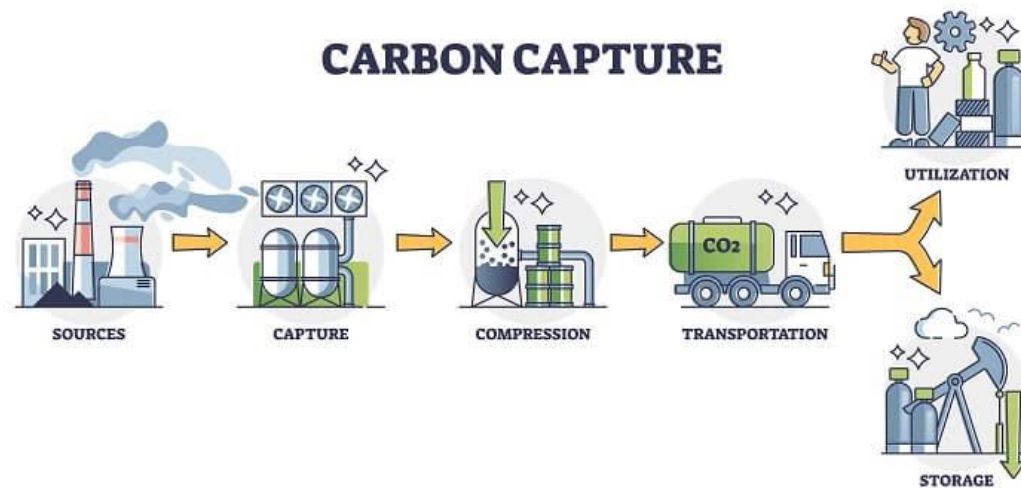




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων παραγόμενης
ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα και λιγνιτικές μονάδες
που εφαρμόζουν τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης
εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Πέτρος Ρούσσος

Επιβλέπουσα: Μαρία Ταξιάρχου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων παραγόμενης
ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα και λιγνιτικές μονάδες
που εφαρμόζουν τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης
εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πέτρος Ρούσσος

Επιβλέπουσα: Μαρία Ταξιάρχου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 08/03/2024.

Μαρία Ταξιάρχου, Αναπλ. Καθηγήτρια

Άνθιμος Ξενίδης, Καθηγητής

Αντώνης Πέππας, Επίκ. Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Copyright © Πέτρος Ρούσος, 2024

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος του κύκλου σπουδών μου, δε μπορώ παρά να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσους συνετέλεσαν στο να έρθει αυτή η στιγμή.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Πέππα Αντώνη γιατί από την αρχή της ανάληψης του θέματος της διπλωματικής μου εργασίας υπήρξε κατανόηση, συνεννόηση, άριστη συνεργασία και επικοινωνία και πάνω απ' όλα υπομονή για να έρθει εις πέρας το τελευταίο μέρος των προπτυχιακών μου σπουδών.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα. Ταξιάρχου Μαρία για την επίβλεψη της εργασίας και τον κ. Κοτταρίδη Σωτήρη για την σημαντική του βοήθεια και καθοδήγηση στην υλοποίηση της AKZ.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους φίλους και συμφοιτητές μου, Αργύρη, Βασίλη, Γιώργο, Κώστα, Κωνσταντίνο, Μαριάννα, Μιχάλη, Φίλιππο και Φίλιππο Παπαθανασίου-Πινέρο, για όλες τις στιγμές που μοιραστήκαμε κατά τη διάρκεια των σπουδών μας, για τη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου έδειξαν και κυρίως για τη φιλία μας.

Τέλος, τα άτομα στα οποία οφείλω τα πάντα είναι η οικογένειά μου. Θέλω να ευχαριστήσω την αδερφή μου για τη συγκατοίκησή μας και την απεριόριστη στήριξη και αγάπη που μου έδειξε και πάνω απ' όλα τους γονείς μου, Γιάννη και Ειρήνη για όλη τη στήριξη που μου παρείχαν για να μπορώ να αποκαλούμαι πλέον Μηχανικός.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τριών σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (1 MWh) από ατμοηλεκτρικό σταθμό που χρησιμοποιεί ως καύσιμο τον λιγνίτη (Σενάριο 1), η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα αιολικό πάρκο (Σενάριο 2) και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα εργοστάσιο που χρησιμοποιεί τεχνολογία δέσμευσης CO₂ και αποθήκευσης (CCS), (Σενάριο 3). Οι υπολογισμοί για την εύρεση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος έγιναν σύμφωνα με τη μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ), για την συγκριτική αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των τεχνολογιών.

Η δέσμευση, αποθήκευση ή και η αξιοποίηση του CO₂ που προέρχεται από βιομηχανικές διεργασίες έχει προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Μεγάλες ποσότητες από τις συνολικές εκπομπές CO₂ προέρχονται από τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και κυρίως από τους σταθμούς που χρησιμοποιούν ως καύσιμο τον λιγνίτη ή τον άνθρακα. Από την άλλη μεριά, η ανάπτυξη και η χρήση των ανεμογεννητριών παρουσιάζει επιπτώσεις στο περιβάλλον κυρίως κατά το στάδιο της κατασκευής καθώς χρησιμοποιούνται σπάνιες γαίες (νεοδύμιο, δυσπρόσιο, κ.α.). Εκτός από τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών που απαιτούνται για την κατασκευή, η διαδικασία της εξόρυξης των πρώτων υλών παρουσιάζει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προκαλώντας αμφισβήτηση της βιωσιμότητας της τεχνολογίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζεται στη μελέτη της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ που παράγεται κατά την καύση λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλύονται λεπτομερώς τα επιμέρους στάδια της τεχνολογίας σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο καύσης λιγνίτη, καθώς και με εναλλακτικές επιλογές, όπως τα αιολικά πάρκα. Για κάθε τεχνολογία, αναδεικνύονται οι προκλήσεις και οι δυνητικοί περιορισμοί που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της. Μέσω της εφαρμογής AKZ, υπολογίστηκαν οι επιπτώσεις των τεχνολογιών ανά κατηγορία επίπτωσης, όπως το δυναμικό οξίνισης και του ευτροφισμού, καθώς και οι δυνητικές επιπτώσεις στην υγεία και την κοινωνία.

Βάσει των υπολογισμών διαπιστώθηκε ότι για την κατηγορία της κλιματικής αλλαγής η τεχνολογία CCS στις λιγνιτικές μονάδες οδηγεί σε σημαντική μείωση (~ 55.8%) της ποσότητας CO₂ eq. που εκλύεται. Όσον αφορά το δυναμικό οξίνισης του

περιβάλλοντος, εφαρμόζοντας το σύστημα αποθήκευσης, το δυναμικό είναι της τάξης του 1.5 kgSO₂ eq, αυξημένο κατά 42.9% συγκριτικά με την λιγνιτική μονάδα χωρίς τεχνολογία CCS. Επιπρόσθετα, από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας CCS αυξάνει σημαντικά το δυναμικό ευτροφισμού, την παραγωγή των NO_x κατά 46.1% συγκριτικά με την λιγνιτική μονάδα χωρίς τεχνολογία CCS και κατά 154% σε σύγκριση με την παραγωγή ενέργειας από ένα αιολικό πάρκο. Ακόμα, παρατηρείται αύξηση στην παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων κατά 36.3% συγκριτικά με την λιγνιτική μονάδα χωρίς τεχνολογία CCS.

Τέλος, η μελέτη καταδεικνύει τη σημασία της προώθησης και ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα αιολικά πάρκα, όπου σύμφωνα με την ανάλυση επιφέρει το μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Από την διπλωματική εργασία η ανάγκη εφαρμογής της AKZ για κάθε τεχνολογική λύση είναι επιτακτική, ώστε να εντοπίζονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προκειμένου να επιτευχθεί μια βιώσιμη και αποτελεσματική ενεργειακή πολιτική με τις μικρότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Abstract

In the present thesis, the environmental impacts of three electricity production scenarios were studied. Specifically, the environmental footprint of electricity production (1 MWh) from a lignite-fired power plant (Scenario 1), electricity production from a wind farm (Scenario 2) and electricity production from a facility utilizing Carbon Capture and Storage (CCS) technology (Scenario 3) was calculated. The calculations for determining the environmental footprint were conducted according to the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, for the comparative assessment of the environmental performance of the technologies.

The capture, storage, or utilization of CO₂ emissions from industrial processes has attracted significant interest in recent years. Large amounts of CO₂ emissions come from electricity production, mainly from plants using lignite or coal as fuel. On the other hand, the development and use of wind turbines have environmental impacts during the construction phase due to the use of rare earth elements (neodymium, dysprosium, etc.). Apart from the availability of the raw materials required for construction, the extraction process of these raw materials presents significant environmental impacts, raising questions about the sustainability of the technology.

The present thesis focuses on studying the Carbon Capture and Storage (CCS) technology generated during lignite combustion for electricity production. The individual stages of the technology are analyzed in detail in relation to conventional lignite combustion methods, as well as alternative options such as wind farms. For each technology, the challenges and potential constraints arising during implementation are identified. Through the application of the LCA, the impacts of the technologies are calculated per impact category, such as acidification potential and eutrophication, as well as potential impacts on health and society.

Based on the calculations, it was found that for the category of climate change, CCS technology in lignite units leads to a significant reduction (~55.8%) in CO₂ eq. emissions. Regarding the acidification potential of the environment, applying the storage system results in approximately 1.5 kg SO₂ eq, an increase of 42.9% compared to lignite units without CCS technology. Additionally, the results show that the implementation of CCS technology increases eutrophication potential substantially and the production of NO_x by 46.1% compared to lignite units without CCS technology and 154% compared to electricity production from a wind farm. Furthermore, the

production of suspended particles increases by 36.3% compared to lignite units without CCS technology and the production from wind farms nears zero.

Finally, the study highlights the importance of promoting and developing renewable energy sources, such as wind farms, which according to the analysis have the smallest environmental footprint. From the thesis, the necessity of applying LCA for each technological solution is pivotal, in order to identify the advantages and constraints, considering all environmental impacts, to achieve a sustainable and effective energy policy with minimal environmental impacts.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract	iv
Κεφάλαιο 1^ο	1
1.1. Αγορά ενέργειας.....	1
1.2. Ενεργειακό ζήτημα	4
1.3. Εκπομπές CO ₂	5
1.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ορυκτών καυσίμων και δράσεις μετριασμού	7
1.5. Εκπομπές CO ₂ από λιγνιτικές μονάδες της Ελλάδας.....	10
1.6. Οι προοπτικές των λιγνιτικών μονάδων.....	12
1.6.1. Στήριξη της εξόρυξης λιγνίτη	12
Κεφάλαιο 2^ο	13
2.1. Εισαγωγή.....	13
2.2. Διεργασίες δέσμευσης με διαλύτες CO ₂	13
2.3. Διεργασίες προσρόφησης CO ₂	14
2.4. Περιγραφή θερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δέσμευση CO ₂ 16	
2.5. Αποθήκευση CO ₂ σε γεωλογικές δομές της Ελλάδας.	18
2.6. Περιβαλλοντικές επιδόσεις αιολικής ενέργειας,	21
Παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα και επιπτώσεις στο περιβάλλον.....	21
2.7. Σπάνιες γαίες για αιολική ενέργεια	24
2.8. Επαναχρησιμοποίηση των σπάνιων γαιών.....	25
2.9. Βιβλιογραφική ανασκόπηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενεργειακών τεχνολογιών.....	26
Κεφάλαιο 3^ο	32
3.1. Εισαγωγή.....	32
3.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής – Πρότυπα ISO	35

3.3.	Ορισμός του σκοπού και του στόχου μιας ΑΚΖ.....	36
3.4.	Ανάλυση της καταγραφής των δεδομένων του συστήματος (Life Cycle Inventory, LCI) 36	
3.5.	Εκτίμηση των επιπτώσεων	38
3.6.	Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	39
Κεφάλαιο 4^ο		41
4.1.	Εισαγωγή.....	41
4.2.	Όρια συστήματος ανάλυσης κύκλου ζωής.....	43
4.3.	Περιγραφή διεργασιών/απογραφή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	44
4.4.	Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής.....	53
4.4.1.	Κλιματική αλλαγή.....	54
4.4.2.	Οξίνιση του περιβάλλοντος	55
4.4.3.	Ευτροφισμός.....	56
4.4.4.	Σχηματισμός φωτοχημικών σχηματισμός όζοντος	57
4.4.5.	Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων.....	58
Κεφάλαιο 5^ο		59
	Συμπεράσματα	59
Βιβλιογραφία		61

Κεφάλαιο 1^ο

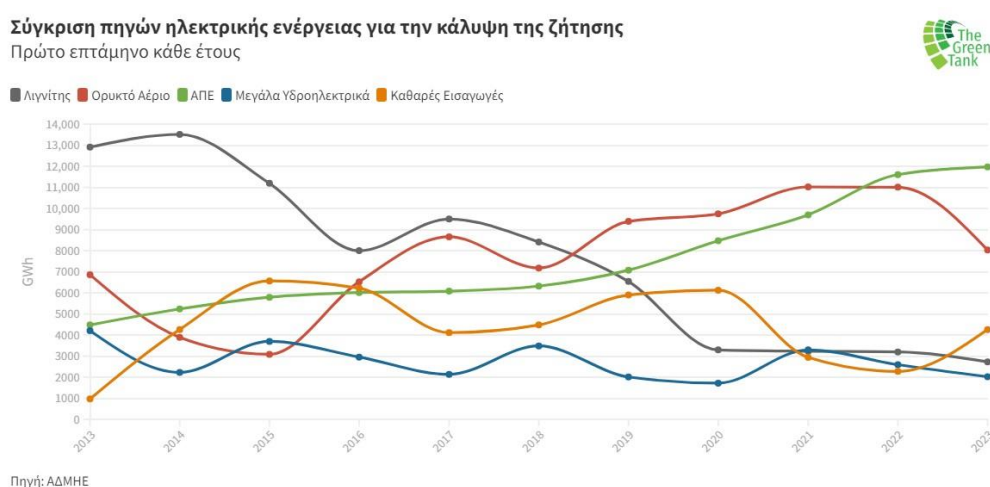
Ενεργειακό μείγμα του Ελληνικού χώρου

1.1. Αγορά ενέργειας

Ο ενεργειακός τομέας και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την οικονομική ανάπτυξη της χώρας, δεδομένου ότι συνεισφέρει στην ενίσχυση του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος (ή ΑΕΠ) της Ελληνικής οικονομίας, προσφέρει θέσεις εργασίας και προσελκύει επενδύσεις, παρουσιάζοντας παράλληλα ισχυρά οφέλη στην Ελληνική οικονομία σε τοπικό και γενικό επίπεδο.

Είναι γνωστό ότι ο ενεργειακός τομέας έχει μακροοικονομική επιρροή στα φορολογικά έσοδα του Ελληνικού κράτους και στο ισοζύγιο τρεχουσών συναλλαγών. Ταυτόχρονα, η άμεση σχέση της οικονομίας της Ελλάδας με την εισαγωγή ορυκτών πόρων, όπως το φυσικό αέριο (CH₄) και αργό πετρέλαιο προκαλεί ισχυρές πιέσεις, δηλαδή έλλειμα στο ισοζύγιο των συναλλαγών της χώρας με το εξωτερικό. Οι συναλλαγές αυτές αν και μειώθηκαν (μείωση εξαγωγής συναλλάγματος), λόγω της πρόσφατης περιόδου ανάπτυξης των εξαγωγών ειδών πετρελαίου που παράγονται στην Ελλάδα παραμένουν μέχρι σήμερα αυξημένες [1]. Είναι κρίσιμο να σημειωθεί ότι το ενεργειακό κόστος είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ανταγωνιστικότητα των επιχειρήσεων. Τα τελευταία χρόνια οι ξαφνικές και όλο και πιο συχνές γεωπολιτικές κρίσεις έχουν οδηγήσει σε αύξηση του κόστους των ορυκτών πόρων προκαλώντας σημαντικές πιέσεις στην οικονομία των νοικοκυριών και των επιχειρήσεων. Σημειώνεται ότι το αυξημένο κόστος ενέργειας προκλήθηκε από τον χαμηλό ρυθμό παραγωγής λιγνίτη, την αυξημένη εξάρτηση σε εισαγόμενο «ακριβό» φυσικό αέριο και την χαμηλή συνεισφορά των ΑΠΕ [2]. Την τελευταία δεκαετία εγκαταλείπεται ο λιγνίτης ως καύσιμο για την

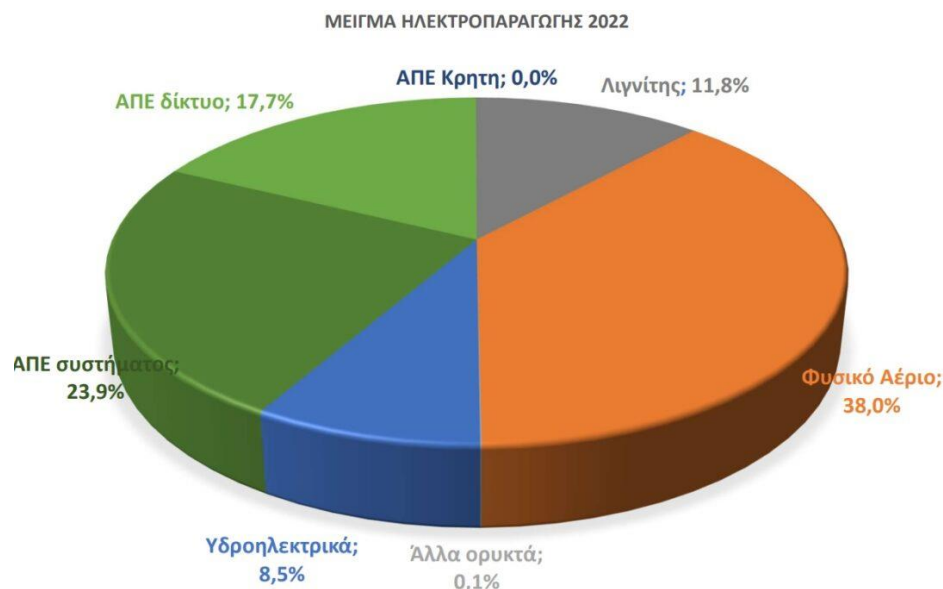
παραγωγή ενέργειας για ηλεκτρισμό, ενώ αυξάνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, βιομάζα) [3]. Πιο αναλυτικά, τα προηγούμενα χρόνια η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, ήταν η μοναδική εταιρεία στη χώρα μας υπεύθυνη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη μεταφορά μέσω του δικτύου, τη διανομή στους καταναλωτές και την προμήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας στους πολίτες. Πλέον, υπάρχουν ιδιωτικές εταιρείες που διαχειρίζονται τόσο το δίκτυο μεταφοράς όσο και το δίκτυο διανομής, ενώ παράλληλα η αγορά της Ελλάδας περιλαμβάνει ιδιωτικές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην παραγωγή και προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως μέσω της καύσης φυσικού αερίου και χρήσης ΑΠΕ. Σύμφωνα με το Σχήμα 1.1, το ποσοστό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση λιγνίτη, που τις προηγούμενες δεκαετίες ήταν το κυρίαρχο καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει μειωθεί αρκετά τα τελευταία πέντε χρόνια. Αυτό συνέβη λόγω της αύξησης των τιμών των δικαιωμάτων του CO₂, οδηγώντας σε αύξηση της τιμής της παραγόμενης kWh και της απώλειας του ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος του στερεού καυσίμου (λιγνίτη) σε σύγκριση με το CH₄.



Σχήμα 1.1. Προσφορά πηγών ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια [3].

Πλέον, το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας προέρχεται από ΑΠΕ και τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν CH₄, όπως της ΔΕΗ (εργοστάσιο παραγωγής Κομοτηνής) και άλλων ιδιωτικών εταιριών. Σημειώνεται εδώ ότι για πρώτη φορά το 2022 οι ΑΠΕ πέρασαν στην πρώτη θέση στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής στην χώρα μας. Σύμφωνα με δημοσιευμένα δεδομένα από τον ΑΔΜΗΕ [4], το 2022 αποτέλεσε

έτος ορόσημο, καθώς άλλαξε πλήρως το ενεργειακό μείγμα. Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 1.2, οι ΑΠΕ ήταν στην κορυφή της προσφοράς ηλεκτρική ενέργειας με μερίδιο 41.6% (23.9% + 17.7%).



Σχήμα 1.2. Μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2022 [4].

Στην δεύτερη θέση ήταν το CH₄ με 38% και στην τρίτη ο λιγνίτης με ποσοστό 11.8%. Τέλος, το μερίδιο των υδροηλεκτρικών ήταν 8.5%. Συνολικά για το 2022 οι καθαρές μορφές ενέργειας (ΑΠΕ και υδροηλεκτρικά) συνεισέφεραν στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με ποσοστό 50.1%, ενώ τα ορυκτά καύσιμα το 49.9%. Σημειώνεται ότι το 2021 το αντίστοιχο ποσοστό των καθαρών μορφών ενέργειας ήταν 46.1%.

Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι η ζήτηση ενέργειας κατέγραψε πτώση στην περίοδο της κρίσης στην Ελλάδα, αλλάζοντας σημαντικά το ενεργειακό μείγμα. Σήμερα, η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας είναι το εμπόριο, δεύτερη από το κτιριακό τομέα, ενώ στην τρίτη θέση βρίσκεται η βιομηχανία [5]. Παρά την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Μυτιλιναίος, ΓΕΚ Τέρνα, Motor oil) και τις αλλαγές που έχουν γίνει στις τεχνολογίες που παράγουν ρεύμα, η ΔΕΗ είναι ακόμα και σήμερα η εταιρεία που κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό στην παραγωγή ενέργειας (είτε από λιγνίτη, είτε από CH₄, είτε από ΑΠΕ).

1.2. Ενεργειακό ζήτημα

Στην σημερινή εποχή η ενέργεια αντιμετωπίζεται ως παγκόσμια πρόκληση, καθώς η διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων μειώνεται ενώ ταυτόχρονα πρέπει να προστατευθεί το περιβάλλον [6-8]. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα μεγαλύτερα αποθέματα συμβατικών καυσίμων βρίσκονται σε περιοχές γεωπολιτικών κρίσεων, όπως η Μέση Ανατολή, Ρωσία κ.τ.λ. προκαλώντας έντονες πολιτικές και στρατιωτικές εντάσεις για την προσβασιμότητα στους πόρους [9]. Ο πόλεμος της Ουκρανίας για παράδειγμα οδήγησε το φυσικό αέριο σε τιμές ρεκόρ (Σχήμα 1.3), ανεβάζοντας κατακόρυφα την τιμή της κιλοβατώρας σε όλη την Ευρώπη.



Σχήμα 1.3. Πορεία τιμής φυσικού αερίου κατά την διάρκεια των τελευταίων πέντε ετών [10].

Οι προκλήσεις αυτές απαιτούν άμεσα και δραστικά μέτρα από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελληνική Δημοκρατία, τα οποία αναπόφευκτα οδηγούν στην αναθεώρηση του υφιστάμενου ενεργειακού μοντέλου. Για την αντιμετώπιση του ενεργειακού ζητήματος, πρέπει να προηγηθεί ο ορισμός των τριών βασικών παραγόντων: η προσφορά ενέργειας, η ζήτηση ενέργειας και το κόστος που χρειάζεται για την παραγωγή της. Στη χώρα μας μέχρι στιγμής, οι προτάσεις για μακροχρόνιο σχεδιασμό επικεντρώθηκαν κυρίως στην πλευρά της προσφοράς, αγνοώντας την ζήτηση, που θεωρήθηκε δεδομένη, και στο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, μετά την πανδημία του κορονοϊού η ζήτηση για ενέργεια αυξήθηκε ραγδαία στη χώρα, αρκετά γρήγορα σε σύγκριση με τον μέσο ρυθμό στην ΕΕ. Αν αυτοί οι ρυθμοί δεν επιβραδυνθούν κυρίως

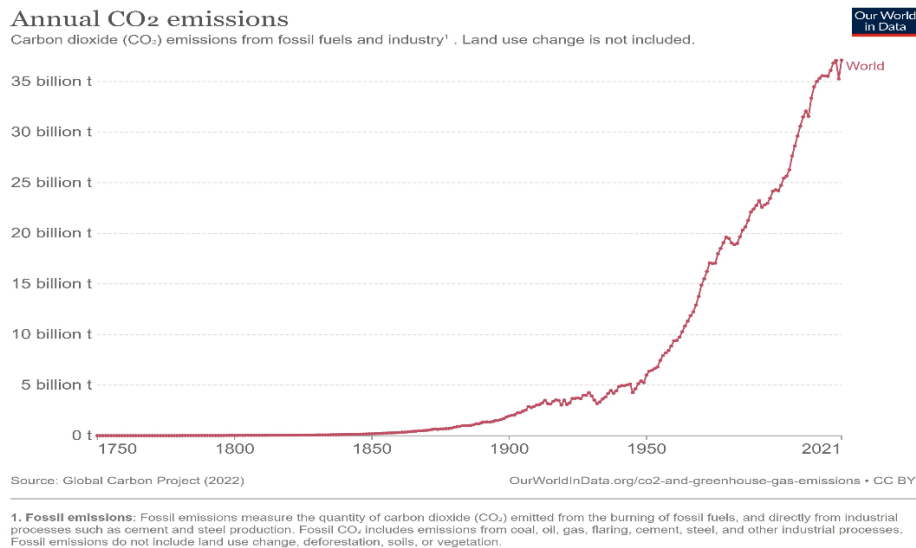
τις περιόδους των χαμηλών θερμοκρασιών (ανάγκες θέρμανσης) και των υψηλών θερμοκρασιών (αυξημένη κατανάλωση λόγω air condition), τότε ούτε ο λιγνίτης, ούτε το CH₄ θα μπορέσουν να ανταπεξέλθουν στην κατανάλωση ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια επιδιώκεται η ανάπτυξη εναλλακτικών πηγών ενέργειας (ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, βιομάζα, πράσινο υδρογόνο) καθώς μπορούν να παρέχουν ασφάλεια διαθεσιμότητας ηλεκτρικής ενέργειας με βελτιωμένο ανθρακικό αποτύπωμα [11].

1.3. Εκπομπές CO₂

Οι εκπομπές του αερίου CO₂ σε παγκόσμια κλίμακα που συνδέονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκαν κατά 0.9% ή 321 Mt το 2022, φτάνοντας την μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή των 36,8 Gt (Σχήμα 1.4) [12]. Αξίζει να σημειωθεί ότι για το ίδιο έτος η παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου από την κατανάλωση και καύση των ορυκτών πόρων από τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας αυξήθηκε κατά 423 Mt, ενώ η εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου από την βιομηχανία παρουσίασε μείωση κατά 102 Mt.

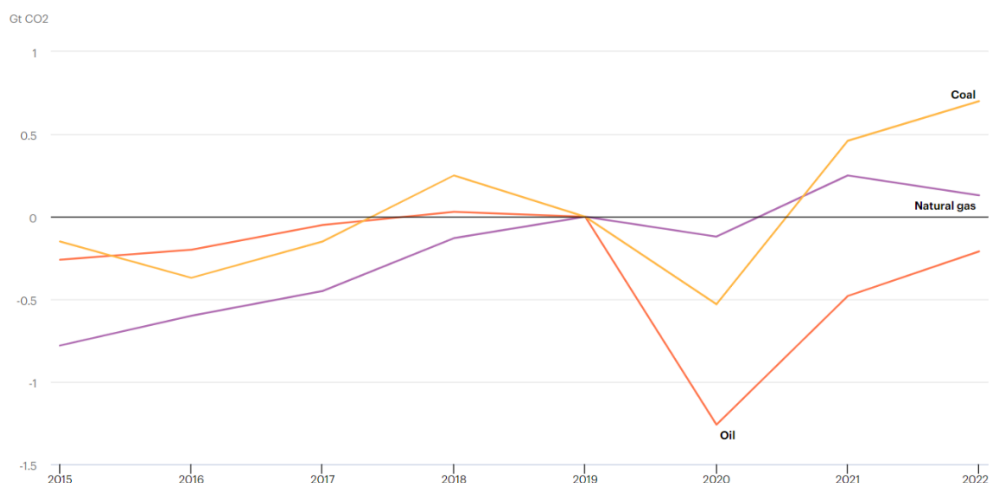
Τα δύο τελευταία έτη που σηματοδεύτηκαν από αστάθεια στις τιμές της ενέργειας, αυξανόμενο πληθωρισμό και περιορισμένη διαθεσιμότητα καυσίμων, η παγκόσμια αύξηση των εκπομπών ήταν χαμηλότερη από ό,τι αναμενόταν, παρά την αλλαγή από την κατανάλωση φυσικού αερίου σε κατανάλωση άνθρακα σε πολλές χώρες. Η αυξημένη ανάπτυξη τεχνολογιών για την παραγωγή πράσινης ενέργειας, όπως τα Φ/Β και αιολικά πάρκα, τα ηλεκτρικά οχήματα και οι αντλίες θερμότητας βοήθησαν στην αποφυγή επιπλέον εκπομπών CO₂ ύψους 550 Mt.



Σχήμα 1.4. Καταγραφή εκπομπών CO₂ μέχρι σήμερα [12].

Οι εκπομπές λόγω της χρήσης φυσικού αερίου μειώθηκαν κατά 1.6% ή 118 Mt, λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας που επιδεινώθηκε από τον πόλεμο μεταξύ Ουκρανίας και Ρωσίας. Η μείωση των εκπομπών από αέριο ήταν ιδιαίτερα σημαντικές στην Ευρώπη (-13.5%), ωστόσο υπήρξε μεταστροφή στον άνθρακα οδηγώντας σε αύξηση των εκπομπών κατά 1.6% ή 243 Mt, υπερβαίνοντας κατά πολύ τον μέσο ρυθμό ανάπτυξης της τελευταίας δεκαετίας και φτάνοντας σε νέο ιστορικό υψηλό σχεδόν 15,5 Gt. Επιπρόσθετα, οι εκπομπές από την χρήση του πετρελαίου και προϊόντων του αυξήθηκαν κατά 2.5% ή 268 Mt σε 11.2 Gt (Σχήμα 1.5). Περίπου το ήμισυ της αύξησης προήλθε από τον κλάδο των αερομεταφορών, καθώς τα αεροπορικά ταξίδια συνέχισαν να ανακάμπτουν από τα χαμηλά επίπεδα της πανδημίας, πλησιάζοντας αύξηση κατά 80% από τα επίπεδα του 2019.

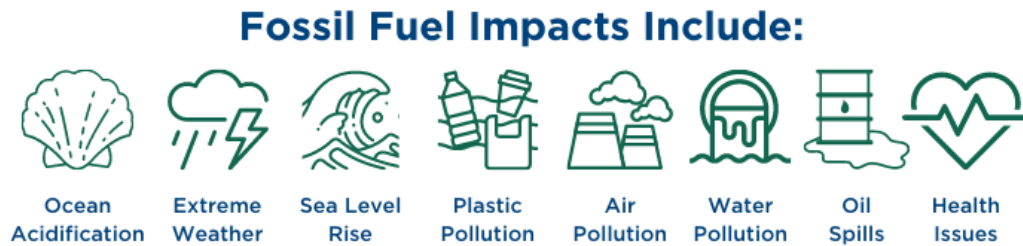
Είναι εξίσου σημαντικό να αναφερθεί εδώ ότι η ισχυρή ανάπτυξη των ΑΠΕ περιόρισε παγκοσμίως την άνοδο των εκπομπών CO₂ στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Η παραγωγή ενέργειας από Φ/Β και αιολικά πάρκα αυξήθηκε κατά περίπου 275 TWh, καταγράφοντας ένα νέο ετήσιο ρεκόρ. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση σημειώθηκε μείωση κατά 2.8% ή 70 Mt στις εκπομπές CO₂, παρόλο που είχε να αντιμετωπίσει τις επιπτώσεις του πολέμου Ρωσίας - Ουκρανίας, της μειωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικούς σταθμούς λόγω ξηρασίας και την παύση λειτουργίας πυρηνικών εργοστασίων που έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας.



Σχήμα 1.5. Παραγωγή εκπομπών CO₂ από ορυκτά καύσιμα στο χρονικό διάστημα μεταξύ 2015-2022.

1.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ορυκτών καυσίμων και δράσεις μετριασμού

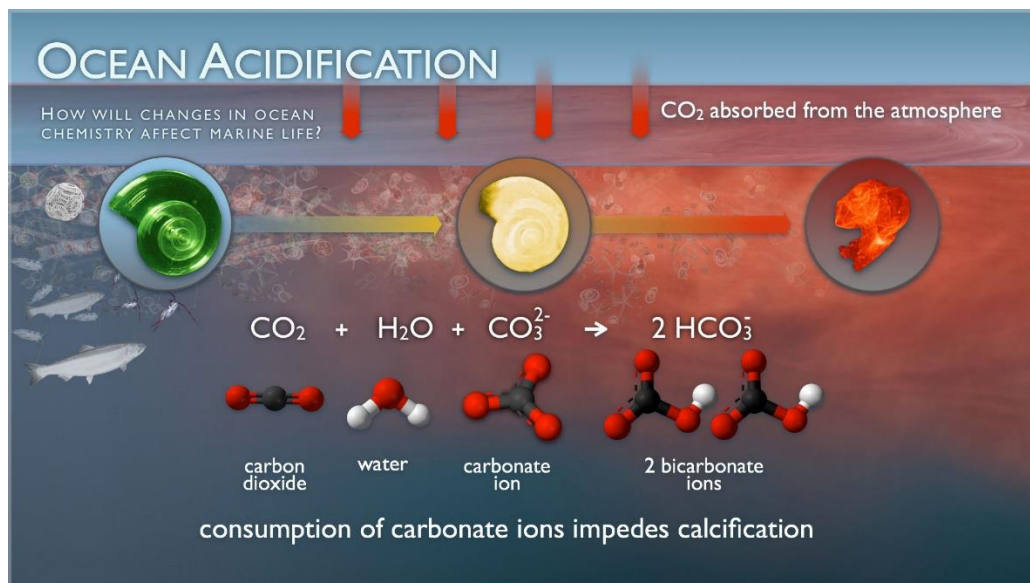
Η χρήση ορυκτών πόρων όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το CH₄, έχει αποτέλεσμα την επιβάρυνση του κλίματος, γενικά του περιβάλλοντος και της υγείας των πολιτών που δεν αντανακλάται στις τιμές της αγοράς πώλησης των καυσίμων. Συνήθως, οι εξωτερικές επιπτώσεις της χρήσης των ορυκτών καυσίμων βρίσκονται στον κλάδο της υγείας και στον κλάδο υποδομών που επηρεάζονται από φυσικές καταστροφές λόγω της κλιματικής κρίσης. Κάθε στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας ορυκτών καυσίμων, από το αρχικό στάδιο της εξόρυξης και το δεύτερο στάδιο της μεταφοράς έως τη διύλιση και την κατανάλωση μέσω της καύσης, προκαλεί εξωτερικές επιπτώσεις. Σε αυτό το σημείο θα παρατεθούν ορισμένες από τις εξωτερικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τα ορυκτά καύσιμα [13-16].



Σχήμα 1.6. Επιπτώσεις χρήσεις των ορυκτών καυσίμων.

Μερικές από τις επιπτώσεις που έχουν οι ορυκτοί πόροι στο κλίμα είναι:

- i. Μείωση του pH στους ωκεανούς: Σχεδόν 25% του CO₂ που εκπέμπεται από την χρήση των ορυκτών καυσίμων απορροφάται από τους ωκεανούς, αλλάζοντας το pH του νερού. Σύμφωνα με το Σχήμα 1.7 φαίνεται ότι ανάμειξη του CO₂ με το θαλασσινό νερό προκαλεί την ασβεστοποίηση στο κέλυφος του θαλάσσιου σαλιγκαριού, προκαλώντας την καταστροφή του.



Σχήμα 1.7. Ένα κέλυφος από θαλάσσιο σαλιγκάρι φαίνεται να διαλύεται με την πάροδο του χρόνου σε θαλασσινό νερό με χαμηλότερο pH [17].

- ii. Ακραίες καιρικές συνθήκες: Με βάση στοιχεία της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας, η κλιματική αλλαγή, που προέρχεται από χρήση των ορυκτών πόρων, έχει ως αποτέλεσμα συχνότερες και πιο ακραίες καιρικές συνθήκες που έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία καταστροφών με μεγάλο κόστος. Δύο

ακραία καιρικά φαινόμενα εκδηλώθηκαν και στην Ελλάδα, καταστρέφοντας καλλιέργειες και σπίτια αγροτών, εγκαταστάσεις εργοστασίων, πλημμυρίζοντας πόλεις, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο οικονομικό αρνητικό αποτύπωμα στη χώρα.

- iii. Αύξηση της στάθμης της θάλασσας: Το φαινόμενο οφείλεται στην υπερθέρμανσή της και στην αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτή η υπερθέρμανση έχει ως αποτέλεσμα την τήξη των παγετώνων και των χιονοστρωμάτων στην στεριά, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης. Έχει παρατηρηθεί ότι από τα τέλη του 1800, η στάθμη της θάλασσας έχει ανέβει περίπου 9 ίντσες (22,86 εκατοστά), με αποτέλεσμα την εμφάνιση συχνότερων πλημμυρικών φαινομένων, αλλά και την εισροή αλμυρού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα παραθαλάσσιων περιοχών. Εκτιμάται ότι τα επόμενα χρόνια θα υπάρξει έντονη μετανάστευση από τις παραθαλάσσιες περιοχές λόγω των συνεχόμενων καταστροφών που γίνονται εξαιτίας των καιρικών φαινομένων.

Για την προστασία του περιβάλλοντος και των οικονομιών των κρατών έχουν βρεθεί και αναπτυχθεί πολλές λύσεις για την κλιματική αλλαγή που έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν οικονομικά οφέλη ενισχύοντας τη βιωσιμότητα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τρεις ευρείες κατηγορίες δράσεων που εφαρμόζονται είναι: μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, προσαρμογή των συνηθειών πάνω στα νέα κλιματικά δεδομένα και διάθεση νέων κεφαλαίων για τις προσαρμογές στις νέες συνθήκες. Η δέσμευση για εκπομπές αερίων μηδενικής συγκέντρωσης σε CO₂ έως το έτος του 2050 περιλαμβάνει αρχικά το στόχο να μειωθούν στο μισό οι εκπομπές CO₂ έως το 2030 διατηρώντας με αυτό τον τρόπο σταθερή την θερμοκρασία του πλανήτη κάτω από το όριο της αύξησης του 1.5°C που έχει τεθεί. Η επίτευξη αυτού του στόχου σημαίνει μεγάλη μείωση στη χρήση άνθρακα, πετρελαίου ή/και CH₄, δηλαδή ουσιαστικά σημαίνει ότι πάνω από τα δύο τρίτα των σημερινών αποδεδειγμένων αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων πρέπει να διατηρηθούν στο έδαφος μέχρι το 2050 και έπειτα, προκειμένου να αποφευχθούν καταστροφικά φαινόμενα της κλιματικής αλλαγής.

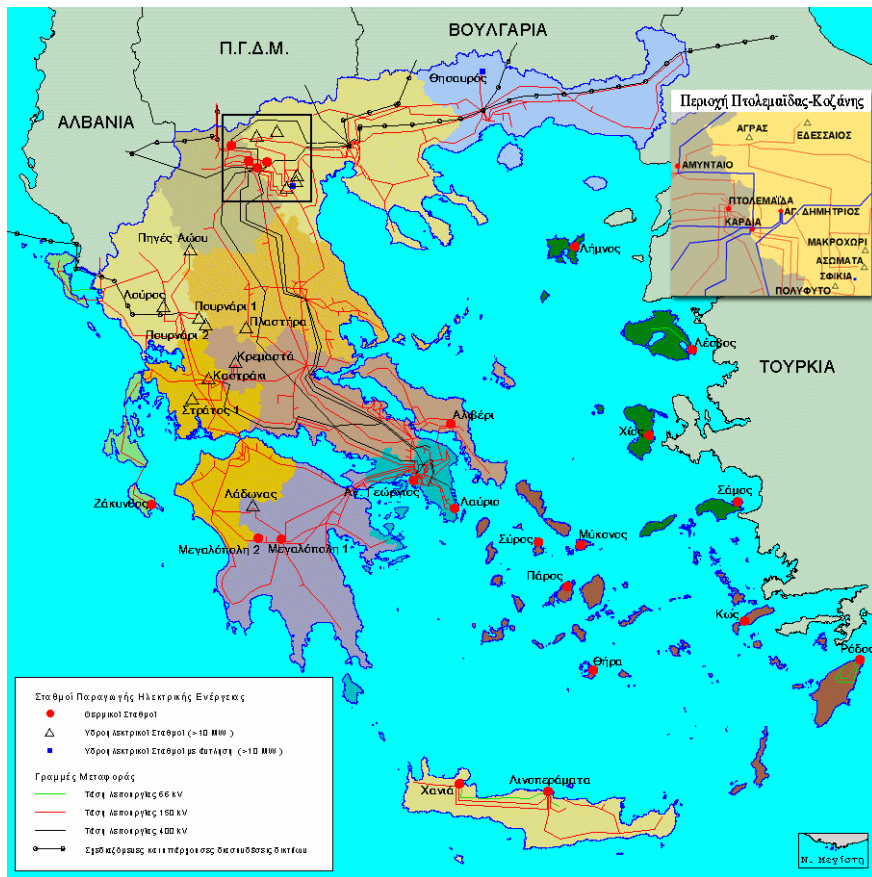
Στα πλαίσια των συμφωνιών για το περιβάλλον, έχουν αναπτυχθεί μηχανισμοί για τη μείωση των επιπτώσεων από την αξιοποίηση των ορυκτών πόρων, όπως:

- i. Κατάργηση των επιδοτήσεων χρήσης ορυκτών καυσίμων
- ii. Αύξηση του κοινωνικού κόστους του άνθρακα (SCC), το οποίο εκτιμά τις οικονομικές ζημιές που προκύπτουν από τις εκπομπές CO₂.
- iii. Προώθηση των ενεργειακών κοινοτήτων και την απαίτηση ένα ποσοστό της ενέργειας που παράγεται και πωλείται από τις επιχειρήσεις παραγωγής να προέρχεται από καθαρές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, μηχανισμός ο οποίος εφαρμόζεται ήδη στην Ελλάδα.
- iv. Φορολόγηση των εκπομπών CO₂, που πληρώνονται από τους χρήστες ορυκτών πόρων όπως η βιομηχανία της μεταλλουργίας, τσιμέντου και οι μονάδες παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν το πετρέλαιο ως καύσιμο, το λιγνίτη ή το φυσικό αέριο. Τα ποσά που συγκεντρώνονται από το κόστος εκπομπών CO₂ διοχετεύονται σε επενδύσεις καθαρής ενέργειας.

1.5. Εκπομπές CO₂ από λιγνιτικές μονάδες της Ελλάδας

Η Μαριάννα Τζαννέ στο άρθρο της με τίτλο «ΔΕΗ: Καμπανάκι οι εκπομπές CO₂ εξαμήνου για τις ρήτρες βιωσιμότητας του ομολογιακού ύψους 500 εκατ. €» [18] στο newsmoney, περιγράφει με λεπτομερή τρόπο το κόστος που έχουν οι λιγνιτικές μονάδες στη ΔΕΗ, πως επηρεάζονται τα οικονομικά της εταιρείας μεταφέροντας παράλληλα το κόστος των εκπομπών CO₂ στους καταναλωτές μέσω της αναπροσαρμογής των τιμολογίων χρέωσης της κιλοβατώρας.

Συγκεκριμένα το 2023 το εργοστάσιο παραγωγής της ΔΕΗ του Αγίου Δημητρίου ήταν ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τις μεγαλύτερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ενώ στην αρχή του 2023 στη δεύτερη θέση βρέθηκε το νέο εργοστάσιο της ΔΕΗ, που ονομάζεται «Πτολεμαΐδα 5». Κατέλαβε τη δεύτερη θέση στη λίστα με τα θερμικά εργοστάσια της ΔΕΗ, καθώς κατά την διάρκεια του καλοκαιριού (Ιούνιο μήνα) κάλυψε πάνω από το μισό της παραγωγής με λιγνίτη εκπέμποντας πεντακόσιους (500) εκατομμύρια τόνους CO₂. Την μεγαλύτερη ποσότητα CO₂ παράγει η μονάδα του Αγίου Δημητρίου, λόγω της παλαιότητας και της χαμηλότερης απόδοσης.



Σχίμα 1.8. Παλιές και νέες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τρίτη πιο ρυπογόνος μονάδα παραγωγής είναι το εργοστάσιο Μεγαλόπολης V που παράγει συνολικά 410 εκατομμύρια τόνους, επόμενη σε σειρά είναι η μονάδα Μεγαλόπολη IV με περίπου 362 εκατομμύρια τόνους. Τέλος, η παραγωγή CO₂ της μονάδας «Μελίτη» της ΔΕΗ ήταν αρκετά πιο μικρή με περίπου 200 εκατομμύρια τόνους

Σύμφωνα ξανά με το δημοσίευμα, ο κ. Γιώργος Στάσης, επικεφαλής της ΔΕΗ, δήλωσε ότι το να συνεχιστεί η παραγωγή του λιγνίτη και της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αυτού, έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στο λειτουργικό κόστος λόγω του κόστους των ρύπων, αλλά και ποιών στους όρους που έχει υπογράψει η ΔΕΗ για την χρηματοδότησή της μέσω των τραπεζών (ομολογιακά δάνεια). Κατά την διάρκεια του 2021 η ΔΕΗ ήρθε σε συμφωνία με το τραπεζικό σύστημα για δανεισμό ύψους 775 εκατ. € και υποσχέθηκε ότι θα μειώνει τις εκπομπές CO₂ κατά 40% συγκριτικά με το επίπεδο των ρύπων το 2019, ενώ σε επόμενα δάνεια υπήρχε ρήτρα μείωσης των ρύπων κατά 57% για το έτος του 2023 σε σύγκριση με το έτος 2019. Συνοπτικά, η επιχείρηση

ακολούθησε πιστά αυτόν τον σχεδιασμό μειώνοντας την χρήση των μονάδων της και επιβαρύνθηκε ελάχιστα από την ρήτρα (μόνο κατά 50 μονάδες βάσης).

1.6. Οι προοπτικές των λιγνιτικών μονάδων

1.6.1. Στήριξη της εξόρυξης λιγνίτη

Σύμφωνα με τα οικονομικά διεθνή δεδομένα στον τομέα της ενέργειας αναμένεται ότι το κόστος του φυσικού αερίου, θα παραμείνει σε υψηλά επίπεδα, δίνοντας την ευκαιρία στους λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα σε περίπτωση εφαρμογής καινοτόμων συστημάτων αντιρύπανσης. Η νέα μονάδα που ονομάζεται «Πτολεμαΐδα 5», λόγω της αξιοποίησης των βέλτιστων τεχνολογιών στον σχεδιασμό, έχει την ικανότητα να παράγει περισσότερη ενέργεια με μικρότερη κατανάλωση σε καύσιμο και ανταγωνίζεται τις μονάδες φυσικού αερίου. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, η νέα λιγνιτική μονάδα Πτολεμαΐδα 5 έχει μεγαλύτερη ισχύ (κατά 43.3%), μεγαλύτερη απόδοση (περίπου 48%), χαμηλότερη κατανάλωση σε καύσιμο (περίπου 35%), μεγάλη μείωση του CO₂, μείωση της εκπομπής σωματιδίων ($\leq 10 \text{ mg/Nm}^3$), το ανώτερο όριο που επιτρέπεται είναι 20 mg/Nm^3 . Όλες οι παραπάνω τιμές είναι σε σύγκριση με τις παλαιότερου τύπου λιγνιτικές μονάδες.

Το σημαντικότερο ερώτημα είναι για πόσο καιρό θα είναι ακόμα ανταγωνιστικές οι μονάδες που χρησιμοποιούν για καύσιμο τον λιγνίτη, το πως θα αντικατασταθούν και ποιες θα είναι οι τυχόν βελτιώσεις στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα με εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης και αξιοποίησης του CO₂ [19-23].

Κεφάλαιο 2^ο

Τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂, περιβαλλοντικές επιπτώσεις αιολικής ενέργειας

2.1. Εισαγωγή

Το ιδανικό σενάριο για τη μείωση του CO₂ είναι η αντικατάσταση μεγάλου ποσοστού των ορυκτών καυσίμων με ΑΠΕ, με παράλληλη ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και βελτιστοποίηση των υφιστάμενων τεχνολογιών. Παράλληλα, είναι η απαραίτητη η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που θα συμβάλουν στον έλεγχο του CO₂ για τις ήδη υπάρχουσες μονάδες. [24,25].

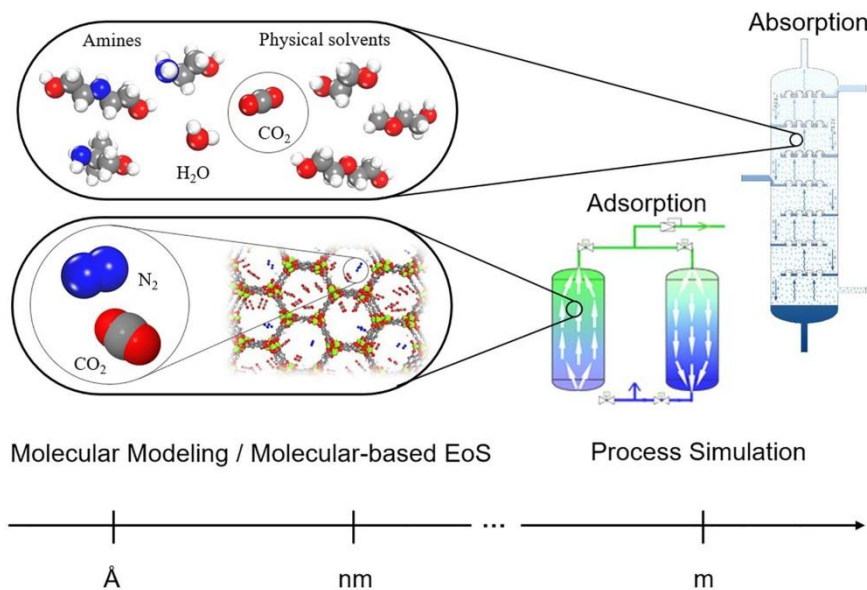
2.2. Διεργασίες δέσμευσης με διαλύτες CO₂

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες διεργασίες χημικής ρόφησης. Οι κυριότερες είναι:

- i. Δέσμευση του CO₂ χρησιμοποιώντας αμίνες (Σχήμα 2.1.). Οι πιο γνωστές αμίνες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η διαιθανολαμίνη (DEA), η μονοαιθανολαμίνη (MEA) και η και η μεθυλο διαιθανολαμίνη (MDEA). Η πιο διαδεδομένη είναι η MEA καθώς έχει το μικρότερο κόστος. Το σημαντικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη διεργασία είναι η αποδόμηση της αμίνης. Τα παραπροϊόντα αντιδρούν με την αμίνη μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τον βαθμό απορρόφησης του CO₂ προκαλώντας παράλληλα και διάβρωση του εξοπλισμού της μονάδας [26]. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, προτείνεται η δέσμευση των παραπροϊόντων την καύσης πριν τη διεργασία και σε

δεύτερο στάδιο η αναπλήρωση της αμίνης, της οποίας η αποδόμηση μπορεί να αποφευχθεί όταν η περιεκτικότητα του διαλύματος σε αμίνη είναι χαμηλή [26].

- ii. Απορρόφηση του CO_2 χρησιμοποιώντας υδατικό διάλυμα αμμωνίας. Η συγκεκριμένη διεργασία έχει συγκεντρώσει υψηλό ερευνητικό ενδιαφέρον, λόγω του ότι είναι δυνατόν να δεσμευτούν παράλληλα με το CO_2 , τα NO_x και τα SO_x [27].
- iii. Διεργασία απορρόφησης CO_2 διπλού σταδίου χρησιμοποιώντας αλκαλικές ενώσεις σε συνδυασμό με μεθυλαμινοαιθανόλη (MEA) [28].
- iv. Απορρόφηση του CO_2 χρησιμοποιώντας Na_2CO_3 μέσω θερμικής διεργασίας. Το μειονέκτημα που παρουσιάζει και σχετίζεται με το άλας ανθρακικού νατρίου είναι ο μικρότερος ρυθμός δέσμευσης του CO_2 σε σχέση με την διεργασία που χρησιμοποιεί αμίνες, έχοντας ως συνέπεια την απαίτηση πολύ μεγάλων προσροφητών – αντιδραστήρων [29].



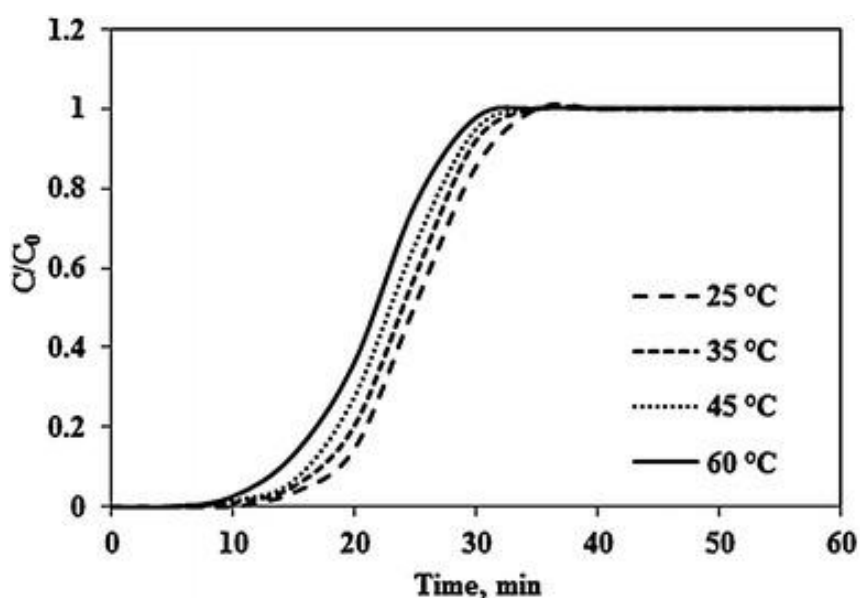
Σχήμα 2.1. Διεργασία απορρόφησης του CO_2 [30].

2.3. Διεργασίες προσρόφησης CO_2

Η απομάκρυνση του CO_2 από ένα ρεύμα εκπομπών ρύπων μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση προσροφητικών υλικών [31-33]. Σημαντικός αριθμός μελετών έχει δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια παρουσιάζοντας καινοτόμα υλικά που χρησιμοποιούνται για την δέσμευση διαφόρων ρύπων (H_2S , CO_2) ή/και προϊόντων αντιδράσεων αυξημένης προστιθέμενης αξίας, όπως το αιθυλένιο [34-36].

Μετά την καύση, τα απαέρια πρέπει να περάσουν αρχικά από ένα στάδιο επεξεργασίας για την απομάκρυνση διαφόρων ενώσεων που μπορούν να απενεργοποιήσουν τα ενεργά κέντρα του προσροφητικού υλικού, τέτοιες ενώσεις είναι: (NO_x , SO_x και H_2O). Συγκεκριμένα, τα μόρια αυτά των ενώσεων δρουν ανταγωνιστικά με τα μόρια του CO_2 για την κάλυψη των θέσεων προσρόφησης, μειώνοντας έτσι την απόδοση του προσροφητικού μέσου [37,38]. Είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι το ρεύμα των καυσαερίων, πριν εισαχθεί στον προσροφητή – αντιδραστήρα, θα πρέπει πρώτα να έχει ξηρανθεί καθώς τα μόρια νερού δρουν ανταγωνιστικά με το CO_2 για τις ενεργές θέσεις του προσροφητικού μέσου [37,38]. Τέλος η παρουσία του νερού υποβαθμίζει και την κρυσταλλική δομή των προσροφητικών μέσων [29].

Η φυσική προσρόφηση πραγματοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία ($25\text{-}50^\circ\text{C}$) συγκριτικά με την διεργασία της χημικής ρόφησης που λαμβάνει χώρα σε υψηλότερη θερμοκρασία. Συνήθως η αναγέννηση του υλικού λαμβάνει χώρα χρησιμοποιώντας κάποιο αδρανές αέριο. Στο παρακάτω Σχήμα 2.2. παρουσιάζεται η διεργασία της προσρόφησης του CO_2 σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Φαίνεται ότι η προσροφητική ικανότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω αύξησης της κινητικής ενέργειας των μορίων CO_2 .



Σχήμα 2.2. Καμπύλες προσρόφησης CO_2 σε 1 atm και σε διαφορετικές θερμοκρασίες προσρόφησης.

Μερικά από τα προσροφητικά μέσα που χρησιμοποιούνται είναι:

Ζεόλιθοι: Είναι υλικά που έχουν την ικανότητα να προσροφούν CO₂ και παρουσιάζουν μεγάλη προσροφητική ικανότητα λόγω της παρουσίας του αργιλίου στο κρυσταλλικό πλέγμα της δομής του. Η παρουσία του αργιλίου (Al) στο πλέγμα του υλικού προκαλεί τη δημιουργία αρνητικού φορτίου που ισορροπεί με ανταλλάξιμα κατιόντα (συχνά αλκαλικά) στους πόρους του υλικού. Αυτά τα αλκαλικά κατιόντα επιτρέπουν στους ζεόλιθους την προσρόφηση και τη συγκράτηση όξινων μορίων όπως είναι το CO₂. Ιδανικά για υψηλές τιμές προσροφητικής ικανότητας είναι επιθυμητή η χαμηλή αναλογία (Si) προς Al έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος αριθμός κατιόντων [29].

Ενεργός άνθρακας: Το υλικό αυτό παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων προσροφητικών μέσων. Ο ενεργός άνθρακας έχει υψηλή ειδική επιφάνεια που σε ορισμένα είδη αγγίζει την τιμή των 1000 m² g⁻¹, υψηλή θερμική σταθερότητα μέχρι του 500-660°C, και χαμηλό κόστος [39]. Ο ενεργός άνθρακας παράγεται από ανθρακούχα υλικά όπως μπαμπού, φλοιό καρύδας, τύρφη ιτιάς, ξύλο, ίνες κοκοφοίνικα, λιγνίτη, άνθρακας και πίσσα πετρελαίου.

Προσροφητικά με αμίνη: Είναι υλικά που αποτελούνται από πολυαιθυλενοϊμίνη (polyethylenimine, PEI) δεσμευμένη στην επιφάνεια ενός υποστρώματος στερεάς πυριτίας με μεγάλη ειδική επιφάνεια [40,41].

Υλικά με μέταλλο-οργανικές δομές (MOFs): Τα μεταλλο-οργανικά υλικά είναι καινοτόμα ομάδα νέων μικροπορώδων κρυσταλλικών υλικών. Η δομή τους αποτελείται από κατιόντα μετάλλων που συνδέονται μεταξύ τους με οργανικές ενώσεις και χρησιμοποιούνται κυρίως σε διαχωρισμό αερίων μιγμάτων, σε καταλυτικές διεργασίες, στην προσρόφηση ρύπων (H₂S & CO₂) και στην αποθήκευση του CH₄ [29].

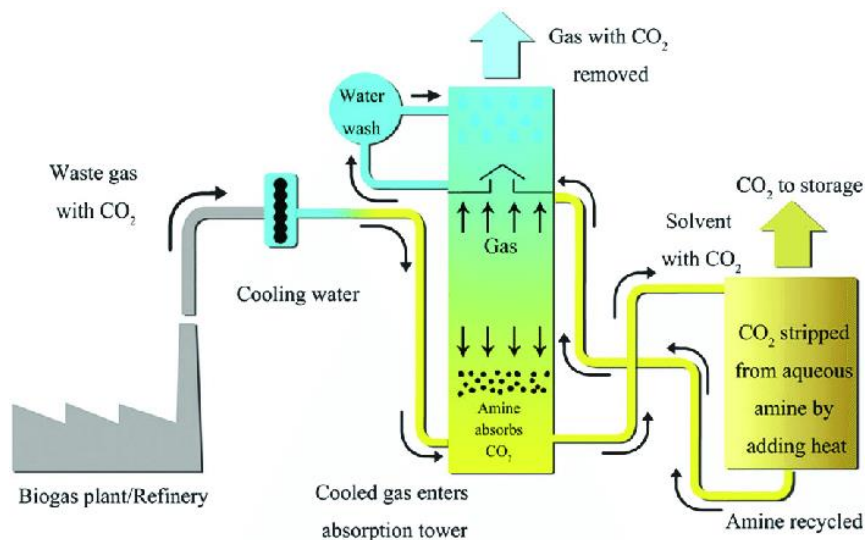
Βασικά οξείδια μετάλλων: Είναι μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε από τον Shimizu και τους συνεργάτες του [42, 43] βάσει της αντίδρασης CaO + CO₂ → CaCO₃ και την αναγέννηση του CaO με πύρωση.

2.4. Περιγραφή θερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δέσμευση CO₂

Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 1, η αξιοποίηση του λιγνίτη στην Ελλάδα θα μπορούσε να βελτιωθεί μέσω της δέσμευσης των εκπομπών CO₂. Μία θερμοηλεκτρική μονάδα για δέσμευση του CO₂ περιλαμβάνει:

- i. Το σύστημα μεταφοράς και επεξεργασίας του λιγνίτη
- ii. Τον λέβητα για την καύση του λιγνίτη
- iii. Το σύστημα συγκράτησης των αιωρούμενων σωματιδίων
- iv. Τον αμοστρόβιλο
- v. Τη μονάδα αποθείωσης των καυσαερίων
- vi. Τη μονάδα χημικής απορρόφησης του CO₂
- vii. Το σύστημα συμπίεσης του CO₂

Η δέσμευση του CO₂ συνήθως γίνεται με διάλυμα μονοαιθανολαμίνης με απόδοση μεγαλύτερη του 90% σε αντιστοιχία 20 m³/ton CO₂ με αποτέλεσμα να δεσμεύονται 0.48 - 0.50 mole CO₂ / mole αμίνης [44]. Για την αποθήκευση, λόγω της υψηλής καθαρότητας του CO₂ δεν είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία του ρεύματος. Το CO₂ εκροφάται και συμπιέζεται από τα 1.5 μέχρι και τα 200 bar και αποθηκεύεται ως υγροποιημένο [44].

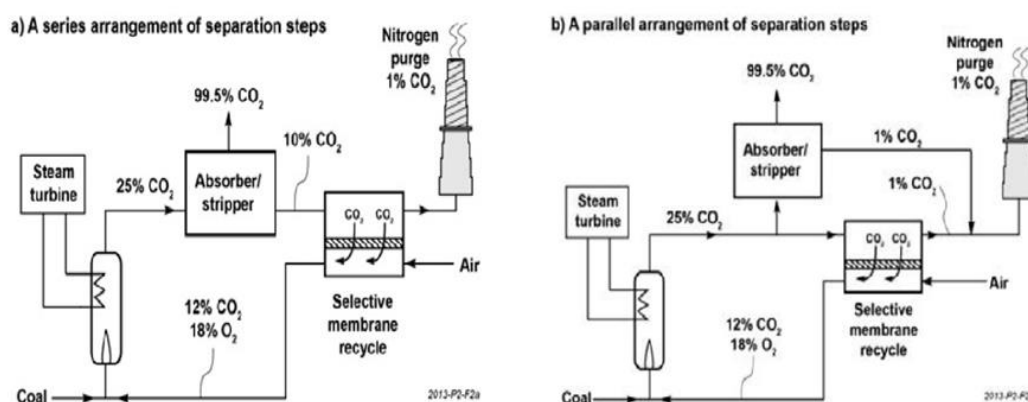


Σχήμα 2.3. Διεργασία δέσμευσης του CO₂ [45].

Υβριδικά συστήματα

Για την βελτίωση της απόδοσης δέσμευσης του CO₂, έχουν αναπτυχθεί υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν πολλές τεχνολογίες ταυτόχρονα. Η εταιρεία Membrane Technology & Research, Inc. (MTR) και το Πανεπιστήμιο του Τέξας επικεντρώθηκαν

στην ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων δέσμευσης με μεμβράνη και απορρόφησης. Στο παρακάτω Σχήμα 2.4 παρουσιάζονται δύο παραλλαγές της τεχνολογίας.



Σχήμα 2.4. Υβριδικά συστήματα διοξειδίου του άνθρακα [46].

Στο Σχήμα 2.4α η μονάδα χημικής απορρόφησης επεξεργάζεται σε πρώτο στάδιο το αέριο που παράγεται κατά το στάδιο της καύσης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να αφαιρεθεί περίπου το μισό CO_2 . Στη συνέχεια το ρεύμα απομακρύνεται από τον προσροφητή με ένα ποσοστό γύρω στο 10% του CO_2 και οδηγείται σε μονάδα μεμβράνης. Με τον τρόπο αυτό δεσμεύεται το CO_2 σε ποσοστό 90%. Στο Σχήμα 2.4 β το αέριο που παράγεται διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα και διαμοιράζεται στα δύο υποσυστήματα. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη διάταξη είναι ότι μειώνεται ο όγκος του καυσαερίου που διαχειρίζεται η κάθε διάταξη.

2.5. Αποθήκευση CO_2 σε γεωλογικές δομές της Ελλάδας.

Καθώς η ζήτηση για μείωση των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) αυξάνεται, η ανάγκη για αποθήκευση που αναφέρθηκε παραπάνω καθίσταται επιτακτική. Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η τρέχουσα κατάσταση των τεχνολογιών δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO_2 . Επιπλέον αναλύεται η τεχνική ανθρακοποίησης ορυκτών, μια νέα μέθοδος για ασφαλή και μόνιμη δέσμευση CO_2 που βασίζεται στην αντίδραση του CO_2 με οξείδια ασβεστίου ή μαγνησίου ή υδροξείδια για να σχηματίσουν σταθερές ανθρακικές ενώσεις. Περιγράφονται τρέχοντα έργα εμπορικής κλίμακας CCS σε όλη την Ευρώπη, συμπεριλαμβανομένης της μοναδικής περίπτωσης ανθρακοποίησης ορυκτών στην Ευρώπη, η περίπτωση του CarbFix στην Ισλανδία. Επιπλέον σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η αναγκαιότητα

δέσμευσης CO₂ στην Ελλάδα και αναλύεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μελέτης περίπτωσης σχετικά με την αποθήκευση CO₂ στην Ελλάδα σε γεωλογικές δομές. Η μελέτη δείχνει ότι οι γεωλογικές δομές της Πίνδου και στο σύμπλεγμα του Βουρίνου θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα πολλά υποσχόμενο σενάριο αποθήκευσης CO₂. Η διαδικασία CCS περιλαμβάνει αποθήκευση σε εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και αερίου, σχηματισμούς άνθρακα, αλατούχους σχηματισμούς, σχηματισμούς βασάλτη και την αποθήκευση ένυδρου CO₂ σε υπόγειο περιβάλλον.

Στην περίπτωση ανθρακοποίησης ορυκτών, το CO₂ αντιδρά χημικά με το οξείδιο του ασβεστίου ή του μαγνησίου για να σχηματίσει σταθερά ανθρακικά άλατα μέσω της παρακάτω αντίδρασης:



όπου Μ είναι το δισθενές μέταλλο. Η ποσότητα της θερμότητας που θα παραχθεί εξαρτάται από το μέταλλο που περιέχει το μεταλλικό οξείδιο.

Η διεργασία της ανθρακοποίησης των ορυκτών μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η *in situ* μέθοδος όπου το CO₂ εγχέεται σε έναν γεωλογικό σχηματισμό με σκοπό την τελική παραγωγή σταθερών ανθρακικών αλάτων, όπως ο ασβεστίτης (CaCO₃), ο δολομίτης (Ca_{0.5}Mg_{0.5}CO₃), ο μαγνησίτης (MgCO₃) και ο σιδηρίτης (FeCO₃). Τα προϊόντα που σχηματίζονται είναι θερμοδυναμικά σταθερά, επομένως, η δέσμευση είναι μόνιμη και ασφαλής [47]. Αυτή η μέθοδος έχει διαφορά από τη συμβατική αποθήκευση στη γη καθώς το αέριο CO₂ εγχέεται υπόγεια κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες με σκοπό την φυσική διεργασία ανθρακοποίησης ορυκτών. Στην *ex-situ* μέθοδο, η διεργασία ανθρακοποίησης εφαρμόζεται πριν την αποθήκευση στους υπόγειους αποδέκτες [48,49]. Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις όπως η επιλογή του κατάλληλου γεωλογικού στρώματος για την προσρόφιση του CO₂, η δυνατότητα επιτάχυνσης της αντίδρασης και η ενδεχόμενη αξιοποίηση της θερμότητας που παράγεται κατά της διάρκεια της εξώθερμης διεργασίας [50].

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, η πιο μεγάλη πηγή CO₂ αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα είναι οι λιγνιτικές μονάδες στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας. Οι τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης δεν έχουν εφαρμοστεί στους ελληνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και η μεταφορά CO₂ σε άλλες χώρες για την αποθήκευση

είναι μια κοστοβόρα διαδικασία. Ωστόσο, υπάρχουν μόνο λίγες μελέτες που έχουν διεξαχθεί για την αποθήκευση CO₂ στην Ελλάδα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 [51-54].

Πίνακας 2.1. Λίστα περιοχών προς μελέτη στην Ελλάδα για την ανάπτυξη συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂.

A/A	Πιθανοί χώροι αποθήκευσης	Βιβλιογραφία
1	Πρίνος, Καβάλα στη βόρεια Ελλάδα, Πεντάλοφος, Επταχώρι, ΒΔ Ελλάδα	Tasianas et al. [51]
2	Έβρος, Βόρεια Ελλάδα	Vatalis et al. [52]
3	Πεντάλοφος και Τσοτίλι, ΒΔ Ελλάδα	Koukouzas et al. [53]
4	Bourinos, Δυτική Μακεδονία	Koukouzas et al. [54]
5	Θερμαϊκός κόλπος	Στο παρών έγγραφο

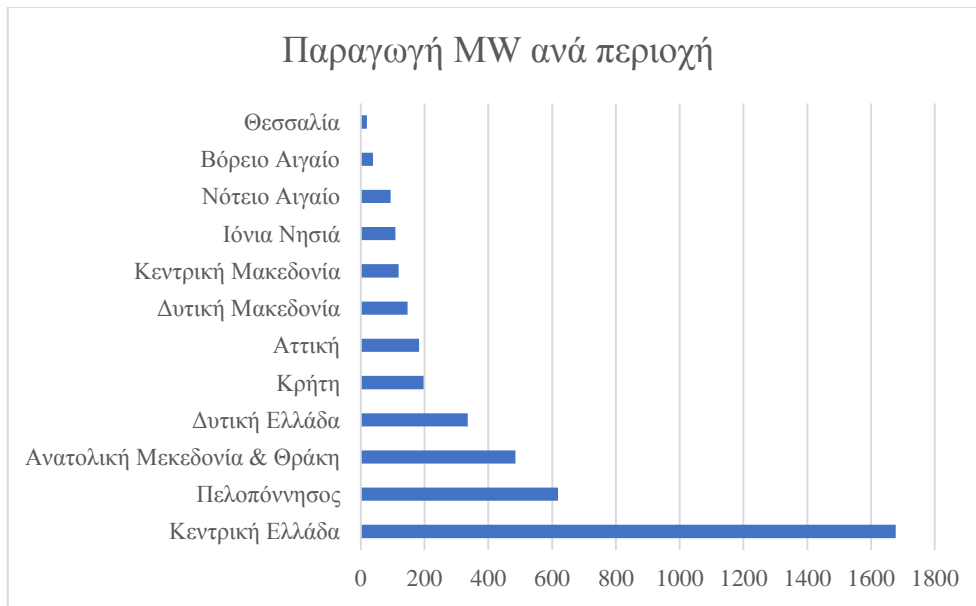
Οι ταμειυτήρες Πεντάλοφου και Επταχωρίου στη ΒΔ Ελλάδα έχουν χωρητικότητα 728 δισεκατομμυρίων τόνων CO₂ [51]. Ο Βατάλης και οι συνεργάτες του [52], πρότειναν την αποθήκευση CO₂ στο γνωστό κοίτασμα ζεόλιθου στον Έβρο (Βόρεια Ελλάδα). Επίσης ο Κουκούζας και οι συνεργάτες του [53,54] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι σχηματισμοί του αμμόλιθου στο Πεντάλοφο και στο Τσοτύλι θα μπορούσαν να αποτελέσουν πιθανή τοποθεσία αποθήκευσης CO₂ υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Τέλος, μια πολλά υποσχόμενη περιοχή αποθήκευσης CO₂ βρίσκεται στο όρος Βούρινος στη Δυτική Μακεδονία αλλά και στον Θερμαϊκό κόλπο (η περίπτωση αποθήκευσης CO₂ εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία). Οι τελευταίες περιοχές που αναφέρθηκαν έχουν το πλεονέκτημα ότι βρίσκονται κοντά σε περιοχές που έχει τις δραστηριότητες παραγωγής ενέργειας η ΔΕΗ. Για την περιοχή του Βούρινου, διεξήχθη πειραματική μελέτη [54] για την αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂ σε πυριτικά άλατα μαγνησίου. Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν περιορισμένη χημειορόφηση του CO₂, ωστόσο, η συμπεριφορά των πετρωμάτων θα μπορούσε να αλλάξει με κατάλληλες διεργασίες. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να εφαρμοστεί μεγαλύτερος χρόνος παραμονής (μεγαλύτερος χρόνος αντίδρασης) και δέσμευση των ακαθαρσιών που δηλητηριάζουν τα ενεργά κέντρα του προσροφητή.[54].

2.6. Περιβαλλοντικές επιδόσεις αιολικής ενέργειας.

Παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα και επιπτώσεις στο περιβάλλον

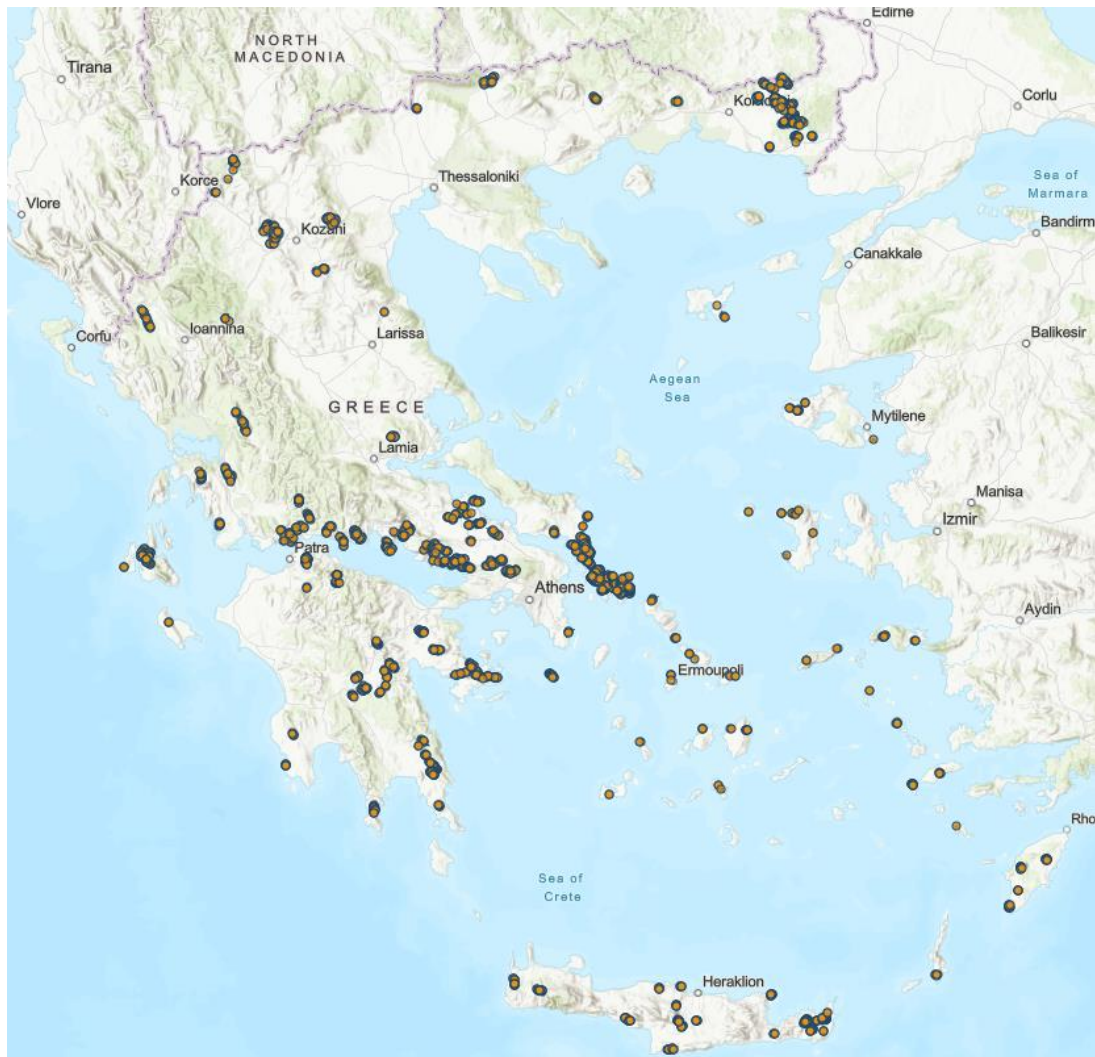
Σύμφωνα με δημοσιευμένη μελέτη [55], η αιολική ενέργεια που είχε εγκατασταθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση μέχρι το τέλος του 2009 ήταν 74.767 MW, με την Ελλάδα να διαθέτει μόνο ένα μικρό μερίδιο 1087 MW, συγκεκριμένα το 1.5% του συνόλου [56]. Στοιχεία δείχνουν ότι στην Ελλάδα μέχρι εκείνη την χρονιά είχαν εγκατασταθεί 1028 ανεμογεννήτριες και το πλήθος τους είχε οριστεί να φτάσει πριν από το τέλος του 2010 τις 2587 ανεμογεννήτριες με την ισχύ να ανέρχεται στις 3372 MW, αύξηση περίπου 350% σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος [55]. Σύμφωνα με το Ελληνικό Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, ο τότε στόχος ήταν 6500 - 8500 MW εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας με μέση ετήσια αύξηση μεταξύ 460 - 626 MW. Σύμφωνα με στοιχεία που παρέχονται από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, η χώρα μας εγκατέστησε 727 MW αιολικής ισχύος το 2019, παρουσιάζοντας μια εντυπωσιακή συνολική αύξηση κατά 230% σε διάστημα 10 ετών, αν και δεν πέτυχε τον αριθμό που δήλωσε το 2009 [55]. Στο παρακάτω Σχήμα 2.5, παρουσιάζεται σε ποιες περιοχές της Ελλάδας είχαν εγκατασταθεί οι ανεμογεννήτριες μέχρι το 2019. Σύμφωνα με στοιχεία που δημοσιεύονται στη ιστοσελίδα της ελληνικής επιστημονικής ένωσης αιολικής ενέργειας [57], για την 10^η Οκτωβρίου 2023 η ημερήσια παραγωγή αιολικής ενέργειας ήταν 15.8 GWh, 13.4% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι πριν ξεκινήσει η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου ή άλλης εγκατάστασης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πραγματοποιείται Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ). Στην νομοθεσία αναφέρεται ότι για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η επιβάρυνση που θα προκληθεί στο περιβάλλον καθώς θα πρέπει να αφαιρεθούν δέντρα και θα αλλοιωθεί το ανάγλυφο της περιοχής.



Σχήμα 2.5. εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας ανά περιοχή στην Ελλάδα (2019) [55].

Γενικά, η αξιοποίηση του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρισμού παρουσιάζει ελάχιστες επιπτώσεις (αναλύονται σε παρακάτω ενότητα). Κατά την λειτουργία της, μια ανεμογεννήτρια έχει περιορισμένες εκπομπές και φέρει μικρό ανθρακικό αποτύπωμα στο περιβάλλον.



Σχήμα 2.6. Εγκατεστημένα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα [57].

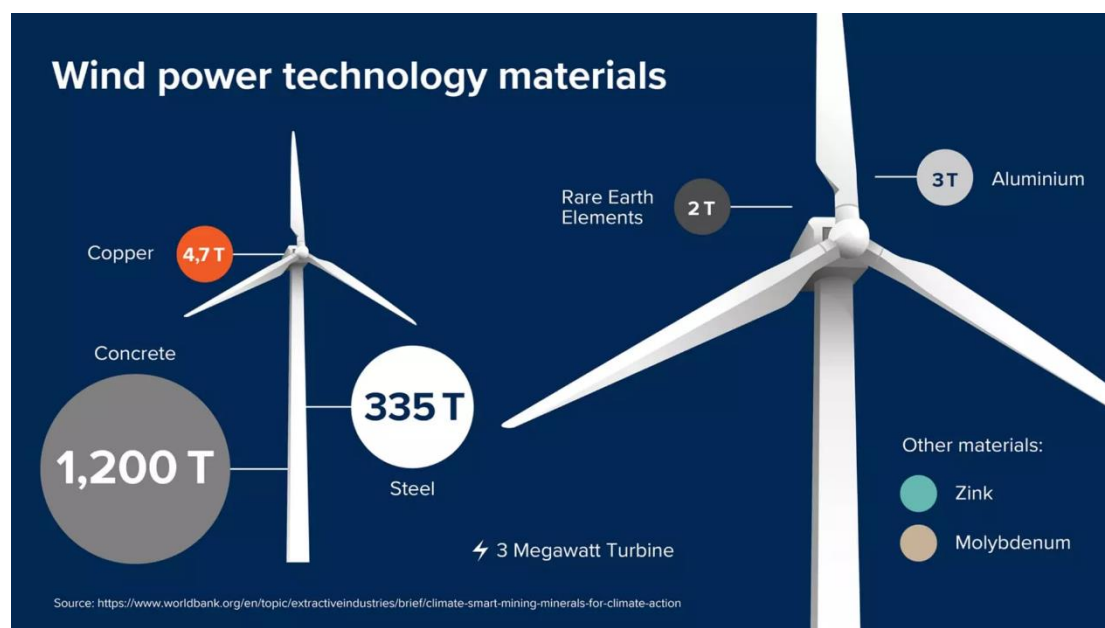
Οι κύριες επιπτώσεις παρουσιάζονται κατά την κατασκευή της ανεμογεννήτριας, λόγω της εξόρυξης και χρήσης πρώτων υλικών και των ενεργειακών καταναλώσεων που σχετίζονται με αυτές τις διεργασίες. Η Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας σε μελέτη που δημοσίευσε αναφέρει ότι μια ανεμογεννήτρια παρουσιάζει θετικό περιβαλλοντικό και ενεργειακό ισοζύγιο.

Για την κατασκευή, την εγκατάσταση, την λειτουργία, απαιτούνται ποσά ενέργειας τα οποία αντισταθμίζονται μέσα στον πρώτο χρόνο λειτουργίας της. Έχει αποδειχθεί ότι συνολικά, κατά τον χρόνο ζωής της, μία ανεμογεννήτρια θα παράγει έως και 50 φορές περισσότερη ενέργεια από αυτή που καταναλώθηκε για την λειτουργία της [57]. Επιπλέον, γίνεται συζήτηση για την επαναχρησιμοποίηση των υλικών μιας ανεμογεννήτριας στο τέλος ζωής της, δεδομένου ότι πολλά υλικά κατασκευής της δεν είναι ανακυκλώσιμα και απορρίπτονται.

2.7. Σπάνιες γαίες για αιολική ενέργεια

Τα μέταλλα των σπάνιων γαιών διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και στην προώθηση της τεχνολογίας της αιολικής ενέργειας. Στα στοιχεία αυτά βρίσκονται το Ce^{4+} , La^{3+} , Pr^{3+} , Y^{3+} και άλλα.

Η σημαντικότερη εφαρμογή των σπάνιων γαιών στην ανεμογεννήτρια είναι για την παραγωγή ισχυρών μόνιμων μαγνητών. Το μέταλλο του νεοδυμίου (Nd) και το μέταλλο του δυσπρόσιου (Dy) είναι δύο σπάνιες γαίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μαγνητών νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB). Αυτοί οι μαγνήτες για τη δημιουργία αποδοτικών και ισχυρών μαγνητικών πεδίων, τα οποία επιτρέπουν την υψηλής απόδοσης μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια ισχύος 3 MW χρησιμοποιεί ένα μαγνήτη που περιέχει σπάνιες γαίες βάρους σχεδόν 2 τόνων [58]. Επιπλέον, οι μαγνήτες που κατασκευάζονται με σπάνιες γαίες έχουν υψηλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση και απομαγνητοποίηση.



Σχήμα 2.7. Υλικά από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια ισχύος 3 MW [59].

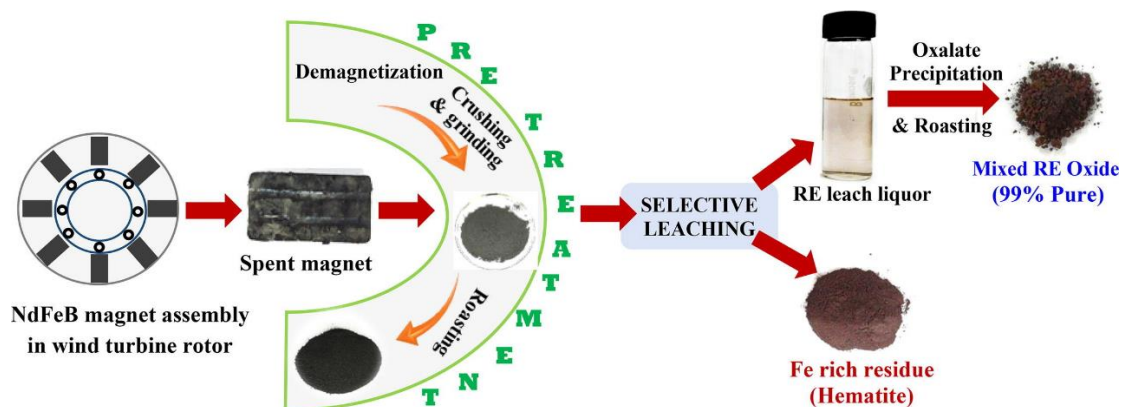
Η παραγωγή των σπάνιων γαιών γίνεται σε λίγες χώρες, με κυρίαρχη χώρα παραγωγής την Κίνα. Η συγκέντρωση της παραγωγής σε ορισμένα σημεία του πλανήτη μπορεί να προκαλέσει ζητήματα στην αλυσίδα εφοδιασμού, επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητα και την αύξηση κόστους για την κατασκευή ανεμογεννήτριας και των περιφερειακών της.

Είναι σημαντικό επίσης να τονιστεί, ότι η διαδικασία παραγωγής σπάνιων γαιών παρουσιάζει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προκαλώντας ανησυχίες για τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας.

2.8. Επαναχρησιμοποίηση των σπάνιων γαιών

Η ανακύκλωση των σπάνιων γαιών που αξιοποιούνται στην κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας είναι ένας αναδυόμενος και πολύ σημαντικός τομέας λόγω της συνεχιζόμενα αυξανόμενης ζήτησης για εγκατάσταση ανεμογεννητριών και των περιβαλλοντικών ανησυχιών που συνδέονται με την εξόρυξη των σπάνιων γαιών.

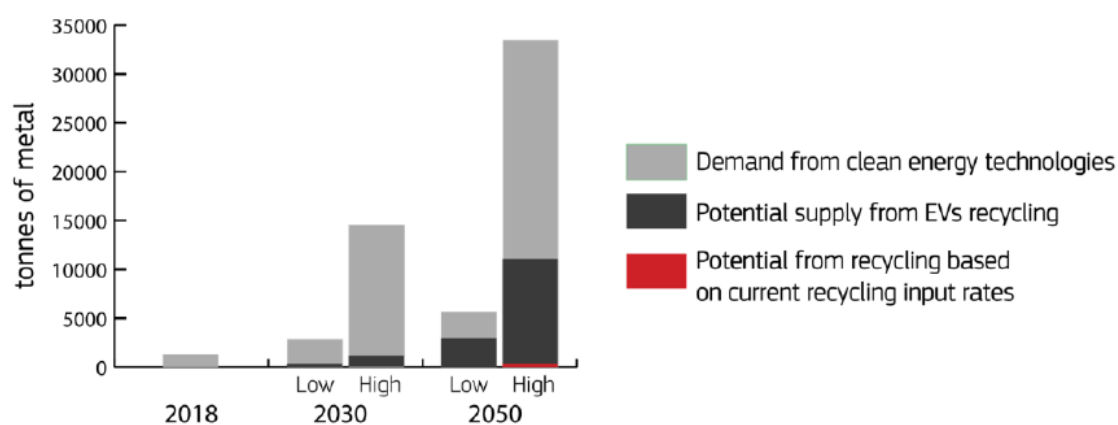
Η ανακύκλωση σπάνιων γαιών από ανεμογεννήτριες περιλαμβάνει την αποσυναρμολόγηση, την απομόνωση των εξαρτημάτων που περιέχουν τους μαγνήτες (συνήθως τη γεννήτρια) και στη συνέχεια την εφαρμογή για την εξαγωγή και τον καθαρισμό των στοιχείων σπάνιων γαιών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [60], η ανακύκλωση NdFeB γίνεται μέσω πυρο-υδρομεταλλουργικής διεργασίας για την ανάκτηση στοιχείων όπως Nd, Pr και Dy.. Κατά την διεργασία αρχικά ο χρησιμοποιημένος μαγνήτης απομαγνητίζεται και θερμαίνεται στους 1123K για να μετατραπουν οι σπάνιες γαίες και ο σίδηρος στα αντίστοιχα οξειδιά τους. Ακολουθεί υδρομεταλλουργική μέθοδος για την ανάκτηση των σπάνιων γαιών και την παραγωγή καθαρού αιματίτη (Fe_2O_3) ως υπόλειμμα, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως χρωστική ουσία ή και σε άλλες εφαρμογές. Από τη συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να παραχθεί μεικτό οξείδιο σπάνιων γαιών καθαρότητας 99%.



Σχήμα 2.8. Ανάκτηση σπάνιων γαιών από χρησιμοποιημένους μαγνήτες NdFeB της ανεμογεννήτριας.

Η ανακύκλωση στοιχείων σπάνιων γαιών από ανεμογεννήτριες αποτελεί προαπαίτηση για τη μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όχι μόνο συμβάλλει στη διασφάλιση μιας πιο βιώσιμης αλυσίδας εφοδιασμού για αυτά τα κρίσιμα υλικά, αλλά συμβάλλει επίσης στη μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον από την βιομηχανία παραγωγής συστημάτων αιολικής ενέργειας.

Μακροπρόθεσμα, η ανακύκλωση θα μπορούσε να καλύψει έως και το ήμισυ της ζήτησης για σπάνιες γαίες για ηλεκτρικούς κινητήρες και σχεδόν το ένα τρίτο της ζήτησης για τις πράσινες τεχνολογίες. Ωστόσο αυτό θα επιτευχθεί μακροπρόθεσμα εφόσον βελτιωθούν σημαντικά οι αποδόσεις κατά την ανακύκλωση (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9. Πρόβλεψη ζήτησης για νεοδύμιο, πρασεοδύμιο και δυσπρόσιο για τεχνολογίες καθαρής ενέργειας σε σύγκριση με τη δυνητική προσφορά από την ανακύκλωση σπάνιων γαιών από ηλεκτρικά οχήματα [61].

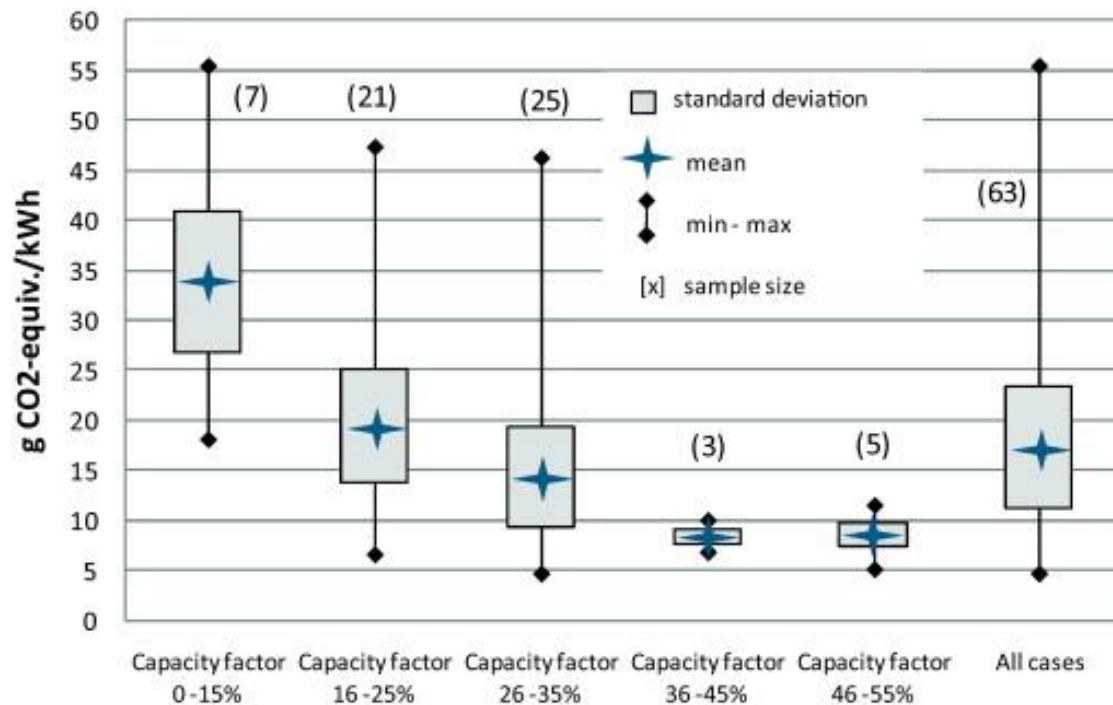
2.9. Βιβλιογραφική ανασκόπηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενεργειακών τεχνολογιών

Οι μελέτες για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ενεργειακά συστήματα ποικίλουν. Για παράδειγμα σε δημοσιευμένη μελέτη [62] για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κονιοτροποιημένο άνθρακα υπολογίστηκαν εκπομπές CO₂ από 751 g CO₂ eq./kWh (IGCC, ΗΠΑ) και έως 1095 g CO₂ eq./kWh. Επιπρόσθετα η μελέτη αναφέρει ότι στην περίπτωση που το εργοστάσιο έχει εξοπλιστεί με σύστημα δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂, η τιμή εκπομπών του CO₂ παρουσιάζεται μειωμένη. Πιο αναλυτικά, για τη συγκεκριμένη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρονται τιμές μεταξύ 147 - 469 g CO₂ eq./kWh. Συγκρίνοντας τις τιμές

εκπομπών CO₂ με άλλες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου καύσης φυσικού αερίου για παραγωγή ρεύματος μπορεί να εκπέμπει ποσότητες CO₂ μεταξύ 403 - 513 g CO₂ eq./kWh και μεταξύ 49 και 220 g CO₂ eq./kWh αν εφαρμόζονται τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂. Τόσο τα μοντέλα άνθρακα όσο και του φυσικού αερίου περιλαμβάνουν διαρροή μεθανίου στις φάσεις εξόρυξης και μεταφοράς (για αέριο). Ωστόσο, η άμεση καύση του υδρογονάνθρακα κυριαρχεί στην ανάλυση κύκλου ζωής των εκπομπών GHG.

Αντίθετα, οι εκπομπές CO₂ για αιολικά πάρκα σε χερσαίες περιοχές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνονται μεταξύ 7.8 και 16 g CO₂ eq./kWh, ενώ για υπεράκτια αιολικά πάρκα κυμαίνονται μεταξύ 12 και 23 g CO₂ eq./kWh. Οι περισσότερες εκπομπές GHG των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προέρχονται από την παραγωγή τους (για τα φωτοβολταϊκά πάρκα ενσωματώνονται μέχρι και το 99%), γεγονός που υποδηλώνει τις επιπτώσεις του κύκλου ζωής κατά την παραγωγή και ειδικότερα της χρήσης πρώτων υλών και του μείγματος ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή [62].

Οι H.L. Raadal et al. [63] παρουσίασαν και σύγκριναν βιβλιογραφικά αποτελέσματα αναφορικά με μελέτες AKZ σε διάφορες τεχνολογίες. Συγκεκριμένα, στην εργασία τους παρουσιάζουν το παρακάτω Σχήμα 2.10 και αναφέρουν ότι η διακύμανση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην αιολική ενέργεια κυμαίνονται μεταξύ 4.6 g CO₂ eq./kWh έως 55.4 g CO₂ eq./kWh. Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές αφορούν τουρμπίνες 3 MW και 30 kW, αντίστοιχα. Ένα πολύ σημαντικό εύρημα είναι ότι καθώς αυξάνεται η ισχύς της τουρμπίνας μειώνεται το αποτύπωμά της στο περιβάλλον. Ανέφεραν επίσης ότι οι μικρές ανεμογεννήτριες 1 kW απαιτούν περίπου τρεις φορές περισσότερη ενέργεια στον κύκλο ζωής ανά μονάδα ισχύος από τις μεγάλες ανεμογεννήτριες ισχύος 1 MW.



Σχήμα 2.10. Παρουσίαση αποτελεσμάτων LCA αερίων του θερμοκηπίου από αιολική ενέργεια [63].

Οι συγγραφείς Li H. et. al [64], πραγματοποίησαν συγκριτική αξιολόγηση για τις επιπτώσεις στο περιβάλλον από την αιολική ενέργεια και από μονάδες που παράγουν ενέργεια χρησιμοποιώντας ως καύσιμο τον άνθρακα. Στη δημοσιευμένη εργασία παραθέτουν αναλυτικά στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. και αναφέρουν ότι όλες οι εκπομπές (εξαιρουμένης των εκπεμπόμενων μικροσωματιδίων) που παράγονται από την αιολική ενέργεια κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της μονάδας παραγωγής είναι σημαντικά λιγότερες από τις εκπομπές που παράγονται από την διαδικασία παραγωγής ενέργειας μέσω καύσης του άνθρακα. Οι συγγραφείς συγκρίνοντας τις τεχνολογίες αναφέρουν ότι η αιολική ενέργεια μειώνει τις εκπομπές CO₂, SO₂, NO_x και CO κατά 744.5 g/kWh, 5.9 g/kWh, 2.84 g/kWh και 0.14 g/kWh αντίστοιχα. Για 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, οι εκπομπές CO₂ από τον άνθρακα είναι 25 φορές περισσότερες από αυτές της αιολικής ενέργειας. Παρόλο που η αιολική ενέργεια είναι αποτελεσματική στον περιορισμό του CO₂, οι εκπομπές μικροσωματιδίων είναι μεγαλύτερες από αυτές του άνθρακα (0.06 g/kWh). Το αποτέλεσμα σύμφωνα με τους συγγραφείς μπορεί να αποδοθεί στο είδος της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την διαδικασία κατασκευής των ανεμογεννητριών (ανανεώσιμες ή συμβατές πηγές). Όπως φαίνεται και στα στοιχεία του Πίνακα 3.1. και

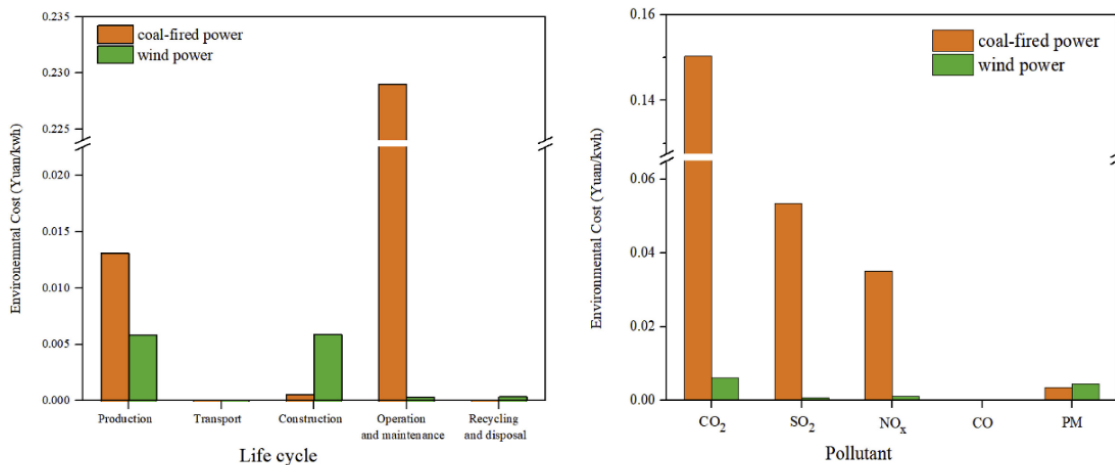
του Σχήματος 2.12, όσον αφορά την ποσότητα των εκπομπών CO₂, οι τιμές διαφέρουν σημαντικά για την αιολική ενέργεια και την ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των μονάδων. Για την αιολική ενέργεια, η μεγαλύτερη ποσότητα ρύπων συγκεντρώνεται στο στάδιο παραγωγής και κατασκευής, ενώ για την τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα η παραγωγή των ρύπων βρίσκεται στο στάδιο λειτουργίας και συντήρησης.

Πίνακας 3.1. Εκπομπές ρύπων ανά kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα και ατμοηλεκτρικούς σταθμούς (g/kWh).

Σύστημα παραγωγής ενέργειας	Στάδιο κύκλου ζωής	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	PM
Αιολική ενέργεια	Παραγωγή και κατασκευή	23.9694	0.0328	0.0655	0.0324	0.0057
	Μεταφορά	0.2150	0.0011	0.0008	0.0007	0.0004
	Κατασκευή αιολικού πάρκου	4.3092	0.0383	0.0259	0.0032	0.3113
	Λειτουργία και συντήρηση	1.4243	0.0018	0.0041	0.0024	0.0004
	Ανακύκλωση και απόθεση	1.4463	0.0022	0.0039	0.0021	0.0004
Παραγωγή ενέργειας μέσω	Παραγωγή εξοπλισμού	24.6802	0.2348	0.3892	0.0600	0.1034
	Μεταφορά	0.1872	0.0009	0.0007	0.0006	0.0004

καύσης άνθρακα	Κατασκευή μονάδας/ εργοστασίου	0.7191	0.0005	0.0018	0.0290	0.0218
	Λειτουργία και συντήρηση	750.2000	5.7420	2.5520	0.0829	0.1276
	Ανακύκλωση και απόθεση	0.0719	0.0000	0.0002	0.0029	0.0022
	Σύνολο	775.86	5.98	2.94	0.18	0.26

Τα παραπάνω δεδομένα αποτυπώνονται και στο παρακάτω συγκριτικό Σχήμα 2.12.



(a) Comparison of environmental costs between wind and coal power from life cycle perspective

(b) Comparison of environmental costs between wind and coal power from pollutant perspective

Σχήμα 2.12. Σύγκριση του περιβαλλοντικού κόστους μεταξύ αιολικής ενέργειας και ενέργειας από άνθρακα συγκρίνοντας τον τρόπο ρύπανσης (α), και το είδος του ρύπου (β).

Όπως έχει αναφερθεί και σε άλλα σημεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι τεχνολογίες CCS (Carbon Capture and Storage) έχουν την δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [65-68], από αναλύσεις AKZ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση τεχνολογία CCS χρησιμοποιώντας ορυκτά καύσιμα, οι τιμές του CO₂

κυμαίνονται μεταξύ 70 και 190 g CO₂-eq./kWh. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές, φαίνεται πως τείνουν να πλησιάσουν τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την ανάλυση των επιπτώσεων των αιολικών πάρκων. Συγκριμένα, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την αιολική ενέργεια είναι μεταξύ 10 έως 55 g CO₂-eq./kWh και των φωτοβολταϊκών πάρκων με 50 έως 90 g CO₂-eq./kWh. Συνεπώς, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες μεγάλης κλίμακας με χρήση λιγνίτη, η χρήση μονάδων αντιρύπανσης με τεχνολογία CCS θα μπορούσε να συνεισφέρει σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος.

Κεφάλαιο 3^ο

Μεθοδολογία ανάλυσης κύκλου ζωής

3.1. Εισαγωγή

Η μέθοδος της ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ) προϊόντων και υπηρεσιών παρέχει τη δυνατότητα μιας ουσιαστικής, ολιστικής και συστηματικής ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ολόκληρη την αξιακή τους αλυσίδα [69-74]. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η AKZ διαδραμάτισε και αναμένεται να συνεχίσει να διαδραματίζει ακόμη πιο κρίσιμο ρόλο σε πέντε τομείς εφαρμογής [72]:

- i. Στην κατανόηση των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων.
- ii. Στη βελτίωση των υφιστάμενων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων.
- iii. Στη σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογιών ή επιδόσεων τεχνολογίας.
- iv. Στην τεχνολογική ανάπτυξη.
- v. Στην ανάπτυξη πολιτικών για την προστασία του περιβάλλοντος

Η εφαρμογή των μοντέλων AKZ μέσω της συνεχής μελέτης θα πρέπει να βελτιωθεί και να συνεχίσει να εξελίσσεται με σκοπό να αντιμετωπίσει τις θεμελιώδεις αλλαγές των διεργασιών και μετασχηματισμούς προϊόντων για την προστασία του περιβάλλοντος, όπως οι νέοι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για κλιματική ουδετερότητα μέχρι το έτος 2050 [76,77]. Οι βασικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η μείωση των αποβλήτων, η αύξηση του ποσοστού ανάκτησης των πρώτων υλών μέσω καινοτόμων διεργασιών και ο έλεγχος των εκπομπών, ακόμα και η αξιοποίηση

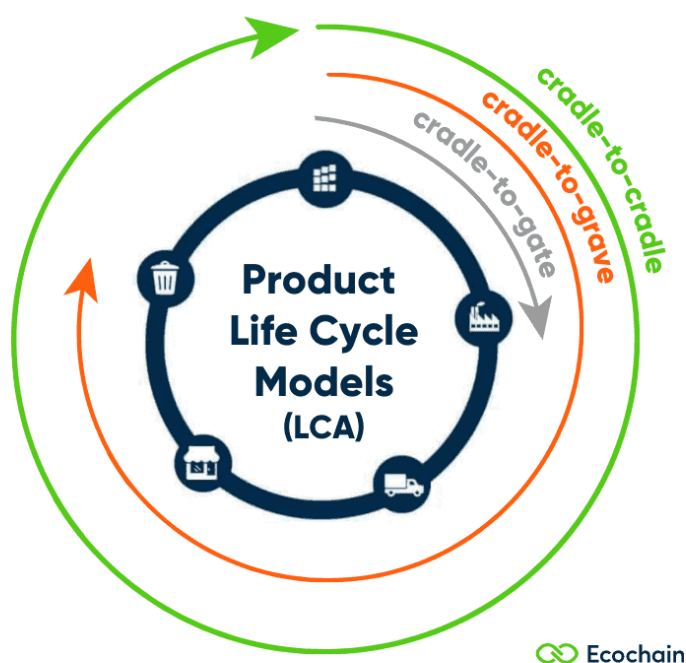
εκπομπών για την παραγωγή προϊόντων αυξημένης προστιθέμενης αξίας (π.χ. διεργασία υδρογόνωσης του CO₂) [78-80]. Γενικά, φαίνεται ότι αυτές οι νέες απαιτήσεις θα οδηγήσουν σε περαιτέρω μετασχηματισμό των τεχνολογιών, των συστημάτων και των στόχων που σχετίζονται με τα υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων και ρύπων.

Η μεθοδολογία της AKZ δύναται να αξιολογήσει τις επιπτώσεις πολλαπλών ρευμάτων αποβλήτων, των μειγμάτων τεχνολογιών για την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας και της εφαρμογής νέων τεχνολογιών. Με την αυξανόμενη ανάγκη μεγάλων επενδύσεων φιλικότερων προς το περιβάλλον, η AKZ είναι σε θέση να αξιολογεί τις βέλτιστες λύσεις που θα καλύπτουν τις μελλοντικές κοινωνικές ανάγκες παράλληλα με την κατάργηση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων. Ακόμα, η AKZ έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην προώθηση του λιγνίτη μέσω βελτιστοποίησης των τεχνολογιών όπως η διεργασία της πυρόλυσης, η αεριοποίηση και η ξήρανση [81-86], δεδομένου ότι είναι εξαιρετικά σημαντικός ο ποσοτικός προσδιορισμός των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων και ο εντοπισμός των βασικών παραγόντων για τη βελτίωση της διεργασίας.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης του λιγνίτη έχουν μελετηθεί εκτενώς μέσω AKZ [87-89]. Ο Volkart και οι συνεργάτες του [87] αναφέρουν στην δημοσίευσή τους μελέτη AKZ που συγκρίνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας λιγνίτη, λιθάνθρακα, φυσικό αέριο και ξύλο σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνδυασμένου κύκλου ολοκληρωμένης αεριοποίησης, για την Ευρώπη του 2025 και μια εκτίμηση για το 2050 με ή και χωρίς διεργασία CCS. Ο Çetinkaya και οι συνεργάτες του [88] ανέλυσαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ατμού μέσω της χρήσης λιγνίτη στην Τουρκία. Επιπλέον ο Skodras και οι συνεργάτες του [89] αξιολόγησαν την περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλείται από την ταυτόχρονη αξιοποίηση υπολειμμάτων ξύλου και ποσότητας λιγνίτη σε βιομηχανικούς λέβητες, ενώ οι Theodosiou και οι συνεργάτες του [90] και ο Georgakellos [91,92] ποσοτικοποίησαν τις επιπτώσεις στο περιβάλλον που δημιουργούνται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα.

Για την κατανόηση του όρου «Ανάλυση Κύκλου Ζωής» και των σταδίων που λαμβάνουν χώρα κατά τον κύκλο ζωής ενός νέου προϊόντος ή μιας διαδικασίας – ενέργειας, παρατίθεται το παρακάτω Σχήμα 3.1. Η προσέγγιση κάθε AKZ δίνει

εναλλακτικές επιλογές, όπως gate-to-gate, cradle-to-gate, cradle-to-grave, και cradle-to-cradle [93]. Η ανάλυση “cradle-to-grave” δηλαδή «από τη γέννηση στο θάνατο» ενός προϊόντος ορίζεται ως η πλήρης αξιολόγηση του κύκλου ζωής από την εξαγωγή των πρώτων υλών, μέχρι τη χρήση τους και την τελική απόρριψη ενός προϊόντος, ενσωματώνοντας όλα τα στάδια κύκλου ζωής (παραγωγή, χρήση, τέλος ζωής). Μεγάλο κομμάτι των μελετών LCA παραδοσιακά πραγματοποιείται με αυτήν την προσέγγιση. Μία άλλη προσέγγιση είναι το “cradle-to-gate” δηλαδή «από τη γέννηση στην πύλη» στην οποία εξαιρούνται οι διαδικασίες της διανομής, της χρήσης και της απόρριψης.



Σχήμα 3.1. Διαφορετικά μοντέλα κύκλου ζωής.

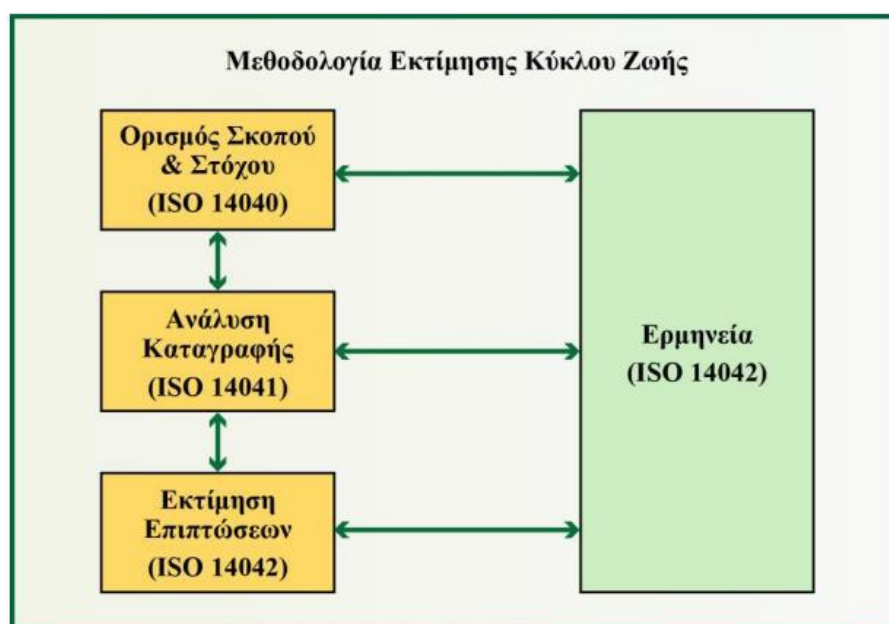
Στο μοντέλο AKZ “gate-to-gate”, δηλαδή «από την πύλη στην πύλη», σκοπός είναι να αξιολογήσει ο χρήστης ένα μόνο στάδιο στον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, όπως η παραγωγή ή η διαχείριση του προϊόντος στο τέλος της ζωής του ή το στάδιο διαχείρισης των αποβλήτων. Στο μοντέλο cradle-to-cradle δηλαδή από τη γέννηση στη γέννηση, πραγματοποιείται μια παραλλαγή του μοντέλου “cradle-to-grave”, αντικαθιστώντας το στάδιο της τελικής απόρριψης με επαναχρησιμοποίηση μέσω ανακύκλωσης των υλικών [94,95].

3.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής – Πρότυπα ISO

Για πολλά χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές προσπάθειες με στόχο την αντικειμενικότερη προσέγγιση του μεθοδολογικού πλαισίου της ΑΚΖ, οδηγώντας στη δημιουργία πολλών διαφορετικών κατευθυντήριων γραμμών. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης ISO (International Standardization Organization), έχει δημιουργηθεί μια σειρά προτύπων ISO για την ανάλυση ΑΚΖ, γνωστή ως σειρά ISO 14040 (περιλαμβάνοντας τα ISO 14040, 14041, 14042, 24043). Η εν λόγω σειρά προσφέρει μια λεπτομερή περιγραφή μέσω της ανάπτυξης ενός συγκεκριμένου μεθοδολογικού πλαισίου. Η διαδικασία ΑΚΖ είναι μια συστηματική, σταδιακή προσέγγιση, χωρισμένη σε τέσσερις συνιστώσες [96].

- i. Καθορισμός σκοπού και αντικείμενου της μελέτης (Goal and scope definition - ISO 14040)
- ii. Απογραφή δεδομένων (LCI, Life Cycle Inventory – ISO 14041)
- iii. Εκτίμηση των επιπτώσεων (LCIA, Life Cycle Impact Assessment – ISO 14042)
- iv. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation – ISO 14042)

Το συγκεκριμένο μεθοδολογικό πλαίσιο απεικονίζεται επίσης στο παρακάτω Σχήμα 3.2.).



Σχήμα 3.2. Μεθοδολογία ανάλυσης του κύκλου Ζωής [97].

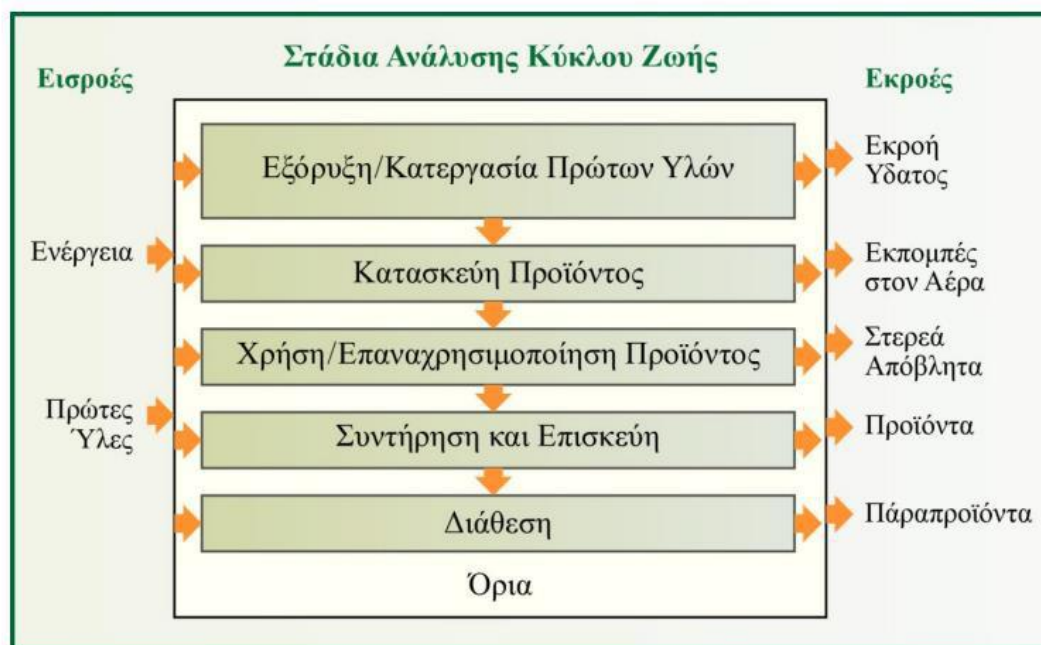
3.3. Ορισμός του σκοπού και του στόχου μιας AKZ

Η καθοριστική φάση στη μεθοδολογία AKZ είναι ο καθορισμός του στόχου και του σκοπού. Αυτή η διαδικασία αποτελεί το αρχικό βήμα κατά την ανάλυση σε ένα προϊόν, μια διαδικασία ή σε μια δραστηριότητα και έχει κρίσιμη σημασία για την επιτυχία της μελέτης. Αρχικά, ο στόχος και ο σκοπός αξιολογούνται συνεχώς, αναθεωρούνται και βελτιώνονται σε όλη τη διάρκεια της μελέτης AKZ βάσει των νέων πληροφοριών που συσσωρεύονται. Κατά τον καθορισμό του σκοπού, καθορίζονται όλες οι πτυχές που περιλαμβάνονται στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής, καθώς και ο τύπος μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί. Τονίζεται ότι ο στόχος της μελέτης καθορίζει ακριβώς την επιθυμητή εφαρμογή της, ενσωματώνοντας τα αίτια της μελέτης, του πλήθους των ενδιαφερομένων και των χρηστών που θα αξιοποιήσουν τα αποτελέσματα. Η λειτουργική μονάδα, ως μονάδα αναφοράς, καθορίζει την κλίμακα για την μετρήσιμη σύγκριση των προϊόντων, ενώ τα όρια συστήματος καθορίζουν τις συγκεκριμένες διεργασίες και λειτουργίες που θα ληφθούν υπόψη. Είναι κρίσιμη η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, καθώς επηρεάζει τα αποτελέσματα της μελέτης, ενώ πραγματοποιείται συνεχώς κριτική επισκόπηση για την επιβεβαίωση της ποιότητας της μεθόδου AKZ [98,99].

3.4. Ανάλυση της καταγραφής των δεδομένων του συστήματος (Life Cycle Inventory, LCI)

Η δεύτερη φάση της μεθοδολογίας είναι η ανάλυση και η απογραφή όλων των διαθέσιμων δεδομένων. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, συλλέγονται και επεξεργάζονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα με στόχο την ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών του εκάστοτε συστήματος. Η διαδικασία συλλογής δεδομένων αποτελεί μία από τις πιο χρονοβόρες φάσεις της μελέτης AKZ, καθώς η ακριβής και συνεκτική συγκέντρωση δεδομένων είναι καθοριστική για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, στο στάδιο αυτό προσδιορίζονται τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής, τα οποία αναδεικνύονται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 3.3.). Τα εν λόγω στάδια περιλαμβάνουν την απόκτηση/επεξεργασία των πρώτων υλών, τη βιομηχανική επεξεργασία και δημιουργία του προϊόντος, τη χρήση, την ανακύκλωση, και την τελική απόθεσή του. Κατόπιν, πραγματοποιείται η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων για την ακριβή ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών του συστήματος. Οι εισροές περιλαμβάνουν τις πρώτες ύλες και την ενέργεια

που απαιτείται, ενώ οι εκροές περιλαμβάνουν τα προϊόντα, τα στερεά απόβλητα, τους αέριους ρύπους, τα υγρά απόβλητα, και την απόβλητη ενέργεια που απορρίπτεται στο περιβάλλον.



Σχήμα 3.3.: Διάγραμμα ροής δημιουργίας και αξιοποίησης ενός προϊόντος.

Μετά τη συλλογή των δεδομένων, είναι πιθανό να ανακύψει η ανάγκη για επανακαθορισμό των ορίων που είχαν καθοριστεί στο αρχικό στάδιο της μεθοδολογίας. Αυτό μπορεί να συμβεί με την εισαγωγή νέων δεδομένων που αναδεικνύουν την ανάγκη για επανεξέταση ή προσαρμογή των αρχικών παραμέτρων [100]. Στη συνέχεια, τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί κατά τη διάρκεια της ανάλυσης της απογραφής διατίθενται στους ενδιαφερόμενους φορείς για τυχόν αντιρρήσεις/διορθώσεις ή προτάσεις βελτίωσης των δεδομένων [101,102]. Στη συνέχεια, τα τελικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στη μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής συσχετίζονται με την λειτουργική μονάδα που είχε καθοριστεί στο αρχικό στάδιο της μεθοδολογίας (στόχος και σκοπός). Αυτή η συσχέτιση είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση της συνοχής και της επικαιροποίησης των δεδομένων καθ' όλη τη διαδικασία [23,55]. Τέλος, στο πλαίσιο ενός πολύπλοκου συστήματος, η εκτίμηση όλων των δυνατών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συστατικών και των εκροών μπορεί να είναι αδύνατη. Για αυτό τον λόγο, συχνά επιλέγονται μόνο οι σημαντικότερες αλληλεπιδράσεις για περαιτέρω ανάλυση,

ενώ πραγματοποιείται η κατανομή των επιπτώσεων και η εξέταση των δυνατοτήτων ανακύκλωσης εντός των ορίων του συστήματος [101,102].

3.5. Εκτίμηση των επιπτώσεων

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [103-105], η ανάλυση των επιπτώσεων στο περιβάλλον γνωστή και ως "impact assessment," αποτελεί το τρίτο στάδιο στη μεθοδολογία της μελέτης ΑΚΖ. Κατά τη διάρκεια αυτού του τρίτου σταδίου, προσδιορίζονται λεπτομερώς και χαρακτηρίζονται οι επιπτώσεις που προκαλούνται στο περιβάλλον από το υπό εξέταση σύστημα, είτε αυτές χαρακτηρίζονται ως θετικές είτε ως αρνητικές. Για την επιτυχή και αξιόπιστη αξιολόγηση των επιπτώσεων, είναι σημαντικό να έχουν συλλεγεί σωστά τα δεδομένα κατά το στάδιο της απογραφής. Τα στάδια που περιγράφουν τη διαδικασία αυτή είναι τα εξής:

i. Επιλογή της μεθόδου και των κατηγοριών επιπτώσεων:

Προτού προχωρήσουμε στον καθορισμό των κατηγοριών που αναλύονται όσον αφορά τις επιπτώσεις, είναι αναγκαίο να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω δύο βασικών κατηγοριών: ενδιάμεσου (midpoint) ή τελικού σημείου (endpoint). Οι επιπτώσεις που εμπίπτουν στις κατηγορίες ενδιάμεσου σημείου οφείλονται σε διαφορετικές υποκατηγορίες, ενώ αυτές που εμπίπτουν στις κατηγορίες τελικού σημείου κατατάσσονται σε τρία επίπεδα επιδράσεων:

- a. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία
- b. Επιπτώσεις στο οικοσύστημα (ως προς την δομή και την λειτουργία του)
- c. Επιπτώσεις στους φυσικούς πόρους (αφορά την εξάντλησή τους)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί εδώ ότι η μέθοδος ILCD 2011 Midpoint+ είναι η μέθοδος που εφαρμόζεται επίσημα από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τον χαρακτηρισμό του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος ενός Προϊόντος (EUPEF), ενώ οι κατηγορίες που εξετάζει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οι παρακάτω [103-105]:

Κλιματική αλλαγή (Climate change), Καταστροφή του όζοντος (Ozone depletion), Τοξικότητα στον άνθρωπο- καρκινογόνες επιδράσεις (Human toxicity), Τοξικότητα για τον άνθρωπο -μη καρκινογόνες επιδράσεις (Human toxicity), Αιωρούμενα σωματίδια

(Particulate matter), Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionising radiation), Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος (Photochemical ozone formation), Ευτροφισμός - επίγειος (Eutrophication), Ευτροφισμός – υδάτινος (Eutrophication), Οξίνιση (Acidification), Οικοτοξικότητα για καθαρά υδατικά συστήματα (Exotoxicity), Εξάντληση πόρων-νερό (Depletion of sources), Εξάντληση πόρων - ορυκτά, μεταλλεύματα (Depletion of sources), Μετασχηματισμός της γης.

3.6. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Στη ανάλυση των αποτελεσμάτων μιας AKZ μελέτης, ποσοτικοποιούνται, ελέγχονται και αξιολογούνται οι πληροφορίες που προέκυψαν από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκτίμησης των επιπτώσεων. Τα αποτελέσματα της απογραφής των δεδομένων συνοψίζονται ταυτόχρονα και εντοπίζονται οι κύριες ροές και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον που προκύπτουν. Βασιζόμενοι στα συμπεράσματα της ανάλυσης των αποτελεσμάτων, διατυπώνονται προτεινόμενες λύσεις για το εξεταζόμενο σύστημα.

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040:2006, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων υπόκειται σε συγκεκριμένα στάδια:

Ταυτοποίηση:

Καταρχάς, τα αποτελέσματα των σταδίων απογραφής δεδομένων και εκτίμησης επιπτώσεων ταξινομούνται, προκειμένου να εντοπιστούν οι σημαντικότεροι παράγοντες, σύμφωνα με τον ορισμό του στόχου και του αντικειμένου εφαρμογής. Εντοπίζονται οι διεργασίες που συντελούν περισσότερο στην αύξηση των περιβαλλοντικών φορτίων (hot spots).

Αξιολόγηση:

Η αξιολόγηση βασίζεται στο στόχο και το εύρος του αντικειμένου εφαρμογής, καθορισμένα στο πρώτο στάδιο της AKZ. Εδώ αξιολογούνται οι εισροές και οι εκροές, ενώ συνήθως πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων σε περίπτωση αλλαγής των εισόδων.

Έλεγχος και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων:

Πραγματοποιείται έλεγχος συνέπειας και πληρότητας, ανάλυση συμβολής, ανάλυση αποκλίσεων, ανάλυση ευαισθησίας και ανάλυση αβεβαιότητας. Τα αποτελέσματα πρέπει να παρατίθενται σαφώς για να κατανοηθεί η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής.

Συμπεράσματα και Προτάσεις:

Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική μελέτη και βελτιώσεις του περιβαλλοντικού αντικτύπου σε σημεία που υπάρχουν οι μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

Κεφάλαιο 4^ο

Σενάρια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

4.1. Εισαγωγή

Ο στόχος της τρέχουσας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ) είναι να αναλύσει την περιβαλλοντική επίδοση των τεχνολογιών CCS κατά την εφαρμογή σε μονάδες παραγωγής με καύση λιγνίτη, καθώς και η πρόβλεψη της μείωσης των εκπομπών CO₂. Παράλληλα, για λόγους σύγκρισης, εκτιμήθηκε και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αιολικών πάρκων.

Παρακάτω αποτυπώνονται λεπτομερώς τα σενάρια που εξετάζονται στην μελέτη, συγκεκριμένα:

1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδα λιγνίτη
2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα
3. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδα λιγνίτη, δέσμευση και υπόγεια αποθήκευση του παραγόμενου CO₂.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η δέσμευση του CO₂ και οι τεχνολογίες αποθήκευσης (CCS) σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια καινοτόμα επιλογή που μπορεί να μειώσει δραστικά τις εκπομπές CO₂.

Επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι η απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία της μονάδας δέσμευσης CO₂ στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας μειώνει το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδεται στο δίκτυο κατά 30%. (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Ενδεικτικές τιμές μέσης θερμικής απόδοσης της μονάδας και νέα απόδοση μετά την εγκατάσταση ενός CCS για διαφορετικούς τύπους καυσίμων [106].

Καύσιμο	Θερμική απόδοση εγκατάστασης	
	χωρίς CCS	με CCS
Όλες οι εγκαταστάσεις	46%	35%
Εγκαταστάσεις λιγνίτη	46%	32%

Επιπλέον, η κατανάλωση υλών κατά τη διάρκεια λειτουργίας του CCS συστήματος, περιλαμβάνει τη χρήση αμίνης. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη οι υποδομές και η κατανάλωση ενέργειας για τη μεταφορά CO₂ από τον σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στον χώρο αποθήκευσης και συγκεκριμένα στους υδροφόρους του Θερμαϊκού κόλπου [107,108].

Σε αυτή την ενότητα λαμβάνει χώρα λεπτομερής καταγραφή του σεναρίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση λιγνίτη και δέσμευση του CO₂, με σκοπό τη μοντελοποίηση ενός θερμοηλεκτρικού σταθμού που στηρίζεται σε δεδομένα για την νέα μονάδα V της ΔΕΗ στην Πτολεμαΐδα [109], με λειτουργική μονάδα την 1 MWhe. Σημειώνεται εδώ ότι για τη μοντελοποίηση (πίνακας 4.2) λαμβάνεται υπόψη η ενέργεια που τελικά παραδόθηκε στο δίκτυο. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [110], η απόδοση διαχωρισμού CO₂ εξαρτάται απ' τη τεχνολογία με τιμή απόδοσης 90% με την χρήση αμίνων. Δημοσιευμένη μελέτη αναφέρει ότι η απαίτηση ενέργειας είναι 396 MJ ηλεκτρικής ενέργειας / tn CO₂ που απομακρύνεται με απόδοση διαχωρισμού 90% [111].

Πίνακας 4.2: Βασικές παράμετροι λειτουργίας της νέας μονάδας Πτολεμαΐδα V [109].

Ονομαστική ισχύς (MWe)	660
Καθαρά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (MWe)	615.7
Καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)	41.5
Μέσος βαθμός απόδοσης ηλεκτροστατικών φίλτρων (ESP) (%)	99.3
Βαθμός απόδοσης αποθείωσης καυσαερίων (FGD) (%)	98
Βαθμός απόδοσης συστήματος δέσμευσης CO ₂ (%)	90
Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h)	7800
Έτη ωφέλιμης ζωής (y)	40

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ο μέσος βαθμός απόδοσης ηλεκτροστατικών φίλτρων (ESP) (%) και ο βαθμός απόδοσης από την διεργασία αποθείωσης των καυσαερίων (FGD) (%) έχουν εκτιμηθεί στην διπλωματική εργασία του Γιώργου Σταματίου [110].

4.2. Όρια συστήματος ανάλυσης κύκλου ζωής

Όπως περιεγράφηκε και πιο πάνω, τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν τις φάσεις, όπως η εξόρυξη και μεταφορά του καυσίμου (λιγνίτης) προς την μονάδα καύσης του, η χρήση του καυσίμου στη μονάδα παραγωγής, η δέσμευση του CO₂, η μεταφορά και η αποθήκευση του CO₂. Το παρακάτω Σχήμα 4.1 παρουσιάζει με λεπτομέρεια τα όρια του συστήματος της μελέτης AKZ και για τα τρία σενάρια στο πλαίσιο της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας.

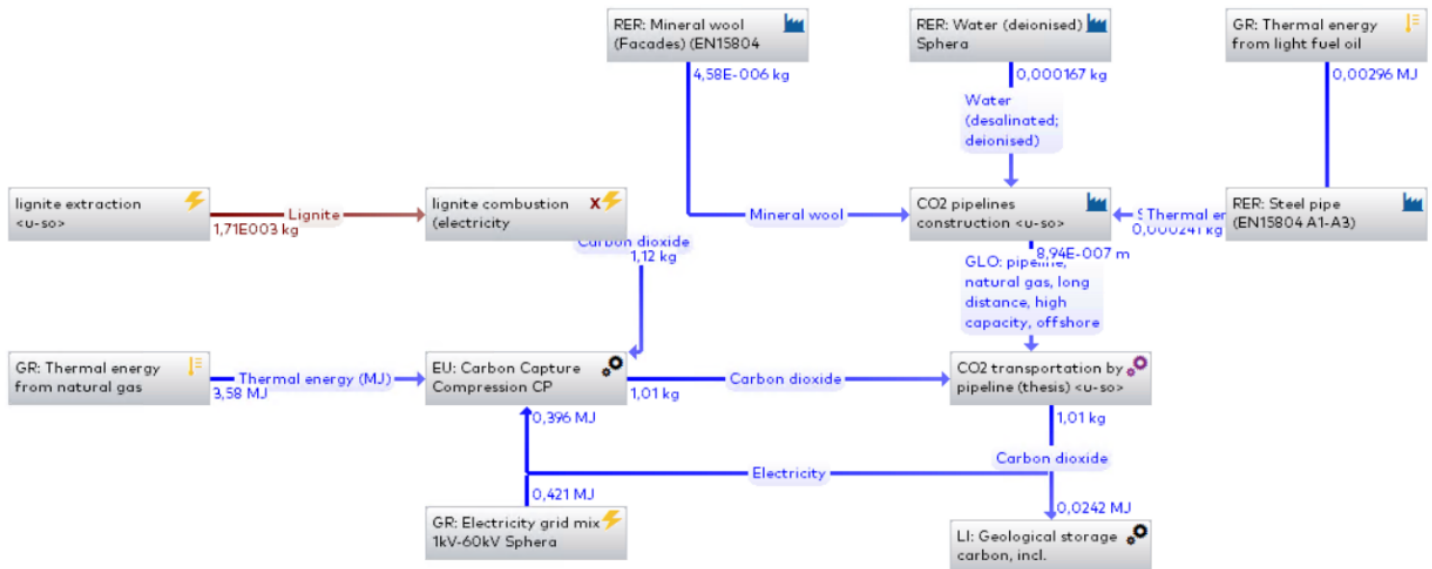
Παραγωγή ηλεκτρισμού από Λιγνίτη (Σενάριο 1)



Παραγωγή ηλεκτρισμού από Αιολικά (Σενάριο 2)



Παραγωγή ηλεκτρισμού από Λιγνίτη και υπόγεια αποθήκευση CO₂ (Σενάριο 3)



Σχήμα 4.1. Λεπτομερής αποτύπωση σεναρίων του συστήματος της μελέτης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για την αξιοποίηση του λιγνίτη για παραγωγή ενέργειας χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος.

4.3. Περιγραφή διεργασιών/απογραφή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Εξόρυξη και καύση λιγνίτη

Το αρχικό στάδιο περιλαμβάνει την εκχέρσωση-αφαίρεση των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους, στη συνέχεια γεώτρηση και ανατίναξη των αγόνων εδαφών, έπειτα οι διατρήσεις και η ανατίναξη του κοιτάσματος του λιγνίτη. Σε επόμενο στάδιο λαμβάνει χώρα η αφαίρεση-εξόρυξη των υπερκειμένων και μεταφορά τους, η εξόρυξη του λιγνιτικού κοιτάσματος και η μεταφορά του στους χώρους απόθεσης και τέλος η περιβαλλοντική αποκατάσταση.

Τα μεγάλα μεγέθη του ρυθμού εκσκαφής, σχετίζονται με την απαίτηση για υψηλή παραγωγικότητα στα λιγνιτωρυχεία [112]. Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι εκτός από τον σταθερό εξοπλισμό που λειτουργεί συνεχώς, χρησιμοποιείται επίσης ένας μεγάλο πλήθος δευτερευόντων οχημάτων και μηχανημάτων που χρησιμοποιούν πετρέλαιο.

Στους παρακάτω πίνακες 4.3 και 4.4 παρουσιάζεται το είδος και η δυναμική των κυριότερων χωματουργικών οχημάτων που χρησιμοποιούνται σε ένα λιγνιτωρυχείο. Επιπρόσθετα στον Πίνακα 4.4. παρουσιάζονται και οι τιμές εισροών/εκροών που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του συστήματος.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά βαρέως εξοπλισμού ορυχείων [110].

Τύπος μηχανήματος	Δυναμικότητα (m ³ /h)	Ηλεκτρική ισχύς (kWe)
Καδοφόρος εκσκαφέας	600-10.000	160-3.800
Εκσκαφέας με συρόμενο κάδο	1.350-1.800	1.500-4.500
Ηλεκτροκίνητο πτύο	425-900	1.000-2.200
Ταινιόδρομος	Ανάλογα με το φορτίο που μεταφέρεται	
Αποθέτης	600-10.000	160-3.800

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά έκτακτου εξοπλισμού ορυχείων [110].

Τύπος μηχανήματος	Δυναμικότητα (m ³ /10min)	Κατανάλωση καυσίμου (lt _{diesel} /h)
Όχημα μεταφοράς προσωπικού	-	10-15
Ερπυστριοφόρος μολτόζα	1.53-45	14.975-124.1
Μηχάνημα απομάκρυνσης επιφανειακού στρώματος εδάφους	2.66-17	7.5-14
Μπολτόζα	1.6-20	14.975-124.1
Μηχάνημα απόξεσης εδάφους	38-56	40-130
Μηχάνημα πλανίσματος εδάφους	20-30	49-95

Ισοπεδωτής	3.7-5	15.7-50
Μηχάνημα αναμόρφωσης δρόμων	10-15	34.1-85
Φορτωτής-Εργαλειοφορέας	1.2-2	7-130
Τύπος μηχανήματος	(tn/20min)	(Lt/h)
Αρθρωτό φορτηγό	20-40	17-40
Φορτηγό χωματουργικών εργασιών	52-65	36-250
Τύπος μηχανήματος	(tn/h)	(Lt/h)
Θραυστήρας ή Σπαστήρας	300-500	2.5-3
Τύπος μηχανήματος	(m³/h)	(Lt/h)
Φορτωτής-Εκσκαφέας	11.4-13.2	13-17
Πρόσθιο πτύο	45.6-91.2	48-130
Φορτωτής	24-48	20-35
Εκσκαφέας	40.8-80.4	5.5-50
Εξοπλισμός αποκατάστασης φυσικού περιβάλλοντος	-	12-14
Τύπος μηχανήματος	(Km²/h)	(Lt/h)
Οδοστρωτήρας	0.01312-0.015	10.93-21
Γεωτρύπανο	2.835-3	12.1-14

Πίνακας 4.4. Τιμές εισροών/εκροών για την μοντελοποίηση του συστήματος για τον σταθμό της Πτολεμαΐδας V [111].

Εκπομπές	Λιγνιτωρυχείο	ΑΗΣ	
Στον αέρα			
NMVOC	5,01E-05	2,33E-06	kg
NO _x	1,78E-04	4,38E-04	kg
PM _{2.5-10}	7,50E-06	3,90E-06	kg
PM _{2.5}	4,70E-05	1,20E-05	kg
SO ₂	3,48E-04	2,51E-04	kg
CO ₂	8,87E-02	1,12E+00	kg
NH ₃	2,54E-07	1,17E-05	kg
Cd	2,15E-09	1,09E-08	kg
As	7,25E-09	8,47E-08	kg
Ni	7,75E-08	1,29E-07	kg
Pb	1,84E-08	7,69E-08	kg
Hg	3,97E-09	7,30E-08	kg
Cr	2,36E-08	4,00E-08	kg
Cr-VI	6,89E-10	3,85E-09	kg
Formaldehyde	8,94E-08	5,19E-07	kg
Dioxins	8,04E-15	6,46E-14	kg
Aerosols, radioactive	1,65E-05	5,50E-06	Bq
Carbon-14	6,69E-02	2,82E-02	Bq
Iodine-131	3,37E-03	9,63E-04	Bq
Iodine-133	1,49E-07	2,00E-07	Bq
krypton-85	2,66E-02	7,89E-03	Bq
noble gases, radiactive	6,51E+02	2,40E+02	Bq

thorium-230	3,63E-05	1,43E-05	Bq
uranium-234	1,09E-04	4,41E-05	Bq
uranium-235	5,19E-06	2,12E-06	Bq
uranium-238	2,64E-03	5,41E-02	Bq
Στο νερό			
Iodine-131	3,27E-06	1,97E-06	Bq
Unanium-234	2,04E-04	8,32E-05	Bq
Uranium-235	3,36E-04	1,37E-04	Bq
uranium-238	8,36E-04	2,71E-04	Bq
PM _{2.5-10}	1,91E-03	0,00E+00	kg

Δέσμευση και συμπίεση CO₂

Η δέσμευση του CO₂ από τα απαέρια γίνεται μέσω κατιονισμού με αμίνες, το οποίο απομονώνει το μεγαλύτερο μέρος του CO₂. Στη συνέχεια το CO₂ μπορεί να συμπιεστεί σε πίεση 200 bar. Για την δέσμευση του CO₂, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο κλίνες, όπου στη μία θα γίνεται η απορρόφηση του CO₂ μέσω αμίνης, ενώ στην άλλη η αναγέννηση της αμίνης, όπου το CO₂ θα απελευθερώνεται για να συμπιεστεί και η αμίνη θα ανακτηθεί. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι πριν την απομάκρυνση του CO₂ το καυσαέριο θα πρέπει να ψυχθεί ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία στους 40-60°C και υποβάλλεται σε διαδικασία καθαρισμού από τους άλλους ρύπους (SO_x, NO_x, PM_{2.5} και PM₁₀), ενώσεις που προκαλούν δηλητηρίαση του διαλύτη. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει σημειωθεί επίσης ότι η θερμότητα του αντιδραστήρα – αναγεννητή θα πρέπει να είναι 120°C. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η απαιτούμενη θερμότητα που χρειάζεται ο αναγεννητής λαμβάνεται από τον κύκλο ατμού, με συνεπακόλουθη μείωση του βαθμού απόδοσης, ενώ, όπως συμβαίνει και με όλες τις άλλες τεχνολογίες, απαιτείται ενέργεια και για τη συμπίεση του CO₂. Στον παρακάτω Πίνακα 4.5. παρουσιάζονται οι τιμές εισροών που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του συστήματος.

Πίνακας 4.5. Παράμετροι απόδοσης του συστήματος δέσμευσης CO₂ με βάση τη διαδικασία απορρόφησης του CO₂ σε MEA (MEA-ABS) [112].

<i>Απόδοση απορρόφησης</i>	
Καθαρότητα CO ₂ , %	99.6
Βαθμός δέσμευσης, %	90
<i>Απαιτήσεις σε πρώτες ύλες</i>	
MEA, kg/tonne CO ₂ in	1.44
Καυστική σόδα, kg/tonne CO ₂ in	0.12
Ενεργός άνθρακας, kg/tonne CO ₂ in	0.07
H ₂ O, kg/tonne CO ₂ in	18.1
<i>Ενεργειακές απαιτήσεις</i>	
Reboiler duty, GJ/tonne CO ₂ in	3.2
EMEA, kWh/tonne CO ₂ in	33.8
ECP, CO ₂ , kWh/tonne CO ₂ in	64.5
<i>Εκπομπές αερίων</i>	
H ₂ O, kg/tonne CO ₂ in	87.5
CO ₂ , kg/tonne CO ₂ in	99.9
Ar, kg/tonne CO ₂ in	54.8
N ₂ , kg/tonne CO ₂ in	3202.2
O ₂ , kg/tonne CO ₂ in	128.3
MEA, kg/tonne CO ₂ in	0.06
NH ₃ , kg/tonne CO ₂ in	0.03
Φορμαλδεΰδη, kg/tonne CO ₂ in	2.4×10^{-4}
Ακεταλδεΰδη, kg/tonne CO ₂ in	1.5×10^{-4}

Απόρριψη στερεών	
Απόβλητα ανάκτησης αμινών, kg/tonne CO ₂ in	2.9

Μεταφορά και αποθήκευση CO₂

Μετά τη δέσμευση, η μεταφορά του CO₂ μπορεί να γίνει με φορτηγά ή τρένα για μικρές αποστάσεις, ενώ για μεγάλες αποστάσεις και μεγάλες ποσότητες CO₂, χρησιμοποιούνται πλοία ή αγωγοί. Στην παρούσα μελέτη, γίνεται μεταφορά του CO₂ μέσω αγωγών. Για την συγκεκριμένη ενότητα της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα τριών πινάκων (4.6. – 4.8.) που αναφέρονται στην κατασκευή σωλήνων για την μεταφορά του CO₂ χωρίς επανασυμπίεση (<200 χλμ απόσταση) και για την υπόγεια αποθήκευση CO₂. [113,114]

Πίνακας 4.6. Δεδομένα LCI ανά km αγωγού που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία [113].

<i>Αγωγός CO₂</i>	Unit/km
Πόροι	
Εργοτάξιο	3330 m ² a
Ανάπλαση χώρου από δάσος	2000 m ²
Μεταμόρφωση, σε ετερογενή, αγροτική	2000 m ²
Νερό, απροσδιόριστης φυσικής προέλευσης	187 m ³
Υλικά/Καύσιμα	
Άμμος/CH U	4.40E+06 kg
Πετρέλαιο χρήση ως καύσιμο /GLO U	3.31E+06 MJ
Χάλυβας, χαμηλού κράματος, στο εργοστάσιο /RER U	2.70E+05 kg

Σχέδιο σωλήνων, γάλυβας /RER U	2.70E+05 kg
Πετροβάμβακας, συσκευασμένος, στο εργοστάσιο/CH U	5119 kgV
Μεταφορά, ελικόπτερο/GLO U	26 hr
Μεταφορά, ελικόπτερο, LTO cycle/GLO U	10.4 p
Μεταφορά, φορτηγό 32t/RER U	3.15.E+05 tkm
Μεταφορές, φορτία, rail/RER U	5.51.E+04 tkm
Απόβλητα για επεξεργασία	
Απόρριψη, αδρανή απόβλητα, 5% νερό, σε ΧΥΤΑ αδρανών υλικών /CH U	4.40E+06 kg
Απόρριψη, σίδηρος, 0% νερό, σε ΧΥΤΑ αδρανών υλικών /CH U	1.35E+05 kg
Απόρριψη, πετροβάμβακας, μέχρι την τελική διάθεση /CH U	5.12E+03 kg

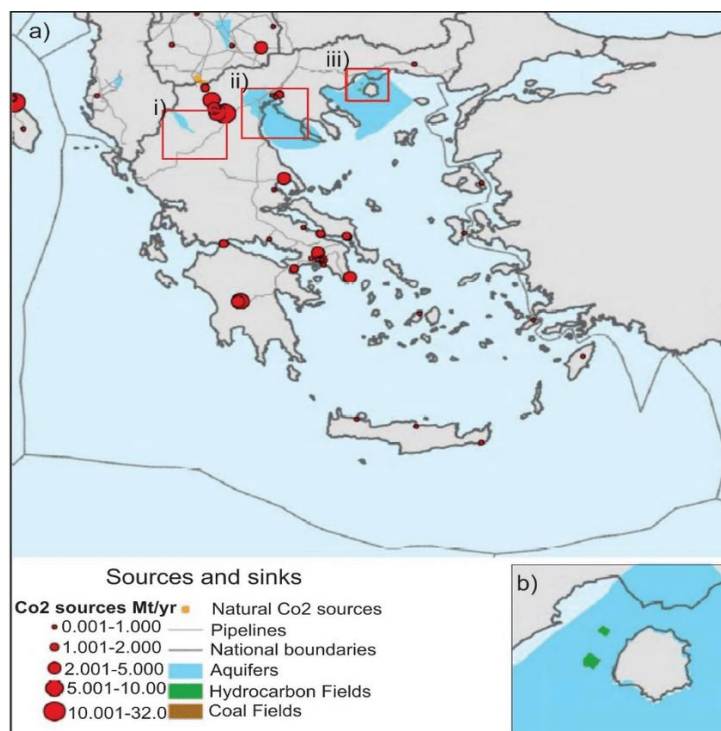
Πίνακας 4.7. Δεδομένα LCI ανά tkm μεταφορά CO₂ σε αγωγό χωρίς επανασυμπίεση [114].

Μεταφορά, αγωγός, υπερκρίσιμο CO₂, χωρίς επανασυμπίεση	Unit/tkm
Αγωγός,	6.34E-09 km
Ενδογενές διοξείδιο του άνθρακα από χρήση ορυκτών καυσίμων	2.60E-04 kg

Πίνακας 4.8. Δεδομένα βιβλιογραφίας LCI για γεωλογική αποθήκευση του CO₂ [115].

Διαδικασία	Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Τιμή
Κατασκευή φρεατίου αποθήκευσης	Πετρέλαιο	t	302
	Τσιμέντο Πόρτλαντ	t	290
	Μπεντονίτης	t	29
	Ανόργανες χημικές ουσίες	t	61.19
	Οργανικές χημικές ουσίες	t	13.12
	Βαρυτίνη	t	391.5
	Λιγνίτης	t	0.29
	Λάδι λίπανσης	t	87
	Χάλυβας ενίσχυσης	t	304.5
	Μεταφορές μέσω σιδηροδρόμου	tkm	706150
	Μεταφορές μέσω φορτηγών	tkm	117595
	Διάθεση απορριμμάτων γεωτρήσεων σε αγροκτήματα	t	343.65
	Διάθεση απορριμμάτων γεωτρήσεων σε χώρους υγειονομικής ταφής υπολειμματικών υλικών	t	229.1
Διάθεση επικίνδυνων αποβλήτων στην αποτέφρωση επικίνδυνων αποβλήτων	t	7.25	
Εγχυση CO ₂	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας	kWh/t injected CO ₂	6.68

Η μεταφορά CO₂ γίνεται από τον σταθμό της Πτολεμαΐδας, στους υδροφόρους ορίζοντες του Θερμαϊκού κόλπου (~140 χιλιόμετρα), σχήμα 4.2. [116].



Σχήμα 4.2. Χάρτης χώρων αποθήκευσης CO₂ στην Ελλάδα.

4.4. Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια μοντελοποίησης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πρώτο σενάριο AKZ εκτιμήθηκε η παραγωγή ενέργειας μέσω λιγνιτικής μονάδας, στο δεύτερο σενάριο εκτιμήθηκε η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα αιολικό πάρκο. Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο εκτιμήθηκε η παραγωγή ενέργειας μέσω λιγνιτικής μονάδας με την ταυτόχρονη δέσμευση, αποθήκευση και μεταφορά του CO₂ προς αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς στον Θερμαϊκό κόλπο. Στον πίνακα 4.9 απεικονίζονται οι υπολογισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις για τα τρία σενάρια.

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα AKZ των τριών σεναρίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

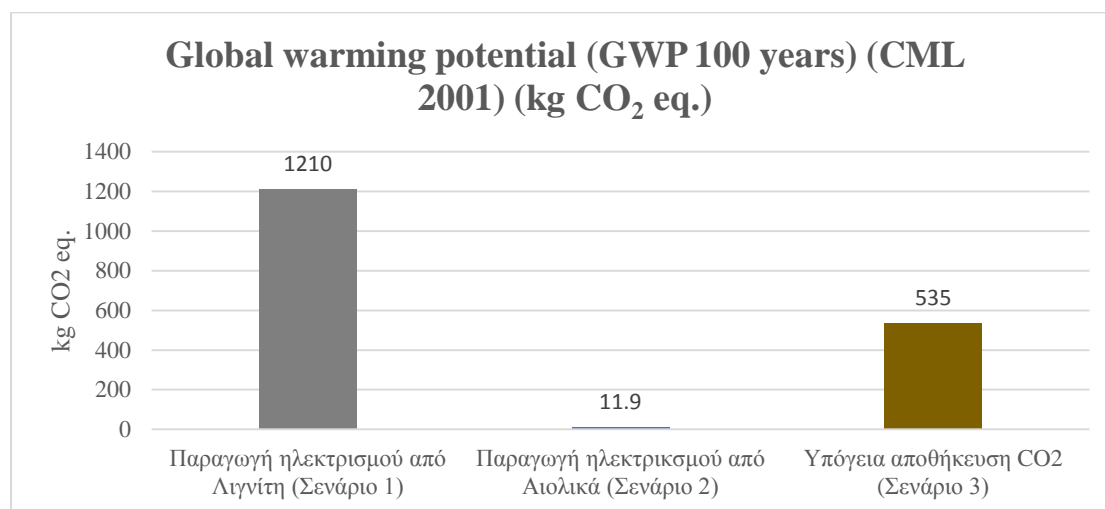
	Παραγωγή ηλεκτρισμού από Λιγνίτη (Σενάριο 1)	Παραγωγή ηλεκτρισμού από Αιολικά (Σενάριο 2)	Υπόγεια αποθήκευση CO₂ (Σενάριο 3)
Global warming potential (GWP 100 years) (CML 2001) (kg CO₂ eq.)	1210	11,9	535
Acidification Potential (AP) (CML 2001) (kg SO₂ eq.)	1.05	3.24E-02	1.5
Eutrophication Potential (EP) (CML 2001) (kg Phosphate eq.)	8.43E-02	2.97E-03	1510
Photochemical Ozone Formation (ReCiPe 2016) (kg NO_x eq.)	0.631	0.363	0.922
Fine Particulate Matter Formation (ReCiPe 2016) (kg PM_{2.5})	0,303	3,60E-04	0,413

4.4.1. Κλιματική αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή (GWP) αντιπροσωπεύει την επίδραση των εκπομπών αερίων όπως CO₂, N₂O, CH₄, VOCs που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Η πλειονότητα των εν λόγω εκλύσεων προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης, η οποία γενικά αναφέρεται ως "φαινόμενο του θερμοκηπίου". Η υπερθέρμανση του πλανήτη επηρεάζει την οικολογία και την ανθρώπινη υγεία, η οποία τελικά οδηγεί σε κλιματική αλλαγή. Η κλιματική αλλαγή εκφράζεται με kg διοξειδίου του άνθρακα για χρονικό ορίζοντα 100 ετών (GWP100)

Οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή και για τα τρία σεναρία AKZ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3. Σύμφωνα με την ανάλυση, η μεγαλύτερη ποσότητα εκπομπών CO₂ παράγεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με λιγνίτη, 1210 kgCO₂eq. Η ποσότητα που εκλύεται στην περίπτωση δέσμευσης και αποθήκευσης τους παραγόμενου CO₂ είναι αρκετά μικρότερη, περίπου ~ 55.8%. Από την άλλη μεριά η

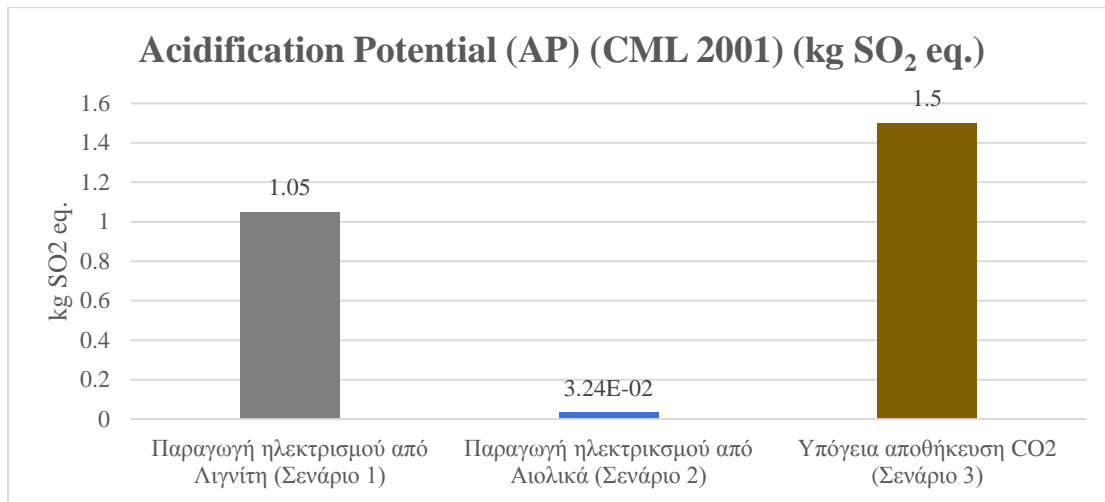
χρήση των αιολικών πάρκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώνει τις εκπομπές CO₂ κατά 99%.



Σχήμα 4.3. Επίδραση των τριών σεναρίων στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλογικά με την ποσότητα των εκλυόμενων εκπομπών CO₂ σε kg.

4.4.2. Οξίνιση του περιβάλλοντος

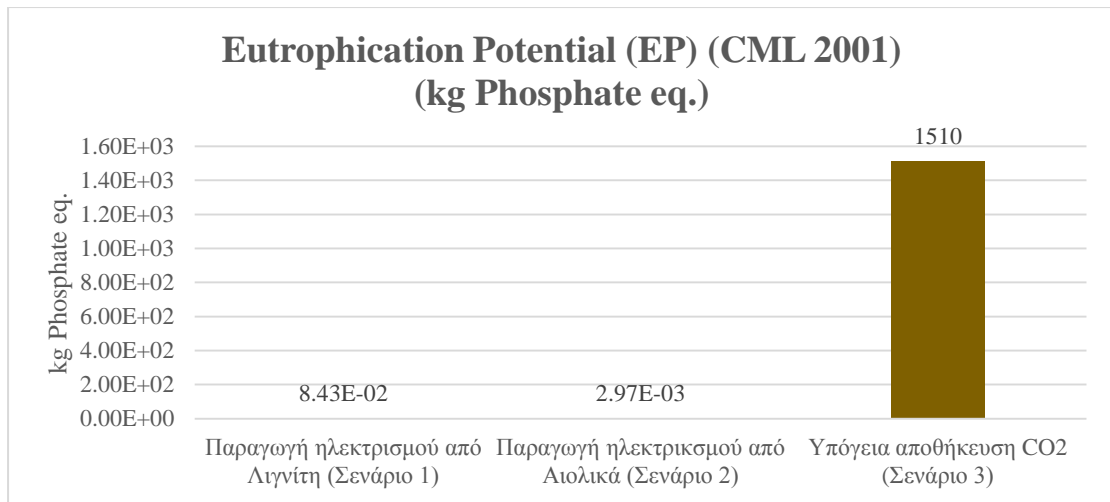
Η οξίνιση αφορά τις όξινες προσμίξεις που συναντώνται στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, στο έδαφος, στα οικοσυστήματα, στους βιολογικούς οργανισμούς και στις ουσίες. Βασικοί οξινιστικοί ρύποι είναι οξείδια του θείου (SO_x), οξείδια του αζώτου (NO_x) και αμμωνία NH₃. Η μονάδα μέτρησης είναι Equivalents/kg of SO₂ (kg Sb-eq). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4., οι μικρότερες εκπομπές φαίνεται πως είναι για τα αιολικά πάρκα, αποδεικνύοντας ξανά πως είναι μια τεχνολογία αρκετά φιλική προς το περιβάλλον. Στην περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω λιγνίτη χωρίς το σύστημα δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ η ποσότητα που εκλύεται είναι 1.05 kgSO₂ eq, ενώ εφαρμόζοντας το σύστημα αποθήκευσης η ποσότητα που εκλύεται είναι 1.5 kgSO₂ eq. Η συγκεκριμένη αύξηση (42.9%) πιθανόν να οφείλεται στις ενεργειακές καταναλώσεις του συστήματος δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂.



Σχήμα 4.4. Επίδραση των τριών σεναρίων στο φαινόμενο της οξίνιση του περιβάλλοντος αναλογικά των εκπομπών SO₂ σε kg.

4.4.3. Ευτροφισμός

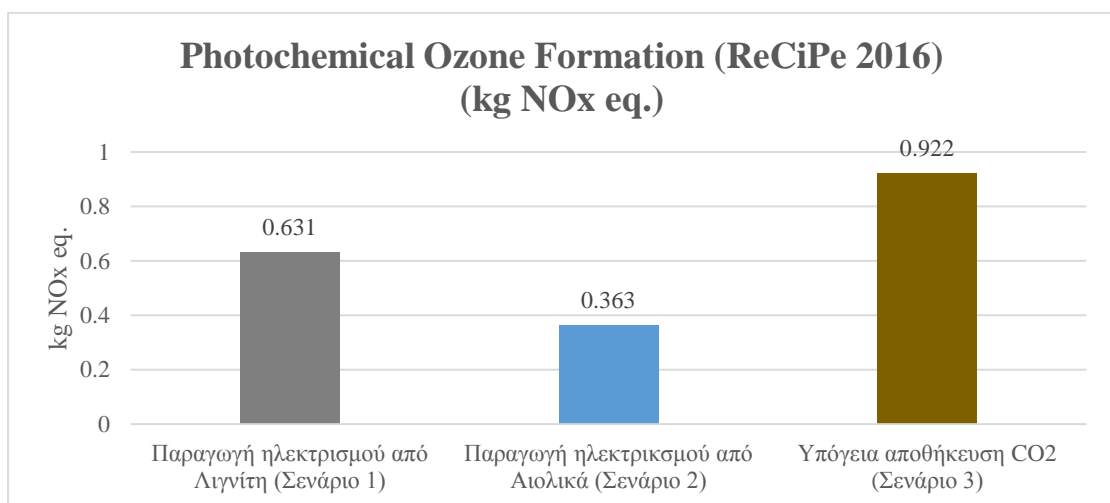
Ο ευτροφισμός αναφέρεται στη συγκέντρωση χημικών θρεπτικών συστατικών σε ένα οικοσύστημα, το οποίο δεν μπορεί να λειτουργήσει ομαλά. Ως συνέπεια, προκαλείται εκτεταμένη ανάπτυξη φυτών (όπως φύκια) τόσο στα χερσαία όσο και στα υδάτινα οικοσυστήματα, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε σημαντικές επιπτώσεις τόσο στη ποιότητα του νερού και του εδάφους, όσο και στους ζωντανούς οργανισμούς. Υπεύθυνες ουσίες ευτροφισμού θεωρούνται τα νιτρικά άλατα, η αμμωνία τα οξείδια του αζώτου και του φωσφόρου τα οποία εκπέμπονται είτε στον αέρα είτε στο νερό [36]. Η κατηγορία αυτή μετριέται σε kg Phosphate Equivalent και σύμφωνα με το Σχήμα 4.5. η μεγαλύτερη επίπτωση στο περιβάλλον προκαλείται από την έκχυση του CO₂ στο σημείο αποθήκευσης του Θερμαϊκού κόλπου (1510kg). Φαίνεται ότι η διοχέτευση του CO₂ προκαλεί αύξηση των θρεπτικών στοιχείων, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωσή του στον υδροφόρο ορίζοντα μειώνοντας το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό και κατά συνέπεια επιφέροντας αλλοίωση της βιοποικιλότητας σε αυτό.



Σχήμα 4.5. Επίδραση των τριών σεναρίων στο φαινόμενο του ευτροφισμού σύμφωνα με το παραγόμενο φωσφορικό άλας σε kg.

4.4.4. Σχηματισμός φωτοχημικών σχηματισμός όζοντος

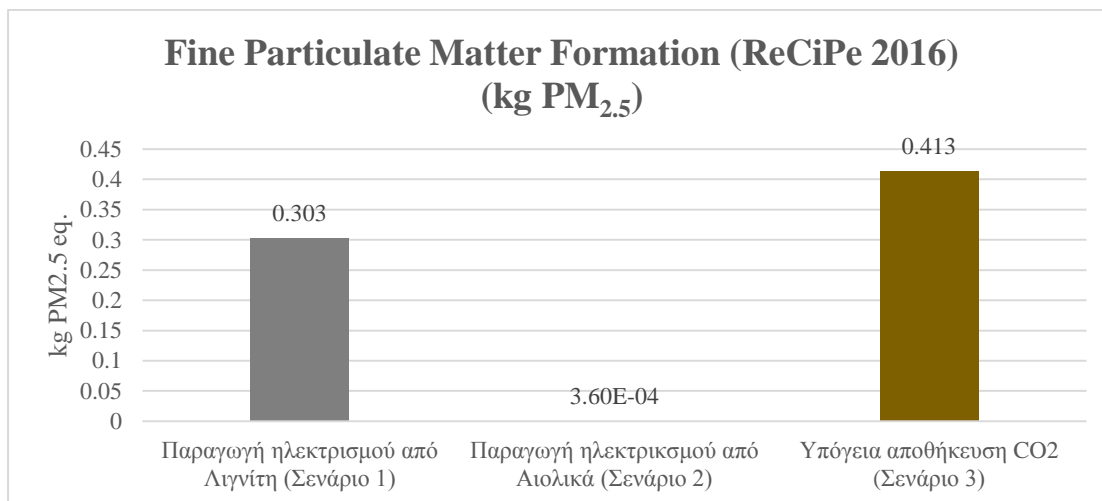
Η επόμενη περιβαλλοντική επίπτωση αφορά τον σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους λόγω της αλληλεπίδραση των παραγόμενων οξειδίων του αζώτου με την ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.6. και σε αυτή την περίπτωση το σενάριο της αποθήκευσης του CO₂ παρουσιάζει τις μεγαλύτερες εκπομπές NO_x (0,922 kg) συγκριτικά με τα δύο άλλα σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται αύξηση εκπομπών κατά 46.1% σε σχέση με το σενάριο 1 ενώ για το σενάριο 2 παρατηρείται αύξηση 154%.



Σχήμα 4.6. Επίδραση των τριών σεναρίων στο φαινόμενο του σχηματισμού φωτοχημικών οξειδωτικών αναλογικά με τις εκπομπές NO_x σε kg.

4.4.5. Εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, το σενάριο της δέσμευσης και της υπόγειας αποθήκευσης του CO₂ έχει την μεγαλύτερη επίπτωση στο περιβάλλον. Σε σύγκριση με το σενάριο 1, παρουσιάζεται αύξηση 36.3%. Σημειώνεται εδώ ότι παρουσιάζονται σχεδόν μηδενικές επιπτώσεις για το σενάριο 2.



Σχήμα 4.7. Επίδραση των τριών σεναρίων στις εκπομπές PM_{2.5}.

Τέλος, αξίζει να σημειωθούν οι πολύ χαμηλές εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούνται από τα αιολικά πάρκα, γεγονός που υποδεικνύει το χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της τεχνολογίας.

Κεφάλαιο 5^ο

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκε λεπτομερώς η τεχνολογία της δέσμευσης και της αποθήκευσης του CO₂ που παράγεται κατά την καύση του λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά την υψηλότερη απαιτούμενη επένδυση και τεχνολογική πολυπλοκότητα, η τεχνολογία της δέσμευσης CO₂ φαίνεται να προσφέρει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όμως επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον όπως η οξίνιση και ο ευτροφισμός που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη, για τη βελτίωση στις διαδικασίες μεταφοράς και αποθήκευσης του CO₂.

Ωστόσο, δεν πρέπει να παραβλέπουμε τη σημασία της προώθησης και ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα αιολικά πάρκα, καθώς όπως φάνηκε από την ανάλυση, παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερες περιβαλλοντικές επιδόσεις. Κάθε τεχνολογική λύση έχει τα πλεονεκτήματά της και τους περιορισμούς της και είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη όλοι οι περιβαλλοντικοί δείκτες και να εξεταστούν προσεκτικά οι διάφορες επιλογές προκειμένου να επιτευχθεί μια βιώσιμη και αποτελεσματική ενεργειακή πολιτική για το μέλλον μας και το περιβάλλον.

Έχοντας λοιπόν αυτόν τον στόχο κατά την διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο αφορούσε την παραγωγή ενέργειας από τη νέα μονάδα Πτολεμαΐδα V, το δεύτερο σενάριο αφορούσε την παραγωγή ενέργειας μέσω της καύσης του λιγνίτη από τη νέα μονάδα Πτολεμαΐδα V αλλά με την χρήση τεχνολογίας CCS με υπόγεια αποθήκευση του CO₂ στο Θερμαϊκό κόλπο και το τρίτο σενάριο αφορούσε την παραγωγή ενέργειας μέσω αιολικού πάρκου. Συνολικά αναλύθηκαν οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή, το φαινόμενο της οξίνισης, το φαινόμενο του ευτροφισμού, το φαινόμενο του σχηματισμού οξειδίων του

αζώτου, και ο σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων καθιστώντας εμφανές το αντίκτυπο που έχει η κάθε τεχνολογία στο περιβάλλον. Αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν οι κύριες εκπομπές και επιπτώσεις για κάθε τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας πληροφορίες για την περιβαλλοντική επίδραση.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι για τις επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή, η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί τεχνολογία CCS εκλύει αρκετά μικρότερη ποσότητα CO₂, περίπου ~ 55.8%. Όσον αφορά την οξίνιση του περιβάλλοντος εφαρμόζοντας το σύστημα αποθήκευσης η ποσότητα που εκλύεται είναι 1.5 kgSO₂ eq, αύξηση περίπου 42,9% συγκριτικά με την μονάδα παραγωγής χωρίς τεχνολογία CCS. Η συγκεκριμένη αύξηση πιθανόν να οφείλεται στις ενεργειακές καταναλώσεις του συστήματος δέσμευσης και αποθήκευσης. Επιπρόσθετα, από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας CCS ενισχύει το φαινόμενο του ευτροφισμού (κατακόρυφα), της παραγωγής των NO_x (αύξηση κατά 46.1% και 154% σε σύγκριση με το σενάριο 1 και 2, αντίστοιχα) αλλά και της παραγωγής αιωρούμενων σωματιδίων (αύξηση 36.3% σε σύγκριση με το σενάριο 1). Ως εκ τούτου η εφαρμογή της τεχνολογίας φαίνεται ότι μειώνει τις εκπομπές του CO₂, ωστόσο επιβαρύνει άλλους δείκτες. Από την άλλη μεριά η εφαρμογή αιολικών πάρκων παρουσιάζει το μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Βιβλιογραφία

- [1]. https://www.businessdaily.gr/oikonomia/57611_sta-ypsi-emporiko-elleimma-2021-para-tin-ayxisi-ton-exagogon (Πρόσβαση στις 02/10/2023)
- [2]. <https://www.iea.org/news/greece-must-build-on-its-successes-in-reducing-fossil-fuel-dependence-iea-report-says> (Πρόσβαση στις 07/10/2023)
- [3]. <https://thegreentank.gr/2022/09/02/admie-july2022-el/?fbclid=IwAR3PEqC6kPN1WNQtCAGkUH4R5tFOSkTW3sSSZnapMkstW8UCvWVV2Qs8yrk> (Πρόσβαση στις 12/10/2023)
- [4]. <https://www.admie.gr/agora/enimerotika-deltia/miniaia-deltia-energeias> (Πρόσβαση στις 12/10/2023).
- [5]. Νίκος Βέττας, Svetoslav Danchev, Γιώργος Μανιάτης, Νίκος Παρατσιώκας, Κώστας Βαλάσκας, Ο Τομέας Ενέργειας στην Ελλάδα: Τάσεις, Προοπτικές και Προκλήσεις. διαΝΕΟσις. Απρίλιος 2021.
- [6]. P. Berg, A. Boland, Analysis of ultimate fossil fuel reserves and associated CO₂ emissions in IPCC scenarios. Nat Resour Res, 23 (1) (2014) 141-158.
- [7]. J. Baek, Do nuclear and renewable energy improve the environment? Empirical evidence from the United States. Ecol Indic, 66 (2016) 352-356.
- [8]. S.S. Wang, D.Q. Zhou, P. Zhou, Q.W. Wang, CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in China: a panel data analysis. Energy Pol, 39 (9) (2011) 4870-4875.
- [9]. Marike Schiffer, A war running on fossil fuels. Nature Human Behaviour 6771–773 (2022)
- [10]. Natural gas price, <https://tradingeconomics.com/commodity/gold> (Πρόσβαση στις 19/10/2023)
- [11]. Spiru Paraschiv, Analysis of the variability of low-carbon energy sources, nuclear technology and renewable energy sources, in meeting electricity demand. Energy Reports 9 (2023) 276-283.
- [12]. Hannah Ritchie, Max Roser. CO₂ emissions. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/co2-emissions> (Πρόσβαση στις 23/10/2023)
- [13]. EPA Overview of Greenhouse Gases, Retrieved from. 2023
- [14]. IEA, Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021.

- [15]. A. Buis, *The Atmosphere: Getting a Handle on Carbon Dioxide—Climate Change: Vital Signs of the Planet*.
- [16]. J. Maze, T.O. Donald, J. Trump, President of the United States of America Scott Pruitt, Director of the Environmental Protection Agency Michael Brune, Director of the Sierra Club Marco Lambertini, Director of the World Wildlife Fund FROM: Domestic Team 3: Amy Blood, Jake. Diam., David Lee, Ray Ludwig, . J. Policy, 52 (2013), pp. 797-809.
- [17]. Ocean acidification <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification> (Πρόσβαση στις 23/10/2023).
- [18]. Μαριάννα Τζάννε, ΔΕΗ: Καμπανάκι οι εκπομπές CO₂ εξαμήνου για τις ρήτρες βιωσιμότητας του ομολογιακού ύψους €500 εκατ. <https://energypress.gr/news/dei-kampanaki-oi-ekpompes-co2-examinoy-gia-tis-ritres-biosimotitas-toy-omologiakoy-ypsoys>. (Πρόσβαση στις 02/10/2023).
- [19]. M.S. Frei, C. Mondelli, J. Pérez-Ramírez, Development of In₂O₃ -based Catalysts for CO₂ -based Methanol Production. *Chimia*, 74 (4) (2020), p. 257.
- [20]. S. Navarro-Jaén, M. Virginie, J. Bonin, M. Robert, R. Wojcieszak, A.Y. Khodakov, Highlights and challenges in the selective reduction of carbon dioxide to methanol. *Nat. Rev. Chem.*, 5 (8) (2021), pp. 564-579,
- [21]. J. Ye, R.C. Cammarota, J. Xie, M.V. Vollmer, D.G. Truhlar, C.J. Cramer, C.C. Lu, L. Gagliardi. Rationalizing the Reactivity of Bimetallic Molecular Catalysts for CO₂ Hydrogenation. *ACS Catal.*, 8 (6) (2018), pp. 4955-4968.
- [22]. W. Wang, C. Duong-Viet, H. Ba, W. Baaziz, G. Tuci, S. Caporali, et al. Nickel nanoparticles decorated nitrogen-doped carbon nanotubes (Ni/N-CNT); a robust catalyst for the efficient and selective CO₂ methanation. *ACS Appl Energy Mater*, 2 (2018), pp. 1111-1120.
- [23]. T. Zhang, W. Wang, F. Gu, W. Xu, J. Zhang, Z. Li, T. Zhu, G. Xu, Z. Zhong, F. Su, Enhancing the low-temperature CO₂ methanation over Ni/La-CeO₂ catalyst: The effects of surface oxygen vacancy and basic site on the catalytic performance. *Appl. Catal. B: Environ.*, 312 (2022), Article 121385
- [24]. I.E. Forum: *Strategies to Scale Carbon Capture, Utilization, and Storage*. 2021.
- [25]. IPCC: *Special report on global warming of 1.5 degrees celsius. Contribution from Working Group I*. 2018.

- [26]. Κόρδαρης Νικόλαος (2012). Τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ και δυνατότητες συμβολής στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου: Η περίπτωση της Ελλάδας (Μεταπτυχιακή εργασία). Πανεπιστήμιο Πειραιώς και Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [27]. Dongdong Feng a, Dawei Guo a, Yu Zhang a, Shaozeng Sun a, Yijun Zhao a, Guozhang Chang b, Qingjie Guo b, Yukun Qin. Adsorption-enrichment characterization of CO₂ and dynamic retention of free NH₃ in functionalized biochar with H₂O/NH₃·H₂O activation for promotion of new ammonia-based carbon capture. *Chemical Engineering Journal* 409 (2021) 128193.
- [28]. Diwakar Pandey, Monoj Kumar Mondal, Equilibrium CO₂ solubility in the aqueous mixture of MAE and AEEA: Experimental study and development of modified thermodynamic model. *Fluid Phase Equilibria* 522 (2020) 112766.
- [29]. B.P. Spigarelli, S. Komar Kawatra (2013). Opportunities and challenges in carbon dioxide capture. *Journal of CO₂ Utilization*, Vol. 1, pp. 69-87.
- [30]. A Comparative Assessment of Emerging Solvents and Adsorbents for Mitigating CO₂ Emissions From the Industrial Sector by Using Molecular Modeling Tools
- [31]. Gabriel Landeta Avellaneda, Renaud Denoyel, Isabelle Beurroies, Microporous and Mesoporous Materials CO₂/H₂O adsorption and co-adsorption on functionalized and modified mesoporous silicas. *Microporous and Mesoporous Materials* 363 (2024) 112801.
- [32]. S. Kumar, R. Srivastava, J. Koh Utilization of zeolites as CO₂ capturing agents: advances and future perspectives. *J. CO₂ Util.*, 41 (2020), Article 101251.
- [33]. V. Indira, K. Abhitha, A review on recent developments in Zeolite A synthesis for improved carbon dioxide capture: Implications for the water-energy nexus. *Energy Nexus*, 7 (2022), Article 100095.
- [34]. Z. Huang, G. Liu, F. Kang, Glucose-promoted Zn-based metal-organic framework/graphene oxide composites for hydrogen sulfide removal. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 4 (2012), pp. 4942-4947.
- [35]. E. Sánchez-González, P.G.M. Mileo, M. Sagastuy-Breña, J.R. Álvarez, J.E. Reynolds, A. Villarreal, A. Gutiérrez-Alejandre, J. Ramírez, J. Balmaseda, E. González-Zamora, G. Maurin, S.M. Humphrey, I.A. Ibarra. Highly reversible sorption of H₂S and CO₂ by an environmentally friendly Mg-based MOF. *J. Mater. Chem. A*, 6 (2018), pp. 16900-16909.

- [36]. Lan Yang a, Qiang Gao a, Yan-Mei Zhang a, Ruihan Wang b, Li-Zhuang Chen,, Efficient C₂H₆/C₂H₄ adsorption separation by a microporous heterometal-organic framework. *Journal of Colloid and Interface Science* 652 (2023) 1093-1098.
- [37]. J. Zhao, S. Deng, L. Zhao, X. Yuan, B. Wang, L. Chen, K. Wu, Synergistic and competitive effect of H₂O on CO₂ adsorption capture: Mechanism explanations based on molecular dynamic simulation. *J. CO₂ Util.*, 52 (2021), Article 101662.
- [38]. M. Oschatz, M. Antonietti, A search for selectivity to enable CO₂ capture with porous adsorbents. *Energy Environ. Sci.*, 11 (1) (2018), pp. 57-70
- [39]. Hao Yu a, František Mikšík b, Kyaw Thu a c, Takahiko Miyazaki a c, Characterization and optimization of pore structure and water adsorption capacity in pinecone-derived activated carbon by steam activation. *Powder Technology*. In Press.
- [40]. Xuedi Chen a, Gen Li a, Min Gao a, Yuan Dong a, Ming Yang a b, Hansong Cheng a Wet-impregnated bimetallic Pd-Ni catalysts with enhanced activity for dehydrogenation of perhydro-N-propylcarbazole. *International Journal of Hydrogen Energy* 45, Issue 56, 13 November 2020, Pages 32168-32178.
- [41]. Xuhui Zou a b, Zhangfeng Shen b, Xi Li b, Yongyong Cao b, Qineng Xia b, Siqian Zhang b, Yanan Liu b, Lingchang Jiang b, Lifen Li b, Lifeng Cui a, Yangang Wang b, Boosting CO₂ methanation on ceria supported transition metal catalysts via chelation coupled wetness impregnation. *Journal of Colloid and Interface Science* 620, 15 August 2022, Pages 77-85.
- [42]. Shimizu, T.; HIRAMA, T.; Hosoda, H.; Kitano, K.; Inagaki, M.; Tejima, K. A twin fluid bed reactor for removal of CO₂ from combustion processes. *Chem. Eng. Res. Des.* 1999, 77, 62–68.
- [43]. Bui, M.; Adjiman, C.S.; Bardow, A.; Anthony, E.J.; Boston, A.; Brown, S.; Fennell, P.S.; Fuss, S.; Galindo, A.; Hackett, L.A.; et al. Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy Environ. Sci.* 2018, 11, 1062–1176.
- [44]. Πτυχιακή. Διπλωματική Εργασία, «Τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα από θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας».
- [45]. Metal–organic frameworks for upgrading biogas via CO₂ adsorption to biogas green energy.

- [46]. Yuan Wang, Li Zhao, Alexander Otto, Martin Robinius, Detlef Stolten (2017). A Review of Post-combustion CO₂ Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. *Energy Procedia*, Vol. 114, pp. 650-665.
- [47]. Huijgen, W.J.J.; Comans, R.N.J. *Carbon Dioxide Sequestration by Mineral Carbonation*; ECN Publications: Petten, The Netherlands, 2003
- [48]. The Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage: Mineral Carbonation and Industrial Uses of Carbon Dioxide*; IPCC: Geneva, Switzerland, 2005; pp. 320–335.
- [49]. Oelkers, E.H.; Gislason, S.R.; Matter, J. Mineral Carbonation of CO₂. *Elements* 2008, 4, 333–337.
- [50]. Olajire, A.A. A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂. *J. Pet. Sci. Eng.* 2013, 109, 364–392.
- [51]. Tasianias, A.; Koukoulas, N. CO₂ storage capacity estimate in the lithology of the Mesohellenic Trough, Greece. *Energy Procedia* 2016, 86, 334–341.
- [52]. Vatalis, K.I.; Laaksonen, A.; Charalampides, G.; Benetis, N.P. Intermediate technologies towards low-carbon economy. The Greek zeolite CCS outlook into the EU commitments. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16, 3391–3400.
- [53]. Koukoulas, N.; Kypritidou, Z.; Purser, G.; Rochelle, C.A.; Vasilatos, C.; Tsoukalas, N. Assessment of the impact of CO₂ storage in sandstone formations by experimental studies and geochemical modeling: The case of the Mesohellenic Trough, NW Greece. *Int. J. Greenh. Gas Control* 2018, 71, 116–132.
- [54]. Koukoulas, N.; Gemeni, V.; Ziock, H.J. Sequestration of CO₂ in magnesium silicates, in Western Macedonia, Greece. *Int. J. Miner. Process.* 2009, 93, 179–186.
- [55]. C.S. Ioakimidis, H. Gerbelova, A. Bagheri, S. Koutra, N. Koukoulas, Strategic Planning for Carbon Capture and Storage Implementation in the Electricity Sector of Greece: A TIMES Based Analysis. *Processes* 2021, 9(11), 1913
- [56]. Weiss, W.; Spork-Dur, M. *Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2019. Detailed Market Figures 2018.* 2020.
- [57]. Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας <https://eletaen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=875b7ea838>

cf4fe6a937c4be90fa8edd&extent=2070592.4486%2C4027438.181%2C348926
3.6936%2C5196618.9657%2C102100

- [58]. Claudiu C. Pavel a, Roberto Lacal-Arántegui a, Alain Marmier a, Doris Schüller b, Evangelos Tzimas a, Matthias Buchert b, Wolfgang Jenseit b, Darina Blagoeva a, Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy* 52 (2017) 349-357.
- [59]. <https://www.flsmidth.com/en-gb/discover/mining-2020/wind-will-power-clean-energy-and-the-demand-for-crucial-minerals>
- [60]. Aarti Kumari a b, Manish Kumar Sinha a, Swati Pramanik a, Sushanta Kumar Sahu a b Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects. *Waste Management Volume 75*, May 2018, Pages 486-498
- [61]. The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility
- [62]. L. Vandepaer, E. Panos, C. Bauer, Ben Amor, Energy System Pathways with Low Environmental Impacts and Limited Costs: Minimizing Climate Change Impacts Produces Environmental Cobenefits and Challenges in Toxicity and Metal Depletion Categories. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 8, 5081–5092
- [63]. H. L. Raadal, L. Gagnon, I. S. Modahl, O. J. Hanssen, Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(7) 2011 3417-3422.
- [64]. H. Li, H.-D. Jiang, K.-Y. Dong, Y.-M. Wei, H. Liao, A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production* 248 (2020) 119192.
- [65]. Schleisner L. Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. *Renew Energ* 2000;20:279–88.
- [66]. Proops JLR, Gay PW, Speck S, Schroder T. The lifetime pollution implications of various types of electricity generation. *Energ Policy* 1996;24(3):229–37
- [67]. Spath PL, Mann MK, Kerr DR. Life cycle assessment of coal-fired power production. Tech. Rep. NREL/TP-570-27715, US National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO; 1999.
- [68]. Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy* 2005;30:2042–56.

- [69]. V. Bisinella, S. Schmidt, A.S. Varling, D. Laner, T.H. Christensen, Waste LCA and the future. *Waste Management* 174 (2024) 53-75.
- [70]. R. Clift, A. Doig, G. Finnveden, The application of life cycle assessment to integrated solid waste management. Part 1 – Methodology. *Process Saf. Environ. Prot.*, 78 (2000) 279-287.
- [71]. G. Finnveden, Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems. *Resour. Conserv. Recycl.*, 26 (1999), pp. 173-187,ET
- [72]. G. Finnveden, A.-C. Albertsson, J. Berendson, E. Eriksson, L.O. Höglund, S. Karlsson, J.-O. Sundqvist, Solid waste treatment within the framework of life-cycle assessment. *J. Clean. Prod.*, 3 (1995), pp. 189-199
- [73]. T.H. Christensen, A. Damgaard, J. Levis, Y. Zhao, A. Björklund, U. Arena, M.A. Barlaz, V. Starostina, A. Boldrin, T.F. Astrup, V. Bisinella. Application of LCA modelling in integrated waste management. *Waste Manag.*, 118 (2020), pp. 313-322,
- [74]. H. Jeswani, C. Krüger, M. Russ, M. Horlacher, F. Antony, S. Hann, A. Azapagic, Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. *Sci. Total Environ.*, 769 (2021), Article 144483.
- [75]. Laurent, I. Bakas, J. Clavreul, A. Bernstad, M. Niero, E. Gentil, M.Z. Hauschild, T.H. Christensen, Review of LCA studies of solid waste management systems - Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Manag.*, 34 (2014), pp. 573-588,
- [76]. Laurent, J. Clavreul, A. Bernstad, I. Bakas, M. Niero, E. Gentil, T.H. Christensen, M.Z. Hauschild. Review of LCA studies of solid waste management systems - Part II: methodological guidance for a better practice. *Waste Manag.*, 34 (2014), pp. 589-606,
- [77]. T. Haas, J. Herberg, D. Löw-Beer, From carbon democracy to post-fossil capitalism? The German Coal Phase-out as a Crossroads of Sustainability Politics (2022), *Sustainability: Science, Practice and Policy* 18 (2022) 384-399.
- [78]. Hajer, M., Versteeg, W., 2018. Territory, Politics, Governance Imagining the post-fossil city: why is it so difficult to think of new possible worlds?

- [79]. S. Sammarchi, J. Li, D. Izikowitz, Q. Yang, D. Xu, China's coal power decarbonization via CO₂ capture and storage and biomass co-firing: A LCA case study in Inner Mongolia. *Energy* 261 (2022) 125158.
- [80]. K. Yang, N. Zhu, T. Yuan, Analysis of optimum scale of biomass gasification combined cooling heating and power (CCHP) system based on life cycle assessment(LCA). *Procedia Engineering* 205 (2017) 145-152.
- [81]. C. A. Moreno-Camacho, J.R. Montoya-Torres, A. Jaegler, N. Gondran, Sustainability metrics for real case applications of the supply chain network design problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 231 (2019) 600-618.
- [82]. Y. Xu, Y. Zhang, Y. Wang, G. Zhang, L. Chen, Gas evolution characteristics of lignite during low-temperature pyrolysis. *J Anal Appl Pyrol*, 104 (2013), pp. 625-631
- [83]. M. Agraniotis, A. Koumanakos, A. Doukelis, S. Karellas, E. Kakaras, Investigation of technical and economic aspects of pre-dried lignite utilization in a modern lignite power plant towards zero CO₂ emissions. *Energy*, 2012 (45) (2012), pp. 134-141
- [84]. N. Nikolopoulos, I. Violidakis, E. Karampinis, M. Agraniotis, C. Bergins, P. Grammelis, Report on comparison among current industrial scale lignite drying technologies (a critical review of current technologies). *Fuel*, 155 (2015), pp. 86-114
- [85]. ISO 14040. International Standard. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework; 2006.
- [86]. ISO 14044. International Standard. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines; 2006.
- [87]. K. Volkart, C. Bauer, C. Boulet, Life cycle assessment of carbon capture and storage in power generation and industry in Europe. *Int J Greenh Gas Control*, 16 (2013), pp. 91-106
- [88]. E. Çetinkaya, M. Rosen, İ. Dinçer, Life cycle assessment of a fluidized bed system for steam production. *Energy Convers Manage*, 63 (2012), pp. 225-232
- [89]. G. Skodras, P. Grammelis, E. Kakaras, G. Sakellariopoulos, Evaluation of the environmental impact of waste wood co-utilisation for energy production. *Energy*, 29 (2004), pp. 2181-2193

- [90]. G. Theodosiou, C. Koroneos, N. Stylos, Environmental impacts of the Greek electricity generation sector. *Sustain Energy Technol Assess*, 5 (2014), pp. 19-27
- [91]. D. Georgakellos, Climate change external cost appraisal of electricity generation systems from a life cycle perspective: the case of Greece. *J Clean Prod*, 32 (2012), pp. 124-140
- [92]. D. Georgakellos, Impact of a possible environmental externalities internalisation on energy prices: the case of the greenhouse gases from the Greek electricity sector. *Energy Econ*, 32 (2010), pp. 202-20.
- [93]. Παπουτσάκης, Ι. (2022) Επισκόπηση των Εφαρμογών της μεθόδου LCA (Life Cycle Assessment) στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής φιαλών PET και αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία.
- [94]. D. Pan, X. Yu, Y. Zhou, Cradle-to-grave lifecycle carbon footprint analysis and frontier decarbonization pathways of district buildings in subtropical Guangzhou, China. *Journal of Cleaner Production* 416 (2023) 137921.
- [95]. J. Geng, J. Wang, J. Huang, D. Zhou, J. Bai, J. Wang, H. Zhang, H. Duan, W. Zhang, Quantification of the carbon emission of urban residential buildings: the case of the Greater Bay Area cities in China. *Environ. Impact Assess. Rev.*, 95 (2022), Article 132860.
- [96]. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, Περιβαλλοντική αποτύπωση παραμετρικής βελτιστοποίησης διεργασίας παραγωγής βιοπλαστικών
- [97]. Ζουμπούλης, Α., Πελέκα, Ε., & Τριανταφυλλίδης, Κ. Ανάλυση Κύκλου Ζωής [Κεφάλαιο]. Πράσινη χημεία και τεχνολογία στη βιώσιμη ανάπτυξη [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. 2015.
- [98]. Huijbregts, M.A.J., Gilijamse, W., Ragas, A.M.J. & Reijnders, L. (2003). Evaluating uncertainty in environmental Life-Cycle Assessment, *Environmental Science and Technology*, 37, 2600-2608.
- [99]. Acero, A. A. P., Rodríguez, C., & Cirotto, A. (2015). LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, (February 2014), 1–22
- [100]. Αγγελική Μητροπούλου, Ανάλυση του Κύκλου Ζωής για την παραγωγή σκόνης μίγματος άνθου αραβοσίτου, Κεφάλαιο 2, Αθήνα 2016.

- [101]. Πανταζή Ελένη, Διπλωματική εργασία με θέμα: Συγκριτική μελέτη μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής, Κεφάλαιο 3, Χανιά 2014.
- [102]. Sala, S., Crenna, E., Secchi, M. and Pant, R., Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017.
- [103]. E. Nieuwlaar, Life Cycle Assessment and Energy Systems. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences 2013.
- [104]. S. Renou, J.S. Thomas, E. Aoustin, M.N. Pons, Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of Cleaner Production* 16 (2008) 1098-1105.
- [105]. R.Panameño, C.M. Gutiérrez-Aguilar, B.E. Angel, S.F. César, A. Kiperstok, Cleaner Production and LCA as Complementary Tools in Environmental Assessment: Discussing Tradeoffs Assessment in a Case of Study within the Wood Sector in Brazil. *Sustainability* 2019, 11(18), 5026.
- [106]. J. Koornneef, T.v. Keulen, A. Faaij, W. Turkenburg, Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2(4) 2008 448-467.
- [107]. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2707> (Πρόσβαση στις 17/02/2024)
- [108]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/44/5/052043> (Πρόσβαση στις 17/02/2024).
- [109]. ΔΕΗ. (2013b). Clarifications on the item of the Extraordinary General Meeting of shareholders on 29.3.2013 “Approval for materialization of the investment for the construction of the Plant Ptolemais V and the pertinent contract”. www.dei.gr Electronic Article.
- [110]. Διπλωματική εργασία Σταματίου Γεώργιος, Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής του λιγνίτη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: Εφαρμογή στην Ελληνική περίπτωση. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων, Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, 2015.
- [111]. Life Cycle Analysis and Life Cycle Costing of lignite for power generation: Applied case study in Greece

- [112]. M. Pehnt, J. Henkel, Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 3 (1) (2009) 49-66.
- [113]. L. Giordano, D. Roizard, E. Favre, Life cycle assessment of post-combustion CO₂ capture: A comparison between membrane separation and chemical absorption processes. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 68 (2018) 146-163.
- [114]. Caroline Wildbolz. Life Cycle Assessment of Selected Technologies for CO₂ Transport and Sequestration. Diploma Thesis July 2007
- [115]. I. Stasiulaitiene¹, A. Babarskaite, D. Martuzevicius, R. Zevenhoven, Comparison of mineral carbonation process with geological carbon dioxide storage by life cycle assessment tool. ACEME 2013, April 9-12, 2013 – Leuven, Belgium.
- [116]. N. Koukouzas, P. Lympelopoulou, A. Tasianias, S. Shariatipour, Feasibility Study for The Setting Up of a Safety System for Monitoring CO₂ Storage at Prinos Field, Greece. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 44 052043.