



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Ανάλυση Κύκλου Ζωής Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου

Διπλωματική Εργασία

Αγνή Αργύρη

Επιβλέπων

Γεώργιος Αραμπατζής, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά, Ιούλιος 2022



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Ανάλυση Κύκλου Ζωής Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου

Διπλωματική Εργασία

Αγνή Αργύρη

Εγκρίθηκε από την εξεταστική επιτροπή:

Γεώργιος Αραμπατζής

Επίκουρος Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Σπυρίδων Παπαευθυμίου

Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Δημήτρης Ιψάκης

Επίκουρος Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Χανιά, Ιούλιος 2022

Αφιερώνεται σε όλους τους ανθρώπους μου.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που συνέδραμαν στην προσπάθειά μου.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνό μου Δόκτωρ Βίκτωρ Κουλουμπή, για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε από το πρώτο λεπτό της συνεργασίας μας μέχρι το τελευταίο. Είμαι τυχερή που μπόρεσα να συνεργαστώ με έναν τόσο καταρτισμένο και καλό άνθρωπο.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Αραμπατζή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο θέμα της εργασίας μου, καθώς και του καθηγητές κ. Σπυρίδων Παπαευθυμίου και κ. Δημήτριο Ιψάκη που αποτέλεσαν τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στους γονείς μου. Χάρη στη βοήθεια και την στήριξή τους μπόρεσα να ολοκληρώσω με επιτυχία τις σπουδές μου και να ακολουθήσω τα όνειρά μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με στήριξαν σε κάθε στιγμή, σε όλες τις αποφάσεις μου και έκαναν αυτά τα χρόνια τα ομορφότερα.

Περίληψη

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να αποτελέσουν λύση στο πρόβλημα παραγωγής ενέργειας με πιο φιλικό περιβαλλοντικό τρόπο κυρίως λόγω των χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η αιολική ενέργεια, και πιο συγκεκριμένα η αξιοποίηση του ανέμου στις θαλάσσιες περιοχές εξελίσσεται ραγδαία την τελευταία δεκαετία σε παγκόσμιο επίπεδο. Η Ελλάδα είναι σε φάση επανεκκίνησης των διαδικασιών για την κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων (ΥΑΠ). Όπως και με τα χερσαία αιολικά πάρκα έτσι και με τα ΥΑΠ μπορεί να υπάρξουν ανησυχίες σχετικά με το κατά πόσο η δημιουργία τους μπορεί να έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανεξάρτητα από τις δυνητικά θετικές επιπτώσεις που έχουν στην μετρίαση της κλιματικής αλλαγής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση κύκλου ζωής (ΑΚΖ) των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Η ΑΚΖ είναι μια τυποποιημένη μέθοδος η οποία με συστηματικό τρόπο αναλύει και καταγράφει τις εισροές (υλικά και ενέργεια) και εκροές (απόβλητα και εκπομπές) που λαμβάνουν χώρα σε όλη την διάρκεια ζωής ενός προϊόντος από την εξόρυξη των πρώτων υλών, την κατασκευή/παραγωγή, χρήση και απόρριψη του και το οποίο μπορεί να εκτιμήσει τις δυνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες.

Η περίπτωση προς μελέτη αφορά σε ΥΑΠ που προγραμματίζεται να κατασκευαστεί κοντά σε νησί του Ελλαδικού χώρου στο οποίο υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες ανέμου που σχετίζονται με την απόδοση του ΥΑΠ και σύμφωνα με περιορισμούς σχετικά με την ναυσιπλοΐα, ύπαρξη προστατευόμενων περιοχών κτλ. Η ΑΚΖ θα εξετάσει διαφορετικά σενάρια για ΥΑΠ όπως διαμορφώνονται με βάση χαρακτηριστικά του έργου όπως διαφορετικά βάθη, διαφορετικοί τύποι θεμελίωσης. Στο πλαίσιο της εργασίας θα εκτιμηθούν το ανθρακικό αποτύπωμα, καθώς και άλλες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιπλέον, θα αναγνωριστούν οι φάσεις και τα μέρη του κύκλου ζωής που συνεισφέρουν περισσότερο στις επιπτώσεις αυτές, καθώς και οι επιλογές που τις μειώνουν.

ABSTRACT

Renewable energy sources can solve the problem of energy production in a more environmentally friendly way, mainly due to the low greenhouse gas emissions. Wind energy, and specifically the use of wind in the offshore areas, has been developing rapidly over the last decade on a global scale. Greece is restarting the procedures for the construction of offshore wind farms. As with onshore wind farms, there may be concerns about whether their creation could have a negative environmental impact regardless of the potentially positive impact they have on mitigating climate change.

The purpose of this thesis is the life cycle assessment (LCA) of offshore wind farms. LCA is a standardized method that systematically analyzes and records the inputs (materials and energy) and outputs (waste and emissions) that occur throughout the life of a product from the extraction of raw materials, construction / production, use and disposal and which can assess the potential environmental consequences.

The case study refers to Offshore Wind Farm planned to be built near a Greek island, where favorable conditions related to the performance of the farm exist and in accordance with the restrictions for navigation, protected areas etc. The LCA will consider different scenarios for the Offshore Wind Farms, as they are formed based on project characteristics such as different depths, different types of foundation. The thesis will assess the carbon footprint, as well as other categories of environmental impact. In addition, the phases and parts of the life cycle that contribute most to these effects will be identified, as well as the options that reduce them.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
ABSTRACT	7
Πίνακας Περιεχομένων	8
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	12
1.2. Αιολική Ενέργεια	13
Κεφάλαιο 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	16
Κεφάλαιο 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	18
3.1. Ορισμός και στάδια.....	18
3.2. ΑΚΖ κατά ISO	18
3.3. Λογισμικό GaBi.....	19
3.4. Σκοπός και πλαίσιο της ΑΚΖ για τα ΥΑΠ	20
Κεφάλαιο 4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	21
4.1. Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα.....	21
4.2. Ανεμογεννήτριες	22
4.2.1. Είδη Ανεμογεννητριών.....	22
4.2.2. Βασικά Μέρη.....	22
4.3. Συστήματα Θεμελίωσης.....	23
4.3.1. Βαρυτικός Τύπος Θεμελίωσης (Gravity Base)	23
4.3.2. Διάταξη Μονής Στήλης (Monopile)	24
4.3.3. Τρίποδες (Tripod).....	24
4.3.4. Τετράποδο Δικτύωμα (Jacket)	24
4.3.5. Πλωτά Συστήματα (Floating Systems)	25
4.4. Πλεονεκτήματα Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων	27
4.5. Επιλογή θέσης πρώτου ΥΑΠ	27
4.6. Πληροφορίες για ΥΑΠ Λήμνου.....	28

4.7.	Επιλογή θέσης δεύτερου ΥΑΠ.....	28
4.8.	Πληροφορίες για ΥΑΠ Μυκόνου	29
4.9.	Ομοιότητες και διαφορές	29
4.10.	Βαθμός απόδοσης.....	30
4.11.	Ανεμογεννήτρια NREL 5MW	31
4.11.1.	Πύργος	34
4.11.2.	Ρότορας.....	34
4.11.3.	Κέλυφος	34
4.11.4.	Κινούμενα Μέρη	35
4.11.5.	Παρουσίαση GaBi	35
4.12.	Καλώδια	36
4.12.1.	Εσωτερικά Καλώδια.....	36
4.12.2.	Εξωτερικά Καλώδια	37
4.13.	Θαλάσσιος Υποσταθμός	38
4.14.	Βάσεις Θεμελίωσης.....	39
4.14.1.	ΥΑΠ Λήμνου – Monopile.....	39
4.14.2.	ΥΑΠ Μυκόνου – Floating.....	40
4.15.	Μεταφορά.....	41
4.16.	Εγκατάσταση	43
4.17.	Λειτουργία & Συντήρηση	43
4.18.	End of Life.....	43
	Κεφάλαιο 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	49
5.1.	Εισαγωγή.....	49
5.2.	ΥΑΠ Λήμνου	50
5.3.	ΥΑΠ Μυκόνου.....	58
5.4.	Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	65
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	67
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1, Ηλεκτρική παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ	13
Εικόνα 2, Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ανέμου	14
Εικόνα 3, Παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας με τη χρήση ανέμου	14
Εικόνα 4, Δομή Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ISO 14044).....	18
Εικόνα 5, Επιφάνεια εργασίας GaBi.....	20
Εικόνα 6, Εγκαταστάσεις υπεράκτιου αιολικού πάρκου	21
Εικόνα 7, Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας	23
Εικόνα 8, Τύποι θεμελίωσης Α/Γ στη θάλασσα	25
Εικόνα 9, Τύποι πλωτών συστημάτων	26
Εικόνα 10, Πλάνο δημιουργίας Α/Γ	35
Εικόνα 11, Εισροές ρότορα	36

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1, LCI ανεμογεννήτριας	31
Πίνακας 2, LCI εσωτερικών καλωδίων	37
Πίνακας 3, LCI εξωτερικών καλωδίων Λήμνου	37
Πίνακας 4, LCI εξωτερικών καλωδίων Μυκόνου	38
Πίνακας 5, LCI θαλάσσιου υποσταθμού	39
Πίνακας 6, LCI βάσης θεμελίωσης monopile	40
Πίνακας 7, LCI βάσης θεμελίωσης Spar Buoy	41
Πίνακας 8, LCI στάδιο μεταφοράς Λήμνου	41
Πίνακας 9, LCI στάδιο μεταφοράς Μυκόνου	42
Πίνακας 10, LCI στάδιο λειτουργίας & συντήρησης	43
Πίνακας 11, LCI υλικών προς διαχείριση	44
Πίνακας 12, LCI για χώρους υγειονομικού ενδιαφέροντος.....	45
Πίνακας 13, LCI για αποτέφρωση	45
Πίνακας 14, LCI για ανακύκλωση	46
Πίνακας 15, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις για ΥΑΠ Λήμνου	50
Πίνακας 16, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σταδίου παραγωγής, Λήμνος	54
Πίνακας 17, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε υλικού, Λήμνος	56
Πίνακας 18, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις για ΥΑΠ Μυκόνου	58
Πίνακας 19, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σταδίου παραγωγής, Μύκονος	62
Πίνακας 20, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε υλικού, Μύκονος	64

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

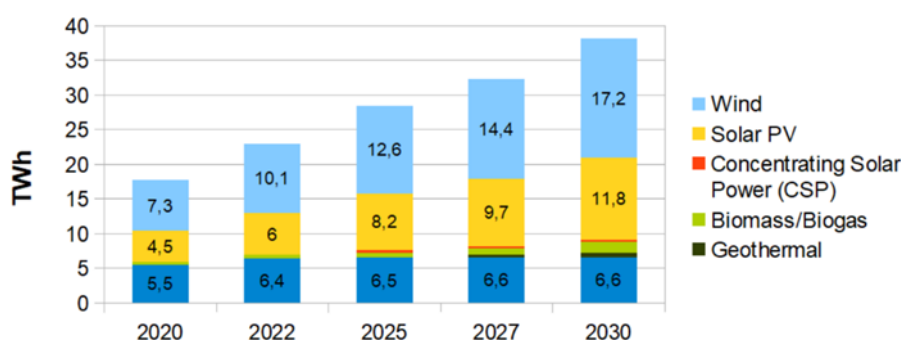
Σήμερα, ένα από τα βασικότερα προβλήματα που καλείται η ανθρωπότητα να αντιμετωπίσει είναι η κλιματική αλλαγή. Με το πέρασμα των χρόνων, οι ανθρώπινες δραστηριότητες επιβαρύνουν ολοένα και περισσότερο το περιβάλλον, μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων, της κοπής δασών και της εκτροφής ζώων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, εκλύονται τεράστιες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Το 97% των επιστημών που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, συμφωνούν στο ότι η τάση αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη από τον τελευταίο αιώνα μέχρι σήμερα οφείλεται σε ανθρώπινες δραστηριότητες. (*Scientific Consensus*, 2022) Εκτός από τους ειδικούς, έρευνα που διεξήχθη από την Ευρωπαϊκή επιτροπή, έδειξε ότι το 93% των ερωτηθέντων θεωρεί ότι η κλιματική αλλαγή είναι ένα σοβαρό πρόβλημα με το 78% να θεωρεί ότι είναι πολύ σοβαρό. Αυτή η έρευνα του Eurobarometer δείχνει ότι οι Ευρωπαίοι πολίτες πιστεύουν ότι η κλιματική αλλαγή είναι το μόνο τόσο σοβαρό πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα. (*Climate Change - Ιουλίου 2021 - - Eurobarometer Survey*, n.d.)

Με βάση τα παραπάνω, ένας από τους στόχους των Ηνωμένων Εθνών είναι ο περιορισμός της υπερθέρμανσης του πλανήτη στους 1,5 °C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα, 13,8 °C μέση θερμοκρασία, και επίτευξη των καθαρών μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως έως το 2050. Συγκεκριμένα, 125 από τις 154 ανεπτυγμένες χώρες δίνουν προτεραιότητα στη διαμόρφωση και εφαρμογή εθνικών σχεδίων προσαρμογής για να ενισχύσουν τις προσπάθειές τους να προσαρμοστούν στους στόχους για τον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτά περιλαμβάνουν την κατασκευή αντιπλημμυρικών συστημάτων, τη δημιουργία συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για κυκλώνες, τη μετάβαση σε καλλιέργειες ανθεκτικές στην ξηρασία, την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. (2020 VLR Stuttgart Eng.Pdf, n.d.)

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν την λύση στο πρόβλημα της παραγωγής ενέργειας, όσον αφορά την αναμενόμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και τον περιορισμό των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Οι Α.Π.Ε. είναι εναλλακτικές πηγές ενέργειας, οι οποίες επειδή δεν στηρίζονται σε καύσιμα που μπορεί να εξαντληθούν και τα οποία συνοδεύονται από εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μπορούν να θεωρηθούν φιλικές προς το περιβάλλον και να χρησιμοποιηθούν αντί των ορυκτών καυσίμων. Η ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές προέρχεται από τον ήλιο, τον άνεμο, τη γεωθερμία, το νερό, τις παλίρροιες, τα κύματα και τη βιομάζα. Κύριος στόχος της χρήσης τους είναι η σταδιακή μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων, για τον περιορισμό έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου και την περεταίρω οικολογική καταστροφή. Οι Α.Π.Ε. είχαν αναπτυχθεί πριν ακόμα τη δεύτερη βιομηχανική επανάσταση σε πρωταρχικές μορφές, όπως η

αξιοποίηση της δύναμης του νερού. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με την ανακάλυψη μεγάλων ποσοτήτων άνθρακα, πετρελαίου και μετέπειτα φυσικού αερίου, παραμερίστηκαν. Ωστόσο, η ανάδειξη των περιβαλλοντικών προβλημάτων τις έφερε ξανά στο φως τις τελευταίες δεκαετίες και μέχρι σήμερα έχουν αλματώδη εξέλιξη.

Ολοένα και περισσότερες χώρες επιζητούν τρόπους και μέσα ανάπτυξης του συγκεκριμένου τομέα. Συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση είχε θέσει ως στόχο μέχρι το 2020 να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, κάτι που επετεύχθη χάρη στην εξέλιξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ο επόμενος στόχος αφορά το 2030 και την μείωση κατά 55% των καθαρών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Στην Ευρώπη, κυρίως στη Βόρεια, οι επενδύσεις στον τομέα τον Α.Π.Ε. καλπάζουν, ενώ στην Ελλάδα η ανάπτυξη αν και σταδιακή ανθίζει όλο και περισσότερο.

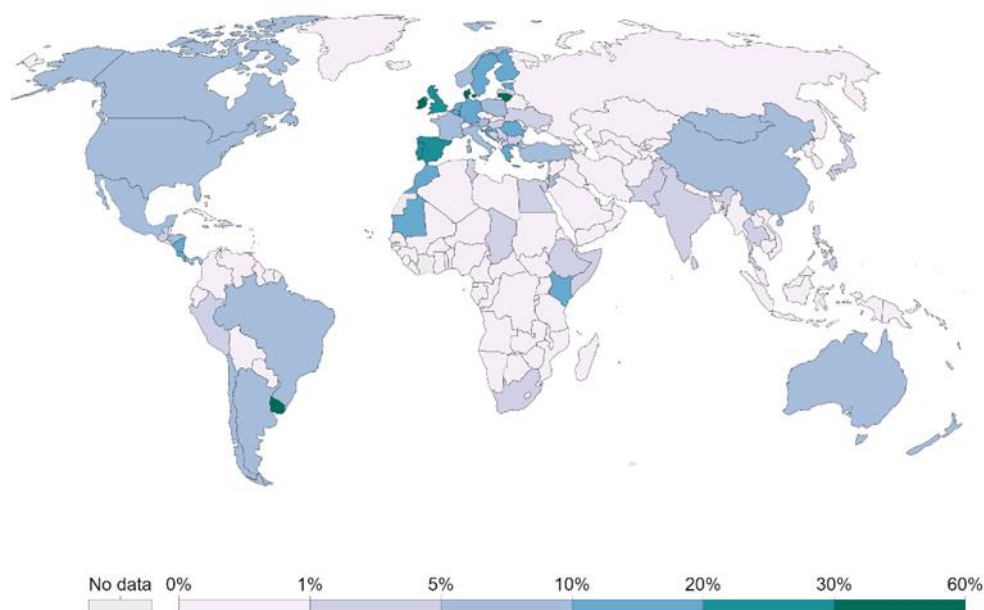


Εικόνα 1, Ηλεκτρική παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ, (Hellenic Republic Ministry, 2019)

1.2. Αιολική Ενέργεια

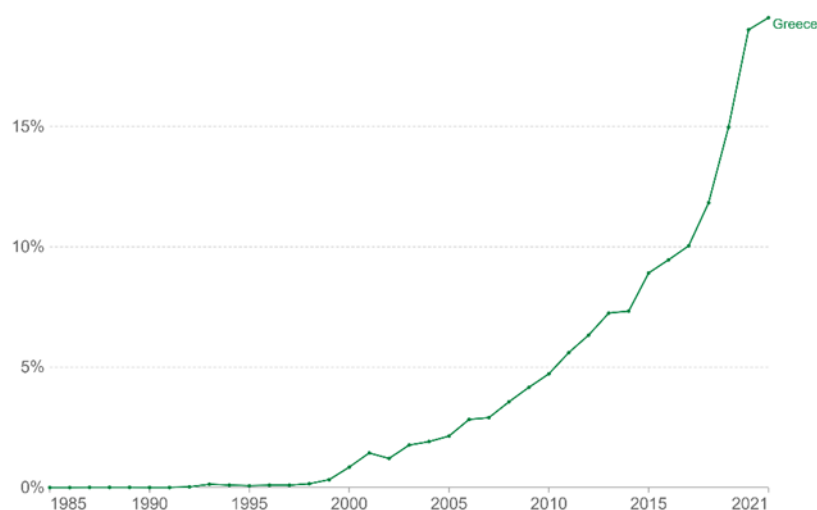
Η αιολική ενέργεια είναι μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που βασίζεται στην εκμετάλλευση του ανέμου. Το όνομά της έχει παρθεί από την ελληνική μυθολογία και τον Θεό του ανέμου, Αίοιο. Η πρώτη φορά που εφαρμόστηκε ήταν ως κινητήριος δύναμη στα πλοία με πανιά, στα ιστιοφόρα. Στις μέρες μας, αποτελεί μία από τις πιο οικονομικά συμφέρουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εξελίσσεται ταχύτατα.

Αναλυτικότερα, σε παγκόσμιο επίπεδο, η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ανέμου ανέρχεται στα 733 GW το 2020. Πρώτη σε συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού με τη χρήση του ανέμου είναι η Δανία με 48,58%, ακολουθεί η Ουρουγουάη με 40,31%, ενώ η Ελλάδα βρίσκεται σε ικανοποιητική θέση με 19,53%. Στον ευρωπαϊκό χώρο μετά τη Δανία, σειρά έχει το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ολλανδία. (Our World in data, 2021)



Εικόνα 2, Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ανέμου, 2021, (Our World in data, 2021)

Ιστορικά, η εκμετάλλευση του ανέμου έγινε για πρώτη φορά μέσω της χρήσης των ανεμόμυλων, κυρίως για την άλεση σιτηρών. Ο πρώτος ανεμόμυλος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε στο Cleveland του Οχάιο το 1888 και είχε ισχύ 12 KW (“Ανεμόμυλος,” 2022). Στην Ελλάδα, η πρώτη επένδυση στην αιολική ενέργεια έγινε το 1990 στην Κύθνο, με την εγκατάσταση του πρώτου αιολικού πάρκου. Η Ελλάδα είναι μία χώρα με υψηλό αιολικό δυναμικό με απόδοση πάνω από 8 m/s. Έτσι, από το 2005 ξεκίνησε συστηματικά η επένδυση στα οφέλη του ανέμου, ενώ από το 2015 μέχρι το 2021 υπήρξε κατακόρυφη αύξηση. Σε τελευταία μελέτη το 2021, η συνολική χωρητικότητα στο ελληνικό δίκτυο ανερχόταν στα 4.450 MW, με στόχο τα 10GW μέχρι το 2030. (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017)



Εικόνα 3, Παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας με τη χρήση ανέμου, Ελλάδα 1985-2021, (Hellenic Republic Ministry, 2019)

Η αιολική ενέργεια έχει προτερήματα σε σχέση με τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας, αλλά παρουσιάζει και κάποια προβλήματα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημά της είναι ότι θεωρείται μία καθαρή μορφή ενέργειας, δηλαδή συγκριτικά με τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας, μολύνει πολύ λιγότερο την ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, τα επίπεδα μόλυνσης της ατμόσφαιρας λόγω της έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή ενέργειας είναι πολύ χαμηλότερα με τη χρήση ανεμογεννητριών συγκριτικά με την καύση λιγνίτη. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να στηθούν σε διάφορες περιοχές, βουνά, θάλασσες, αγροκτήματα, ανάλογα με το σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσουν. Στον αντίποδα, η παραγωγή ενέργειας με χρήση ανεμογεννητριών απαιτεί προς το παρόν υψηλότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τις συμβατικές μορφές. Τέλος, ένα εξίσου σημαντικό μειονέκτημα των ανεμογεννητριών είναι η αστάθεια στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Αναλυτικότερα, ο άνεμος δεν είναι συνεχής, κάτι που σημαίνει ότι είτε θα πρέπει σε περιόδους μεγάλης παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος αυτό να αποθηκεύεται, είτε ότι το δίκτυο δε θα μπορεί να τροφοδοτείται πάντα.

Κεφάλαιο 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Λόγω του ότι τα ΥΑΠ και οι ανεμογεννήτριες γενικότερα προωθούνται ως μια ενεργειακή τεχνολογία χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οι περισσότερες ΑΚΖ αφορούσαν σχετικά στην επίδραση που είχαν στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής μετρώντας το αποτύπωμα άνθρακα. Οι πρώτες αναφορές (Lenzen & Munksgaard, 2002) που εξέτασαν 29 μελέτες τοποθετούν το αποτύπωμα άνθρακα μεταξύ 7,9 και 123,7 g CO₂ eq./kWh με τις περισσότερες τιμές να μην ξεπερνούν τα 52 g CO₂ eq./kWh. Δέκα χρόνια μετά σε μια πιο πρόσφατη δημοσίευση (Dolan & Heath, 2012) εξετάστηκαν περίπου 240 εργασίες εγκαταστάσεων ανεμογεννητριών και κατόπιν εναρμόνισης και προσεκτικού ελέγχου για το κατά πόσο αυτές ήταν σχετικές, ποιοτικές και διαφανείς το εύρος των τιμών για το αποτύπωμα άνθρακα μειώθηκε σε 3–45 g CO₂ eq./kWh για τις χερσαία αιολικά πάρκα και σε 7.2–23 g CO₂ eq./kWh για τα υπεράκτια. Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξε και μια πιο πρόσφατη δημοσίευση (Mendecka & Lombardi, 2019) η οποία διεύρυνε την μέγιστη τιμή σε 7.8–32 g CO₂ eq./kWh όπως και η δημοσίευση (Arvesen & Hertwich, 2012) στην οποία επισημαίνεται ότι η εγκατάσταση ανεμογεννητριών μεγαλύτερης δυναμικότητας (π.χ. 5 MW και άνω) δεν συνεπάγεται και χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις διότι αυξάνονται οι απαιτήσεις σε εξαρτήματα και υλικά. Ειδικότερα για τα ΥΑΠ, μια δημοσίευση για την Γερμανία (Weinzettel et al., 2009) εξέτασε ένα ΥΑΠ με επιπλέουσα θεμελίωση και μία άλλη (Reimers et al., 2014) εξέτασε ένα τυπικό ΥΑΠ και οι δύο βασιζόμενες σε δεδομένα σχεδιαστικά και όχι πραγματικά και ανέφεραν τιμές 12,2 και 16,8 g CO₂ eq./kWh αντίστοιχα. Άλλες μελέτες που θεώρησαν χαμηλότερες αποδόσεις και περισσότερα υλικά κατέγραψαν τιμές 32 g CO₂ eq./kWh (Wagner et al., 2011) και 18–47.32 g CO₂ eq./kWh (Raadal et al., 2014; Tsai et al., 2016). Οι διαφορές αυτές καταδεικνύουν ότι οι επιπτώσεις είναι ευαίσθητες στις διάφορες θεωρήσεις και συνθήκες του εκάστοτε ΥΑΠ καθιστώντας αναγκαία την μεγαλύτερη ανάλυση και επικέντρωση στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κάθε πάρκου όπως η απόσταση από την ακτή, τα βάθη, οι ταχύτητες ανέμου και οι απαιτήσεις συντήρησης. Η πιο πρόσφατη μελέτη που εξετάζει την ΑΚΖ ενός ΥΑΠ 24MW με επιπλέουσα θεμελίωση (Poujol et al., 2020) για να εγκατασταθεί στην Ν. Γαλλία, λαμβάνει υπόψη την θέση και συγκεκριμένα τα γεωγραφικά δεδομένα για την απόσταση και την ένταση ανέμου δίνει διαφορετικές τιμές για τις δύο επιλογές θέσης, 19,6 και 17,8 g CO₂ eq./kWh αντίστοιχα.

Τα τελευταία έτη παρατηρείται μια τάση για δημιουργία μοντέλων τα οποία θα επιτρέπουν με σχετικά απλό τρόπο να διενεργούνται αναλύσεις κύκλου ζωής για ΥΑΠ χωρίς να είναι υποχρεωτική η κατοχή και χρήση εξειδικευμένου υπολογιστικού προγράμματος. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τα χαρακτηριστικά του ΥΑΠ που επιθυμεί όπως ο τύπος ανεμογεννητριών, η απόσταση από την ακτή κτλ. και να λάβει τα αποτελέσματα είτε για το αποτύπωμα άνθρακα είτε και για άλλες περιβαλλοντικές

επιπτώσεις όπως η τοξικότητα, η απομείωση της στιβάδας του όζοντος κ.α. Μια πρόσφατη περίπτωση που χρησιμοποιεί χωρικά -και χρονικά έως ένα βαθμό δεδομένα- για την Δανία, αφορά στην διαδραστική πλατφόρμα “LCA WIND DK” (Besseau et al., 2019) και στηρίζεται σε ένα παραμετρικό μοντέλο (Sacchi et al., 2019) το οποίο επιτρέπει την εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα βάσει συγκεκριμένων χωρικών χαρακτηριστικών του ΥΑΠ. Παρά ταύτα, το μοντέλο αυτό περιορίζεται σε ανεμογεννήτριες μέχρι 2MW και ένα τύπο υποβρύχιου καλωδίου (33 kV). Οι συγγραφείς προτείνουν το μοντέλο για να γίνεται σωστότερη λήψη αποφάσεων σε ότι αφορά στην καταγραφή του ανθρακικού αποτυπώματος ακόμη και σε εθνικό επίπεδο. Όμως και πάλι οι χρήστες δεν μπορούν να διαμορφώσουν το μοντέλο για το ΥΑΠ με μεγαλύτερη επιλογή παραμέτρων και τύπου αποτελεσμάτων μια και το μοντέλο αναφέρεται μόνο στο αποτύπωμα άνθρακα. Το μοντέλο για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ΥΑΠ MEAOW (Kouloumpis & Azaragic, 2022) λαμβάνει υπόψη περισσότερες παραμέτρους και παρουσιάζει τα αποτελέσματα όχι μόνο για το αποτύπωμα άνθρακα αλλά και για άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως η τοξικότητα υδάτινων πόρων, η απομείωση των πόρων κτλ. Με βάση την δημοσίευση που παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου σε 20 ΥΑΠ στο Ηνωμένο Βασίλειο το ανθρακικό αποτύπωμα κυμαίνεται στο εύρος (6,4–19,5 g CO₂ eq./kWh). Επειδή είναι δωρεάν διαθέσιμο σε Excel και επιτρέπει στον χρήστη να δει αναλυτικά το LCI σε επίπεδο βασικών εισροών και εκροών του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την διπλωματική εργασία για τον υπολογισμό μιας σειράς εξαρτημάτων των ΥΑΠ που εξετάζονται.

Κεφάλαιο 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. Ορισμός και στάδια

«Η ΑΚΖ είναι μια μεθοδολογία και αντιπροσωπεύει ένα συστηματικό σύνολο διαδικασιών για τη συλλογή και εξέταση των εισροών (υλικών, ενέργειας) και εκροών (αποβλήτων, εκπομπών) και των σχετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, που αποδίδονται άμεσα στο προϊόν ή την υπηρεσία σε όλο τον κύκλο ζωής του». (Mehmeti et al., 2016) Η διάρκεια ζωής ενός προϊόντος ορίζεται από τα ακόλουθα κομβικά στάδια: την εξόρυξη των πρώτων υλών, την κατασκευή/παραγωγή, την μεταφορά, την χρήση και απόρριψη του.

Βασικός στόχος της ΑΚΖ είναι η εκτίμηση των δυνητικών περιβαλλοντικών συνεπειών μέσω λογισμικών. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα να:

- Εντοπίζονται σημεία του κύκλου ζωής ενός προϊόντος προς βελτίωση
- Κρίνονται τα αποτελέσματα με βάση τους εκάστοτε νόμους
- Χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα για την στρατηγική μιας επιχείρησης

3.2. ΑΚΖ κατά ISO

Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό για την Προτυποποίηση (ISO), η μεθοδολογία για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) των προϊόντων αποτελείται από τέσσερα στάδια όπως εμφανίζεται στο ISO 14040:2006 και περιγράφεται αναλυτικότερα και στο ISO 14044:2006 και φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί.

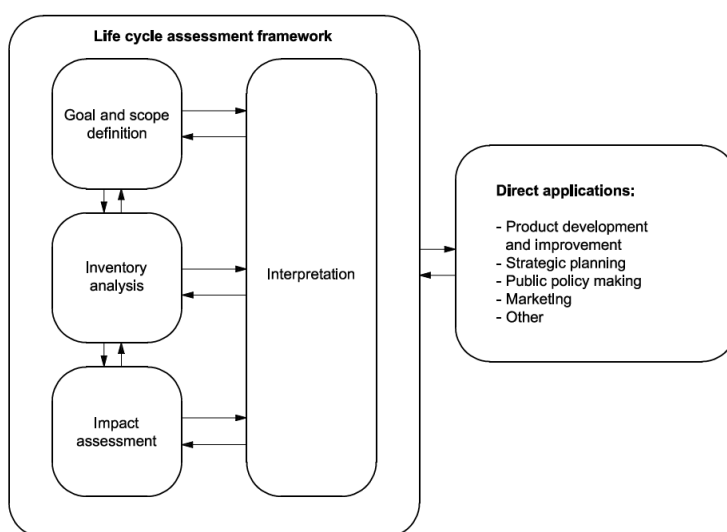


Figure 1 — Stages of an LCA

Εικόνα 4, Δομή Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ISO 14044)

- Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τον καθορισμό του σκοπού και του πλαισίου ανάλυσης. Το δεδομένο στάδιο αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της μελέτης, καθώς καθορίζει το γιατί γίνεται, το τι πρόκειται να υπολογιστεί, αλλά και η έκτασή της.
- Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την συλλογή όλων των δεδομένων για κάθε υποσύστημα του προϊόντος. Ουσιαστικά είναι μία καταγραφή δεδομένων εισόδου και εξόδου, συμπεριλαμβανομένων των απαραίτητων υλικών και της ενέργειας που χρησιμοποιούνται ως εισροές και των αποβλήτων και εκπομπών που χρησιμοποιούνται ως εκροές.
- Το τρίτο στάδιο είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων. Είναι μία ποσοτική διαδικασία για την εκτίμηση δυνητικών αρνητικών ή συγκριτικά θετικών περιβαλλοντικών συνεπειών που χαρακτηρίζουν το εξεταζόμενο προϊόν. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αξιολόγησης των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Μία από αυτές, η οποία και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι η EF (Environmental Footprint).
- Το τέταρτο στάδιο περιλαμβάνει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την αξιολόγησή τους με βάση τους αρχικούς στόχους και το πεδίο εφαρμογής.

Τα παραπάνω στάδια της AKZ αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους καθ' όλη τη διάρκεια της μεθόδου, ώστε να επιδέχονται βελτιώσεις και να εντοπίζονται λάθη.

3.3. Λογισμικό GaBi

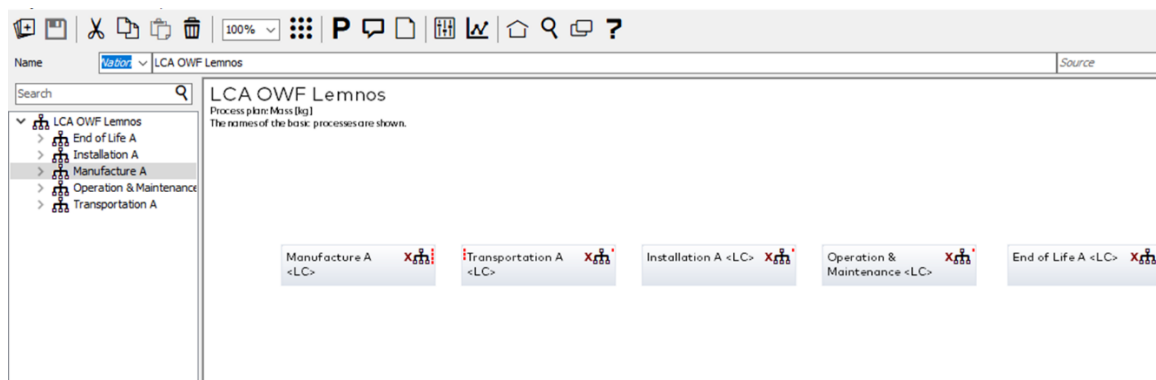
Για την μελέτη των σεναρίων που περιεγράφηκαν παραπάνω και την ανάπτυξη της μεθοδολογίας AKZ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GaBi. (*Life Cycle Assessment LCA Software*, 2022) Είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό μοντελοποίησης που συνεργάζεται με σύγχρονες βάσεις δεδομένων και επεξεργάζεται τις πληροφορίες που εισάγει ο χρήστης. Η χρησιμότητά του βασίζεται στην ταχεία επεξεργασία των δεδομένων και την παραγωγή αποτελεσμάτων που μπορούν να απαντήσουν σε θέματα που αφορούν τη βιωσιμότητα των προϊόντων τόσο για τη δημιουργία ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος, όσο και για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων και την αποτελεσματική χρήση πόρων.

Η επιφάνεια εργασίας αποτελείται από ένα κενό λευκό πίνακα που στο επάνω μέρος περιέχει τα εργαλεία για την επεξεργασία των δεδομένων και στο αριστερό σκέλος τα πλάνα και τις διεργασίες που χρησιμοποιούνται.

«Ένα πλάνο αντιπροσωπεύει το σύστημα με τα όριά του. Το σύστημα που μελετάται αποτελείται από διεργασίες που αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές διεργασίες που παίρνουν μέρος. Οι ροές αντιπροσωπεύουν όλα τα υλικά και την ενέργεια μεταξύ των διεργασιών που εισρέουν και εκρέουν από το σύστημα». (*Life Cycle Assessment LCA Software*, 2022)

Για την δημιουργία των μοντέλων των υπεράκτιων αιολικών πάρκων έγινε χρήση ενός κεντρικού πλάνου το οποίο περιέχει πέντε ξεχωριστά πλάνα. Τα πλάνα αυτά αφορούν

την κατασκευή των εξαρτημάτων, την μεταφορά τους, την εγκατάσταση, την λειτουργία & συντήρηση και την επεξεργασία τους με το πέρας της ζωής των υλικών. Παρακάτω φαίνεται η επιφάνεια εργασίας για το πρώτο πάρκο, αυτό της Λήμνου.



Εικόνα 5, Επιφάνεια εργασίας GaBi

Το κάθε πλάνο περιέχει είτε άλλα πλάνα που αφορούν το κάθε εξάρτημα, είτε διεργασίες που συνθέτουν μια μεγαλύτερη. Παρακάτω πρόκειται να περιγραφεί αναλυτικά το κάθε πλάνο που συντελεί την δημιουργία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

Η καταγραφή αυτή που θα ακολουθήσει στο κεφάλαιο 4 αποτελεί το Life Cycle Inventory (LCI) όπως προβλέπεται στο ISO που περιγράφεται και στο σχήμα 3.2. Πριν από αυτό όμως πρέπει να δηλωθεί ο σκοπός και το πλαίσιο της ανάλυσης στο 3.4.

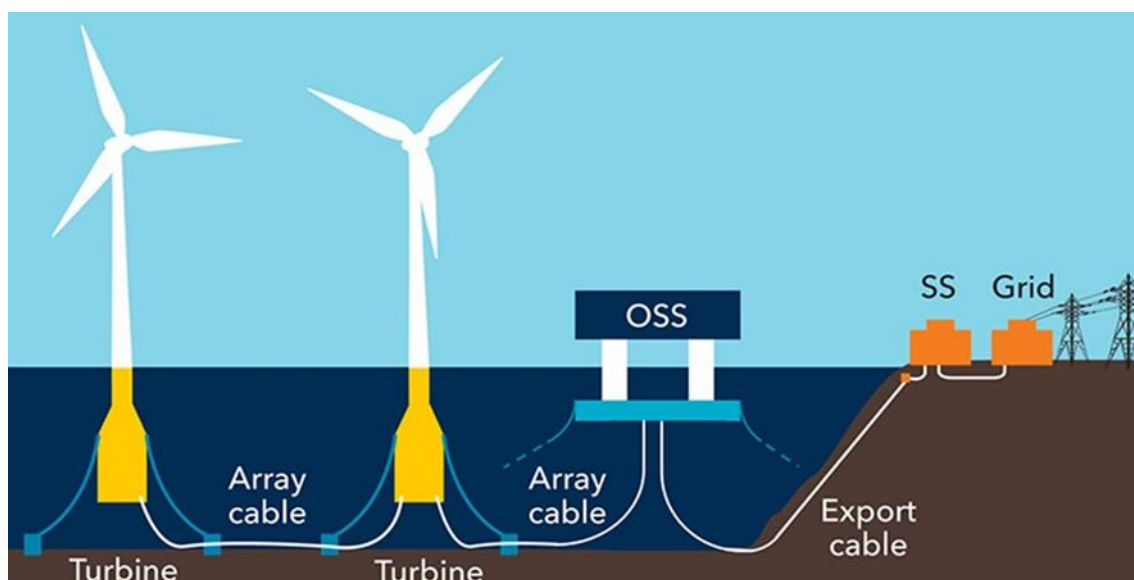
3.4. Σκοπός και πλαίσιο της ΑΚΖ για τα ΥΑΠ

Ο σκοπός της ΑΚΖ είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας από τα συγκεκριμένα ΥΑΠ στην Ελλάδα εκ των οποίων το ένα θα έχει σύστημα θεμελίωσης μονής στήλης και το άλλο πλωτό σύστημα θεμελίωσης και να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ τους καθώς και με την παραγόμενη 1 kWh από το ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα. Το πλαίσιο ορίζεται έτσι ώστε να περιλαμβάνει την εξαγωγή των πρώτων υλών και την παραγωγή και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, των συστημάτων θεμελίωσης, των καλωδίων, του θαλάσσιου υποσταθμού, των μεταφορών, της εγκατάστασης, λειτουργίας & συντήρησης και του τέλους ζωής μετά τα 20 έτη η οποία περιλαμβάνει την υγειονομική ταφή αλλά και ανακύκλωση. Ως λειτουργική μονάδα ορίζεται η παραγωγή 1 kWh από το ΥΑΠ και η παροχή της στο κεντρικό δίκτυο χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι χερσαίοι υποσταθμοί.

Κεφάλαιο 4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

4.1. Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα

Ένα αιολικό πάρκο είναι μία δομή είτε στη στεριά, είτε στην θάλασσα, το οποίο περιλαμβάνει πολυάριθμες ανεμογεννήτριες με σκοπό την μετατροπή της κινητικής ενέργειας, που προέρχεται από τον άνεμο, σε ηλεκτρική. Οι ανεμογεννήτριες τροφοδοτούν με ενέργεια τον ηλεκτρικό σταθμό. Η αρχική ιδέα των αιολικών πάρκων βασίστηκε στα χερσαία αιολικά πάρκα, ωστόσο τα τελευταία χρόνια πολλές επενδύσεις γίνονται σε υπεράκτια αιολικά πάρκα. Τα τελευταία θεωρούνται πιο επικερδή, ωστόσο έχουν μεγαλύτερο αρχικό κόστος επένδυσης. Συγκεκριμένα, είναι σχεδόν 25% πιο ακριβά από τα χερσαία, λόγω των δύσκολων συνθηκών της εγκατάστασης και λειτουργίας & συντήρησής τους. (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017)



Εικόνα 6, Εγκαταστάσεις υπεράκτιου αιολικού πάρκου, (Από αριστερά προς δεξιά υπάρχουν οι ανεμογεννήτριες που συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια, τα οποία καταλήγουν σε έναν θαλάσσιο υποσταθμό. Από εκεί, τα εξωτερικά καλώδια φτάνουν στην στεριά, στον σταθμό συλλογής ηλεκτρικού ρεύματος και τροφοδοτούν το δίκτυο), (DNV Starting Floating Offshore Substation JIP, 2021)

Η αιολική ενέργεια λειτουργεί ως κινητήριος δύναμη για να περιστραφούν οι πτέρυγες του ρότορα. Οι πτέρυγες περιστρέφουν έναν άξονα που περιέχει μαγνήτες μέσα σε βρόχους από σύρματα χαλκού. Τα καλώδια συστοιχίας (array cables) συνδέουν την τουρμπίνα της κάθε ανεμογεννήτριας με την άλλη και όλες με τον υπεράκτιο υποσταθμό. Ο υπεράκτιος υποσταθμός μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μορφή υψηλότερου δυναμικού, ώστε κατά την μεταφορά ενέργειας στην ακτή να υπάρχουν όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες. Τα εξωτερικά καλώδια συνδέουν τον υπεράκτιο υποσταθμό με τον υποσταθμό στη στεριά. Από εκεί η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο εθνικό δίκτυο (*Our Energy Infrastructure*, n.d.)

4.2. Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες είναι τα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας με σκοπό τη μετατροπή της σε ηλεκτρική. Στα αιολικά πάρκα τόσο τα χερσαία όσο και υπεράκτια, χρησιμοποιείται η ίδια τεχνολογία, με διαφορές στα μοντέλα, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες.

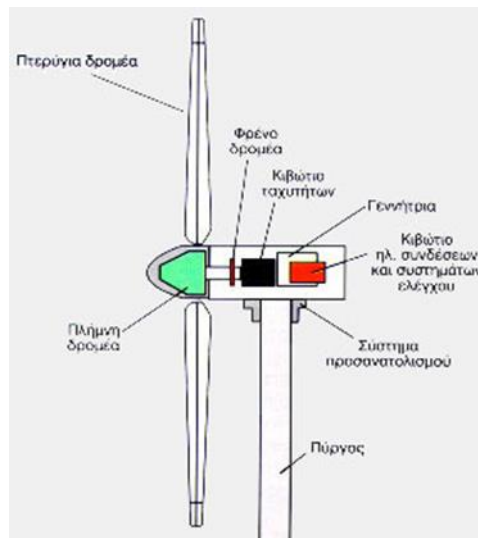
4.2.1. Είδη Ανεμογεννητριών

Υπάρχουν δύο είδη ανεμογεννητριών με βάση τον τρόπο εκμετάλλευσης του ανέμου: οριζόντιου και κάθετου άξονα. «Οι ανεμογεννήτριες της πρώτης κατηγορίας, έχουν τοποθετημένους το ρότορα του άξονα και την ηλεκτρική γεννήτρια στην κορυφή ενός πύργου, στραμμένους προς την κατεύθυνση του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα έχουν τοποθετημένο το ρότορα κάθετα στο έδαφος» (‘‘Ανεμογεννήτρια,’’ 2022). Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες εδώ και χρόνια και αποτελούν το μοντέλο που θα μελετηθεί και στην κατασκευή υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Άλλες κατηγορίες διαχωρισμού περιλαμβάνουν το μέγεθος και την ισχύ, την ταχύτητα περιστροφής.

4.2.2. Βασικά Μέρη

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα η κατεύθυνση του ανέμου είναι παράλληλη με τον άξονα περιστροφής. Αποτελεί ένα σύνθετο σύστημα με πολυάριθμα μέρη, ωστόσο παρακάτω θα αναλυθούν οι βασικότερες ομάδες τους.

Στα εξωτερικά μέρη εντοπίζονται τα πτερύγια, ο πύργος και ο ρότορας. Τα πτερύγια ποικίλουν σε αριθμό με συνηθέστερο τα τρία. «Ο άνεμος πάνω στα πτερύγια δημιουργεί άνοση (lift) που έχει σαν αποτέλεσμα μια ροπή γύρω από τον άξονα περιστροφής και αναγκάζει τα πτερύγια να περιστρέφονται» (Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών, 2013). Ο πύργος αποτελεί το σύστημα υποστήριξης και κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα. «Ο ρότορας είναι το σύστημα που αποτελείται από τα πτερύγια και την κεφαλή του. Ο ρότορας περιστρέφεται από τον κεντρικό άξονα και περιλαμβάνει τις λεπίδες οι οποίες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε χαμηλής ταχύτητας κινητική». (Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών, 2013).



Εικόνα 7, Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας, (Αληφράγκης Ιωάννης, 2018)

4.3. Συστήματα Θεμελίωσης

Η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας στη θάλασσα έχει ως βασική παράμετρο τη σωστή επιλογή συστήματος θεμελίωσης με βάση τις εκάστοτε συνθήκες. Αυτή είναι και η κύρια διαφορά με τη χερσαία τοποθέτηση των Α/Γ. Στις χερσαίες εγκαταστάσεις συνήθως χρησιμοποιείται ο βαρυτικός τύπος θεμελίωσης. Αντίθετα, στην περίπτωση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, αυτός ο τύπος συχνά δεν έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα, λόγω «της ύπαρξης ανωστικών δυνάμεων, των πιέσεων των πόρων και της λειτουργίας του εδάφους λόγω ενεργών τάσεων». (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017)

4.3.1. Βαρυτικός Τύπος Θεμελίωσης (Gravity Base)

Οι βαρυτικοί τύποι θεμελίωσης είναι βαριές κατασκευές, συχνά από σκυρόδεμα, που βυθίζονται και τοποθετούνται στον βυθό της θάλασσας για να παρέχουν υποστήριξη στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Στόχος είναι η στήριξη της Α/Γ σε συνθήκες έντονων ανέμων, κυματισμών και σεισμικών δονήσεων. Ο τύπος αυτός θεμελίωσης προορίζεται για ρηχά νερά με βάθος μέχρι 30 μέτρα.

Τα προτερήματα του συγκεκριμένου τύπου βασίζονται στη χρήση σχετικά φτηνών υλικών, ορισμένα σχέδια δεν χρειάζονται εγκατάσταση με γερανό και τα ρυμουλκά μπορούν να μετακινήσουν εύκολα τις βάσεις που έχουν συναρμολογηθεί σε λιμάνι. (Esteban et al., 2019)

4.3.2. Διάταξη Μονής Στήλης (*Monopile*)

Η θεμελίωση μονής στήλης είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διάταξη κυρίως στα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Με τη χρήση ενός γεωτρύπανου ανοίγεται μία οπή στο έδαφος και εκεί τοποθετείται ο πυλώνας από χάλυβα. Στο κενό που δημιουργείται ρίχνεται σκυρόδεμα. Ακολουθώντας, με τη βοήθεια γερανού συναρμολογούνται η άτρακτος του κινητήρα και ο δρομέας. (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017)

Έχει δυνατότητα να εγκατασταθεί σε βάθη μέχρι 40 μέτρα, ενώ η κατασκευή του είναι απλή και γρήγορη. Ωστόσο, «το κόστος και οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την κατασκευή, την εγκατάσταση και τη μεταφορά αυξάνονται για μεγαλύτερα μονόστυλα που απαιτούνται σε βαθύτερες εγκαταστάσεις όπου τα υδροδυναμικά φορτία αποτελούν πρόβλημα». (Esteban et al., 2019)

4.3.3. Τρίποδες (*Tripod*)

Όπως περιγράφει και το όνομά τους, τα συγκεκριμένα συστήματα θεμελίωσης αποτελούνται από τρεις σωλήνες που καταλήγουν σε πυλώνες εντός του εδάφους. Τα μέρη αυτά είναι κατασκευασμένα από χάλυβα. Εξωτερικά φαίνονται ως σύστημα μονού πασσάλου, αλλά «το κεντρικό μέρος διανέμει τα φορτία στους κυλινδρικούς σωλήνες που λειτουργούν σαν το ενδιάμεσο κομμάτι για τον πύργο» (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017). Η τεχνολογία του τρίποδα εφαρμόζεται για βάθη μέχρι 60 μέτρα.

Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται η σταθερότητα που προσφέρει στην ανεμογεννήτρια λόγω της ικανότητας του τρίποδα να «αντιστέκεται σε δυνάμεις ανατροπής» (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017). Βέβαια, η κατασκευή και λειτουργία & συντήρηση απαιτούν μεγαλύτερο κόστος, καθώς και η διάβρωση της βάσης είναι γρηγορότερη συγκριτικά με τις παραπάνω περιπτώσεις.

4.3.4. Τετράποδο Δικτύωμα (*Jacket*)

Το jacket μπορεί να εγκατασταθεί, όπως και ο τρίποδας, σε βάθη μέχρι 60 μέτρα. Οι πλατφόρμες του δικτύωματος αποτελούνται από τέσσερις σωλήνες ως βάσεις που συνδέονται μεταξύ τους με διαγώνιες αντηρίδες. Θα μπορούσαν να παρομοιαστούν με τις αντίστοιχες πλατφόρμες πετρελαίου. (*Comparing Offshore Wind Turbine Foundations*, 2021) Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζεται στην πλατφόρμα, ενώ όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η βάση στερεώνεται στο έδαφος με πασσάλους.

Μέρος της επιφάνειας του πλέγματος μπορεί να λειτουργήσει ως τεχνητός ύφαλος, παρέχοντας ένα νέο βιότοπο για τα τοπικά είδη. Ωστόσο, «οι εγκαταστάσεις θεμελίων jacket στη Βόρεια Θάλασσα, έχουν αναφέρει συνεχή προβλήματα στους αρμούς της εγκατάστασης, προκαλώντας μεγάλες περιόδους διακοπής συντήρησης για τη

διατήρηση της δομικής ακεραιότητας». (*Comparing Offshore Wind Turbine Foundations*, 2021)



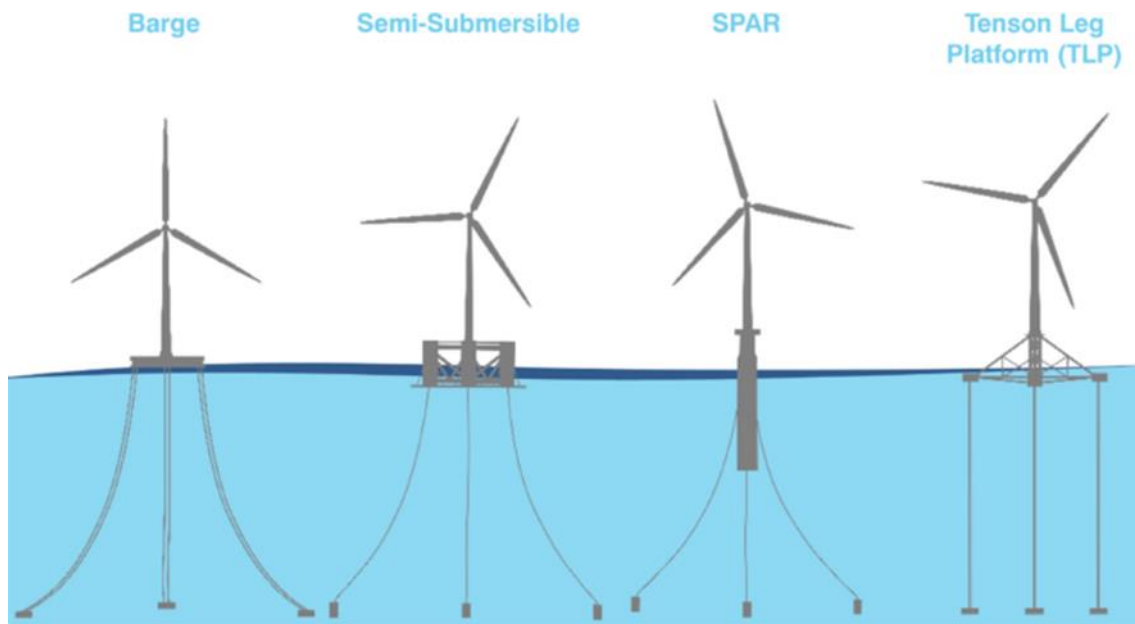
Εικόνα 8, Τύποι θεμελίωσης Α/Γ στη θάλασσα, (Offshore | DEME Group, 2021)

4.3.5. Πλωτά Συστήματα (Floating Systems)

Μία νέα τεχνολογία, των πλωτών συστημάτων έχει έρθει για να δώσει λύση σε προβλήματα, όπως τα μεγάλα βάθη. Πιο συγκεκριμένα, τα floating systems μπορούν να εγκατασταθούν σε μέρη με βάθος πυθμένα πάνω από εκατό μέτρα. Κάτι τέτοιο γίνεται λόγω της «ανωστικής δύναμης που ασκείται στην πλατφόρμα στήριξης της ανεμογεννήτριας» (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017). Η πλατφόρμα στερεώνεται στον πυθμένα με τη βοήθεια καλωδίων. Η πλωτή τεχνολογία έχει ήδη χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μέρη όπως η Σκωτία και η Πορτογαλία και αναμένονται και άλλα παρόμοια έργα σε όλη την Ευρώπη. Σημαντικά παραδείγματα αποτελούν το Hywind με 30 MW ισχύ και το Kincardine με 50 MW με έδρα την Σκωτία.

Εκτός από τα μεγάλα βάθη, τα οποία μπορούν να φτάσουν μέχρι και 200 μέτρα, τα floating systems επειδή βρίσκονται εγκατεστημένα μακριά από την ακτή εκμεταλλεύονται έως και 58% παραπάνω την ισχύ του ανέμου. (*Offshore | DEME Group*, 2021) Ένα ακόμα θετικό είναι ότι η συναρμολόγησή τους γίνεται στη στεριά (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017), κάτι που κάνει τη διαδικασία της τοποθέτησής τους ευκολότερη. Τέλος, η μεγάλη απόσταση από την στεριά συνδράμει στην περιορισμένη ορατότητά τους, για αισθητικούς λόγους. Από την άλλη πλευρά, τα πλωτά συστήματα λόγω της στερέωσής τους στο βυθό με καλώδια, απαιτούν συνεχή επιδιόρθωση και συντήρηση αυξάνοντας το κόστος της συνολικής εγκατάστασης.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι πλωτών συστημάτων: Spar-buoy, Semi-Submersible, Barge, Tension-leg platform. «Οι πρώτες τρεις τοποθετούνται χαλαρά αγκυροβολημένες στον πυθμένα της θάλασσας, επιτρέποντας ευκολότερη εγκατάσταση, ενώ η “tension leg platform” είναι πιο σταθερά δεμένη στον πυθμένα, κάτι που επιτρέπει μια πιο σταθερή κατασκευή». (Αικατερίνη Μητσάκου, 2018)



Εικόνα 9, Τύποι πλωτών συστημάτων, (Ha et al., 2021)

Η θεμελίωση Spar-buoy αποτελείται από έναν κυλινδρικό πυλώνα με αέρα, με διάμετρο αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του πύργου της ανεμογεννήτριας. «Έτσι, το κέντρο πλεύσης του είναι πολύ πιο πάνω από το κέντρο βάρους του» (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017), προσδίδοντας σταθερότητα. Το μέγεθος της διαμέτρου συμβάλει ώστε οι ανωστικές δυνάμεις που δημιουργούνται να κρατούν την ανεμογεννήτρια ψηλότερα από τη στάθμη του νερού. Στερεώνεται στον πυθμένα μέσω συρματόσχοινων από χάλυβα ή άλλο συνθετικό υλικό. (Αθανασιάδης Γρηγόριος, 2015)

Η θεμελίωση Semi-Submersible αποτελείται από μία ημιβυθισμένη τριγωνική πλατφόρμα, που έχει στις κορυφές της κυλίνδρους και συνδέονται με σιδερένιους σωλήνες. Η Α/Γ είναι τοποθετημένη πάνω σε έναν από αυτούς τους κυλίνδρους και στερεώνεται στον πυθμένα με έξι αλυσοειδή σύρματα. «Μια άλλη καινοτομία που προσφέρει ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης είναι ότι κατά την αντιστάθμιση που γίνεται για να παραμένει σε ορθή θέση η γεννήτρια χρησιμοποιεί και την ενεργεία των κυμάτων και την μετατρέπει σε ηλεκτρική». (Αθανασιάδης Γρηγόριος, 2015)

Η θεμελίωση Barge αποτελείται από μία τετραγωνική συνήθως βάση, με κενό στο εσωτερικό της μέρος. Η Α/Γ τοποθετείται σε μία από τις πλευρές της και στερεώνεται στον πυθμένα με συρματόσχοινα διάφορων υλικών και άγκυρες. Η μεγάλη επιφάνεια της πλωτής εγκατάστασης προσδίδει σταθερότητα, λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της άνωσης. Ωστόσο, ο δεδομένος τύπος δεν είναι ιδανικός για ανοιχτές θάλασσες και

ωκεανούς, λόγω της ευαισθησίας του στις κινήσεις που δημιουργεί το πέρας των υπερωκεάνιων πλοίων. (Wang et al., 2010)

Η θεμελίωση Tension Leg Platform αποτελείται από μία πλωτή βάση με κάθετους σωλήνες. «Στον πυθμένα τα συρματόσχοινα σταθεροποιούνται με άγκυρες βαρύτητας από μπετόν ή μεταλλικά στοιχεία, έτσι ώστε να έχουν αρκετή μάζα και να μην μπορούν οι δυνάμεις από τα κύματα ή τον αέρα να παρασύρουν το θεμέλιο». (Αθανασιάδης Γρηγόριος, 2015)

Σύμφωνα με την έκθεση της WindEurope, στα τέλη του 2017, το monopile foundation ερχόταν πρώτο σε κατάταξη στην Ευρώπη με 3720 μονάδες (81,7%). Ακολουθεί το jacket με 315 μονάδες, και το gravity base με 283 μονάδες. (Esteban et al., 2019)

4.4. Πλεονεκτήματα Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων

Τα υπεράκτια πάρκα μπορούν να λύσουν προβλήματα που δημιουργούν τα επίγεια, όπως είναι αυτά τα θορύβου, των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και του περιορισμού του χώρου.

Καταρχάς, τα ΥΑΠ έχουν μεγαλύτερη απόδοση λόγω της ταχύτητας του ανέμου στη θάλασσα. Σε αυτές τις περιοχές η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη, λόγω της απουσίας τριβής του ανέμου που σε αντίθετη περίπτωση βασίζεται στην ύπαρξη βουνών, δασών, πόλεων και ανθρώπινων κατασκευών. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η κατασκευή αιολικών πάρκων στη θάλασσα μειώνει προβλήματα θορύβου και ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε σχέση με κατοικημένες περιοχές. Βέβαια, με την εξέλιξη των μοντέλων των ανεμογεννητριών αυτά τα προβλήματα είναι σχεδόν λυμένα και για τους δύο τύπους. Ωστόσο, στη στεριά υπάρχει το χωροταξικό πρόβλημα. Στο υδάτινο περιβάλλον, το πρόβλημα αυτό έγκειται κυρίως στις θαλάσσιες μεταφορές, όμως υπάρχουν μεγάλες εκτάσεις στις οποίες μπορεί να γίνει η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Έτσι, δημιουργούνται μεγάλα αιολικά πάρκα με αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας.

4.5. Επιλογή θέσης πρώτου ΥΑΠ

Η Λήμνος βρίσκεται στο βορειοκεντρικό Αιγαίο. Η θέση της θεωρείται από τις πιο ευνοϊκές στο ελλαδικό χώρο για την εγκατάσταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Κάτι τέτοιο, βασίζεται σε πληθώρα λόγων. Καταρχάς, ο άνεμος που κυριαρχεί στην βορειοανατολική πλευρά κυμαίνεται σε τιμές κοντά στα 6 m/s. (Παπαβασιλείου Γεώργιος, 2017) Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο είναι τα βάθη στη συγκεκριμένη περιοχή, τα οποία κυμαίνονται από 0-80 μέτρα αρκετά ανοιχτά του νησιού. Στα

περισσότερα σημεία της νησιωτικής χώρας τα βάθη είναι αποτρεπτικά για εγκατάσταση ΥΑΠ, αφού αυξάνονται πολύ απότομα και σε μικρή απόσταση από τη στεριά. Επιπλέον, στην συγκεκριμένη περιοχή καλύπτονται περιβαλλοντικοί περιορισμοί που αφορούν περιοχές Natura. Η τελική θέση ενός ΥΑΠ επηρεάζεται και από στοιχεία όπως στρατιωτικές βάσεις, γραμμές ναυσιπλοΐας, μνημεία UNESCO. Στην περιοχή ανοιχτά της Πλάκας στη Λήμνο κανένας από τους παραπάνω περιορισμούς δεν παραβιάζεται, συνεπώς είναι μια ιδανική θέση.

4.6. Πληροφορίες για ΥΑΠ Λήμνου

Στόχος της δεδομένης επένδυσης είναι η παραγωγή ρεύματος της τάξεως των 498,1 GW για την ηλεκτροδότηση 500.000 νοικοκυριών της Θεσσαλονίκης, ίσως και παραπάνω.

Με βάση υπάρχουσες μελέτες και συμφωνίες, το πάρκο το πιο πιθανό είναι να αποτελείται από 81 ανεμογεννήτριες των 6,15 MW. Το πλάνο δείχνει ότι πρόκειται να εγκατασταθούν τέσσερις σειρές σε διαφορετικά βάθη, δεδομένου ότι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους θα είναι στα πεντακόσια μέτρα. Τα προτεινόμενα βάθη είναι στα 25, 30, 35 και 40 μέτρα αντίστοιχα. Το ΥΑΠ της Λήμνου θα είναι σταθερής θεμελίωσης, με δύο κυρίαρχους τύπους. Αυτόν του μονού πασσάλου και του jacket. Προς το παρόν, δεν υπάρχει κάποια πληροφορία για τη θέση του υποσταθμού ώστε να πραγματοποιηθεί η μετατροπή του ρεύματος για την άμεση χρήση από τα νοικοκυριά. Ωστόσο, υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια για το σημείο της ηπειρωτικής Ελλάδας που θα συλλέγεται το ρεύμα. Το ένα σενάριο αφορά τη συλλογή ρεύματος στο σημείο της Ν. Σάντας και το άλλο αφορά την περιοχή της Ξάνθης, η οποία αποτελεί το πλησιέστερο σημείο στεριάς από το νησί.

Το ΥΑΠ στη Λήμνο φαίνεται να είναι το πρώτο που θα δημιουργηθεί στον ελλαδικό χώρο τα επόμενα χρόνια. Η έρευνα σε αυτό το σχέδιο ανάπτυξης έχει γίνει και μάλιστα έχει δανειοδοτηθεί. Έχουν ελεγχθεί σε βάθος όλες οι παραπάνω προϋποθέσεις που αναλύθηκαν παραπάνω. Πέρα από το επαγγελματικό κομμάτι, στην παρούσα εργασία αντλούνται στοιχεία από αντίστοιχη ακαδημαϊκή έρευνα που εκπονήθηκε το 2017. Ένα τέτοιο εγχείρημα θα δώσει την ευκαιρία στον ελλαδικό χώρο να κινηθεί στους ήδη ανεπτυγμένους ρυθμούς της αξιοποίησης αιολικής ενέργειας και να συμβαδίσει με την εξέλιξη της εποχής.

4.7. Επιλογή θέσης δεύτερου ΥΑΠ

Η Μύκονος βρίσκεται στο κεντρικό Αιγαίο στο σύμπλεγμα των Κυκλάδων. Είναι ευρέως γνωστό και επιστημονικά εξακριβωμένο ότι οι Κυκλάδες χαρακτηρίζονται από έντονο

αέρα κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι τιμές του ανέμου κυμαίνονται στα 6 m/s, ενώ μπορούν να φτάσουν τα 7 m/s κατά τους χειμερινούς μήνες. Ωστόσο, ο χώρος των Κυκλάδων εμπεριέχει πολλές περιοχές Natura, στρατιωτικές ζώνες και γραμμές ναυσιπλοΐας. Συνεπώς, μετά από έρευνα καταλήξαμε ότι η πλέον κατάλληλη θέση είναι αυτή στο βορειοανατολικό μέρος του νησιού.

Ένα σημαντικό θέμα στην περίπτωση που μελετάται τώρα, είναι αυτό της αισθητικής επίδρασης ενός αιολικού πάρκου σε τουριστικές περιοχές όπως η Μύκονος. Με βάση έρευνα την ΕΛΕΤΑΕΝ, η σωστή χωροταξική τοποθέτηση ενός ΥΑΠ δεν επηρεάζει αρνητικά την αισθητική άποψη των επισκεπτών σε κάποιο νησί. Αντίθετα, η παρουσία τέτοιων έργων μπορεί να δείξει την τεχνολογική αναβάθμιση του τόπου και να προσελκύσει περισσότερους επενδυτές.

4.8. Πληροφορίες για ΥΑΠ Μυκόνου

Το δεδομένο ΥΑΠ βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο. Στόχος είναι η δημιουργία ενός πάρκου πανομοιότυπο με αυτό της Λήμνου. Αναλυτικότερα, το πάρκο αποτελείται από 81 ανεμογεννήτριες, 6.15 MW, τύπου NREL, που πρόκειται να παράγουν 498,1 GW για την ηλεκτροδότηση μέρους της Αθήνας. Πρόκειται να στηθεί ένας υποσταθμός για τη συλλογή και μετατροπή του ρεύματος, όπως και στην πρώτη περίπτωση.

Η διαφορά με το πρώτο ΥΑΠ έγκειται στο γεγονός ότι το παρόν είναι πλωτό. Ουσιαστικά, χρησιμοποιείται πλωτό σύστημα Spar-Buoy και τοποθετείται σε βάθος 150 μέτρων. Με την αλλαγή στον τύπο θεμελίωσης επιτυγχάνεται η τοποθέτηση του πάρκου σε μεγαλύτερο βάθος, για την εκμετάλλευση πιο ισχυρών ανέμων. Πρέπει να σημειωθεί ότι και τα δύο πάρκα βρίσκονται στην ίδια απόσταση από την ξηρά, στα πέντε χιλιόμετρα, ωστόσο στην δεύτερη περίπτωση το συντελεστής απόδοσης είναι μεγαλύτερος στο συγκεκριμένο βάθος που πρόκειται να τοποθετηθεί. Οι ομοιότητες και οι διαφορές των δύο πάρκων περιγράφονται εκτενώς παρακάτω.

4.9. Ομοιότητες και διαφορές

Όπως περιεγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τα δύο αιολικά πάρκα έχουν ομοιότητες και διαφορές.

Οι ομοιότητές τους αφορούν αρχικά την απόσταση από την ακτή, που είναι πέντε χιλιόμετρα. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιες, NREL 5 MW. Τοποθετούνται 81 ανεμογεννήτριες μοιρασμένες σε 4 σειρές. Σε κάθε περίπτωση ικανοποιούνται οι περιορισμοί που αφορούν: Περιοχές Natura, στρατιωτικές περιοχές, μνημεία UNESCO, περιοχές αποκλεισμού ΕΠΧΣΑΑ, γραμμές ναυσιπλοΐας. Ως τελευταίο

στοιχείο ομοιοτήτων, παρατίθεται ότι η διανομή των εξαρτημάτων ξεκινάει από το Ώρχους στην Δανία, ενώ με το πέρας της λειτουργικής ζωής τους επιστρέφονται σε σημείο της κεντρικής Ευρώπης.

Οι δύο βασικές διαφορές των υπεράκτιων αιολικών πάρκων συναντώνται στο βάθος της κατασκευής και στον τύπο θεμελίωσης. Ουσιαστικά, ο τύπος θεμελίωσης επηρεάζει το επιτρεπτό βάθος για την τοποθέτηση του πάρκου. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται ο τύπος θεμελίωσης είναι monopile σε βάθος 25-40 μέτρα, ενώ στη δεύτερη ο τύπος πλωτού Spar-Buoy σε βάθος 150 μέτρων. Επιπλέον, σύμφωνα με δεδομένα του 2020, το υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη Λήμνο έχει μέσο συντελεστή απόδοσης 43,9% και παράγει ετησίως 19264,044 MWh. Στην άλλη περίπτωση, το υπεράκτιο πλωτό αιολικό πάρκο της Μυκόνου έχει μέσο συντελεστή απόδοσης 44,9% και παράγει ετησίως 19733,472 MWh. Το κέρδος της δεύτερης περίπτωσης είναι 469,428 MWh ετησίως. Μία τελευταία διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το βασικό λιμάνι στην πρώτη περίπτωση που γίνονται η διακινήσεις υλικών είναι η Θεσσαλονίκη, ενώ στην δεύτερη περίπτωση είναι η Αθήνα.

4.10. Βαθμός απόδοσης

Όπως επεξηγήθηκε παραπάνω, το κάθε πάρκο έχει διαφορετικό βαθμό απόδοσης. Και για τα δύο υπεράκτια αιολικά πάρκα χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή “Renewables ninja”. Για το ΥΑΠ της Λήμνου υπήρχαν δεδομένα για τη βέλτιστη επιλογή θέσης στο Βορειοανατολικό άκρο του νησιού. Ωστόσο, μέσω της εφαρμογής τα δεδομένα αυτά επαληθεύτηκαν.

Κατά την χρήση του Renewables ninja ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Εισάγεται στο “Search” η περιοχή ενδιαφέροντος
- Στο κελί “Select year of data” επιλέγεται το 2021, ώστε τα δεδομένα να είναι όσο το δυνατόν πιο πρόσφατα
- Στο κελί “Capacity” συμπληρώνεται το 5000, αφού η NREL ανεμογεννήτρια είναι της τάξεως των 5 MW
- Το ύψος του κώνου είναι 90 μέτρα
- Ως μοντέλο ανεμογεννήτριας συμπληρώνεται η REpower 5 MW
- Πατώντας το Run παρουσιάζονται δύο διαγράμματα. Ο μηνιαίος βαθμός απόδοσης παρουσιάζεται στο δεύτερο και κάτω από αυτό υπάρχει ο μέσος όρος των 12 μηνών. Αυτή είναι και η τιμή που γίνονται οι υπόλοιποι υπολογισμοί.
- Με την απόσταση από το νησί που εξετάζεται σε κάθε σενάριο με μία νοητή γραμμή εξετάζονται σημεία γύρω από το νησί.
- Το σημείο που έχει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης επιλέγεται ως σημείο κατασκευής του ΥΑΠ. Φυσικά πρέπει να καλύπτονται και οι περιορισμοί που

αναλύθηκαν παραπάνω όσον αφορά τις γραμμές ναυσιπλοΐας, τις περιοχές Natura κτλ.

4.11. Ανεμογεννήτρια NREL 5MW

Η ανεμογεννήτρια NREL 5 MW είναι ένα ερευνητικό μοντέλο ανεμογεννήτριας και χρησιμοποιείται για μελέτες τόσο σε χερσαίες όσο και σε υπεράκτιες κατασκευές. Ο τύπος αυτής της ανεμογεννήτριας προσομοιάζει τον τύπο 6,15 MW σύμφωνα με τον οποίο έγιναν οι υπολογισμοί σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από α) τον πύργο, β) τον ρότορα που χωρίζεται στις πτέρυγες και στον κώνο και γ) το κέλυφος, όπως θα αναλυθούν περαιτέρω παρακάτω. Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση (Jonkman et al., 2009) η ανεμογεννήτρια έχει στο σύνολό της βάρος 600 τόνους. Η ταχύτητα στην οποία λειτουργεί είναι της τάξεως 3-5 m/s, ενώ μετά τα 25 m/s παύει να λειτουργεί για λόγους ασφαλείας. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο MEAOW (Kouloumpis & Azaragic, 2022), έγινε η εκτίμηση των εισροών των εξαρτημάτων στις υποπαραγράφους που ακολουθούν. Σύμφωνα με όσα περιεγράφηκαν για το δεύτερο στάδιο (LCI) πρέπει εκτός από τα υλικά να προστεθούν όλες οι σχετιζόμενες εισροές και οι εκροές. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται η ενέργεια, τα απόβλητα. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και στο GaBi για τη δημιουργία του μοντέλου της ανεμογεννήτριας.

Πίνακας 1, LCI ανεμογεννήτριας

ΠΥΡΓΟΣ		
Χάλυβας χαμηλού κράματος	245500	kg
Αλουμίνιο	4500	kg
Ηλεκτρική Ενέργεια	25525	kWh
Diesel	125	litres
Θερμότητα	4825	kWh
Αέριο Συγκόλλησης	25	kg
Καύσιμα	2025	litres
Νερό	3900	kg

Απόβλητα	3450	kg
Επικίνδυνα απόβλητα	25	kg
Απόβλητα λιπαντικών ελαίων	5	kg
ΡΟΤΟΡΑΣ		
Πτέρυγες	57750	kg
Ίνες υάλου	38577	kg
Εποξική ρητίνη	15246	kg
Ξύλο (Μείγμα)	2829.75	kg
Πολυπροπυλένιο	1097.25	kg
Νερό	59367	kg
Φυσικό αέριο	19808.25	kWh
Ηλεκτρική Ενέργεια	39616.5	kWh
Θερμότητα	11319	kWh
Hub (Κώνος)	52250	kg
Χυτοσίδητος	24087.25	kg
Χρωμιοχάλυβας	14055.25	kg
Χάλυβας χαμηλού κράματος	12696.75	kg
Glass fibre	1463	kg
Ηλεκτρική Ενέργεια	63431.5	kWh
Φυσικό Αέριο	26125	kWh

Νερό	22833.25	kg
Άμμος	209000	kg
ΚΕΛΥΦΟΣ		
Κύριο μέρος Κελύφους	211680	kg
Χυτοσίδηρος	99066.24	kg
Χάλυβας χαμηλού κράματος	94832.64	kg
Χρωμιοχάλυβας	5927.04	kg
Steel electric	5292	kg
Χαλκός	3810.24	kg
Αλουμίνιο	2751.84	kg
Ηλεκτρική Ενέργεια	31752	kWh
Φυσικό Αέριο	174492	kWh
Power/transformer unit	28320	kg
Χάλυβας χαμηλού κράματος	14754.72	kg
Χάλυβας (ηλεκτρικού φούρνου)	5522.4	kg
Χαλκός	5409.12	kg
Αλουμίνιο	1529.28	kg
Πολυαιθυλένιο μεγάλης πυκνότητας	1104.48	kg
Επεξεργασία Χαλκού	5409.12	kg

Επεξεργασία Χάλυβα	20277.12	kg
KINOYΜΕΝΑ ΜΕΡΗ		
Νερό	39061.64	kg
Φυσικό Αέριο	13460.43	kWh
Ηλεκτρική Ενέργεια	17947.24	kWh
Θερμότητα	1319.65	kWh

4.11.1. Πύργος

Ο πύργος αποτελεί τον κορμό της ανεμογεννήτριας. Πάνω σε αυτόν στηρίζονται το κέλυφος και στη βάση του συνδέεται με τις κατασκευές θεμελίωσης για την στερέωση του. Το βάρος του πύργου στην παρούσα εργασία είναι 250 τόνοι. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.11.1 ο πύργος αποτελείται από 245.5 τόνους χάλυβα χαμηλού κράματος και 4.5 τόνους αλουμίνιο.

4.11.2. Ρότορας

Ο ρότορας αποτελείται από τον κώνο και τις πτέρυγες. Ο κώνος είναι η «μύτη» του επάνω μέρους της ανεμογεννήτριας πάνω στον οποίο στηρίζονται οι πτέρυγες και συνδέεται και με το κέλυφος. Ο κώνος έχει βάρος 52.25 τόνους και οι τρεις πτέρυγες ζυγίζουν 57.75 τόνους. Αναλυτικότερα, οι πτέρυγες αποτελούνται κυρίως από 38.755 τόνους ινών υάλου και 15.246 τόνους εποξικής ρητίνης. Ο κώνος έχει ως βασικά υλικά τον χυτοσίδηρο με τιμή 24.087 τόνους, τον χρωμοχάλυβα με 14.055 τόνους και τον χάλυβα χαμηλού κράματος με 12.696 τόνους.

4.11.3. Κέλυφος

Το κέλυφος βρίσκεται στο επάνω μέρος της ανεμογεννήτριας και περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια, τους άξονες ταχύτητας, τον ελεγκτή και το φρένο. Ο ρότορας συνδέεται με το κέλυφος της ανεμογεννήτριας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για το κέλυφος είναι κατά φθίνουσα σειρά ο χυτοσίδηρος, ο χάλυβας χαμηλού κράματος, ο χρωμοχάλυβας και ο χαλκός με τιμές 99.066 τόνους, 94.832 τόνους, 5.927 τόνους και 3.810 τόνους αντίστοιχα.

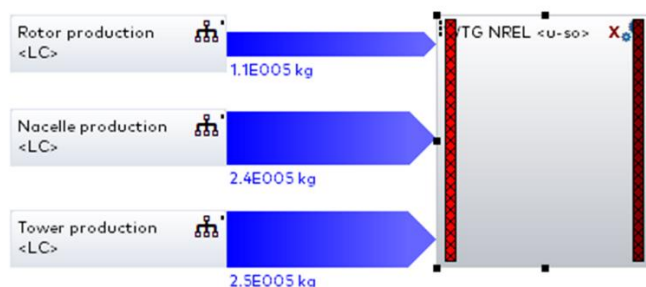
4.11.4. Κινούμενα Μέρη

Το κέλυφος και ο κώνος εκτός από τα βασικά μέρη αποτελούνται και από κινούμενα. Σε αυτά συγκαταλέγονται εισροές όπως το νερό, το φυσικό αέριο και η χρήση ενέργειας.

4.11.5. Παρουσίαση GaBi

Τα παραπάνω μέρη της ανεμογεννήτριας αποτελούνται από τις εισροές που περιεγράφηκαν ήδη, παρουσιάζονται στην επιφάνεια του λογισμικού GaBi.

WTG NREL production
Process plan: Mass [kg]
The names of the basic processes are shown.



Εικόνα 10, Πλάνο δημιουργίας A/Γ

Αναλυτικότερα, στην επιφάνεια εργασίας του GaBi υπάρχουν τρία πλάνα που αφορούν τα μέρη της ανεμογεννήτριας και μία διεργασία που ονομάζεται WTG NREL (Ανεμογεννήτρια NREL). Τα πλάνα συνθέτουν την διεργασία και για αυτό τον λόγο καταλήγουν σε αυτή. Το κάθε πλάνο περιέχει άλλες διεργασίες με τις εισροές τους. Για παράδειγμα παρουσιάζεται παρακάτω το πλάνο για τον ρότορα.



Εικόνα 11, Εισροές ρότορα

Στο πλάνο του ρότορα που αναλύεται παραπάνω διακρίνονται τέσσερις διεργασίες. Οι τρεις πρώτες αφορούν στην κατασκευή των εξαρτημάτων τα οποία είναι οι πτέρυγες, ο κώνος (hub) και τα κινούμενα μέρη και οι οποίες ενώνονται κάτω στην διεργασία του ρότορα στην οποία καταλήγουν οι τρεις πρώτες διεργασίες. Στο αριστερό μέρος της κάθε μίας υπάρχουν οι εισροές για την κατασκευή του κάθε μέρους όπως παρουσιάστηκε και στους πίνακες των αντίστοιχων υποκεφαλαίων. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται και όλα τα υπόλοιπα μέρη που συνιστούν το υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο λογισμικό GaBi.

4.12. Καλώδια

Το παραγόμενο από την ανεμογεννήτρια ρεύμα μεταφέρεται μέσω των καλωδίων αρχικά στον θαλάσσιο υποσταθμό και μετά στο χερσαίο μέρος της χώρας. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί τύποι καλωδίων. Τα εσωτερικά καλώδια βρίσκονται μέσα στον πύργο των ανεμογεννητριών και συνδέονται μεταξύ όλων στο αιολικό πάρκο. Τα εξωτερικά καλώδια μεταφέρουν το ρεύμα από το κεντρικό σημείο συλλογής για περαιτέρω μεταφορά στο ηλεκτρικό δίκτυο.

4.12.1. Εσωτερικά Καλώδια

Για την δημιουργία του πλάνου των εσωτερικών καλωδίων στο λογισμικό GaBi είναι απαραίτητη η καταγραφή όλων των εισροών για την κατασκευή τους. Τα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν είναι της τάξεως των 33 kV και διαμέτρου 400 mm². Χρησιμοποιώντας το μοντέλο (Victor Kouloumpis, Adisa Azaragic, 2021) υπολογίστηκαν τα δεδομένα για τις εισροές που χρησιμοποιήθηκαν για 81 χιλιόμετρα εσωτερικών καλωδίων.

Πίνακας 2, LCI εσωτερικών καλωδίων

Χάλυβας χαμηλού κράματος	880125.737	kg
Χαλκός	536651.265	kg
Μόλυβδος	640532.437	kg
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας	137332.791	kg
Πολυπροπυλένιο	89329.350	kg
Επικάλυψη Ψευδάργυρου	33506.387	m ²
Ηλεκτρική Ενέργεια	2598049	kWh
Θερμότητα	17745630	MJ

4.12.2. Εξωτερικά Καλώδια

Τα εξωτερικά καλώδια ξεκινούν από τον θαλάσσιο υποσταθμό για την μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος αρχικά στο πλησιέστερο νησί και από εκεί στο προβλεπόμενο χερσαίο σημείο της ηπειρωτικής χώρας. Τα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν είναι τις τάξεως των 150 kV και έχουν διάμετρο 1000 mm². Η παρούσα εργασία ερευνά δύο σενάρια ένα για υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη Λήμνο και ένα στη Μύκονο. Για το λόγο αυτό τα υλικά που χρησιμοποιούνται θα είναι διαφορετικά, αφού στο πρώτο σενάριο η χερσαία απόσταση είναι 120 χιλιόμετρα, ενώ στη δεύτερη είναι 130 χιλιόμετρα. Και στις δύο περιπτώσεις η απόσταση από τον θαλάσσιο υποσταθμό στο νησί είναι 5 χιλιόμετρα.

1^η Περίπτωση (ΥΑΠ Λήμνου)

Πίνακας 3, LCI εξωτερικών καλωδίων Λήμνου

Χάλυβας χαμηλού κράματος	3047587.500	kg
Χαλκός	268187.700	kg
Μόλυβδος	13194.835	kg

Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας	3274.958	kg
Πολυπροπυλένιο	1130.188	kg
Επικάλυψη Ψευδάργυρου	703962.237	m ²
Ηλεκτρική Ενέργεια	12785048	kWh
Θερμότητα	87326617	MJ

2^η Περίπτωση (ΥΑΠ Μυκόνου)

Πίνακας 4, LCI εξωτερικών καλωδίων Μυκόνου

Χάλυβας χαμηλού κράματος	3291394	kg
Χαλκός	289642.716	kg
Μόλυβδος	14250.422	kg
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας	3536.955	kg
Πολυπροπυλένιο	1220.603	kg
Επικάλυψη Ψευδάργυρου	760279.216	m ²
Ηλεκτρική Ενέργεια	13807851	kWh
Θερμότητα	94312746	MJ

4.13. Θαλάσσιος Υποσταθμός

Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο παράγει ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μεταφέρεται μέσω καλωδίων μέσα στον πυλώνα των ανεμογεννητριών. Τα καλώδια αυτά συνδέονται υπογείως και μεταξύ τους και το καταλήγουν στον θαλάσσιο υποσταθμό ρεύματος. Για να μπορεί το ηλεκτρικό ρεύμα να τροφοδοτήσει το ηλεκτρικό δίκτυο, θα πρέπει η τάση του να ανυψωθεί. Αυτή η διεργασία γίνεται στον υποσταθμό. Όπως και στα

προηγούμενα υποκεφάλαια, έτσι και σε αυτό παρουσιάζεται παρακάτω ο πίνακας με τα στοιχεία που χρειάζονται για την κατασκευή του θαλάσσιου υποσταθμού.

Πίνακας 5, LCI θαλάσσιου υποσταθμού

Χάλυβας χαμηλού κράματος	316733	kg
Χάλυβας	2080007	kg
Επεξεργασία Χάλυβα	2396740	kg
Αλουμίνιο	162029	kg
Χαλκός	98155	kg
Επεξεργασία Χαλκού	98155	kg
Λιπαντικό	273076	kg

4.14. Βάσεις Θεμελίωσης

Η βασική διαφορά των δύο πάρκων που μελετώνται είναι η βάση θεμελίωσης. Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Λήμνου έχει ως βάση θεμελίωσης τη διάταξη μονής στήλης (monopile), ενώ το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Μυκόνου είναι πλωτό με βάση Spar Buoy.

4.14.1. ΥΑΠ Λήμνου – Monopile

Η διάταξη μονής στήλης που χρησιμοποιείται στο πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο αποτελεί μία από τις συνηθέστερες μορφές συστήματος θεμελίωσης. Τοποθετείται σε σχετικά μικρά βάθη από 25-60 μέτρα. Τα βασικά κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης είναι δύο. Το πρώτο αφορά την απλότητα της κατασκευής. Το monopile είναι ένας τυποποιημένος κυλινδρικός σχεδιασμός, κάτι που προσφέρει μείωση στο κόστος και στον χρόνο κατασκευής. Η απλότητα του σχεδιασμού του, σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα θεμελίωσης, οδηγεί και στο δεύτερο κριτήριο επιλογής που είναι η προσαρμοστικότητα του σχεδίου σε μικρά βάθη. Αλλαγές σε διαστάσεις, χαρακτηριστικά και υλικά μπορούν εύκολα να γίνουν χάρη στην ευκολία της παρούσας κατασκευής.

Για την κατασκευή του μοντέλου monopile στο λογισμικό GaBi χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο (Victor Kouloumpis, Adisa Azaragic, 2021) για την εκτίμηση των τιμών των

εισορών . Σύμφωνα με την παραδοχή το μήκος του πυλώνα είναι 68,4 μέτρα και το βάρος του 516 τόνοι. Η κατασκευή αυτή αποτελείται και από ένα μεταβατικό κομμάτι, το οποίο αποτελεί το σημείο ένωσης του πυλώνα της ανεμογεννήτριας με τον πυλώνα της βάσης. Το συγκεκριμένο κομμάτι έχει μήκος 24 μέτρα και βάρος 300 τόνους. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις εισροές της διάταξης μονής στήλης.

Πίνακας 6, LCI βάσης θεμελίωσης monopile

Χάλυβας χαμηλού κράματος	64245312	kg
Επεξεργασία χάλυβα (έλαση)	64245312	kg
Επεξεργασία χάλυβα (συγκόλληση)	7484.4	m
Άμμος	991440	kg
Τσιμέντο	859248	kg

4.14.2. ΥΑΠ Μυκόνου – Floating

Στο δεύτερο πάρκο που εξετάζεται ερευνητικά, ως σύστημα θεμελίωσης είναι η πλωτή βάση Spar Buoy. Με τη χρήση αυτού του συστήματος το υπεράκτιο αιολικό πάρκο μπορεί να εγκατασταθεί σε βάθη μεγαλύτερα των 150 μέτρων. Η επιλογή πλωτών συστημάτων γίνεται κυρίως για λόγους αποδοτικότητας, αφού οι συντελεστές απόδοσης σε μεγάλα βάθη είναι υψηλοί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ένα εξίσου σημαντικό κριτήριο είναι ότι τα βάθη στα ελληνικά ύδατα είναι πολύ μεγάλα. Για το πάρκο που μελετάται, σε απόσταση 5 χιλιομέτρων από το νησί της Μυκόνου το βάθος του πυθμένα ξεπερνάει τα 150 μέτρα, επομένως η χρήση πλωτού συστήματος είναι η μόνη επιλογή. Το Spar ως διάταξη είναι εύκολη στην κατασκευή της και το κόστος εγκατάστασής της είναι μικρό σε σχέση με τις άλλες τρεις περιπτώσεις (tension-leg, barge, semi-submersible).

Η βάση θεμελίωσης Spar Buoy αποτελείται από το κέλυφος Spar, τις άγκυρες, τις αλυσίδες και τα συρματόσχοινα. Αναλυτικότερες πληροφορίες για το καθένα παρουσιάζονται παρακάτω.

- Spar: Είδη χάλυβα (χρωμιοχάλυβας)
- 3 άγκυρες τύπου Stevshark mk5
- 6 αλυσίδες από χρωμιοχάλυβα
- 3 συρματόσχοινα από χρωμιοχάλυβα

Τα παραπάνω μέρη μαζί με τα υλικά τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7, LCI βάσης θεμελίωσης Spar Buoy

Spar	6276000	Kg
Χρωμιοχάλυβας	900000	Kg
Χάλυβας Οπλισμού	2688000	Kg
Σκυρόδεμα	1120	Kg
Άγκυρες	17000	Kg
Χρωμιοχάλυβας	17000	Kg
Αλυσίδες	18975	Kg
Χρωμιοχάλυβας	18975	Kg
Συρματόσχοινα	59925	Kg
Χρωμιοχάλυβας	59925	Kg

4.15. Μεταφορά

Στο λογισμικό GaBi πέρα από τις εισροές υλικών και ενέργειας για την παραγωγή κάθε κομματιού της κατασκευής προστίθεται και ο τομέας της μεταφοράς. Αναλυτικότερα, τα κομμάτια που παράγονται μεταφέρονται στα νησιά μέσω φορτηγού και πλοίου. Το σημείο εκκίνησης είναι σε σημείο της κεντρικής Ευρώπης. Ενδεικτικές χώρες είναι η Δανία και η Γερμανία. Στην περίπτωση της Λήμνου τα εξαρτήματα μεταφέρονται μέχρι τη Θεσσαλονίκη που αποτελεί μεγάλο λιμάνι, ενώ στην περίπτωση της Μυκόνου μεταφέρονται μέχρι την Αθήνα. Με βάση αυτές τις παραδοχές και τις εκτιμήσεις για τις χιλιομετρικές αποστάσεις με την χρήση του GoogleMaps (REF) εκτιμήθηκαν οι ανάγκες για μεταφορά σε tkm πολλαπλασιάζοντας την μάζα των εξαρτημάτων επί τα χιλιόμετρα που πρέπει να μεταφερθούν όπως φαίνεται και στον Πίνακα ΥΥ.

Πίνακας 8, LCI στάδιο μεταφοράς Λήμνου

ΛΗΜΝΟΣ	Μεταφορά με φορτηγό (tkm)	Μεταφορά με πλοίο (tkm)
Πύργος	50625000	4050000

Ρότορας	22275000	1782000
Κέλυφος	48600000	3888000
Κινούμενα μέρη	85050000	4252500
Βάση Θεμελίωσης	165240000	28943438
Θαλάσσιος Υποσταθμός	7325000	586000
Εσωτερικά Καλώδια	5709929	216343 (Συνολική τιμή για εσωτερικά και εξωτερικά)
Εξωτερικά Καλώδια	10333463	

Πίνακας 9, LCI στάδιο μεταφοράς Μυκόνου

ΜΥΚΟΝΟΣ	Μεταφορά με φορτηγό (tkm)	Μεταφορά με πλοίο (tkm)
Πύργος	60750000	3037500
Ρότορας	26730000	1336500
Κέλυφος	58320000	2916000
Κινούμενα μέρη	70875000	5670000
Βάση Θεμελίωσης		77418585
Θαλάσσιος Υποσταθμός	8790000	468800
Εσωτερικά Καλώδια	6851915	617550 (Συνολική τιμή για εσωτερικά και εξωτερικά)
Εξωτερικά Καλώδια	10800136	

4.16. Εγκατάσταση

Επόμενο στάδιο της μεταφοράς των εξαρτημάτων αποτελεί η εγκατάσταση των καλωδίων. Σε αυτή τη διεργασία συνεπάγεται το σκάψιμο στον πυθμένα τα θάλασσας για την τοποθέτηση και σύνδεση των καλωδίων τόσο μεταξύ τους όσο και με τον υποσταθμό και το τελικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο (Victor Kouloumpis, Adisa Azaragic, 2021) για την εκτίμηση των τιμών των εισροών χρειάζονται 621000 m³ εκσκαφής με τη χρήση υδραυλικού εκσκαφέα. Η μεταφορά του μηχανήματος στο σημείο με πλοίο εισάγεται με 287070 tkm.

4.17. Λειτουργία & Συντήρηση

Ο τομέας της λειτουργίας & συντήρησης περιλαμβάνει την μεταφορά του πληρώματος στο σημείο του υπεράκτιου αιολικού πάρκου για επισκευές καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του πάρκου και την χρήση απαραίτητου λιπαντικού. Και στα δύο εξεταζόμενα σενάρια η μεταφορά του πληρώματος δε γίνεται με ελικόπτερο όπως συνηθίζεται σε ΥΑΠ που βρίσκονται μακριά από την ακτή, αλλά με πλοίο λόγω της εγγύτητας. Παρακάτω παρουσιάζεται ο αναλυτικός πίνακας των στοιχείων που εισάγονται και στο GaBi, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς με πλοίο.

Πίνακας 10, LCI στάδιο λειτουργίας & συντήρησης

Ποσότητα λιπαντικού ανά A/N ανά χρόνο	15,8	kg
Βάρος πληρώματος και εξοπλισμού	500	kg
Διαδρομές με πλοίο	31	Φορές
Συνολική ποσότητα λιπαντικού	25596	kg
Απόρριψη λιπαντικού κατά τη συντήρηση	25596	kg
Μεταφορά πληρώματος με πλοίο	155	tkm

4.18. End of Life

Το τέλος της ζωής των υλικών είναι το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης κύκλου ζωής. Περιλαμβάνει δυνητικά την διακομιδή των υλικών σε χώρους υγειονομικού ενδιαφέροντος (χωματερές), την αποτέφρωση και την ανακύκλωσή τους.

Μερικά υλικά υπόκεινται σε δύο ή τρεις μεθόδους για τη διαχείριση τους. Το αλουμίνιο είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Θεωρήθηκε ότι το 5% του αλουμινίου πηγαίνει σε χωματερές, το 5% πηγαίνει σε μονάδες αποτέφρωσης και το υπόλοιπο 90% ανακυκλώνεται. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο αλλά και τις τεχνικές εκθέσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (*European Commission Service Site, 2021*) για τα ποσοστά ανακύκλωσης εκτιμήθηκαν οι τιμές των εισροών που απαιτούνται.

Πίνακας 11, LCI υλικών προς διαχείριση

Υλικά για διαχείριση		
Αλουμίνιο	873300	kg
Χυτοσίδηρος	9975433	kg
Χρωμιοχάλυβας	1618565	kg
Χαλκός	1671217	kg
Ίνες ύαλου	3243240	kg
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας	230333	kg
Μόλυβδος	654783	kg
Λιπαντικό	298672	kg
Εποξική ρητίνη	1234926	kg
PolypropyleneΠολυπροπυλένιο	179427	kg
Χάλυβας Οπλισμού	2080007	kg
Χάλυβας (ηλεκτρικού φούρνου)	875966	kg
Χάλυβας χαμηλού κράματος	56728078	kg

Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις πίνακες, ένας για την κάθε διεργασία διαχείρισης των αποβλήτων. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται και τα ποσοστά που αναλύθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 12, LCI για χώρους υγειονομικού ενδιαφέροντος

Χώροι υγειονομικού ενδιαφέροντος		
Ίνες υάλου	100%	
Ύαλος από ίνες υάλου	2108106	kg
Πλαστικό από ίνες υάλου	1135134	kg
Εποξική ρητίνη	100%	
Πλαστικό από εποξικό χρώμα	1234926	kg
Μόλυβδος	5%	
Μόλυβδος σε χωματερή	32739	kg
Αλουμίνιο	5%	
Αλουμίνιο σε χωματερή	43665	kg
Χυτοσίδηρος	10%	
Χυτοσίδηρος σε χωματερή	997.543	kg
Χάλυβας	10%	
Χάλυβας σε χωματερή	5968405	kg
Χρωμιοχάλυβας	10%	
Χρωμιοχάλυβας σε χωματερή	161857	kg

Πίνακας 13, LCI για αποτέφρωση

Αποτέφρωση		
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας	100%	

Πλαστικά καλωδίων (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και πολυπροπυλένιο)	409760	kg
Μόλυβδος	5%	
Μόλυβδος για αποτέφρωση	32739	kg
Αλουμίνιο	5%	
Αλουμίνιο για αποτέφρωση	43665	
Χαλκός	10%	
Χαλκός για αποτέφρωση	167122	kg
Λιπαντικό	100%	
Λιπαντικό για αποτέφρωση	298672	kg

Πίνακας 14, LCI για ανακύκλωση

Ανακύκλωση	
Χαλκός	
Ποσοστό Ανακύκλωσης	90%
Ποσοστό δευτερεύοντος υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή	37%
Ποσοστό υλικού που χάθηκε κατά την διεργασία ανακύκλωσης	0%
Αποφευχθείσα παραγωγή πρωτογενούς υλικού	885745,1
Επιπρόσθετη διεργασία για την ανακύκλωση	885745,1
Αλουμίνιο	

Ποσοστό Ανακύκλωσης	90%
Ποσοστό δευτερεύοντος υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή	37%
Ποσοστό υλικού που χάθηκε κατά την διεργασία ανακύκλωσης	0%
Αποφευχθείσα παραγωγή πρωτογενούς υλικού	532712,8292
Επιπρόσθετη διεργασία για την ανακύκλωση	532713
Χάλυβας	
Ποσοστό Ανακύκλωσης	90%
Ποσοστό δευτερεύοντος υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή	54%
Ποσοστό υλικού που χάθηκε κατά την διεργασία ανακύκλωσης	0%
Αποφευχθείσα παραγωγή πρωτογενούς υλικού	20422108
Επιπρόσθετη διεργασία για την ανακύκλωση	21486259
Χυτοσίδηρος	
Ποσοστό Ανακύκλωσης	90%
Ποσοστό δευτερεύοντος υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή	54%
Ποσοστό υλικού που χάθηκε κατά την διεργασία ανακύκλωσης	0%
Αποφευχθείσα παραγωγή πρωτογενούς υλικού	3591156
Επιπρόσθετη διεργασία για την ανακύκλωση	3591156
Χρωμιοχάλυβας	

Ποσοστό Ανακύκλωσης	90%
Ποσοστό δευτερεύοντος υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή	54%
Ποσοστό υλικού που χάθηκε κατά την διεργασία ανακύκλωσης	0%
Αποφευχθείσα παραγωγή πρωτογενούς υλικού	582684
Επιπρόσθετη διεργασία για την ανακύκλωση	582684
Μόλυβδος	
Ποσοστό Ανακύκλωσης	90%
Ποσοστό δευτερεύοντος υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή	74%
Ποσοστό υλικού που χάθηκε κατά την διεργασία ανακύκλωσης	0%
Αποφευχθείσα παραγωγή πρωτογενούς υλικού	104765,26
Επιπρόσθετη διεργασία για την ανακύκλωση	104765

Τα παραπάνω δεδομένα βασίζονται σε υπολογισμούς «που περιλαμβάνουν την ποσότητα του υλικού που επιδέχεται ανακύκλωση και το ποσό του πρωτογενούς υλικού που μπορεί να αποφευχθεί έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να πιστωθεί για την αποφυγή των επιπτώσεων της παραγωγής του». (Victor Kouloumpis, Adisa Azaragic, 2021)

Κεφάλαιο 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιώντας τους πίνακες με τα καταγεγραμμένα δεδομένα και εκτιμήσεις για τις εισροές και εκροές του κάθε συστήματος δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα μοντέλα με το λογισμικό GaBi και υπολογίστηκαν τα αποτελέσματα για το κάθε σενάριο. Τα αποτελέσματα αφορούν στις δυνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα έχουν τα αντίστοιχα ΥΑΠ για διάφορες κατηγορίες όπως η κλιματική αλλαγή, ο ευτροφισμός και τα ποσά τοξικότητας που επηρεάζουν τους ανθρώπους. Το κάθε στάδιο της ΑΚΖ παρέχει διαφορετικές τιμές για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικής επίπτωσης που εξετάζεται.

5.1. Εισαγωγή

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού GaBi ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Στο γενικό πλάνο του κάθε ΥΑΠ γίνεται υπολογισμός των αποτελεσμάτων
- Για την ποσοτική ανάλυση επιλέγεται το “Quantity View”
- Για την επιλογή της περιβαλλοντικής μεθόδου επιλέγεται το “Environmental quantities”
- Τα αποτελέσματα αναλύονται με τη μέθοδο EF 3.0 (Environmental Footprint)
- Για την καλύτερη σύγκριση των δεδομένων που θα προκύψουν επιλέγεται η λειτουργία “Columns Relative”. Μέσω αυτής τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ποσοστά
- Με το εργαλείο “Weak point analysis” γίνεται χρωματική απεικόνιση των ποσοστών, κάτι που βοηθάει στο να γίνει γρήγορα ένας έλεγχος στους τομείς που συνεισφέρουν περισσότερο σε κάθε μία από τις περιβαλλοντικές κατηγορίες που εξετάζονται
- Τα αποτελέσματα εισάγονται στο excel
- Οι περιβαλλοντικές κατηγορίες που πρόκειται να εξεταστούν είναι οι ακόλουθες:
 - Acidification [Mole of H⁺ eq.]: Οξίνιση
 - Climate Change - total [kg CO₂ eq.]: Κλιματική αλλαγή
 - Ecotoxicity, freshwater - total [CTUe]: Οικοτοξικότητα γλυκού νερού - συνολική
 - Eutrophication, freshwater [kg P eq.]: Ευτροφισμός, γλυκού νερού
 - Eutrophication, marine [kg N eq.]: Ευτροφισμός, θάλασσας
 - Eutrophication, terrestrial [Mole of N eq.]: Ευτροφισμός, εδάφους
 - Human toxicity, cancer - total [CTUh]: Ανθρώπινη τοξικότητα, καρκινογόνος - συνολική
 - Human toxicity, non-cancer - total [CTUh]: Ανθρώπινη τοξικότητα, μη καρκινογόνος - συνολική
 - Ionising radiation, human health [kBq U235 eq.]: Ιοντίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία

- Land Use [Pt]: Χρήση γης
- Ozone depletion [kg CFC-11 eq.]: Απομείωση του όζοντος
- Particulate matter [Disease incidences]: Δημιουργία σωματιδίων
- Photochemical ozone formation, human health [kg NMVOC eq.]: Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος, ανθρώπινη υγεία
- Resource use, fossils [MJ]: Χρήση πόρων
- Resource use, mineral and metals [kg Sb eq.]: Χρήση πόρων, ορυκτά και μέταλλα
- Water use [m³ world equiv.]: Χρήση νερού
- Οι τιμές που προκύπτουν παρουσιάζονται παρακάτω σε πίνακες αντίστοιχα για το κάθε ΥΑΠ για τα πέντε στάδια της ΑΚΖ
- Συνολικός πίνακας τιμών που περιέχει όλες τις εισροές και εκροές παρατίθεται στο τέλος της εργασίας
- Για τις αριθμητικές τιμές των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται σε κάθε ενότητα διάγραμμα με τις τιμές αθροισμένες επί τοις 100
- Για την ευκολότερη ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών για τις πέντε κατηγορίες της ΑΚΖ χρησιμοποιείται η λειτουργία “Conditional Formatting – Color Scales”. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα “Heat Map” στον οποίο οι μεγαλύτερες τιμές παίρνουν αποχρώσεις του κόκκινου και οι μικρότερες αποχρώσεις του πράσινου
- Η πρώτη στήλη αποτελεσμάτων σε κάθε περίπτωση έχει την τιμή 100%, διότι αναφέρεται στην συνολική τιμή που δίνεται για το πάρκο και δεν λαμβάνεται υπόψιν στον θερμικό χάρτη. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που κάποια κατηγορία (πχ. Manufacturing) μπορεί να ξεπεράσει το 100% συγκριτικά με τις υπόλοιπες (πχ. End of Life) που μπορεί να παίρνουν αρνητικές τιμές και οι οποίες υποδηλώνουν περιβαλλοντικά κέρδη του συστήματος κυρίως λόγω των αποφευχθεισών επιβαρύνσεων για την εξόρυξη και απόκτηση νέων μετάλλων. Αθροιστικά οι πέντε κατηγορίες φτάνουν το 100%

5.2. ΥΑΠ Λήμνου

Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Λήμνου.

Επιπτώσεις ανά στάδιο κύκλου ζωής

Στο πρώτο κομμάτι παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές για κάθε περιβαλλοντική επίπτωση, τόσο για ολόκληρη την ΑΚΖ, όσο και για το κάθε ένα από τα στάδιά της ξεχωριστά και είναι υπολογισμένα από κιλοβατώρα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

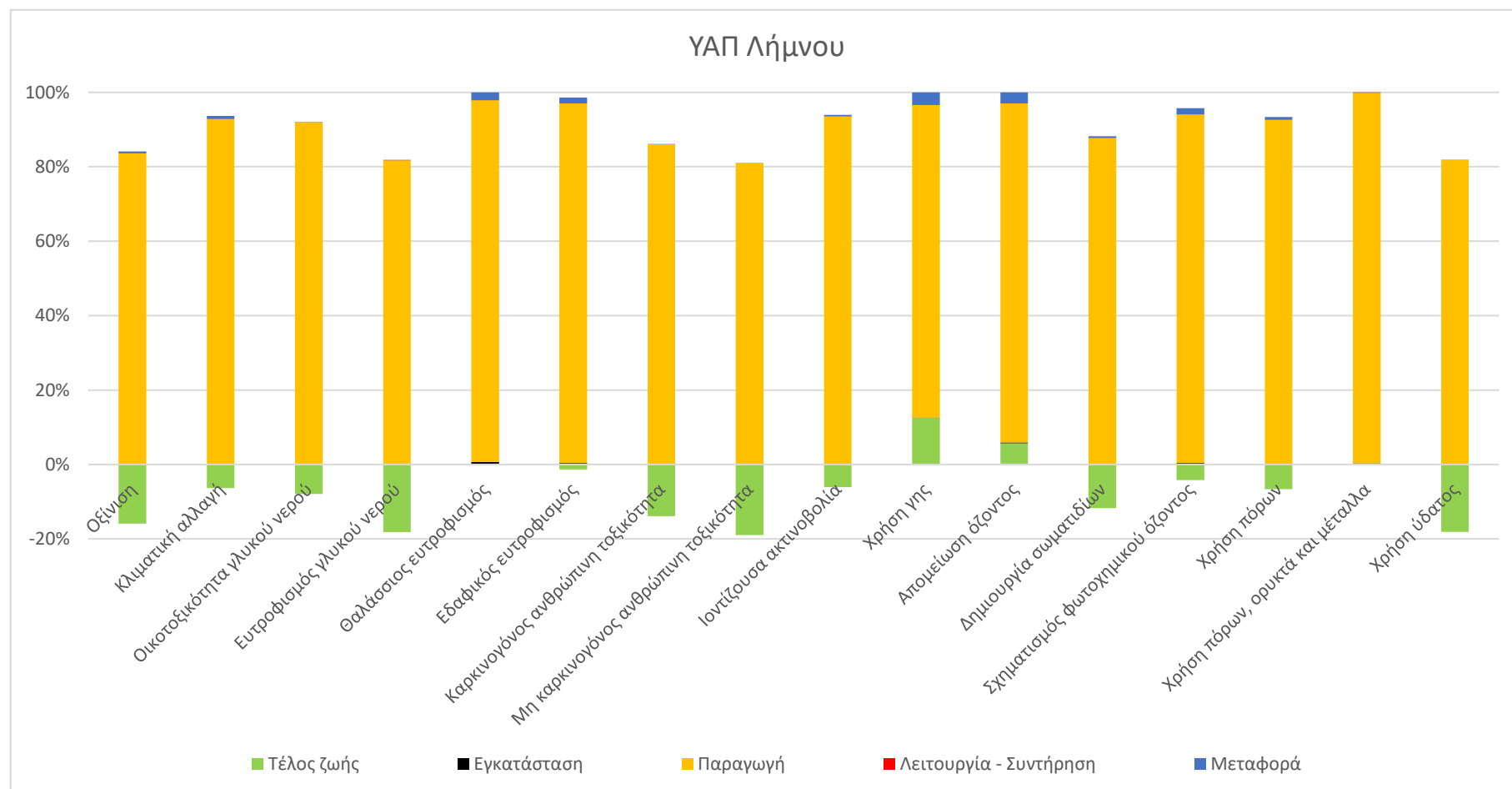
Πίνακας 15, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις για ΥΑΠ Λήμνου

	Συνολικά	Τέλος Ζωής	Εγκατάσταση	Παραγωγή	Λειτουργία - Συντήρηση	Μεταφορά
--	----------	------------	-------------	----------	---------------------------	----------

Οξίνιση	6,06E-05	-1,41E-05	1,02E-07	7,41E-05	8,18E-02	4,59E-02
Κλιματική αλλαγή	7,49E-03	-5,45E-04	9,87E-06	7,96E-03	3,44E-02	6,72E-02
Οικοτοξικότητα Γλυκού νερού	2,77E+00	-2,61E-01	5,19E-04	3,03E+00	3,25E-02	8,35E-04
Ευτροφισμός γλυκού νερού	5,40E-06	-1,54E-06	6,55E-10	6,92E-06	4,77E-12	1,68E-01
Θαλάσσιος ευτροφισμός	8,43E-06	1,62E-08	4,33E-08	8,20E-06	1,52E-11	1,78E-01
Εδαφικός ευτροφισμός	1,21E-04	-1,68E-06	4,75E-07	1,20E-04	1,63E-01	1,95E-01
Καρκινογόνος ανθρώπινη τοξικότητα	5,40E-11	-1,04E-11	3,65E-15	6,45E-11	1,02E-17	3,81E-14
Μη καρκινογόνος ανθρώπινη τοξικότητα	9,42E-10	-2,87E-10	1,40E-13	1,23E-09	1,77E-16	8,86E-13
Ιοντίζουσα ακτινοβολία	1,30E-03	-8,95E-05	3,60E-07	1,38E-03	2,84E-09	5,40E-06
Χρήση γης	3,39E-02	4,23E-03	2,36E-05	2,84E-02	7,93E-08	1,14E-03
Απομείωση όζοντος	5,38E-10	3,05E-11	1,50E-12	4,91E-10	6,45E-15	1,58E-11
Δημιουργία σωματιδίων	1,33E-09	-2,04E-10	2,77E-12	1,52E-09	5,87E-16	7,65E-12
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος	2,98E-05	-1,38E-06	1,31E-07	3,05E-05	2,30E-10	5,48E-07
Χρήση πόρων	1,31E-01	-9,97E-03	1,39E-04	1,39E-01	5,27E-07	1,05E-03
Χρήση πόρων, ορυκτά και μέταλλα	2,26E-07	7,83E-10	2,42E-12	2,25E-07	1,69E-13	1,68E-10
Χρήση ύδατος	1,61E+00	-4,57E-01	1,97E-04	2,06E+00	4,59E-09	5,19E-06

Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητός ο παραπάνω πίνακας παρατίθεται το διάγραμμα που ακολουθεί και έχει ως στήλες τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις με το κάθε στάδιο της ΑΚΖ να απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα δεν υπάρχει η πρώτη στήλη που αφορά ολόκληρη την ΑΚΖ, αλλά μόνο τα στάδια της. Η μορφή του διαγράμματος παρουσιάζει τις τιμές σε ποσοστά.

Διάγραμμα 1, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά στάδιο ΑΚΖ Λήμνου



Όπως παρατηρείται, το στάδιο της παραγωγής έχει το μεγαλύτερο αποτύπωμα σε όλες τις κατηγορίες, κάτι που είναι λογικό λόγω της ποσότητας των εισροών που χρησιμοποιούνται. Το στάδιο της μεταφοράς καταλαμβάνει ένα μικρό ποσοστό και γίνεται αισθητό κυρίως στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αφορούν το θαλάσσιο και τον εδαφικό ευτροφισμό, καθώς και στις κατηγορίες της χρήσης γης και της απομείωσης του όζοντος. Το στάδιο της εγκατάστασης αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό συγκριτικά με τις υπόλοιπες, ενώ το στάδιο της λειτουργίας & συντήρησης είναι σχεδόν αμελητέα. Τέλος, το στάδιο του τέλους της ζωής των υλικών εκτός από την δεύτερη θέση στις επιπτώσεις στην χρήση γης, την απομείωση του όζοντος και την χρήση πόρων (μετάλλων) είναι στις περισσότερες επιπτώσεις αρνητικό. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα πιστώνεται το παραγόμενο ανακυκλώσιμο υλικό ως αποφυγή εξόρυξης και δημιουργίας υλικών εκ νέου.

Επιπτώσεις για το στάδιο της παραγωγής για το κάθε υποστάδιο/εξάρτημα

Για το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Λήμνου όπως αναλύθηκε και παραπάνω, το στάδιο της ΑΚΖ με τις πιο έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι το στάδιο της παραγωγής. Λόγω του ότι η παραγωγή αποτελεί το κύριο στάδιο που ευθύνεται για τις επιπτώσεις, αναλύεται διεξοδικότερα παρακάτω με την βοήθεια ενός θερμικού χάρτη ο οποίος βοηθά στην εύκολη σύγκριση των επιμέρους υποσταδίων.

Πίνακας 16, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σταδίου παραγωγής, Λήμνος

	Εξωτερικά καλώδια προς το νησί	Εξωτερικά καλώδια προς Θεσ/νίκη	Βάση θεμελίωσης	Εσωτερικά καλώδια	Υποσταθμός	Ανεμογεννήτρια
Οξίνιση	0,67%	20%	24,20%	14,90%	3,60%	36,70%
Κλιματική αλλαγή	0,23%	7%	50,30%	2,61%	2,67%	37,20%
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	0,16%	5%	48,80%	3,94%	3,40%	39,00%
Ευτροφισμός γλυκού νερού	0,33%	10%	34,00%	12,90%	3,57%	39,40%
Θαλάσσιος ευτροφισμός	0,32%	10%	44,20%	5,06%	2,92%	37,90%
Εδαφικός ευτροφισμός	1,08%	33%	31,20%	5,43%	2,13%	27,60%
Καρκινογόνος ανθρώπινη τοξικότητα	0,14%	4%	46,90%	4,21%	2,45%	42,00%
Μη καρκινογόνος ανθρώπινη τοξικότητα	0,34%	10%	28,70%	17,40%	2,97%	40,20%
Ιοντίζουσα ακτινοβολία	0,39%	12%	47,00%	2,35%	2,05%	36,50%
Χρήση γης	0,29%	9%	39,30%	5,87%	3,03%	42,70%
Απομείωση όζοντος	0,34%	10%	42,00%	2,73%	3,60%	41,20%
Δημιουργία σωματιδίων	0,23%	7%	54,00%	2,02%	1,42%	35,50%
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος	0,23%	7%	44,80%	5,66%	3,81%	38,70%
Χρήση πόρων	0,26%	8%	49,30%	2,57%	2,41%	37,70%
Χρήση πόρων, ορυκτά και μέταλλα	0,58%	17%	17,60%	33,70%	2,66%	28,10%
Χρήση ύδατος	0,09%	3%	50,10%	0,62%	3,08%	43,50%

Μέσω του λογισμικού GaBi εξήχθησαν τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο στάδιο και παρουσιάζονται τα ποσοστά για κάθε υποστάδιο/εξάρτημα και πιο συγκεκριμένα για τις ανεμογεννήτριες, τις βάσεις θεμελίωσης, των υποσταθμών, των εσωτερικών καλωδίων που ενώνουν τις ανεμογεννήτριες, και των εξωτερικών καλωδίων προς το νησί και την ηπειρωτική χώρα.

Όπως παρατηρείται και στον αντίστοιχο θερμικό χάρτη:

- Το στάδιο της κατασκευής των βάσεων θεμελίωσης έχει τις μεγαλύτερες τιμές άρα και ευθύνεται για την πλειοψηφία των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται στο στάδιο της παραγωγής και συγκεκριμένα για το 50.3% της κλιματικής αλλαγής, το 48.8% της συνολικής οικοτοξικότητας του γλυκού νερού, το 44.2% του ευτροφισμού των θαλασσίων υδάτων, το 46.9% της συνολικής καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας, του 47% της ιονίζουσας ακτινοβολίας, του 42% της απομείωσης του όζοντος, του 54% της δημιουργίας σωματιδίων, του 44.8% του φωτοχημικού σχηματισμού όζοντος, του 49.3% της χρήσης ορυκτών πόρων και του 50.1% της χρήσης ύδατος
- Το στάδιο κατασκευής της ανεμογεννήτριας έχει τις μεγαλύτερες τιμές σε τέσσερις κατηγορίες και συγκεκριμένα το 36.7% της οξίνισης, το 39,4% του ευτροφισμού του γλυκού νερού, το 40.2% της μη καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας και του 42.7% της χρήση γης
- Σημαντικό μέρος καταλαμβάνει και η κατασκευή των εξωτερικών καλωδίων που ενώνουν τη Λήμνο με το σημείο της ηπειρωτικής Ελλάδας που συνδέονται. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτά οφείλεται το 33% του ευτροφισμού εδάφους
- Επίσης, η κατασκευή των εσωτερικών καλωδίων που ενώνουν τις ανεμογεννήτριες ευθύνονται για το 33.7% της χρήσης πόρων (μετάλλων και ορυκτών)
- Τις χαμηλότερες τιμές έχει η κατασκευή των εξωτερικών καλωδίων που ξεκινούν από τον θαλάσσιο υποσταθμό και καταλήγουν στο νησί της Λήμνου. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, αφού η απόσταση για να φτάσουν στο νησί είναι μόνο 5 χιλιόμετρα, άρα απαιτείται μικρότερη ποσότητα υλικών

Επιπτώσεις για το στάδιο της παραγωγής για τις κύριες ομάδες εισροών

Περαιτέρω ανάλυση εφαρμόστηκε για το στάδιο της παραγωγής σε επίπεδο εισροών (υλικών, παραγωγικών διεργασιών και ενέργειας) που χρειάζονται για την παραγωγή των εξαρτημάτων. Αθροίζοντας τις τιμές των ίδιων υλικών για το κάθε εξάρτημα και συμπληρώνονται τον πίνακα με τις τιμές σε ποσοστά επί τοις εκατό δημιουργήθηκε ο ακόλουθος θερμικός χάρτης για την ευκολότερη ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 17, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε υλικού, Λήμνος

	Οξίνιση	Κλιματική αλλαγή	Οικ. Γλ. Ν.	Ευτρ. Γλ. Ν.	Θαλάσσιος ευτρ.	Εδαφικός ευτρ.	Καρκινογόνος Α.Τ.	Μη καρκινογόνος Α.Τ.	Ιοντίζουσα ακτ.	Χρήση γης	Απ. Όζοντος	Δημ. Σωματιδίων	Σχημ. Φωτ. Όζοντος	Χρ. πόρων	Χρ. πόρων, ορυκτά, μέταλλα	Χρήση ύδατος
Αλουμίνιο	2,02%	3,50%	13,61%	1,76%	2,44%	1,68%	0,95%	0,77%	5,20%	1,65%	4,12%	2,31%	2,27%	2,80%	0,14%	15,36%
Χυτοσίδηρος	2,27%	5,30%	0,33%	2,81%	4,94%	3,39%	9,94%	6,91%	2,73%	6,06%	4,60%	2,20%	6,36%	4,64%	0,36%	0,00%
Τσιμέντο	0,05%	0,21%	0,00%	0,03%	0,12%	0,10%	0,00%	0,01%	0,06%	0,05%	0,06%	0,01%	0,10%	0,05%	0,01%	0,00%
Χαλκός	40,91%	2,67%	9,34%	37,39%	10,65%	10,16%	8,93%	42,86%	0,52%	9,28%	2,23%	3,13%	13,30%	2,10%	29,37%	0,01%
Χρωμοχάλυβας	1,61%	2,47%	2,74%	1,32%	2,44%	1,76%	7,24%	0,95%	2,83%	2,22%	2,35%	6,75%	2,12%	2,25%	2,77%	10,07%
Ντίζελ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,04%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
Ηλεκτρική ενέργεια	1,92%	4,16%	0,12%	3,24%	3,34%	2,14%	0,13%	0,23%	15,96%	6,18%	3,82%	0,28%	2,21%	5,83%	0,22%	0,01%
Εποξική ρητίνη	0,93%	2,06%	0,29%	0,76%	1,66%	1,17%	0,46%	0,17%	0,92%	1,53%	4,90%	0,41%	1,98%	2,45%	0,88%	0,00%
Ινες υάλου	1,83%	2,27%	0,07%	0,97%	3,47%	2,44%	0,29%	0,87%	2,44%	1,63%	3,04%	0,58%	2,66%	2,19%	0,74%	0,00%
Μόλυβδος	1,25%	0,50%	0,39%	0,76%	0,75%	0,56%	0,87%	3,71%	0,19%	1,85%	0,52%	0,22%	0,66%	0,35%	24,42%	0,00%
Λιπαντικό έλαιο	0,08%	0,11%	0,01%	0,04%	0,12%	0,09%	0,01%	0,01%	0,17%	0,21%	1,11%	0,03%	0,62%	0,32%	0,06%	0,00%
Θερμότητα	0,21%	2,17%	0,01%	0,03%	0,56%	0,42%	0,02%	0,01%	0,14%	0,17%	5,20%	0,03%	0,55%	2,05%	0,03%	0,00%
Κάυσιμα	0,17%	0,35%	0,01%	0,01%	0,26%	0,19%	0,01%	0,01%	0,07%	0,19%	5,56%	0,02%	0,36%	1,74%	0,01%	0,00%
Πολυαιθυλένιο	0,06%	0,15%	0,00%	0,03%	0,09%	0,07%	0,01%	0,00%	0,06%	0,04%	0,05%	0,02%	0,13%	0,31%	0,04%	0,00%
Πολυπροπυλένιο	0,05%	0,13%	0,02%	0,00%	0,08%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,12%	0,24%	0,00%	0,00%
Άμμος	0,14%	0,15%	0,01%	0,05%	0,27%	0,21%	0,01%	0,01%	0,04%	1,68%	0,25%	0,08%	0,23%	0,11%	0,02%	0,00%
Χάλυβας	31,29%	64,37%	72,08%	44,43%	56,32%	40,17%	65,53%	41,98%	58,83%	47,42%	50,00%	78,22%	56,40%	63,50%	25,54%	74,47%
Νερό	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Ξυλεία	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%	0,11%	0,08%	0,00%	0,00%	0,01%	8,94%	0,09%	0,04%	0,10%	0,02%	0,00%	0,00%
Διαδικασίες	15,25%	9,26%	0,99%	6,24%	12,22%	35,57%	5,13%	1,63%	9,83%	10,90%	12,08%	5,63%	9,83%	9,03%	15,41%	0,04%
Διαχείριση υλικών	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Οι κατηγορίες των εισροών που εξετάζονται είναι οι ακόλουθες: αλουμίνιο, χυτοσίδηρος, τσιμέντο, χαλκός, χρωμιοχάλυβας, ντίζελ, ηλεκτρική ενέργεια, εποξική ρητίνη, ίνες ύαλου, μόλυβδος, λιπαντικό, θερμότητα, ορυκτά καύσιμα, πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο, άμμος, χάλυβας, νερό, ξύλο, παραγωγικές διεργασίες και διαχείριση/επεξεργασία ορισμένων αποβλήτων.

Σύμφωνα με τον θερμικό χάρτη προκύπτουν τα εξής:

- Τη μεγαλύτερη συνεισφορά την έχει ο χάλυβας σχεδόν σε όλους τους τομείς εκτός από τρεις κατηγορίες επιπτώσεων, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα εξαρτήματα και κυρίως οι βάσεις θεμελίωσης, ο πύργος των ανεμογεννητριών αποτελείται από διάφορα είδη χάλυβα όπως χάλυβα χαμηλού κράματος, οπλισμό σκυροδέματος, κτλ.
- Δεύτερο σε συνεισφορά βρίσκεται ο χαλκός, ο οποίος στις κατηγορίες της οξίνισης, της μη καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας και της χρήσης πόρων (μετάλλων) έχει τιμές μεγαλύτερες και από τον χάλυβα, 40,91%, 42,86% και 29,37% αντίστοιχα
- Στην κατηγορία των παραγωγικών διεργασιών συμπεριλαμβάνονται η έλαση των φύλλων χάλυβα και χαλκού, η περιέλιξη των καλωδίων κτλ. Η συνεισφορά τους δεν είναι αμελητέα και μερικές φορές κυμαίνεται σε σχετικά σημαντικά ποσοστά που φτάνουν μέχρι και 35,57% στην περίπτωση του χερσαίου ευτροφισμού.
- Το αλουμίνιο παίζει σημαντικό ρόλο στις κατηγορίες της οικοτοξικότητας γλυκού νερού και στην χρήση νερού με ποσοστά 13,61% και 15,36% αντίστοιχα
- Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας συνεισφέρει με ποσοστό 15,96% στον τομέα της ιοντίζουσας ακτινοβολίας
- Ο χρωμιοχάλυβας συνεισφέρει κυρίως στον τομέα της χρήσης νερού με 10,07%, ενώ οι τιμές του στις υπόλοιπες περιβαλλοντικές επιπτώσεις βρίσκονται κοντά στο 2%
- Ο μόλυβδος μόνο σε μία κατηγορία συνεισφέρει σημαντικά και αυτή είναι η χρήση πόρων (μετάλλων) με ποσοστό 24,42%, ενώ στις υπόλοιπες περιβαλλοντικές επιπτώσεις οι τιμές του είναι κοντά στο 1%

5.3. ΥΑΠ Μυκόνου

Όπως και στην προηγούμενη υποενότητα, έτσι και εδώ, αρχικά παρουσιάζεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα για το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Μυκόνου που εξάγονται από το GaBi και υπολογισμένα από κλοβατώρα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το γράφημα με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις με χρήση ποσοστών και ολοκληρώνεται η ανάλυση με την παράθεση των δύο θερμικών χαρτών.

Επιπτώσεις ανά στάδιο κύκλου ζωής

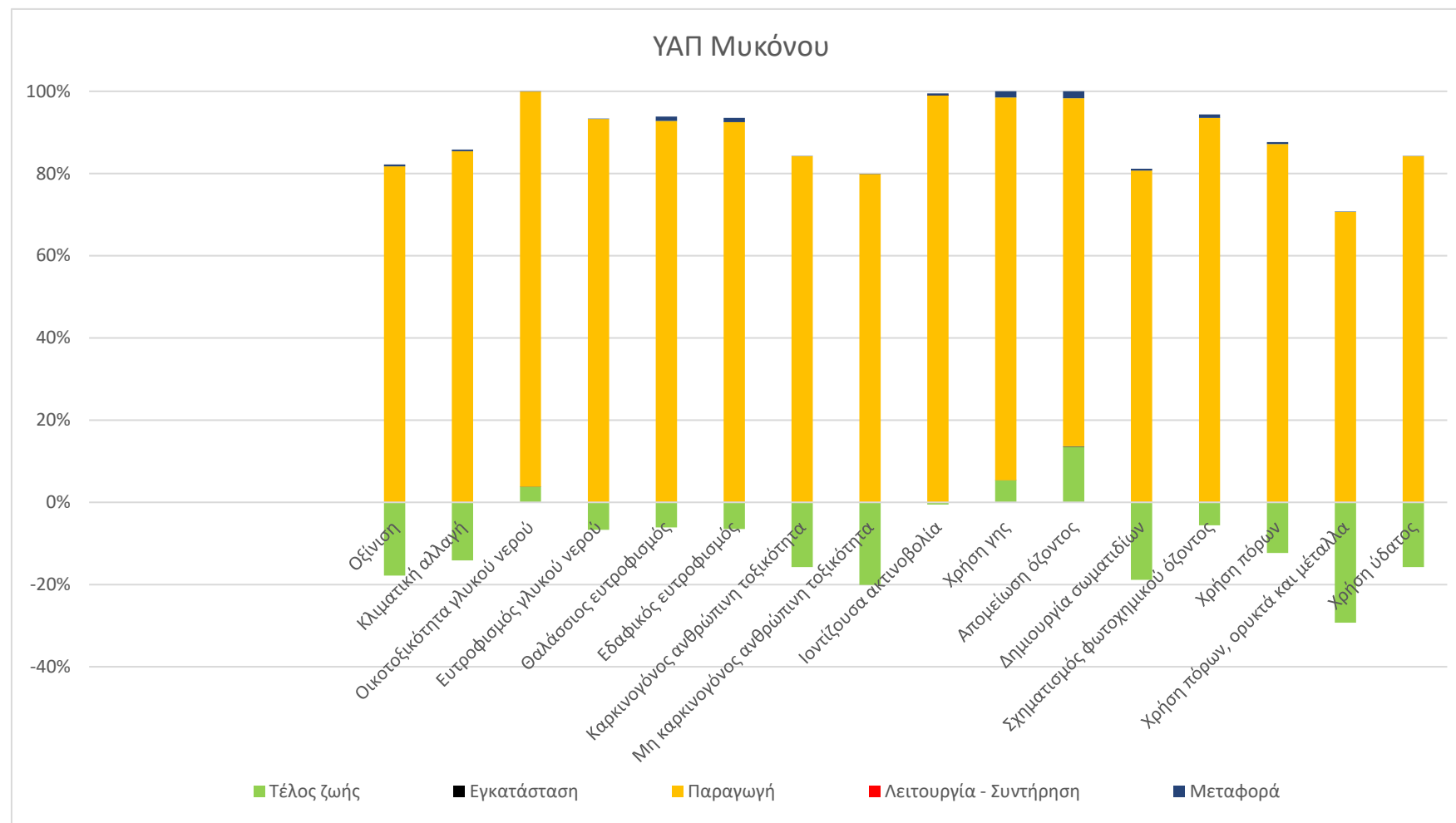
Πίνακας 18, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις για ΥΑΠ Μυκόνου

	Συνολικά	Τέλος Ζωής	Εγκατάσταση	Παραγωγή	Συντήρηση - Λειτουργία	Μεταφορά
Οξίνιση	1,25E-04	-3,47E-05	8,79E-02	1,59E-01	8,00E-02	7,82E-02
Κλιματική αλλαγή	2,08E-02	-4,11E-03	8,53E-02	2,48E-02	3,37E-02	1,14E-01
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	2,23E+00	8,47E-02	4,49E-04	2,15E+00	3,17E-02	1,42E-03
Ευτροφισμός γλυκού νερού	1,24E-05	-9,49E-07	5,66E-02	1,33E-01	4,66E-12	7,44E-03
Θαλάσσιος ευτροφισμός	2,55E-05	-1,77E-06	3,76E-02	2,69E-02	1,49E-11	3,05E-02
Εδαφικός ευτροφισμός	2,86E-04	-2,12E-05	4,11E-02	3,03E-04	1,60E-01	3,33E-02
Καρκινογόνος ανθρώπινη τοξικότητα	2,29E-10	-5,28E-11	3,17E-15	2,82E-02	9,93E-18	6,48E-14
Μη καρκινογόνος ανθρώπινη τοξικότητα	1,03E-09	-3,47E-10	1,21E-13	1,38E-09	1,73E-16	1,51E-12
Ιοντίζουσα ακτινοβολία	1,88E-03	-1,02E-05	3,11E-07	1,88E-03	2,78E-09	9,16E-06
Χρήση γης	1,30E-01	6,94E-03	2,05E-05	1,21E-01	7,76E-08	1,96E-03

Απομείωση όζοντος	1,62E-09	2,19E-10	1,30E-12	1,37E-09	6,30E-15	2,68E-11
Δημιουργία σωματιδίων	1,78E-09	-5,38E-10	2,40E-12	2,30E-09	5,74E-16	1,31E-11
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος	9,95E-05	-6,28E-06	1,13E-07	1,05E-04	2,25E-10	9,39E-07
Χρήση πόρων	2,99E-01	-4,87E-02	1,20E-04	3,45E-01	5,15E-07	1,79E-03
Χρήση πόρων, ορυκτά και μέταλλα	3,29E-07	-2,33E-07	2,10E-12	5,61E-07	1,66E-13	2,78E-10
Χρήση ύδατος	8,17E-01	-1,88E-01	1,70E-04	1,01E+00	4,49E-09	8,78E-06

Με βάση το διάγραμμα Stack 100%, παρατηρείται ότι και πάλι το στάδιο της κατασκευής των μερών του ΥΑΠ καταλαμβάνει τα μεγαλύτερα ποσοστά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Όπως και στο ΥΑΠ της Λήμνου έτσι και εδώ, το στάδιο της μεταφοράς παρατηρείται κυρίως στις περιπτώσεις της χρήσης γης και της απομείωσης του όζοντος. Οι τιμές για εγκατάσταση και συντήρηση - λειτουργία είναι σχεδόν αμελητέες συγκριτικά με τις υπόλοιπες φάσεις. Τέλος, το στάδιο του τέλους ζωής έχει και πάλι στην πλειοψηφία αρνητικές τιμές, εκτός από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις: οικοτοξικότητα γλυκού νερού, χρήση γης και απομείωση του όζοντος.

Διάγραμμα 2, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά στάδιο ΑΚΖ Μυκόνου



Επιπτώσεις για το στάδιο της παραγωγής για το κάθε υποστάδιο/εξάρτημα

Και στην περίπτωση της Μυκόνου, το στάδιο της παραγωγής παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές. Ακολουθεί το στάδιο της μεταφοράς με πολύ μικρότερα ποσοστά. Ωστόσο, το ενδιαφέρον βρίσκεται στο στάδιο της ολοκλήρωσης ζωής των προϊόντων κατά την οποία στην κατηγορία της απομείωση του όζοντος βρίσκεται η δεύτερη μεγαλύτερη τιμή.

Πίνακας 19, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σταδίου παραγωγής, Μύκονος

	Εξωτερικά καλώδια προς το νησί	Εξωτερικά καλώδια προς Αθήνα	Βάση θεμελίωσης	Εσωτερικά καλώδια	Υποσταθμός	Ανεμογεννήτρια
Οξίνιση	0,30%	7,87%	66,70%	6,80%	1,64%	16,70%
Κλιματική αλλαγή	0,07%	1,91%	84,40%	1,06%	0,84%	11,70%
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	0,22%	5,67%	30,10%	5,46%	4,70%	53,90%
Ευτροφισμός γλυκού νερού	0,17%	4,30%	67,10%	6,59%	1,81%	20,10%
Θαλάσσιος ευτροφισμός	0,10%	2,49%	83,70%	1,57%	0,87%	11,30%
Εδαφικός ευτροφισμός	0,42%	10,90%	75,00%	2,16%	0,82%	10,70%
Καρκινογόνος ανθρώπινη τοξικότητα	0,03%	0,84%	88,30%	0,94%	0,55%	9,37%
Μη καρκινογόνος ανθρώπινη τοξικότητα	0,30%	7,76%	39,20%	15,10%	2,59%	35,00%
Ιοντίζουσα ακτινοβολία	0,28%	7,33%	62,90%	1,72%	1,48%	26,30%
Χρήση γης	0,07%	1,76%	86,20%	1,37%	0,70%	9,86%
Απομείωση όζοντος	0,12%	3,06%	79,50%	1,61%	1,26%	14,40%
Δημιουργία σωματιδίων	0,15%	3,84%	70,90%	1,31%	0,92%	22,90%
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος	0,07%	1,68%	84,50%	1,67%	1,09%	11,00%
Χρήση πόρων	0,10%	2,64%	80,10%	1,30%	0,95%	14,90%
Χρήση πόρων, ορυκτά και μέταλλα	0,23%	5,93%	68,60%	13,20%	1,04%	11,00%
Χρήση ύδατος	0,17%	4,47%	0,70%	1,25%	6,17%	87,20%

Ο θερμικός χάρτης για τη Μύκονο παρουσιάζει μερικές διαφορές με τον αντίστοιχο της Λήμνου:

- Το στάδιο κατασκευής των βάσεων θεμελίωσης έχει τις μεγαλύτερες τιμές εκτός από δύο περιπτώσεις. Η πρώτη αφορά την οικοτοξικότητα γλυκού νερού, κατά την οποία η μεγαλύτερη τιμή βρίσκεται στο στάδιο κατασκευής της ανεμογεννήτριας, με τιμή 53,9%. Η δεύτερη αφορά την χρήση νερού, που τη μεγαλύτερη τιμή κατέχει με διαφορά η κατασκευή ανεμογεννήτριας, με ποσοστό 87,2%.
- Η κατασκευή των ανεμογεννητριών έχει εξίσου μεγάλη τιμή που αφορά την περιβαλλοντική επίπτωση της μη καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας, με ποσοστό 35%
- Σημαντικό ρόλο παίζει και το στάδιο της κατασκευής καλωδίων που ενώνουν το νησί της Μυκόνου με την ηπειρωτική Ελλάδα στο σημείο της Αθήνας για την περιβαλλοντική επίπτωση του εδαφικού ευτροφισμού με τιμή 10,9%
- Στον τομέα της μη καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας με ποσοστό 15,1% καταλαμβάνει την τρίτη θέση η παραγωγή των εσωτερικών καλωδίων

Επιπτώσεις για το στάδιο της παραγωγής για τις κύριες ομάδες εισροών

Όπως και στην προηγούμενη υποενότητα έτσι και εδώ γίνεται περαιτέρω ανάλυση που αφορά όλες τις εισροές για το στάδιο της παραγωγής. Τα υλικά είναι τα ίδια, οπότε και ο χάρτης θα έχει την ίδια μορφή, με ποσοστά επί τοις εκατό. Ο θερμικός χάρτης παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 20, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε υλικού, Μύκονος

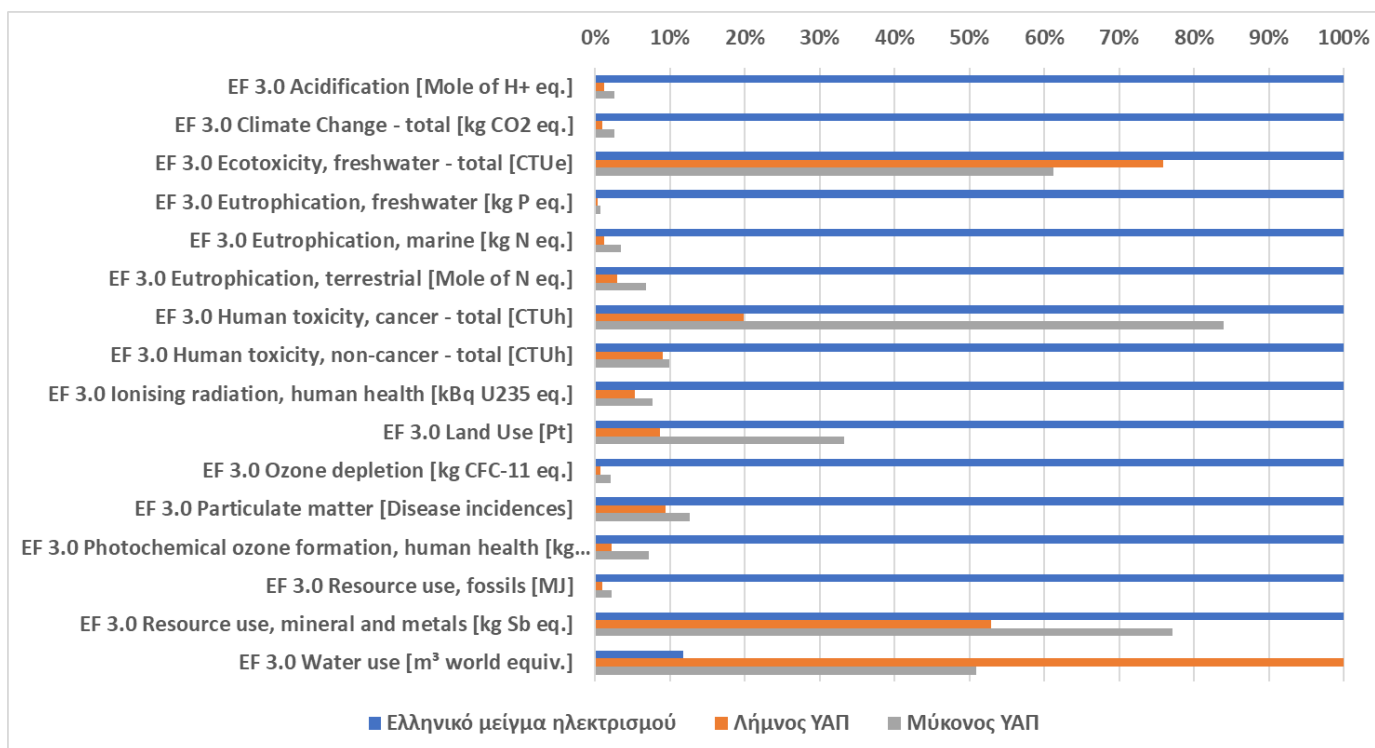
	Οξίνιση	Κλιματική αλλαγή	Οικ. Γλ. Ν.	Ευτρ. Γλ. Ν.	Θαλάσσιος ευτρ.	Εδαφικός ευτρ.	Καρκινογόνος Α.Τ.	Μη καρκινογόνος Α.Τ.	Ιοντίζουσα ακτ.	Χρήση γης	Απ. Όζοντος	Δημ. Σωματιδίων	Σχημ. Φωτ. Όζοντος	Χρ. πόρων	Χρ. πόρων, ορυκτά, μέταλλα	Χρήση ύδατος
Αλουμίνιο	0,92%	1,10%	18,83%	0,89%	0,73%	0,65%	0,21%	0,67%	3,74%	0,38%	1,44%	1,49%	0,65%	1,11%	0,05%	30,79%
Χυτοσίδηρος	1,03%	1,66%	0,46%	1,43%	1,47%	1,31%	2,23%	6,00%	1,96%	1,40%	1,61%	1,42%	1,81%	1,83%	0,14%	0,01%
Τσιμέντο	18,13%	0,82%	12,60%	18,56%	3,10%	3,83%	1,95%	36,34%	0,36%	2,09%	0,76%	1,97%	3,70%	0,81%	11,22%	0,02%
Χαλκός	1,34%	2,53%	0,38%	0,62%	2,43%	2,41%	0,07%	0,37%	1,24%	5,11%	2,56%	0,92%	1,82%	1,38%	0,53%	0,02%
Χρωμιογάλυβας	39,31%	40,27%	20,83%	29,83%	41,64%	39,39%	56,86%	22,36%	31,96%	45,82%	36,50%	41,26%	37,33%	38,25%	62,78%	20,39%
Ντίζελ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Ηλεκτρική ενέργεια	0,84%	1,24%	0,16%	1,63%	0,95%	0,78%	0,03%	0,19%	10,68%	1,31%	1,26%	0,17%	0,60%	2,17%	0,08%	0,01%
Εποξική ρητίνη	0,42%	0,65%	0,39%	0,39%	0,49%	0,45%	0,10%	0,15%	0,67%	0,35%	1,72%	0,26%	0,56%	0,97%	0,35%	0,01%
Ινες υάλου	0,83%	0,71%	0,10%	0,50%	1,03%	0,95%	0,07%	0,76%	1,76%	0,38%	1,06%	0,38%	0,76%	0,86%	0,29%	0,01%
Μόλυβδος	0,04%	0,03%	0,01%	0,02%	0,04%	0,03%	0,00%	0,01%	0,12%	0,05%	0,39%	0,02%	0,18%	0,13%	0,03%	0,00%
Λιπαντικό έλαιο	0,57%	0,16%	0,54%	0,39%	0,22%	0,22%	0,19%	3,22%	0,14%	0,43%	0,18%	0,14%	0,19%	0,14%	9,54%	0,00%
Θερμότητα	0,12%	0,85%	0,01%	0,02%	0,21%	0,20%	0,01%	0,01%	0,12%	0,05%	2,28%	0,03%	0,20%	1,01%	0,01%	0,00%
Καύσιμα	0,08%	0,11%	0,01%	0,01%	0,08%	0,07%	0,00%	0,01%	0,05%	0,04%	1,95%	0,01%	0,10%	0,69%	0,00%	0,00%
Πολυαιθυλένιο	0,03%	0,05%	0,00%	0,01%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%	0,04%	0,01%	0,02%	0,02%	0,04%	0,12%	0,02%	0,00%
Πολυπροπυλένιο	0,02%	0,04%	0,02%	0,00%	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,03%	0,09%	0,00%	0,00%
Άμμος	0,06%	0,04%	0,01%	0,02%	0,08%	0,07%	0,00%	0,01%	0,03%	0,36%	0,08%	0,05%	0,06%	0,04%	0,01%	0,00%
Χάλυβας	31,42%	49,25%	45,03%	44,75%	46,04%	39,10%	38,05%	29,33%	45,79%	39,63%	47,25%	49,61%	51,44%	49,79%	9,66%	48,67%
Νερό	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Ξυλεία	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%	0,01%	2,07%	0,03%	0,03%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
Διαδικασίες	4,67%	0,47%	0,74%	0,79%	1,38%	10,38%	0,20%	0,71%	1,33%	0,53%	0,91%	2,21%	0,50%	0,61%	5,28%	0,01%
Διαχείριση υλικών	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

- Τη μεγαλύτερη συνεισφορά την έχει ο χάλυβας σχεδόν σε όλους τους τομείς, εκτός από τον τομέα της οξίνισης, του εδαφικού ευτροφισμού, της καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας, της χρήσης γης και της χρήσης πόρων. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, αφού πολλά από τα εξαρτήματα όπως βάσεις θεμελίωσης, μέρη της ανεμογεννήτριας αποτελούνται από διάφορα είδη χάλυβα
- Δεύτερο σε συνεισφορά βρίσκεται ο χρωμιοχάλυβας, ο οποίος στις κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω έχει προβάδισμα με ποσοστά 39,31%, 39,39%, 56,89%, 45,82%, 62,79% αντίστοιχα. Κάτι τέτοιο είναι λογικό αφού για την κατασκευή του Spar χρησιμοποιούνται μεγάλα ποσά χρωμιοχάλυβας συγκριτικά με την κατασκευή διάταξης μονής στήλης
- Ο χαλκός στον τομέα της μη καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά από όλα τα υλικά με ποσοστό 36,34%. Επιπλέον με ποσοστό 11,22% συνεισφέρει σημαντικά και στον τομέα της χρήσης πόρων
- Το αλουμίνιο παίζει σημαντικό ρόλο στις κατηγορίες της οικοτοξικότητας γλυκού νερού και στην χρήση νερού με ποσοστά 18,83% και 30,79% αντίστοιχα
- Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας συνεισφέρει με ποσοστό 10,68% στον τομέα της ιοντίζουσας ακτινοβολίας
- Ο μόλυβδος μόνο σε μία κατηγορία συνεισφέρει σημαντικά και αυτή είναι η χρήση πόρων με ποσοστό 9,54%, ενώ στις υπόλοιπες περιβαλλοντικές επιπτώσεις οι τιμές του είναι κοντά στο 1%

5.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Τα συνολικά αποτελέσματα για τα δύο αιολικά πάρκα για όλες τις κατηγορίες των επιπτώσεων συγκρίθηκαν μεταξύ τους και με τα αποτελέσματα για την παραγωγή μίας κιλοβατώρας από το ελληνικό μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα αποτελέσματα αυτά επί τοις εκατό και όπως φαίνεται εκτός από την κατηγορία της χρήσης νερού οι τιμές και για τα δύο αιολικά πάρκα είναι πολύ χαμηλότερες και κυμαίνονται από 1% μέχρι 13% σε όλες σχεδόν τις κατηγορίες. Μόνο για τις κατηγορίες της οικοτοξικότητα γλυκού νερού, καρκινογόνου ανθρώπινης τοξικότητας και χρήσης πόρων (μετάλλων και ορυκτών) τα ποσοστά αυτά είναι αυξημένα και κυμαίνονται από 20% έως 84%. Συγκριτικά για τα δύο υπεράκτια αιολικά πάρκα της Λήμνου έχει τις μικρότερες επιπτώσεις σε όλες τις κατηγορίες εκτός από την οικοτοξικότητα γλυκού νερού που εμφανίζει 76% έναντι της Μυκόνου που εμφανίζει 61% και της χρήσης νερού που εμφανίζει το μέγιστο έναντι και της Μυκόνου και του ελληνικού μείγματος ηλεκτρισμού.

Διάγραμμα 3, Σύγκριση ΥΑΠ Λήμνου, Μυκόνου και ελληνικού μείγματος ηλεκτρισμού



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε και σύμφωνα με την βιβλιογραφική επισκόπηση, παρατηρήθηκε ότι τα γραμμάρια ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα και για τα δύο ΥΑΠ είναι όχι μόνο εντός των ορίων, αλλά και μικρότερα από αυτά. Συγκεκριμένα, για το υπεράκτιο αιολικό πάρκο της Λήμνου παράγονται 9 γραμμάρια ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα και για το αντίστοιχο της Μυκόνου 24. Οι κυμαινόμενες τιμές πρέπει να είναι 6,4 – 32, γεγονός που επαληθεύει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Και στα δύο σενάρια που μελετώνται, το στάδιο της παραγωγής είναι αυτό με τη μεγαλύτερη συνεισφορά και συγκεκριμένα ως υλικό ο χάλυβας. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το ΥΑΠ της Μυκόνου που είναι πλωτό έχει σχεδόν τριπλάσια τιμή παραγόμενου ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, αυτή η τιμή είναι και πάλι μικρότερη σε σχέση με την τιμή που αντιστοιχεί στο ανθρακικό αποτύπωμα της ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνεται από το ελληνικό δίκτυο.

Οι ελληνικές θάλασσες χαρακτηρίζονται από τα μεγάλα βάθη. Αυτός είναι ο λόγος που είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι πλωτές ανεμογεννήτριες, ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν υπεράκτια αιολικά πάρκα μακριά από την στεριά. Όσο πιο βαθιά τοποθετούνται, τόσο αυξάνεται ο συντελεστής απόδοσης και μπορεί να παραχθεί επιπλέον ηλεκτρικό ρεύμα. Ωστόσο, με βάση τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, προτείνεται η δημιουργία ΥΑΠ με βάση θεμελίωσης το *monopile*. Η χρήση διατάξεων μονής στήλης προσφέρει μικρότερες τιμές στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και καλύπτει το σκοπό για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2020 VLR Stuttgart eng.pdf. (n.d.). Retrieved July 20, 2022, from

[https://sdgs.un.org/sites/default/files/2020-](https://sdgs.un.org/sites/default/files/2020-10/2020%20VLR%20Stuttgart%20eng.pdf)

[10/2020%20VLR%20Stuttgart%20eng.pdf](https://sdgs.un.org/sites/default/files/2020-10/2020%20VLR%20Stuttgart%20eng.pdf)

Arvesen, A., & Hertwich, E. G. (2012). Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5994–6006.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.023>

Besseau, R., Sacchi, R., Blanc, I., & Pérez-López, P. (2019). Past, present and future environmental footprint of the Danish wind turbine fleet with LCA_WIND_DK, an online interactive platform. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.030>

Climate Change—louλίου 2021— Eurobarometer survey. (n.d.). Retrieved July 20, 2022, from <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2273>

Comparing offshore wind turbine foundations. (2021). Windpower Engineering & Development. <https://www.windpowerengineering.com/comparing-offshore-wind-turbine-foundations/>

Dolan, S. L., & Heath, G. A. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Utility-Scale Wind Power: Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, 16, S136–S154. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00464.x>

Esteban, M. D., Lopez-Gutierrez, J., & Negro, V. (2019). Gravity-Based Foundations in the Offshore Wind Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7, 64. <https://doi.org/10.3390/jmse7030064>

European Commission Service Site. (2021). <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>

- Hellenic Republic Ministry. (2019, December). *National Energy & Climate Plan*.
<https://www.haee.gr/FileServer?file=0d05aabb-92c0-4a66-89d2-827aaab2ef65>
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., & Scott, G. (2009). *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development* (NREL/TP-500-38060, 947422; p. NREL/TP-500-38060, 947422).
<https://doi.org/10.2172/947422>
- Kouloumpis, V., & Azapagic, A. (2022). A model for estimating life cycle environmental impacts of offshore wind electricity considering specific characteristics of wind farms. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 495–506.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.024>
- Lenzen, M., & Munksgaard, J. (2002). Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—Review and applications. *Renewable Energy*, 26(3), 339–362.
[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00145-8)
- Life Cycle Assessment LCA Software*. (2022).
<https://gabi.sphera.com/international/index/>
- Mehmeti, A., McPhail, S. J., Pumiglia, D., & Carlini, M. (2016). Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications. *Journal of Power Sources*, 325, 772–785.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.06.078>
- Mendecka, B., & Lombardi, L. (2019). Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 462–480.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.019>
- Offshore | DEME Group*. (2021). <https://www.deme-group.com/activities/offshore>

- Our energy infrastructure: From wind farm to Grid.* (n.d.). Retrieved July 20, 2022, from <https://orsted.co.uk/energy-solutions/offshore-wind/how-we-work-onshore>
- Our World in data. (2021). *Share of electricity production from wind*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-wind>
- Poujol, B., Prieur-Vernat, A., Dubranna, J., Besseau, R., Blanc, I., & Pérez-López, P. (2020). Site-specific life cycle assessment of a pilot floating offshore wind farm based on suppliers' data and geo-located wind data. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 248–262. <https://doi.org/10.1111/jiec.12989>
- Raadal, H. L., Vold, B. I., Myhr, A., & Nygaard, T. A. (2014). GHG emissions and energy performance of offshore wind power. *Renewable Energy*, 66, 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.075>
- Reimers, B., Özdirik, B., & Kaltschmitt, M. (2014). Greenhouse gas emissions from electricity generated by offshore wind farms. *Renewable Energy*, 72, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.023>
- Sacchi, R., Besseau, R., Pérez-López, P., & Blanc, I. (2019). Exploring technologically, temporally and geographically-sensitive life cycle inventories for wind turbines: A parameterized model for Denmark. *Renewable Energy*, 132, 1238–1250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.020>
- Scientific Consensus: Earth's Climate is Warming.* (2022). Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus>
- Tsai, L., Kelly, J. C., Simon, B. S., Chalot, R. M., & Keoleian, G. A. (2016). Life Cycle Assessment of Offshore Wind Farm Siting: Effects of Locational Factors, Lake Depth, and Distance from Shore: LCA of Offshore Wind Farm Siting. *Journal of Industrial Ecology*, 20(6), 1370–1383. <https://doi.org/10.1111/jiec.12400>

- Victor Kouloumpis, Adisa Azapagic. (2021). *A model for estimating life cycle environmental impacts of offshore wind electricity considering specific characteristics of wind farms* | Elsevier Enhanced Reader.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.024>
- Wagner, H.-J., Baack, C., Eickelkamp, T., Epe, A., Lohmann, J., & Troy, S. (2011). Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus. *Energy*, 36(5), 2459–2464. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.036>
- Wang, C. M., Utsunomiya, T., Wee, S. C., & Choo, Y. S. (2010). Research on floating wind turbines: A literature survey. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3(4), 267–277. <https://doi.org/10.1080/19373260.2010.517395>
- Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C., & Hertwich, E. G. (2009). Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy*, 34(3), 742–747.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.004>
- Αθανασιάδης Γρηγόριος. (2015). *Ανάλυση Πλωτών Ανεμογεννητριών*.
<http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/12878/1/DT2015-0232.pdf>
- Αικατερίνη Μητσάκου. (2018). *Τεχνοοικονομική ανάλυση εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών πάρκων*. <https://dias.library.tuc.gr/view/78414>
- Ανεμογεννήτρια. (2022). In *Βικιπαίδεια*.
<https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%91%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%B1&oldid=9537614>

Ανεμόμυλος. (2022). In *Βικιπαίδεια*.

<https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%91%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CF%8C%CE%BC%CF%85%CE%BB%CE%BF%CF%82&oldid=9459153>

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών. (2013). 94.

Παπαβασιλείου Γεώργιος, Π. (2017). *ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΘΕΣΕΩΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ*. 127.