εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου, που δεν περιλαμβάνονται στην AKZ.

Δεν έχει εφαρμοστεί καμία ομαλοποίηση, ομαδοποίηση, κατάταξη ή στάθμιση στα αποτελέσματα.

3.14 Ερμηνεία της AKZ

Το στάδιο της ερμηνείας της AKZ έχει διεξαχθεί σύμφωνα με τα κύρια βήματα που ορίζονται στο ISO (2006α) για την ανάλυση κύκλου ζωής, το οποίο περιλαμβάνει μια αξιολόγηση των σημαντικών περιβαλλοντικών ροών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων με βάση τα αποτελέσματα της απογραφής του καταλόγου κύκλου ζωής (LCI-Life Cycle Inventory) και της εκτίμησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA). Τα πιο σημαντικά εξαρτήματα της Α/Γ και των υπολοίπων εγκαταστάσεων, τα στάδια του κύκλου ζωής και οι ροές των αποθεμάτων (ουσίες που εξόρρυσσονται και οι εκπομπές από και προς το περιβάλλον) αναγνωρίζονται και εκτιμώνται.

Η αξιολόγηση τόσο της πληρότητας όσο και της συνέπειας των συνόλων δεδομένων αλλά και των παραδοχών έχει αξιολογηθεί ποιοτικά στην AKZ. Τα σύνολα των τεχνικών δεδομένων της AKZ έχουν αξιολογηθεί ποιοτικά βάσει των απαιτήσεων που εμφανίζονται στον πίνακα 5.

Parameter	Description	Requirement
Time-related coverage	Desired age of data and the minimum length of time over with data should be collected.	Data should represent the situation in 2014 and cover a period representing a complete calendar year.
Geographical coverage	Area from which data for unit processes should be collected.	Data should be representative of the Vestas global supply chain.
Technology coverage	Technology mix.	Technology (for manufacture, product usage and end-of-life management) should be representative of global supply conditions and technology.
Precision	Measure of the variability of the data values for each data category expressed.	No requirement specified.
Completeness	Assessment of whether all relevant input and output data are included for a certain data set.	Specific datasets will be compared with literature data and databases, where applicable.
Representativeness	Degree to which the data represents the identified time-related, geographical and technological scope.	The data should fulfil the defined time-related, geographical and technological scope.
Consistency	How consistent the study methodology has been applied to different components of the analysis.	The study methodology will be applied to all the components of the analysis.
Reproducibility	Assessment of the methodology and data, and whether an independent practitioner will be able to reproduce the results.	The information about the methodology and the data values should allow an independent practitioner to reproduce the results reported in the study.
Sources of the data	Assessment of data sources used.	Data will be derived from credible sources and databases.

Πίνακας 5: Απαιτήσεις ποιότητας των δεδομένων για τα δεδομένα απογραφής

Ανάλυση ευαισθησίας έχει επίσης διεξαχθεί για να κατανοηθεί καλύτερα η κλίμακα και η σημασία των ασαφειών στα δεδομένα και τις υποθέσεις κατά τη μοντελοποίηση για το σύστημα παραγωγής αιολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν πραγματοποιηθεί οι ακόλουθες αναλύσεις ευαισθησίας για αυτή τη μελέτη:

1. η διακύμανση στη διάρκεια ζωής του σταθμού σε ± 4 χρόνια

2. οι μεταβολές στη ρύθμιση παραμέτρων των Α/Γ με ύψος πλήμνης 80 μέτρα
3. η μεταβολή στη συχνότητα αντικατάστασης των ανταλλακτικών
4. η λειτουργία του σταθμού ισχύος 50MW λειτουργία ισχύος σε κάθε Α/Γ τάξης των 2 MW
5. οι διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς για τα επιμέρους τμήματα του σταθμού κατά την ανέγερση
6. οι διαφορετικές αποστάσεις του αιολικού σταθμού από το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη και τις αντίστοιχες απώλειες των καλωδίων.
7. Η αλλαγή του τύπου του θεμελίου που χρησιμοποιείται από τύπο χαμηλής στάθμης επίγειων υδάτων σε τύπο εδάφους υψηλής στάθμης επίγειου νερού.
8. Η εμφάνιση ενός συμβάντος έκρηξης διακόπτη ισχύος σε μία Α/Γ
9. Οι πιθανές επιδράσεις της μεθόδου που χρησιμοποιείται για την πίστωση από την ανακύκλωση των μετάλλων.

Επιπλέον, έχουν εντοπιστεί τα σημαντικά συμπεράσματα και συστάσεις για βελτίωση (παρουσιάζονται στην ενότητα 5). Οι περιορισμοί στη μελέτη επισημαίνονται σε όλη την έκθεση, κατά περίπτωση.

Ως μέρος της ερμηνείας της μελέτης, έχει επίσης γίνει αναφορά στις πρόσφατες οδηγίες και έγγραφα για ΑΚΖ, συμπεριλαμβανομένων των:

- εγχειρίδιο ILCD: γενικό οδηγό για την ανάλυση κύκλου ζωής (EC, 2010)
- UNEP παγκόσμιες αρχές καθοδήγησης για τις βάσεις δεδομένων της αξιολόγησης του κύκλου ζωής (UNEP, 2011).

3.15 Κριτική επισκόπηση

Τα αποτελέσματα αυτής των μελέτης ΑΚΖ προορίζονται να υποστηρίξουν την εξωτερική επικοινωνία των κατασκευαστών Α/Γ, των παραγωγών και εν γένει των ενδιαφερομένων μερών στην αιολική ενέργεια. Επίσης αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για την περιβαλλοντική εκτίμηση και αξιολόγηση των εγκαταστάσεων για τους μελετητές και τις κρατικές υπηρεσίες. Τέλος οι ΑΚΖ χρησιμοποιούνται από τους επενδυτές και τους φορείς για να εκτιμήσουν τη βιωσιμότητα των επενδύσεων στην αιολική ενέργεια. Προκειμένου να διασφαλιστεί η αυστηρότητα των μελετών και η

ευρωστία των αποτελεσμάτων, κρίνεται απαραίτητο να διεξαχθεί μια ανεξάρτητη κριτική ανασκόπηση της μελέτης. Ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής της κριτικής αναθεώρησης ορίζεται σύμφωνα με το ISO 14044, παράγραφο 5.1. ακολουθώντας το ISO 14044, εξασφαλίζεται από την κριτική διαδικασία ότι (ISO, 2006β):

- Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή της AKZ είναι σύμφωνες με το διεθνές πρότυπο
- Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή της AKZ είναι επιστημονικά και τεχνολογικά έγκυροι
- τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι κατάλληλα και λογικά σε σχέση με το στόχο της μελέτης
- οι ερμηνείες αντικατοπτρίζουν τους περιορισμούς που εντοπίστηκαν και το στόχο της μελέτης
- η τελική έκθεση της μελέτης είναι διαφανής και συνεπής

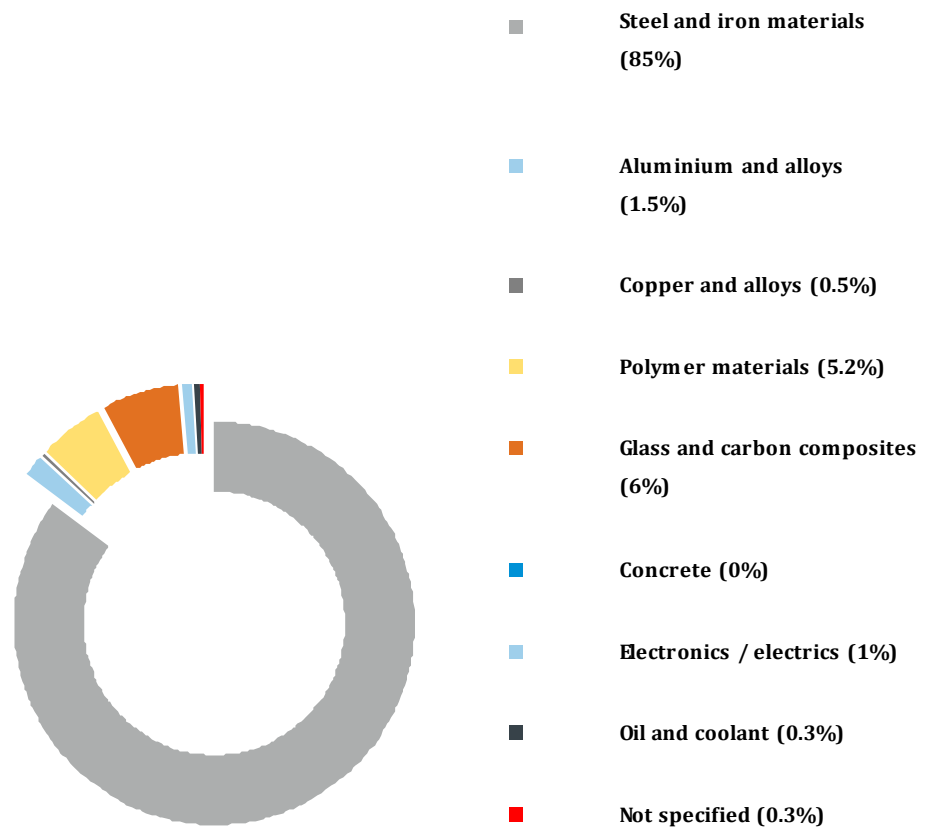
Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

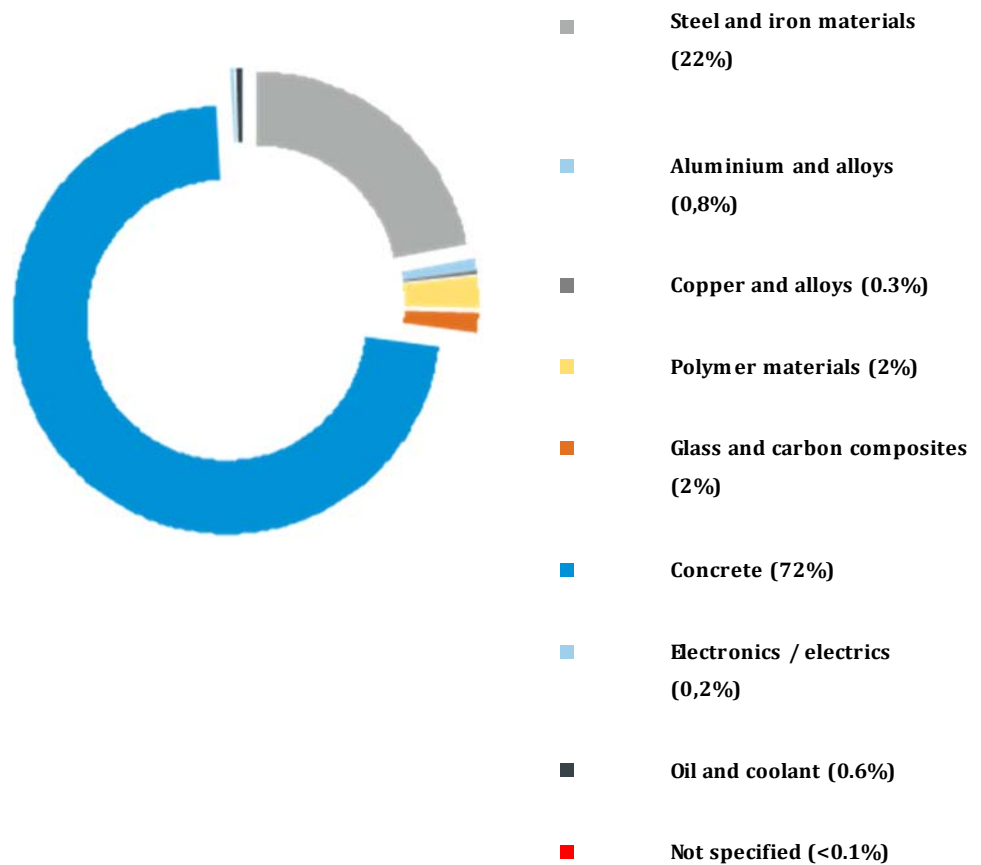
4.1 Ανάλυση υλικών αιολικού σταθμού αποτελούμενο από Α/Γ ισχύος 2 MW

Στον πίνακα 6 και 7 παρουσιάζεται η ανάλυση υλικών για έναν πλήρη αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 50MW και των συνοδών εγκαταστάσεων αυτού αποτελούμενο από Α/Γ ισχύος 2.0 MW. Το σύνολο των εγκαταστάσεων περιλαμβάνεται και παρουσιάζεται στο απόθεμα των δεδομένων, με εξαίρεση τα ανταλλακτικά που χρησιμοποιούνται στον χρόνο ζωής της εγκατάστασης. Επιπλέον, το διάγραμμα 7 δείχνει την ποσοστιαία ανάλυση υλικών κατά μάζα της Α/Γ και το διάγραμμα 8 δείχνει την αντίστοιχη ανάλυση υλικών κατά μάζα για ολόκληρο τον αιολικό σταθμό.

Τα πλήρη δεδομένα απογραφής του κύκλου ζωής για τον αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται με βάση τις ροές των υλικών και αναφέρονται ανά κυρίως τμήμα του κύκλου ζωής.



Διάγραμμα 7: Ανάλυση υλικών για μια Α/Γ 2MW (% μάζας)



Διάγραμμα 8: Ανάλυση υλικών για έναν αιολικό σταθμό παραγωγής αποτελούμενο από 25 Α/Γ των 2 MW (% μάζας)

Material classification	Unit	Turbines	Foundations	Site cables	Site switchgears	Site transformer
<u>Steel and iron materials</u>						
Unalloyed, low alloyed	tonne	4607	1228	0	5	20
Highly alloyed	tonne	3746	1223	0	0	20
<u>Cast iron</u>	tonne	861	5	0	5	0
<u>Lights alloys, cast and wrought alloys (total)</u>	tonne	664	0	0	0	0
Aluminium and aluminium alloys	tonne	96	0	159	0	0
<u>Nonferrous heavy metals, cast and wrought alloys</u>	tonne	95	0	159	0	0
	tonne	32	1	41	2	11

Copper	tonne	30	1	41	2	11
Copper alloys	tonne	2	0	0	0	0
Zinc alloys	tonne	0	0	0	0	0
Nonferrous heavy metals, cast and wrought alloys (unspecified)	tonne	0	0	0	0	0
<u>Special metals</u>	tonne	0	0	0	0	0
<u>Polymer materials (total)</u>	tonne	325	1	355	0	0
<u>Other materials and material compounds (total)</u>	tonne	388	22836	1	0	1
Modified organic natural materials	tonne	1	0	0	0	1
Ceramic / glass	tonne	368	0	1	0	1
Other materials and material compounds	tonne	16	0	0	0	0
Concrete	tonne	0	22836	0	0	0
SF6	kg	201	0	0	42	0
Magnets	tonne	3	0	0	0	0
<u>Electronics / electrics (total)</u>	tonne	46	0	0	0	0
Electronics	tonne	12	0	0	0	0
Electrics	tonne	35	0	0	0	0
<u>Lubricants and liquids (total)</u>	tonne	18	0	0	0	19
Lubricants	tonne	14	0	0	0	19
Coolant / other glycols	tonne	4	0	0	0	0
Other fuels and auxiliary means	tonne	0	0	0	0	0
<u>Not specified</u>	tonne	25	0	0	0	0
Total mass	tonne	6201	24066	557	8	51

Total number of pieces	Units	25	25	1	1	1
Mass of piece	tonne	248	963	557	8	51

Πίνακας 6: Ανάλυση υλικών για ένα αιολικό σταθμό 50MW αποτελούμενο από Α/Γ 2.0 MW (Οι μονάδες φαίνονται σε τόνους ή κιλά ανά εγκατάσταση)

Material classification	Unit	Turbines	Foundations	Site cables	Site switchgears	Site transformer
<u>Steel and iron</u>						
<u>materials</u>	g per MWh	1218	324	0	1	5
Unalloyed, low alloyed	g per MWh	990	323	0	0	5
Highly alloyed	g per MWh	227	1	0	1	0
<u>Cast iron</u>	g per MWh	175	0	0	0	0
<u>Lights alloys, cast and wrought alloys</u>						
<u>(total)</u>	g per MWh	25	0	42	0	0
Aluminium and aluminium alloys	g per MWh	25	0	42	0	0
<u>Nonferrous heavy metals, cast and wrought alloys</u>						
<u>(unspecified)</u>	g per MWh	8	0	11	1	3
Copper	g per MWh	8	0	11	1	3
Copper alloys	g per MWh	1	0	0	0	0
Zinc alloys	g per MWh	0	0	0	0	0
Nonferrous heavy metals, cast and wrought alloys	g per MWh	0	0	0	0	0
<u>Special metals</u>	g per MWh	0	0	0	0	0

<u>Polymer materials</u>						
<u>(total)</u>	g per MWh	86	0	94	0	0
<u>Other materials and material compounds</u>						
<u>(total)</u>	g per MWh	103	6035	0	0	0
Modified organic natural materials						
	g per MWh	0	0	0	0	0
Ceramic / glass						
	g per MWh	97	0	0	0	0
Other materials and material compounds						
	g per MWh	4	0	0	0	0
Concrete						
	g per MWh	0	6035	0	0	0
mg per						
SF6	MWh	53	0	0	11	0
Magnets						
	g per MWh	1	0	0	0	0
<u>Electronics / electrics (total)</u>						
	g per MWh	12	0	0	0	0
Electronics						
	g per MWh	3	0	0	0	0
Electrics						
	g per MWh	9	0	0	0	0
<u>Lubricants and liquids (total)</u>						
	g per MWh	5	0	0	0	5
Lubricants						
	g per MWh	4	0	0	0	5
Coolant / other glycols						
	g per MWh	1	0	0	0	0
Other fuels and auxiliary means						
	g per MWh	0	0	0	0	0
<u>Not specified</u>						
	g per MWh	7	0	0	0	0
Total mass						
	g per MWh	1639	6361	147	2	14

Πίνακας 7: Ανάλυση υλικών για ένα αιολικό σταθμό 50MW αποτελούμενο από Α/Γ 2.0 MW (Οι μονάδες φαίνονται σε γραμμάρια ή mg ανά MWh)

4.2 Εκτίμηση των επιπτώσεων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του αιολικού σταθμού, όπως προκύπτουν από την ΑΚΖ. Η ανάλυση των επιπτώσεων περιλαμβάνει τη συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής ως προς τις επιπτώσεις και αναλυτική παρουσίαση των διαφορετικών επιπτώσεων στο περιβάλλον.

4.2.1 Σύνοψη των αποτελεσμάτων

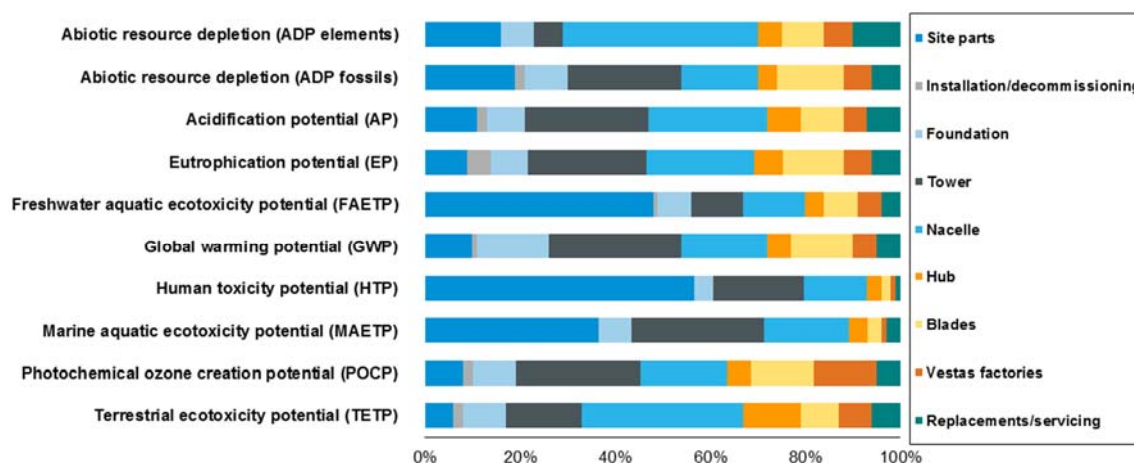
Ο πίνακας 8 παρουσιάζει τις συνολικές πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με μια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας στην ξηρά συνολικής ισχύος 50MW αποτελούμενη από Α/Γ των 2.0 MW, και καλύπτει ολόκληρη την εγκατάσταση για το συνολικό κύκλο ζωής της. Μια πρόσθετη ανάλυση των αποτελεσμάτων προβάλλεται στην ενότητα 4.2.2, η οποία παρέχει την εκτίμηση της κάθε κατηγορίας επιπτώσεων ανά στάδιο του κύκλου ζωής. Παρακάτω περιέχεται μια περιγραφή των κατηγοριών των επιπτώσεων οι οποίες θεωρούνται στην παρούσα μελέτη.

Environmental impact categories	Unit	Quantity
Abiotic resource depletion (ADP elements)	mg Sb-e	0.06
Abiotic resource depletion (ADP fossils)	MJ	0.10
Acidification potential (AP)	mg SO ₂ -e	32
Eutrophication potential (EP)	mg PO ₄ -e	3.7
Freshwater aquatic ecotoxicity potential (FAETP)	mg DCB-e	62
Global warming potential (GWP)	g CO ₂ -e	7.2
Human toxicity potential (HTP)	mg DCB-e	1427
Marine aquatic ecotoxicity potential (MAETP)	g DCB-e	793
Photochemical oxidant creation potential (POCP)	mg Ethene	3.9
Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	mg DCB-e	4.1
Non-impact indicators		
*Primary energy from renewable raw materials	MJ	0.01
*Primary energy from resources	MJ	0.10
Water consumption	g	67

Return-on energy	Number of times	31
Turbine recyclability	% (w/w)	84.5%

Πίνακας 8: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κύκλου ζωής του αιολικού σταθμού

Στο διάγραμμα 9 παρουσιάζονται οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις για τα στάδια της παραγωγής των πρώτων υλών και των βασικών εξαρτημάτων που απαρτίζουν τον αιολικό σταθμό για ολόκληρο τον κύκλο ζωής, συμπεριλαμβανομένων των σταδίων της λειτουργίας και της συντήρησης κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της εγκατάστασης (δηλαδή όλα τα στάδια του κύκλου ζωής εκτός από το τέλος του κύκλου ζωής). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τα μέρη της Α/Γ, η νασέλα, ο πύργος και τα φτερά συμβάλλουν πιο σημαντικά σε όλους τους δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα επόμενα πιο σημαντικά μέρη είναι τα τμήματα της εγκατάστασης και τα θεμέλια. Τα εργοστάσια παραγωγής των Α/Γ συνεισφέρουν περίπου από 1% έως και 14% σε όλες τις κατηγορίες των επιπτώσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεταφορές, όταν απαιτούνται, συμπεριλαμβάνονται για κάθε τμήμα που μεταφέρεται και δεν αναλύονται ξεχωριστά.



Διάγραμμα 9: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των φάσεων της κατασκευής και της λειτουργίας του αιολικού σταθμού

4.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων: κατηγορίες επιπτώσεων

Τα αποτελέσματα για κάθε κατηγορία επιπτώσεων περιγράφονται με περισσότερες λεπτομέρειες στις ακόλουθες ενότητες, προσδιορίζοντας τις πιθανές επιπτώσεις ανά στάδιο του κύκλου ζωής του αιολικού σταθμού, και ανά σημαντικότητα του κάθε συστατικού και κάθε ουσίας ως προς τη συμβολή τους στις επιπτώσεις αυτές.

Ο πίνακας 9 δείχνει τα αποτελέσματα για κάθε κατηγορία αντίκτυπου, για τα ακόλουθα κύρια στάδια του κύκλου ζωής:

- κατασκευή: περιλαμβάνει την εξόρυξη πρώτων υλών και μεταφορά έως το εργοστάσιο και μεταφορά των μερών στο χώρο εγκατάστασης
- ανέγερση αιολικού σταθμού: περιλαμβάνει την κατασκευή των δρόμων και των έργων υποδομής καθώς και την επιτόπου εγκατάσταση του εξοπλισμού (π.χ. γερανοί, γεννήτριες, κλπ.)
- λειτουργία: περιλαμβάνει λειτουργία του σταθμού, τις εργασίες συντήρησης και τις απαραίτητες υπηρεσίες μεταφοράς που προκύπτουν στη διάρκεια της λειτουργίας.
- διαχείριση τέλους-ζωής: περιλαμβάνει τον παροπλισμό του αιολικού σταθμού, τις διεργασίες ανακύκλωσης και διάθεσης των απορριμμάτων.

Impact category	Unit	Manufacture	Plant setup	Operation	End-of-life	Total
Abiotic resource depletion (ADP elements)	mg Sb-e	0.15	0.00	0.02	-0.10	0.06
Abiotic resource depletion (ADP fossils)	MJ	0.11	0.01	0.01	-0.03	0.10
Acidification potential (AP)	mg SO2-e	39	1	2	-11	32
Eutrophication potential (EP)	mg PO4-e	3.5	0.2	0.2	-0.2	3.7
Freshwater aquatic ecotoxicity potential (FAETP)	mg DCB-e	61	3	3	-5	62
Global warming potential (GWP)	g CO2-e	9.7	0.2	0.3	-3.0	7.2
Human toxicity potential (HTP)	mg DCB-e	6435	15	79	-5102	1427
Marine aquatic ecotoxicity potential (MAETP)	g DCB-e	2616	9	44	-1877	793
Photochemical oxidant creation potential (POCP)	mg Ethene	5.2	0.1	0.2	-1.6	3.9

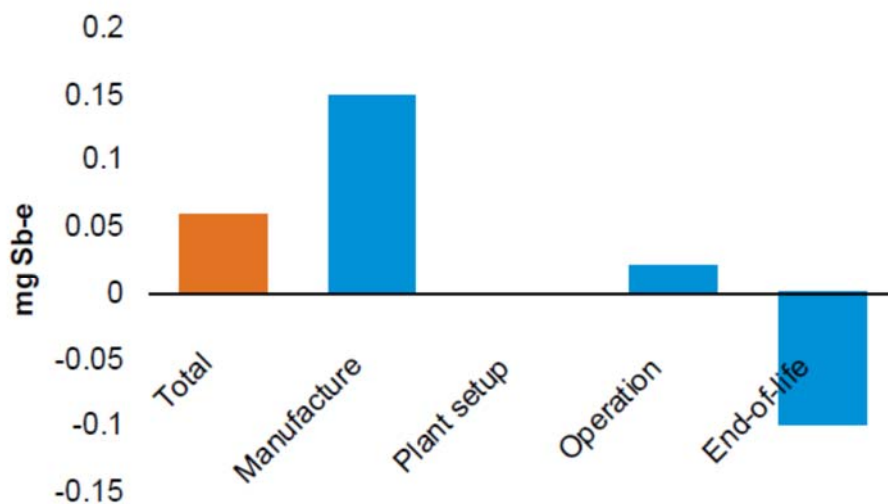
Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	mg DCB-e	38	0.7	2.4	-0.5	41
Non-impact indicators						
*Primary energy from renewable raw materials	MJ	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
*Primary energy from resources	MJ	0.12	0.01	0.01	-0.03	0.10
Water consumption	g	89	2	3	-27	67

Πίνακας 9: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κύκλου ζωής του αιολικού σταθμού ανά στάδιο του κύκλου ζωής (οι μονάδες σε g, mg ή MJ/KWh).

4.2.2.1 Εξάντληση των αβιοτικών πόρων (Στοιχείων)

Η εξάντληση των αβιοτικών πόρων (στοιχείων) παρέχει μια ένδειξη της δυνατής εξάντλησης (ή έλλειψης) μη ενεργειακών φυσικών πόρων (ή στοιχείων) στο φλοιό της γης, όπως τα μεταλλεύματα σιδήρου, αλουμινίου ή τα πολύτιμα μέταλλα, και υπολογίζεται από το σύνολο των γεωλογικών αποθεμάτων (όχι τα οικονομικά εφικτά εξορυγίσιμα αποθέματα) και τα αναμενόμενα ποσοστά εξάντλησης. Μετρείται σε ισοδύναμη μάζα αντιμονίου.

Το διάγραμμα 10 δείχνει τις πιθανές επιπτώσεις ανά στάδιο του κύκλου ζωής για μείωση των αβιοτικών πόρων (στοιχεία) ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το στάδιο της κατασκευής είναι αυτό που δεσπόζει από τον κύκλο ζωής. Αυτό οφείλεται κυρίως από χρήση μετάλλων, όπως μολύβδος (32%), ασήμι (25%), μολυβδαίνιο (19%), ψευδάργυρος (11%), χρώμιο (11%), ανθρακικού μεταλλεύματος (18%) και χαλκός (3%). Πιθανές επιπτώσεις αφορούν κυρίως στη χρήση των κραμάτων χάλυβα και του χαλκού στα μέρη της νασέλας, όπως η γεννήτρια και κιβώτιο ταχυτήτων, κλπ. Η κατανάλωση μεταλλεύματος άνθρακα οφείλεται στην παραγωγή υαλονήματος για τα πτερύγια της Α/Γ. Η φάση του τέλους της ζωής της έχει επίσης μια συνεισφορά, παρέχοντας μια περιβαλλοντική πίστωση για την ανακύκλωση μετάλλων (περίπου -70%), όπου αποφεύγεται η παραγωγή των υλικών αυτών. Το στάδιο του τέλους του κύκλου ζωής κυριαρχείται από την ανακύκλωση του χάλυβα και του χαλκού. Οι επιπτώσεις από την λειτουργία αφορά κυρίως ανταλλακτικά που αντικαθίστανται κατά τη διάρκεια ζωής της τουρμπίνας.



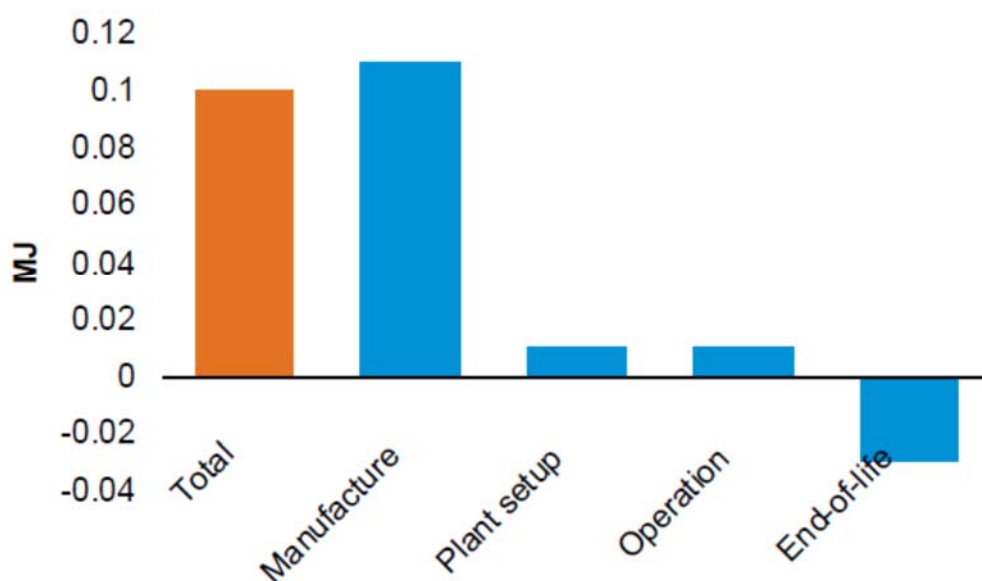
Διάγραμμα 10: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στην εξάντληση αβιοτικών πόρων (στοιχείων) ανά kWh

4.2.2.2 Εξάντληση Αβιοτικών πόρων (ορυκτά καύσιμα)

Η μείωση των αβιοτικών πόρων (ορυκτά) παρέχει μια ένδειξη της δυναμικής εξάντλησης (ή έλλειψης) των μη - ανανεώσιμων πόρων που είναι μη-βιωτικοί, και μετράται με βάση την ενεργειακή αξία (MJ).

Το διάγραμμα 11 απεικονίζει τις πιθανές επιπτώσεις από τα εκάστοτε στάδια του κύκλου ζωής για μείωση των αβιοτικών πόρων (ορυκτά) ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το εργοστάσιο ηλεκτρικής ενέργειας. Το στάδιο της κατασκευής κυριαρχεί στην συμβολή στις πιθανές επιπτώσεις για τη μείωση των αβιοτικών πόρων (ορυκτά), όπου οδηγεί η παραγωγή του στροβίλου (66%), ακολουθούμενη από την κατασκευή της καλωδίωσης των εγκαταστάσεων (10%) και την κατασκευή των θεμέλιων (8%). Μέσα στη φάση της παραγωγής, ο πύργος, η νασέλα και τα φτερά συμβάλλουν πιο σημαντικά σε αυτήν την κατηγορία επιπτώσεων. Συνολικά, οι επιπτώσεις αυτές σχετίζονται με την κατανάλωση του πετρελαίου (45%), φυσικού αερίου (30%) και άνθρακα (19%), για την παραγωγή των μετάλλων και των πολυμερών. Το τέλος του κύκλου ζωής παρέχει επίσης περιβαλλοντικές πιστώσεις που αφορούν στην

αποφυγή της εξάντλησης των φυσικών πόρων λόγω της ανακύκλωσης μετάλλων (περίπου 30%).



Διάγραμμα 11: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στην εξάντληση αβιοτικών πόρων (ορυκτά) ανά kWh

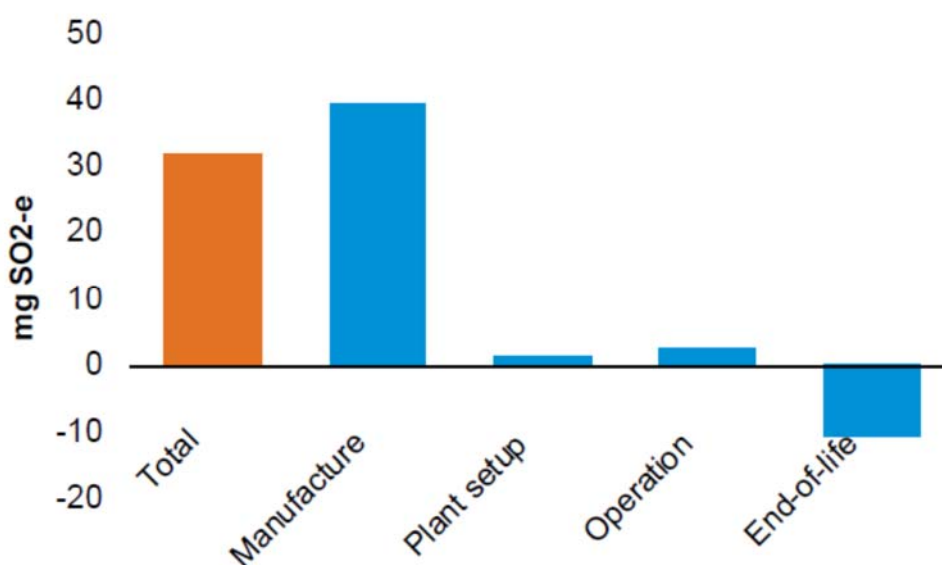
4.2.2.3 Δυναμικό Οξύνισης

Η οξύνιση παρέχει ένα μέτρο της μείωσης της αξίας του pH της βροχής και της ομίχλης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη βλάβη των οικοσυστημάτων λόγω του ότι ξεπλένονται τα θρεπτικά συστατικά από τα συστατικά του εδάφους και προκαλείται αυξημένη διαλυτότητα των μετάλλων στο έδαφος. Το δυναμικό της οξύνισης είναι γενικά ένα περιφερειακό (τοπικό) αντίκτυπο και μετريέται σε μάζα ισοδύναμου διοξειδίου του θείου.

Το διάγραμμα 12 δείχνει τις πιθανές επιπτώσεις της οξύνισης ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το εργοστάσιο ηλεκτρικής ενέργειας. Το στάδιο της κατασκευής του σταθμού κυριαρχεί αυτή η κατηγορία επιπτώσεων, η οποία αφορά κυρίως την παραγωγή της πύργου (27%), της νασέλας (24%), των φτερών (8%), των καλωδίων (9%) και των θεμελίων (8%). Οι εκπομπές στον αέρα διοξειδίου του θείου (60%) και οξειδίων του αζώτου (37%) συνδέονται με την παραγωγή του σιδήρου, του χάλυβα και των ινών γυαλιού για τα φτερά. Η μεταφορά των βαριών συστατικών από χάλυβα της νασέλας και του πύργου συμβάλλουν κατά 40% στην οξίνιση και

αποδίδονται κυρίως στις επιχειρήσεις μεταφοράς των εξαρτημάτων και πρώτων υλών με καράβια.

Η φάση του τέλους της ζωής έχει, επίσης, μια συνολική συνεισφορά, παρέχοντας μια περιβαλλοντική πίστωση (από περίπου - 27%), για την ανακύκλωση των μετάλλων, που αποφεύγεται η παραγωγή των υλικών αυτών. Ομοίως, οι ουσίες που οδηγούν στην περιβαλλοντική πίστωση κατά το τέλος του κύκλου ζωής βοηθούν αντίστοιχα και την αποφυγή των εκπομπών διοξειδίου του θείου και οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα.



Διάγραμμα 12: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στο δυναμικό οξίνισης ανά kWh

4.2.2.4 Δυναμικό ευτροφισμού

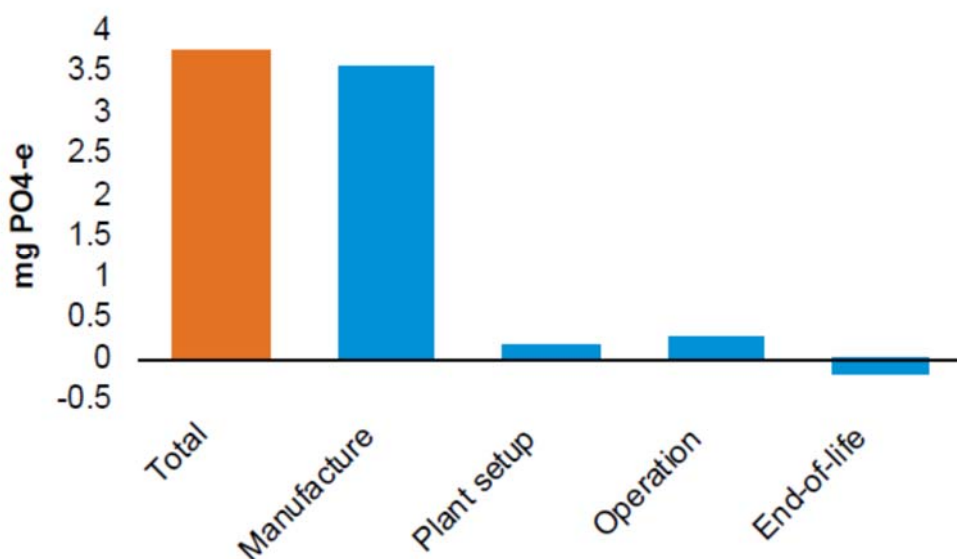
Σε γενικές γραμμές, το δυναμικό του ευτροφισμού παρέχει ένα μέτρο του εμπλουτισμού από θρεπτικά υλικά σε υδρόβια ή επίγεια περιβάλλοντα, κάτι που οδηγεί σε ζημία του οικοσυστήματος σε αυτές τις θέσεις από τον υπερβολικό εμπλουτισμό, και μετριέται σε μάζα των ισοδυνάμων του φωσφορικού άλατος.

Το διάγραμμα 13 δείχνει τις πιθανές επιπτώσεις του ευτροφισμού ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον αιολικό σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως και με άλλες κατηγορίες επιπτώσεων, είναι το στάδιο της κατασκευής της μονάδας παραγωγής ενέργειας που κυριαρχεί από τον συνολικό κύκλο ζωής. Από τον πλήρη κύκλο ζωής, οι

πρωτεύουσες ουσίες που συμβάλλουν στον ευτροφισμό είναι οι εκπομπές στον αέρα οξειδίων του αζώτου (82%), το υποξείδιο του αζώτου (3%) και εκπομπές ανόργανων υλών σε φρέσκο νερό (8%).

Τα συστατικά των ανεμογεννητριών που κατά κύριο λόγο συμβάλλουν στο δυναμικό ευτροφισμού είναι ο πύργος (24%), η νασέλα (22%), τα φτερά (11%) και οι θεμελιώσεις (8%). Επιπλέον, τα καλώδια συνεισφέρουν περίπου 6%. Οι επιπτώσεις του ευτροφισμού από τη νασέλα και τον πύργο οφείλονται κυρίως τις μεταφορές που συνδέονται με τα εξαρτήματα αυτά. Από τα φτερά, η συμβολή στον δυναμικό ευτροφισμού είναι από την κατασκευή των ινών γυαλιού, το σκυρόδεμα για τα θεμέλια και το αλουμίνιο σε όλα τα καλώδια στην εγκατάσταση συμβάλλουν στον ευτροφισμό.

Οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου προέρχονται κυρίως από την παρασκευή των ινών υάλου που χρησιμοποιείται στα πτερύγια των Α/Γ. Η φάση του τέλος ζωής του έχει επίσης μια σχετικά χαμηλή συνολική συνεισφορά, παρέχοντας μια περιβαλλοντική πίστωση (περίπου -6%). Η σχετικά χαμηλή πίστωση στο τέλος του κύκλου ζωής για αυτή την κατηγορία του αντικτύπου (σε σύγκριση με άλλους δείκτες επιπτώσεων) σχετίζεται με τη σχετικά χαμηλότερη συμβολή της παραγωγής χάλυβα στην κατηγορία των επιπτώσεων αυτών, που αντιστοιχεί στις χαμηλότερες πιστώσεις για τον χάλυβα που ανακυκλώνεται.

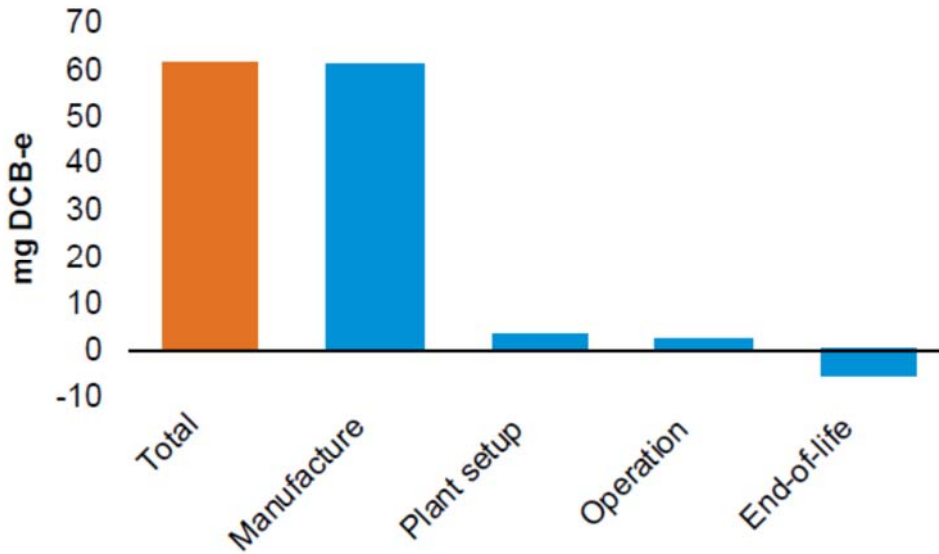


Διάγραμμα 13: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στο δυναμικό ευτροφισμού ανά kWh

4.2.2.5 Δυναμικό οικοτοξικότητας αποθεμάτων γλυκού νερού

Το δυναμικό οικοτοξικότητας του γλυκού νερού (υδατική οικοτοξικότητα), σε γενικές γραμμές, αναφέρεται στις επιπτώσεις στα οικοσυστήματα γλυκού νερού, ως αποτέλεσμα των εκπομπών τοξικών ουσιών στον αέρα, νερό και χώμα, και μετριέται σε μάζα των ισοδυνάμου διχλωροβενζολίου.

Στο διάγραμμα 14 φαίνονται οι δυνητικές επιπτώσεις στο γλυκό νερό λόγω της υδατικής οικοτοξικότητας ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το στάδιο της κατασκευής κυριαρχεί ως προς τις επιπτώσεις που προκαλούνται από ολόκληρο τον κύκλο ζωής, με την παραγωγή του εξαρτημάτων της εγκατάστασης (κυρίως καλώδια) (40%), τη νασέλα (12%), τον πύργο (12%), τα φτερά (6%), τα θεμέλια (7%) και την πλήμνη (4%). Για τα καλώδια, οφείλεται στην παραγωγή πολυμερών υλικών (πολυβινυλοχλωρίδιο και πολυαιθυλένιο), που οδηγεί στην εκπομπή των πολυχλωριωμένων διβενζο-p-διοξινών σε φρέσκο νερό. Ενώ άλλες ουσίες που συμβάλλουν στην οικοτοξικότητα σχετίζονται με την απελευθέρωση βαρέων μετάλλων (40%), στο νερό και στον αέρα, όπως βανάδιο, νικέλιο και βάριο. Αυτές οι εκλύσεις βαρέων μετάλλων προκύπτουν από τις παραγωγικές διεργασίες για μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην Α/Γ. Η περιβαλλοντική πίστωση από το τέλος του κύκλου ζωής συνδέεται επίσης με την αποφυγή της απελευθέρωσης των βαρέων μετάλλων στον αέρα και το νερό (περίπου -9%) εξαιτίας της ανακύκλωσης.



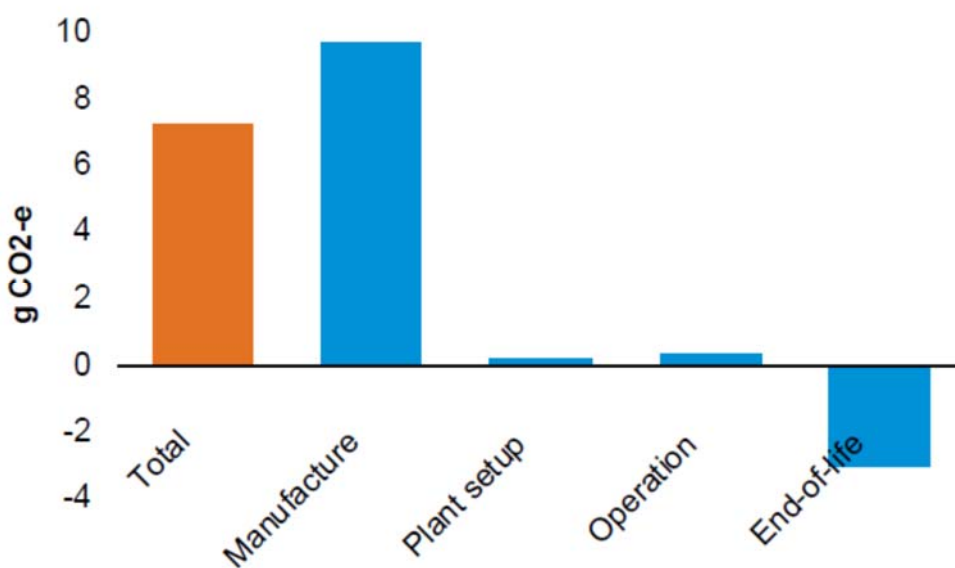
Διάγραμμα 14: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στο δυναμικό οικοτοξικότητας αποθεμάτων γλυκού νερού ανά kWh

4.2.2.6 Δυναμικό παγκόσμιας υπερθέρμανσης

Οι επιπτώσεις λόγω του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη έχουν ως αποτέλεσμα μια θερμαντική επίδραση στην επιφάνεια της γης λόγω της απελευθέρωσης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και μετριέται σε μάζα ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα.

Το διάγραμμα 15 δείχνει τις πιθανές επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως και με άλλες κατηγορίες επιπτώσεων, το στάδιο της κατασκευής είναι που δεσπόζει από τον κύκλο ζωής του αιολικού πάρκου, με την παραγωγή του πύργου (29%), της νασέλας (17%), των θεμέλιων (15%), των φτερών (12%) και των καλωδίων (8%), να είναι τα κύρια συστατικά που συμβάλλουν σε αυτήν την κατηγορία των επιπτώσεων. Μόνο η παραγωγή και οι λειτουργίες του μεγαλύτερου κατασκευαστή Α/Γ της Vestas (Vestas, 2015) συνεισφέρει περίπου στο 5% των παγκόσμιων επιπτώσεων θέρμανσης του πλανήτη. Η φάση που αφορά το τέλος της ζωής της εγκατάστασης συμβάλει σημαντικά (-31%), παρέχοντας περιβαλλοντικές πιστώσεις που προέρχονται από την αποφυγή παραγωγής μεταλλικών προϊόντων από σίδηρο, χάλυβα, χαλκό και αλουμίνιο. Οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα διοξειδίου του άνθρακα (91%) είναι η κύρια ουσία που συμβάλει στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του

πλανήτη, και προκύπτει από την καύση των ορυκτών καυσίμων για παραγωγή των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του σταθμού. Επίσης το μεθάνιο (5%) που προκύπτει από την παραγωγή ινών γυαλιού και χάλυβα. Άλλες λιγότερο βλαβερές ουσίες που προκαλούν το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη αποτελεί η απελευθέρωση του αερίου εξαφθοριούχου θείου στον αέρα (1,7%) από ακατάλληλη διαχείριση διακοπών, και το οξείδιο του αζώτου (2%), που προέρχεται από τις διάφορες παραγωγικές διαδικασίες, συμπεριλαμβανομένης και της παραγωγής ινών γυαλιού που χρησιμοποιείται στα φτερά.



Διάγραμμα 15: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στο δυναμικό παγκόσμιας υπερθέρμανσης ανά kWh

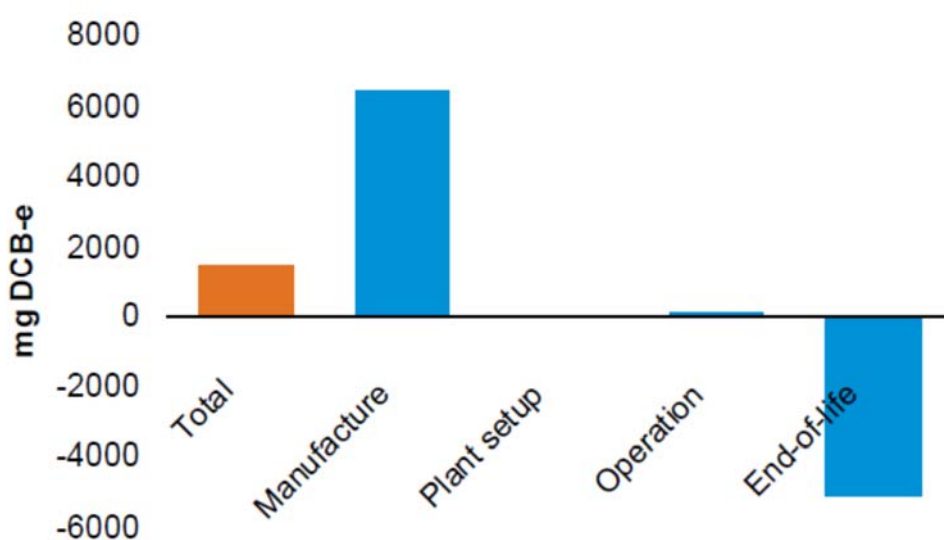
4.2.2.7 Δυναμικό ανθρώπινης τοξικότητας

Η τοξικότητα για τον άνθρωπο, σε γενικές γραμμές, αναφέρεται στις επιπτώσεις στον άνθρωπο, ως αποτέλεσμα των εκπομπών τοξικών ουσιών στον αέρα, το νερό και το χώμα, και μετριέται σε μάζα ισοδύναμου διχλωροβενζολίου.

Το διάγραμμα 16 δείχνει τις δυνητικές επιπτώσεις της τοξικότητας για τον άνθρωπο ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον αιολικό σταθμό. Το στάδιο της κατασκευής κυριαρχεί στις επιπτώσεις από τις υπόλοιπες κατηγορίες του κύκλου ζωής, με την παραγωγή του πύργου (21%), της νασέλας (12%), των θεμελιώσεων (4%) και τα

καλώδια (50%) όντας ο κύριος παράγοντας. Η φάση του τέλους ζωής παρέχει επίσης μια μεγάλη περιβαλλοντική πίστωση (περίπου -79%) από την ανακύκλωση μετάλλων.

Η απελευθέρωση των βαρέων μετάλλων στον αέρα (38%), όπως το νικέλιο και αρσενικό και της εκπομπής πτητικών οργανικών ενώσεων που δεν περιέχουν μεθάνιο (40%), είναι από τους βασικούς συντελεστές για την πιθανή τοξικότητα για τον άνθρωπο. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις που δεν περιέχουν μεθάνιο απελευθερώνονται κυρίως κατά την κατασκευή του αλουμινίου που περιέχεται στα καλώδια της εγκατάστασης και από την κατασκευή των ινών γυαλιού που χρησιμοποιείται στα φτερά.



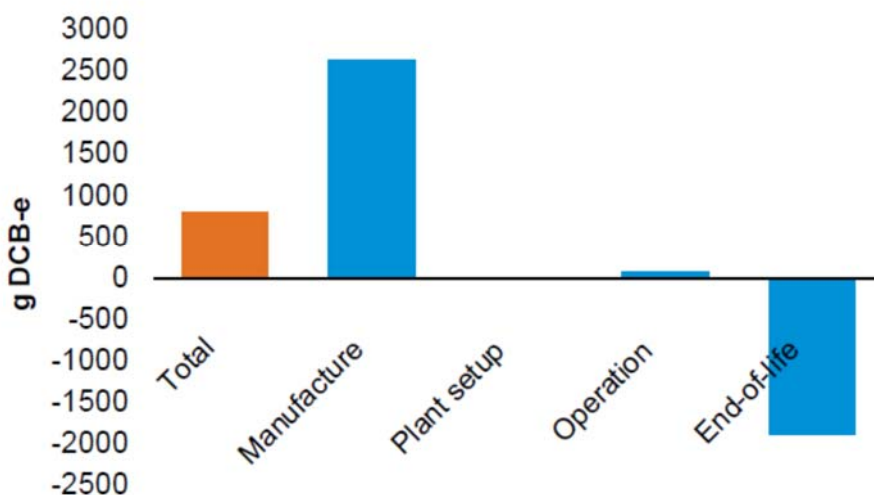
Διάγραμμα 16: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στο δυναμικό ανθρώπινης οικοτοξικότητας ανά kWh

4.2.2.8 Δυναμικό οικοτοξικότητας θαλασσίων υδάτων

Η θαλάσσια υδατική οικοτοξικότητα, σε γενικές γραμμές, αναφέρεται σε επιπτώσεις στα οικοσυστήματα του θαλάσσιου νερού, ως αποτέλεσμα των εκπομπών τοξικών ουσιών στον αέρα, το νερό και το χώμα, και μετρείται σε μάζα ισοδύναμου διχλωροβενζολίου.

Το διάγραμμα 17 δείχνει στις πιθανές επιπτώσεις της θαλάσσιας υδατικής οικοτοξικότητας ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το σταθμό

παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως και με τις άλλες επιπτώσεις τοξικότητας που παρουσιάστηκαν παραπάνω στην AKZ, είναι το στάδιο της κατασκευής το οποίο κυριαρχεί ως προς τις επιπτώσεις που προκαλούνται από όλοκληρο τον χρόνο ζωής του σταθμού. Οι πιθανές επιπτώσεις από τη θαλάσσια υδατική οικοτοξικότητα οφείλονται κατά κύριο λόγο στις εκπομπές του φθοριδίου του υδρογόνου στον αέρα (82%) από διεργασίες παραγωγής του χάλυβα και του αλουμινίου, όπου το αλουμίνιο χρησιμοποιείται στις καλωδιώσεις της εγκατάστασης, στα καλώδια του πύργου, στο εσωτερικό του πύργου και ο χάλυβας σε πολλά μέρη της Α/Γ. Οι υπόλοιπες επιπτώσεις είναι κυρίως αποτέλεσμα των εκπομπών των βαρέων μετάλλων στον αέρα (9%), στο φρέσκο νερό (2%) και στο θαλασσινό νερό (1%), τα οποία προκύπτουν, για παράδειγμα, από την παραγωγή υλικών κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα. Το στάδιο του τέλους του κύκλου ζωής προσφέρει επίσης σημαντικές περιβαλλοντικές πιστώσεις (περίπου -72%), που συνδονται κυρίως με την αποφυγή των εκπομπών του φθοριδίου του υδρογόνου στον αέρα από την αποφυγή της παραγωγή αλουμινίου και χάλυβα.

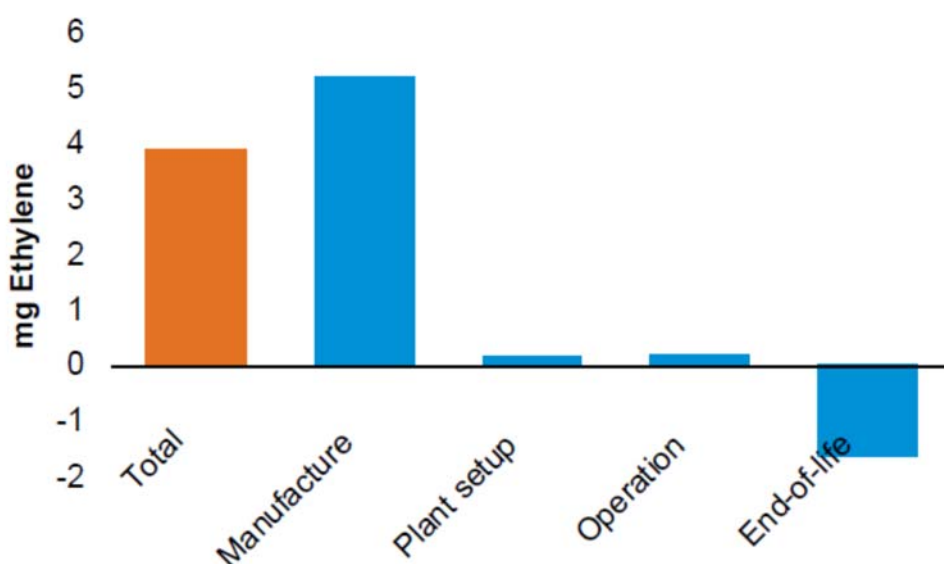


Διάγραμμα 17: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στο δυναμικό οικοτοξικότητας θαλασσίων υδάτων ανά kWh

4.2.2.9 Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικής οξείδωσης

Η δημιουργία φωτοχημικών οξειδωτικών παραγόντων παρέχει μια ένδειξη σχηματισμού χαμηλού επιπέδου οξειδωτικών, επίσης γνωστή ως θερινή αιθαλομίχλη, η οποία βλάπτει τη βλάστηση και σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι τοξική για τον άνθρωπο.

Το διάγραμμα 18 δείχνει το δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικών οξειδωτικών ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η φάση της κατασκευής κυριαρχεί, η οποία σχετίζεται κυρίως με την διαδικασία παραγωγής του πύργου (27%), της νασέλας (17%), των φτερών (11%) και των θεμελιώσεων (9%). Οι κύριες ουσίες που συμβάλλουν στη δημιουργία του φαινομένου είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (15%), τα οξείδια του αζώτου (17%), το διοξείδιο του θείου (19%), οι πτητικές οργανικές ενώσεις που δεν περιέχουν μεθάνιο (30%) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (15%) από τις διαδικασίες παραγωγής του χάλυβα, του αλουμινίου, του χαλκού και των ινών γυαλιού. Οι μεταφορές συμβάλλουν κατά 22% στη δημιουργία φωτοχημικών οξειδωτικών, η οποία είναι κατά κύριο λόγο από την χρήση πλοίων για τις μεταφορές. Κατά το τέλος του κύκλου ζωής, η ανακύκλωση παρέχει μια πίστωση περίπου 31% των πιθανών επιπτώσεων. Η φάση της ανέγερσης και λειτουργίας συνεισφέρουν συνολικά περίπου 13% σε αυτή την κατηγορία επιπτώσεων.

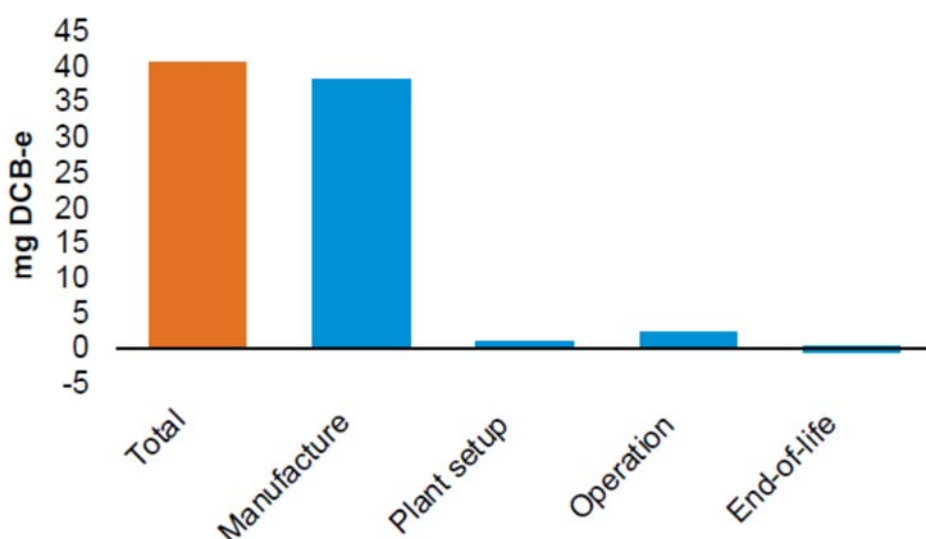


Διάγραμμα 18: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στο δυναμικό φωτοχημικής οξείδωσης ανά kWh

4.2.2.10 Δυναμικό οικοτοξικότητας χερσαίων οικοσυστημάτων

Το δυναμικό της επίγειας οικοτοξικότητας, σε γενικές γραμμές, αναφέρεται στον αντίκτυπο που έχει στα χερσαία οικοσυστήματα, η εκπομπή τοξικών ουσιών στον αέρα, το νερό και το χώμα, και μετριέται σε μάζα των ισοδυνάμων διχλωροβενζολίου.

Το διάγραμμα 19 δείχνει τις ενδεχόμενες επιπτώσεις της επίγειας οικοτοξικότητας ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το εργοστάσιο ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως με άλλες κατηγορίες επιπτώσεων για την ΑΚΖ, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το στάδιο της κατασκευής, δεσπόζει από τον κύκλο ζωής, η οποία οφείλεται κυρίως από την έκλυση των βαρέων μετάλλων στον αέρα (79%), καθώς και από τις εκπομπές βαρέων μετάλλων στο έδαφος (21%). Τα βαρέα μέταλλα σχετίζονται κυρίως με το χρώμιο, τον υδράργυρο και το αρσενικό. Οι εκπομπές αυτές προκύπτουν κυρίως από την παραγωγή των μετάλλων που χρησιμοποιούνται στην Α/Γ, και ιδιαίτερα η παραγωγή του χυτοσιδήρου, του χάλυβα και του ανοξειδωτού χάλυβα με ποσοστά στα επιμέρους μέρη της Α/Γ να είναι: νασέλα (31%), πλήμνη (11%), πύργος (15%) και θεμέλια (8%). Οι διεργασίες του τέλους του κύκλου ζωής όπως η ανακύκλωση παρέχουν μια συνολική πίστωση (περίπου -2%) λόγω της τιμής της ανακύκλωσης σκραπ χάλυβα με αποτέλεσμα να προκαλείται ένα συνολικά επιζήμιο αντίκτυπο. Οι διαδικασίες ανέγερσης και λειτουργίας συνεισφέρουν συνολικά περίπου 7% σε αυτή την κατηγορία επιπτώσεων.



Διάγραμμα 19: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στο δυναμικό οικοτοξικότητας χερσαίων οικοσυστημάτων ανά kWh

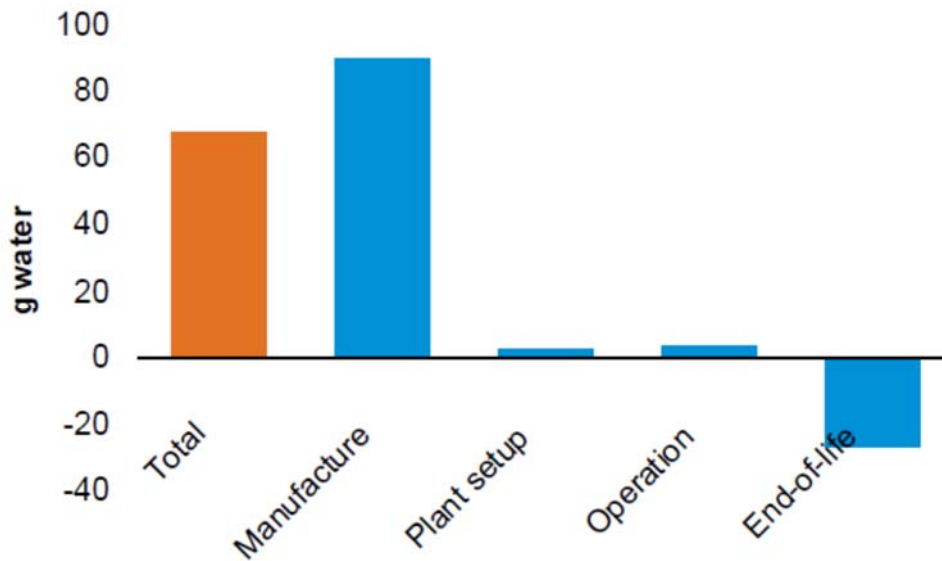
4.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων: Δείκτες μη περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Αυτή η ενότητα παρέχει μια ανάλυση δεικτών σχετικά με τις μη επιπτώσεις για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής.

4.2.3.1 Κατανάλωση νερού

Η κατανάλωση νερού παρέχει μια ένδειξη του ισοζυγίου νερού, εισροές και εκροές γλυκού νερού, σε όλο τον κύκλο ζωής της μονάδας παραγωγής ενέργειας, και αποτιμάται σε γραμμάρια ανά kWh. Αυτό δεν αντιστοιχεί σε ένα υδατικό αποτύπωμα, αλλά αντιπροσωπεύει το καθαρό υπόλοιπο νερό που προκύπτει από τις εισροές και τις εκροές γλυκού νερού για τις διαδικασίες της παραγωγής και της διάθεσης από τα σύνολα δεδομένων AKZ που χρησιμοποιούνται στη μελέτη. Είναι αποδεκτό, ωστόσο, για το «νερό» να αντιμετωπίζεται πιο σχολαστικά και περαιτέρω εξέταση πρέπει να γίνει σχετικά με τους τύπους του νερού που χρησιμοποιείται, ώστε να συμπεριληφθούν υπόψη οι τοπικές ελείψεις νερού, καθώς και η διαφοροποίηση μεταξύ των υδατορευμάτων και των ποιοτικών πτυχών (Berger, 2010), και να υπάρξει μια πιο ακριβής διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στην ενότητα 3.13 γίνεται κάποια περαιτέρω συζήτηση στις μετρήσεις υδατικού αποτυπώματος και στα πρότυπα ISO.

Το διάγραμμα 20 δείχνει την κατανάλωση νερού ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το αιολικό πάρκο, η οποία σχετίζεται κυρίως με την κατασκευαστική φάση του κύκλου ζωής. Μέσα στη φάση της παραγωγής των εξαρτημάτων, η παραγωγή της νασέλας (24%), του πύργου (21%), του δικτύου καλωδιώσεων (16%), των θεμελιώσεων (14%), των φτερών (9%) είναι οι πιο σημαντικές πηγές κατανάλωσης νερού. Το στάδιο του τέλους του κύκλου ζωής παρέχει πίστωση νερού περίπου 30%. Κατανάλωση νερού οφείλεται κυρίως στην παραγωγή του σιδήρου, του χάλυβα και του αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε μια αιολική μονάδα παραγωγής ενέργειας.

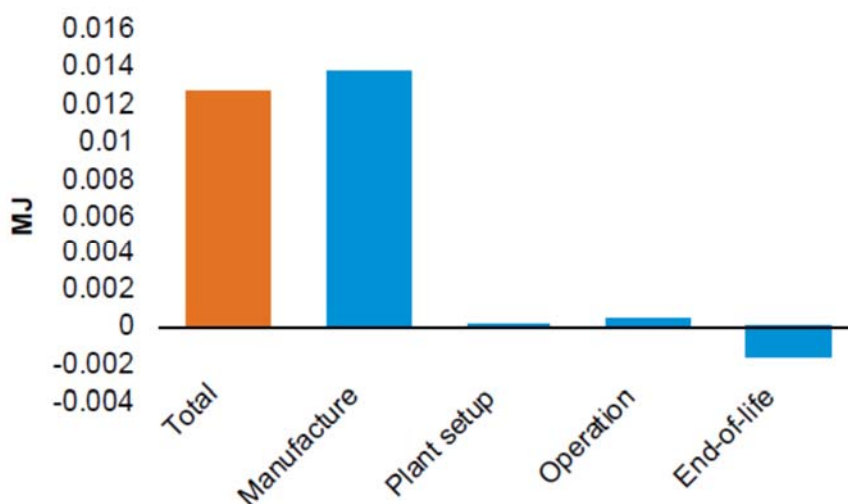


Διάγραμμα 20: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στην κατανάλωση νερού ανά kWh

4.2.3.2 Πρωτογενής ενέργεια από ανανεώσιμες πρώτες ύλες (απόλυτη θερμική αξία)

Η πρωτογενής ενέργεια από ανανεώσιμες πρώτες ύλες δίνει ένα μέτρο της ποσότητας της ανανεώσιμης ενέργειας που καταναλώνεται από την υδροηλεκτρική ενέργεια, την αιολική ενέργεια, την ηλιακή ενέργεια και τη βιομάζα, μετρούμενη σε MJ.

Το διάγραμμα 21 δείχνει την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές πρώτων υλών ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως και με άλλα αποτελέσματα της AKZ, το στάδιο της κατασκευής κυριαρχεί σε σχέση με τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής του, με το τέλος του κύκλου ζωής να παρέχει επίσης μια σημαντική πίστωση και για αυτόν τον δείκτη. Κατά το στάδιο της κατασκευής, τα πιο σημαντικά συστατικά που καταναλώνουν ενέργεια είναι η κατασκευή των καλωδίων (15%), της νασέλας (14%), των θεμελιώσεων (6%), των φτερών (6%) και στην παραγωγή των εργοστασίων των Α/Γ (περίπου 32%), ενώ η φάση του τέλους κύκλου-ζωής παρέχει επίσης πίστωση περίπου -12%. Οι συνεισφορές αυτού του δείκτη προκύπτουν κυρίως από την αιολική ενέργεια, την υδροηλεκτρική ενέργεια και την ηλιακή ενέργεια.



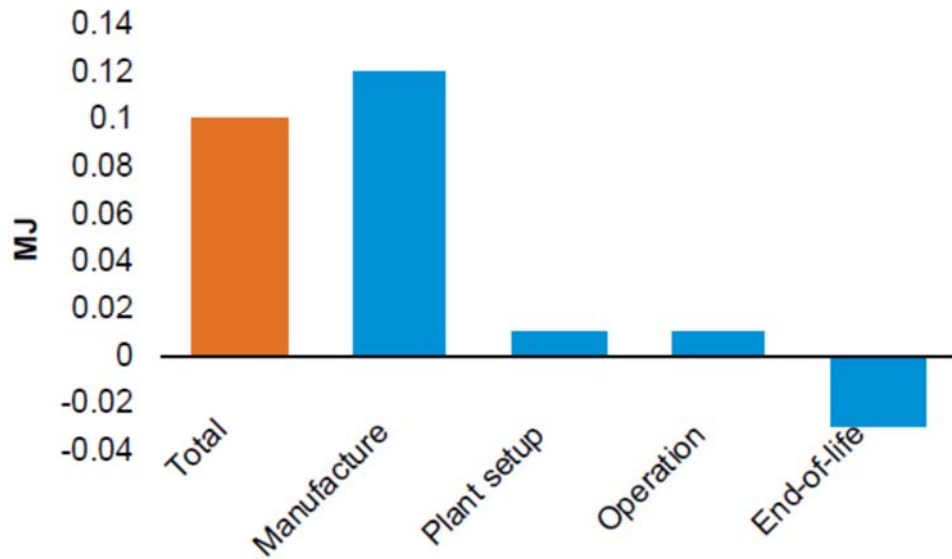
Διάγραμμα 21: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από ανανεώσιμους πόρους (καθαρή θερμική αξία) ανά kWh

4.2.3.3 Πρωτογενής ενέργεια από ορυκτούς πόρους (απόλυτη θερμική αξία)

Η πρωτογενής ενέργεια από φυσικούς ορυκτούς πόρους παρέχει ένα μέτρο της κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, για παράδειγμα, από άνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και πυρηνική ενέργεια, μετρούμενη σε MJ.

Το διάγραμμα 22 δείχνει την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από φυσικούς πόρους ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το εργοστάσιο ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως και με άλλα αποτελέσματα σε της AKZ, το στάδιο της κατασκευής κυριαρχεί σε σχέση με άλλα στάδια του κύκλου ζωής, με το τέλος του κύκλου ζωής να προσφέρει επίσης μια σημαντική πίστωση για αυτόν τον δείκτη.

Κατά το στάδιο της κατασκευής, τα πιο σημαντικά μέρη που συνεισφέρουν στην κατανάλωση ενέργειας είναι ο Πύργος (24%), η νασέλα (15%), τα φτερά (14%), οι καλωδιώσεις της εγκατάστασης (10%), οι θεμελιώσεις (8%), ενώ η διαδικασία κατά το τέλος ζωής παρέχουν μια πίστωση -27%. Η διαδικασία ανέγερσης και λειτουργίας συμβάλλει περίπου 6% του συνολικού κύκλου ζωής. Οι συνεισφορές αυτού του δείκτη προκύπτουν κυρίως από κατανάλωση πετρελαίου (41%), φυσικού αερίου (28%), άνθρακα (17%) και ουρανίου (8%).



Διάγραμμα 22: Συνεισφορά ανά στάδιο του κύκλου ζωής στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από φυσικούς πόρους (καθαρή θερμική αξία) ανά kWh

4.2.3.4 Ανακυκλωσιμότητα

Η έννοια της ανακυκλωσιμότητας παρέχει ένα μέτρο της αναλογίας της εγκατάστασης που μπορεί να ανακυκλωθεί επωφελώς στο τέλος του κύκλου ζωής. Αντιπροσωπεύει το συγκεκριμένο ποσοστό ανακύκλωσης των διαφόρων εξαρτημάτων από το στρόβιλο (ανατρέξτε στην ενότητα 3.3.4) και μετράται ως ποσοστό της συνολικής μάζας της Α/Γ. Το μέτρο αφορά μόνο την Α/Γ και εξαιρούνται τα θεμέλια, τα λοιπά μέρη της εγκατάστασης και άλλα συστατικά του αιολικού σταθμού. Η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό αυτού του δείκτη:

$$\text{Turbine recyclability (\%)} = \frac{[\text{sum for all turbine parts}] \text{ metal recycling rate (\%)}^6 \times \text{metal part mass (kg)}}{\text{total part mass (kg)}}$$

Η συνολική ανακυκλωσιμότητα μιας Α/Γ ισχύος 2.0 MW είναι 84,5 %. Τα στοιχεία που συμβάλλουν στην ανακυκλωσιμότητα σχετίζονται με τα μεταλλικά μέρη που είναι κατασκευασμένα από σίδηρο, χάλυβα, αλουμίνιο και χαλκό. Συνολικά, η Α/Γ 2.0 MW κατασκευάζεται από περίπου 87% μέταλλα.

Άλλα στοιχεία εντός του αιολικού σταθμού (δηλαδή τα τμήματα εκτός της Α/Γ, όπως οι βάσεις θεμελίων, τα δίκτυα των καλωδιώσεων, ο μετασχηματιστής του υποσταθμού ανύψωσης) δεν περιλαμβάνονται στην ανωτέρω ένδειξη. Από μια μοντελοποιημένη προοπτική της ΑΚΖ αυτά τα μέρη μπορούν να ανακυκλωθούν σε διάφορα ποσοστά, όπως π.χ. από τα καλώδια της εγκατάστασης όπου λαμβάνετε ένα ποσοστό ανακύκλωσης της τάξης του 95% (όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.3.4). Ωστόσο, αυτά τα στοιχεία δεν περιλαμβάνονται στον δείκτη «ανακυκλωσιμότητας».

Η χρήση ενός δείκτη για το ποσοστό της «ανακύκλωσης» (δηλαδή, χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση αποφυγής των επιπτώσεων με τις πιστώσεις) παρέχει ένα πολύ «χρησιμοποιήσιμο» επιχειρηματικό μέτρο ώστε να ενισχύσει το συνολικό ποσοστό ανακυκλωσιμότητας της ανεμογεννήτριας, το οποίο έχει μετρηθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τα μοντέλα ΑΚΖ. Αυτό με τη σειρά του στρέφει τις επιχειρηματικές δραστηριότητες σε νέες αναζητήσεις, για παράδειγμα, εστιάζοντας στην ανακύκλωση/επαναχρησιμοποίηση των μη μεταλλικών μερών, όπως τα φτερά και τα σύνθετα υλικά, τους ηλεκτρονικούς ελεγκτές και τα πολυμερή.

4.3 Αποσβέσεις ενέργειας αιολικού σταθμού παραγωγής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιδόσεις των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας όσον αφορά την επιστροφή ενέργειας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των αιολικών σταθμών. Αυτό παρέχει μια ένδειξη του ενεργειακού ισοζυγίου του σταθμού, και δείχνει τη σχέση μεταξύ των ενεργειακών απαιτήσεων καθ' όλο τον κύκλο ζωής του αιολικού σταθμού (δηλαδή για την κατασκευή, λειτουργία και απόρριψη) σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το αιολικό πάρκο. Η περίοδος απόσβεσης υπολογίζεται σε μήνες όπου η ενεργειακή απαίτηση στον κύκλο ζωής του σταθμού ισούται με την ενέργεια που έχει παραχθεί στο χρονικό αυτό διάστημα.

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις που έχουν ληφθεί υπ' όψη για τη μέτρηση αυτού του δείκτη:

1. Καθαρή ενέργεια: η ενεργειακή απαίτηση για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του αιολικού πάρκου προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τον αιολικό

σταθμό και, στη συνέχεια, πολλαπλασιαζόμενο επί τη διάρκεια της ζωής του σταθμού σε μήνες. Αυτός ο δείκτης έχει απόλυτο αποτέλεσμα, ως εξής:

$$\text{Απόσβεση Καθαρής Ενέργειας (μήνες)} = \frac{\text{η ενεργειακή απαίτηση για ολόκληρο τον κύκλο ζωής (MJ)} \times 240}{\text{παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον κύκλο ζωής (MJ)}}$$

2. Πρωτογενής ενέργεια: η δεύτερη προσέγγιση επιχειρεί να διεξάγει την ίδια εξίσωση, αλλά να μετατρέψει την ηλεκτρική παραγωγή από τον αιολικό σταθμό σε ισοδύναμη απαίτηση πρωτογενούς ενέργειας από ένα ενδεικτικό ηλεκτρικό διασυνδεδεμένο δίκτυο (για παράδειγμα το Μέσο Ευρωπαϊκό Δίκτυο). Αυτός ο δείκτης δίνει μια σχετική ένδειξη, ως εξής:

$$\text{Απόσβεση Πρωτογενούς Ενέργειας (μήνες)} = \frac{\text{η ενεργειακή απαίτηση για ολόκληρο τον κύκλο ζωής (MJ)} \times 240}{\text{απαίτηση πρωτογενούς ενέργειας στο Ευρωπαϊκό Σύστημα (MJ)}}$$

Με βάση την προσέγγιση της καθαρής ενέργειας, όπως αυτή ορίστηκε ανωτέρω, ο χρόνος που απαιτεί ένα πρότυπο αιολικό πάρκο εγκατεστημένο στην ξηρά αποτελούμενο από Α/Γ των 2.0 MW είναι 8 μήνες για πάρκα με χαμηλές μέσες ταχύτητες ανέμου. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ότι σε όλο τον κύκλο ζωής του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, η μονάδα θα επιστρέψει 31 φορές (με χαμηλό αιολικό δυναμικό) πίσω περισσότερη ενέργεια από ό, τι καταναλώνεται σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της εγκατάστασης.

Τα αποτελέσματα της δεύτερης προσέγγισης εκτιμά μια θεωρητική επιστροφή της πρωτογενούς ενέργειας, με βάση ένα τυπικό μίγμα ηλεκτρικών δικτύων από διάφορες περιοχές του κόσμου. Η προσέγγιση αυτή συνυπολογίζει την αποδοτικότητα των σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας κατά τον καθορισμό της πρωτογενούς ενέργειας. Δεν γίνεται καμία διάκριση ως προς το κατά πόσον θα πρέπει να αξιολογούνται το ενεργειακό μίγμα βασικού φορτίου ή το ενεργειακό μίγμα του οριακού φορτίου. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα δείχνουν ένα εκτιμώμενο αρχικό σημείο (σημείο καμπής - όπου έχει αποσβεστεί η ενέργεια που καταναλώθηκε στο χρόνο ζωής) για τον αιολικό σταθμό στους 2 μήνες για εγκαταστάσεις σε περιοχές με συνθήκες χαμηλού αιολικού δυναμικού. Ο χρόνος αυτός προκύπτει για αυτόν τον δείκτη όταν τα δείγματα του μείγματος των

ηλεκτρικών δικτύων που αξιολογούνται είναι αυτά των Ηνωμένων Πολιτειών, της Ευρώπης και της Κίνας. Τα αποτελέσματα διαφέρουν ελαφρώς για κάθε μία περιοχή, και τα οποία είναι μια αντανάκλαση των πρωτογενών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στο ενεργειακό μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας του εκάστοτε δικτύου, καθώς και οι αποδοτικότητες των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συμμετέχουν στο ενεργειακό μίγμα σε αυτές τις περιοχές.

Συνολικά, μπορεί να συναχθεί το αποτέλεσμα ότι η προσέγγιση «απόσβεση καθαρής ενέργειας» δεν περιλαμβάνει τις σχετικές μετατροπές, που απαιτούνται κατά την προσέγγιση της « απόσβεσης πρωτογενούς ενέργειας» (όπως ορίζεται παραπάνω), και ως εκ τούτου, η «απόσβεση καθαρής ενέργειας» παρέχει απόλυτη ένδειξη της απόδοσης (Garrett, 2012) και θα πρέπει να θεωρείται προτιμώμενος ο δείκτης αυτός για τον δείκτη επενδύσεων ενέργειας.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση - σχολιασμός αποτελεσμάτων

5.1 Αποτελέσματα και σημαντικά ευρήματα

Τα αποτελέσματα που περιγράφονται στην παρούσα έκθεση δείχνουν το περιβαλλοντικό προφίλ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενός αιολικού σταθμού παραγωγής που αποτελείται από είκοσι πέντε ανεμογεννήτριες των 2.0 MW εκάστη. Αυτή η ΑΚΖ είναι μια ολοκληρωμένη και λεπτομερής μελέτη που καλύπτει πάνω από το 99,9% της συνολικής μάζας των αιολικών στροβίλων, και πάνω από το 99,95% της μάζας ολόκληρης της μονάδας παραγωγής ενέργειας (Α/Γ και λοιπές εγκαταστάσεις και εξοπλισμοί). Η μάζα που δεν καλύπτεται από τη μελέτη σχετίζεται με στοιχεία-εξαρτήματα του σταθμού, των οποίων το υλικό δεν ήταν δυνατόν να αναγνωρισθεί.

Τόσο τα δεδομένα απογραφής ολόκληρου του κύκλου ζωής και της εκτίμησης των επιπτώσεων καθ' όλο τον κύκλο ζωής (που εμφανίζονται στην ενότητα 3) δείχνουν σαφώς ότι η φάση της παραγωγής και κατασκευής των βασικών μερών και εξαρτημάτων δεσπόζει όλων των άλλων φάσεων του κύκλου ζωής του αιολικού σταθμού ως προς τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις ροές των υλικών για τον αιολικό σταθμό (Ji and Chen, 2016). Επιπλέον, η αποφυγή των επιπτώσεων που συνδέονται με τις διεργασίες κατά το τέλος του κύκλου ζωής, όπως η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση υλικών και εξαρτημάτων παρέχουν επίσης σημαντικές περιβαλλοντικές πιστώσεις, που αντιπροσωπεύουν τη δεύτερη πιο σημαντική φάση του κύκλου ζωής του σταθμού. Οι φάσεις της λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης και της ανέγερσης και των συνακόλουθων με αυτή υπηρεσιών αποτελούν πολύ λιγότερο σημαντικά στάδια του κύκλου ζωής.

Οι επιπτώσεις των μεταφορών των ανεμογεννητριών από τις τοποθεσίες παραγωγής τους προς το χώρο ανέγερσης του αιολικού πάρκου είναι επίσης αρκετά σημαντική

(μεταξύ 1% και 40% ανάλογα με την κατηγορία επιπτώσεων). Οι μεταφορές περιλαμβάνουν τη χρήση ειδικών καυσίμων (και χρησιμοποίηση ειδικών οχημάτων) για τη μεταφορά των συγκεκριμένων στοιχείων των ανεμογεννητριών (τα τμήματα του πύργου, την άτρακτο ή νασέλα και τα φτερά). Αυτά τα δεδομένα των καυσίμων βασίζονται σε στοιχεία μετρήσεων και συγκεκριμένες αποστάσεις από μεταφορές πραγματικών ανεμογεννητριών. Αυτά τα συγκεκριμένα σύνολα δεδομένων έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμων σε σύγκριση με μοντέλα μεταφοράς των φορτίων τα οποία θεωρούνταν ότι μεταφέρονται σε προεπιλεγμένα εμπορευματοκιβώτια μεταφοράς (container). Επιπλέον, μια εκτίμηση της ευαισθησίας δείχνει ότι η μεταφορά των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών από τις τοποθεσίες παραγωγής τους προς το χώρο ανέγερσης του αιολικού σταθμού, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές ανάλογα με την δεδομένη αλυσίδα εφοδιασμού, οδηγεί σε εύλογα σημαντικές μεταβολές στις επιπτώσεις του κύκλου ζωής (Ortegon et al., 2013).

Σε γενικές γραμμές, τα μέρη της ανεμογεννήτριας που συμβάλλουν πιο ουσιαστικά στα αποτελέσματα των δεδομένων απογραφής (LCI – life cycle inventory) και στην εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA – life cycle impact assessment) είναι κυρίως τα μεγαλύτερα μεταλλικά μέρη του σταθμού (τόσο για τη φάση της κατασκευής όσο και της διαχείρισης του τέλους του κύκλου ζωής). Συγκεκριμένα, αυτά τα μέρη είναι μέρη κυρίως της Α/Γ όπως τα τμήματα του πύργου, η νασέλα, τα φτερά, τμήματα του χώρου εγκατάστασης όπως τα θεμέλια, ο μετασχηματιστής κ.α.. Προηγούμενες μελέτες ΑΚΖ από πολλούς κατασκευαστές όπως για παράδειγμα της Vestas για τις ανεμογεννήτριες που παράγει (PE, 2011, Vestas 2011a, b, c, Vestas 2013a, β, 2014a, β, γ, δ, Vestas 2015) έχουν δείξει παρόμοια αποτελέσματα.

Ενημερώσεις και διορθώσεις των δεδομένων έγιναν επίσης στις καλωδιώσεις της εγκατάστασης (δηλαδή την καλωδίωση που διασυνδέει τις ανεμογεννήτριες μεταξύ τους σε βρόχους και εν συνεχεία όλους τους βρόχους μέχρι τον υποσταθμό ανύψωσης και το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο), όσον αφορά το μέσο μήκος της καλωδίωσης ανά εγκατάσταση και τις προδιαγραφές με βάση τις οποίες κατασκευάζονται οι καλωδιώσεις αυτές. Αυτή η ενημέρωση των δεδομένων βασίζεται στην αξιολόγηση πάνω από είκοσι τυπικών σχεδιαγραμμάτων διασύνδεσης αιολικών σταθμών, που αντιπροσωπεύουν περίπου εγκαταστάσεις ικανότητας ισχύος του 1.0 GW.

Κατά την εξέταση των βιομηχανικών εγκαταστάσεων όπου γίνεται η κατασκευή των ανεμογεννητριών, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι επιπτώσεις των καυσίμων, της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία καταναλώνεται στις εγκαταστάσεις και τα αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται συνεισφέρουν περίπου από 1% έως 14% σε όλες τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτά τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία για παρόμοιο σε κλίμακα προϊόν με προηγούμενες μελέτες AKZ πολλών κατασκευαστών ανεμογεννητριών (όπως της Vestas). Η AKZ είναι χρονικά υλοποιημένη για δεδομένα εξοπλισμού του 2014, ωστόσο πολλά δεδομένα παραγωγής από προηγούμενες χρονιές χρησιμοποιούνται στην AKZ, καθώς αυτά είναι η πιο αντιπροσωπευτικά της παραγωγής του 2014 εξαιτίας των ακόλουθων λόγων:

- Εντός του 2013 η Vestas (ο μεγαλύτερος παγκοσμίως κατασκευαστής Α/Γ με πωλήσεις πάνω από το 50% των εγκαταστάσεων στην Ελληνική και Ευρωπαϊκή επικράτεια) πούλησε ένα σημαντικό ποσοστό της παραγωγής (δηλαδή εγκαταστάσεις κατασκευής των πύργων στη Δανία μαζί με τη χύτευση και τις μηχανουργικές εργασίες). Αυτά τα εργοστάσια εξακολουθούν να παρέχουν όλα τα εξαρτήματα και ανταλλακτικά για λογαριασμό της Vestas, αλλά ως διαφορετική νομική οντότητα. Τα σύνολα δεδομένων μετά το 2012 δεν περιλαμβάνουν ένα πλήρες ημερολογιακό έτος απογραφής δεδομένων για αυτές τις εγκαταστάσεις.
- Επιπλέον, τα δεδομένα για τη χρήση αναλωσίμων στις μονάδες παραγωγής της Vestas συγκεντρώνονται από το 2014 και μετά (αν και αυτά αντιπροσωπεύουν ένα μικρό ποσοστό σε σύγκριση με τα δεδομένα για την ενεργειακή χρήση, των πρώτων υλών, των αποβλήτων, το νερό και τις εκπομπές στο σύνολό τους). Ως εκ τούτου, με βάση τα τρέχοντα δεδομένα που είναι διαθέσιμα, τα σύνολα δεδομένων του 2012 είναι η πιο πλήρη και αντιπροσωπευτικά για την εφοδιαστική αλυσίδα της παραγωγής από ότι τα αντίστοιχα του 2014.
- Επίσης η τυπική Α/Γ που επιλέχθηκε για το τυπικό αιολικό σταθμό που μελετάται στην παρούσα AKZ (δηλαδή ονομαστικής ισχύος 2MW, και ύψος πλήμνης τα 85μ) συναντάται με παραλλαγές σχεδόν σε όλους τους Ευρωπαίους κατασκευαστές Α/Γ ακόμα από το 2006, και εξακολουθούν να είναι διαθέσιμες στην αγορά ακόμα και σήμερα.

Σε γενικές γραμμές κατά το έτος 2012 υπήρχε χαμηλότερη ζήτηση ενέργειας όπως και κατανάλωση πρώτων υλών, αλλά συνολικά αυξάνεται η συνολική κατανάλωση σε βάση μονάδας παραγωγής.

Πολλοί κατασκευαστές έχουν αναζητήσει τα τελευταία χρόνια την επίτευξη διαπίστευσης 100% WindMade (2015), σύμφωνα με την οποία επενδύονται κεφάλαια από τους κατασκευαστές Α/Γ και αποκτούνται πιστώσεις από ιδίας χρήσης αιολικά πάρκα. Ωστόσο, αυτή η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας δεν συμπεριλήφθηκε στην παρούσα εκτίμηση του κύκλου ζωής καθώς έρχεται σε αντίθεση με τα πρότυπα ISO για την AKZ (ISO 14040/44, 2006) και την μέθοδο αποτύπωσης του αποτυπώματος άνθρακα (ISO14067, 2013). Στην ενότητα 3.9.9 γίνεται περαιτέρω συζήτηση της εν λόγω υπόθεσης. Ωστόσο, έχει γίνει η συμπερίληψη αυτής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ιδίων επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές και έχει αξιολογηθεί στην ανάλυση ευαισθησίας.

Η συμβολή των συγκεκριμένων ουσιών (πρώτων υλών) που αποκτούνται ή αποθέτονται προς/από το περιβάλλον δεν απαριθμούνται εδώ συγκεκριμένα (ανατρέξτε στην ενότητα 5.2). Ωστόσο, η κατανάλωση του σιδήρου, του χάλυβα, του αλουμινίου και του σκυροδέματος (στις ανεμογεννήτριες, στις καλωδιώσεις της εγκατάστασης και στα θεμέλια) είναι από τους βασικούς παράγοντες που συνεισφέρουν σε σχεδόν όλες τις ροές στοιχείων από και προς το περιβάλλον, και στις δυνητικές επιπτώσεις που προκύπτουν. Η προσεκτική μοντελοποίηση στην AKZ αυτών των υλικών, τόσο όσον αφορά τα σύνολα των τεχνικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και ανακύκλωση τους, όσο ως προς τη μέθοδο που να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τις ποιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται (για παράδειγμα χάλυβας υψηλού κράματος), είναι απαραίτητη για να παραχθεί μια αξιόπιστη και ακριβής μελέτη. Οι παραδοχές αυτές έχουν ληφθεί υπόψη με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στην παρούσα εκτίμηση του κύκλου ζωής. Ως επί το πλείστο η μέθοδος της ανακύκλωσης που θεωρείται στην παρούσα διατριβή θεωρεί ότι η ποιότητα των υλικών που ανακυκλώνονται υποβαθμίζεται κατά τη διεργασία της ανακύκλωσης. Σε πολλές περιπτώσεις τα προϊόντα που ανακυκλώνονται αποκτούν χρήσεις για τις οποίες δεν είχαν σχεδιαστεί αρχικά (Martin et al., 2016). Τέτοιες περιπτώσεις δεν αξιολογούνται στην παρούσα.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του κύκλου ζωής δείχνουν επίσης τη σημασία της σωστής χωροθέτησης των αιολικών εγκαταστάσεων και τις ανεμολογικές συνθήκες όπου οι ανεμογεννήτριες θα λειτουργήσουν. Οι παραπάνω δύο παράγοντες έχουν μια σημαντική επίδραση στις συνολικές επιπτώσεις της παραγωγής ενέργειας, όταν μελετάμε την παραγωγή και διοχέτευση 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τη λειτουργική μονάδα. Η ανεμογεννήτρια είναι λειτουργικά μελετημένη ώστε να ταιριάζει με τις διαφορετικές άνεμολογικές κλάσεις και ταχύτητες ανέμου. Έτσι δεν είναι πάντα το μέγεθος του ρότορα (πλήμνη και φτερά) ή η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας (MW) που καθορίζει την ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την Α/Γ αλλά η ανεμολογική κλάση είναι ένας κυρίαρχος παράγοντας. Αυτά τα αποτελέσματα έχουν αξιολογηθεί στην ανάλυση ευαισθησίας. Για αυτή την ΑΚΖ, έχει επιλεγεί για τις ανεμολογικές κλάσεις μία μέση ταχύτητα ανέμου από ένα μεσαίο σημείο της διαθέσιμης κλίμακας (δηλαδή χαμηλή μέση ταχύτητα), που αντιπροσωπεύει μια τυπική «εικονική» εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας στην Ελληνική επικράτεια (στην ενδοχώρα και όχι σε νησιά). Παρόλα αυτά, υψηλότερες ή χαμηλότερες μέσες ταχύτητες ανέμου, θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα της ΑΚΖ για μια συγκεκριμένη τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού σταθμού ο οποίος θα λειτουργεί υπό διαφορετικές συνθήκες.

Η διάρκεια ζωής του αιολικού σταθμού είναι επίσης ένας κυρίαρχος παράγοντας κατά τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της παραγωγής ηλεκτρισμού ανά kWh από το αιολικό πάρκο. Η ΑΚΖ προϋποθέτει μια διάρκεια ζωής των 20 ετών που ταιριάζει με τα τυποποιημένα σχέδια ζωής όλων των κατασκευαστών Α/Γ. Ωστόσο, η αιολική βιομηχανία στροβίλων είναι ακόμα νέα (η Vestas λειτουργεί από το 1979), και λίγες Α/Γ έχουν ποτέ παροπλιστεί, φθάνοντας λειτουργική ζωή 30 ετών και πάνω, για τα παλαιότερα μοντέλα ανεμογεννητριών (Larsen, 2009). Η φυσιολογική φθορά και η κόπωση στα φέροντα στοιχεία της Α/Γ που διαχειρίζονται τα δυναμικά φορτία (όπως ο πύργος, τα φτερά) είναι συχνά οι παράγοντες που περιορίζουν τη συνολική διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας. Πολλά εξαρτήματα μπορούν να αντικατασταθούν συστηματικά ως μέρος της συντήρησης, εκτός όμως από τα σταθερά μέρη (όπως ο Πύργος, οι θεμελιώσεις και τα καλώδια, κλπ.) που κατά κανόνα δεν αντικαθίστανται και μπορούν να περιορίσουν τη φυσική διάρκεια ζωής του αιολικού σταθμού. Πολλοί κατασκευαστές και ανεξάρτητοι παραγωγοί λειτουργούν εξελιγμένα συστήματα με διαγνωστικά εργαλεία και αισθητήρες που μετρούν την απόδοση μεμονωμένων

ανεμογεννητριών σε πραγματικό χρόνο και την κόπωση των επιμέρους εξαρτημάτων και είναι δυνατό να προβλεφθεί ο χρόνος ζωής συγκεκριμένων εξαρτημάτων για ειδικές χωρικές / ανεμολογικές συνθήκες. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν σε πάνω από 27,500 ανεμογεννήτριες σε όλο τον κόσμο, ισοδύναμο με περίπου 60 GW της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος, παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες στους κατασκευαστές. Αυτές οι αξιολογήσεις διεξάγονται επίσης τόσο κατά την αδειοδότηση όσο και κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός νέου αιολικού σταθμού, και οι οποίες χρησιμοποιούνται με ακρίβεια ώστε να προβλεφθεί η διάρκεια ζωής του εξαρτήματος για ειδικές συνθήκες ανεμολογικές ή τοποθεσίες χωροθέτησης. Η διάρκεια ζωής του σταθμού, βάσει των αξιολογήσεων αυτών, επηρεάζει τις επιχειρηματικές αποφάσεις και τις συμβολιακές παραμέτρους κατά την ανάπτυξη ενός νέου αιολικού σταθμού. Για παράδειγμα, στην AKZ του αιολικού σταθμού «Roaring 40s» αποτελούμενο από V90-3.0 MW ανεμογεννήτριες στην Αυστραλία (PE, 2011a; Vestas, 2013) , με βάση τις παραπάνω εκτιμήσεις, υπολογίζεται ότι η ζωή της Α/Γ μπορεί να φτάσει τα 24 έτη. Αν και εμφανίζονται γενικά στην βιβλιογραφία αυτές οι παραλλαγές ως προς τη διάρκεια ζωής, εντούτοις η διάρκεια ζωής σχεδιασμού για την παρούσα μελέτη είναι τα 20 έτη για ένα τυπικό «εικονικό» αιολικό σταθμό και θεωρείται μια εύλογη και ακριβής εκτίμηση.

Η τρέχουσα εκτίμηση δεν λαμβάνει υπόψη τις ενδεχόμενες επιπτώσεις της αλλαγής των χρήσεων γης, για παράδειγμα, την αποψίλωση της βλάστησης κατά την ανέγερση των ανεμογεννητριών ή την τοποθέτηση των καλωδίων στο έδαφος για να συνδεθεί το αιολικό πάρκο με το ηλεκτρικό δίκτυο ή την κατασκευή δρόμων για την πρόσβαση και μεταφορά των εξαρτημάτων της εγκατάστασης σε σημεία όπου πριν δεν υπήρχαν. Σε μια μελέτη ενός συγκεκριμένου αιολικού σταθμού «Musselroe» στην Αυστραλία που αποτελείται από V90 - 3.0 MW ανεμογεννήτριες (PE, 2013a) η αφαίρεση της βλάστησης για κατασκευή εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συμπεριλήφθηκε κατά την αξιολόγηση της AKZ, και το αποτέλεσμα που προέκυψε αύξησε για το χείριστο σενάριο, κατά περίπου 14% τις επιπτώσεις της συνολικής υπερθέρμανσης που προκαλούνται από το αιολικό σταθμό.

Συνολικά, κατά τη σύγκριση της κλίμακας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ανά 1 kWh για το σταθμό παραγωγής αιολικής ενέργειας με Α/Γ των 2.0 MW, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα από άλλες AKZ των κατασκευαστών ανεμογεννητριών. Η μελέτη, σε γενικές γραμμές, θεωρείται να είναι σε ευθυγράμμιση με την AKZ άλλων Α/Γ, και

περιλαμβάνει επίσης ορισμένες πρόσθετες ενημερώσεις που βελτιώνουν την στιβαρότητα και την ακρίβεια της συνολικής εκτιμήσεως.

5.2 Ανάλυση ευαισθησίας της AKZ

Η ανάλυση ευαισθησίας παρέχει μια σκόπιμη αξιολόγηση των παραδοχών, των παραμέτρων και των μεθοδολογικών επιλογών της AKZ, η οποία αποσκοπεί στο να παράσχει την κατανόηση της σημασίας και της κλίμακας των επιλογών που γίνονται την AKZ. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας, η οποία αξιολογεί τα ακόλουθα εννέα σενάρια:

1. Τη διακύμανση στη διάρκεια ζωής του αιολικού σταθμού: ± 4 χρόνια.
2. Τη μεταβολή στη ρύθμιση παραμέτρων της Α/Γ με ύψος πλήμνης 95 μέτρων.
3. Τη μεταβολή στη συχνότητα αντικατάστασης ανταλλακτικών και επιμέρους εξαρτημάτων.
4. Τη λειτουργία του αιολικού σταθμού των 50MW αποτελούμενο από Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2.2 MW.
5. Τις διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς για τα στοιχεία και εξαρτήματα του υπό ανέγερση αιολικού σταθμού.
6. Τις διαφορετικές αποστάσεις του αιολικού σταθμού από το υπάρχον δίκτυο μεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες απώλειες του καλωδίου διασύνδεσης.
7. Την παραλλαγή του τύπου της θεμελίωσης που ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί από τύπο χαμηλής στάθμης υπογείων υδάτων σε τύπο υψηλής στάθμης υπογείων υδάτων.
8. Το συμβάν να γίνει μια έκρηξη ενός ηλεκτρικού διακόπτη
9. Τις πιθανές επιδράσεις της μεθόδου που χρησιμοποιείται για την πίστωση που προσδίδεται από την ανακύκλωση μετάλλων.

Αυτά τα σενάρια αντιπροσωπεύουν τις πιο σημαντικές παραδοχές της μελέτης AKZ.

5.2.1 Χρόνος ζωής του αιολικού σταθμού

Η διάρκεια ζωής ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής από αιολική ενέργεια είναι σχεδιασμένη για 20 χρόνια. Ωστόσο, αυτό ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με τις ειδικές συνθήκες λειτουργίας του σταθμού, και δυνητικά θα μπορούσε να φτάσει τα 30 χρόνια ζωής ή και περισσότερα, αν συνυπολογίσουμε την λειτουργία παλαιότερων εγκατεστημένων ανεμογεννητριών. Η διάρκεια ζωής του σταθμού είναι μια σημαντική υπόθεση για την ΑΚΖ επειδή η απόσβεση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, αποσβένονται κατά τη διάρκεια ζωής του στροβίλου. Ως εκ τούτου, οι αλλαγές στη διάρκεια της ζωής έχουν σημαντική συνολική επίδραση στις επιπτώσεις ανά κιλοβατώρα που παράγεται από το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Αυτή η ανάλυση ευαισθησίας παρουσιάζει τα αποτελέσματα για μια διακύμανση των ± 4 χρόνων στη διάρκεια της ζωής του σταθμού. Δεν γίνεται συνυπολογισμός των αλλαγών σε ανταλλακτικά κατά τη διάρκεια της συντήρησης του πάρκου, καθώς αυτές οι μεταβολές εμφανίζονται ως ξεχωριστή ανάλυση ευαισθησίας στην ενότητα 5.2.3 ώστε να τονιστεί η σημασία αυτών των δεδομένων.

Ο πίνακας 10 δείχνει ότι όλες οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είτε αυξάνονται κατά περίπου 25%, στην περίπτωση της μειωμένης διάρκειας ζωής κατά 4 χρόνια, ή μειώνονται κατά 17% περίπου, για μια αυξημένη διάρκεια ζωής κατά 4 χρόνια. Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα, οι επιπτώσεις ανά kWh αντιστοιχούν απευθείας με τη διάρκεια ζωής του σταθμού.

Environmental impact categories:	Unit	Reduced lifetime (16 years)	Baseline (20 years)	Increased lifetime (24 years)
Abiotic resource depletion (ADP elements)	mg Sb-e	0.08	0.06	0.05
Abiotic resource depletion (ADP fossils)	MJ	0.12	0.10	0.08
Acidification potential (AP)	mg SO ₂ -e	40	32	27
Eutrophication potential (EP)	mg PO ₄ -e	4.7	3.7	3.1
Freshwater aquatic ecotoxicity potential (FAETP)	mg DCB-e	77	62	52
Global warming potential (GWP)	g CO ₂ -e	9.0	7.2	6.0
Human toxicity potential (HTP)	mg DCB-e	1784	1427	1189

Marine aquatic ecotoxicity potential (MAETP)	g DCB-e	991	793	661
Photochemical oxidant creation potential (POCP)	mg Ethene	4.9	3.9	3.3
Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	mg DCB-e	51	41	34
Non-impact indicators:				
*Primary energy from renewable raw materials	MJ	0.0	0.0	0.0
*Primary energy from resources	MJ	0.1	0.1	0.1
Water consumption	g	84	67	56

Πίνακας 10: Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις για όλο το χρόνο ζωής του σταθμού παραγωγής για διαφορετική διάρκεια ζωής (Οι μονάδες εμφανίζονται σε g, mg ή MJ ανά kWh)

5.2.2 Ύψος πλήμνης 95 μέτρων

Υπάρχουν διαφορετικές επιλογές για το ύψος του Πύργου, όταν μελετώνται οι παράμετροι λειτουργίας ενός στροβίλου για μια συγκεκριμένη τοποθεσία χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου. Σε γενικές γραμμές, οι ανεμογεννήτριες που χωροθετούνται σε περιοχές υψηλού αιολικού δυναμικού τείνουν να έχουν χαμηλότερα ύψη πύργου, ενώ ανεμογεννήτριες κατάλληλες για περιοχές με χαμηλό δυναμικό τείνουν να λειτουργούν σε υψηλότερες πύργους. Το ύψος του πύργου και το φορτίο που συνεπάγεται ανάλογα με την κατηγορία του αιολικού δυναμικού, θα επηρεάσει το ποσό του χάλυβα που χρειάζεται για την κατασκευή του πύργου, και των θεμελιώσεων αντίστοιχα.

Η ανάλυση ευαισθησίας αυτή αξιολογεί την επίδραση ενός πύργου 95 μέτρων σε συνθήκες χαμηλού ανέμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η μάζα του πύργου κατά περίπου 40% έναντι ενός αντίστοιχου πύργου με ύψος πλήμνης 80 μέτρων, καθώς και να αυξηθεί το βάρος της θεμελίωσης της Α/Γ. Στα δεδομένα που παρουσιάζονται παρακάτω υποτίθεται ότι η ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι αμετάβλητη. Ως εκ τούτου, υπάρχει ένας συμβιβασμός όσον αφορά τις τοπικές συνθήκες χωροθέτησης, όπου θα υπάρχει μια αυξημένη απόδοση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με το πρόσθετο περιβαλλοντικό βάρος που σχετίζεται με το υψηλότερο ύψος πλήμνης. Ο πίνακας 11 δείχνει ότι όλες οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν μια αύξηση της τάξης του 8% έως 15%, με την παγκόσμια υπερθέρμανση του πλανήτη να έχει πιθανή αύξηση κατά 14% περίπου σε σύγκριση με την επιλογή του «βασικού» ύψος πύργου των 80μ.

Αυτός είναι ο λόγος που επιλέχθηκε το χειρότερο δυνατό σενάριο στην παρούσα ΑΚΖ που μελετά το μέσο Αιολικό σταθμό που θα εγκατασταθεί στην Ελληνική επικράτεια.

Environmental impact categories:	Unit	Baseline: Low wind 80m hub height	Sensitivity: Low wind 95m hub height
Abiotic resource depletion (ADP elements)	mg Sb-e	0,06	0,07
Abiotic resource depletion (ADP fossils)	MJ	0,1	0,11
Acidification potential (AP)	mg SO ₂ -e	32	37
Eutrophication potential (EP)	mg PO ₄ -e	3,7	4,2
Freshwater aquatic ecotoxicity potential (FAETP)	mg DCB-e	62	69
Global warming potential (GWP)	g CO ₂ -e	7,2	8,2
Human toxicity potential (HTP)	mg DCB-e	1427	1601
Marine aquatic ecotoxicity potential (MAETP)	g DCB-e	793	940
Photochemical oxidant creation potential (POCP)	mg Ethene	3,9	4,5
Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	mg DCB-e	4,1	46
Non-impact indicators:			
•Primary energy from renewable raw materials	MJ	0	0
•Primary energy from resources	MJ	0,1	0,12
Water consumption	g	67	76

Πίνακας 11: Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις για όλο το χρόνο ζωής του σταθμού παραγωγής για εγκαταστάσεις με υψηλό αιολικό δυναμικό (Οι μονάδες εμφανίζονται σε g, mg ή MJ ανά kWh)

5.2.3 Εξαρτήματα που αντικαθίστανται στη διάρκεια ζωής του σταθμού

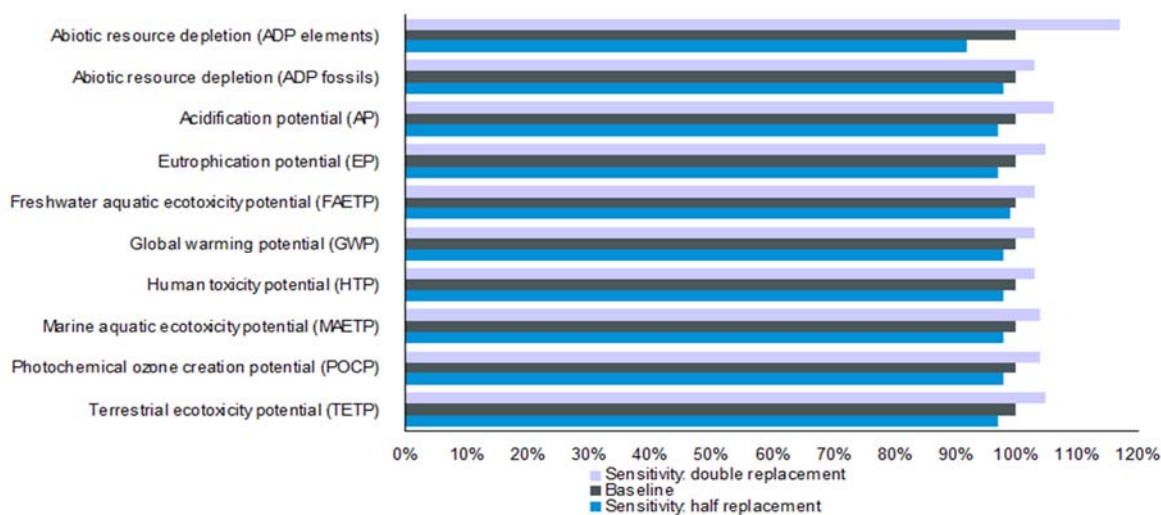
Μπορεί να υπάρχει διακύμανση στο επίπεδο των αναγκών συντήρησης και της χρήσης ανταλλακτικών για οποιαδήποτε ιδιαίτερη ανεμογεννήτρια ενός αιολικού σταθμού. Βάση των υπολογισμών που προκύπτουν από την παρακολούθηση των ροών των ανταλλακτικών και από τα δεδομένα που υπολογίζονται με βάση αυτές τις ροές, ένα τυπικό ποσοστό χρησιμοποιούμενων ανταλλακτικών που αφορά την αντικατάσταση των μη λειτουργικών εξαρτημάτων της Α/Γ περιλαμβάνεται στην ΑΚΖ για την τυπική Α/Γ των 2.0 MW.

Αυτή η ανάλυση ευαισθησίας αξιολογεί τις επιπτώσεις του διπλασιασμού της συχνότητας αλλαγής των ανταλλακτικών, πράγμα που αντιπροσωπεύει μια εξαιρετικά συντηρητική εκτίμηση, καθώς και το σενάριο του υποδιπλασιασμού αυτών, που αποτελεί μια λιγότερο συντηρητική προσέγγιση.

Στο διάγραμμα 23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνει ότι ο διπλασιασμός των μερών που αντικαθίστανται έχει επίδραση στην αύξηση

όλων των κατηγοριών των επιπτώσεων η οποία κυμαίνεται από 3% έως 17%. Η κατηγορία επιπτώσεων που επηρεάζεται πιο σημαντικά είναι η μείωση των στοιχείων των αβιοτικών πόρων (+ 17%), ενώ οι περισσότερες από τις υπόλοιπες επιπτώσεις παρουσιάζουν αύξηση κατά περίπου 3% έως 6%. Για την εξάντληση των στοιχείων των αβιοτικών πόρων, η αύξηση γενικά σχετίζεται με την αυξημένη χρήση χάλυβα και χαλκού, που σχετίζονται με άλλα μεταλλικά στοιχεία όπως το μολυβδαίνιο, το χρώμιο, τον μόλυβδο και το ασήμι.

Η μείωση κατά το ήμισυ των ανταλλακτικών που χρησιμοποιούνται στο χρόνο ζωής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των επιπτώσεων όλων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ -1% και -8%.



Διάγραμμα 23: Ανάλυση ευαισθησίας χρόνου ζωής με διπλασιασμό ή υποδιπλασιασμό των ανταλλακτικών που προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν

5.2.4 Λειτουργία των Α/Γ του αιολικού σταθμού με αυξημένη ισχύ στα 2,2 MW.

Η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας της τουρμπίνας είναι 2.0 MW. Ωστόσο, πολλοί κατασκευαστές Α/Γ προσφέρουν προγράμματα αναβάθμισης της ισχύος εξόδου της Α/Γ ούτως ώστε αυτή να λειτουργεί με ισχύ 2.2 MW για ορισμένες συνθήκες λειτουργίας, που μπορεί να περιορίζονται, για παράδειγμα, από την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την άεργο ισχύ (Vestas, 2015a).

Αυτή η ανάλυση ευαισθησίας αξιολογεί τα αποτελέσματα της λειτουργίας με αυξημένη ισχύ για χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στη λίστα των υλικών στο για την λειτουργία ισχύος στα 2.2 MW καθώς αυτή υλοποιείται κυρίως μέσω των ενημερώσεων και των αναβαθμίσεων του λογισμικού των Α/Γ. Οι ουσιαστικές διαφοροποιήσεις είναι ότι η ετήσια παραγωγή ενέργειας αυξάνεται κατά περίπου 1.0% λόγω την αυξημένης ισχύος της γεννήτριας του στρόβιλου (Vestas, 2015a). Επίσης, κατά συνέπεια, απαιτούνται μόνο 23 Α/Γ για να υλοποιηθεί μια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγέθους 50 MW.

Καθώς η λειτουργία ισχύος στα 2.2MW υπόκειται σε περιορισμούς από την άποψη της λειτουργίας, για παράδειγμα, έχει περιορισμούς που σχετίζονται με υψόμετρο της εγκατάστασης και τη θερμοκρασία. Επιπλέον, απαιτεί χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου (η κλάση του αιολικού δυναμικού είναι για μέση ταχύτητα ανέμου τα 6,5 m/s, αντί για τα 7,0 m/s που εκτιμάται στο βασικό σενάριο). Αυτό καθιστά είναι δύσκολο να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας της Α/Γ. Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται παρακάτω παρουσιάζουν την αντιπαράσταση για δύο ανεμογεννήτριες με μέση ταχύτητα ανέμου στα 6,5 m/s. Ο πίνακας 12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης που δείχνουν μια μείωση περίπου από 2% έως 8% για όλους τους δείκτες ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Υπάρχει μια μείωση στο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη περίπου -2,5% (-0,2 γραμμάρια CO₂-e) για την κατηγορία χαμηλού αιολικού δυναμικού για το στρόβιλο των 2.0 MW έναντι του αντίστοιχου 2.2 MW, όταν η ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε μέση ταχύτητα ανέμου 6,5 m/s για τις δύο παραλλαγές Α/Γ.

Environmental impact categories:	Unit	Baseline: Mk10B Low wind 2.0 MW @ 7m/s	Mk10B Low wind 2.0 MW @ 6,5m/s	Sensitivity: Mk10C Low wind 2.2 MW @ 6,5m/s
Abiotic resource depletion (ADP elements)	mg Sb-e	0.06	0.07	0.067
Abiotic resource depletion (ADP fossils)	MJ	0.10	0.11	0.11
Acidification potential (AP)	mg SO ₂ -e	32	36	35
Eutrophication potential (EP)	mg PO ₄ -e	3.7	4.2	4.1
Freshwater aquatic ecotoxicity potential (FAETP)	mg DCB-e	62	69	68
Global warming potential (GWP)	g CO ₂ -e	7.2	8.1	7.9
Human toxicity potential (HTP)	mg DCB-e	1427	1605	1565
Marine aquatic ecotoxicity potential (MAETP)	g DCB-e	793	892	870
Photochemical oxidant creation potential (POCP)	mg Ethene	3.9	4.4	4.3
Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	mg DCB-e	41	46	45
Non-impact indicators:				
*Primary energy from renewable raw materials	MJ	0.01	0.01	0.01
*Primary energy from resources	MJ	0.10	0.12	0.11
Water consumption	g	67	76	74

Πίνακας 12: Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις για όλο το χρόνο ζωής του σταθμού παραγωγής για λειτουργία Α/Γ στα 2.2 MW σε σταθμούς με μέση ταχύτητα ανέμου 6,5m/s και 7m/s. (οι μονάδες εμφανίζονται σε g, mg ή MJ ανά kWh)

5.2.5 Αποστάσεις μεταφορών από το χώρο παραγωγής έως το χώρο εγκατάστασης.

Το βασικό σενάριο αντιπροσωπεύει την γραμμή μεταφοράς των περισσότερων κατασκευαστών που δραστηριοποιούνται παγκοσμίως, να έχουν εγκαταστάσεις παραγωγής που λειτουργούν μέσα σε μια παγκόσμια περιοχή για την εξυπηρέτηση της συγκεκριμένης περιοχής, αντανακλώντας έτσι την αλυσίδα εφοδιασμού για μια τοποθεσία αιολικού σταθμού.

Αυτή η ανάλυση ευαισθησίας αξιολογεί τη σημασία των μεταφορών των επιμέρους μερών των ανεμογεννητριών από τις τοποθεσίες παραγωγής τους στο χώρο εγκατάστασης του αιολικού σταθμού. Τρία σενάρια θεωρούνται βάσει των αναμενόμενων πωλήσεων τέτοιου μεγέθους στροβίλων μέσα σε τρεις διαφορετικές περιοχές δηλαδή Βόρεια Αμερική, την Ασία (Κίνα) και Ευρώπη. Τόσο η Κίνα όσο και η Βόρεια Αμερική έχουν όλες τις εγκαταστάσεις παραγωγής στην περιοχή, ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, μερικά μέρη ανεμογεννητριών εξακολουθούν να αποστέλλονται από άλλες εγκαταστάσεις παραγωγής για να καλύψουν τη ζήτηση. Η περίπτωση της

Ελλάδας αντιπροσωπεύεται από τη περίπτωση της Ευρώπης και ακολουθεί το χειρότερο δυνατό σενάριο. Ο πίνακας 13 δείχνει τις αποστάσεις μεταφορών και τους τρόπους με τους οποίους γίνονται οι μεταφορές. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στη τρέχουσα AKZ θεωρείται η χρήση φορτηγού και κατανάλωση καυσίμου από πλοία μεταφοράς στη θάλασσα (και χρησιμοποίηση οχήματος) με στοιχεία ειδικών οχημάτων για τη μεταφορά των μερών του Πύργου, των φτερών και της νασέλλας, γεγονός που οδηγεί σε σημαντικά υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου ανά km για τη μεταφορά των μερών των ανεμογεννητριών σε σύγκριση με τα σύνολα δεδομένων του GaBi με την προεπιλογή των φορτίων που μεταφέρονται σε εμπορευματοκιβώτια μεταφοράς (container). Με βάση την ανάλυση ευαισθησίας, το βασικό σενάριο αντιπροσωπεύει μια συντηρητική παραδοχή.

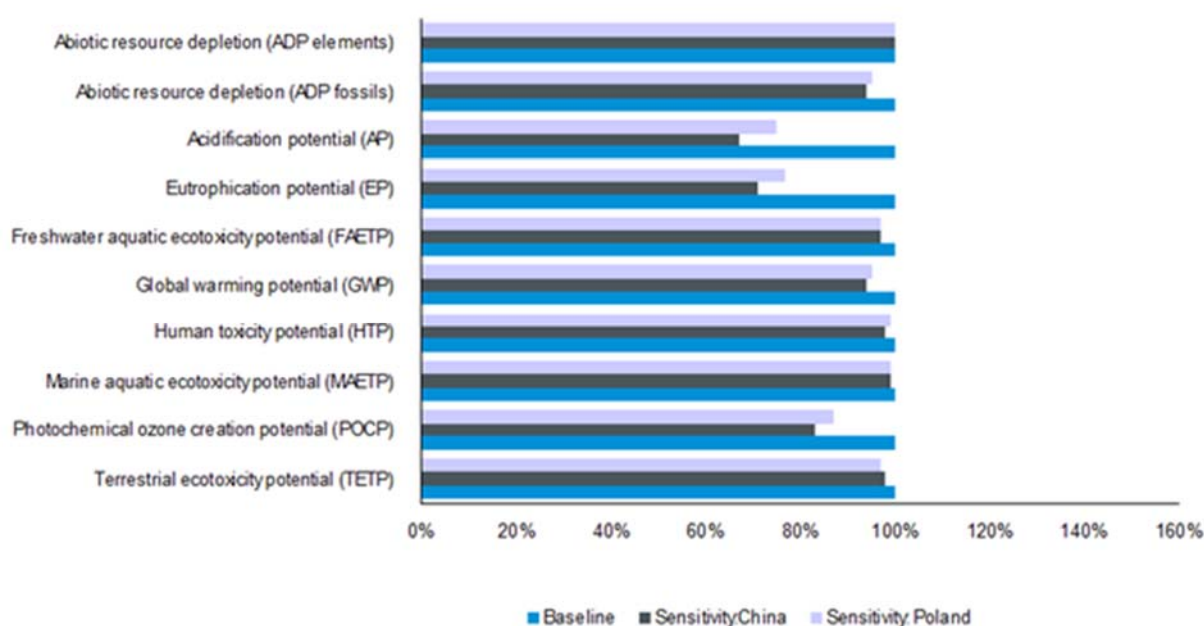
Component	Baseline:		Sensitivity:		Sensitivity:	
	North America		China		Europe	
	Truck (km)	Ship (km)	Truck (km)	Ship (km)	Truck (km)	Ship (km)
Nacelle	785	8575	780	0	570	2520
Hub	785	8575	780	0	570	2520
Blades	2200	1570	700	730	1413	2610
Tower	2065	2125	885	0	555	190
Foundation	50	0	50	0	50	0
Other site parts	600	0	600	0	600	0

Πίνακας 13: διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς για την ανάλυση ευαισθησίας των μερών των Α/Γ.

Το διάγραμμα 24 δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης των σεναρίων που επισημαίνουν ότι για την περίπτωση της Κίνας παρουσιάζεται μια μείωση στις περισσότερες κατηγορίες αποτελεσμάτων των επιπτώσεων κατά περίπου 1% έως 10% σε σύγκριση με τη γραμμή βάσης (βόρεια Αμερική), με εξαίρεση τις πιθανές επιπτώσεις από την οξίνιση, τον ευτροφισμό και τη φωτοχημική δημιουργία του όζοντος, η οποία μειώνεται σε εύρος από 16% έως 33%. Ομοίως, για το σενάριο της Ευρώπης (που επηρεάζει και την ελληνική επικράτεια) τα αποτελέσματα στις περισσότερες κατηγορίες των επιπτώσεων έχουν μειωθεί από περίπου 3% - 5%, με εξαίρεση τις πιθανές επιπτώσεις από την οξίνιση, τον ευτροφισμό και τη φωτοχημική δημιουργία του όζοντος τα οποία μειώνονται σε εύρος από -13% έως -24%. Οι μεγαλύτερες μεταβολές αυτές προέρχονται κυρίως από τις επιπτώσεις από τη μείωση των ναυτικών και λοιπών μεταφορικών επιχειρήσεων, οι οποίες οδηγούν σε σημαντική μείωση των εκπομπών

διοξειδίου του θείου και των οξειδίων του αζώτου στον αέρα, από την καύση των καυσίμων.

Κατά την αξιολόγηση του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη μόνο, το βασικό σενάριο των μεταφορών (καλύπτοντας όλα τα στάδια μεταφοράς στο πλαίσιο του μοντέλου της AKZ) συνεισφέρει περίπου 12% των επιπτώσεων του κύκλου ζωής για την κατηγορία αυτή, ενώ σε αυτή την ανάλυση ευαισθησίας το σενάριο της Κίνας συνεισφέρει περίπου το 7% και το σενάριο της Ευρώπης περίπου το 8% των συνολικών επιπτώσεων της παγκόσμιας υπερθέρμανσης του πλανήτη.



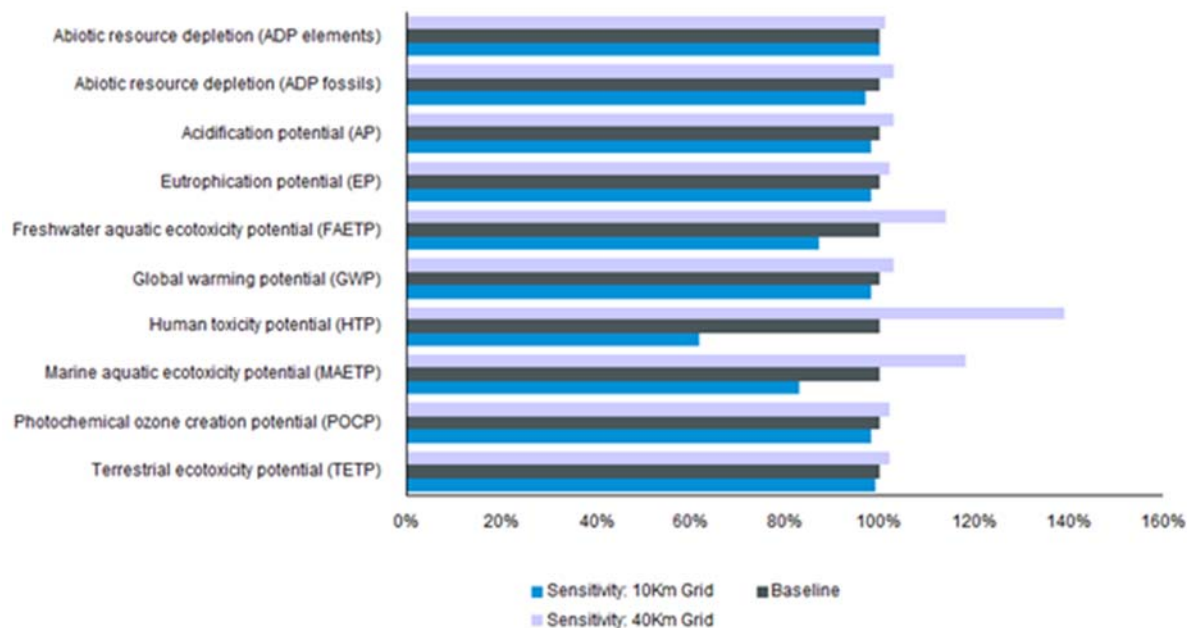
Διάγραμμα 24: Ανάλυση ευαισθησίας για διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς για τον κύκλο ζωής του αιολικού σταθμού

5.2.6 Απόσταση του χώρου ανέγερσης του αιολικού σταθμού από το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η απόσταση του αιολικού σταθμού από το υπάρχον δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια άλλη μεταβλητή που αλλάζει ανάλογα με τη θέση της εγκατάστασης. Το βασικό σενάριο για την παρούσα μελέτη υποθέτει ότι το αιολικό πάρκο απέχει 20 χλμ από το υπάρχον δίκτυο και περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές απώλειες 2,5% για το σύνολο των εγκαταστάσεων παραγωγής, ανύψωσης και μεταφοράς της παραγόμενης από τον αιολικό σταθμό ενέργειας.

Αυτή η ανάλυση ευαισθησίας αξιολογεί δύο εναλλακτικά σενάρια της μονάδας παραγωγής ενέργειας που βρίσκεται είτε στα 10 χλμ. είτε στα 40 χιλιόμετρα από το υπάρχον δίκτυο, που οδηγεί σε μια εκτιμώμενη ηλεκτρική απώλεια 2,0% και 3,5%, αντίστοιχα. Η ανάλυση επίσης υπολογίζει και τις διαφορές στα μεγέθη των ηλεκτρικών καλωδίων υψηλής τάσης που συνδέει το σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας με το υφιστάμενο δίκτυο.

Το διάγραμμα 25 δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης στα οποία φαίνεται ότι οι επιπτώσεις δεν αλλάζουν σημαντικά με τη μεταβαλλόμενη απόσταση από το δίκτυο. Ο διπλασιασμός της απόστασης από το δίκτυο, από τα 20 χιλιόμετρα σε 40 χλμ, αυξάνει όλους τους δείκτες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από 1% έως 18%, εκτός από την τοξικότητα για τον άνθρωπο (40%) και τη θαλάσσια υδατική οικοτοξικότητα (18%) που κυρίως επηρεάζονται από τη μεγαλύτερη χρήση αλουμινίου και πολυμερών στα καλώδια μέσης και υψηλής τάσης. Ενώ η κατά το ήμισυ μείωση της απόστασης του δικτύου, από 20 χλμ σε 10 χλμ, μειώνει όλους τους πιθανούς δείκτες επιπτώσεων στην περιοχή από 1% έως -17%, εκτός από την πιθανή τοξικότητα των για τον άνθρωπο.

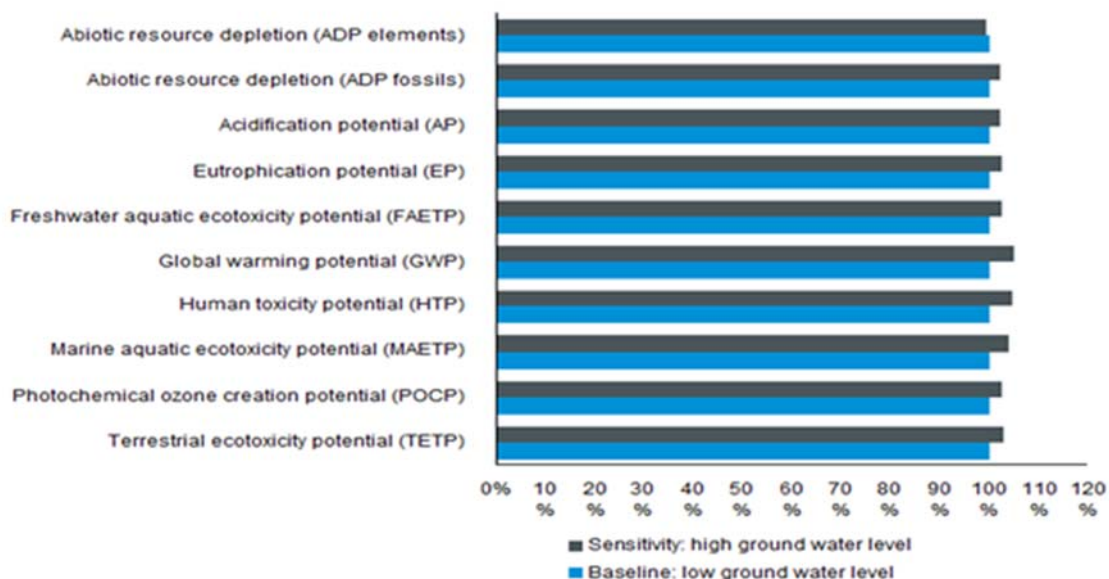


Διάγραμμα 25: Επιπτώσεις κύκλου ζωής για διπλασιασμό.(40km) και υποδιπλασιασμό (10km) της απόστασης του σταθμού από το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

5.2.7 Θεμελιώσεις υψηλής στάθμης υπογείων υδάτων

Η αρχική αξιολόγηση προϋποθέτει θεμελιώσεις χαμηλής στάθμης υπογείων υδάτων (LGWL) Τα θεμέλια για την έδραση της Α/Γ, τα οποία έχουν επιλεγεί ως η βασική περίπτωση, είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός τύπος θεμελίου της πλειοψηφίας των αιολικών εγκαταστάσεων παραγωγής. Αυτή η ευαισθησία αξιολογεί τη χρήση ενός θεμελίου υψηλής στάθμης υπογείων υδάτων (HGWL) που προϋποθέτει την ύπαρξη ενός επιπέδου υπόγειων νερών (μέγιστο) ίσο με το επίπεδο του εδάφους, η οποία απαιτεί αυξημένες ποσότητες σκυροδέματος και οπλισμού σιδηρού.

Το διάγραμμα 26 δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τη χρήση του θεμελίου υψηλής στάθμης υπογείων υδάτων που υποδεικνύει ότι αυτό δεν αλλάζει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυξάνοντας τις πιθανές επιπτώσεις μεταξύ 0,3% και 4% σε όλους τους δείκτες. Η αύξηση των πιθανών επιπτώσεων συσχετίζεται άμεσα με την αυξημένη χρήση του χάλυβα και του σκυροδέματος για την κατασκευή αυτού του τύπου θεμελίου. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η μείωση της εξάντλησης των στοιχείων αβιοτικών παραγόντων (ADP) (κατά περίπου 0,6%), για το θεμέλιο υψηλής στάθμης υπογείων υδάτων. Αυτό οφείλεται στις μικρές ασυνέπειες των ρών αποθεμάτων που προέχονται από τα σύνολα δεδομένων worldsteel (2014) που χρησιμοποιούνται στην AKZ και αφορούν την παραγωγή οπλισμού από χάλυβα (worldsteel, 2014) και στις επιβαρύνσεις λόγω σκραπ χάλυβα και των πιστώσεων από χάλυβα.



Διάγραμμα 26: Επιπτώσεις από τη χρήση θεμελίων υψηλής στάθμης υπογείων υδάτων σε σύγκριση με τα χαμηλής στάθμης για ολόκληρο τον κύκλο ζωής.

5.2.8 Πιθανό περιστατικό έκρηξης ηλεκτρικού διακόπτη ισχύος (περιέχει SF6)

Η αρχική εκτίμηση δεν περιλαμβάνει ύπαρξη περιστατικού έκρηξης ενός διακόπτη ισχύος κατά τη συνολική ανάλυση των αιολικών εγκαταστάσεων, δεδομένου ότι αυτά τα περιστατικά είναι σπάνια. Εάν παρουσιαστεί ένα τέτοιο περιστατικό, στη συνέχεια το μονωτικό αέριο εξαφθοριούχο θείο (SF₆), το οποίο είναι ένα πολύ ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου, απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Αυτή η ανάλυση ευαισθησίας υπολογίζει τη συμβολή της έκρηξης ενός διακόπτη και τις πιθανές επιπτώσεις στην παγκόσμια υπερθέρμανση του πλανήτη.

Με βάση εκτιμήσεις, έχει υποθεθεί για την παρούσα εκτίμηση ευαισθησίας ότι 1 στα 2000 διακόπτες ισχύος ενδέχεται να έχουν ένα συμβάν έκρηξης σε μια περίοδο λειτουργίας 20 ετών. Για ένα εργοστάσιο ηλεκτρικής ενέργειας που περιέχει είκοσι πέντε Α/Γ των 2.0 MW, αυτό θα οδηγήσει σε απελευθέρωση στο περιβάλλον περίπου 100 γραμμαρίων SF₆ κατά τη διάρκεια ζωής, η οποία ισοδυναμεί με κάτω από 0,01% αύξηση των πιθανών επιπτώσεων για τη συνολική υπερθέρμανση του πλανήτη.

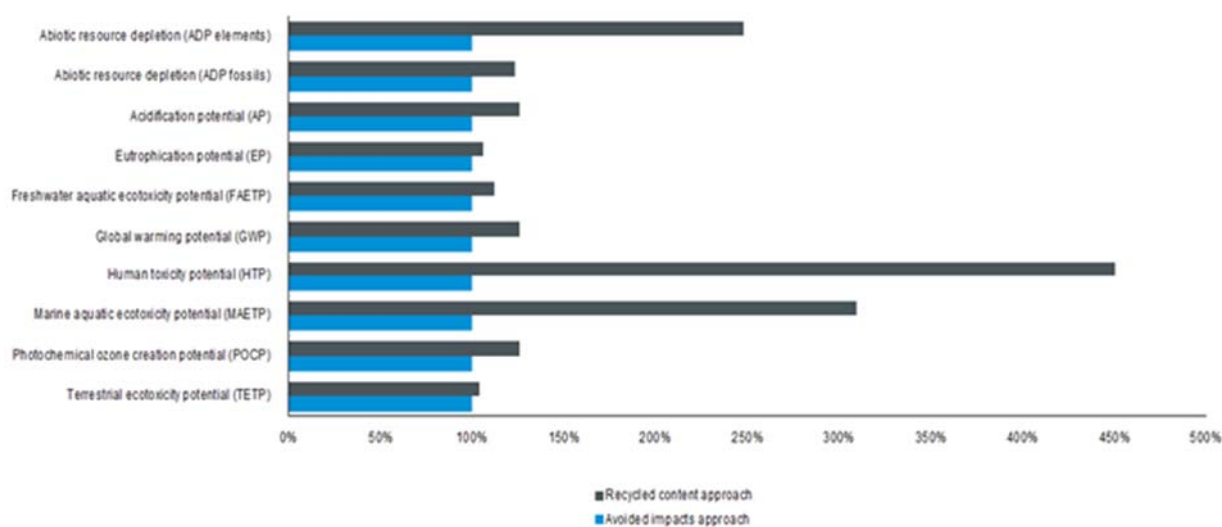
5.2.9 Πιθανές επιδράσεις από τη μέθοδο ανακύκλωσης

Η βασική αξιολόγηση χρησιμοποιεί μια προσέγγιση αποφυγής-επιπτώσεων δίνοντας πιστώσεις για την ανακύκλωση των μετάλλων στο τέλος του κύκλου ζωής, όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.2.3.4.. Μια εναλλακτική πρόταση είναι να χρησιμοποιηθεί μια προσέγγιση του ανακυκλωμένου περιεχομένου, σύμφωνα με την οποία λαμβάνονται περιβαλλοντικές πιστώσεις για τις εισερχόμενες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστεί το αιολικό πάρκο με βάση το πραγματικό περιεχόμενο των υλικών της ανεμογεννήτριας που είναι δυνατόν να ανακυκλωθεί. Με βάση την προσέγγιση αυτή καμία πίστωση δεν δίνεται στο τέλος του κύκλου ζωής, αλλά έχει ληφθεί μόνο από τις εισερχόμενες πρώτες ύλες.

Περίπου το 87% της μάζας της ανεμογεννήτριας είναι κατασκευασμένο από μεταλλικά στοιχεία (κυρίως σιδήρου και χάλυβα, καθώς και χαλκού και αλουμινίου). Ωστόσο, δεν είναι γνωστή η ακριβής ποσότητα του ανακυκλωμένου περιεχομένου όλων των συστατικών του στροβίλου. Ως εκ τούτου, μια εκτίμηση γίνεται με βάση τα πρότυπα

σύνολα δεδομένων (όπως worldsteel) που υπάρχουν στη βιομηχανία, τα οποία περιέχουν το μέσο παγκόσμιο ανακυκλωμένο περιεχόμενο για το σίδηρο και το χάλυβα. Επομένως, αυτή η ευαισθησία παρέχει μια εκτίμηση για τη χρήση της προσέγγισης ανακυκλωμένου περιεχομένου για τις περιβαλλοντικές πιστώσεις. Στη μοντελοποίηση της AKZ όσον αφορά αυτή την ανάλυση ευαισθησίας, οι πιστώσεις τέλους-ζωής καταργούνται από τα μοντέλα της AKZ, καθώς αφαιρούνται και οι επιβαρύνσεις που σχετίζονται με την εισαγωγή παλιοσίδερων σκραπ (για σίδηρο, χάλυβα, χαλκό και αλουμίνιο), τα οποία προστέθηκαν στα σύνολα δεδομένων κατά την προσέγγιση της αποφυγής-επιπτώσεων (βλέπε ενότητα 4.2.3.4).

Το διάγραμμα 27 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης που δείχνουν ότι όλες οι κατηγορίες των επιπτώσεων αυτών έχουν αυξηθεί μεταξύ 4% και 26% σε σύγκριση με τη γραμμή βάσης, με εξαίρεση τους δείκτες τοξικότητας για τη θαλάσσια υδατική οικοτοξικότητα (+ 200%) και την ανθρώπινη τοξικότητα (+350 %) και την εξάντληση στοιχείων αβιοτικών πόρων (150%). Το δυναμικό της θαλάσσιας υδατικής οικοτοξικότητας, αυξάνει κυρίως λόγω των μειωμένων πιστώσεων του τέλους-ζωής λόγω της ανακύκλωσης που αφορά την παραγωγή του χάλυβα και του αλουμινίου με κύριο οδηγό τις εκπομπές υδροφθορίου στον αέρα. Η αύξηση του δυναμικού ανθρώπινης τοξικότητας αφορά κυρίως τις μειωμένες πιστώσεις από την ανακύκλωση χάλυβα υψηλής ανάμιξης, χαλκού και αλουμινίου και οφείλεται στις εκπομπές των βαρέων μετάλλων (στον αέρα και το νερό). Η αύξηση της μείωσης των αβιοτικών πόρων (στοιχεία) οφείλεται στις μειωμένες πιστώσεις για χάλυβα, αλουμίνιο και χαλκό κατά το τέλος της ζωής. Το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη αυξάνεται κατά 25%.

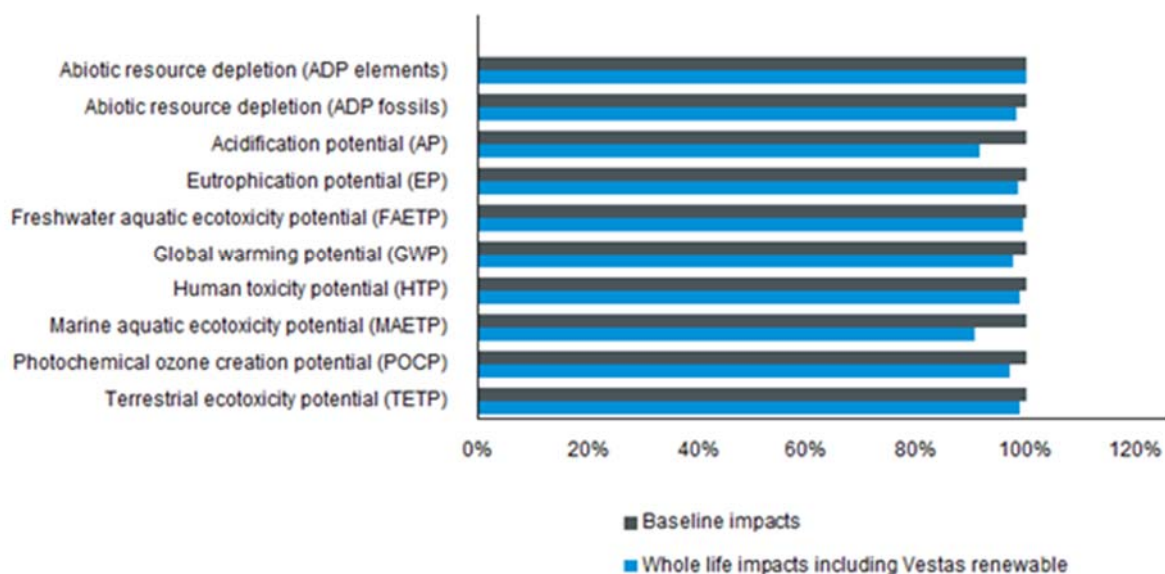


Διάγραμμα 27: επιπτώσεις κύκλου ζωής ακολουθώντας την προσέγγιση απόκτησης περιβαλλοντικών πιστώσεων λόγω ανακυκλωμένου περιεχομένου.

5.2.10 Πιθανές επιδράσεις από την κατανάλωση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας στο χρόνο ζωής.

Η αρχική αξιολόγηση αποκλείει την περίπτωση της πιστοποίησης WindMade (2015), σύμφωνα με την οποία κατασκευαστές Α/Γ επενδύουν και αγοράζουν πιστώσεις από ιδιόκτητα αιολικά πάρκα. Σε αυτή την ανάλυση ευαισθησίας, έχει συμπεριληφθεί αυτή η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (από ιδιόκτητες αιολικές εγκαταστάσεις), δίνοντας μια πίστωση για το μέσο μίγμα ενέργειας ανά MWh για τη συγκεκριμένη χώρα και την ενέργεια που παράγεται από την τοποθεσία της εγκατάστασης. Αυτή η ανάλυση ευαισθησίας εκτιμά την επιπλέον συνεισφορά αν αυτή η πίστωση περιλαμβάνονταν στα αποτελέσματα της AKZ της γραμμής βάσης.

Το διάγραμμα 28 δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης στην οποία δείχνει ότι έχει μία σχετικά μικρή επίδραση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μειώνοντας τις δυνητικές επιπτώσεις στο εύρος μεταξύ 0,0% έως 9% σε όλους τους δείκτες. Για το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, αυτή η πίστωση παρέχει μία συνολική μείωση κατά -0.16 γραμμάρια CO₂-e ανά παραγόμενη κιλοβατώρα, ισοδύναμη με περίπου 2,3% των συνολικών επιπτώσεων της παγκόσμιας υπερθέρμανσης του πλανήτη.



Διάγραμμα 28: Επιπτώσεις κύκλου ζωής όπου συμπεριλαμβάνεται η παραγωγή ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας από τον κατασκευαστή των Α/Γ.

5.3 Έλεγχοι ποιότητας των δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχουν ορισμένα στάδια του κύκλου ζωής όπου οι παραδοχές στη μελέτη και τα σύνολα δεδομένων απογραφής, θα κυριαρχήσουν στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του αιολικού σταθμού. Σε αυτούς τους σημαντικούς τομείς έχει επικεντρωθεί η προσοχή κατά τη διεξαγωγή των ελέγχων για την πληρότητα των δεδομένων, της συνέπειας και της αντιπροσωπευτικότητας αυτών. Οι παρακάτω σημαντικές περιοχές αναγνωρίζονται σε αυτή την ΑΚΖ:

- Η παραγωγή δομών δεδομένων κύκλου ζωής για τον σίδηρο, το χάλυβα, το αλουμίνιο, το σκυρόδεμα, τον χαλκό, τα σύνθετα υλικά και τα πολυμερή.
- Η μέθοδος των πιστώσεων τέλους-ζωής και τα σύνολα δεδομένων κύκλου ζωής που χρησιμοποιούνται για τις πιστώσεις αυτές.
- Ο χρόνος ζωής του αιολικού σταθμού.
- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού παραγωγής
- Τα σύνολα δεδομένων που αφορούν τις μεταφορές
- Η κάλυψη των παραγόντων της ανάλυσης των δεδομένων για τον κύκλο ζωής.

Το παρακάτω κείμενο παρέχει μια γενική περίληψη των αποτελεσμάτων για κάθε μία από τις παραπάνω περιοχές σε σχέση με τις αρχικές απαιτήσεις που είχαν τεθεί σαν στόχοι και σκοποί.

Σε γενικές γραμμές, όλα τα δεδομένα που προέρχονται από κατασκευαστές Α/Γ είναι αντιπροσωπευτικά του 2014, και περιλαμβάνονται δεδομένα από την παγκόσμια παραγωγή και όλες τις άλλες λειτουργίες των επιχειρήσεων (π.χ. πωλήσεις, συντήρηση, λειτουργία), που αποτελείται από πάνω από 100 τοποθεσίες εγκαταστάσεων. Αυτό αφορά τα δεδομένα εισροών για τα υλικά που χρησιμοποιούνται, την ενέργεια που απαιτείται και των καυσίμων που καταναλώνονται, καθώς και δεδομένα εκροών του υπό μελέτη συστήματος, όπως τα απόβλητα και τα ανακυκλωμένα υλικά. Άλλα στοιχεία σχετίζονται με την κατανομή των υλικών της ανεμογεννήτριας, από την οποία προκύπτει ολόκληρη η λίστα εξαρτημάτων η οποία αποτελείται από περίπου 25.000 συστατικά.

Κάθε στοιχείο αξιολογείται με βάση συγκεκριμένη κατηγορία υλικού (π.χ. από ποιότητες ανοξείδωτου χάλυβα), με βάση τις διαδικασίες παραγωγής και τη χώρα παραγωγής. Η χώρα παραγωγής χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του μείγματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της συγκεκριμένης χώρας για τα υλικά και την επεξεργασία, ανάλογα με την περίπτωση. Στην περίπτωση που κάποιο εξάρτημα της ανεμογεννήτριας δεν αποτελεί σχεδιασμό ή κατασκευή του κατασκευαστή (όπως το τμήμα του μετασχηματιστή ή το κιβώτιο ταχυτήτων), ο κατασκευαστής αυτών των ειδών έχει παράσχει μια ειδική σύνθεση του υλικού των συγκεκριμένων εξαρτημάτων, ή τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί από δημοσιευμένα τεχνικά δεδομένα.

Τα σύνολα δεδομένων που αφορούν την παραγωγή των υλικών, έχουν ληφθεί από διάφορες καθιερωμένες και αξιόπιστες δημοσιευμένες πηγές, όπως, worldsteel, Eurofer, πλαστικά Ευρώπης, καθώς και thinkstep (2014) σύνολα δεδομένων που δημιουργούνται. Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται, σε γενικές γραμμές, να είναι καλής ή υψηλής ποιότητας. Τα ενημερωμένα σύνολα δεδομένων της thinkstep γενικά φαίνεται να είναι σε ευθυγράμμιση με προηγούμενα αντίστοιχα σύνολα δεδομένων από το 2006, με εξαίρεση την παραγωγή προϊόντων χυτοσιδήρου. Δεν έχουν πραγματοποιηθεί έλεγχοι για ολόκληρη την αιολική μονάδα παραγωγής, παρόλο που ορισμένα τοπικοί έλεγχοι έχουν γίνει σχετικά με τα περιβαλλοντικής σημασίας σύνολα δεδομένων, όπως τα μέταλλα και το σκυρόδεμα. Συνολικά, αυτά είναι σε ευθυγράμμιση με τα προηγούμενα στοιχεία του 2006 από την άποψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την πλήρη μονάδα παραγωγής ενέργειας, με μια εκτιμώμενη διαφορά κάτω του 5%, σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων.

Η λογιστική παρακολούθηση των «ροών νερού» έχει αλλάξει, τόσο όσον αφορά τη μέθοδο όσο και για κάποια ονοματολογία στις τελευταίες βάσεις δεδομένων GaBi (thinkstep, 2014). Η κύρια αλλαγή είναι σε σχέση με την μέθοδο λογιστικής των ροών, σύμφωνα με την οποία ροές εισόδου και εξόδου-νερού για μια διαδικασία (π.χ. υδροηλεκτρικής παραγωγής ή παραγωγής μετάλλων) εμφανίζονται να αθροίζονται παρά να αφαιρούνται ώστε να προκύψει το νερό που καταναλώνεται. Έχουν γίνει προσαρμογές στις ροές νερού (βλέπε σημείο 1.2.4) προκειμένου να διατηρηθεί η λογική συνοχή με την προηγούμενη μέθοδο λογιστικής των εισροών εκροών. Παρόλα αυτά, πρέπει να γίνει δεκτό ότι σε γενικές γραμμές, η λογιστική απογραφή του κύκλου ζωής για τις ροές νερού βρίσκεται ακόμη σε σχετικά πρώιμο επίπεδο ωριμότητας, όσον

αφορά τη διαθεσιμότητα δεδομένων για την AKZ, καθώς επίσης και τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους σε διεθνές επίπεδο (όπως του πρόσφατα δημοσιευμένου προτύπου ISO 14046, υδατικό αποτύπωμα – Απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές), και ως εκ τούτου, η «ένδειξη χρήσης ύδατος» είναι ελλειμματική και θα υπόκειται σε βελτιώσεις με αναγνωρισμένες βέλτιστες πρακτικές.

Σε σχέση με την μεθοδολογία για την ανακύκλωση, η AKZ αυτή χρησιμοποιεί μια προσέγγιση «αποφυγής επιπτώσεων» για τις πιστώσεις, η οποία εμπεριέχει επίσης και επιβαρύνσεις εισροής σκράπ μετάλλων στην πρωτογενή παραγωγή των μετάλλων. Μεθοδολογικά αυτό είναι μια συνεπής προσέγγιση στην πίστωση και αποτελεί μία δίκαιη αντιπροσώπευση. Επιπλέον, σε συγκεκριμένα μέρη της Α/Γ και του αιολικού σταθμού εφαρμόζονται διαφορετικά ποσοστά ανακύκλωσης τα οποία εξαρτώνται από την ευκολία για την αποσυναρμολόγηση και την ανακύκλωση τους. Έχει πραγματοποιηθεί επίσης ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με την προσέγγιση των πιστώσεων για το ανακυκλωμένο περιεχόμενο.

Όπως συζητήθηκε προηγουμένως στην ενότητα 5.1, δύο σημαντικές παραδοχές για την AKZ αφορούν το χρόνο ζωής και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του αιολικού σταθμού. Αυτά έχουν, ενδεχομένως, μια πολύ σημαντική επίδραση σχετικά με τα συνολικά αποτελέσματα και την περιβαλλοντική απόδοση του στροβίλου (σε σχέση με 1 kWh της παραγωγής). Οι παραδοχές για τις δύο αυτές παραμέτρους θεωρούνται αντιπροσωπευτικές και στιβαρές.

Οι μεταφορές περιλαμβάνουν δεδομένα για την κατανάλωση ειδικών καυσίμων (και χρησιμοποίηση εξειδικευμένων οχημάτων) για τη μεταφορά των συγκεκριμένων μερών των ανεμογεννητριών (για πύργους, ατράκτους και φτερά). Αυτά βασίζονται σε στοιχεία μετρήσεων και συγκεκριμένες αποστάσεις με πραγματικές μεταφορές ανεμογεννητριών. Αυτά τα συγκεκριμένα σύνολα δεδομένων οδηγούν σε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμων σε σύγκριση με τα προεπιλεγμένα μοντέλα όπου τα φορτία μεταφέρονται σε εμπορευματοκιβώτια μεταφοράς τα οποία χρησιμοποιούνται σε πολλές AKZ, και ως εκ τούτου θεωρούνται αντιπροσωπευτικά δεδομένα (Ortegon et al., 2013).

Με βάση έναν έλεγχο πληρότητας των παράγοντες χαρακτηρισμού που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο CML (για τις κατηγορίες επιπτώσεων που αξιολογούνται

σε αυτή την ΑΚΖ), θεωρείται ότι όλες οι σχετικές ουσίες που έχουν σημασία για τον κύκλο ζωής του στροβίλου έχουν χαρακτηριστεί. Δεν υπάρχουν ασυνήθιστα ή ειδικά στοιχεία ή ουσίες που να έχουν εντοπιστεί κατά το στάδιο της συλλογής δεδομένων τα οποία να απαιτούν ειδικό λογισμό.

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η ευρωστία των σημαντικών δεδομένων, γενικά, θεωρείται ότι πρέπει να είναι ολοκληρωμένα, συνεπή και αντιπροσωπευτικά του συστήματος που εξετάζεται στην ΑΚΖ.

5.4 Συμπεράσματα και προτάσεις

Συνολικά, η μελέτη αντιπροσωπεύει μια στιβαρή και λεπτομερή κατηγοριοποίηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αιολικής μονάδας παραγωγής ενέργειας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 50MW αποτελούμενη από ανεμογεννήτριες των 2.0 MW. Η ΑΚΖ βασίζεται σε ακριβή γνώση του προϊόντος και την τρέχουσα βέλτιστη πρακτική στο πεδίο της αποτίμησης του κύκλου ζωής, τόσο στον τομέα της μεθοδολογίας και των συνόλων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς και τα εργαλεία της ΑΚΖ και του λογισμικού που εφαρμόζεται.

Η ανάλυση κύκλου ζωής θα μπορούσε περαιτέρω να βελτιωθεί εξετάζοντας τα ακόλουθα:

- Να διερευνηθούν βελτιώσεις σε λογιστικές μεθόδους υπολογισμού των ροών του νερού
- Να διερευνηθούν πιθανές χρήσεις άλλων μεθόδων αξιολόγησης των επιπτώσεων.
- Να γίνει περιοδική και συστηματική ενημέρωση των συνόλων δεδομένων και των βάσεων δεδομένων για την συνεπή συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των εξελίξεων των τύπων του εξοπλισμού.

Βιβλιογραφία

Andersen, N., Eriksson, O., Hillman, K., Wallhagen, M., 2016. Wind Turbines' End-of-Life: Quantification and Characterisation of Future Waste Materials on a National Level. *Energies Article*, 1-24

Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Brano, V. L., 2008. Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 200-217

Atherton, J., 2007. Declaration by the metals industry on recycling principles, *International Journal of LCA*, Vol 12 (1), Pg 59-60

Berger, M., Finkbeiner, M. (2010). "Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment." *Sustainability* 2, no. 4: 919-944.

CML, 2013. CML 4.2 developed by the Centre for Environmental Studies (CML). November 2009. University of Leiden, The Netherlands.

Crawford, R.H., 2009. Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 2653e2660.

Dale, M., 2013. A comparative analysis of energy costs of photovoltaic, solar thermal, and wind electricity generation technologies. *Appl. Sci.* 3, 325e337.

EC, 2010. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.

EC, 2012. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: Product Environmental Footprint (PEF) Guide. Ref. Ares (2012)873782- 17/07/2012. Ispra, Italy.

Envirodec, 2007. PRODUCT CATEGORY RULES (PCR) For preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for Electricity, Steam, and Hot and Cold Water Generation and Distribution. PCR CPC 17. Version 1.1, 2007-10-31.

Envirodec, 2011. PRODUCT CATEGORY RULES (PCR) For preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for Electricity, Steam, and Hot and Cold Water Generation and Distribution. PCR CPC 17. Version 1.1, 2007-10-31.

Eurofer Annual report 2014, available at:
<<http://www.eurofer.org/News%26Events/Publications.itpl>>

Evans, A., Strezov, V., Evans, T. J., 2009. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1082-1088

Fernando, A.T.D., 2010. Embodied Energy Analysis of New Zealand Power Generation Systems (Master of Engineering). University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

Fingersh, L., Hand, M. and Laxson, A., 2006. Wind turbine design cost and scaling model, Technical report, December 2006. National Renewable Energy Laboratory

Garrett, P., Rønne, K., 2012. Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *Int J Life Cycle Assess* (DOI) 10.1007/s11367-012-0445-4

Global Wind Energy Council (GWEC), Global Wind Reports 2010, 2012; 2013; 2014; 2015, 2016. [Online]. Available: 2011 <http://www.gwec.net/Publications/global-wind-report-2/> [Accessed: 03-Oct-2016].

Gonçalves da Silva, C., 2010. Renewable energies: choosing the best options. *Energy* 35 (8), 3179e3193.

Guezuraga, B., Zauner, R., Polz, W., 2012. Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy* 37, 37-44

Hughes, G., 2012. The Performance of Wind Farms in the United Kingdom and Denmark. Renewable Energy Foundation, London, UK.

IEC IIIa, wind class: IEC 61400:2015OC available at: <https://webstore.iec.ch/publication/22259>

IEC 61400:2015OC available at: <https://webstore.iec.ch/publication/22259>

Intergovernmental Panel on Climate Change and O. Edenhofer, Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Summary for Policymakers and Technical Summary, Intergovernmental Panel on Climate change, Geneva, 2012.

ISO, 2006. ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (Second edition, 2006-07-01). Geneva, Switzerland.

ISO, 2006a. ISO 14044. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (First edition, 2006-07-01). Geneva, Switzerland.

ISO, 2006b. ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations - Principles and procedures. Geneva, Switzerland.

ISO, 2013. ISO 14067:2013. Greenhouse gases -- Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication. Geneva,

Switzerland.

ISO, 2014. ISO 14046:2014. Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines. Geneva, Switzerland.

Ji, S., Chen, B., 2016. LCA-based Carbon Footprint of a Typical Wind Farm in China. *Energy Procedia* 88, 250 – 256

Kaldellis, J. K., Apostolou, D., 2017. Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart. *Renewable Energy* 108, 72-84

Kubiszewski, I., Cleveland, C.J., Endres, P.K., 2010. Meta-analysis of net energy return for wind power systems. *Renew. Energy* 35, 218e225

Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change, UN 1998

Larsen, K., 2009. Recycling wind turbine blades. Feature article, *Renewable Energy Focus*, January/February 2009, 70-73

Lenzen, M., Munksgaard, J., 2002. Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines review and applications. *Renew. Energy* 26, 339e362.

Martín, R.D., Trujillo, F. J. P., García, J. F. M., Río, C. M., Fernández, E. B., Mouhaffel, A. G., 2016. Evaluation of the environmental benefits of recycling materials in the moving parts of a wind turbine using the life cycle assessment (LCA). *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 11/Number 5, 2990-2995

Martinez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jimenez, E., Blanco, J., 2009. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy* 34, 667-673

Nagashima, S., Uchiyama, Y., Okajima, K., 2017. Hybrid input-output table method for socioeconomic and environmental assessment of a wind power generation system. *Applied Energy* 185, 1067–1075

Oikonomou, E. K., Kiliass, V., Goumas, A., Rigopoulos, A., Karakatsani, E., Damasiotis, M., Papastefanakis, D., Marini, N., 2009. Renewable energy sources (RES) projects and their barriers on a regional scale: The case study of wind parks in the Dodecanese islands, Greece. *Energy Policy*, 1-10

Ortegon, J., Nies, L. F., Sutherland, J. W., 2013. Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production* 39, 191-199

Paris Agreement to the UNFCCC, UN 2015

PE, 2011. Life Cycle Assessment of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant. PE NWE, Copenhagen, Denmark.
<http://www.vestas.com/en/about/sustainability#!available-reports>

PE, 2011a. Life Cycle Assessment of the Roaring 40s Waterloo Wind Farm for Roaring

40s Ltd. PE Australasia, July, 2011.

PE, 2013a. Life Cycle Assessment of the Musselroe Wind Farm for Hydro Tasmania. Version 7. PE Australasia, October 2013.

PE, 2014. Harmonization of LCA Methodologies for Metals: A whitepaper providing guidance for conducting LCAs for metals and metal products, Version 1.01. <https://www.icmm.com/document/6657>

Pehnt, M., 2006. Dynamic life assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy* 31, 55-71

Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., Rebitzer, G., 2004. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International* 30, 721-739

Plastics Europe, available at: < <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>>

Raadal, H.L., Vold, B.I., Myhr, A., Nygaard, T.A., 2014. GHG emissions and energy performance of offshore wind power, *Renew. Energy* 66 (Jun. 2014) 314e324.

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W. P., Suh, S., Weidema, B. P., Pennington, D. W., 2004. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International* 30, 701-720

Rule, B.M., Worth, Z.J., Boyle, C.A., 2009. Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand. *Environ. Sci. Technol.* 43, 6406e6413.

Savino, M. M., Manzini, R., Selva, V. D., Accorsi, R., 2017. A new model for environmental and economic evaluation of renewable energy systems: The case of wind turbines. *Applied Energy* 189, 739–752

Sherwani, A. F., Usmani, J. A., Varun, 2010. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 540-544

Simons, P. J., Cheung, W. M., 2016. Development of a quantitative analysis system for greener and economically sustainable wind farms. *Journal of Cleaner Production* 133, 886-898

Smoucha, E. A., Fitzpatrick, K., Buckingham, S., Knox, O. G. G., 2016. Life cycle analysis of the embodied carbon emissions from 14 wind turbines with rated powers between 50 Kw and 3.4 Mw. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 10.4172/2090-4541.1000211

The Writing center, 2018. Review of literature available at: <http://writing.wisc.edu/Handbook/ReviewofLiterature.html>

Thinkstep, 2014. thinkstep - GaBi 7 dataset documentation for the software-system and databases, LBP, University of Stuttgart and PE INTERNATIONAL GmbH, Germany.

Tremeac, B., Meunier, F., 2009. Life cycle analysis of 4,5 Mw and 250 W wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2104-2110

UNEP, 2007. Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer 2007: A success in the making. The United Nations Ozone Secretariat, United Nations Environment Programme.
http://ozone.unep.org/Publications/MP_A_Success_in_the_making-E.pdf

UNEP, 2011. Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases: A basis for greener processes and products. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, United Nations Environment Programme. www.unep.org/pdf/Global-Guidance-Principles-forLCA.pdf

Varun, I. K. Bhat, R. Prakash, 2009. LCA of renewable energy for electricity generation systems – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 1067-1073

Vestas, 2006. Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines. Vestas Wind Systems A/S, Alsvej 21, 8900 Randers, Denmark.
<http://www.vestas.com/en/about/sustainability#!availablereports>

Vestas, 2011a. Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V80-2.0MW Gridstreamer Wind Plant- December 2011. Vestas Wind Systems A/S, Alsvej 21, 8900 Randers, Denmark. <http://www.vestas.com/en/about/sustainability#!available-reports>

Vestas, 2011b Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V90-2.0MW Gridstreamer Wind Plant- December 2011. Vestas Wind Systems A/S, Alsvej 21, 8900 Randers, Denmark. <http://www.vestas.com/en/about/sustainability#!available-reports>.

Vestas, 2011c Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V100-1.8MW Gridstreamer Wind Plant- December 2011. Vestas Wind Systems A/S, Alsvej 21, 8900 Randers, Denmark. <http://www.vestas.com/en/about/sustainability#!available-reports>.

Vestas, 2012

Vestas (2012). Assessment of turbine wake losses from Wind and Site data (covering over 16000 wind turbines). Denmark. Unpublished report.

Vestas, 2013

Vestas (2013). Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V90-3.0 MW Wind Plant – 30 October 2013, Version 1.1. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager

44, Aarhus N, 8200, Denmark.
<http://www.vestas.com/en/about/sustainability#!availablereports>

Vestas, 2013a. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V100-2.6 MW Wind Plant - 31 October 2013, Version 1.1. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 44, Aarhus N, 8200, Denmark.
<http://www.vestas.com/en/about/sustainability#!availablereports>

Vestas, 2014a. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V105-3.3 MW Wind Plant – 6 June 2014, Version 1.0. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 42, Aarhus N, 8200, Denmark.

Vestas, 2014b. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V112-3.3 MW Wind Plant – 6 June 2014, Version 1.0. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 42, Aarhus N, 8200, Denmark.

Vestas, 2014c. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V117-3.3 MW Wind Plant – 6 June 2014, Version 1.0. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 42, Aarhus N, 8200, Denmark.

Vestas, 2014d. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V126-3.3 MW Wind Plant – 6 June 2014, Version 1.0. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 42, Aarhus N, 8200, Denmark.

Vestas, 2015. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V112-3.3 MW Wind Plant – 17 August 2015, Version 2.0. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 42, Aarhus N, 8200, Denmark.

Vestas, 2015a. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V110-2.0 MW Wind Plant – 18th December 2015, Version 1.0. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 42, Aarhus N, 8200, Denmark.

Vestas and Averhoff, 2012. Nacelle recycling and rating of the recyclability. December 2011 - April 2012. Denmark. Unpublished report.

Walmsley, T. G., Walmsley, M. R.W, Atkins, M. J., 2017. Energy Return on energy and carbon investment of wind energy farms: A case study of New Zealand. *Journal of Cleaner Production* 167, 885-895

Weisser, D., A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies, *Energy* 32 (9) (Sep. 2007) 1543e1559.

WindMade 2015. WindMade, Certificate No. 0103-0031
http://vestas.com/en/about/discover_wind#!wind-made

Worldsteel association, statistics. available at: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics.html>

WWEA, 2015 More than 50 GW Additional Wind Power Capacity, *Wind Power*

Worldwide Close to 370 GW. <http://www.wwindea.org/new-record-in-worldwide-windinstallations/>. Accessed July 2015

WWEA, 2017. available at :< <http://www.wwindea.org/information-2/information/>>

Yang, J., Chen, B., 2016. Energy-based sustainability evaluation of wind power generation systems. *Applied Energy* 177, 239–246

2020 climate and energy package, EU 2007

2030 climate and energy framework, EU 2014

2050 low-carbon economy, EU 2017

ΑΔΜΗΕ, 2017. available at: <http://www.admie.gr/to-systima-metaforas/dedomena-stoicheia-systimatos/perigrafi-systimatos-metaforas/>

Βιβλιογραφική ανασκόπηση, 2018. Available at <Wikipedia>

Review of literature, 2018. Available at

http://utopia.duth.gr/~xsakonid/index_htm_files/%CE%A3%CF%85%CE%B3%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AE_%CE%B2%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82_%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CF%83%CE%BA%CF%8C%CF%80%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82.pdf

Διεθνής ένωση Χαλκού, copper alliance, available at: <http://copperalliance.org/trends-and-innovations/data-set/>

Τσουκαλάς Β.Κ., 6 Μαΐου 2009. Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Περιβάλλον & Ανάπτυξη, Διατμηματικό μάθημα 8 Εξαμήνου, Τμήμα πολιτικών μηχανικών, ΕΜΠ (παρουσίαση)