



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, από αιολικά πάρκα και από λιγνιτικές μονάδες που εφαρμόζουν τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, με σκοπό την παραγωγή πράσινου καυσίμου.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Όνοματεπώνυμο: Παπαγιαννόπουλος Ιωάννης - mm17433

Επιβλέπουσα: Μαρία Ταξιάρχου
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, από αιολικά πάρκα και από λιγνιτικές μονάδες που εφαρμόζουν τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, με σκοπό την παραγωγή πράσινου καυσίμου.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όνοματεπώνυμο: Παπαγιαννόπουλος Ιωάννης - mm17433

Επιβλέπουσα: Μαρία Ταξιάρχου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις/..../.....

Ταξιάρχου Μαρία, Αναπλ. Καθηγήτρια,

Πέππας Αντώνιος, Επίκ. Καθηγητής,

Ξενίδης Άνθιμος, Καθηγητής,

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ολοκληρώνεται ένας πενταετής κύκλος σπουδών στην Σχολή Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κατά την διάρκεια του κύκλου αυτού, μου δόθηκε η ευκαιρία να γνωρίσω και να συνεργαστώ με πλήθος αξιότιμων καθηγητών και συμφοιτητών, στους οποίους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους επιβλέποντες καθηγητές της εργασίας, τον κύριο Πέππα Αντώνιο και την κυρία Ταξιάρχου Μαρία, για την εμπιστοσύνη τους, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και για την συστηματική καθοδήγηση και προθυμία τους να επιλύσουν την κάθε μου απορία, καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας και συγγραφής της εργασίας. Η συμβολή τους και της ομάδας τους σε κάθε βήμα ήταν ανεκτίμητη.

Θα ήθελα, στην συνέχεια, να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους και τους κοντινούς ανθρώπους που με στήριξαν και με βοήθησαν σε όλα τα βήματα της σχολής δίνοντας μου κίνητρο και δύναμη. Τελευταία και πιο πολύ από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπέροχους γονείς μου και την υπόλοιπη οικογένεια μου. Η αγάπη, η συμπαράσταση και η πίστη τους σε μένα ήταν είναι και θα είναι πάντα ανεκτίμητη.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις για την παραγωγή 1 MWh_e ενέργειας, παραγόμενη από i) αιολικά πάρκα, ii) από συμβατικές λιγνιτικές μονάδες, και iii) από λιγνιτικές μονάδες που εφαρμόζουν τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα και χρήσης του με σκοπό την παραγωγή πράσινου καυσίμου. Οι υπολογισμοί των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ).

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αγαθά στην σύγχρονη καθημερινότητα. Παγκοσμίως, η παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος στηρίζεται στα ορυκτά καύσιμα, αφού παραπάνω από το 75% της παραγόμενης ενέργειας προέρχεται από αυτά. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι οι διαδικασίες παραγωγής ενέργειας με αυτόν τον τρόπο επιφέρουν πλήθος περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για τον λόγο αυτό υπάρχει μια παγκόσμια στροφή προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, μελετάται αρχικά η διαδικασία παραγωγής ενέργειας με αιολικά πάρκα. Στην εργασία παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τις ανεμογεννήτριες, όπως ο τρόπος λειτουργίας τους, τα υλικά κατασκευής τους καθώς και η προέλευση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Στην συνέχεια, αναλύεται η διαδικασία παραγωγής ενέργειας με την χρήση συμβατικών λιγνιτικών μονάδων, όπου παρουσιάζονται οι μέθοδοι εξόρυξης του λιγνίτη, η λειτουργία των ατμοηλεκτρικών σταθμών και τα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν από την διαδικασία. Τέλος, αναλύονται οι τεχνολογίες δέσμευσης και οι τεχνικές διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιείται προς παραγωγή συνθετικής μεθανόλης (CCU).

Με το πέρας της περιγραφής των τεχνολογιών, πραγματοποιείται η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής για την παραγωγή 1 MWh_e ενέργειας για κάθε περίπτωση. Στόχος της ανάλυσης είναι η συγκριτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ο προσδιορισμός της πιο φιλικής εξ αυτών προς το περιβάλλον που δύναται να περιορίσει την κλιματική αλλαγή. Οι κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αναλύονται είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη, η οξίνιση, ο ευτροφισμός, ο φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος και οι εκπομπές λεπτών σωματιδίων (PM_{2,5}).

Βάσει των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι η πιο φιλική προς το περιβάλλον είναι η παραγωγή ενέργειας με αιολικά πάρκα. Σε σχέση με την παραγωγή από τις

λιγνιτικές μονάδες η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την κατηγορία υπερθέρμανσης του πλανήτη φτάνει το 99%, για την οξίνιση το 97%, τον ευτροφισμό το 96%, για τον φωτοχημικό σχηματισμό όζοντος το 42% και για τις εκπομπές σχηματισμού λεπτών σωματιδίων το 99,9%.

Abstract

In this thesis, the environmental impacts of producing 1 MWh_e of energy, produced by i) wind farms, ii) conventional lignite plants and iii) lignite plants applying carbon capture and utilization technologies to produce green fuel, were studied and compared. The environmental impact calculations were carried out using the Life Cycle Assessment (LCA) method.

Electricity is one of the most important commodities in modern everyday life. Globally, electricity generation is based on fossil fuels, since more than 75% of the energy produced comes from them. However, it is well known that energy production processes in this way have a multitude of environmental impacts. For this reason, there is a global shift towards Renewable Energy Sources (RES).

In this thesis, the process of energy production with wind farms is studied. The paper presents information on wind turbines, such as their mode of operation, their construction materials and the possible origin of their environmental impacts. It then analyses the process of energy production using conventional lignite plants and presents the methods of lignite extraction, the operation of steam power plants and the environmental issues arising from the process. Finally, the carbon capture technologies and separation techniques for CO₂ are analyzed. After the capture, CO₂ is then used to produce synthetic methanol (CCU).

At the end of the description of the technologies, a Life Cycle Analysis is carried out for the production of 1 MWh_e of energy for each case. The aim of the analysis is to determine the environmental impacts of each energy production method and to identify the most environmentally friendly one of them so as to limit the climate change. The environmental impacts analyzed are global warming, acidification, eutrophication, photochemical ozone formation and fine particulate matter (PM_{2.5}) emissions.

Based on the results of the analysis, it was found that the most environmentally friendly way of energy production is by wind farms. Compared to the energy produced from lignite plants, the reduction of environmental impacts of wind farms for global warming reaches 99%, for acidification 97%, eutrophication 96%, for photochemical ozone formation 42% and for fine particle formation emissions 99.9%.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Περίληψη	6
Abstract.....	8
Περιεχόμενα.....	9
1. Εισαγωγή	13
2. Παραγωγή Ενέργειας από Αιολικά Πάρκα	17
2.1 Γενικά περί ανεμογεννητριών	17
2.2 Μηχανισμός λειτουργίας ανεμογεννητριών.....	20
2.3 Υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών.....	21
2.4 Ιστορικό Εγκατεστημένης Ισχύος	21
2.5 Κοινωνικές και Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	24
3. Παραγωγή Ενέργειας από Λιγνιτικές Μονάδες	29
3.1 Διαδικασία Εξόρυξης.....	29
3.2 Διαδικασία Παραγωγής Ενέργειας.....	34
3.3 Κοινωνικές και Περιβαλλοντικά επιπτώσεις	36
4. Δέσμευση άνθρακα και παραγωγή συνθετικών καυσίμων	38
4.1 Τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα.....	38
4.1.1 Δέσμευση και διαχωρισμός CO ₂	39
4.1.2 Μεταφορά και Χρήση ή Αποθήκευση CO ₂	43
4.2 Παραγωγή συνθετικών καυσίμων με υδρογόνωση CO ₂	45
4.2.1 Η Μεθανόλη (CH ₃ OH)	45
4.2.2 Η Μεθανόλη ως πράσινο καύσιμο.....	46
4.2.3 Παραγωγή μεθανόλης με υδρογόνωση CO ₂	47
5. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ).....	51
5.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής.....	51
5.2 Μεθοδολογία και Πρότυπα ISO.....	53

5.2.1	Καθορισμός των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης (Goal and Scope definition).....	53
5.2.2	Ανάλυση καταγραφής δεδομένων (Life Cycle Inventory, LCI).....	54
5.2.3	Εκτίμηση των επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment, LCIA).....	55
5.2.4	Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation)	57
5.3	Λογισμικό LCA παρούσας εργασίας	57
6.	Μεθοδολογία και Υπολογιστική Διαδικασία της παρούσας ΑΚΖ.....	59
6.1	Καθορισμός των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης.....	59
6.1.1	Σκοπός και στόχος της μελέτης	59
6.1.2	Καθορισμός λειτουργικής μονάδας αναφοράς	59
6.1.3	Καθορισμός των σεναρίων	59
6.1.4	Καθορισμός και περιγραφή των ορίων του συστήματος.....	59
6.2	Καταγραφή δεδομένων του συστήματος	61
6.3	Κατηγορίες επιπτώσεων προς εκτίμηση	64
7.	Παρουσίαση κι ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	66
8.	Συμπεράσματα.....	70
	Βιβλιογραφία	72

Εικόνες:

Εικόνα 1:	Ο Λιγνίτης στην Ελλάδα (https://gr.boell.org/el).....	14
Εικόνα 2:	Τα στάδια του κύκλου ζωής (Golsteijn, L. 2020)	16
Εικόνα 3:	Ανεμογεννήτριες HAWT ενός, δύο και τριών πτερυγίων (Wind-turbine-models.com).....	17
Εικόνα 4:	Ανεμογεννήτριες VAWT Darrieus κλασική και ελικοειδής αντίστοιχα (Kamran, M. 2022)	18
Εικόνα 5:	Ανεμογεννήτριες VAWT Savonius με (a) Ίσιο κάδο (b) Ελικοειδή κάδο (c) Πολλαπλών σταδίων (Kumar, P. M., et. al. 2019).....	18
Εικόνα 6:	Μέγεθος Ανεμογεννητριών ανά τα χρόνια (U.S. Department of Energy, energy.gov)	20

Εικόνα 7: Κύρια εξαρτήματα επαγωγικών ανεμογεννητριών (Encyclopedia Britanica, Inc.).....	21
Εικόνα 8: Πτήσεις πουλιών γύρω από ανεμογεννήτριες (www.dasarxeio.com).....	25
Εικόνα 9: Ο θόρυβος των ανεμογεννητριών (U.S. Department of Energy, energy.gov)	26
Εικόνα 10: Μεταφορά με ανυψωμένο πτερύγιο για αιολική εγκατάσταση (www.iefimerida.gr)	27
Εικόνα 11: Παιδική χαρά από επαναχρησιμοποιημένα πτερύγια ανεμογεννητριών στο Ρότερνταμ (https://europedirectpiraeus.gr).....	28
Εικόνα 12: Επιφανειακή Εξόρυξη Λιγνίτη (https://www.newtonmedia.eu/).....	30
Εικόνα 13: Καδοφόρος Εκσκαφέας (https://wall.alphacoders.com/)	31
Εικόνα 14: Κεφαλή Καδοφόρου Εκσκαφέα (https://wall.alphacoders.com/)	31
Εικόνα 15: Ταινιόδρομοι (https://www.shutterstock.com/el/).....	32
Εικόνα 16: Αποθέτης (https://www.cleanenergywire.org/).....	32
Εικόνα 17: Απόσπαση τμήματος άνθρακα λόγω προεξοχής από την υποκείμενη μάργα (Kavvadas, M., et. al. 2020).....	33
Εικόνα 18: Ατμοηλεκτρικός Σταθμός στην Πτολεμαΐδα (https://www.kathimerini.gr/)	34
Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση ατμοηλεκτρικού σταθμού (www.shiksha.com) ...	35
Εικόνα 20: Ορυχείο λιγνίτη στην Πτολεμαΐδα (https://energypress.gr/).....	37
Εικόνα 21: Δέσμευση, Μεταφορά και Αποθήκευση CO2 (www.globalccsinstitute.com)	44
Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση του αντιδραστήρα Lurgi (Dieterich, V., et. al. 2020).....	48
Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ανανεώσιμης μεθανόλης ως καύσιμο (Me _f CO ₂)	49
Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου ζωής (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015).	51
Εικόνα 25: : Διάγραμμα ροής ενός προϊόντος (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015).....	55

Διαγράμματα:

Διάγραμμα 1: Συγκριτική Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας.....	13
Διάγραμμα 2: Παγκόσμια Εγκατεστημένη Ισχύς 1995 - 2010.....	23
Διάγραμμα 3: Παγκόσμια Εγκατεστημένη Ισχύς 2010 - 2021	23

Διάγραμμα 4: Χώρες με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ (2021)	24
Διάγραμμα 5: Τεχνολογίες δέσμευσης CO ₂ (Pires, J. C. M., et. al. 2011)	41
Διάγραμμα 6: Παραγωγή ηλεκτρισμού από λιγνίτη (Σενάριο 1)	61
Διάγραμμα 7: Παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολικά πάρκα (Σενάριο 2)	61
Διάγραμμα 8: Παραγωγή ηλεκτρισμού από λιγνίτη και CCU (παραγωγή συνθετικής μεθανόλης) (Σενάριο 3)	61
Διάγραμμα 9: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών CO ₂ σε kg	67
Διάγραμμα 10: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιβαλλοντική επίπτωση της οξίνισης αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών SO ₂ σε kg	68
Διάγραμμα 11: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιβαλλοντική επίπτωση του ευτροφισμού αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών φωσφορικού άλατος σε kg	68
Διάγραμμα 12: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον σχηματισμό φωτοχημικών οξειδωτικών αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών NO _x σε kg	69
Διάγραμμα 13: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιβαλλοντική επίπτωση του σχηματισμού λεπτών σωματιδίων αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών PM _{2.5} σε kg	69

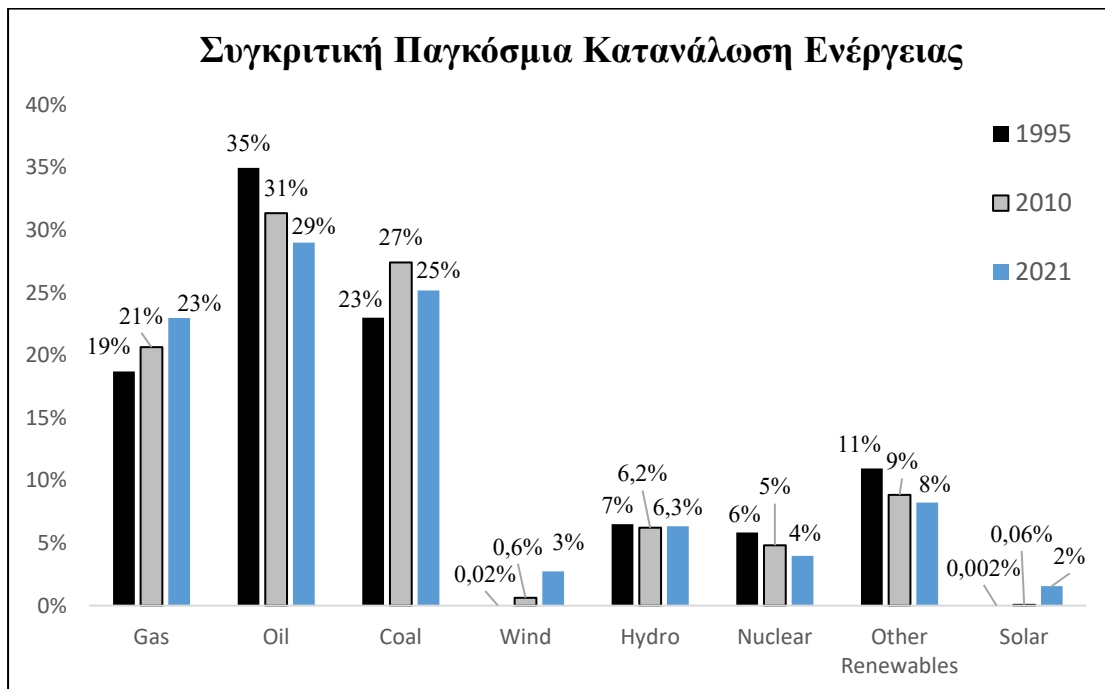
Πίνακες:

Πίνακας 1: Εισροές και εκροές Σεναρίου 1	61
Πίνακας 2: Εισροές και εκροές τεχνολογίας δέσμευσης CO ₂	62
Πίνακας 3: Εισροές και εκροές διεργασίας Παραγωγής μεθανόλης (Σενάριο 3).....	63
Πίνακας 4: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά σενάριο για παραγωγή 1MWh _e ενέργειας	66

1. Εισαγωγή

Η ενέργεια αποτελεί τη βάση της ευημερίας, της οικονομίας και της ανάπτυξης της κοινωνίας και ο ηλεκτρισμός θεωρείται πλέον από τα πολυτιμότερα αγαθά. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται είτε από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, είτε από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι συμβατικές μέθοδοι στηρίζονται συνήθως στην καύση ορυκτών καυσίμων. Τα ορυκτά καύσιμα διακρίνονται σε στερεά, όπως οι γαιάνθρακες (λιθάνθρακας, λιγνίτης), υγρά, όπως το πετρέλαιο και αέρια, όπως το φυσικό αέριο.

Από τη βιομηχανική επανάσταση, η καύση ορυκτών καυσίμων είναι η κύρια μέθοδος παραγωγής ενέργειας, συνεισφέροντας το μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής ζήτησης, τόσο στην χώρα μας όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Σήμερα, παραπάνω από το 75% της ενέργειας που παράγεται σε ολόκληρο τον κόσμο προέρχεται από αυτά. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, βασίζονται στον ήλιο, τον άνεμο, το νερό, τη γεωθερμία και τη βιομάζα, γνωρίζοντας μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια ειδικά, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται κυρίως στην αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας σε συνδυασμό με την ανάγκη επίτευξης του στόχου μηδενικών εκπομπών άνθρακα (IEA, 2023).

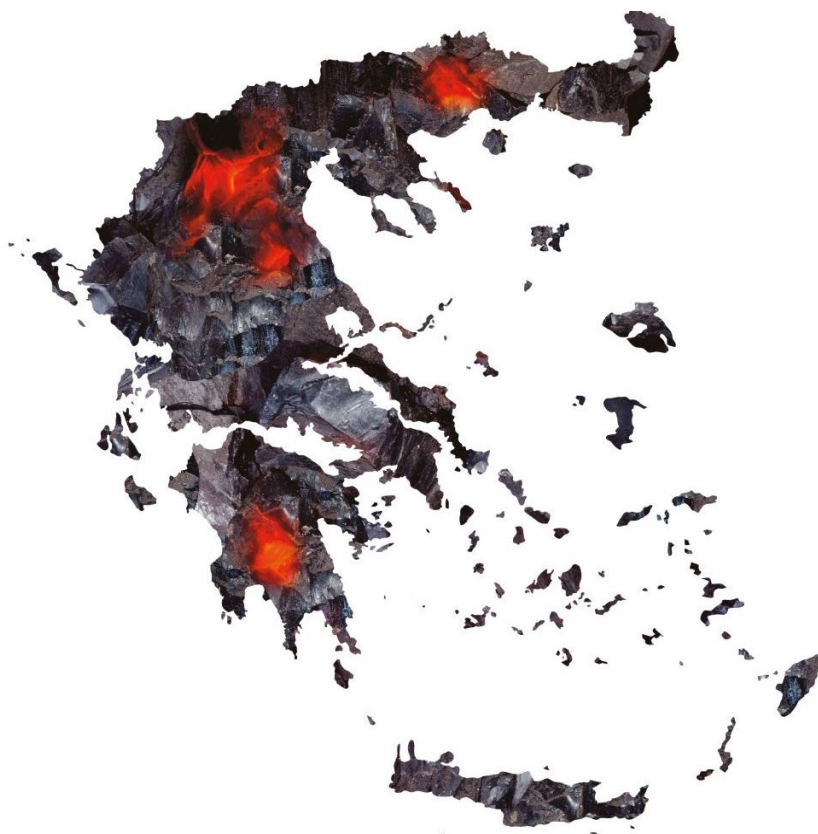


Διάγραμμα 1: Συγκριτική Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας

Στην Ελλάδα, η ανάπτυξη ηλεκτρικού δικτύου έγινε καθυστερημένα (1889), αλλά αναπτύχθηκε με γρήγορους ρυθμούς δεδομένου ότι, μέχρι το 1929 είχαν

ηλεκτροδοτηθεί 250 πόλεις. Η παραγωγή της ενέργειας γίνεται με διάφορους τρόπους, με πιο διαδεδομένη τη καύση ορυκτών καυσίμων, κυρίως λιγνίτη στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς.

Στην Ελλάδα, τα συνολικά βεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη ανέρχονται σε περίπου 5 δις. τόνους. Με τα σημερινά τεχνικοοικονομικά δεδομένα τα κοιτάσματα που είναι κατάλληλα για ενεργειακή εκμετάλλευση, ανέρχονται σε περίπου 3 δις. τόνους και ισοδυναμούν με 450 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου. Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στις περιοχές της Πτολεμαΐδας, του Αμυνταίου και της Φλώρινας με υπολογισμένο απόθεμα 1,5 δις τόνους και ακολουθούν η περιοχή της Δράμας και η περιοχή της Μεγαλόπολης στην Πελοπόννησο (Εικόνα 1). Γενικά, η ποιότητα των ελληνικών λιγνιτών είναι χαμηλή, αφού η θερμογόνο δύναμή τους δεν ξεπερνά τα 2000 kcal/kg αλλά έχουν ως πλεονέκτημα τη χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (ΔΕΗ).



Εικόνα 1: Ο Λιγνίτης στην Ελλάδα (<https://gr.boell.org/el>)

Τα τελευταία έτη, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη έχει μειωθεί σημαντικά, κυρίως λόγω της σημαντικής αύξησης της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και του στόχου μηδενικών καθαρών εκπομπών. Πλέον και στην χώρα μας στα πλαίσια της απολιγνιτοποίησης, μεγάλο μέρος της

παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στις ΑΠΕ και ειδικά στην αιολική και την ηλιακή ενέργεια (ΔΕΗ).

Η διαδικασία παραγωγής ρεύματος από λιγνίτη ξεκινά από την εξόρυξη και ολοκληρώνεται με την καύση του. Κατά την καύση εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases - GHG) κι άλλων βλαβερών κι επικίνδυνων αερίων τόσο ως προς το περιβάλλον, όσο και προς την ανθρώπινη υγεία. Το κυριότερο από αυτά είναι το CO₂ (Chen, S.-C. et. al. 2022). Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την International Energy Agency (IEA, 2022), οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια για το 2021 ήταν 36,3 Gt. Από την δεκαετία του 1950, μάλιστα, η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα, σε παγκόσμιο επίπεδο έχει διπλασιαστεί από 212 ppm το 1958 σε 445 ppm το 2021 (Ren, M., et. al. 2022).

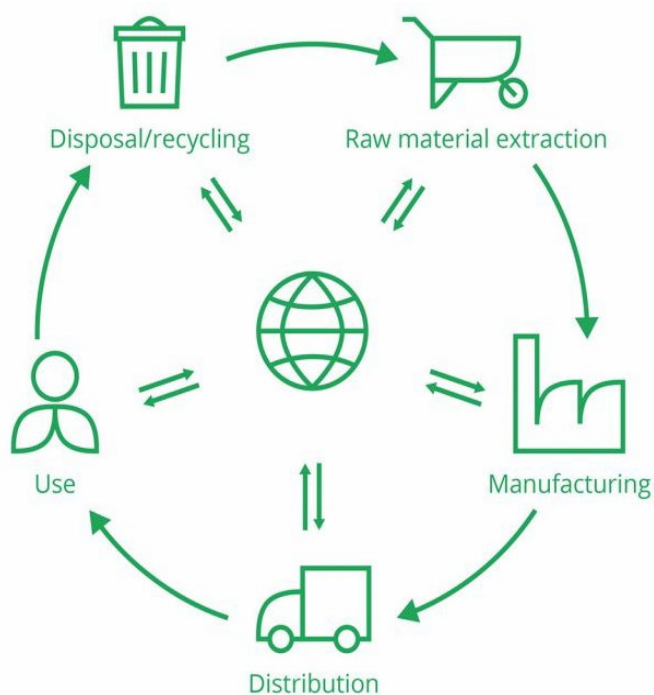
Αυτή η αύξηση των ποσοτήτων CO₂ αλλά και άλλων αερίων που απορροφούν τις υπέρυθρες ακτίνες έχει οδηγήσει, ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες, στην ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Κατά το φαινόμενο αυτό, η θερμότητα εμποδίζεται να διαφύγει από την ατμόσφαιρα, γεγονός που έχει σοβαρό αντίκτυπο στην υπερθέρμανση του πλανήτη και γενικότερα στην κλιματική αλλαγή. Το διοξείδιο του άνθρακα, θεωρείται ότι συμβάλλει περισσότερο από 80% στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Chen, S.-C., et. al. 2022).

Όσον αφορά τα προβλήματα υγείας, το διοξείδιο του άνθρακα, μπορεί να προκαλέσει ανάλογα με την έκθεση κάθε ανθρώπου σε αυτό, πονοκεφάλους, ζαλάδες και παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος. Πολύ συχνά επίσης, είναι και προβλήματα στην καρδιά, όπως αρρυθμίες και αυξημένη αρτηριακή πίεση, ενώ αυξημένος παρουσιάζεται ο κίνδυνος εμφάνισης στεφανιαίας νόσου. Σε περιοχές με μεγάλη έκθεση, συνήθως κοντά σε θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, παρατηρούνται υψηλά ποσοστά πρόωρων θανάτων από καρκίνους (Jacobson, T. et. al. 2019). Από τα παραπάνω γίνεται εμφανής η ανάγκη ανάπτυξης νέων τεχνολογιών και η ανάλυση των επιπτώσεών τους σε σχέση με τη δυνατότητα περιορισμού των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Μια περιβαλλοντικά φιλική λύση φαίνεται ότι είναι η αξιοποίηση των ΑΠΕ και άλλων νέων τεχνολογιών που κατά τη χρήση τους έχουν περιορισμένες έμμεσες εκπομπές αερίων (Ma, X., et. al. 2023). Μια άλλη εναλλακτική, φαίνεται να είναι η αξιοποίηση των τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης ή χρήσης του CO₂ σε άλλες διεργασίες όπως η μετατροπή του σε συνθετικά καύσιμα. Ωστόσο, σε κάθε

διαδικασία υπάρχουν απαιτήσεις ενέργειας και πληθώρα περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίες για να αξιολογηθούν με ακρίβεια είναι απαραίτητη η εφαρμογή της μεθοδολογίας της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) [Life Cycle Assessment – LCA].

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), αναλύει τις επιπτώσεις στο περιβάλλον που σχετίζονται με τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, μιας διαδικασίας ή μιας υπηρεσίας (Golsteijn, L. 2020). Κάθε μέρος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος μπορεί να έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον με πολλούς τρόπους, από την εξαγωγή πρώτων υλών, την επεξεργασία και παραγωγή του προϊόντος και τη φάση χρήσης μέχρι και το τι συμβαίνει στο προϊόν στο τέλος της ζωής του κατά την τελική διαχείριση (Εικόνα 2) (Golsteijn, L. 2020). Η μεθοδολογία της ΑΚΖ αναλύεται περαιτέρω στο Κεφάλαιο 5.



Εικόνα 2: Τα στάδια του κύκλου ζωής (Golsteijn, L. 2020)

2. Παραγωγή Ενέργειας από Αιολικά Πάρκα

2.1 Γενικά περί ανεμογεννητριών

Ο άνεμος δημιουργείται από τον συνδυασμό της άνισης θέρμανσης της ατμόσφαιρας από τον ήλιο, των ανομοιογενειών στην επιφάνεια της γης (βουνά και κοιλάδες) και της περιστροφής του πλανήτη. Ο άνεμος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέποντας την κινητική του ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω ανεμογεννητριών (Masters, M. G. 2016).

Οι ανεμογεννήτριες ποικίλουν ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθός τους. Ο πιο κοινός τύπος ανεμογεννητριών είναι οριζοντίου άξονα (Horizontal-Axis Wind Turbine - HAWT) με ένα, δύο ή πιο συχνά τρία πτερύγια με λεπίδες αεροδυναμικά σχεδιασμένες, σε μορφή έλικας (Εικόνα 3). Πλέον, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται με τρία πτερύγια, αφού συγκριτικά με αυτές των δύο πτερυγίων, δείχνουν ομαλότερη λειτουργία και παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας. Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων που περιέχονται στην άτρακτο βρίσκεται πάντα στο ίδιο ύψος με τα πτερύγια (Kamran, M. 2022).



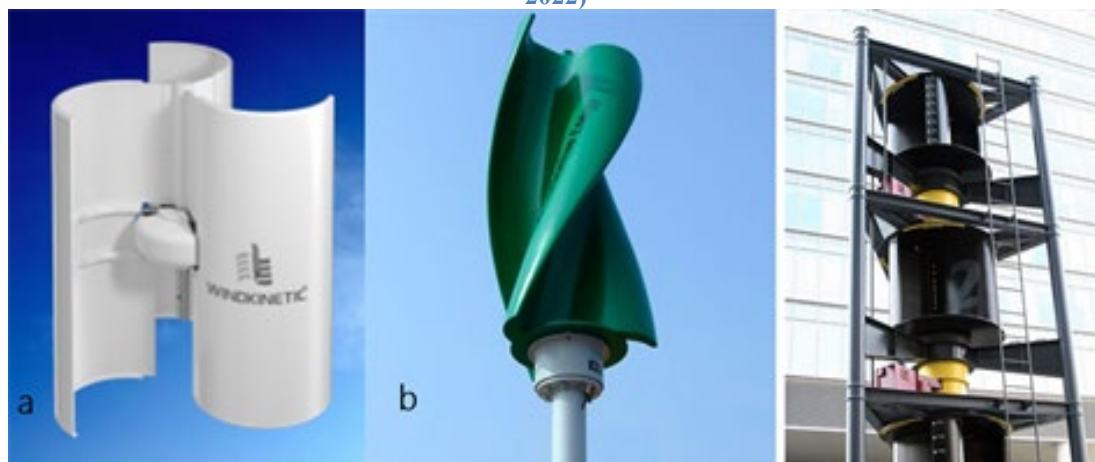
Εικόνα 3: Ανεμογεννήτριες HAWT ενός, δύο και τριών πτερυγίων (Wind-turbine-models.com)

Ο δεύτερος τύπος ανεμογεννητριών, είναι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Vertical-Axis Wind Turbine - VAWT). Υπάρχουν δύο τύποι VAWT, οι ανεμογεννήτριες Darrieus (Εικόνα 4) και Savonius (Εικόνα 5). Οι ανεμογεννήτριες Darrieus, αποτελούνται από μια σειρά από κυρτά πτερύγια τοποθετημένα σε έναν περιστρεφόμενο άξονα. Η καμπυλότητα των λεπίδων επιτρέπει και μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής. Όσον αφορά τις Savonius, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5, αποτελούνται από πτερύγια ημικυλινδρικού σχήματος που λειτουργούν ως ρότορας.

Οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν συνήθως χαμηλότερο συντελεστή ισχύος από τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες (Kamran, M. 2022 & Ali, M., et. al. 2023).



Εικόνα 4: Ανεμογεννήτριες VAWT Darrieus κλασική και ελικοειδής αντίστοιχα (Kamran, M. 2022)



Εικόνα 5: Ανεμογεννήτριες VAWT Savonius με (a) Ίσιο κάδο (b) Ελικοειδή κάδο (c) Πολλαπλών σταδίων (Kumar, P. M., et. al. 2019)

Οι VAWT χρησιμοποιούνται ως ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας με μικρή παραγωγή για εγκατάσταση πάνω ή κοντά σε κτίρια. Είναι μια από τις καλύτερες επιλογές για περιβάλλοντα με μεγάλες διακυμάνσεις στις ταχύτητες του ανέμου, καθώς μπορούν να παράγουν ενέργεια και με χαμηλές ταχύτητες.

Το κύριο πλεονέκτημα των μηχανών κατακόρυφου άξονα είναι ότι η βαριά ηλεκτρική γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκονται κοντά στο έδαφος όπου μπορούν να συντηρηθούν εύκολα. Επιπλέον, δεν χρειάζονται συγκεκριμένο προσανατολισμό και δεν απαιτείται μηχανισμός περιστροφής τους προς τον άνεμο όπως στις HAWT, δεδομένου ότι η κατεύθυνση των πτερυγίων είναι κάθετη στην ταχύτητα του ανέμου. Οι VAWT, επίσης, μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με λιγότερους κραδασμούς και λιγότερο θόρυβο.

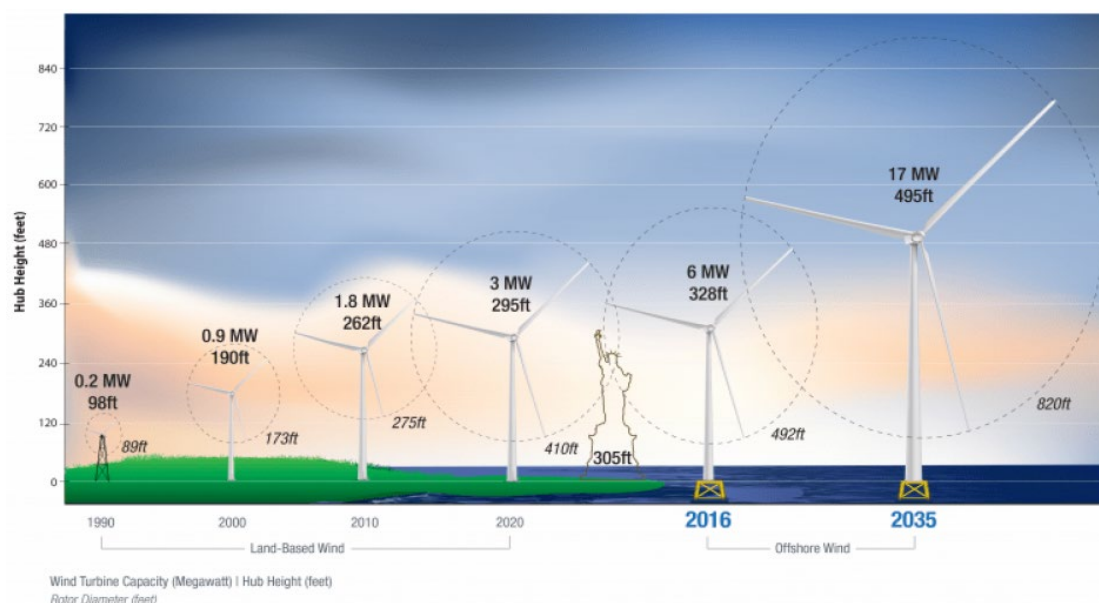
Το κύριο μειονέκτημα αυτού του τύπου ανεμογεννητριών, το οποίο τις καθιστά ακατάλληλες σε μεγαλύτερες κλίμακες είναι ότι τα πτερύγια είναι κοντά στο έδαφος όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλότερες έχοντας έτσι χαμηλότερη παραγωγή από τις HAWT. Επιπλέον, οι VAWT δεν είναι παραγωγικές σε συνθήκες ισχυρών ανέμων, καθώς έχουν αρκετά χαμηλές ροπές εκκίνησης και προβλήματα στη δυναμική τους σταθερότητα (Kamran, M. 2022 & Masters, M. G. 2016).

Μέρος των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούν κιβώτια ταχυτήτων, όπως οι επαγωγικές γεννήτριες μονής ή διπλής τροφοδοσίας (Single/Double Fed Induction Generator - S/DFIG) και είναι οι πιο δημοφιλείς αφού αποτελούν περίπου το 75% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Το κιβώτιο ταχυτήτων εξασφαλίζει υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής με αποτέλεσμα να έχουν και αυξημένη απόδοση (Pavel, C. C., et. al. 2017, Nassar, N. T., et. al. 2016, Schreiber, A., et. al. 2019 & Farina, A., et. al. 2022).

Οι ανεμογεννήτριες χωρίς κιβώτια ταχυτήτων ομαδοποιούνται στις γεννήτριες απευθείας μετάδοσης κίνησης (Direct Driven Synchronous Generator - DDSG) και στις γεννήτριες απευθείας μετάδοσης κίνησης με μόνιμους μαγνήτες (Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG). Στις τουρμπίνες άμεσης μετάδοσης κίνησης, ο ρότορας της ανεμογεννήτριας συνδέεται απευθείας με τη γεννήτρια, η οποία και λειτουργεί σε χαμηλή ταχύτητα (Lacal-Arantegui, R. 2015 & Farina, A., et. al. 2022).

Με την πάροδο του χρόνου η ισχύς και το μέγεθος των ανεμογεννητριών αυξήθηκε σημαντικά. Ταυτόχρονα εξελίχθηκαν τεχνολογικά, βελτιώνοντας σημαντικά και την απόδοσή τους. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6, στην αλλαγή του αιώνα οι ανεμογεννήτριες είχαν ονομαστική ισχύ μέχρι περίπου 1 MW, ύψος πύργου 50 με 80 μέτρα, και διάμετρο πτερυγίων 80 με 100 μέτρα. Μία δεκαετία αργότερα, οι μεγαλύτερες χερσαίες μηχανές ήταν σχεδιασμένες με ονομαστική ισχύς μέχρι τα 2 MW, ενώ μέχρι περίπου το 2020 έφταναν στα 3 με 5 MW. Σήμερα η μεγαλύτερη χερσαία ανεμογεννήτρια είναι της εταιρείας Vestas (έναρξη λειτουργίας το 2020), με ονομαστική ισχύς 7.2 MW, ύψος πύργου περίπου 170m και διάμετρο ρότορα 172m (Vestas.com). Σήμερα, οι Κινέζικες εταιρείες Envision Energy και Goldwind παρουσίασαν χερσαίες ανεμογεννήτριες προς εγκατάσταση με ονομαστική ισχύς 10 και 12 MW αντίστοιχα. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι μεγαλύτερης ισχύος που φτάνει και τα 15 MW με διαμέτρους ρότορα μεγαλύτερες από 200 m, ενώ

βρίσκονται ήδη υπό κατασκευή μηχανές των 18 MW (Masters, M. G. 2016 & Vestas.com).

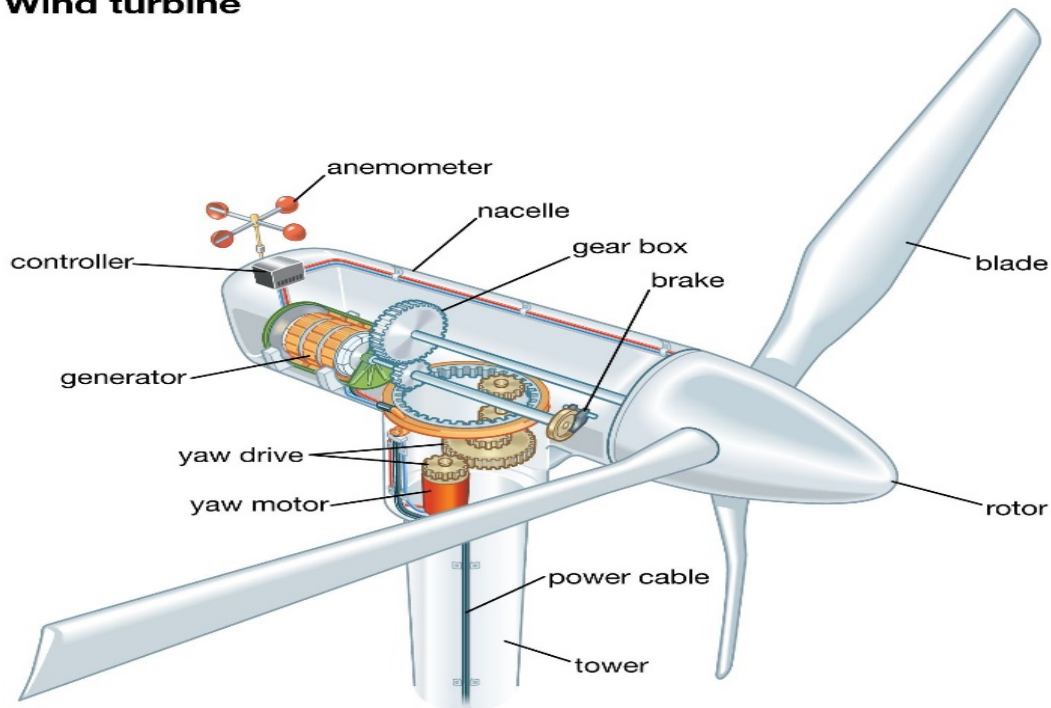


Εικόνα 6: Μέγεθος Ανεμογεννητριών ανά τα χρόνια (U.S. Department of Energy, energy.gov)

2.2 Μηχανισμός λειτουργίας ανεμογεννητριών

Οι αρχές λειτουργίας και τα βασικά εξαρτήματα του συστήματος μετατροπής ενέργειας μιας επαγωγικής γεννήτριας φαίνονται στην Εικόνα 7. Τα κύρια διακριτά μέρη τόσο των χερσαίων, όσο και των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι ο πύργος (tower), η άτρακτος (nacelle), ο ρότορας (rotor) με τα περύγια (blades). Η δυναμική ενέργεια του ανέμου στρέφει τα περύγια της ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι προσαρτημένα στον ρότορα. Με τη σειρά του, ο ρότορας περιστρέφει μέσω ενός άξονα μια γεννήτρια (generator) εγκατεστημένη εντός της ατράκτου, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρισμό. Μεταξύ του άξονα των περυγίων και της γεννήτριας παρεμβάλλεται το κιβώτιο ταχυτήτων. Σε περιπτώσεις πολύ υψηλών ταχυτήτων ανέμου, μηχανισμοί επιβράδυνσης (brake) εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία της γεννήτριας (Masters, M. G. 2016).

Wind turbine



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Εικόνα 7: Κύρια εξαρτήματα επαγωγικών ανεμογεννητριών (Encyclopedia Britannica, Inc.)

2.3 Υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών

Ανάλογα με το είδος της ανεμογεννήτριας, ο περιεχόμενος χάλυβας βρίσκεται σε ποσοστό μεταξύ 65% και 80%. Οι μόνιμοι μαγνήτες, που χρησιμοποιούνται συχνότερα στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι οι μαγνήτες του σαμάριου-κοβαλτίου και οι μαγνήτες του νεοδύμιου-σίδηρου-βόριου ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Οι $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ είναι πιο διαδεδομένοι, αφού είναι 2,5 φορές ισχυρότεροι. Οι μαγνήτες περιέχουν 27-32% στοιχεία σπανίων γαιών, με σημαντικότερο το νεοδύμιο (Nd) που φτάνει το ποσοστό του 25%. Το πρασεοδύμιο (Pr) αντιστοιχεί περίπου στο 5%, ενώ το δυσπρόσιο (Dy) στο 2% και προστίθεται στον μαγνήτη ώστε να βελτιώσει τις μαγνητικές του ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες και να μειώσει τη διάβρωση. Το δυσπρόσιο, μπορεί να αντικατασταθεί πλήρως από το τέρβιο (Schreiber, A., et. al. 2019, Nassar, N. T., et. al. 2016 & Farina, A., et. al. 2022).

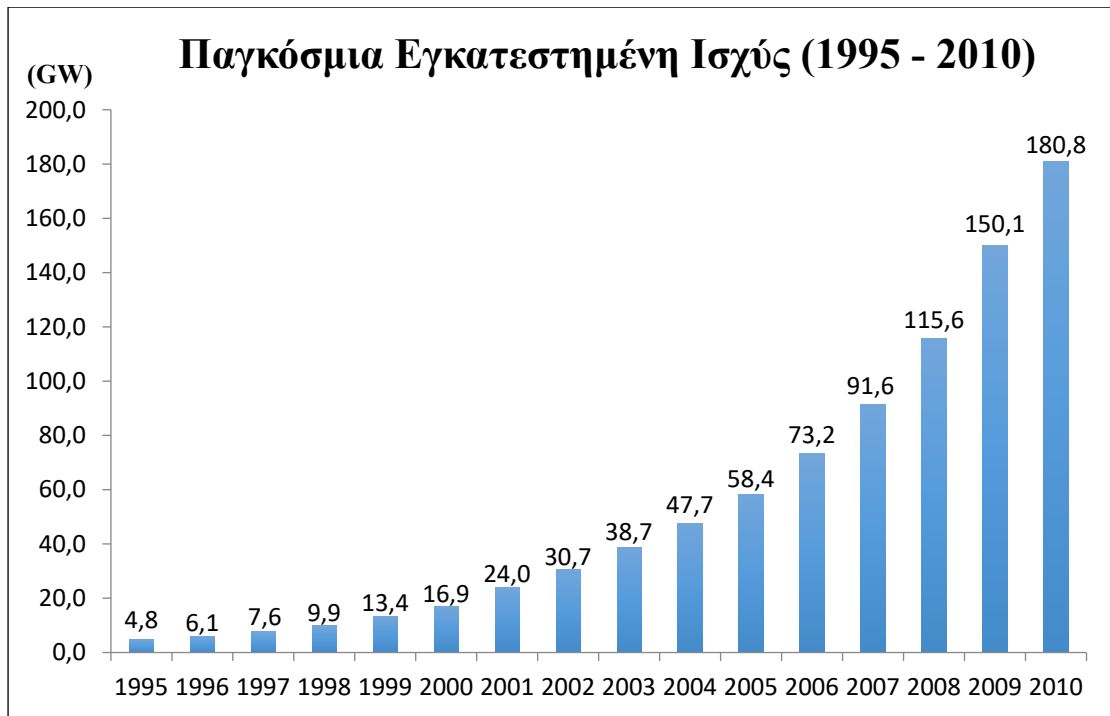
2.4 Ιστορικό Εγκατεστημένης Ισχύος

Οι περισσότερες εκ των πωλήσεων των αιολικών συστημάτων στον κόσμο μέχρι περίπου το 1985 ήταν στις Ηνωμένες Πολιτείες. Τα πρώτα αιολικά - ηλεκτρικά

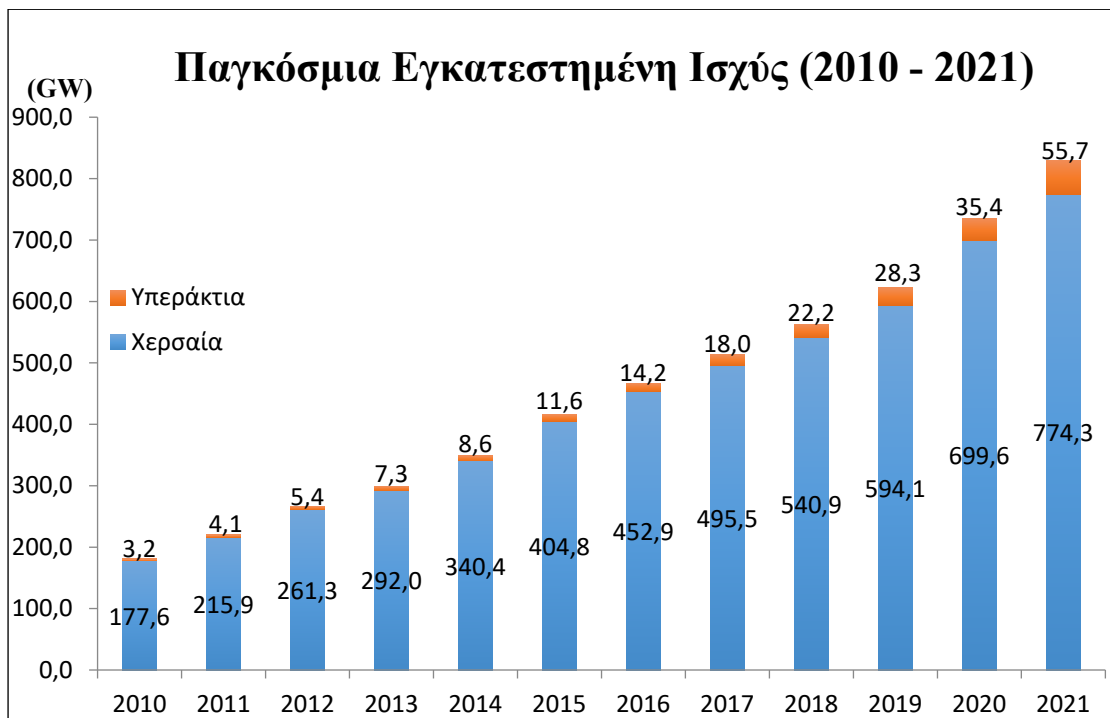
συστήματα κατασκευάστηκαν στα τέλη του 1890 και η τεχνολογία χρήσης της αιολικής ενέργειας εξελίχθηκε ραγδαία κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ου αιώνα. Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1920 και του 1930, η Αμερική ανέπτυξε ευρέως μικρές αιολικές μηχανές (<1 kW). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η δημοτικότητα των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν έφτασε στα υψηλότερα επίπεδα στις ΗΠΑ, με περίπου 600.000 μονάδες εγκατεστημένες κυρίως σε αγροτικές περιοχές που δεν εξυπηρετούνταν ακόμα από το δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Με την ευρεία ανάπτυξη των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας τη δεκαετία του 1950, η αγορά των ανεμογεννητριών σταδιακά μειώθηκε. Μέσα σε περίπου μία δεκαετία, δεκάδες κατασκευαστές εγκατέστησαν χιλιάδες νέες ανεμογεννήτριες ως επί το πλείστον στην Καλιφόρνια, λόγω των φορολογικών ελαφρύνσεων και άλλων κινήτρων, χωρίς ωστόσο αυτές να αποδίδουν τα προσδοκώμενα. Έτσι, στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και μετά την διακοπή των κινήτρων, η εγκατάσταση νέων μηχανών στις ΗΠΑ αλλά και σε όλο τον κόσμο σχεδόν διακόπηκε μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Leung, D. Y. C., & Yang, Y. 2012 & Masters, M. G. 2016).

Στα μέσα της ίδιας δεκαετίας, οι πωλήσεις άρχισαν να αυξάνονται ξανά και η αιολική τεχνολογία συνέχισε να αναπτύσσεται ειδικά σε Δανία, Γερμανία και Ισπανία. Η αιολική ενέργεια έχει αναπτυχθεί ραγδαία από το 2000 δεδομένου ότι υποκαθιστά άλλα ρυπογόνα ενεργειακά συστήματα (Ritchie, H., et. al. 2022). Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών αυξήθηκε κατά παραπάνω από 10 φορές τη δεκαετία από το 2000 έως το 2010. Το 2012, τα αιολικά συστήματα ξεπέρασαν το σημείο αναφοράς των 250GW το οποίο εκείνη την εποχή ήταν περίπου τριπλάσιο της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών, σύμφωνα με τον Gilbert Masters. Η ραγδαία αύξηση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3, όπου για τις τελευταίες δύο δεκαετίες η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς έχει αυξηθεί κατά 44 φορές φτάνοντας από 16,9 GW το 2000, σε περίπου 181 GW το 2010 και 735 GW έως το 2020, σύμφωνα με τα στοιχεία των International Renewable Energy Agency (IRENA) και International Energy Agency (IEA). Από τα περίπου 181 GW το 2010 και τα 735 GW έως το 2020, η χερσαία αιολική δυναμικότητα αυξήθηκε από 178 GW το 2010 σε 699 GW το 2020, ενώ η υπεράκτια αιολική ενέργεια αυξήθηκε αναλογικά περισσότερο (Masters, M. G. 2016 & IRENA). Από τα 735 GW το 2020, υπήρξε αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στα 830 GW το 2021 (IEA).



Διάγραμμα 2: Παγκόσμια Εγκατεστημένη Ισχύς 1995 - 2010

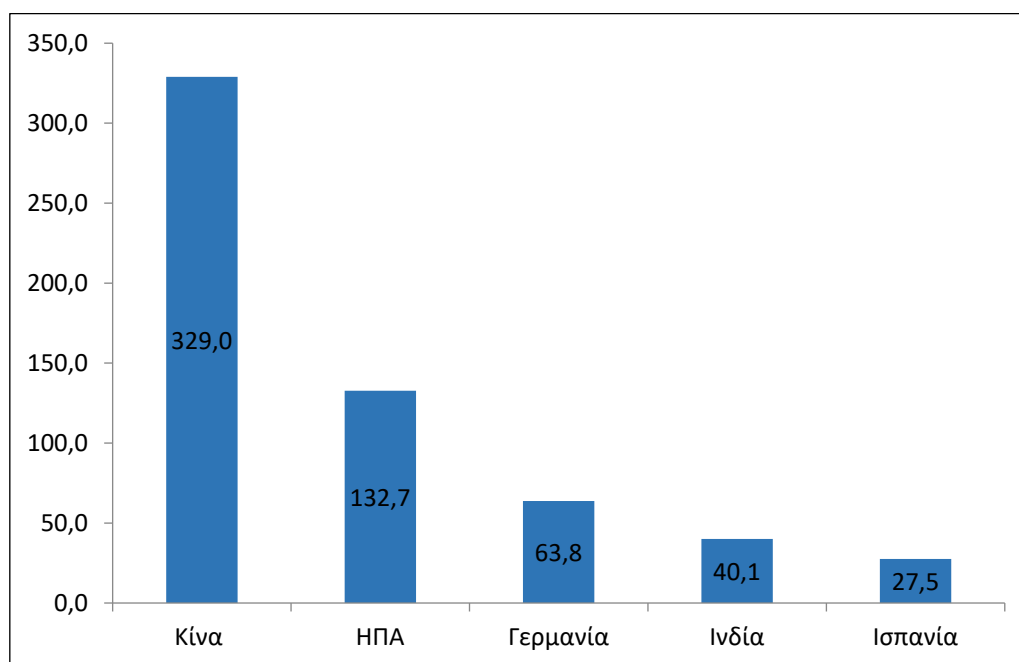


Διάγραμμα 3: Παγκόσμια Εγκατεστημένη Ισχύς 2010 - 2021

Η χερσαία αιολική ενέργεια έχει υιοθετηθεί σε 115 χώρες παγκοσμίως, ενώ η υπεράκτια αιολική ενέργεια σε μόλις 19. Σύμφωνα με την ΙΕΑ τα υπεράκτια συστήματα πρόκειται να αναπτυχθούν σημαντικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση, την Κίνα, τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία. Από την συνολική αύξηση της αιολικής

δυναμικότητας από το 2020 στο 2021, περίπου το 22% αντιστοιχεί σε υπεράκτια τεχνολογία.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη αιολική ισχύ το 2021, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4 είναι πρώτα η Κίνα και ακολουθούν οι ΗΠΑ, η Γερμανία, η Ινδία και η Ισπανία. Στην Κίνα η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε σε μία πενταετία από 2 GW το 2006 σε 46,4 GW το 2011, σε 329 GW το 2021 ξεπερνώντας τις ΗΠΑ με ισχύ 132,7 GW το 2021 (IEA & IRENA).



Διάγραμμα 4: Χώρες με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ (2021)

2.5 Κοινωνικές και Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Υπάρχουν πολλοί προβληματισμοί σχετικά με το πόσο πράσινη και περιβαλλοντικά καθαρή είναι η αιολική ενέργεια. Θάνατοι πτηνών, θόρυβος, οχλήσεις ζωικού πληθυσμού και αλλοίωση του τοπίου αποτελούν τα κυριότερα μειονεκτήματα. Πιθανές αστοχίες από πλήγματα κεραυνών όπως και πιθανές παρεμβολές σε εγκαταστάσεις ραντάρ και τηλεπικοινωνιών, λόγω των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων επιφέρουν επιπλέον προβληματισμούς (Saidur, R. et. al. 2011).

Ωστόσο οι καταγεγραμμένοι θάνατοι πτηνών είναι περιορισμένοι (Εικόνα 8). Υπάρχουν κατάλληλα συστήματα φωτισμού τα οποία μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα προσέλκυσης των πτηνών κατά τη μετανάστευση (Nazir, M. S. Et. al. 2020 & Leung, D. Y. C. et. al. 2012). Όσον αφορά τις υπεράκτιες κατασκευές,

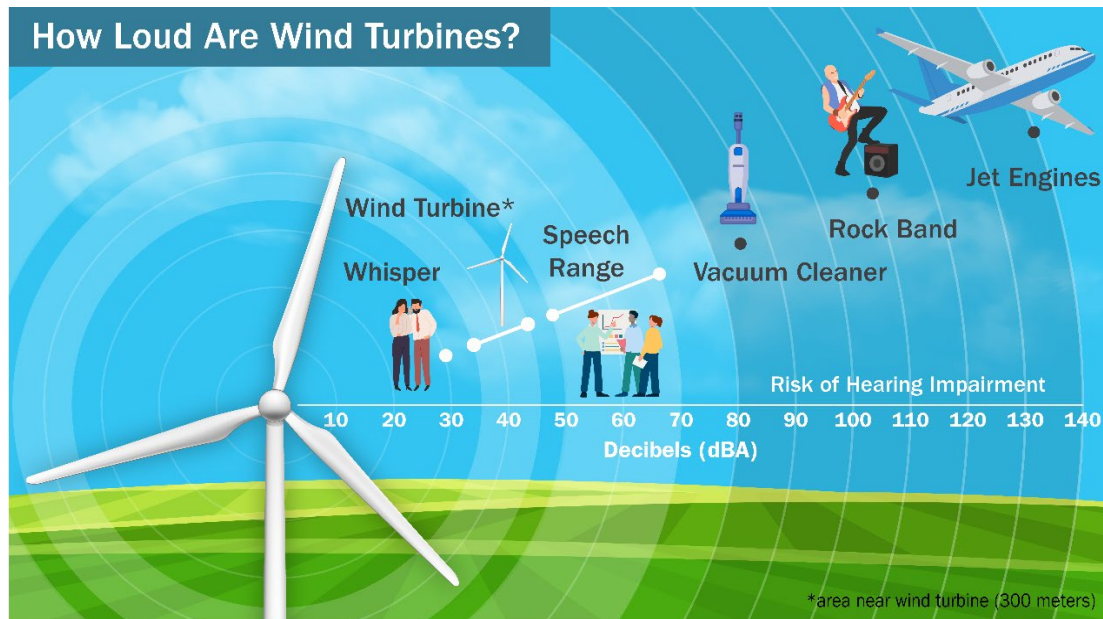
μελέτες σε αιολικά πάρκα στη Δανία κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι πάπιες αποφεύγουν τις ανεμογεννήτριες ακόμα και όταν τοποθετούνται δολώματα για να τις προσελκύσουν στη γύρω περιοχή (Nazir, M. S. et. al. 2020 & Masters, M. G. 2016).



Εικόνα 8: Πτήσεις πουλιών γύρω από ανεμογεννήτριες (www.dasarxeio.com)

Ο θόρυβος των ανεμογεννητριών, εκτός από την όχληση οδηγεί και στην μείωση της αξίας της γης. Για την αντιμετώπιση του θορύβου, η νομοθεσία προβλέπει ότι η ελάχιστη απόσταση τοποθέτησης ανεμογεννητριών είναι 300m μακριά από κατοικίες. Κατά μέσο όρο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9, ο θόρυβος σε απόσταση μεγαλύτερη των 300m από μεγάλες χερσαίες ανεμογεννήτριες είναι 35 - 45dB, ο οποίος είναι μικρότερος από τη λειτουργία ενός ψυγείου (50dB) όσο και από τον μέσο θόρυβο από τη κυκλοφορία των αυτοκινήτων (70dB) (U.S. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy). Αξίζει να αναφερθεί ότι προβλήματα ακοής στον άνθρωπο προκύπτουν από την διαρκή έκθεσή του σε ήχους άνω των 80dB.

Για την βέλτιστη ενσωμάτωση στο τοπίο προτείνεται να χρησιμοποιείται πράσινο χρώμα στη βάση με σταδιακή διαβάθμιση σε ανοιχτό γκρι (Saidur, R. et. al. 2011). Στο τέλος της ζωής τους πρέπει να εξασφαλίζεται η αποσυναρμολόγησή τους, η ανακύκλωση των υλικών τους και η πλήρης αποκατάσταση του τοπίου (Masters, M. G. 2016 & Nazir, M. S. Et. al. 2020).



Εικόνα 9: Ο θόρυβος των ανεμογεννητριών (U.S. Department of Energy, energy.gov)

Μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής για την παραγωγή ενέργειας με αιολικά πάρκα έχουν πραγματοποιηθεί εκτός των άλλων, από τους Davidsson, S., et. al. (2012), Guezuraga, B., et. al. (2012), Haapala, K. R., et. al. (2014), Martínez, E., et. al. (2010), Ozoemena, M., et. al. (2018) και Uddin, M. S., et. al. (2014). Οι μελέτες καταδεικνύουν τις επιπτώσεις κατά το στάδιο κατασκευής τους, λόγω χρήσης σπάνιων γαιών.

Σημαντικές είναι επίσης οι επιπτώσεις στο στάδιο της μεταφοράς τους (Εικόνα 10) στο χώρο εγκατάστασης. Γίνεται αντιληπτό, ότι η μεταφορά ενός πτερυγίου μήκους 65m απαιτεί βαρέα οχήματα, διάνοιξη νέων δρόμων και διαμόρφωση πεπλατυσμένων επιφανειών (Gao, C.-K. et. al. 2019).



Εικόνα 10: Μεταφορά με ανυψωμένο πτερύγιο για αιολική εγκατάσταση (www.iefimerida.gr)

Οι παράγοντες που οδηγούν στην κατανάλωση ενέργειας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις φάσεις της εγκατάστασης, της λειτουργίας και της συντήρησης, προέρχονται κυρίως από την ανύψωση υλικών και την αντικατάσταση εξαρτημάτων. Αρχικά κατά την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας, η άτρακτος και ο ρότορας πρέπει να ανυψωθούν και να τοποθετηθούν στην κορυφή του πύργου σε ύψη δηλαδή συνήθως μεγαλύτερα των 80m. Αφού ξεκινήσει η λειτουργία της ανεμογεννήτριας χρειάζεται συντήρηση 1 με 2 φορές ανά έτος ενώ συχνά προκύπτουν αστοχίες, κυρίως στο κιβώτιο ταχυτήτων και τη γεννήτρια. Μάλιστα, περίπου το 60% των αστοχιών απαιτούν αντικατάσταση του κιβωτίου ταχυτήτων και περίπου το 10% αντικατάσταση της γεννήτριας (Gao, C.-K. et. al. 2019 & Nazir, M. S. et. al. 2020). Τόσο η ενέργεια, όσο και η ρύπανση που προκύπτουν από αυτό το στάδιο φαίνεται να αντισταθμίζονται μέσα στο πρώτο έτος λειτουργίας τους. Εκτιμάται ότι μια ανεμογεννήτρια 2 MW παράγει 34 φορές περισσότερη ενέργεια από αυτή που απαιτείται για την κατασκευή και την λειτουργία της (Yousefi, H. et. al. 2019). Ο χρόνος ζωής των ανεμογεννητριών κυμαίνεται μεταξύ 20 και 25 ετών.

Σύμφωνα με την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) τα υλικά μιας ανεμογεννήτριας κατά την τελική τους διάθεση ανακυκλώνονται κατά 85-90%, ενώ για τα υπόλοιπα υπάρχει και δυνατότητα να επαναχρησιμοποιηθούν (Khalid, M. Y., et. al. 2023). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, στο Ρότερνταμ της Ολλανδίας έχει κατασκευαστεί παιδική χαρά από πτερύγια

ανεμογεννητριών. Σημαντική πρόκληση παραμένει η περιορισμένη δυνατότητα ανακύκλωσης των πτερυγίων που αποτελούνται από συνθετικά υλικά (Psomopoulos, C., et. al. 2019).



Εικόνα 11: Παιδική χαρά από επαναχρησιμοποιημένα πτερύγια ανεμογεννητριών στο Ρότερνταμ (<https://europedirectpiraeus.gr>)

Γενικά, κατά την λειτουργία τους τα αιολικά συστήματα, σε αντίθεση τόσο με τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς όσο και τους πυρηνικούς σταθμούς, προκαλούν μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Saidur, R. et. al. 2011, Masters, M. G. 2016). Έχει υπολογιστεί ότι μια ανεμογεννήτρια της τάξης των 3MW αποτρέπει σχεδόν 123.000 τόνους εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στα 20 χρόνια λειτουργίας της, ενώ μέχρι το τέλος του 2017, έχει υπολογιστεί ότι η αξιοποίηση των αιολικών πόρων έχει αποτρέψει 600 - 1000 Mt εκπομπές CO₂. Αν συνεχιστεί ο τωρινός ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, υπολογίζεται ότι μπορούν να αποφευχθούν έως και 3.100 εκατομμύρια τόνοι CO₂ μέχρι το 2030 (Yousefi, H. et. al. 2019).

3. Παραγωγή Ενέργειας από Λιγνιτικές Μονάδες

Οι περισσότερες χώρες σε όλο τον κόσμο, παρόλη την προσπάθεια απολιγνιτοποίησης εξακολουθούν να βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας, με παραπάνω από το 75% της παραγόμενης ενέργειας να προέρχεται από αυτά. Στην Ελλάδα, η ηλεκτρική ενέργεια κατά κύριο λόγο, παραγόταν στις λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Ο λιγνίτης ανήκει στις στερεές ορυκτές καύσιμες ύλες και προέρχεται από φυτικά υπολείμματα μέσω μιας σειράς διεργασιών ενανθράκωσης. Αποτελεί καύσιμο στρατηγικής σημασίας, γιατί έχει χαμηλό κόστος λόγω της υπαίθριας εξόρυξης και εξασφάλιζε μέχρι τώρα σταθερότητα στην αγορά ενέργειας. Στην Ελλάδα, ο λιγνίτης χαρακτηρίζεται από χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, κάτι που τον καθιστά λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον (ΔΕΗ).

3.1 Διαδικασία Εξόρυξης

Πριν την διαδικασία της εξόρυξης, πραγματοποιούνται ορισμένες ερευνητικές δραστηριότητες για τον εντοπισμό των κοιτασμάτων και τον προσδιορισμό της μορφολογίας του εδάφους, συνήθως μέσω γεωφυσικών μελετών και γεωτρήσεων. Αμέσως μετά, και βάσει των ευρημάτων, καθορίζονται τεχνικές παράμετροι, όπως το βάθος εξόρυξης και ο τρόπος εκμετάλλευσης και στην συνέχεια, σχεδιάζεται και κατασκευάζεται το ορυχείο. Κατά την κατασκευή του ορυχείου πραγματοποιούνται γεωτεχνικές εργασίες, όπως η κατασκευή οδών και άλλων υποδομών που απαιτούνται για τη διαδικασία εξόρυξης. Κάθε ορυχείο έχει το δικό του οδικό δίκτυο στο οποίο μπορούν να κινούνται βαρέα μηχανήματα μεγάλου όγκου σε καθορισμένες διαδρομές. Όταν ολοκληρωθούν οι παραπάνω εργασίες, ξεκινά η εξόρυξη των κοιτασμάτων του λιγνίτη.

Η εξόρυξη πραγματοποιείται είτε με υπόγειες είτε με επιφανειακές μεθόδους. Μια επιφανειακή εκμετάλλευση φαίνεται στην Εικόνα 12. Η υπόγεια εξόρυξη κρίνεται πιο κατάλληλη όταν τα κοιτάσματα βρίσκονται σε μεγάλα βάθη.



Εικόνα 12: Επιφανειακή Εξόρυξη Λιγνίτη (<https://www.newtonmedia.eu/>)

Στην Ελλάδα, η κύρια μέθοδος εξόρυξης του λιγνίτη είναι συνεχούς επιφανειακής εκμετάλλευσης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, επίσης, συστηματικά και σε ευρεία κλίμακα, στις εκμεταλλεύσεις λιγνιτών της Γερμανίας, της Πολωνίας αλλά και άλλων χωρών της Ευρώπης. Το σημαντικότερο λιγνιτωρυχείο της Ελλάδας είναι αυτό της Πτολεμαΐδας στη Δυτική Μακεδονία. Τα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα σε αυτό έχουν πάχος ακόμα και 80m και βρίσκονται σε βάθη μεγαλύτερα των 50m, κάτω από μια ζώνη υπερκείμενων πάχους ως και 160m., απαιτώντας εκσκαφές βάθους 100 – 250m. Τα υπερκείμενα και τα ενδιάμεσα στρώματα είναι στείρα υλικά και αποτελούνται κυρίως από αργίλους, αμμοχάλικα και μάργες αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που περιλαμβάνουν σε μεγάλο ποσοστό σχηματισμούς που αποτελούνται από σκληρά και ημίσκληρα πετρώματα (Kavvadas, M., et. al. 2020 & Kavouridis, K. 2008).

Η μέθοδος εκμετάλλευσης της συνεχούς εξόρυξης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων, συνδυάζει τη χρήση ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων μεγάλης δυναμικότητας για την εκσκαφή με τους καδοφόρους εκσκαφείς (bucket wheel excavators) (Εικόνες 13 & 14), τη μεταφορά με τους ταινιόδρομους (conveyor belts) (Εικόνα 15) και την απόθεση των στείρων με τους αποθέτες (spreaders) (Εικόνα 16). Παράλληλα χρησιμοποιείται και βοηθητικός εξοπλισμός, που περιλαμβάνει εκτός των άλλων γεωτρύπανα και μικρότερα χωματουργικά μηχανήματα, όπως φορτωτές, μπουλντόζες, εκσκαφείς, μηχανικά ή υδραυλικά μηχανήματα εκσκαφής και φορτηγά.

Ο βοηθητικός εξοπλισμός είναι εξαιρετικά χρήσιμος στις περιπτώσεις όπου τα υπερκείμενα περιλαμβάνουν σκληρά ή ημίσκληρα πετρώματα με χαρακτηριστικό παράδειγμα το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου της Πτολεμαΐδας, στο οποίο το 30% των υπερκειμένων αποτελούνταν από σκληρό και ημίσκληρο υλικό (Κavouridis, Κ. 2008). Σε αυτές τις περιπτώσεις, εφαρμόζονται μέθοδοι ασυνεχούς λειτουργίας με τη χρήση κυρίως του βοηθητικού εξοπλισμού και συχνά την πρόσθετη χρήση εκρηκτικών υλών (Ρapanicolaou, C., et. al. 2005 & Κavouridis, Κ. 2008).



Εικόνα 13: Καδοφόρος Εκσκαφέας (<https://wall.alphacoders.com/>)



Εικόνα 14: Κεφαλή Καδοφόρου Εκσκαφέα (<https://wall.alphacoders.com/>)



Εικόνα 15: Ταινιόδρομοι (<https://www.shutterstock.com/el/>)

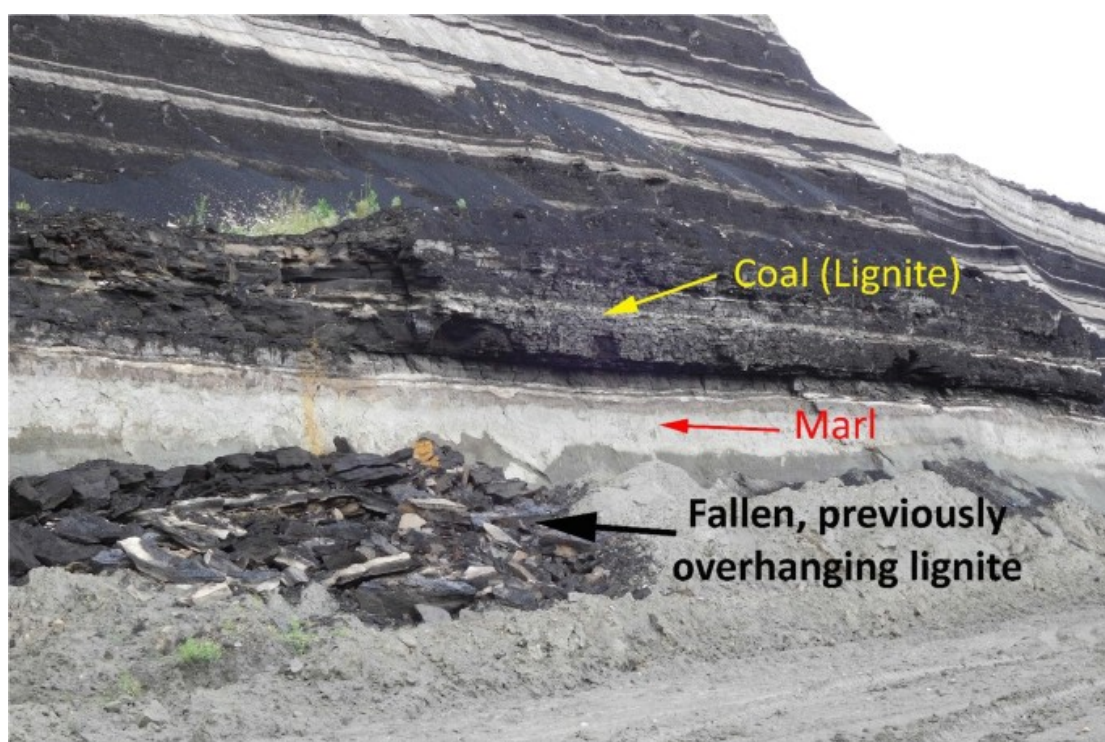


Εικόνα 16: Αποθέτης (<https://www.cleanenergywire.org/>)

Η διαδικασία της συνεχούς εξόρυξης, ξεκινά με την εκσκαφή του κοιτάσματος κατά στρώσεις από τους καδοφόρους εκσκαφείς. Ο λιγνίτης μεταφέρεται με τους ταινιόδρομους στις αποθήκες των λιγνιτικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ή σε υπαίθριους αποθηκευτικούς χώρους εντός των λιγνιτωρυχείων και τα στείρα μεταφέρονται στους αποθέτες, από όπου και απορρίπτονται. Η απόρριψη πραγματοποιείται σε επιλεγμένους χώρους με κατάλληλο σχεδιασμό, στους οποίους μεταφέρεται επίσης και η τέφρα από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Οι χώροι που χρησιμοποιούνται αρχικά, είναι συνήθως κοιλάτητες άλλων εγκαταλειμμένων ορυχείων, ενώ ως δεύτερη επιλογή είναι η πλήρωση των κενών χώρων που δημιουργούνται κατά την εξόρυξη. Με αυτόν τον

τρόπο επιτυγχάνεται η ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ εκσκαφής και απόθεσης, η εξασφάλιση ευστάθειας των πρανών του ορυχείου και η εναρμόνιση με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής (Papanicolaou, C., et. al. 2005 & Kavouridis, K. 2008).

Η σημασία της ευστάθειας των πρανών είναι ιδιαίτερα σημαντική δεδομένου ότι για λόγους εκμετάλλευσης, οι πλαγιές εκσκαφής γίνονται όλο και πιο απότομες αυξάνοντας τον κίνδυνο αστοχίας. Σημαντική επίσης για την ευστάθεια, είναι και η γνώση της πίεσης του νερού των πόρων κατά μήκος της διεπιφάνειας λιγνίτη και μάργας. Συχνά, οι υπάρχουσες ρωγμές γεμίζουν νερό, λόγω της πολύ μεγαλύτερης διαπερατότητας των υπερκειμένων, γεγονός που επηρεάζει έντονα τη σταθερότητα και μπορεί να προκαλέσει καταστροφική αστάθεια. Στην Εικόνα 17, φαίνεται ο άνθρακας που προεξέχει της υποκείμενης μάργας, λόγω της τάσης στις ρωγμές, η οποία τελικά προκαλεί αστοχία σε σημεία (Kavvadas, M., et. al. 2020).



Εικόνα 17: Απόσπαση τμήματος άνθρακα λόγω προεξοχής από την υποκείμενη μάργα (Kavvadas, M., et. al. 2020)

Το τελευταίο στάδιο των λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων αποτελούν οι εργασίες αποκατάστασης του τοπίου. Οι εκτάσεις που έχουν ελευθερωθεί αλλά έχουν αναδιαμορφωθεί λόγω της πλήρωσης τους με άγωνα καθώς και τα κενά/ κοιλότητες που έχουν προκύψει, αποτελούν χώρους για την ανάπτυξη δασών και λιμνών σε μεγάλη κλίμακα ή χώρους για γεωργικές ή κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Ωστόσο,

οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός ορυχείου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφολογία του εδάφους, τις συνθήκες των κοιτασμάτων και την έκταση και τη διάρκεια των εργασιών. Όλες αυτές οι πτυχές πρέπει να ληφθούν υπόψη για να καθοριστεί επακριβώς ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των ορυχείων σε όλο τον κύκλο της ζωής τους (Lelek, L., et. al. 2021).

3.2 Διαδικασία Παραγωγής Ενέργειας

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της εξόρυξης, ακολουθεί η καύση του λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη λαμβάνει χώρα στους λιγνιτικούς θερμοηλεκτρικούς ή ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την θερμότητα από την καύση, μετατρέπουν το νερό σε ατμό που οδηγείται σε ηλεκτρογεννήτριες (Ντοκόπουλος, Π. 1986). Στην Εικόνα 18, φαίνεται ο ατμοηλεκτρικός σταθμός (ΑΗΣ) Αγίου Δημητρίου στην Πτολεμαΐδα καθώς και τμήματα όπως οι πύργοι ψύξης, οι καπνοδόχοι, και οι κτιριακές εγκαταστάσεις που φιλοξενούν τις ηλεκτρογεννήτριες.

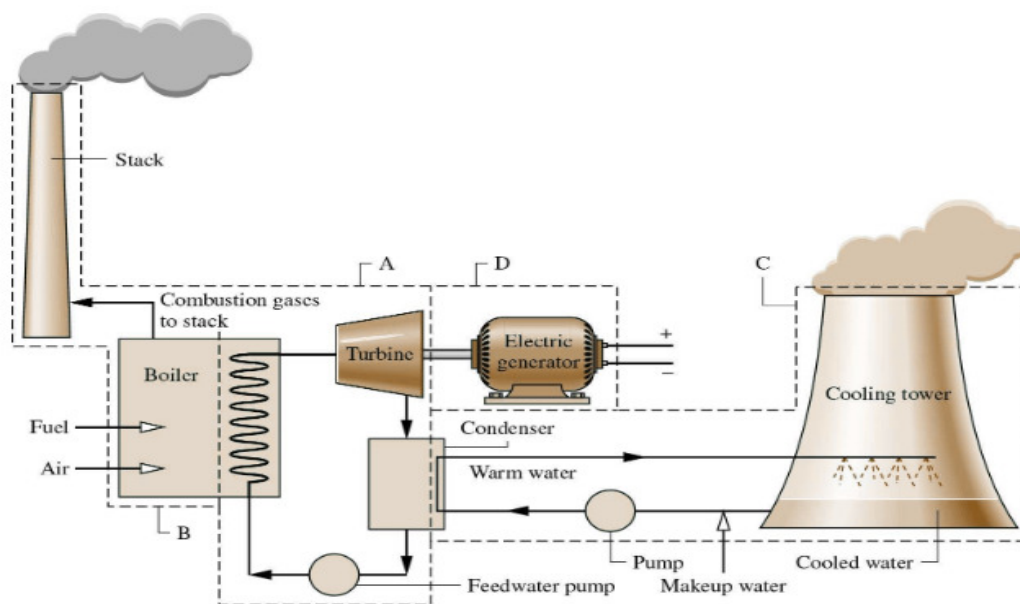


Εικόνα 18: Ατμοηλεκτρικός Σταθμός στην Πτολεμαΐδα (<https://www.kathimerini.gr/>)

Ο λιγνίτης μετά την εξόρυξή του, μεταφέρεται με ταινιόδρομους στους καυστήρες. Κάθε μονάδα έχει έναν ή περισσότερους κεντρικούς λέβητες (boiler) στους οποίους οδηγείται το καύσιμο σε ποσότητες ανάλογα με τις ανάγκες και αφού πρώτα λειοτριβηθεί σε μύλους ή σπαστήρες. Η μείωση μεγέθους οδηγεί σε

υψηλότερες θερμοκρασίες κατά την καύση και υψηλότερο βαθμό απόδοσης. Ο λιγνίτης, μαζί με προθερμασμένο ατμοσφαιρικό αέρα που εισέρχεται με ανεμιστήρες σε υψηλές θερμοκρασίες, οδηγείται στους καυστήρες, όπου και καίγεται. Η θερμότητα που παράγεται από την καύση μετατρέπει ποσότητες νερού, οι οποίες βρίσκονται σε ένα κλειστό κύκλωμα, σε ατμό υψηλής πίεσης. Ο ατμός αυτός, θέτει σε κίνηση έναν αμοστρόβιλο ή τουρμπίνα (turbine), ο οποίος μεταδίδει την κίνηση σε μια γεννήτρια (electric generator) και παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο μέσω μετασχηματιστών διοχετεύεται στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης.

Ο λιγνίτης, μετά την καύση του γίνεται τέφρα, που συγκεντρώνεται στο κάτω μέρος του καυστήρα, ενώ τα θερμά καυσαέρια (combustion gases) που προκύπτουν, διοχετεύονται σε εναλλάκτες θερμότητας, και μετά την απομάκρυνση της σκόνης, οδηγούνται προς τις καπνοδόχους (stack) και αποβάλλονται στο περιβάλλον. Τα φίλτρα είναι συνήθως είτε μηχανικά είτε ηλεκτροστατικά είτε συνδυασμός και των δύο (Ντοκόπουλος, Π. 1986). Όλα αυτά διακρίνονται στην Εικόνα 19, σε μια σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας, όπου στο τμήμα Α φαίνεται το κύκλωμα καυσίμου/ αέρα, στο Β και C το κύκλωμα νερού/ ατμού και ψύξης και στο D η γεννήτρια.



Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση ατμοηλεκτρικού σταθμού (www.shiksha.com)

Ο ατμός μετά τον στρόβιλο οδηγείται στον συμπυκνωτή (condenser) όπου και ψύχεται. Για την ψύξη απαιτείται η χρήση μεγάλων ποσοτήτων ψυκτικού υγρού που μπορεί να λαμβάνεται από λίμνες, ποτάμια ή ακόμα και την θάλασσα. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμες πηγές κοντά στις εγκαταστάσεις, όπως στην

Πτολεμαΐδα και την Μεγαλόπολη, δημιουργούνται τεχνητές λίμνες (Ντοκόπουλος, Π. 1986).

3.3 Κοινωνικές και Περιβαλλοντικά επιπτώσεις

Ο λιγνίτης, παρόλο που έχει αποτελέσει διαχρονικά την πιο σημαντική πηγή ενέργειας, προκαλεί σημαντικές κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Δεδομένου ότι οι επιφανειακές εξορύξεις καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις, συνήθως απαιτείται η μετεγκατάσταση ακόμα και ολόκληρων χωριών, όπως στην Πτολεμαΐδα, σε μεγάλη απόσταση από τις εκμεταλλεύσεις. (Widera, M., et. al. 2016 & Kavouridis, K. 2008). Επιπλέον, όπως και στην περίπτωση των αιολικών πάρκων, έτσι και οι λιγνιτικές μονάδες παράγουν θορύβους που επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα ζωής των ανθρώπων, ενώ επίσης αποσταθεροποιούν την τοπική χλωρίδα και πανίδα (Chatzimouratidis, A. I., et. al. 2008).

Η βιομηχανία λιγνίτη παρείχε πολλές θέσεις εργασίας. Στην Ελλάδα απασχολούνταν το 2008 περίπου 15.000 άτομα (Kavouridis, K. 2008), ενώ στην Πολωνία οι κοινότητες που βρίσκονται τα ορυχεία φέρουν το μεγαλύτερο κατά κεφαλήν εισόδημα στη χώρα (Badera, J., et. al. 2014). Παρόλα αυτά δύο δημοψηφίσματα το 2009 στην Πολωνία, κατέδειξαν ότι το 65% των ψηφοφόρων ήταν κατά της έναρξης νέων επιφανειακών λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων (Badera, J., et. al. 2014).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν κυρίως τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στερεών σωματιδίων, τη χρήση υδάτινων και χερσαίων πόρων και την απόρριψη υγρών και στερεών αποβλήτων. Σημαντική είναι επίσης η αλλοίωση των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών στην περιοχή εκμετάλλευσης και γύρω από αυτήν. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ρύπανση των υδάτινων ρευμάτων με βαρέα μέταλλα (Ουράνιο-234, 235 και 238) και ραδιενεργά στοιχεία (Ιώδιο-131) και αύξηση της θερμοκρασίας του μικροκλίματος (Widera, M., et. al. 2016 & Kaldellis, J. K., et. al. 2009).

Τα στείρα και η παραγόμενη τέφρα αποβάλλονται σε χωματερές, επιβαρύνοντας το έδαφος. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 20 κατά τις διαδικασίες εξόρυξης εκπέμπονται επίσης, σημαντικές ποσότητες σκόνης (Widera, M., et. al. 2016, Kaldellis, J. K., et. al. 2009 & Nanaki, E. A., et. al. 2016).



Εικόνα 20: Ορυχείο λιγνίτη στην Πτολεμαΐδα (<https://energypress.gr/>)

Όσον αφορά τις εκπομπές αερίων και σωματιδίων, από τη καύση του λιγνίτη παρατηρούνται υψηλές εκπομπές μεθανίου (CH_4), οξειδίων του θείου (SO_x), υδρόθειου (H_2S), οξειδίων (NO_x) και υποξειδίου (N_2O) του αζώτου, στερεών σωματιδίων ($\text{PM}_{2,5}$ & PM_{10}) και μονοξειδίου (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) (Nguyen, D. N., et. al. 2002, Widera, M., et. al. 2016, Nanaki, E. A., et. al. 2016 & Vardar, N., et. al. 2010). Τα εκπεμπόμενα μικροσωματίδια συνδέονται με αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις, επιφέροντας σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία, ειδικά του προσωπικού των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (Paragiannis, A., et. al. 2016, Chatzimouratidis, A. I., et. al. 2008 & Kaldellis, J. K., et. al. 2009).

Μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη στην Ελλάδα έχουν πραγματοποιήσει ο Σταματίου Γ. (2015), οι Nanaki, E. A., et. al. (2016) και οι Theodosiou, G., et. al. (2014). Οι Türkmen, A. B., et. al. (2021), πραγματοποίησαν ανάλυση κύκλου ζωής για την παραγωγή 1kWh ενέργειας από έναν σταθμό της Τουρκίας και οι Lelek, L., et. al. (2021) επικεντρώθηκαν στην ανάλυση κύκλου ζωής μόνο των διεργασιών εξόρυξης λιγνίτη, με βάση τα δεδομένα που προέρχονται από ένα πολωνικό ορυχείο. Επιπλέον, οι Li, H., et. al. (2020) πραγματοποίησαν μια συγκριτική μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής για την παραγωγή ενέργειας από άνθρακα και από ανεμογεννήτριες και οι Zhao, J., et. al. (2015) πραγματοποίησαν ανάλυση του κύκλου ζωής για έξι σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη.

4. Δέσμευση άνθρακα και παραγωγή συνθετικών καυσίμων

4.1 Τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα

Βάσει των παραπάνω, είναι φανερό ότι προκειμένου να περιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών λιγνιτικών μονάδων, πρέπει να περιοριστούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία είναι η δέσμευση και επαναχρησιμοποίηση του CO₂ (Carbon Capture and Utilization - CCU). Η τεχνολογία αυτή, υπολογίζεται ότι μπορεί να δεσμεύσει το 85 - 95% του διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια που εκπέμπουν οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής και να περιορίσει τις συνολικές εκπομπές GHG κατά παραπάνω από 70%.

Η πρώτη τεχνολογική εφαρμογή δέσμευσης του CO₂ πραγματοποιήθηκε την δεκαετία του 1920 σε μονάδες φυσικού αερίου. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στο Τέξας μπήκε σε λειτουργία μονάδα δέσμευσης CO₂ από καύση φυσικού αερίου και αποθήκευσή του (Carbon Capture and Storage - CCS) σε ένα κοντινό πετρελαϊκό πεδίο (IEAGHG). Η τεχνολογία εξελίχθηκε σημαντικά μετά το 1977 (IEAGHG & Dubey, A., et. al. 2022), με αναφορά εφαρμογής CCS μεγάλης κλίμακας το 1996 σε μονάδα επεξεργασίας στο κοίτασμα φυσικού αερίου Sleipner στη Βόρεια Θάλασσα από την πετρελαϊκή εταιρεία Statoil (πλέον Equinor) με έδρα τη Νορβηγία. Η εταιρεία, προκειμένου να περιορίσει τις εκπομπές GHG, άρχισε να δεσμεύει το CO₂ και να το διοχετεύει εκ νέου στον σχηματισμό Utsira, έναν αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα σε βάθος περίπου 1 χιλιομέτρου και απόσταση 200 μέτρων από την ακτή. Περίπου 0,9 Mt CO₂ διοχετεύονταν σε αυτόν τον σχηματισμό κάθε χρόνο, ενώ το έργο υπολογιζόταν να αυξήσει τη δυναμικότητά του στους 20 Mt μέχρι το 2020 (Ketzer, J. M., et. al. 2015 & Chadwick, R. A., et. al. 2004). Η επιτυχία του αποτέλεσε σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη του CCS, με αποτέλεσμα το 2012 να υπάρχουν 5 έργα CCS μεγάλης κλίμακας σε λειτουργία (IEAGHG & Ketzer, J. M., et. al. 2015). Το 2021, οι εφαρμογές CCS μεγάλης κλίμακας σε όλο τον κόσμο έφταναν τις 133. Από αυτές, οι 27 είναι σε λειτουργία, 4 είναι υπό κατασκευή, 58 βρίσκονται σε προηγμένη ανάπτυξη και 44 σε πρώιμη ανάπτυξη (Global CSS Institute, 2021). Η δυνατότητα δέσμευσης παγκοσμίως ανέρχεται περίπου σε 150 Mt CO₂/έτος (Global CSS Institute, 2021), ενώ μέχρι το 2020, πάνω από 260 Mt CO₂ είχαν αποθηκευτεί με ασφάλεια. Το γεγονός αυτό, δείχνει ότι οι τεχνολογίες

δέσμευσης CO₂ μπορεί να συνεισφέρουν σημαντικά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής (IEAGHG).

Η πλήρης αλυσίδα των CCU και CCS αποτελείται από ένα σύνολο ολοκληρωμένων τεχνολογιών και περιλαμβάνει τρία βασικά βήματα. Το πρώτο εξ αυτών είναι η δέσμευση και ο διαχωρισμός του CO₂ από τα υπόλοιπα στοιχεία που δεσμεύονται, το δεύτερο είναι η συμπίεση και μεταφορά και το τρίτο είναι η χρήση του δεσμευμένου CO₂ (CCU), ή η αποθήκευση του (CCS). Οι πιο κατάλληλες πηγές για την δέσμευση του CO₂ είναι μονάδες μεγάλων και σταθερών εκπομπών (άνω των 100.000 τόνων ανά έτος), όπως εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με καύση φυσικού αερίου ή άνθρακα, διυλιστήρια πετρελαίου, εργοστάσια τσιμέντου και χαλυβουργίες (Ketzer, J. M., et. al. 2015).

Επί του παρόντος, υπάρχουν τρεις κύριες στρατηγικές δέσμευσης: η δέσμευση πριν από την καύση (pre-combustion capture), η δέσμευση μετά από την καύση (post-combustion capture) και η δέσμευση με χρήση καθαρού οξυγόνου κατά την καύση (oxyfuel combustion capture) που αναλύονται παρακάτω (Pehnt, M., et. al. 2009). Όσον αφορά τις μεθόδους ανάκτησης του CO₂, οι κυριότερες είναι η απορρόφηση, φυσική και χημική, η προσρόφηση, ο κρυογονικός διαχωρισμός και οι μεμβράνες διαχωρισμού και επιλέγονται κάθε φορά ανάλογα με την τεχνολογία δέσμευσης (Dubey, A., et. al. 2022, Wilberforce, T., et. al. 2019 & Wilberforce, T., et. al. 2021).

4.1.1 Δέσμευση και διαχωρισμός CO₂

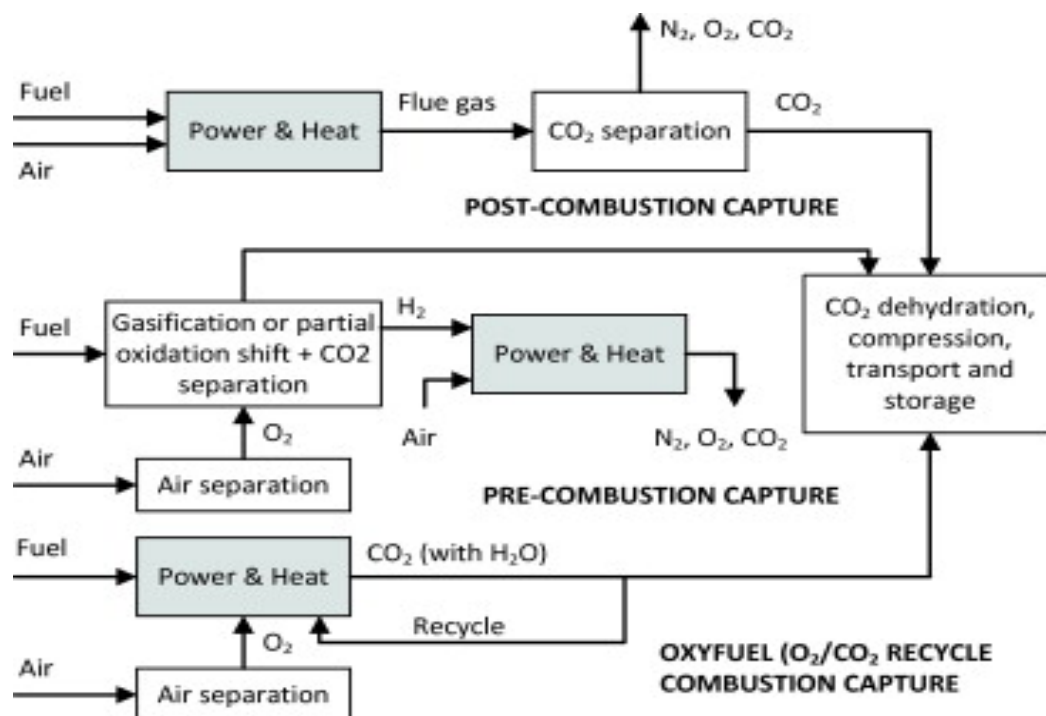
Κατά την δέσμευση του CO₂ πριν από την καύση, το καύσιμο είτε είναι γαιάνθρακας, είτε φυσικό αέριο επεξεργάζεται με σκοπό την απανθρακοποίησή του πριν από την καύση. Από αυτή την επεξεργασία, το καύσιμο μετατρέπεται σε ένα αέριο καύσιμο απαλλαγμένο από άνθρακα και πλούσιο σε H₂ και σε CO (Pehnt, M., et. al. 2009). Η επεξεργασία περιλαμβάνει αεριοποίηση για τον γαιάνθρακα ($C(s) + H_2O + \text{θερμότητα} \rightarrow CO + H_2$) ή αναμόρφωση για το φυσικό αέριο ($CH_4 + H_2O + \text{θερμότητα} \rightarrow CO + 3H_2$). Το μείγμα συνθετικού αερίου (H₂ και CO) βρίσκεται υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία και είναι απαλλαγμένο από άλλα αέρια ρύπων. Στη συνέχεια το μονοξείδιο αντιδρά με ατμό και σχηματίζεται περίσσεια H₂ και CO₂ σε χαμηλή θερμοκρασία ($CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$) (Figuerola, J. D., et. al. 2008, Dubey, A., et. al. 2022, Wilberforce, T., et. al. 2019). Το CO₂, το οποίο έχει συγκέντρωση από περίπου 30% μέχρι και 60% κατ' όγκο, διαχωρίζεται από το H₂ κατά κύριο λόγο

με την διαδικασία της φυσικής απορρόφησης. Ο διαχωρισμός, επίσης, μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τεχνικές προσρόφησης ή μεμβρανών. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Leung, D. Y. C., et. al. 2012).

Κατά τη **δέσμευση του CO₂ μετά την καύση**, το CO₂ διαχωρίζεται από τα άλλα συστατικά καυσαερίων. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδανική για εφαρμογή σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις, ωστόσο παρουσιάζει περιορισμούς λόγω της μικρότερης συγκέντρωσης του CO₂ (<15%) (Luis, P. 2016). Τα καυσαέρια βρίσκονται σε θερμοκρασίες 120 - 180°C και δεδομένης της χαμηλής συγκέντρωσης CO₂, εφαρμόζεται τεχνική διαχωρισμού με χημική απορρόφηση (Dubey, A., et. al. 2022). Οι αμίνες και ειδικότερα η μονοαιθανολαμίνη (MEA) που χρησιμοποιούνται ως διαλύτες απορρόφησης μπορούν να δεσμεύσουν περισσότερο από το 90% του CO₂ σε καθαρότητα υψηλότερη από 99% (Wilberforce, T., et. al. 2019 & Giordano, L., et. al. 2018). Οι προκλήσεις αυτής της τεχνικής αφορούν τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την παραγωγή, την διάθεση και την αναγέννηση των διαλυτών. Υψηλό είναι επίσης και το κόστος που σχετίζεται με τη συμπίεση του δεσμευμένου CO₂ για τη μεταφορά και την αποθήκευσή του (Leung, D. Y. C., et. al. 2012, Zapp, P., et. al. 2012 & Dubey, A., et. al. 2022).

Η τελευταία στρατηγική είναι η **δέσμευση CO₂ με χρήση καθαρού οξυγόνου** κατά την καύση. Η τεχνολογία αυτή, έχει αναγνωριστεί ως μια από τις πιο ανταγωνιστικές επιλογές για τους υφισταμένους ΑΗΣ (Saha, M., et. al. 2022). Κατά την συγκεκριμένη τεχνολογία, ο πλούσιος σε άζωτο (79%) ατμοσφαιρικός αέρας, αρχικά, διαχωρίζεται με σκοπό την παραγωγή σχεδόν καθαρού οξυγόνου (μεγαλύτερη από 95%) με αποτέλεσμα τα καυσαέρια να έχουν υψηλή συγκέντρωση CO₂. Με την απομάκρυνση πλέον του N₂, και την χρήση καθαρού O₂ στην αντίδραση καύσης, το καυσαέριο αποτελείται κυρίως από CO₂ και H₂O, ενώ σε πολύ μικρότερες ποσότητες εντοπίζονται οξείδια του θείου και του αζώτου καθώς και ίχνη ευγενών αερίων. Το H₂O μπορεί να απομακρυνθεί με μια διαδικασία συμπύκνωσης των καυσαερίων και το SO₂ με μια διαδικασία αποθείωσης (Leung, D. Y. C., et. al. 2012 & Saha, M., et. al. 2022). Η συγκέντρωση του CO₂ με αυτή την τεχνική και ανάλογα το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι τουλάχιστον 90% και μπορεί να φτάνει μέχρι και 98%. Η καύση οξυγόνου εφαρμόζεται συνήθως στη βιομηχανία γυαλιού και τη μεταλλουργική βιομηχανία. Το βασικό μειονέκτημα της παρούσας μεθόδου είναι ότι

απαιτεί καθαρό οξυγόνο μέσω διαχωρισμού από το άζωτο του ατμοσφαιρικού αέρα, σε κρυογονικές μονάδες. Ο διαχωρισμός καταναλώνει περίπου το 85% της συνολικής ενέργειας της διεργασίας και έχει αυξημένο κόστος (Dubey, A., et. al. 2022 & Toftgaard, M. B., et. al. 2010). Στο Διάγραμμα 5, παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα ροής των τεχνολογιών δέσμευσης CO₂.



Διάγραμμα 5: Τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ (Pires, J. C. M., et. al. 2011)

Προχωρώντας στις μεθόδους διαχωρισμού του CO₂, οι πιο διαδεδομένες περιλαμβάνουν χρήση διαλύματος ροφητή για φυσική ή χημική δέσμευση, η οποία και εφαρμόζεται κατά κανόνα στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Η διεργασία περιλαμβάνει δύο στάδια, της ρόφησης και της αναγέννησης. Τα καυσαέρια που εξέρχονται από τη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, συμπιέζονται, ψύχονται και στη συνέχεια διοχετεύονται σε αντιδραστήρα όπου το CO₂ κατιονίζεται με το διάλυμα του ροφητή. Στο επόμενο στάδιο το διάλυμα θερμαίνεται ώστε να διαχωριστεί το διοξείδιο του άνθρακα και να αναγεννηθεί ο ροφητής (Giordano, L., et. al. 2018).

Κατά την **χημική ρόφηση**, οι ροφητές που χρησιμοποιούνται είναι υδατικά διαλύματα αμινών. Συνήθως χρησιμοποιούνται αλκαλαμίνες, με την μονοαιθανολαμίνη (MEA) να είναι η πιο διαδεδομένη με απόδοση άνω του 90% (Leung, D. Y. C., et. al. 2012 & Ravikumar, D., et. al. 2020). Γενικότερα, τα διαλύματα με βάση τις αμίνες έχουν υψηλότερη ικανότητα ρόφησης σε συνθήκες μικρής ποσότητας CO₂ (Dubey, A., et. al. 2022 & Figueroa, J. D., et. al. 2008). Ωστόσο, οι διαλύτες με βάση τις αμίνες έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές

επιπτώσεις, λόγω των μεγάλων ενεργειακών απαιτήσεων για τη παραγωγή τους, λόγω της αποβολής τους στο περιβάλλον κατά την διαδικασία της δέσμευσης καθώς και λόγω της χρήσης αμμωνίας, η οποία αντιδρά με οξείδιο του αιθυλενίου (Giordano, L., et. al. 2018).

Η **φυσική ρόφηση** βασίζεται στη ρόφηση και δέσμευση μέσω ηλεκτροστατικών δυνάμεων και δυνάμεων έλξης Van der Waals, βάσει του νόμου του Henry. Οι πιο δημοφιλείς διαλύτες είναι το Selexol (πολυαιθυλενικός διμεθυλαιθέρας γλυκόλης) και το Rectisol (ψυχρή μεθανόλη). Το Selexol χρησιμοποιείται για απομάκρυνση του υδρόθειου και του διοξειδίου του άνθρακα από το φυσικό αέριο, ενώ το Rectisol χρησιμοποιείται σε διεργασίες παραγωγής υδρογόνου. Η χαμηλή θερμοκρασία και η υψηλή πίεση είναι οι βέλτιστες συνθήκες εφαρμογής, ενώ για την ανάκτηση του δεσμευμένου CO₂ απαιτείται αντιστροφή των συνθηκών. Η φυσική απορρόφηση προτιμάται στις περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση CO₂ είναι υψηλή (>15% κατ' όγκο), (Dubey, A., et. al. 2022, Wilberforce, T., et. al. 2019 & Wilberforce, T., et. al. 2021).

Όσον αφορά την **διαδικασία της προσρόφησης** σε στερεά με μεγάλη ενεργό επιφάνεια, όπως ο ζεόλιθος γίνεται εκμετάλλευση φυσικής όσο και χημικής σύνδεσης μεταξύ του CO₂ και της επιφάνειας του προσροφητικού μέσου. Το προσροφημένο CO₂ μπορεί να ανακτηθεί μέσω ελέγχου θερμοκρασίας και πίεσης (Wilberforce, T., et. al. 2019 & Wilberforce, T., et. al. 2021).

Κατά τον **κρυογονικό διαχωρισμό**, το ρεύμα αερίου μετατρέπεται σε υγρό μέσα από μια σειρά σταδίων συμπίεσης, ψύξης και εκτόνωσης κι έπειτα, το υγρό εισέρχεται σε μια αποστακτική στήλη στην οποία δεσμεύεται το CO₂ σε μεγάλες πιέσεις. Η ποσότητα του CO₂ που ανακτάται ανέρχεται έως και 90% της αρχικής ποσότητας στο μείγμα των καυσαερίων (Leung, D. Y. C., et. al. 2012). Ο κρυογονικός διαχωρισμός είναι ωφέλιμος μόνο σε υψηλές συγκεντρώσεις και χαμηλές θερμοκρασίες CO₂, ωστόσο, καταναλώνει πολύ μεγάλη ποσότητα ενέργειας (Bόρριας Η. 2014 & Wilberforce, T., et. al. 2019).

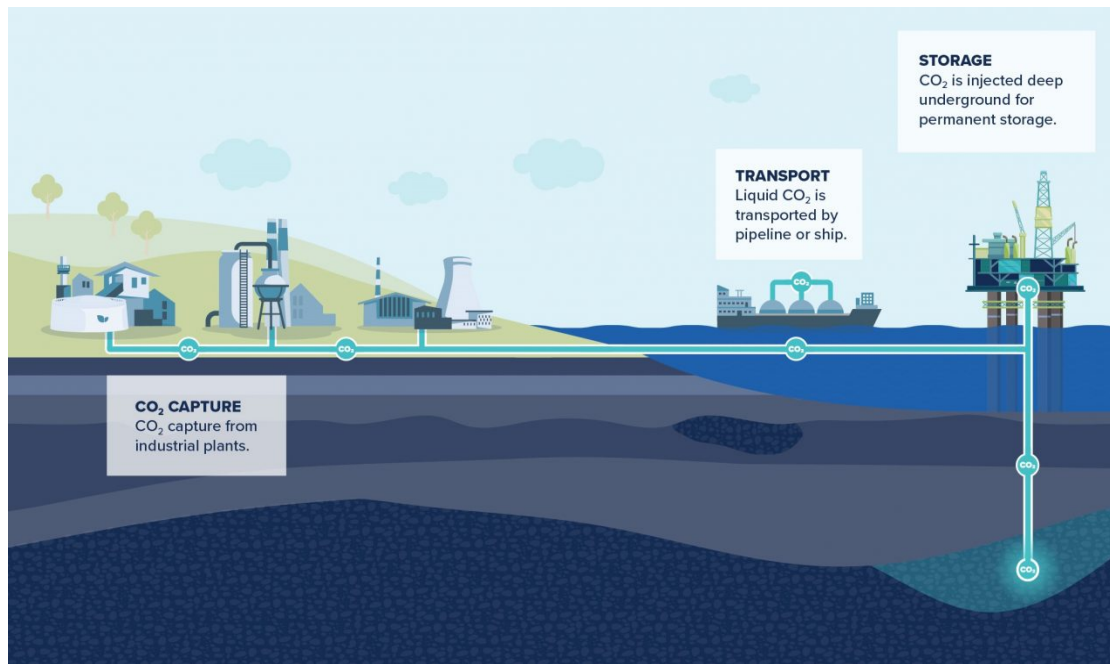
Τέλος, οι **μεμβράνες διαχωρισμού** αποτελούν την πιο φιλική προς το περιβάλλον διεργασία. Πρόκειται για λεπτές ημιδιαπερατές μεμβράνες οι οποίες επιλεκτικά επιτρέπουν τη διέλευση μόνο στο CO₂, ενώ εξαιρούν τα υπόλοιπα συστατικά των καυσαερίων. Η επιλεκτικότητα της μεμβράνης εξαρτάται κυρίως από το είδος της μεμβράνης, τη σύσταση των αερίων και τη διαφορά πίεσης που

εφαρμόζεται πριν και μετά τη μεμβράνη (Luis, P. 2016, Βόρριας Η. 2014, Dubey, A., et. al. 2022 & Wilberforce, T., et. al. 2021).

4.1.2 Μεταφορά και Χρήση ή Αποθήκευση CO₂

Το συμπιεσμένο CO₂ μπορεί να μεταφερθεί μέσω αγωγών, φορτηγών, τρένων ή πλοίων σε δομές προς προσωρινή ή μόνιμη αποθήκευση ή επαναχρησιμοποίησή του. Το διοξείδιο, στα συστήματα αγωγών μεταφέρεται σε αέρια μορφή και σε όλες τις άλλες περιπτώσεις σε υγρή μορφή. Οι αγωγοί θεωρούνται ως ο καλύτερος και πιο βιώσιμος τρόπος μεταφοράς CO₂ σε μεγάλες αποστάσεις (Leung, D. Y. C., et. al. 2012). Σε μικρότερες αποστάσεις, οι οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές είναι πιο ανταγωνιστικές, ενώ στις θαλάσσιες μεταφορές χρησιμοποιούνται κατάλληλα δεξαμενόπλοια (Wang, Y., et. al. 2022).

Η γεωλογική αποθήκευση θεωρείται επί του παρόντος, ως η πιο βιώσιμη επιλογή για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων CO₂. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του CO₂ αποτελεί ότι είναι μη τοξικό, μη διαβρωτικό και μη εύφλεκτο και μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή υπό πίεση άνω των 70 bar σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Jadhav, S. G., et. al. 2014). Προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος διαρροής, αξιολογείται η διαπερατότητα των πετρωμάτων και η γενικότερη γεωλογική δομή (Leung, D. Y. C., et. al. 2012 & Κτενάς, Δ., et. al. 2020). Οι πιο κατάλληλες γεωλογικές τοποθεσίες είναι υπόγειοι βραχώδεις σχηματισμοί, όπως εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου, σχηματισμοί αλατούχου διαλύματος, υποθαλάσσιοι αλατούχοι υδροφορείς και δομές παλιών ανθρακωρυχείων που δεν υπάρχει πλέον δυνατότητα εξόρυξης (Wang, Y., et. al. 2022, Dubey, A., et. al. 2022, Κτενάς, Δ., et. al. 2020 & Understanding CCS, 2018). Στην περίπτωση των εξαντλημένων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, η έγχυση CO₂ μπορεί να οδηγήσει σε ανάκτηση επιπλέον ποσοτήτων πετρελαίου και αερίου (Wang, Y., et. al. 2022). Μελέτες έχουν δείξει ότι αυτές οι γεωλογικές δεξαμενές μπορούν να αποθηκεύουν με ασφάλεια το σύνολο των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου για δεκάδες χρόνια (Ketzer, J. M., et. al. 2015). Στην Εικόνα 23 φαίνεται η διαδικασία δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης του CO₂ σε υποθαλάσσιο σχηματισμό.



Εικόνα 21: Δέσμευση, Μεταφορά και Αποθήκευση CO₂ (www.globalccsinstitute.com)

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνολογιών αυτών, προκύπτουν από όλα τα στάδια της διεργασίας, από τη δέσμευση και τη παραγωγή των διαλυτών, ως και τη συμπίεση και την μεταφορά του CO₂. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που εφαρμόζουν συστήματα δέσμευσης CO₂ ιδιοκαταναλώνουν ένα μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας (Κτενάς, Δ., 2020, Zapp, P., et. al. 2012 & Wilberforce, T., et. al. 2021).

Οι τεχνολογίες CCU και CCS θεωρείται ότι είναι οι μόνες βιώσιμες τεχνικές για τη μείωση των εκπομπών CO₂ στο άμεσο μέλλον για την επίτευξη του κλιματικού στόχου (Dubey, A., et. al. 2022). Ωστόσο απαιτείται συστηματική μελέτη του τελικού ισοζυγίου εκπομπών, ώστε να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα. Μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής για τις παραπάνω τεχνολογίες, έχουν πραγματοποιήσει οι Pehnt, M., et. al. (2009) οι οποίοι μελέτησαν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την παραγωγή 1kWh_e. Οι Viebahn, P., et. al. (2007) και οι Viebahn, P., et. al. (2012), μελέτησαν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την παραγωγή 1kWh_e σε σύγκριση την ίδια παραγωγή με ΑΠΕ, καθώς και το αποτύπωμα χρήσης της τεχνολογίας σε μεγάλη κλίμακα. Οι Wang, Y., et. al. (2022) συνέκριναν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις διαφορετικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση ή χωρίς των τεχνολογιών CCS, ενώ οι Giordano, L., et. al. (2018), ανέλυσαν μόνο τις διαδικασίες δέσμευσης του CO₂ και συνέκριναν τις τεχνολογίες δέσμευσης με αμίνες και τις τεχνολογίες δέσμευσης με μεμβράνες διαχωρισμού. Τέλος, οι Cuéllar-Franca,

R. M., & Azaragic, A. (2015), πραγματοποίησαν μελέτες και ανέλυσαν ξεχωριστά τις επιπτώσεις από την δέσμευση και την μετέπειτα χρήση ή αποθήκευση του CO₂.

4.2 Παραγωγή συνθετικών καυσίμων με υδρογόνωση CO₂

4.2.1 Η Μεθανόλη (CH₃OH)

Η χρήση και η μετατροπή του δεσμευμένου CO₂ από τις παραπάνω διαθέσιμες τεχνολογίες, σε πράσινο καύσιμο με χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αποτελεί την πιο ενδιαφέρουσα κι ελπιδοφόρα για το περιβάλλον χρήση του CO₂. Η συνθετική μεθανόλη (CH₃OH) αποτελεί ένα βιώσιμο καύσιμο που κατά κύριο λόγο, παράγεται από φυσικό αέριο, άνθρακα αλλά και από ανανεώσιμους πόρους όπως η βιομάζα.

Την τελευταία δεκαετία έχουν υλοποιηθεί σημαντικά έργα για την παραγωγή συνθετικής μεθανόλης από ανανεώσιμες πρώτες ύλες, όπως γεωργικά ή αστικά απόβλητα, καθώς ρευμάτων δέσμευσης CO₂, με εγκαταστάσεις στην Ισλανδία και την Ιαπωνία και παράγουν 4000 και 100 τόνους ετησίως, αντίστοιχα (Ravikumar, D., et al. 2020). Η μεθανόλη που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές χαρακτηρίζεται και ως ανανεώσιμη (Methanol Institute, 2019).

Η παραγωγή μεθανόλης με συμβατικές μεθόδους γίνεται από τη δεκαετία του 1930, με την παγκόσμια παραγωγική ικανότητα σήμερα να φτάνει τους 150 εκατομμύρια τόνους (Mt). Το 2019, η παγκόσμια ετήσια κατανάλωση είχε φτάσει σχεδόν τους 98,3 Mt και αναμένεται έως το 2025 να ξεπεράσει τους 120 Mt και έως το 2050 τους 500 Mt. Επιπλέον, μέχρι το 2027 υπολογίζεται ότι θα υπάρχει δυνατότητα να παράγονται περισσότεροι από 8 Mt ανανεώσιμης μεθανόλης. Πρωτοπόρος τόσο στην παραγωγή, όσο και στην κατανάλωση είναι η Κίνα, με κατανάλωση περίπου 55 Mt μεθανόλης το 2018, ενώ ακολουθούν η υπόλοιπη Ασία, η Ευρώπη, η Βόρεια και η Νότια Αμερική (IRENA & Methanol Institute, 2021).

Η μεθανόλη έχει σημαντικό ρόλο στην βιομηχανία, αφού χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ουσιών όπως η φορμαλδεΰδη και το οξικό οξύ, ουσίες που με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται για την παρασκευή προϊόντων καθημερινής χρήσης, όπως χρώματα, πλαστικά, οικοδομικά υλικά αλλά και εξαρτήματα αυτοκινήτων. Πάνω από το 60% της μεθανόλης σήμερα χρησιμοποιείται για τη

σύνθεση της φορμαλδεΐδης και του οξικού οξέος, ενώ το 31% περίπου χρησιμοποιείται ως καύσιμο (IRENA & Methanol Institute, 2021).

4.2.2 Η Μεθανόλη ως πράσινο καύσιμο

Η μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης σε καθαρή μορφή ή σε μείγμα με βενζίνη καθώς και σε τροποποιημένους κινητήρες ντίζελ και ήδη χρησιμοποιείται ως καύσιμο αυτοκινήτων, φορτηγών και λεωφορείων. Ειδικότερα στην Κίνα, τα τελευταία χρόνια ταξί, φορτηγά και λεωφορεία έχουν προσαρμοστεί ώστε να μπορούν να λειτουργούν είτε με 85% μεθανόλη και 15% βενζίνη (M85), είτε με καθαρή μεθανόλη (M100), είτε και με άλλα μείγματα μεθανόλης/βενζίνης. Στην Κίνα καταναλώνονται σήμερα 4,8 Mt μεθανόλης ετησίως για τις οδικές μεταφορές. Εκτός από την Κίνα, η μεθανόλη ως καύσιμο στις οδικές μεταφορές προσελκύει ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον και σε άλλα μέρη του κόσμου, όπως το Ισραήλ, η Ινδία και η Ευρώπη (IRENA & Methanol Institute, 2021). Η καύση καθαρής μεθανόλης σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, όπως η βενζίνη ή το diesel, προκαλεί λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και περιορίζει σημαντικά τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x) (Al-Qahtani, A., et.al. 2020 & Methanol Institute, 2019).

Ένας άλλος τομέας στον οποίο παρουσιάζεται ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την μεθανόλη είναι αυτός των θαλάσσιων μεταφορών. Αυτή τη στιγμή, υπάρχουν περισσότερα από 20 μεγάλα πλοία είτε σε λειτουργία είτε υπό κατασκευή τα οποία κινούνται με μεθανόλη. Ο τομέας της ναυτιλίας είναι υπεύθυνος για το 3% περίπου του συνόλου των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αφού, αφού παραδοσιακά χρησιμοποιείται ως καύσιμο το μαζούτ που έχει υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Στόχος της χρήσης της μεθανόλης είναι η άμεση μείωση του περιεκτικότητας από 3,5% σε 0,5%, όπως επιβάλλουν οι νέοι διεθνείς κανονισμοί.

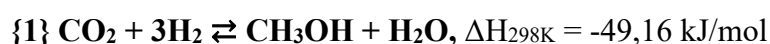
Η μεθανόλη, εκτός των άλλων έχει και μικρότερο κόστος καθώς είναι τρεις έως και τέσσερις φορές φθηνότερη από άλλα καύσιμα. Η μετατροπή του υφιστάμενου στόλου μεγάλων και μικρών πλοίων μπορεί να επιτευχθεί με μέτριο κόστος, ενώ όσον αφορά τις νέες κατασκευές, το κόστος είναι παρόμοιο με αυτό της κατασκευής των παραδοσιακών πλοίων. Συνολικά, τα καύσιμα μεθανόλης καταλαμβάνουν περίπου το 10% της συνολικής ζήτησης καυσίμου παγκοσμίως (Methanol Institute, 2019 & IRENA & Methanol Institute, 2021).

Η καύση της μεθανόλης είναι καθαρότερη και ευκολότερα αντιμετωπίσιμη σε περίπτωση πυρκαγιάς σε σχέση με τη βενζίνη. Η μεθανόλη μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα με νερό σε αντίθεση με τη βενζίνη, που επιπλέει σε αυτό, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε επέκταση της πυρκαγιάς.

Η αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων με ανανεώσιμη μεθανόλη, δύναται να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) έως και 95%, τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) έως και 80%, ενώ δύναται να εξαλείψει σχεδόν πλήρως τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) και σωματιδίων (Methanol Institute, 2019).

4.2.3 Παραγωγή μεθανόλης με υδρογόνωση CO₂

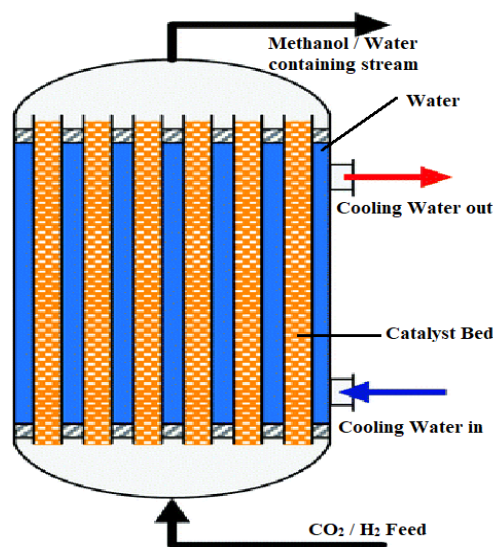
Μια από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους παραγωγής μεθανόλης είναι αυτή της υδρογόνωσης του CO₂. Ένα κοινό σύστημα υδρογόνωσης CO₂ αποτελείται από έναν αντιδραστήρα υδρογόνωσης και από μια στήλη απόσταξης για το διαχωρισμό και τη συλλογή της παραγόμενης μεθανόλης. Κατά την υδρογόνωση του CO₂, σε έναν αντιδραστήρα, σε θερμοκρασίες μεταξύ 200°C και 300°C αντιδρούν το CO₂ με το H₂ για την παραγωγή μεθανόλης μαζί με παραπροϊόν νερό. Ωστόσο, ως παραπροϊόν από την αντίδραση παράγεται και CO, το οποίο προέρχεται από την αντίστροφη αντίδραση μετάθεσης νερού (Reverse Water Gas Shift - RWGS). Το CO αντιδρά εκ νέου με H₂, οπότε και τελικά στον αντιδραστήρα έχουμε τις εξής αντιδράσεις, παρουσία καταλύτη (Bowker, M. 2019 & Peppas, A., et. al. 2023):



Στην έξοδο από τον αντιδραστήρα, υπάρχει μεθανόλη, νερό, καθώς και CO₂, CO και H₂ που δεν αντέδρασαν. Το ρεύμα συμπυκνώνεται και τα αέρια που δεν αντέδρασαν, διαχωρίζονται από την μεθανόλη και το νερό και στην συνέχεια επιστρέφουν πίσω στον αντιδραστήρα για να αυξηθεί η τελική μετατροπή του CO₂. Η μεθανόλη και το νερό ακολούθως, εισέρχονται στην στήλη απόσταξης όπου θερμαίνονται με σκοπό την εξάτμιση της μεθανόλης και τον διαχωρισμό της από το νερό.

Πολύ σημαντικό ρόλο στις διεργασίες παραγωγής μεθανόλης παίζει ο αντιδραστήρας υδρογόνωσης. Ο αντιδραστήρας Lurgi (Εικόνα 22), είναι ένας

καταλυτικός αντιδραστήρας πολλαπλών σωληνώσεων για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και την επίτευξη μεγάλου βαθμού αντίδρασης και συνολικής μετατροπής CO₂. Στον χώρο μεταξύ των σωλήνων ρέει ψυκτικό, συνήθως νερό, ενώ οι σωλήνες είναι γεμάτοι με σωματίδια καταλύτη. Το αέριο τροφοδοσίας ρέει σε αξονική κατεύθυνση μέσω των σωλήνων και ψύχεται από το περιβάλλον νερό, με αποτέλεσμα την μετατροπή περίπου του 80% της θερμότητας της αντίδρασης σε ατμό μέσης πίεσης (Dieterich, V., et. al. 2020 & Peppas, A., et. al. 2023).



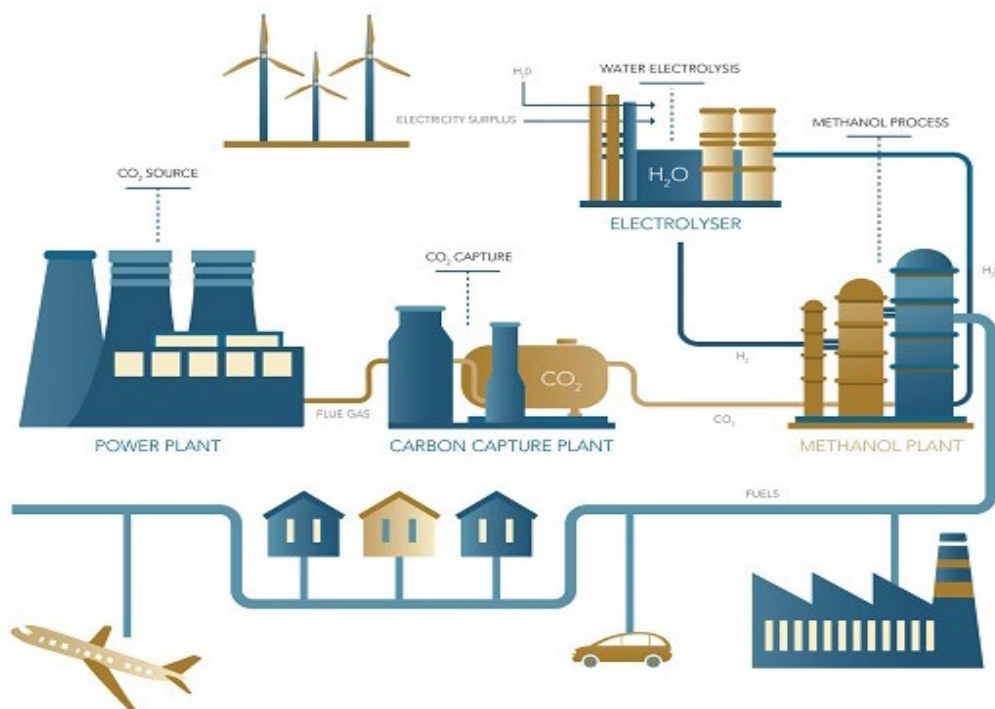
Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση του αντιδραστήρα Lurgi (Dieterich, V., et. al. 2020)

Οι αντιδραστήρες Lurgi παράγουν το 30% της παγκόσμιας ζήτησης μεθανόλης, ενώ έχουν μεγάλες δυνατότητες παραγωγής (Leonzio, G. 2020). Υπάρχουν δύο κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες οι οποίες είναι η σύνθεση υψηλής πίεσης που λειτουργεί στα 300 bar και η σύνθεση χαμηλής πίεσης, που λειτουργεί στα 50-100 bar. Η κυρίαρχη τεχνολογία για την παραγωγή μεθανόλης είναι οι διεργασίες χαμηλής πίεσης. Η σύνθεση χαμηλής πίεσης ευνοεί τη μετατροπή της μεθανόλης και εμποδίζει την παραγωγή παραπροϊόντων (Keshavarz, A., et.al. 2020).

Οι καταλύτες έχουν ως βάση το Cu και Zn ή τα οξειδιά τους, συνήθως μαζί με Al₂O₃ ή Cr₂O₃ (Cu/Zn/Al₂O₃, Cu/Zn/Cr₂O₃) και διάφορα σταθεροποιητικά πρόσθετα. Ο καταλύτης παίζει σημαντικό ρόλο στην όλη απόδοση, γι' αυτό και είναι συνεχώς υπό ανάπτυξη καταλύτες που μπορούν να λειτουργήσουν σε πιο ήπιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (Jadhav, S. G., et. al. 2014, IRENA & Methanol Institute, 2021). Οι καταλύτες με βάση τον χαλκό εξακολουθούν να παραμένουν οι καταλληλότεροι καταλύτες καθώς διακρίνονται για την υψηλή δραστηριότητα και την

επιλεκτικότητά τους (>99%) σε μεθανόλη (Spadaro, L., et. al. 2017 & Dieterich, V., et. al. 2020). Ωστόσο οδηγούν σε παραγωγή σημαντικής ποσότητας υδρατμών που επηρεάζει την απόδοση και την διάρκεια ζωής του καταλύτη (Ren, M., et. al. 2022) και «δηλητηριάζονται» από τις θειούχες ενώσεις και τα χλωρίδια, με αποτέλεσμα τελικά η τυπική διάρκεια ζωής των βιομηχανικών καταλυτών να είναι 4 με 6 χρόνια (Dieterich, V., et. al. 2020).

Η τεχνολογία υδρογόνωσης CO₂ για παραγωγή καυσίμων είναι μια βιώσιμη στρατηγική για την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (Al-Qahtani, A., et. al. 2020). Ωστόσο, το υδρογόνο (H₂) παρόλο που μπορεί να συνεισφέρει καθοριστικά τόσο στην παραγωγή πράσινου καυσίμου, όσο και γενικότερα στον στόχο της κλιματικής ουδετερότητας, σήμερα σχεδόν στο σύνολο του παράγεται από ορυκτά καύσιμα. Στα τέλη του 2021, σχεδόν το 47% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου προήλθε από φυσικό αέριο και μόνο το 4% προήλθε από ηλεκτρόλυση. Για την ηλεκτρόλυση, το 33% της ηλεκτρικής ενέργειας προήλθε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πράγμα που σημαίνει ότι μόνο το 1% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. (IEA, 2019 & IRENA).



Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ανανεώσιμης μεθανόλης ως καύσιμο (MeOHCO₂)

Και σε αυτή την περίπτωση απαιτείται η συστηματική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τον κύκλο ζωής. Μελέτες έχουν γίνει από τους Ravikumar, D., et. al. (2020) και τους Maimaiti, S., et. al. (2023), οι οποίοι μελέτησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής 1tn και 1kg μεθανόλης, αντίστοιχα,

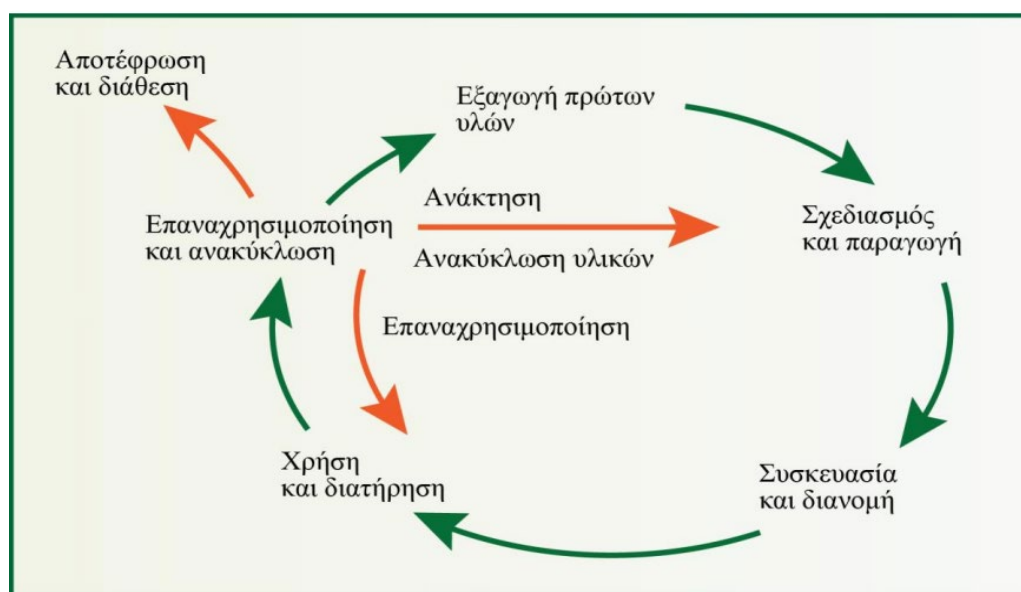
από δεσμευμένο CO₂ και από H₂ από ηλεκτρόλυση με ενέργεια ανανεώσιμων πηγών και από τους Al-Qahtani, A., et. al. (2020), οι οποίοι πραγματοποίησαν την ίδια μελέτη αλλά επιπλέον συνέκριναν τις επιπτώσεις της μεθανόλης ως καύσιμο με τα υπόλοιπα διαθέσιμα καύσιμα για τις οδικές μεταφορές.

5. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)

5.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Η κλιματική αλλαγή και οι συνέπειές της έχουν εγείρει ανησυχίες και έχουν εντείνει την κλιματική ευαισθητοποίηση και την ανάγκη επίτευξης του στόχου της αιεφόρου ανάπτυξης. Για να υπάρξει βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων καθώς και ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου κάθε δραστηριότητας που επηρεάζει το περιβάλλον, έχουν αναπτυχθεί και ήδη βρίσκονται σε χρήση ορισμένα εργαλεία περιβαλλοντικής διαχείρισης (environmental management tools).

Τα κυριότερα εξ αυτών είναι ο «Καθαρός Σχεδιασμός» (Clean Design), η «Βιομηχανική Οικολογία» (Industrial Ecology), η «Διαχείριση Προϊόντων» (Product Stewardship) και ειδικότερα η «Ανάλυση Κύκλου Ζωής» (Life Cycle Assessment) (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015). Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), ορίζεται ως ένας συστηματικός τρόπος αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, μιας μεμονωμένης δραστηριότητας ή μιας υπηρεσίας ακολουθώντας μια συγκεκριμένη προσέγγιση. Αυτή η μεθοδολογία απαιτεί την αναγνώριση και την ποσοτική αξιολόγηση των υλικών, των ενεργειακών ροών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, από την εξαγωγή υλικών από το περιβάλλον, την παραγωγή και την χρήση μέχρι και την τελική διάθεση του προϊόντος στο τέλος της ζωής του. Στην Εικόνα 24 παρουσιάζεται σχηματικά ο κύκλος ζωής (Krozer, J., et. al. 1998, Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015 & Golsteijn, L. 2020).



Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου ζωής (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015)

Ιστορικά, η έννοια του Κύκλου Ζωής θεωρείται ότι αναφέρθηκε πρώτη φορά το 1884, ενώ η έννοια του σύγχρονου όρου της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής ξεκίνησε το 1960. Το 1884, ένας οικονομολόγος από την Σκωτία, ο Patrick Geddes παρατηρώντας την ταχεία ανάπτυξη του γαιάνθρακα ως πηγή ενέργειας, ασχολήθηκε με τις πιθανές βελτιώσεις της επίδοσης του κύκλου ζωής της αλυσίδας παραγωγής του. Τη δεκαετία του 1960, υπήρχε αυξημένο ενδιαφέρον, κυρίως γύρω από τα θέματα της ενεργειακής αποδοτικότητας και της κατανάλωσης πρώτων υλών και σε μικρότερο ποσοστό στο ζήτημα της παραγωγής και της διάθεσης αποβλήτων. Μάλιστα στο τέλος της δεκαετίας και συγκεκριμένα το 1969, η εταιρεία Coca Cola χρηματοδότησε μια μελέτη ανάλυσης του κύκλου ζωής προκειμένου να συγκρίνει και να περιορίσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαφόρων συσκευασιών των προϊόντων της (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015 & Amahmoud, A., et. al. 2022).

Τη δεκαετία του 1970 στις ΗΠΑ, πραγματοποιήθηκαν μελέτες AKZ με διαφοροποιημένες μεθοδολογίες και χωρίς κοινό θεωρητικό πλαίσιο, με αποτέλεσμα σε μία μελέτη της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος το 1974 να παρουσιαστούν σημαντικές διαφορές για το ίδιο προϊόν. Η Ευρώπη, ακολουθώντας τις ΗΠΑ, υιοθέτησε την AKZ το 1972, όταν ένας Άγγλος επιστήμονας, ο Ian Boustead υπολόγισε τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή συσκευασιών από διάφορα υλικά (Boustead, I. 1996). Κατόπιν, το ενδιαφέρον στράφηκε στην ανάπτυξη λογισμικών που να υποστηρίζουν την υλοποίηση μελετών AKZ, με εμφάνιση των λογισμικών GaBi (πλέον Sphera LCA for Experts) και SimaPro (Amahmoud, A., et. al. 2022) το 1989 και το 1990 αντίστοιχα. Το 1989, ο SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) έγινε ο πρώτος διεθνής οργανισμός που άρχισε να εποπτεύει την πρόοδο της AKZ, ενώ ταυτόχρονα ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization - ISO) άρχισε να εκδίδει σχετικά πρότυπα το 1994. Έτσι, κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών, ως μέρος του προτύπου ISO 14000 για την περιβαλλοντική διαχείριση, εκδόθηκαν τα ακόλουθα τέσσερα πρότυπα ISO (Amahmoud, A., et. al. 2022):

- α) Principles and Framework (ISO 14040) το 1997,
- β) Goal and Scope Definition and Inventory Analysis (ISO 14041) το 1998,
- γ) Life Cycle Impact Assessment (ISO 14042) το 2000,
- δ) Life Cycle Interpretation (ISO 14043) το 2000.

Η AKZ παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα με ακριβείς πληροφορίες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το λίκνο ως τον τάφο (from cradle to grave), όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στην βιβλιογραφία που περιλαμβάνει τις διεργασίες από τη παραγωγή των πρώτων υλών μέχρι την τελική απόρριψη. Μελέτες κύκλου ζωής μπορεί να λάβουν χώρα και μεμονωμένα στα επιμέρους στάδια, δηλαδή από λίκνο σε πύλη (from cradle to gate), από τις πρώτες ύλες δηλαδή μέχρι την πύλη του εργοστασίου παραγωγής ή από πύλη σε πύλη (from gate to gate) με εστίαση μόνο στις διαδικασίες παραγωγής (Golsteijn, L. 2020).

5.2 Μεθοδολογία και Πρότυπα ISO

Για να εξασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αναλύσεων του κύκλου ζωής, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης παρέχει από το 2006 δύο συμπληρωματικά πρότυπα, το ανανεωμένο ISO 14040 στο οποίο περιγράφονται οι αρχές και το πλαίσιο των AKZ και το ISO 14044. Τα πρότυπα αυτά, αναλύουν και καθορίζουν τις απαιτήσεις και παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές για την AKZ χωρίς να τροποποιούν τα ήδη εφαρμοσμένα πρότυπα (Golsteijn, L. 2020 & Amahmoud, A., et. al. 2022). Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής αποτελείται από τα ακόλουθα τέσσερα στάδια:

- i. Καθορισμός των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης (Goal and Scope definition - ISO 14040)
- ii. Ανάλυση καταγραφής δεδομένων (Life Cycle Inventory, LCI - ISO 14041)
- iii. Εκτίμηση των επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment, LCIA - ISO 14042),
- iv. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation - ISO 14042).

5.2.1 Καθορισμός των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης (Goal and Scope definition)

Ο καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής μιας μελέτης αποτελεί την πρώτη φάση κατά την εκτίμηση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, μιας διαδικασίας ή μιας δραστηριότητας και περιλαμβάνει τα ακόλουθα επιμέρους στάδια (Ζουμπούλης, A., et. al. 2015):

- Σκοπός: Ο ορισμός του σκοπού θέτει τα όρια της ανάλυσης του κύκλου ζωής και συγκεκριμένα, τα στοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτόν και τη μέθοδο εκτίμησης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.
- Στόχος: Ο στόχος πρέπει να δηλώνει με ακρίβεια την επιθυμητή εφαρμογή της μελέτης, τις αιτίες διεξαγωγής της και τους τελικούς αποδέκτες που θα την χρησιμοποιήσουν.
- Λειτουργική μονάδα: Η λειτουργική μονάδα, θέτει την κλίμακα για τη μετρήσιμη σύγκριση δύο ή και περισσότερων προϊόντων. Μια ορθά καθορισμένη λειτουργική μονάδα που διασφαλίζει την ισοδυναμία επιτρέπει την ουσιαστική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.
- Όρια συστήματος: Τα όρια του συστήματος καθορίζουν τις επιμέρους διεργασίες ή λειτουργίες που θα ληφθούν υπόψιν, στάδια όπως η κατασκευή, η μεταφορά και η διαχείριση αποβλήτων. Επιπλέον, καθορίζουν τις εισροές και τις εκροές κατά την εκτίμηση του κύκλου ζωής. Τα όρια του συστήματος μπορούν να αποκλείσουν μικρές ποσότητες συστατικών που συνεισφέρουν ελάχιστα στο συνολικό αποτύπωμα και μένουν εκτός του σκοπού της μελέτης.
- Ποιότητα δεδομένων: Η ποιότητα μιας μελέτης AKZ καθορίζεται γενικά από την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.
- Διαδικασία κριτικής επισκόπησης: Το στάδιο αυτό πραγματοποιείται για την εξασφάλιση όλων των απαιτήσεων υλοποίησης της AKZ.

Το παραπάνω πλαίσιο αναθεωρείται και βελτιώνεται συνεχώς, σύμφωνα με την εξέλιξη της μεθοδολογίας (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015).

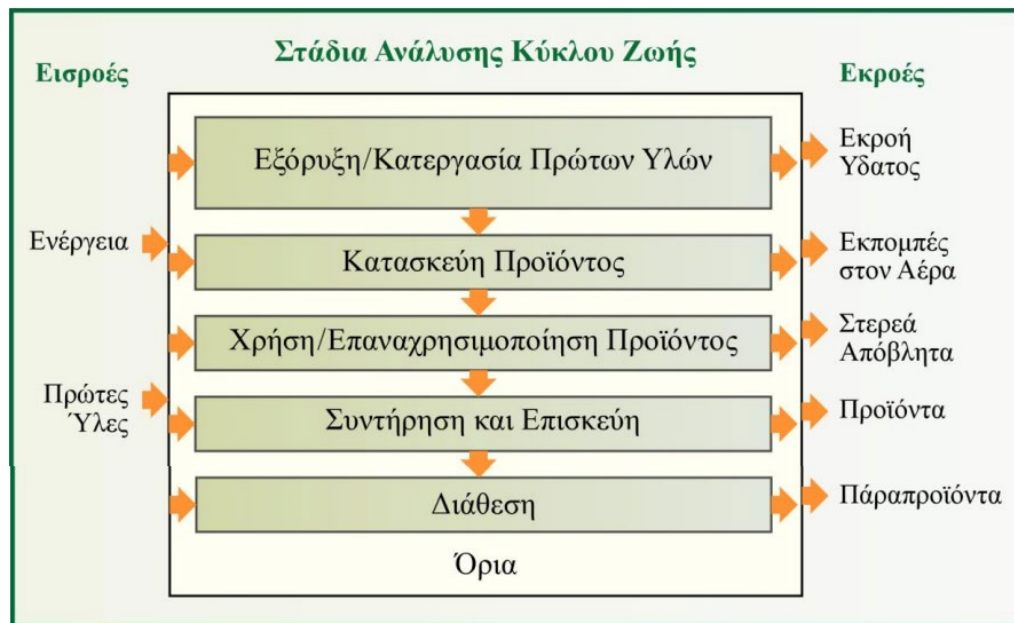
5.2.2 Ανάλυση καταγραφής δεδομένων (Life Cycle Inventory, LCI)

Η δεύτερη φάση της μεθοδολογίας για την δημιουργία μιας μελέτης AKZ, περιλαμβάνει την καταγραφή όλων των διαθέσιμων δεδομένων, δηλαδή όλων των εισροών και εκροών που σχετίζονται με ένα προϊόν ή μια υπηρεσία στον κύκλο ζωής του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Αναλυτικότερα αυτό το στάδιο της ανάλυσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα θέματα (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015):

- Συλλογή δεδομένων: Η συλλογή δεδομένων αποτελεί την πιο χρονοβόρα διαδικασία κατά τη διεξαγωγή της μελέτης AKZ και συνήθως υποστηρίζεται από λογισμικά και ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων. Η ορθή συλλογή των δεδομένων

είναι εξαιρετικά σημαντική και για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

- Επανακαθορισμός των ορίων του συστήματος: Κατόπιν της συλλογής των δεδομένων, αξιολογείται η ανάγκη αναθεώρησης των ορίων του συστήματος.
- Αναφορά δεδομένων: Τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από την ανάλυση καταγραφής ομαδοποιούνται σε τεχνικές εκθέσεις για τον τελικό έλεγχο από τους ενδιαφερόμενους, με σκοπό να αναδειχθούν σημεία, τα οποία χρίζουν βελτίωσης ή διαφοροποίησης.
- Συσχέτιση δεδομένων: Όλα τα δεδομένα εισροών και εκροών ανάγονται με βάση την λειτουργική μονάδα που ορίστηκε στο παραπάνω στάδιο.
- Κατανομή επιπτώσεων και συσχετίσεων: Στις περιπτώσεις που το εξεταζόμενο σύστημα είναι αρκετά πολύπλοκο μπορεί να απαιτείται η επιλογή των σημαντικότερων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιμέρους συστατικών και εκροών του μελετώμενου συστήματος.



Εικόνα 25: : Διάγραμμα ροής ενός προϊόντος (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015)

5.2.3 Εκτίμηση των επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

Η εκτίμηση των επιπτώσεων αποτελεί την τρίτη φάση της ΑΚΖ. Σε αυτή την φάση κατηγοριοποιούνται οι επιπτώσεις όλων των διαδικασιών που συλλέγονται σε επιπτώσεις στο περιβάλλον ή στην ανθρώπινη υγεία. Τα αποτελέσματα μπορεί να παρουσιάζουν είτε μια ενιαία βαθμολογία που να δείχνει πόσο βιώσιμο είναι ένα προϊόν είτε κατά πόσο περιορίζει τις εκπομπές CO₂ και πώς επηρεάζει τη χρήση γης

(Golsteijn, L. 2020). Η φάση αυτή περιλαμβάνει τα παρακάτω θέματα (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015):

- Ορισμός της κατηγορίας: Στο πρώτο βήμα, ορίζονται οι κατηγορίες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι κυριότερες κατηγορίες με βάση την τρέχουσα μέθοδος που έχει προταθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τον χαρακτηρισμό του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος ενός Προϊόντος είναι:
 - 1) Κλιματική αλλαγή (Climate change)
 - 2) Καταστροφή του όζοντος (Ozone depletion)
 - 3) Τοξικότητα στον άνθρωπο - καρκινογόνες επιδράσεις (Human toxicity)
 - 4) Τοξικότητα για τον άνθρωπο - μη καρκινογόνες επιδράσεις (Human toxicity)
 - 5) Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate matter)
 - 6) Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation)
 - 7) Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος (Photochemical ozone formation)
 - 8) Ευτροφισμός - χερσαίος (Eutrophication)
 - 9) Ευτροφισμός - υδάτινος (Eutrophication)
 - 10) Οξίνιση (Acidification)
 - 11) Οικοτοξικότητα για καθαρά υδατικά συστήματα (Ecotoxicity)
 - 12) Εξάντληση πόρων - νερό (Depletion of sources)
 - 13) Εξάντληση πόρων - ορυκτά, μεταλλεύματα (Depletion of sources)
 - 14) Μετασχηματισμός της γης
- Κατηγοριοποίηση: Στο βήμα αυτό κατηγοριοποιούνται τα δεδομένα εισροών και εκροών, στις ανάλογες κατηγορίες επιπτώσεων. Η ταξινόμηση αυτή αποτελεί ένα ποιοτικό βήμα, που στηρίζεται στην επιστημονική ανάλυση των σχετικών περιβαλλοντικών διαδικασιών.
- Χαρακτηρισμός: Στη συνέχεια, κάθε κατηγορία διαμορφώνεται υπό τη μορφή δεικτών και τελικά δημιουργείται μια συγκεντρωτική βάση δεδομένων για το σύνολο των εισροών και των εκροών του συστήματος. Με τη χρήση των δεικτών επιτυγχάνεται μια περισσότερο κατανοητή απεικόνιση της συνολικής θετικής ή αρνητικής μεταβολής των εισροών και εκροών στην κάθε κατηγορία που εξετάζεται.
- Εκτίμηση/Αξιολόγηση: Στόχος του βήματος αυτού αποτελεί η παρουσίαση της σημασίας των αποτελεσμάτων. Τα επιμέρους αποτελέσματα κάθε κατηγορίας αξιολογούνται και προσδιορίζουν τις επιδράσεις των κύκλων ζωής.

5.2.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation)

Η τελευταία φάση της AKZ, περιλαμβάνει την αξιολόγηση, την περαιτέρω ερμηνεία των παραπάνω αντικειμένων και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των συμπερασμάτων. Το πρότυπο ISO 14044 περιγράφει αρκετές μεθόδους για τον έλεγχο των δεδομένων (Golsteijn, L. 2020). Σε αυτή την φάση περιλαμβάνονται τα παρακάτω θέματα (Ζουμπούλης, Α., et. al. 2015):

- Αναγνώριση των επιμέρους διεργασιών με τις μεγαλύτερες επιπτώσεις: Σε αυτό το βήμα συλλέγονται πληροφορίες από τις φάσεις της καταγραφής και της εκτίμησης των επιπτώσεων της μελέτης με σκοπό τον καθορισμό των σημαντικότερων περιβαλλοντικών ζητημάτων (σύμφωνα με την πρώτη φάση).
- Εκτίμηση επιπτώσεων: Σκοπός αυτού του βήματος είναι ο έλεγχος της ορθότητας των αποτελεσμάτων της μελέτης βάσει του πρότυπου ISO 14044.
- Συμπεράσματα και προτάσεις: Τελικώς, εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα με βάση την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και παρατίθενται προτάσεις για την βελτίωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου.

5.3 Λογισμικό LCA παρούσας εργασίας

Μέχρι σήμερα, υπάρχουν πολλά λογισμικά που πραγματοποιούν AKZ στην αγορά. Τα πιο διαδεδομένα εξ αυτών είναι το Sphera LCA for Experts (GaBi), το SimaPro και το OpenLCA. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Sphera LCA for Experts (GaBi), το οποίο αποτελεί ένα από τα κορυφαία λογισμικά τόσο για τη βιομηχανία όσο και για τον ακαδημαϊκό κόσμο.

Το λογισμικό Sphera LCA for Experts (GaBi) είναι διεθνώς αναγνωρισμένο και σημαντικά αξιόπιστο, ενώ λόγω της εύκολης χρήσης του έχει πλήθος χρηστών (πάνω από 10.000) και χρησιμοποιείται από μικρές επιχειρήσεις, μεγάλες εταιρείες ως και άλλους μεγάλους φορείς. Το Sphera LCA for Experts (GaBi), προσφέρει ένα φιλικό και εύχρηστο προς το χρήστη γραφικό περιβάλλον κι έτσι οι χρήστες μπορούν πιο εύκολα να περιηγηθούν στα πολλά μέρη και τις λειτουργίες του. Το λογισμικό περιλαμβάνει βάσεις δεδομένων για Life Cycle Inventory (LCI) σε διάφορους κλάδους, όπως ηλεκτρονικά, χημικά, πλαστικά και κατασκευές. Όλα τα περιεχόμενα στις βάσεις δεδομένων του Sphera ανανεώνονται πλήρως κάθε χρόνο κι έτσι,

επιτρέπει στους χρήστες να αξιολογούν γρήγορα, αποτελεσματικά και βάσει των πιο πρόσφατων δεδομένων τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (DEISO & GHGProtocol).

6. Μεθοδολογία και Υπολογιστική Διαδικασία της παρούσας ΑΚΖ

6.1 Καθορισμός των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης

6.1.1 Σκοπός και στόχος της μελέτης

Σκοπός της συγκεκριμένης Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής είναι η συγκριτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής 1MWh_e από i) αιολικά πάρκα, ii) συμβατικές λιγνιτικές μονάδες και iii) λιγνιτικές μονάδες που εφαρμόζουν δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα με αμίνες με σκοπό την παραγωγή μεθανόλης (CCU) με χρήση πράσινου υδρογόνου. Στόχος της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού αντικτύπου κάθε διεργασίας ξεχωριστά και ο προσδιορισμός της πιο φιλικής εξ αυτών προς το περιβάλλον με απώτερο στόχο τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής.

6.1.2 Καθορισμός λειτουργικής μονάδας αναφοράς

Η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα Ανάλυση Κύκλου Ζωής, είναι η παραγωγή 1MWh_e ηλεκτρικής ενέργειας.

6.1.3 Καθορισμός των σεναρίων

Για την διεξαγωγή της συγκεκριμένης μελέτης καθορίστηκαν τρία σενάκια. Στο πρώτο σενάριο και σενάριο βάσης (base case), αναλύεται η παραγωγή 1MWh_e από λιγνίτη και στο δεύτερο σενάριο, αναλύεται η παραγωγή 1MWh_e από αιολικά πάρκα. Στο τρίτο σενάριο, αναλύεται η παραγωγή 1MWh_e από λιγνίτη με ταυτόχρονη δέσμευση του παραγόμενου CO₂ για την παραγωγή συνθετικής μεθανόλης (CCU).

6.1.4 Καθορισμός και περιγραφή των ορίων του συστήματος

Στην μελέτη αυτή, περιλαμβάνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις για την παραγωγή 1MWh_e ηλεκτρικής ενέργειας στα τρία σενάκια. Στο πρώτο σενάριο αναλύονται οι επιπτώσεις από την εξόρυξη ως και την καύση του λιγνίτη για την παραγωγή 1MWh_e και στο δεύτερο σενάριο αναλύονται οι επιπτώσεις που

προκύπτουν από την παραγωγή 1MWh_e με αιολικά πάρκα. Στο τρίτο σενάριο αναλύεται η παραγωγή 1MWh_e ηλεκτρισμού από λιγνίτη και η δέσμευση και η συμπίεση του παραγόμενου CO₂ για την παραγωγή συνθετικής μεθανόλης. Τα όρια του συστήματος για τα τρία σενάρια παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 6, 7 και 8.

Στο διάγραμμα που αφορά το Σενάριο 1, για την παραγωγή 1MWh_e, καταναλώνεται 1,71t λιγνίτη κι εκπέμπονται εκτός των άλλων, 1,12t CO₂ από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής κι άλλα 0,0887t από τα λιγνιτωρυχεία σύμφωνα με την ανάλυση των Σταματίου Γ. και Καρέλλα Σ., ενώ όσον αφορά τα δεδομένα του 2^{ου} σεναρίου για την παραγωγή 1MWh_e με αιολικά πάρκα, αυτά έχουν ληφθεί από το λογισμικό Sphera LCA for Experts (GaBi).

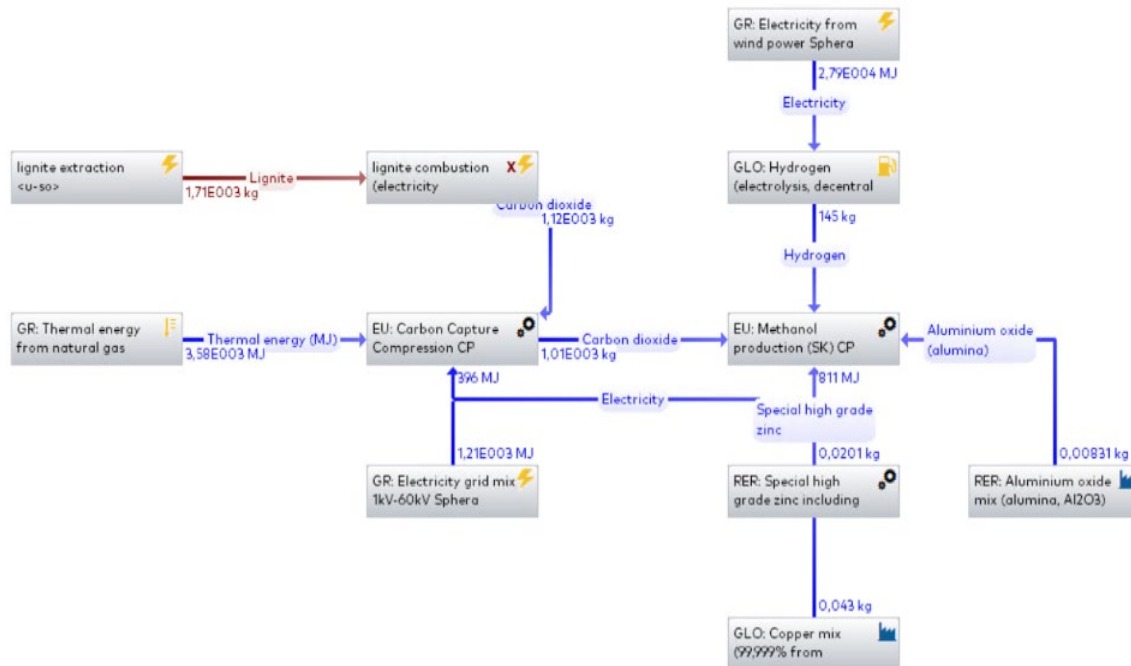
Στο διάγραμμα του 3^{ου} σεναρίου, φαίνεται η υδρογόνωση του δεσμευμένου CO₂ για την παραγωγή μεθανόλης παρουσία καταλύτη Cu/Zn/Al₂O₃. Το παραγόμενο CO₂ δεσμεύεται μετά την καύση χρησιμοποιώντας ένα σύστημα αμινών και συγκεκριμένα μονοαιθανολαμίνης (MEA) καθώς έχει υψηλή (≥90%) απόδοση δέσμευσης άνθρακα. Το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα από αιολικά πάρκα. Για την παραγωγή 1MWh_e, καταναλώνεται 1,71t λιγνίτη κι εκπέμπονται 1,12t CO₂ από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (Σταματίου Γ. 2015). Θεωρώντας ότι από το σύστημα της MEA δεσμεύτηκε το 90%, 1,01t CO₂ οδηγείται προς παραγωγή μεθανόλης, μαζί με 145kg H₂ που προέκυψαν με ηλεκτρόλυση νερού με ενέργεια από αιολικά πάρκα. Από το CO₂ που παράγεται για κάθε 1MWh_e, δύναται να παραχθούν 693kg μεθανόλης. Ιδιαίτερης σημασίας είναι και ο καταλύτης της διεργασίας Cu/Zn/Al₂O₃, για τον οποίο για παραγωγή 693kg μεθανόλης απαιτούνται 0,043 kg Cu, 0,0201 kg υψηλής ποιότητας Zn και 0,00831 kg Al₂O₃ (Ravikumar, D., et. al. 2020). Για το Σενάριο 3 και την παραγωγή 693kg μεθανόλης με αυτή την μέθοδο, οι καταναλισκόμενες ποσότητες έχουν αναχθεί από τις αντίστοιχες της μελέτης των Ravikumar, D., et. al. (2020). Όσον αφορά τις καταναλώσεις ρεύματος, προσδιορίστηκε ότι για την παραγωγή 693kg μεθανόλης απαιτούνται 811MJ (Treyer, K., et. al. 2021), για το υδρογόνο απαιτούνται 27.900MJ σύμφωνα με το λογισμικό Sphera LCA for Experts (GaBi) και για την δέσμευση 1,12t CO₂ απαιτούνται 396MJ ηλεκτρικής και 3.580MJ θερμικής ενέργειας (Giordano, L., et. al. 2018).



Διάγραμμα 6: Παραγωγή ηλεκτρισμού από λιγνίτη (Σενάριο 1)



Διάγραμμα 7: Παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολικά πάρκα (Σενάριο 2)



Διάγραμμα 8: Παραγωγή ηλεκτρισμού από λιγνίτη και CCU (παραγωγή συνθετικής μεθανόλης) (Σενάριο 3)

6.2 Καταγραφή δεδομένων του συστήματος

Το επόμενο βήμα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε αφορά την ανάλυση καταγραφής των δεδομένων του συστήματος, δηλαδή όλων των περιβαλλοντικών εισροών και εκροών που σχετίζονται με κάθε σενάριο. Αρχικά, για το Σενάριο 1 και σύμφωνα με την μελέτη του Σταματίου Γ. (2015), για την παραγωγή 1MWh_e από λιγνίτη οι εισροές και οι εκροές του συστήματος παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Εισροές και εκροές Σεναρίου 1

Εισροές		
Λιγνίτης	1,71	t/MWh _e
Εκροές		
Ηλεκτρισμός	1	MWh _e

Εκπομπές	Λιγνιτωρυχείο	ΑΗΣ	Εκπομπές	Λιγνιτωρυχείο	ΑΗΣ	
Στον αέρα						
NM VOC	5,01E-05	2,33E-06	As	7,25E-09	8,47E-08	t/MWhe
NOx	1,78E-04	4,38E-04	Ni	7,75E-08	1,29E-07	t/MWhe
PM2.5-10	7,50E-06	3,90E-06	Pb	1,84E-08	7,69E-08	t/MWhe
PM2.5	4,70E-05	1,20E-05	Hg	3,97E-09	7,30E-08	t/MWhe
SO ₂	3,48E-04	2,51E-04	Cr	2,36E-08	4,00E-08	t/MWhe
CO ₂	8,87E-02	1,12	Cr-VI	6,89E-10	3,85E-09	t/MWhe
NH ₃	2,54E-07	1,17E-05	Formaldehyde	8,94E-08	5,19E-07	t/MWhe
Cd	2,15E-09	1,09E-08	Dioxins	8,04E-15	6,46E-14	t/MWhe
Aerosols, radioactive	1,65E-02	5,50E-03	Noble gases, radioactive	651.000	240.000	Bq/MWhe
Carbon-14	66,9	28,2	Thorium-230	3,63E-02	1,43E-02	Bq/MWhe
Iodine-131	3,37	9,63E-01	Uranium-234	1,09E-01	4,41E-02	Bq/MWhe
Iodine-133	1,49E-04	2,00E-04	Uranium-235	5,19E-03	2,12E-03	Bq/MWhe
Krypton-85	26,6	7,89	Uranium-238	2,64	54,1	Bq/MWhe
Στο νερό						
Iodine-131	3,27E-03	1,97E-03	Bq/MWhe			
Uranium-234	2,04E-01	8,32E-02	Bq/MWhe			
Uranium-235	3,36E-01	1,37E-01	Bq/MWhe			
Uranium-238	8,36E-01	2,71E-01	Bq/MWhe			
PM2.5-10	1,91E-03	0,00	t/MWhe			

Για το Σενάριο 2, το οποίο αφορά την παραγωγή 1MW_{he} με αιολικά πάρκα, τα δεδομένα εισροών και εκροών πάρθηκαν από το λογισμικό Sphera LCA for Experts (GaBi).

Προχωρώντας στο Σενάριο 3, όπως προέκυψε από το Σενάριο 1, για την παραγωγή 1MW_{he} από λιγνιτικές μονάδες, εκπέμπονται 1,12t CO₂. Η πρώτη διεργασία που λαμβάνει χώρα είναι η δέσμευση του εκπεμπόμενου CO₂, η οποία όπως έχει αναφερθεί, πραγματοποιείται με τη χρήση MEA μετά την καύση. Παρακάτω στον Πίνακα 2, φαίνονται τα δεδομένα εισροών και εκροών της διεργασίας της δέσμευσης του CO₂, σύμφωνα με τους Giordano, L., et. al. (2018).

Πίνακας 2: Εισροές και εκροές τεχνολογίας δέσμευσης CO₂

CO₂ Capture		
Εισροές		
CO ₂	1,12	t
MEA	1,61E-03	t
Activated Carbon	7,84E-05	t
Water	0,02	t

NaOH	1,34E-04	t
Heat	3.580	MJ
Electricity	396	MJ
Εκροές		
Captured CO ₂	1,01	t
Emitted CO ₂	0,11	t
MEA	6,72E-05	t
NH ₃	3,36E-05	t
Ar	0,061	t
N ₂	3,586	t
O ₂	0,14	t
Formaldehyde	2,68E-07	t
Acetaldehyde	1,68E-07	t
Water	0,098	t

Το υδρογόνο που απαιτείται για την παραγωγή μεθανόλης προέρχεται από ηλεκτρόλυση με ενέργεια από αιολικά πάρκα, για τα οποία λαμβάνονται δεδομένα από το λογισμικό Sphera LCA for Experts (GaBi). Συγκεκριμένα, για τα 145kg H₂ που απαιτούνται για την παραγωγή της μεθανόλης, σύμφωνα με το λογισμικό απαιτούνται 27.900MJ ενέργειας.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι εισροές και οι εκροές για την παραγωγή 693kg μεθανόλης παρουσία του καταλύτη Cu/Zn/Al₂O₃ και σύμφωνα με τα δεδομένα των Ravikumar, D., et. al. (2020). Η ενέργεια που καταναλώνεται για αυτή την ποσότητα της μεθανόλης υπολογίστηκε από τους Treyer, K., et. al. (2021).

Πίνακας 3: Εισροές και εκροές διεργασίας Παραγωγής μεθανόλης (Σενάριο 3)

MeOH production		
Εισροές		
Captured CO ₂	1,01	t
H ₂	0,145	t
Copper mix	8,31E-06	t
Special high grade Zinc	2,01E-05	t
Aluminum Oxide mix	4,30E-05	t
Electricity	811	MJ
Εκροές		

MeOH	693	kg
Waste water	412	kg

6.3 Κατηγορίες επιπτώσεων προς εκτίμηση

Στο στάδιο αυτό παρουσιάζεται η εκτίμηση των επιπτώσεων της μελέτης (Life Cycle Impact Assessment, LCIA). Κατά την διεξαγωγή της παρούσας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μελετήθηκαν ήταν η κλιματική αλλαγή, η οξίνιση του περιβάλλοντος, ο ευτροφισμός, ο σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών και ο σχηματισμός λεπτών σωματιδίων.

Η κατηγορία επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής βασίζεται στο μοντέλο Bern για τον υπολογισμό του δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential - GWP) σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών. Για τον προσδιορισμό της κλιματικής αλλαγής, υπολογίζεται το ισοδύναμο παραγόμενο CO₂ σε kg/MWh_e από κάθε σενάριο.

Τον παράγοντα χαρακτηρισμού της οξίνισης αποτελεί το δυναμικό Οξίνισης (Acidification Potential – AP), το οποίο προέρχεται από τη χρήση του σταθμισμένου παγκοσμίου μέσου για τον παράγοντα πορείας (fate factor) του διοξειδίου του θείου (SO₂). Η μονάδα αναφοράς αφορά τις εκπομπές του ισοδύναμου SO₂ σε kg/MWh_e.

Το δυναμικό του ευτροφισμού αποτελεί το περιβαλλοντικό φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται υπέρμετρη αύξηση της συγκέντρωσης θρεπτικών ουσιών (νιτρικά άλατα και φωσφορικές ενώσεις) σε ένα οικοσύστημα, με αποτέλεσμα την μη φυσιολογική ανάπτυξη. Το πιο χαρακτηριστικό φαινόμενο είναι η ανάπτυξη αλγών σε λίμνες και κλειστούς κόλπους προκαλώντας σοβαρές μεταβολές της ποιότητας του νερού. Για το φαινόμενο του ευτροφισμού στην παρούσα μελέτη υπολογίζεται η παραγωγή σε kg/MWh_e του ισοδύναμου φωσφορικού άλατος (phosphate).

Ο φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, χαρακτηρίζει το δυναμικό δημιουργίας του όζοντος που οφείλεται στην εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO_x) καθώς και πτητικών οργανικών ενώσεων εκτός του μεθανίου (NMVOC). Για το φαινόμενο του φωτοχημικού σχηματισμού οξειδωτικών υπολογίζονται οι ισοδύναμες εκπομπές NO_x σε kg/MWh_e κάθε σεναρίου.

Η τελευταία κατηγορία επιπτώσεων που μελετάται στην παρούσα μελέτη είναι οι εκπομπές λεπτών σωματιδίων (PM_{2,5}) τα οποία συνδέονται με

αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.

Η Μονάδα αναγωγής αφορά τις εκπομπές PM_{2,5} σε kg/MWh_e.

7. Παρουσίαση κι ερμηνεία αποτελεσμάτων

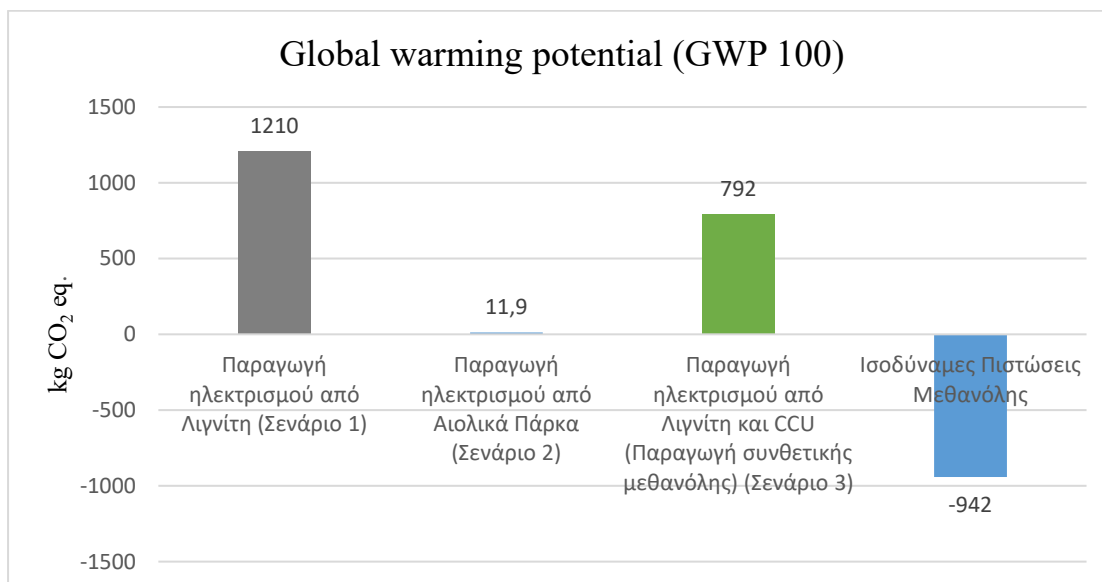
Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά σενάριο για την παραγωγή 1MWh_e ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση του λογισμικού Sphera LCA for Experts (GaBi). Όπως προαναφέρθηκε, με τη δέσμευση του CO₂ που εκλύεται για την παραγωγή 1MWh_e από καύση λιγνίτη, παράγονται 693kg μεθανόλης τα οποία αντιστοιχούν σε 13.790,7 MJ ενέργειας κατά την καύση της. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή άλλα και την καύση της παραγόμενης μεθανόλης βάσει της μελέτης των Al-Breiki, M., & Bicer, Y. Οι εκπομπές της καύσης της μεθανόλης παρουσιάζονται με αρνητικό πρόσημο, ως ισοδύναμες πιστώσεις μεθανόλης για χρήση εξωτερικά του συστήματος.

Πίνακας 4: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά σενάριο για παραγωγή 1MWh_e ενέργειας

Κατηγορία επιπτώσεων	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Ισοδύναμες Πιστώσεις Μεθανόλης
	Καύση λιγνίτη	Αιολικά Πάρκα	Παραγωγή Ηλεκτρισμού από Λιγνίτη και CCU (παραγωγή συνθετικής μεθανόλης)	
Global warming potential (GWP 100 years) (CML 2001) (kg CO ₂ eq.)	1.210	11,9	792	-942
Acidification Potential (AP) (CML 2001) (kg SO ₂ eq.)	1,05	3,24E-02	2,48	-0,0594
Eutrophication Potential (EP) (CML 2001) (kg Phosphate eq.)	8,43E-02	2,97E-03	1.510	-0,0175
Photochemical Ozone Formation (ReCiPe 2016) (kg NO _x eq.)	0,631	0,363	1,28	-0,119
Fine Particulate Matter Formation (ReCiPe 2016) (kg PM _{2.5})	0,303	3,60E-04	0,658	-0,0131

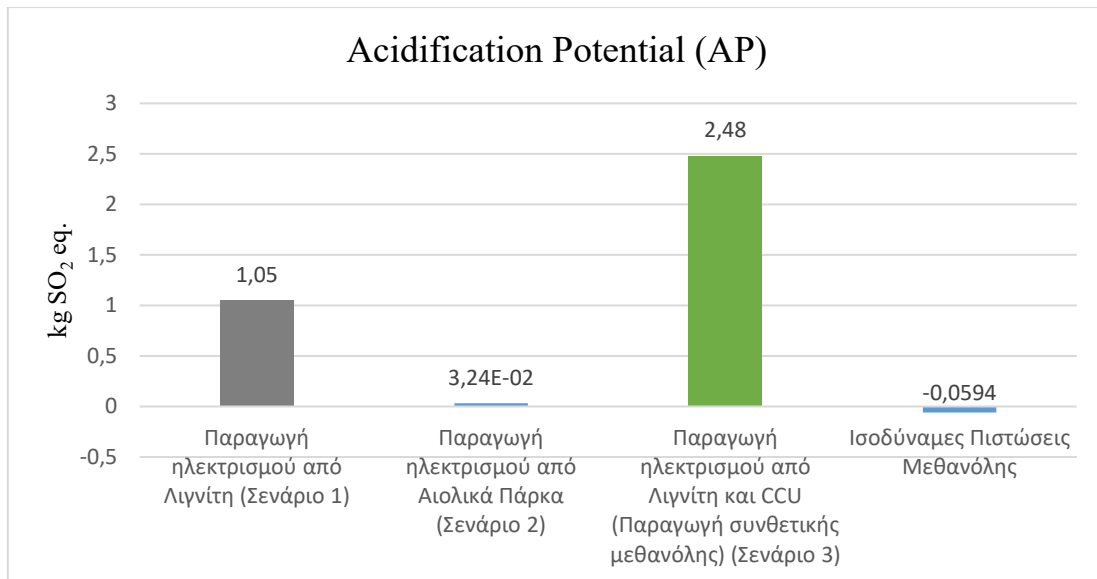
Στα παρακάτω διαγράμματα (9-13) παρουσιάζονται τα δυναμικά για τις πέντε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων για παραγωγή 1MWh_e ενέργειας, όπου και παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση το βέλτιστο δυναμικό επέρχεται από τη χρήση ανεμογεννητριών. Όσον αφορά τις επιπτώσεις προς την κλιματική αλλαγή (Διάγραμμα 9), παρατηρείται ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού από λιγνίτη επιφέρει

εκπομπές CO₂ περισσότερο από το εκατονταπλάσιο σε σχέση με τα αιολικά πάρκα. Έτσι, η παραγωγή ενέργειας με αιολικά πάρκα μειώνει το GWP κατά 99% και η παραγωγή συνθετικής μεθανόλης το μειώνει κατά 34,5%.



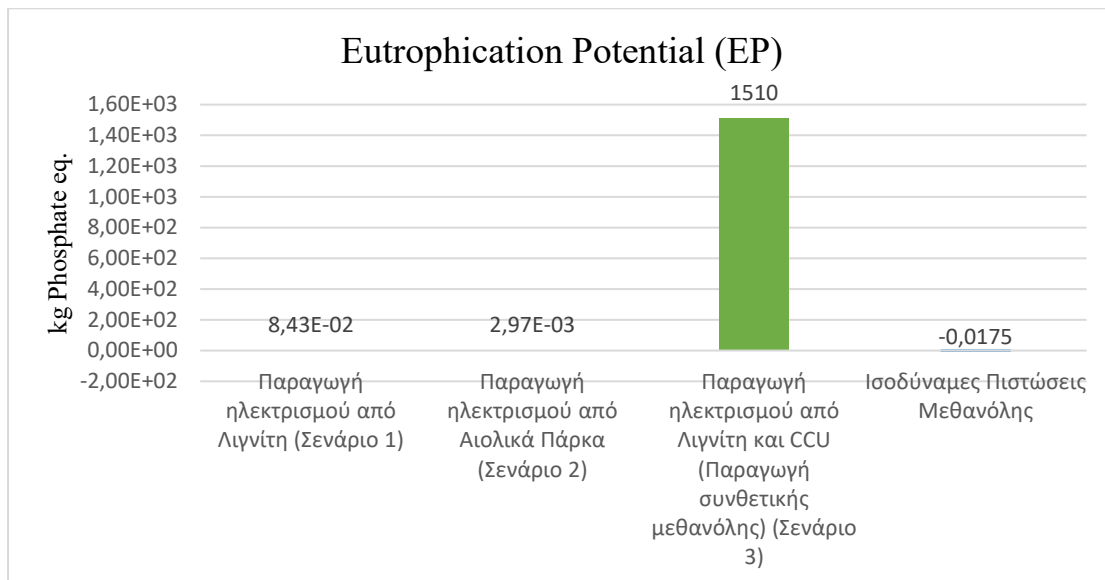
Διάγραμμα 9: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών CO₂ σε kg

Για την κατηγορία της οξίνισης (Διάγραμμα 10), το ισοδύναμο SO₂ για την παραγωγή ηλεκτρισμού με λιγνίτη παρουσιάζεται περισσότερο από 300 φορές μεγαλύτερο σε σύγκριση με τα αιολικά πάρκα. Η παραγωγή ενέργειας με αιολικά πάρκα μειώνει το AP κατά 97% συγκριτικά με την συμβατική παραγωγή με λιγνίτη. Αντιθέτως, κατά την παραγωγή μεθανόλης, το ισοδύναμο SO₂ παρουσιάζεται περισσότερο από το διπλάσιο, λόγω των αυξημένων ενεργειακών αναγκών κατά την δέσμευση και υδρογόνωση του CO₂.



Διάγραμμα 10: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιβαλλοντική επίπτωση της οξίνισης αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών SO₂ σε kg

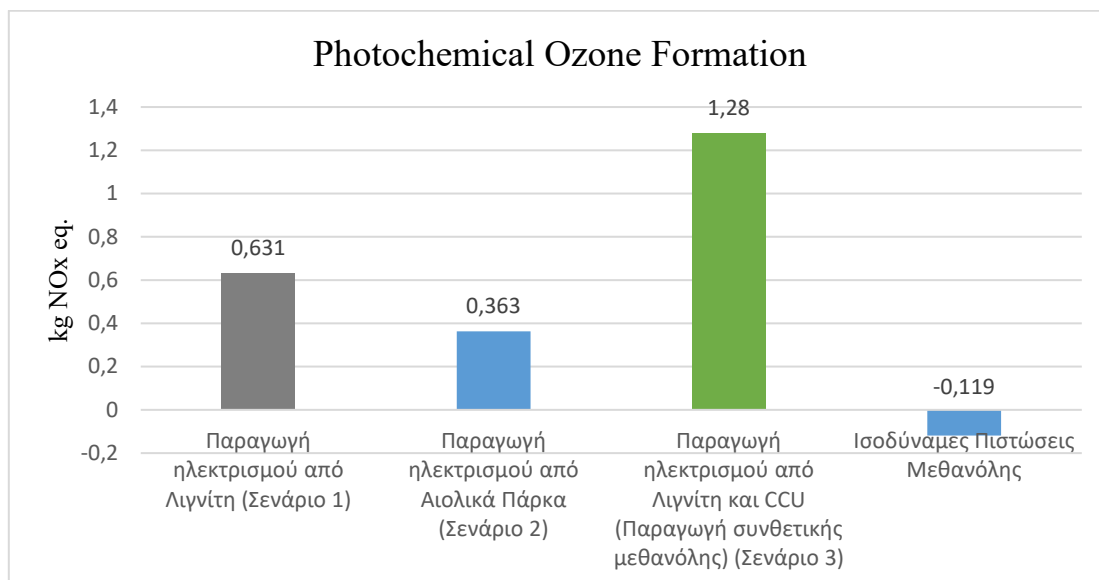
Για την κατηγορία του ευτροφισμού (Διάγραμμα 11), συγκριτικά με την συμβατική παραγωγή με λιγνίτη, τα αιολικά πάρκα μειώνουν το EP κατά 96%. Κατά την παραγωγή μεθανόλης, το ισοδύναμο φωσφορικού άλατος αυξάνεται ραγδαία λόγω των αυξημένων ενεργειακών αναγκών κατά την δέσμευση και υδρογόνωση του CO₂ και της αποβολής αμίνης κατά την διαδικασία δέσμευσης.



Διάγραμμα 11: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιβαλλοντική επίπτωση του ευτροφισμού αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών φωσφορικού άλατος σε kg

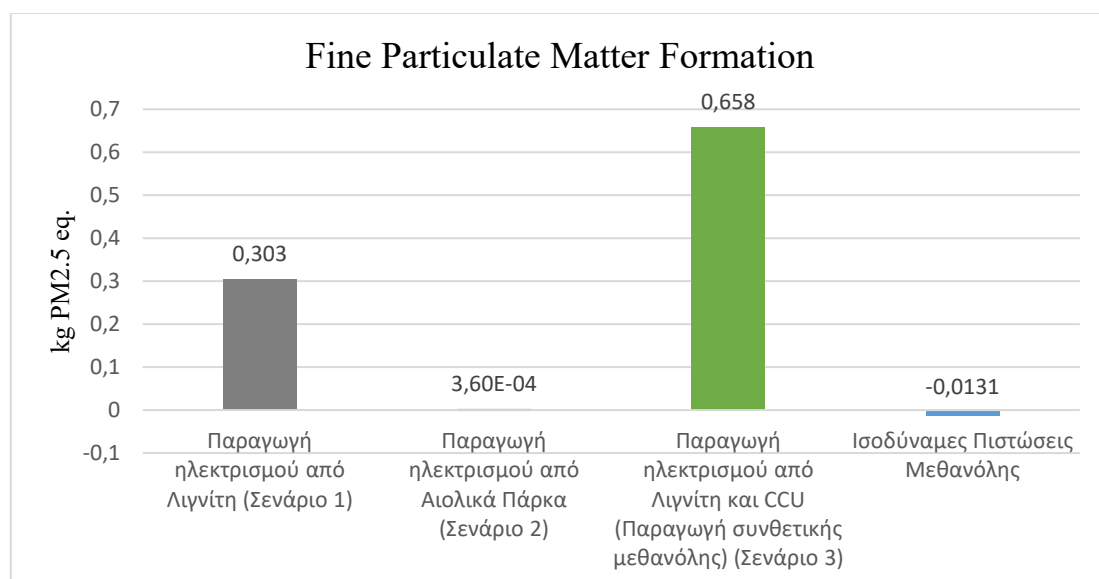
Για τον φωτοχημικό σχηματισμό όζοντος (Διάγραμμα 12), οι ισοδύναμες εκπομπές NO_x του σεναρίου παραγωγής ενέργειας με αιολικά πάρκα είναι χαμηλότερες. Συγκριτικά με την συμβατική παραγωγή με λιγνίτη, τα αιολικά πάρκα

μειώνουν το δυναμικό κατά 42%. Στην περίπτωση της παραγωγής μεθανόλης, τα ισοδύναμα NO_x παρουσιάζονται σχεδόν διπλάσια, λόγω των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων.



Διάγραμμα 12: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον σχηματισμό φωτοχημικών οξειδωτικών αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών NO_x σε kg

Στο διάγραμμα 13, για τις εκπομπές λεπτών σωματιδίων (PM_{2,5}), η μέγιστη τιμή εκπομπών παρουσιάζεται για την παραγωγή μεθανόλης (0,658kg ανά 1MWh_e) και είναι διπλάσια από την αντίστοιχη των συμβατικών λιγνιτικών μονάδων, λόγω των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Και σε αυτή τη περίπτωση, τα αιολικά πάρκα έχουν κατά πολύ το μικρότερο αντίκτυπο (99,9%).



Διάγραμμα 13: Επίδραση των σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιβαλλοντική επίπτωση του σχηματισμού λεπτών σωματιδίων αναλογικά με την ποσότητα των συνολικών εκπομπών PM_{2.5} σε kg

8. Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, για την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής κρίσης, τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής και των συνεπειών τους, απαιτείται ο περιορισμός των εκπομπών βλαβερών αερίων στην ατμόσφαιρα, με σημαντικές επιπτώσεις να προέρχονται από την παραγωγή ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία προκειμένου να γίνει συγκριτική αξιολόγηση συμβατικών και νέων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, πραγματοποιήθηκε AKZ και σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων παραγωγής 1MWh_e ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές λιγνιτικές μονάδες, από αιολικά πάρκα και από λιγνιτικές μονάδες που εφαρμόζουν τεχνολογίες δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα και αξιοποίησής του για παραγωγή μεθανόλης (CCU).

Αναλύθηκε κάθε τεχνολογία διεξοδικά, προκειμένου να δοθεί μία εποπτική εικόνα των διεργασιών και της πιθανής προέλευσης των περιβαλλοντικών της επιπτώσεων. Στο πλαίσιο της AKZ, αξιολογήθηκαν οι επιπτώσεις για πέντε κατηγορίες: την κλιματική αλλαγή, την οξίνιση, τον ευτροφισμό, τον φωτοχημικό σχηματισμό οξειδωτικών και τον σχηματισμό λεπτών σωματιδίων αξιολογώντας το δυναμικό κάθε κατηγορίας. Όσον αφορά τα αποτελέσματα της μελέτης, αυτά έδειξαν ως πιο περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο παραγωγής ενέργειας τα αιολικά πάρκα. Η παραγωγή ενέργειας με αιολικά πάρκα, συγκριτικά με την παραγωγή από τις λιγνιτικές μονάδες δύναται να μειώσει το GWP κατά 99%, το AP κατά 97%, το EP κατά 96%, το φαινόμενο του φωτοχημικού σχηματισμού οξειδωτικών κατά 42% και το φαινόμενο του σχηματισμού λεπτών σωματιδίων κατά 99,9%. Η παραγωγή συνθετικής μεθανόλης μπορεί να μειώσει τις εκπομπές ισοδύναμου CO₂ κατά 34,5%, ωστόσο παρουσιάζει αυξημένες εκπομπές στις λοιπές κατηγορίες, κυρίως λόγω της μεγάλης κατανάλωσης ενεργείας κατά την δέσμευση και υδρογόνωση του CO₂.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, κατέδειξαν ότι η στροφή των τελευταίων ετών προς τις ΑΠΕ και ειδικότερα προς την αιολική ενέργεια, θα βοηθήσει στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο τόσο τα κοινωνικά όσο και τα περιβαλλοντικά ζητήματα θα συνεχίσουν να προκαλούν ανησυχία αν και με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας θα περιοριστούν πολλά εξ αυτών.

Οι τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα, έχουν την δυνατότητα να περιορίσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ωστόσο αντιμετωπίζονται ως μεταβατικές

τεχνολογίες μέχρι την πλήρη απανθρακοποίηση της βιομηχανικής παραγωγής. Η δέσμευση CO₂ για την παραγωγή μεθανόλης, με χρήση πράσινου H₂ οδηγεί στην παραγωγή ενός φιλικότερου καυσίμου για τις μεταφορές, δίνοντας έναν επιπλέον κύκλο ζωής στον άνθρακα. Ήδη παγκοσμίως γίνεται στροφή προς τα πράσινα εναλλακτικά καύσιμα με την μεθανόλη να πρωταγωνιστεί. Η μεθανόλη μπορεί να αντικαταστήσει ή να χρησιμοποιηθεί ως μίγμα με άλλα καύσιμα, στους υπάρχοντες κινητήρες εσωτερικής καύσης με μικρό κόστος μετατροπής.

Αν και ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών αποτελεί μία από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους απανθρακοποίησης, ιδίως για τις οδικές μεταφορές, οι περιβαλλοντικοί στόχοι της χώρας δεν μπορούν να επιτευχθούν εξ'ολοκλήρου μέσω αυτού. Ο εξηλεκτρισμός αντιμετωπίζει τόσο προκλήσεις, ως προς τις ενεργειακές απαιτήσεις των οδικών μεταφορών και την έλλειψη υποδομών, όσο και περιορισμούς, καθώς η ηλεκτροκίνηση σε μεγάλα οδικά οχήματα, όπως λεωφορεία και φορτηγά, στην ναυτιλία και τις αερομεταφορές δεν είναι εφικτή. Για τους παραπάνω λόγους ο τομέας δεν μπορεί να αποβάλλει ολοκληρωτικά τις μηχανές εσωτερικής καύσης, και συνεπώς στρέφεται στην ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων με μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, όπως τα συνθετικά καύσιμα. Από τα συνθετικά καύσιμα, η χρήση συνθετικής μεθανόλη εστιάζει όχι τόσο στην μείωση των άμεσων εκπομπών, αλλά στην μείωση των εκπομπών κατά την παραγωγή του καυσίμου, μέσω της προσέγγισης “Power to Fuel”.

Βιβλιογραφία

- Al-Breiki, M., & Bicer, Y. (2021). Comparative life cycle assessment of sustainable energy carriers including production, storage, overseas transport and utilization. *Journal of Cleaner Production*, 279(123481), 123481. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123481>
- Al-Qahtani, A., González-Garay, A., Bernardi, A., Galán-Martín, Á., Pozo, C., Dowell, N. M., Chachuat, B., & Guillén-Gosálbez, G. (2020). Electricity grid decarbonisation or green methanol fuel? A life-cycle modelling and analysis of today's transportation-power nexus. *Applied Energy*, 265(114718), 114718. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114718>
- Ali, M., Khan, S. A., Shamsuddin, Ali, A., Ali, S., Hassan, R., Cho, D.-H., & Byun, D. (2023). Low profile wind savonius turbine triboelectric nanogenerator for powering small electronics. *Sensors and Actuators. A, Physical*, 114535, 114535. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114535>
- Amahmoud, A., El Attar, M. M., & Meleishy, A. (2022). The evolution of Life Cycle Assessment approach: A review of past and future prospects. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 992(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/992/1/012002>
- Badera, J., & Kocoń, P. (2014). Local community opinions regarding the socio-environmental aspects of lignite surface mining: Experiences from central Poland. *Energy Policy*, 66, 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.048>
- Bojek, P. (n.d.). Wind Electricity. IEA. Retrieved June 15, 2023, from <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>
- Boustead, I. (1996). LCA — how it came about: The beginning in the U.K. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(3), 147–150. <https://doi.org/10.1007/bf02978943>
- Bowker, M. (2019). Methanol synthesis from CO₂ hydrogenation. *ChemCatChem*, 11(17), 4238–4246. <https://doi.org/10.1002/cctc.201900401>
- CCS Information Sheet 1. (n.d.). Ieaghg.org. Retrieved November 1, 2023, from https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Publications/Information_Sheets_for_CCS_2.pdf
- Chadwick, R. A., Zweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G. A., Holloway, S., & Johannessen, P. N. (2004). Geological reservoir characterization of a CO₂ storage site: The Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea. *Energy (Oxford, England)*, 29(9–10), 1371–1381. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.071>

- Chatzimouratidis, A. I., & Pilavachi, P. A. (2008). Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy*, 36(3), 1074–1089. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.028>
- Chen, S.-C., & Jeng, J.-C. (2022). Design and analysis of fuel-assisted solid oxide electrolysis cell combined with biomass gasifier for hydrogen production. In Y. Yamashita & M. Kano (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 49, pp. 2113–2118). Elsevier.
- Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO2 Utilization*, 9, 82–102. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>
- Davidsson, S., Höök, M., & Wall, G. (2012). A review of life cycle assessments on wind energy systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(6), 729–742. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0397-8>
- Dieterich, V., Buttler, A., Hanel, A., Spliethoff, H., & Fendt, S. (2020). Power-to-liquid synthesis of methanol, DME or Fischer–Tropsch-fuels: a review. *Energy & Environmental Science*, 13(10), 3207–3252. <https://doi.org/10.1039/d0ee01187h>
- Dubey, A., & Arora, A. (2022). Advancements in carbon capture technologies: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373(133932), 133932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133932>
- Farina, A., & Anctil, A. (2022). Material consumption and environmental impact of wind turbines in the USA and globally. *Resources, Conservation, and Recycling*, 176(105938), 105938. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105938>
- Figueroa, J. D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H., & Srivastava, R. D. (2008). Advances in CO2 capture technology—the U.s. department of energy’s carbon sequestration program. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(1), 9–20. [https://doi.org/10.1016/s1750-5836\(07\)00094-1](https://doi.org/10.1016/s1750-5836(07)00094-1)
- GaBi databases. (n.d.). Ghgprotocol.org. Retrieved from <https://ghgprotocol.org/gabi-databases>
- GaBi Software for Life Cycle Assessment (LCA). Spherica Blog. DEISO. Retrieved from <https://deiso.co.jp/briefing-gabi-software-for-life-cycle-assessment-lca/>
- Gao, C.-K., Na, H.-M., Song, K.-H., Dyer, N., Tian, F., Xu, Q.-J., & Xing, Y.-H. (2019). Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind farms in different locations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.018>

- Giordano, L., Roizard, D., & Favre, E. (2018). Life cycle assessment of post-combustion CO₂ capture: A comparison between membrane separation and chemical absorption processes. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, 146–163. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.11.008>
- Global Status of CCS 2021—CCS Accelerating to Net Zero; Global CSS Institute: Melbourne, VIC, Australia, 2021.
- Golsteijn, L. (2020). Life Cycle Assessment (LCA) explained. PRé Sustainability. <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>
- Guezuraga, B., Zauner, R., & Pölz, W. (2012). Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy*, 37(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.008>
- Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 3(2), 170. <https://doi.org/10.1504/ijsm.2014.062496>
- Hydrogen. (n.d.). Irena.org. Retrieved November 28, 2023, from <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- IEA (2019), The Future of Hydrogen, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, License: CC BY 4.0
- IEA (2022), Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>, License: CC BY 4.0
- IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)
- Irena and Methanol Institute (2021), Innovation Outlook: Renewable Methanol, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Jacobson, T. A., Kler, J. S., Hernke, M. T., Braun, R. K., Meyer, K. C., & Funk, W. E. (2019). Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*, 2(8), 691–701. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>
- Jadhav, S. G., Vaidya, P. D., Bhanage, B. M., & Joshi, J. B. (2014). Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: A review of recent studies. *Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 92(11), 2557–2567. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.03.005>
- Kaldellis, J. K., Zafirakis, D., & Kondili, E. (2009). Contribution of lignite in the Greek electricity generation: Review and future prospects. *Fuel (London, England)*, 88(3), 475–489. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.021>
- Kamran, M. (2022). *Fundamentals of smart grid systems*. Academic Press.

- Kavouridis, K. (2008). Lignite industry in Greece within a world context: Mining, energy supply and environment. *Energy Policy*, 36(4), 1257–1272. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.017>
- Kavvadas, M., Roumpos, C., & Schilizzi, P. (2020). Stability of deep excavation slopes in continuous surface lignite mining systems. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 791–812. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01066-x>
- Keshavarz, A., Mirvakili, A., Chahibakhsh, S., Shariati, A., & Rahimpour, M. R. (2020). Simultaneous methanol production and separation in the methanol synthesis reactor to increase methanol production. *Genie Des Procesdes [Chemical Engineering and Processing]*, 158(108176), 108176. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108176>
- Ketzer, J. M., Iglesias, R. S., & Einloft, S. (2015). Reducing Greenhouse Gas Emissions with CO₂ Capture and Geological Storage. *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, (pp. 1–40). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6431-0_37-2
- Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Hossain, M., & Umer, R. (2023). Recycling of wind turbine blades through modern recycling technologies: A road to zero waste. *Renewable Energy Focus*, 44, 373–389. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.02.001>
- Krozer, J., & Vis, J. C. (1998). How to get LCA in the right direction? *Journal of Cleaner Production*, 6(1), 53–61. [https://doi.org/10.1016/s0959-6526\(97\)00051-6](https://doi.org/10.1016/s0959-6526(97)00051-6)
- Kumar, P. M., Sivalingam, K., Narasimalu, S., Lim, T.-C., Ramakrishna, S., & Wei, H. (2019). A review on the evolution of darrieus vertical axis wind turbine: Small wind turbines. *Journal of Power and Energy Engineering*, 07(04), 27–44. <https://doi.org/10.4236/jpee.2019.74002>
- Lacal-Arántegui, R. (2015). Materials use in electricity generators in wind turbines – state-of-the-art and future specifications. *Journal of Cleaner Production*, 87, 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.047>
- Lelek, L., & Kulczycka, J. (2021). Life cycle assessment of opencast lignite mining. *International Journal of Coal Science & Technology*, 8(6), 1272–1287. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00467-9>
- Leonzio, G. (2020). Analysis and optimization of a methanol reactor with the adsorption of carbon monoxide and water. *Renewable Energy*, 146, 2744–2757. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.084>
- Leung, D. Y. C., & Yang, Y. (2012). Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 1031–1039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.024>

- Li, H., Jiang, H.-D., Dong, K.-Y., Wei, Y.-M., & Liao, H. (2020). A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 248(119192), 119192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119192>
- Luis, P. (2016). Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination*, 380, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.004>
- Ma, X., Zhai, Y., Zhang, T., Yao, X., & Hong, J. (2023). What changes can solar and wind power bring to the electrification of China compared with coal electricity: From a cost-oriented life cycle impact perspective. *Energy Conversion and Management*, 289(117162), 117162. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117162>
- Maimaiti, S., Gu, Y., Chen, Q., & Tang, Z. (2023). Prospective life cycle environmental impact assessment of renewable energy-based methanol production system: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 425(139002), 139002. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139002>
- Martínez, E., Jiménez, E., Blanco, J., & Sanz, F. (2010). LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine. *Applied Energy*, 87(7), 2293–2303. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.025>
- Nanaki, E. A., Koroneos, C. J., & Xydis, G. A. (2016). Environmental impact assessment of electricity production from lignite. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35(6), 1868–1875. <https://doi.org/10.1002/ep.12427>
- Nassar, N. T., Wilburn, D. R., & Goonan, T. G. (2016). Byproduct metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios. *Applied Energy*, 183, 1209–1226. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.062>
- Nazir, M. S., Ali, N., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2020). Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 13, 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.002>
- Nguyen, D. N., & Allinson, W. G. (2002). The economics of CO₂ capture and geological storage. All Days, SPE-77810-MS.
- Ozoemena, M., Cheung, W. M., & Hasan, R. (2018). Comparative LCA of technology improvement opportunities for a 1.5-MW wind turbine in the context of an onshore wind farm. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(1), 173–190. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1466-2>
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2022). Energy. Our World in Data. <http://OurWorldInData.org/renewable-energy>

- Papagiannis, A., Roussos, D., Menegaki, M., & Damigos, D. (2014). Externalities from lignite mining-related dust emissions. *Energy Policy*, 74, 414–424. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.026>
- Papanicolaou, C., Galetakis, M., & Foscolos, A. E. (2005). Quality characteristics of Greek brown coals and their relation to the applied exploitation and utilization methods. *Energy & Fuels: An American Chemical Society Journal*, 19(1), 230–239. <https://doi.org/10.1021/ef030164b>
- Pavel, C. C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Jenseit, W., & Blagoeva, D. (2017). Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy*, 52, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010>
- Pehnt, M., & Henkel, J. (2009). Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(1), 49–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.07.001>
- Peppas, A., Kottaridis, S., Politi, C., & Angelopoulos, P. M. (2023). Carbon Capture utilisation and Storage in extractive industries for methanol production. *Eng*, 4(1), 480–506. <https://doi.org/10.3390/eng4010029>
- Pires, J. C. M., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Simões, M. (2011). Recent developments on carbon capture and storage: An overview. *Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 89(9), 1446–1460. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.01.028>
- Psomopoulos, C., Kalkanis, K., Kaminaris, S., Ioannidis, G., & Pachos, P. (2019). A review of the potential for the recovery of wind turbine blade waste materials. *Recycling*, 4(1), 7. <https://doi.org/10.3390/recycling4010007>
- Ravikumar, D., Keoleian, G., & Miller, S. (2020). The environmental opportunity cost of using renewable energy for carbon capture and utilization for methanol production. *Applied Energy*, 279(115770), 115770. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115770>
- Ren, M., Zhang, Y., Wang, X., & Qiu, H. (2022). Catalytic hydrogenation of CO₂ to methanol: A review. *Catalysts (Basel, Switzerland)*, 12(4), 403. <https://doi.org/10.3390/catal12040403>
- Renewable methanol. (2019). METHANOL INSTITUTE. <https://www.methanol.org/renewable/>
- Saha, M., & Dally, B. B. (2022). Solid fuels flameless combustion. In S. E. Hosseini (Ed.), *Fundamentals of Low Emission Flameless Combustion and Its Applications* (pp. 505–552). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85244-9.00016-2>

- Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R., & Solangi, K. H. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2423–2430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.024>
- Schreiber, A., Marx, J., & Zapp, P. (2019). Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types. *Journal of Cleaner Production*, 233, 561–572. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.058>
- Spadaro, L., Santoro, M., Palella, A., & Arena, F. (2017). Hydrogen utilization in green fuel synthesis via CO₂ conversion to methanol over new Cu-based catalysts. *ChemEngineering*, 1(2), 19. <https://doi.org/10.3390/chemengineering1020019>
- Theodosiou, G., Koroneos, C., & Stylos, N. (2014). Environmental impacts of the Greek electricity generation sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2013.10.005>
- Toftegaard, M. B., Brix, J., Jensen, P. A., Glarborg, P., & Jensen, A. D. (2010). Oxy-fuel combustion of solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(5), 581–625. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.02.001>
- Treyer, K., Sacchi, R., Bauer, C. (2021) Life Cycle Assessment of synthetic hydrocarbons for use as jet fuel: “Power-to-Liquid” and “Sun-to-Liquid” processes. Paul Scherrer Institute (PSI), Villigen, Switzerland. Commissioned by the Swiss Federal Office of Civil Aviation (FOCA)
- Türkmen, A. B., Deveci, E. Ü., & Sağlam, Ç. Ş. (2021). Environmental sustainability of electricity generation: Case study of lignite combustion. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(2). <https://doi.org/10.1002/ep.13521>
- Uddin, M. S., & Kumar, S. (2014). Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique. *Journal of Cleaner Production*, 69, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.073>
- Understanding CCS. (2018, November 1). Global CCS Institute. <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/>
- U.S. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (n.d.). Energy.gov. Retrieved September 4, 2023, from <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>
- Vardar, N., & Yumurtaci, Z. (2010). Emissions estimation for lignite-fired power plants in Turkey. *Energy Policy*, 38(1), 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.011>
- Viebahn, P., Daniel, V., & Samuel, H. (2012). Integrated assessment of carbon capture and storage (CCS) in the German power sector and comparison with the deployment of renewable energies. *Applied Energy*, 97, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.053>

- Viebahn, P., Nitsch, J., Fishedick, M., Esken, A., Schüwer, D., Supersberger, N., Zuberbühler, U., & Edenhofer, O. (2007). Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economic, and ecological aspects in Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(1), 121–133. [https://doi.org/10.1016/s1750-5836\(07\)00024-2](https://doi.org/10.1016/s1750-5836(07)00024-2)
- Wang, Y., Pan, Z., Zhang, W., Borhani, T. N., Li, R., & Zhang, Z. (2022). Life cycle assessment of combustion-based electricity generation technologies integrated with carbon capture and storage: A review. *Environmental Research*, 207(112219), 112219. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112219>
- What is CCS? (n.d.). Ieaghg.org. Retrieved November 2, 2023, from <https://www.ieaghg.org/ccs-resources/what-is-ccs>
- Widera, M., Kasztelewicz, Z., & Ptak, M. (2016). Lignite mining and electricity generation in Poland: The current state and future prospects. *Energy Policy*, 92, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.002>
- Wilberforce, T., Baroutaji, A., Soudan, B., Al-Alami, A. H., & Olabi, A. G. (2019). Outlook of carbon capture technology and challenges. *The Science of the Total Environment*, 657, 56–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>
- Wilberforce, T., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. (2021). Progress in carbon capture technologies. *The Science of the Total Environment*, 761(143203), 143203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>
- Wind energy. (n.d.). Irena.org. Retrieved June 15, 2023, from <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- Wind turbines. (n.d.). Vestas.com; Vestas. Retrieved August 24, 2023, from <https://www.vestas.com/en/products>
- Yang, X. J., Lin, A., Li, X.-L., Wu, Y., Zhou, W., & Chen, Z. (2013). China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environmental Development*, 8, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.006>
- Yousefi, H., Abbaspour, A., & Seraj, H. (2019). Worldwide development of wind energy and CO2 emission reduction. *Environmental Energy and Economic Research*, 3(1), 1–9. <https://doi.org/10.22097/eeer.2019.164295.1064>
- Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., Haines, M., Hake, J.-F., & Gale, J. (2012). Overall environmental impacts of CCS technologies—A life cycle approach. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 8, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.01.014>

- Zhao, J., Hong, J., Song, Z., Wang, Q., Zhao, X., & Ma, C. (2015). Cost combined life cycle assessment of lignite-based electricity generation. *Fuel* (London, England), 159, 666–674. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.026>
- Βόρριας, Η. (2014) "Προηγμένα συστήματα δέσμευσης του CO₂", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) (N.d.). Dei.Gr. Retrieved June 7, 2023, from <https://dei.gr/el>
- Ζουμπούλης, Α., Πελέκα, Ε., & Τριανταφυλλίδης, Κ. (2015). Πράσινη χημεία και τεχνολογία στη βιώσιμη ανάπτυξη [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/2320>
- Κτενάς, Δ., Κοσμίδου, Β., Σπίνος, Σ. (2020). Υπόγεια Γεωλογική Αποθήκευση CO₂ και Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα. Technical Report CCS. ΕΔΕΥ Α.Ε. https://www.greekhydrocarbons.gr/news_files/Technical_report_CCS_June_2020.pdf
- Masters, M. G. (2016). Συστήματα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Γ. Παπαδάκης, Επιμέλεια). Εκδόσεις ΠΕΔΙΟ.
- Ντοκόπουλος, Π. (1986). Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Εκδόσεις Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη
- Σταματίου Γ. (2015). Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής του λιγνίτη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: Εφαρμογή στην Ελληνική περίπτωση. Διπλωματική Εργασία, Επιβλέπων Καθηγητής: Καρέλλας Σ. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο