



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

«Τεχνική και οικονομική αξιολόγηση τεχνολογιών δέσμευσης,
αποθήκευσης και αξιοποίησης βιομηχανικών εκπομπών διοξειδίου
του άνθρακα»

ΝΤΑΦΛΟΥ ΘΕΟΦΑΝΩ

Επιβλέποντες καθηγητές:

Αναστασία Πασχαλίδου
Δημήτριος Παπαναστασίου

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2024

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της Θ. Ντάφλου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο τον χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά, της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Τεχνική και οικονομική αξιολόγηση τεχνολογιών
δέσμευσης, αποθήκευσης και αξιοποίησης βιομηχανικών
εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα»

ΘΕΟΦΑΝΩ ΝΤΑΦΛΟΥ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΠΑΣΧΑΛΙΔΟΥ

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ

Επίκουρος Καθηγητής, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2024

*Η παρούσα εργασία είναι αφιερωμένη
στις ανάσες της ζωής μου Αθηνά, Αμαλία και Αλίκη
και την κινητήρια δύναμη όλων, τον Χρήστο*

*Ευχαριστώ θερμά τη ΜΟΤΟΡ ΟΪΛ ΕΛΛΑΣ
για τη συνδρομή της στην εκπόνηση
αυτού του μεταπτυχιακού προγράμματος*

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή είναι ίσως ο μεγαλύτερος κίνδυνος που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα τα τελευταία χρόνια, με καταστροφικές συνέπειες που έχουν ήδη γίνει ορατές στην καθημερινή ζωή. Σύμφωνα με διεθνείς οργανισμούς και βάσει των εκτιμήσεων της επιστημονικής κοινότητας, το μέλλον του πλανήτη προβλέπεται ζοφερό, αν δεν αντιμετωπιστεί το φαινόμενο. Ήδη οι επιπτώσεις από την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας της Γης είναι εμφανείς, με πολλαπλές αρνητικές συνέπειες τόσο στα φυσικά όσο και στα ανθρωπογενή οικοσυστήματα. Για τον λόγο αυτόν, οι πολιτικές ηγεσίες σε όλο τον κόσμο έχουν κληθεί να λάβουν άμεσα μέτρα και να καταρτίσουν στρατηγικό πλάνο, προκειμένου να αποφευχθεί η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας της Γης σε επίπεδα μικρότερα του 1,5 °C σε σχέση με την προβιομηχανική εποχή. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), στα πλαίσια αυτής της δράσης, έθεσε ως στόχο να γίνει η Ευρώπη η πρώτη ήπειρος με μηδενικό ισοζύγιο άνθρακα, δηλαδή οι εκπεμπόμενες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) να είναι ίσες με αυτές που μπορούν να απορροφηθούν από το οικοσύστημα. Ο φιλόδοξος αυτός στόχος περιλαμβάνει δραστικά μέτρα μείωσης των εκπομπών σε όλους τους παραγωγικούς τομείς, χρηματοδότηση νέων τεχνολογιών για τη μείωση ή την αποφυγή εκπομπών, αποκατάσταση και δημιουργία νέων καταβοθρών άνθρακα, καθώς και οικονομική ενίσχυση των πολιτών, προκειμένου να προστατευθούν ή να αντιμετωπίσουν τις καταστροφές από την κλιματική αλλαγή.

Είναι προφανές ότι η μείωση των εκπεμπόμενων ποσοτήτων CO₂ που θεσμοθετήθηκε από την ΕΕ αφορά σε μεγάλο ποσοστό στην παραγωγή ενέργειας και στη βιομηχανική παραγωγή, δραστηριότητες οι οποίες είναι οι κυριότερες πηγές που συνεισφέρουν στην κλιματική αλλαγή. Οι παραπάνω πηγές είναι συνυφασμένες με την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη, ως εκ τούτου ο στόχος του μηδενικού ισοζυγίου άνθρακα είναι ουσιαστικά στόχος για τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ της βιωσιμότητας του πλανήτη και της οικονομικής ανάπτυξης.

Σε αυτόν τον στόχο, σύμφωνα με τους διεθνείς οργανισμούς, σημαντική θέση στα μέτρα μείωσης των εκπομπών κατέχουν οι τεχνολογίες δέσμευσης, αποθήκευσης και αξιοποίησης CO₂ (CCUS technologies). Οι τεχνολογίες αυτές θεωρούνται ο πυλώνας της οικονομικής βιωσιμότητας της βιομηχανίας, δεδομένου ότι δεν είναι εφικτό να μειωθούν άμεσα οι εκπομπές από ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες, χωρίς να μειωθεί η παραγωγικότητά τους, ενώ η παραγωγή ενέργειας αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές δεν εξασφαλίζει ενεργειακή ασφάλεια, ακόμα και με την προβλεπόμενη αύξηση της αποθηκευτικής

ικανότητας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η αλυσίδα της βιομηχανικής δέσμευσης άνθρακα, από την κατακράτηση των εκπομπών μέχρι τη μόνιμη αποθήκευση ή την αξιοποίησή τους, περιλαμβάνει διαφορετικές τεχνολογίες. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας σε κάθε στάδιο αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία στην οποία λαμβάνονται υπόψη η απόδοση, το οικονομικό κόστος, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς και οι τυχόν τεχνικοί περιορισμοί που μπορούν να προκύψουν σε κάθε εφαρμογή. Επιπλέον, και δεδομένου ότι μέχρι σήμερα όλες οι τεχνικές δεν έχουν εφαρμοστεί σε βιομηχανική και εμπορική κλίμακα, λαμβάνεται υπόψη και η τεχνολογική ετοιμότητα.

Στην παρούσα εργασία αναδεικνύεται η ανάγκη εφαρμογής των τεχνολογιών CCUS για την επίτευξη των στόχων απανθρακοποίησης της βιομηχανίας, με σκοπό τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Κατόπιν της παρουσίασης του νομοθετικού πλαισίου για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής στην ΕΕ, αναλύονται οι εφαρμοζόμενες και οι αναδυόμενες τεχνολογίες δέσμευσης, αποθήκευσης και αξιοποίησης CO₂. Επιπλέον, σε κάθε στάδιο της αλυσίδας, γίνεται σύγκρισή τους αναφορικά με την τεχνολογική τους ετοιμότητα, το οικονομικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και τους τυχόν περιορισμούς που μπορεί να προκύψουν σε κάθε εφαρμογή.

Λέξεις κλειδιά

Δέσμευση - αποθήκευση - αξιοποίηση διοξειδίου του άνθρακα, κλιματική αλλαγή, φαινόμενο του θερμοκηπίου, απανθρακοποίηση

“Technical and economical evaluation of carbon capture, storage
and utilization technologies”

Theofano Daflou

Abstract

Climate change is probably the greatest hazard facing humanity in recent years, with devastating consequences, already visible in everyday life. According to international organizations, and based on the assessments of the scientific community, the future of the planet is predicted to be bleak if the issue is not addressed. The effect of the Earth's atmosphere average temperature increase is already evident, with multiple negative impacts on both natural and man-made ecosystems. For this reason, political leaders around the world have been called upon to take immediate action and draw up a strategic plan, in order to keep the average temperature increase to less than 1.5 °C compared to the pre-industrial levels. The European Union (EU), as part of this action, set the goal of becoming the first continent with a zero carbon balance, i.e. the emitted amounts of carbon dioxide (CO₂) to be equal to those absorbed by the ecosystems. This ambitious goal includes drastic measures to reduce emissions in all productive sectors, investments in new technologies to mitigate or avoid emissions, restoration and creation of new carbon sinks, as well as financial support to citizens to protect them from (or cope with) disasters from climate change.

Obviously, the EU legislated decarbonization covers a large percentage of the energy and industrial production activities which are the main contributors to climate change. These sources are intertwined with economic and social development, therefore the goal of zero carbon balance is essentially an attempt to maintain balance between sustainability of the planet and economic development.

According to international organizations, CO₂ capture, storage and utilization technologies (CCUS technologies) play an important role in emission reduction measures. These technologies are considered the pillar of the economic viability of the industry, as it is impossible to directly reduce emissions from certain industrial processes without reducing their productivity, while the production of energy from renewable sources exclusively does not ensure energy security, even when considering the projected increase in the storage capacity of the energy storage systems. The chain of industrial carbon sequestration, from the capture of emissions to their permanent storage or utilization, includes different technologies. Selecting the appropriate technology at each stage is a complex process that takes into account performance, financial cost, overall environmental footprint, as well as any technical limitations that may arise. In addition, and given that to date not all techniques have been implemented on an industrial and commercial scale, technological readiness is also taken into account.

This thesis highlights the need to apply CCUS technologies to achieve the decarbonization of the industry sector in order to mitigate climate change. Following the presentation of the legislative framework for limiting climate change in the EU, the applied and emerging technologies for CO₂ capture, storage and utilization are analyzed. In addition, at each stage of the chain, they are discussed in terms of their technological readiness, the financial cost of installation and operation and any limitations that may arise.

Keywords

Carbon capture, storage, utilization, climate change, greenhouse effect, decarbonization

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Λέξεις κλειδιά	3
Abstract	5
Keywords	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Εικόνων	9
Κατάλογος Πινάκων.....	10
Συνομογραφίες & Ακρωνύμια.....	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
2. ΜΕΘΟΔΟΣ	19
3. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ Η ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	21
3.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου	21
3.2 Αέρια του θερμοκηπίου.....	21
3.3. Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις της.....	25
4. ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΕΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ.....	29
4.1 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία- Ευρωπαϊκός Κλιματικός Νόμος.....	29
4.2 Fit for 55 package.....	29
5. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΣΤΟΧΩΝ ΣΤΗΝ ΕΕ	34
6. ΕΘΝΙΚΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ	36
7. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΤΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑΣ	37
7.1 Νομοθετική πράξη για τη βιομηχανία καθαρών εκπομπών.....	37
7.2 Στρατηγική βιομηχανικής διαχείρισης άνθρακα.....	38
8. ΔΕΣΜΕΥΣΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO ₂ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	41
8.1 Τεχνολογίες δέσμευσης και απομάκρυνσης.....	41
8.2 Μεταφορά και αποθήκευση	48
9. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	60
9.2 Καύσιμα/Χημικά/Πλαστικά	64
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

Διαδικτυακές πηγές	73
Ελληνική βιβλιογραφία	73
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....	73

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ανθρώπινες και οικονομικές απώλειες της κλιματικής αλλαγής	12
Εικόνα 2: Ποσοστό εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως και στην ΕΕ	22
Εικόνα 3: Αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας ανά δεκαετία	26
Εικόνα 4: Προβλέψεις για την αίσθηση της θερμοκρασίας μέχρι το 2100.....	26
Εικόνα 5: Άνοδος μέσης στάθμης θάλασσας τα τριάντα τελευταία χρόνια	27
Εικόνα 6: Προτεινόμενη αύξηση εθνικών στόχων στην Οδηγία ESR.....	31
Εικόνα 7: Μείωση στόχων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου στα οχήματα σε σχέση με τους στόχους του 2021	32
Εικόνα 8: Μείωση συνολικών εκπομπών και ανά τομέα στην ΕΕ	34
Εικόνα 9: Στόχοι της ΕΕ για κλιματική ουδετερότητα σε συνδυασμό με την οικονομική ευημερία	35
Εικόνα 10: Αξιακή αλυσίδα διαχείρισης άνθρακα.....	39
Εικόνα 11: Εγκαταστάσεις CCS και ικανότητα δέσμευσης (Μtpra) το 2023 σε σχέση με το 2022.....	40
Εικόνα 12: Σχηματική σύγκριση διεργασιών τεχνολογιών post-combustion και oxy-fuel	46
Εικόνα 13: Υποδομή μεταφοράς και αποθήκευσης CO ₂ στη Νορβηγία-Northern Lights .	49
Εικόνα 14: Σχέδιο μονάδας υποδοχής και αποθήκευσης CO ₂ Πρίνου	50
Εικόνα 15: Δυνατότητα μόνιμης αποθήκευσης στον χρόνο σε σχέση με τον μηχανισμό κατακράτησης	56
Εικόνα 16: Άμεσες και κατόπιν μετατροπής χρήσεις δεσμευμένου CO ₂	60
Εικόνα 17: Δυναμικό αξιοποίησης CO ₂ ως προς την ποσότητα ανάκτησης και το συνολικό κλιματικό όφελος	66

Κατάλογος Πινάκων

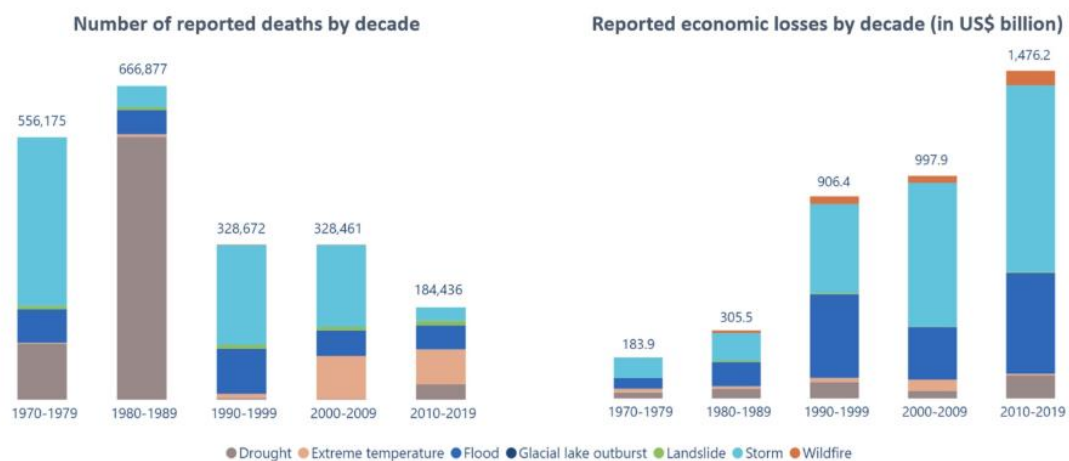
ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Απόδοση ηλεκτροχημικών μεθόδων σε συνδυασμό με τις λειτουργικές τους παραμέτρους.....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Τυπικές προδιαγραφές διακινούμενου προϊόντος σε αγωγούς	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Συγκριτική τεχνική και οικονομική αξιολόγηση μεθόδων μεταφοράς CO ₂	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Επίδρασεις ωκεάνιας αποθήκευσης CO ₂ στο θαλάσσιο οικοσύστημα.....	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Σύγκριση χώρων αποθήκευσης και τρέχουσα κατάσταση εφαρμογής.....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Παράγοντες επίδρασης ανθρακοποίησης δομικών υλικών.....	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Τάσεις μεθόδων αξιοποίησης CO ₂ ως προς τη δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης και την απομάκρυνση CO ₂ από την ατμόσφαιρα.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: Ανάλυση κυριότερων πλεονεκτημάτων, μειονεκτημάτων, κινδύνων και ευκαιριών (<i>SWOT analysis</i>) αλυσίδας αξίας CCUS	69

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

CATF	Clean Air Task Force
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
CH ₄	Μεθάνιο
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα
ETS	Emissions Trading System
ESR	Effort Sharing Regulation
FAR	Free Allocation Rules
GCCSI	Global Carbon Capture Storage Institute
GWP	Global Warming Potential
IEA	International Energy Agency
IPPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LULUCF	Land Use, Land-Use Change, and Forestry
NZIA	Net-Zero Industry Act
N ₂ O	Υποξείδιο του αζώτου
O ₃	Όζον
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
US EPA	United States Environmental Protection Agency
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΕΠ	Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν
ΕΕ/EU	Ευρωπαϊκή Ένωση/European Union
ΟΗΕ	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική κρίση που βιώνει ο πλανήτης τα τελευταία χρόνια είναι ίσως το πιο ανησυχητικό φαινόμενο της εποχής μας. Σε κάθε σημείο της Γης, τα ακραία καιρικά φαινόμενα και η εμφανής αλλαγή του κλίματος προκαλούν σοβαρές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Η αύξηση της θερμοκρασίας, το λιώσιμο των πάγων, η παρατεταμένη ανομβρία και οι φυσικές καταστροφές από τις πλημμύρες και τις πυρκαγιές έχουν ως συνέπεια την περιορισμένη πρόσβαση σε τροφή και νερό, με αποτέλεσμα την επιβάρυνση της δημόσιας υγείας, επιδημίες και αναγκαστική μετανάστευση, καθώς και εξαφάνιση σημαντικών ειδών πανίδας και χλωρίδας, που αποτελούν αναγκαίους κρίκους της αλυσίδας ζωής στον πλανήτη (IPCC, 2023). Τα παραπάνω οδηγούν σε μια βαθιά οικονομική και κοινωνική κρίση, με αποτέλεσμα κοινωνικές ανισότητες στο μεγαλύτερο ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού. Το 2023, το World Economic Forum παρουσίασε τις παγκόσμιες ανθρώπινες και οικονομικές απώλειες από τα ακραία καιρικά φαινόμενα των τελευταίων δεκαετιών (WEF, 2023a) (Εικόνα 1). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, παρόλο που οι θάνατοι από τα ακραία καιρικά φαινόμενα παρουσίασαν μείωση λόγω των έργων προστασίας των πληθυσμών, η οικονομική επίπτωση της κλιματικής αλλαγής πολλαπλασιάστηκε. Επιπλέον, μετά το 2000 αυξήθηκε η θνησιμότητα από υψηλές θερμοκρασίες και από το 1990 και έκτοτε πολλαπλασιάστηκαν οι οικονομικές καταστροφές από τις πλημμύρες.



Εικόνα 1: Ανθρώπινες και οικονομικές απώλειες της κλιματικής αλλαγής

(πηγή: WEF, 2023a)

Η κλιματική αλλαγή οφείλεται κυρίως στην ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία παράγει τα λεγόμενα «αέρια του θερμοκηπίου». Το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ο επιστημονικός όρος για τη φυσική διεργασία που συμβαίνει στον πλανήτη για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε επίπεδα που επιτρέπουν τη διατήρηση της ζωής. Η διαφορά μεταξύ της Γης και άλλων πλανητών είναι ότι, στη Γη, μέρος της γήινης (υπέρυθρης) ακτινοβολίας μπορεί να συγκρατηθεί από την ατμόσφαιρά της, με αποτέλεσμα τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, ο ορισμός αυτός σήμερα έχει πάρει άλλη διάσταση και αναφέρεται στη συνθήκη όπου, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου, δημιουργείται στοιβάδα που κατακρατά μεγαλύτερο ποσοστό της γήινης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας (global warming). Τα αέρια του θερμοκηπίου, είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), το όζον (O₃) και διάφορες αλογονούχες ενώσεις. Παράγονται κυρίως (ή αποκλειστικά) από την παραγωγή και τη χρήση προϊόντων τα οποία είναι σημαντικά για την ανθρώπινη διαβίωση. Επίσης, οι αλλαγές στις χρήσεις γης ως αποτέλεσμα της αστικοποίησης και της ανάγκης για δημιουργία περιοχών αγροτικής καλλιέργειας, καθώς και οι δασικές πυρκαγιές έχουν οδηγήσει σε περαιτέρω μεταβολή του κλίματος. Συνολικά, το CO₂ θεωρείται το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου, διότι οι εκπομπές του συμβάλλουν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στην κλιματική αλλαγή. Η Συμφωνία των Παρισίων δηλαδή η σύμβαση μεταξύ των μελών του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ) για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής που τέθηκε σε ισχύ τον Νοέμβριο του 2016, έθεσε ως στόχο τη διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη σε επίπεδα χαμηλότερα του 1,5 °C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, προκειμένου να μετριαστούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Η κλιματική κρίση είναι, επομένως, ένα μείζον πολιτικό θέμα, δεδομένου ότι έχει άμεσες και σοβαρές επιπτώσεις στον κοινωνικό ιστό. Η ΕΕ, με σκοπό τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής αλλά και την οικονομική βιωσιμότητα των επιχειρήσεων και των πολιτών της, προχώρησε στη δημιουργία της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Η Πράσινη Συμφωνία θέτει το νομοθετικό πλαίσιο για τη δημιουργία πακέτου μέτρων που θα έχουν κοινό στόχο την κλιματική ουδετερότητα της Ένωσης έως το 2050, με οικονομικά και κοινωνικά βιώσιμο τρόπο. Κλιματική ουδετερότητα (net-zero) νοείται το μηδενικό ισοζύγιο εκπομπών άνθρακα. Τα μέτρα που περιλαμβάνονται στο νομοθετικό πλαίσιο της Πράσινης Συμφωνίας αφορούν σε όλους τους παραγωγικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς τομείς. Καταρχήν θεσμοθετήθηκαν μειώσεις εκπομπών σε όλη την παραγωγική αλυσίδα, όπως βιομηχανία,

αγροτική παραγωγή και μεταφορές και μετάβαση σε καθαρή παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και καύσιμα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Παράλληλα, προβλέπονται οικονομικές ενισχύσεις τόσο για την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών για τον περιορισμό των εκπομπών, όσο και για τις ευπαθείς ομάδες του πληθυσμού που πλήττονται οικονομικά. Τα νομοθετήματα και οι στόχοι που περιέχονται σε αυτά έχουν υιοθετηθεί από τα Κράτη-Μέλη. Στην Ελλάδα συνοψίζονται στον Εθνικό Κλιματικό Νόμο.

Τα αποτελέσματα του νομοθετικού πλαισίου της Πράσινης Συμφωνίας είναι ήδη ορατά τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με τις ετήσιες αναφορές της ΕΕ για το κλίμα, παρουσιάζεται μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με αυτές του 1990, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται αύξηση του μέσου ακαθάριστου εθνικού προϊόντος στην Ένωση. Ωστόσο, προβλέπεται ότι θα χρειαστεί περισσότερη προσπάθεια, ώστε η Ευρωπαϊκή βιομηχανία να είναι ανταγωνιστική και βιώσιμη σε σχέση με τις βιομηχανίες παγκοσμίως. Για τον λόγο αυτόν, στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Συμφωνίας για το κλίμα, δημιουργήθηκαν στρατηγικές με στόχο τη βιωσιμότητα των επιχειρήσεων παράλληλα με αυτόν της επίτευξης της κλιματικής ουδετερότητας. Σκοπός τους είναι να διασφαλιστεί η κλιματική ουδετερότητα παράλληλα με την ενεργειακή αυτονομία της Ένωσης, μέσω τεχνολογιών και εγκαταστάσεων που θα αναπτυχθούν εντός των συνόρων της. Με τον τρόπο αυτόν, επιτυγχάνονται οι κλιματικοί στόχοι σε συνδυασμό με την αποφυγή διαφυγής κερδών προς τρίτες χώρες και με τη δημιουργία ευκαιριών απασχόλησης και επιπλέον επενδύσεων. Οι στρατηγικές περιλαμβάνουν ενίσχυση της έρευνας και επενδυτικά προγράμματα για νέες τεχνολογίες μείωσης ή αποφυγής εκπομπών. Στις τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνονται οι τομείς της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, της ανάπτυξης δικτύων, της παραγωγής βιώσιμων εναλλακτικών καυσίμων, της παραγωγής υδρογόνου και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Κυρίως όμως εστιάζονται στη δέσμευση, αποθήκευση και τη χρήση CO₂ (CCUS, Carbon Capture Utilization and Storage).

Ο Περιβαλλοντικός Οργανισμός Clean Air Task Force (CATF) παρουσίασε τους λόγους που η δέσμευση, η αποθήκευση και η αξιοποίηση του CO₂ θεωρείται η μοναδική λύση για την επίτευξη των στόχων απανθρακοποίησης. Σύμφωνα με την αναφορά του CATF (2023), οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν από τους μεγαλύτερους Ευρωπαϊκούς Οργανισμούς έδειξαν ότι, χωρίς την εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα των εγκαταστάσεων δέσμευσης, αποθήκευσης και αξιοποίησης CO₂, δεν θα είναι εφικτός ο στόχος της κλιματικής ουδετερότητας το 2050. Αυτό, διότι ο περιορισμός των εκπομπών κυρίως από τη βιομηχανία έχει πεπερασμένο όριο, δεδομένου ότι οι εκπομπές από ορισμένες

βιομηχανικές διεργασίες (π.χ. παραγωγή τσιμέντου και χάλυβα) δεν είναι δυνατόν να μειωθούν χωρίς να μειωθεί και η παραγωγή των προϊόντων. Επίσης, διότι οι ΑΠΕ δεν μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα χωρίς την υποστήριξη των αποθηκευτικών συστημάτων και των ορυκτών καυσίμων, ενώ οι λύσεις για τη χρήση καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα δεν θεωρούνται οικονομικές σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα (π.χ. φυσικό αέριο).

Οι τεχνολογίες δέσμευσης έχουν αναπτυχθεί λαμβάνοντας υπόψη την απόδοσή τους ως προς την καθαρότητα του CO₂, σε συνδυασμό με την οικονομική βιωσιμότητά τους και το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Στον σχεδιασμό λαμβάνεται, επίσης, υπόψη κατά πόσο η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Οι τεχνολογίες δέσμευσης διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με το στάδιο της διεργασίας όπου γίνεται η δέσμευση και με το μέσο που χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση για την παραγωγή του CO₂: πριν την καύση (pre-combustion), μετά την καύση (post-combustion), με χρήση οξυγόνου (oxy-fuel combustion) και με χρήση οξειδίων μετάλλων (chemical looping).

Η τεχνική «πριν την καύση» πραγματοποιείται με επεξεργασία του καυσίμου πριν την καύση, μέσω αναμόρφωσης με ατμό ή με μερική οξείδωση με οξυγόνο ή με συνδυασμό αυτών, από όπου παράγεται CO₂ και υδρογόνο (H₂). Στη συνέχεια, γίνεται διαχωρισμός του CO₂ και του H₂, συνήθως με διαλύματα χημικών και φυσικών διαλυτών ή με μεμβράνες. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι είναι οικονομική και εφαρμόζεται ήδη σε πολλές διεργασίες με ικανοποιητικές αποδόσεις, ενώ το παραγόμενο H₂ μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω ως καύσιμο. Κύρια μειονεκτήματα είναι ότι απαιτείται μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση και δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις.

Η τεχνολογία «post-combustion», σε αντίθεση με την «pre-combustion» μέθοδο, διαχωρίζει το CO₂ από τα καυσαέρια της διεργασίας. Πριν τη δέσμευση του CO₂ απαιτείται ο καθαρισμός των καυσαερίων από θειούχες και αζωτούχες ενώσεις και σωματίδια. Ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει είτε με παραδοσιακές μεθόδους (απορρόφηση, προσρόφηση, ηλεκτροχημικές διεργασίες) είτε με αναδυόμενες τεχνικές, όπως είναι ο διαχωρισμός με μεμβράνες και χημικές αντιδράσεις, οι κρυογενικές μέθοδοι και μέσω απορρόφησης από μικροοργανισμούς. Οι παραδοσιακές μέθοδοι διαχωρισμού πλεονεκτούν αναφορικά με την απλή και αποδεδειγμένη εφαρμογή τους σε μεγάλη κλίμακα, τα λίγα απόβλητα και τις χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Ωστόσο, η απορρόφηση θεωρείται περιβαλλοντικά μη φιλική και σχετικά ασύμφορη οικονομικά μέθοδος, λόγω της χρήσης διαλυτών, ενώ ενέχεται

και κίνδυνος διάβρωσης του εξοπλισμού. Επίσης, η προσρόφηση δεν θεωρείται κατάλληλη για μεγάλους όγκους καυσαερίων και έχει χαμηλή επιλεκτικότητα. Τέλος οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι έχουν χαμηλές αποδόσεις απομάκρυνσης. Οι αναδύμενες τεχνικές προκρίνονται για το χαμηλό τους περιβαλλοντικό αποτύπωμα και τις μεγάλες αποδόσεις που μπορούν να επιτύχουν, ωστόσο οι περισσότερες δεν έχουν εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα, υπάρχουν περιορισμοί για την εφαρμογή τους σε υφιστάμενες μονάδες και σε κάποιες περιπτώσεις έχουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

Η μέθοδος «oxy-fuel», δηλαδή η χρήση καθαρού οξυγόνου αντί αέρα για τον διαχωρισμό του CO₂, είναι παρόμοια με την «post-combustion» τεχνική, με το πλεονέκτημα της υψηλότερης απόδοσης και της μεγαλύτερης καθαρότητας προϊόντος. Το μειονέκτημά της είναι ότι απαιτούνται μεγάλες ενεργειακές καταναλώσεις και ως εκ τούτου μεγαλύτερο κόστος για την παραγωγή του οξυγόνου. Για την αποφυγή της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης για την κάλυψη των απαιτήσεων σε οξυγόνο, αναπτύσσονται νέες τεχνικές όπως η κρυογενική απόσταξη. Το υψηλό κόστος της ενέργειας μπορεί, επίσης, να καλυφθεί με τη χρήση βιοκαυσίμων.

Στην ίδια λογική με τη μέθοδο «oxy-fuel» κινείται η τεχνική «chemical looping», όπου το οξυγόνο που χρησιμοποιείται για την καύση είναι στη μορφή οξειδίων μετάλλων. Στην περίπτωση αυτή, τα μέταλλα λειτουργούν ως «μεταφορείς» του οξυγόνου (oxygen carriers) σε μια κυκλική διαδικασία αναγωγής για την παραγωγή του CO₂ και οξείδωσης του μετάλλου για την ανακύκλωση του «μεταφορέα». Αν και η μέθοδος είναι σε φάση ανάπτυξης, προκρίνεται λόγω του μειωμένου λειτουργικού κόστους για την παραγωγή οξυγόνου και την ελαχιστοποίηση των κινδύνων ασφαλείας που μπορεί να προκύψουν από τη διαχείρισή του.

Η αλυσίδα διαχείρισης του δεσμευμένου CO₂ περιλαμβάνει και δυο ακόμη σημαντικά μέρη: τη μεταφορά και τη μόνιμη αποθήκευσή του ή την αξιοποίησή του. Δεδομένου ότι η ποσότητα του δεσμευμένου CO₂ έχει αυξηθεί κατά πολύ και προέρχεται από διάφορες εγκαταστάσεις, η δημιουργία κοινών δικτύων μεταφοράς και μεμονωμένων υποδομών που θα συγκεντρώνουν τις ποσότητες προς αποθήκευση ή χρήση παρουσιάζεται ως η οικονομικότερη λύση. Οι υποδομές αυτές διαθέτουν δεξαμενές για προσωρινή αποθήκευση μέχρι τη μόνιμη διάθεση ή την αξιοποίηση σε άλλες εφαρμογές. Η μεταφορά προς τις εγκαταστάσεις αυτές μπορεί να γίνει μέσω αγωγών, πλοίων, φορτηγών και τρένων. Η μεταφορά με κοινούς αγωγούς, όπου είναι εφικτό, θεωρείται ο οικονομικότερος και αποδοτικότερος τρόπος. Απαιτείται, ωστόσο, λεπτομερής σχεδιασμός αναφορικά με τις

προδιαγραφές του διακινούμενου CO₂ και την όδευση του αγωγού σε σχέση με το κόστος του, τη δυνατότητα επιθεώρησης και συντήρησής του και τους γεωφυσικούς περιορισμούς που μπορεί να υπάρξουν. Μεταξύ των υπόλοιπων μέσων μεταφοράς, τα πλοία πλεονεκτούν ως προς το κόστος, λόγω κυρίως της δυνατότητας διακίνησης μεγάλων ποσοτήτων και σε μεγάλες αποστάσεις.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂ είναι η δυνατότητα παραμονής του στον επιλεγμένο χώρο στη διάρκεια του χρόνου και η πιθανή επίδρασή του στο οικοσύστημα σε περίπτωση διαφυγής. Η μοναδική μέχρι σήμερα διαθέσιμη μέθοδος για την εισαγωγή του CO₂ στον αποθηκευτικό χώρο είναι η έγχυση, ενώ η κατακράτησή του πραγματοποιείται μέσω φυσικών και γεωχημικών διεργασιών. Η αποφυγή έκλυσης του αποθηκευμένου υλικού εξαρτάται από τους μηχανισμούς κατακράτησής του. Αυτοί κατηγοριοποιούνται σε φυσικούς και γεωχημικούς, ανάλογα με τους δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ των πετρωμάτων και του CO₂. Η αποτελεσματικότερη μέθοδος είναι εκείνη που μέσω αντίδρασης μετατρέπει το CO₂ σε ανόργανα ανθρακικά υλικά. Κατάλληλοι γεωλογικοί χώροι είναι τα εξαντλημένα και τα μερικώς εξαντλημένα ή ανεκμετάλλευτα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, τα βαθιά μη εξορύξιμα κοιτάσματα άνθρακα ή κλίνες CH₄ και οι βαθείς αλατούχοι υδροφορείς. Μέχρι σήμερα, η αποθήκευση έχει εφαρμοστεί κατά κύριο λόγο στα μερικώς εξαντλημένα ή ανεκμετάλλευτα κοιτάσματα πετρελαίου και στους αλατούχους υδροφορείς. Στην πρώτη περίπτωση επιτυγχάνεται και ενίσχυση της εξόρυξης του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, ενώ η δεύτερη περίπτωση προκρίνεται λόγω ευκολίας εφαρμογής και χαμηλού κόστους. Σε όλες τις περιπτώσεις, σημαντικός παράγοντας είναι η δυνατότητα ανάπτυξης δικτύου παρακολούθησης τυχόν διαρροών προς το οικοσύστημα. Εκτός από τους γεωλογικούς χώρους, σε φάση διερεύνησης είναι και η αποθήκευση στα βάθη των ωκεανών, λόγω της ικανότητάς τους να υποδεχτούν μεγάλες ποσότητες CO₂. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω έγχυσής του στην επιφάνεια του βυθού ή μέσω διάλυσής του στο υδατικό σώμα και δημιουργία ένυδρων ενώσεων. Μέχρι σήμερα, ωστόσο, η συγκεκριμένη τεχνική είναι μη εφαρμόσιμη, λόγω του ότι ενέχονται σοβαροί κίνδυνοι διαφυγής μεγάλων ποσοτήτων και επιβάρυνσης του θαλάσσιου οικοσυστήματος.

Η αξιοποίηση, τέλος, του CO₂ αποτελεί ένα συμπληρωματικό εργαλείο της μόνιμης αποθήκευσής του, το οποίο, μέσω και της ενίσχυσης της κυκλικής οικονομίας, μπορεί να παράγει προϊόντα προστιθέμενης αξίας με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα. Σήμερα, οι κυριότερες εφαρμογές χρήσης του CO₂ είναι στην παραγωγή λιπασμάτων (ουρία) και την

ανάκτηση πετρελαιοειδών. Επίσης, απαντάται σε βιομηχανίες τροφίμων και ποτών, παραγωγής μετάλλων και φαρμακευτικών/ιατρικών ειδών. Σε φάση εμπορικής ανάπτυξης, ωστόσο, βρίσκεται η αξιοποίηση του CO₂ στον κατασκευαστικό τομέα, τον τομέα των καυσίμων, των πλαστικών, των χημικών και των εδαφοβελτιωτικών. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις απαιτείται περαιτέρω έρευνα, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και να αυξηθεί η απόδοση της μόνιμης απορρόφησης CO₂ στα προϊόντα.

Η διαδικασία αξιολόγησης της αξιοποίησης του CO₂ περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες, κυριότεροι των οποίων είναι το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα σε όλα τα στάδια παραγωγής και χρήσης του προϊόντος και το μέγεθος της αγοράς που απευθύνεται το προϊόν. Κυρίαρχος τομέας όσον αφορά στην εμπορική αξιοποίηση του CO₂ είναι τα κατασκευαστικά υλικά, τα οποία λόγω μεγάλης ζήτησης μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες CO₂, ενώ έχουν το πλεονέκτημα να το απομακρύνουν μόνιμα από την ατμόσφαιρα. Επίσης, σημαντική αξιοποίηση του CO₂ είναι η παραγωγή καυσίμων που μπορούν να προέλθουν είτε από απευθείας υδρογόνωση του CO₂ είτε από άλγη και πολυμερή.

Η ανάγκη για άμεση και δραστική μείωση των βιομηχανικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, σε συνδυασμό με την οικονομική βιωσιμότητα και την κοινωνική ανάπτυξη, έχει καταστήσει τις τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης ή αξιοποίησης CO₂ μια από τις κύριες στρατηγικές απανθρακοποίησης. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η τεχνική και οικονομική ανάλυση των μέχρι σήμερα διαθέσιμων τεχνολογιών σε κάθε στάδιο της αλυσίδας αξίας διαχείρισης των βιομηχανικών εκπομπών άνθρακα. Μέσω αυτής της ανάλυσης, παρουσιάζεται η σύγκριση των διαθέσιμων τεχνολογιών αναφορικά με την απόδοσή τους, τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο και την οικονομική βιωσιμότητά τους. Παράλληλα, η εργασία παρουσιάζει τις πολιτικές της ΕΕ για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, όπου, όσον αφορά στις βιομηχανικές εκπομπές, θεμελιώδης στρατηγική της είναι η εφαρμογή των τεχνολογιών CCUS.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ

Αρχικά γίνεται παρουσίαση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής. Στα πλαίσια της παρουσίασης αυτής, καθορίζονται οι ρύποι που συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ο τρόπος με τον οποίο προκαλούν την κλιματική αλλαγή. Από τα παραπάνω, έμφαση δίδεται στο CO₂, το αέριο του θερμοκηπίου με τις μεγαλύτερες εκπομπές. Για το κάθε αέριο αναλύονται οι κυριότερες πηγές εκπομπής του, που εντοπίζονται κατά κύριο λόγο στη βιομηχανική παραγωγή. Στην παρουσίαση των ρύπων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου περιλαμβάνεται και ο δείκτης του Παγκοσμίου Δυναμικού Θέρμανσης (GWP, Global Warming Potential), ο οποίος καθορίζει τη συνεισφορά του κάθε αερίου του θερμοκηπίου σε σχέση με το CO₂, ως προς τη δυνατότητα απορρόφησης της γήινης ακτινοβολίας και την παραμονή του στην ατμόσφαιρα.

Η εργασία εστιάζεται επιπλέον στις πολιτικές της ΕΕ, της πρώτης ηπείρου που έθεσε τον στόχο *net-zero*, δηλαδή του μηδενικού ισοζυγίου άνθρακα μέχρι το 2050. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, η ΕΕ δεσμεύτηκε μέσω της Πράσινης Συμφωνίας και της νομοθετικής της αποτύπωσης, τον Ευρωπαϊκό Κλιματικό Νόμο, για υποχρεωτική μείωση των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στην αλλαγή του κλίματος από όλους τους παραγωγικούς τομείς, τις μεταφορές και την παραγωγή ενέργειας, ενώ περιλαμβάνονται και ενδιάμεσοι στόχοι. Οι πολιτικές αυτές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δράσεων που περιλαμβάνουν, εκτός από μείωση των εκπομπών, και χρηματοδότηση νέων τεχνολογιών για την επίτευξη των στόχων μείωσης. Επίσης, περιλαμβάνουν ενίσχυση των κοινωνικών ομάδων και επιχειρήσεων που πλήττονται από την κλιματική αλλαγή. Ανάμεσα σε αυτές τις πολιτικές είναι και η υιοθέτηση στρατηγικού πλάνου για τη βιομηχανική διαχείριση του άνθρακα, με σκοπό τη δημιουργία «net-zero» βιομηχανικής παραγωγής.

Στη διαχείριση βιομηχανικού άνθρακα πρωταρχική θέση κατέχουν οι τεχνολογίες CCUS, καθώς η εφαρμογή τους έχει ως αποτέλεσμα την άμεση και μόνιμη απομάκρυνση του CO₂, σε συνδυασμό με τη διατήρηση της βιωσιμότητας της βιομηχανικής παραγωγής. Η εργασία παρουσιάζει την αλυσίδα αξίας διαχείρισης του εκπεμπόμενου CO₂ και τη σύνθετη διαδικασία επιλογής τεχνολογίας για κάθε στάδιο. Η επιλογή αυτή στηρίζεται στην τεχνολογική ετοιμότητα των μεθόδων, τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε συγκεκριμένη διεργασία, τα θέματα ασφάλειας και το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Επιπλέον, αποτυπώνεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μεθόδων σε κάθε στάδιο, όπου συμπεραίνεται ότι η αποδοτικότητα των μεθόδων είναι σε άμεση συνάρτηση με την

ενδεχόμενη δημιουργία αποβλήτων από τις διεργασίες απομάκρυνσης, μεταφοράς, αποθήκευσης και χρήσης CO₂. Στις διαδικασίες που ακολουθούν τη δέσμευση του CO₂, δηλαδή κατά τη μεταφορά του, τη μόνιμη αποθήκευσή του και τη χρήση του, απαιτείται λεπτομερής τεχνικός σχεδιασμός, ώστε να διασφαλιστεί ότι το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα δεν θα επιβαρύνει το ισοζύγιο άνθρακα και τους κλιματικούς στόχους.

Στην εργασία παρουσιάζονται οι μέθοδοι δέσμευσης του CO₂, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το στάδιο της διεργασίας που εφαρμόζονται και με το μέσο διαχωρισμού του προϊόντος. Από τα αποτελέσματα της τεχνοοικονομικής σύγκρισης των μεθόδων, φαίνεται ότι οι αναδυόμενες τεχνολογίες δέσμευσης και διαχωρισμού μπορούν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές, λόγω του ότι προσφέρουν μεγάλη απόδοση, με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν έχουν εφαρμοστεί σε εγκαταστάσεις μεγάλης βιομηχανικής κλίμακας, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτούν αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση. Η τελευταία οδηγεί στην αύξηση του κόστους αλλά και των εκπομπών και είναι ζήτημα που μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ΑΠΕ.

Η υιοθέτηση πρακτικών δέσμευσης από τη βιομηχανία είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κοινών υποδομών συγκράτησης CO₂ από διάφορες εγκαταστάσεις. Οι εγκαταστάσεις αυτές είτε αποθηκεύουν μόνιμα το CO₂, είτε το διανέμουν προς χρήση. Στην εργασία παρουσιάζονται οι τρόποι μεταφοράς του δεσμευμένου CO₂ προς τις εγκαταστάσεις, ενώ γίνεται σύγκρισή τους ως προς την οικονομική βιωσιμότητα και την τεχνολογική εφαρμογή.

Η μόνιμη αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂ αποτελεί σημαντικό ζήτημα αναφορικά με τη διαθεσιμότητα των αποθηκευτικών χώρων, κυρίως όμως αναφορικά με τη διάρκεια παραμονής του σε αυτούς. Η εργασία αναλύει την ικανότητα των διαθέσιμων αποθηκευτικών χώρων να συγκρατήσουν το CO₂ στη διάρκεια του χρόνου, είτε μέσω φυσικής κατακράτησης είτε μέσω μετατροπής του. Επιπλέον, στη σύγκριση λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα παρακολούθησης του αποθηκευτικού χώρου, προκειμένου να αποφευχθεί η διατάραξη του οικοσυστήματος από τυχόν διαρροές, ενώ εξετάζεται και το οικονομικό κόστος έγχυσης.

Τέλος, η εργασία παρουσιάζει τις δυνατότητες αξιοποίησης του CO₂ που δεσμεύεται από τις βιομηχανικές διεργασίες ή από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η αξιοποίηση του CO₂ μπορεί να υποστηρίξει την επίτευξη των στόχων απανθρακοποίησης της βιομηχανίας. Αν και το εύρος εφαρμογής είναι δυνητικά μεγάλο, μέχρι σήμερα παρουσιάζονται ζητήματα που άπτονται κυρίως του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος από τη χρήση του προϊόντος και της εμπορικής ανάπτυξής του σε σχέση με το κόστος παραγωγής.

3. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ Η ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

3.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο που επιτρέπει τη ζωή στη Γη. Ορίζεται ως η διαδικασία όπου ένα μέρος της εκπεμπόμενης γήινης ακτινοβολίας κατακρατείται από την ατμόσφαιρα και διατηρεί τη θερμοκρασία σε επίπεδα ανεκτά για τη βιωσιμότητα της χλωρίδας και της πανίδας. Χωρίς τη φυσική αυτή διεργασία, η θερμοκρασία της Γης, θα ήταν $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, κάτι που θα καθιστούσε τη ζωή σε αυτή αδύνατη. Τα τελευταία χρόνια ο όρος αυτός, ωστόσο, αναφέρεται στην έξαρση του φαινομένου, σύμφωνα με την οποία η κατακρατούμενη ακτινοβολία είναι περισσότερη, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, τα οποία δημιουργούν μια στριβάδα που εμποδίζει τη γήινη ακτινοβολία να διαφύγει από την ατμόσφαιρα της Γης. Τα αέρια του θερμοκηπίου, σε αντίθεση με τα άλλα αέρια της ατμόσφαιρας, είναι διαφανή ως προς την υπεριώδη ακτινοβολία του Ήλιου, αλλά αδιαφανή ως προς την υπέρυθη γήινη ακτινοβολία. Λόγω των αυξημένων ανθρωπογενών εκπομπών των αερίων αυτών, η εκπεμπόμενη γήινη ακτινοβολία παγιδεύεται εντός της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα την διαταραχή του ισοζυγίου ενέργειας και την αύξηση της θερμοκρασίας.

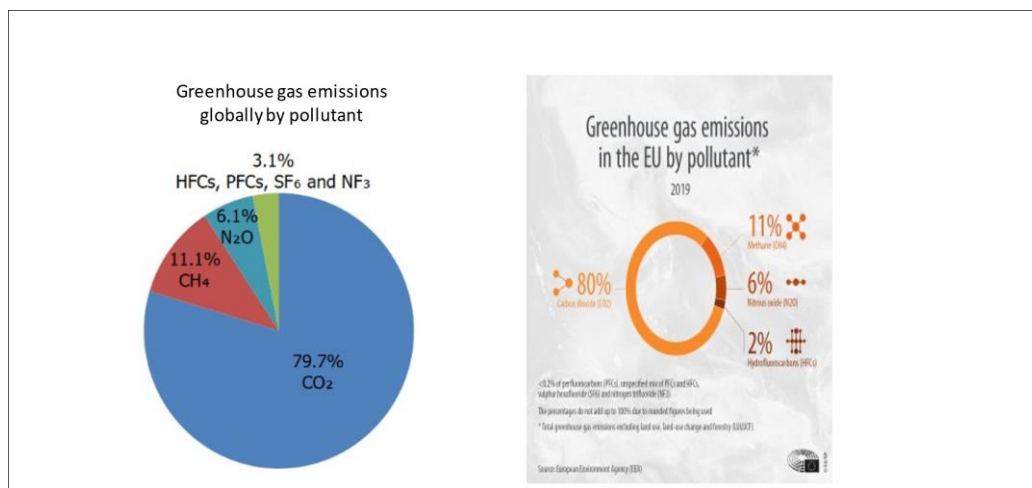
3.2 Αέρια του θερμοκηπίου

Με τη Συμφωνία των Παρισίων, δηλαδή τη σύμβαση των κρατών του ΟΗΕ για την αντιμετώπιση της απειλής της κλιματικής αλλαγής, που τέθηκε σε ισχύ τον Νοέμβριο του 2016, καθορίστηκαν τα επτά σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου και οι τρόποι μείωσης της συγκέντρωσής τους, ώστε να μετριαστεί η κλιματική αλλαγή. Η Συμφωνία των Παρισίων υιοθετήθηκε τον Δεκέμβριο του 2015 από 55 Εταίρους των Ηνωμένων Εθνών (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) οι εκπομπές των οποίων αντιστοιχούν συνολικά στο 55% των παγκόσμιων εκπομπών. Η Συμφωνία έχει τους κάτωθι στόχους:

1. Συγκράτηση της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από τους $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με τα επίπεδα της προβιομηχανικής εποχής, με αισιόδοξο στόχο τον περιορισμό της αύξησής της κάτω από $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Με τον τρόπο αυτόν, θα περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

2. Αύξηση της ικανότητας προσαρμογής στις αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με τρόπους που δεν απειλούν τη διατροφική ασφάλεια.
3. Ροές χρηματοδότησης ως προς τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την ανάπτυξη κλιματικής προσαρμοστικότητας.

Τα αέρια του θερμοκηπίου και το ποσοστό εκπομπών τους παγκοσμίως και στην ΕΕ παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Ποσοστό εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως και στην ΕΕ

(πηγή: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>, EEA 2023a)

Οι κύριες ανθρωπογενείς πηγές των βασικών αερίων του θερμοκηπίου και η συμβολή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως παρουσιάζονται από τον Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US EPA, United States Environmental Protection Agency) παρατίθενται παρακάτω.

3.2.1 Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Πρόκειται για το κύριο αέριο του θερμοκηπίου. Παρόλο που αποτελεί φυσικό συστατικό της ατμόσφαιρας ως μέρος του κύκλου του άνθρακα, η συγκέντρωσή του αυξήθηκε μετά τη βιομηχανική επανάσταση, λόγω άμεσων ανθρωπογενών εκπομπών, αλλά και λόγω της επίδρασής του στην ικανότητα των φυσικών οικοσυστημάτων, όπως τα δάση και το έδαφος, να το απορροφούν από την ατμόσφαιρα. Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής CO₂ είναι η καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας και τις μεταφορές, καθώς και ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες (παραγωγή τσιμέντου και χάλυβα) και οι αλλαγές

χρήσης γης (Land Use, Land-Use Change, and Forestry). Συνοπτικά, οι πηγές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μεταφορές: Η καύση ορυκτών καυσίμων, κυρίως βενζίνης και diesel, στα μέσα που μεταφέρουν ανθρώπους και αγαθά είναι η κυριότερη πηγή εκπομπής CO₂. Στις μεταφορές περιλαμβάνονται οι οδικές, οι αεροπορικές και οι ακτοπλοϊκές.
- Ηλεκτρική ενέργεια: Αντίστοιχα με τις μεταφορές, μεγάλη συμβολή στις εκπομπές CO₂ έχει και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, με διαφορετικές εκπομπές το καθένα. Το φυσικό αέριο είναι το καύσιμο με τις λιγότερες εκπομπές.
- Βιομηχανία: Οι βιομηχανικές διεργασίες, όπως η παραγωγή τσιμέντου, χάλυβα, σιδήρου και χημικών, εκπέμπουν CO₂ ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων. Επιπλέον, για τις ενεργειακές ανάγκες της παραγωγής, γίνεται καύση ορυκτών καυσίμων.
- Χρήσεις γης: Τα φυσικά οικοσυστήματα όπως τα δάση και τα λιβάδια λειτουργούν ως «καταβόθρες» (sinks) CO₂, δηλαδή το δεσμεύουν από την ατμόσφαιρα. Ως εκ τούτου, η διαχείρισή τους, όπως η χρήση τους και η αλλαγή χρήσης τους, είναι κρίσιμη για τη διατήρηση του ισοζυγίου άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

3.2.2 Μεθάνιο (CH₄)

Το μεθάνιο που εκπέμπεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες προέρχεται από τη βιομηχανία και την παραγωγή ενέργειας, τις καλλιέργειες και την εκτροφή ζώων, τη χρήση γης και τη διαχείριση των αποβλήτων. Επιπλέον, φυσικές διεργασίες στο έδαφος και την ατμόσφαιρα μπορούν να συμβάλλουν ως «καταβόθρες». Σε παγκόσμια κλίμακα, οι εκπομπές CH₄ προέρχονται κατά 50-65% από ανθρωπογενείς διεργασίες. Οι τομείς που συμβάλλουν στις εκπομπές CH₄ παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αγροτικός τομέας: Ο αγροτικός τομέας είναι η μεγαλύτερη πηγή εκπομπής CH₄. Η εκτροφή ζώων όπως βοοειδών, χοίρων και αιγοπροβάτων για παραγωγή διατροφικών προϊόντων, παράγει CH₄ μέσω της φυσικής διεργασίας χώνευσης των ζώων. Επιπλέον, σημαντικές ποσότητες παράγονται κατά τη διαχείριση και την αποθήκευση των ζωικών απορριμμάτων.
- Παραγωγή ενέργειας και βιομηχανία: Τα συστήματα παραγωγής, επεξεργασίας, διακίνησης και αποθήκευσης φυσικού αερίου και παραγωγής, διύλισης, διακίνησης και αποθήκευσης του αργού πετρελαίου και των προϊόντων του είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή εκπομπής CH₄ παγκοσμίως. Επίσης, η εξόρυξη γαιάνθρακα συμβάλλει σημαντικά σε αυτές.

ο Οικιακά και βιομηχανικά απόβλητα: Σύμφωνα με την EPA, η διαχείριση των αποβλήτων σε Χώρους Υγιεινής Ταφής είναι η τρίτη μεγαλύτερη πηγή εκπομπής CH₄ στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Επίσης, CH₄ παράγεται κατά τη διαχείριση υγρών αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων.

ο Χρήσεις γης: Σημαντικές εκπομπές CH₄ παράγονται κατά τη διαχείριση και αλλαγή χρήσης των οικοσυστημάτων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι δασικές πυρκαγιές για τη δημιουργία εκτάσεων καλλιέργειας, η διαχείριση των υδατικών συστημάτων για παραγωγή πόσιμου νερού και η αποσύνθεση οργανικών υλών στους υγροτόπους.

Οι φυσικές διεργασίες που παράγουν CH₄ είναι κυρίως οι φυσικοί (χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση) υγρότοποι, λόγω των βακτηρίων που αποσυνθέτουν σε ανοξικές συνθήκες οργανική ύλη. Άλλες φυσικές πηγές εκπομπής CH₄ είναι οι ωκεανοί, τα ηφαίστεια και οι δασικές πυρκαγιές που προκαλούνται από φυσικά φαινόμενα.

3.2.3 Υποξείδιο του αζώτου (N₂O)

Το N₂O είναι, όπως και το CO₂, φυσικό συστατικό της ατμόσφαιρας και παράγεται κατά τον κύκλο του αζώτου. Ωστόσο, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι κατά 40% υπεύθυνες για τις εκπομπές του στην ατμόσφαιρα. Οι πηγές που συμβάλλουν στην αύξηση της συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα είναι:

ο Αγροτικές καλλιέργειες, χρήσεις γης και αλλαγή χρήσεων γης και διαχείριση δασών: Το N₂O προκύπτει από γεωργικές πρακτικές όπως η χρήση λιπασμάτων, η διαχείριση της κοπριάς και η καύση των αγροτικών υπολειμμάτων. Επίσης, παράγεται από δασικές πυρκαγιές και χρήση συνθετικών λιπασμάτων σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

ο Καύση καυσίμων: Το N₂O παράγεται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων. Η ποσότητα εκπομπής εξαρτάται από το καύσιμο, την τεχνολογία της καύσης, τη συντήρηση του εξοπλισμού και τις λειτουργικές συνθήκες.

ο Βιομηχανία: Η παραγωγή χημικών, όπως του νιτρικού οξέος για την παραγωγή συνθετικών λιπασμάτων ή του αδιπικού οξέος για την παραγωγή συνθετικών ινών, παράγουν N₂O.

ο Διαχείριση αποβλήτων: Τα αστικά απόβλητα περιέχουν ουρία, αμμωνία και πρωτεΐνες. Κατά την επεξεργασία τους και στο στάδιο της απονιτροποίησης παράγουν N₂O.

Το N₂O προκύπτει και από φυσικές πηγές λόγω της συμμετοχής του στον κύκλο του αζώτου. Κυρίως προκύπτει από την αποσύνθεση του αζώτου από βακτήρια σε εδάφη και

ωκεανούς. Μπορεί να δεσμευθεί από την ατμόσφαιρα, είτε από ορισμένα βακτήρια, είτε λόγω της καταστροφής του από την υπεριώδη ακτινοβολία και άλλες χημικές αντιδράσεις.

3.2.4 Φθοριούχα αέρια (HFCs, PFCs, NF₃, SF₆)

Τα φθοριούχα αέρια (υδροφθοράνθρακες, φθοράνθρακες, φθοριούχο άζωτο και αζαφθοριούχο θείο) προέρχονται σχεδόν αποκλειστικά από ανθρωπογενείς πηγές. Οι εκπομπές τους συνδέονται με τη χρήση τους ως ψυκτικά μέσα, προωθητικά αεροζόλ, διογκωτικά αφρών, διαλύτες και άλλα προϊόντα οικιακής και βιομηχανικής χρήσης. Επιπλέον, φθοριούχα αέρια παράγονται από την παραγωγή αλουμινίου και ημιαγωγών, ενώ το SF₆ μπορεί να παραχθεί κατά τη διακίνηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι HFCs μπορούν να εκλύονται λόγω διαρροών στα ψυκτικά συστήματα των οχημάτων.

Η συμβολή των παραπάνω αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι διαφορετική. Για τη σύγκριση της συμβολής αυτής, αναπτύχθηκε ο δείκτης του Παγκόσμιου Δυναμικού Θέρμανσης (GWP, Global Warming Potential), ο οποίος συνδυάζει δυο παραμέτρους: α) την ικανότητά τους να απορροφούν τη γήινη ακτινοβολία και τον χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα. Εξ' ορισμού, ο GWP μετρά την ενέργεια που απορροφά 1 τόνος αερίου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 100 χρόνια) σε σχέση με το CO₂. Η αύξηση του GWP δηλώνει αύξηση της ικανότητας του αερίου να θερμαίνει τη Γη σε σχέση με το CO₂. Επομένως, θεωρείται ότι ο GWP του CO₂ είναι 1.

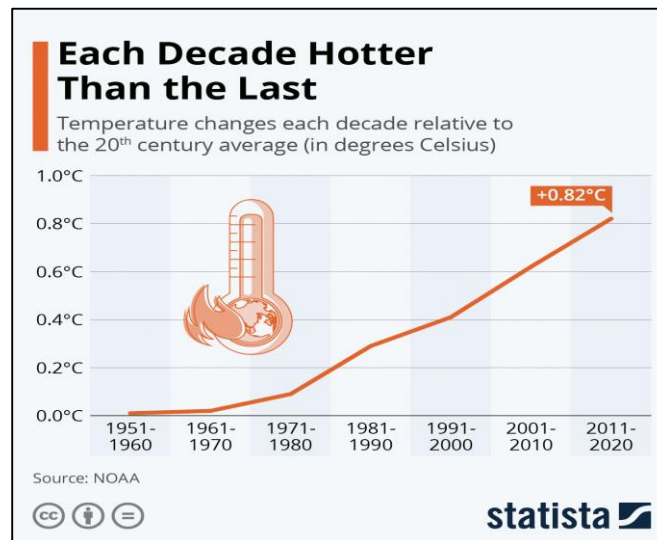
Το CH₄ που εκπέμπεται σήμερα απορροφά περισσότερη ενέργεια από το CO₂, ωστόσο παραμένει στην ατμόσφαιρα λιγότερο (περίπου 10 έτη). Εκτιμάται ότι το GWP του CH₄ είναι 27-30 σε 100 έτη. Επίσης, το N₂O θεωρείται ότι παραμένει στην ατμόσφαιρα παραπάνω από 100 έτη και έχει GWP 273 σε σχέση με το CO₂. Τέλος, τα φθοριούχα αέρια θεωρείται ότι έχουν πολύ υψηλό GWP, της τάξης των δεκάδων χιλιάδων, λόγω του μεγάλου χρόνου παραμονής τους στην ατμόσφαιρα. Ο δείκτης αναθεωρείται τακτικά, λόγω των νέων επιστημονικών ευρημάτων και της διαφορετικής σύστασης των αερίων στην ατμόσφαιρα με το πέρασμα του χρόνου. Η εισαγωγή του GWP είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της συνολικής συμβολής μιας δραστηριότητας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, με τον δείκτη του ισοδύναμου CO₂ (CO₂eq). Το CO₂eq ενός αερίου είναι το γινόμενο της ποσότητάς του επί το GWP.

3.3.Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις της

Η κλιματική αλλαγή, σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη, αναφέρεται στις μακροχρόνιες αλλαγές της θερμοκρασίας του πλανήτη και των καιρικών φαινομένων. Τα Ηνωμένα Έθνη έχουν αναγνωρίσει τους κινδύνους που μπορεί να προκαλέσει η κλιματική αλλαγή, οι οποίοι

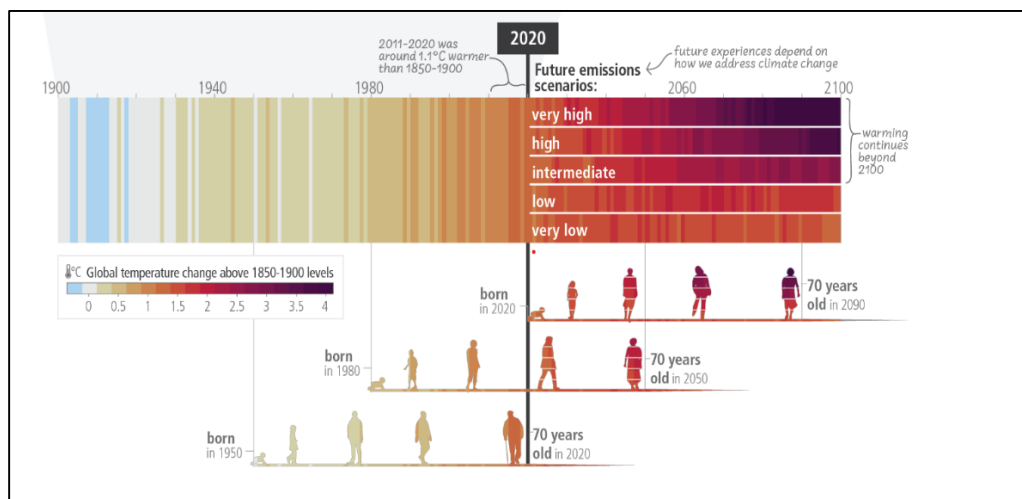
έχουν εξαιρετικά σοβαρές συνέπειες, όπως επιβάρυνση της δημόσιας υγείας, έλλειψη τροφής και στέγης και αναγκαστική μετανάστευση λόγω ευπάθειας των περιοχών στην κλιματική αλλαγή. Οι κυριότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Υψηλές θερμοκρασίες: Σύμφωνα με το World Economic Forum (WEF, 2021), η παγκόσμια θερμοκρασία έχει αυξηθεί από τη δεκαετία του 1960 κατά 0,82 °C (Εικόνα 3), ενώ τα Ηνωμένα Έθνη (IPCC, 2023) παρουσίασαν προβλέψεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας μέχρι το 2100 (Εικόνα 4).



Εικόνα 3: Αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας ανά δεκαετία

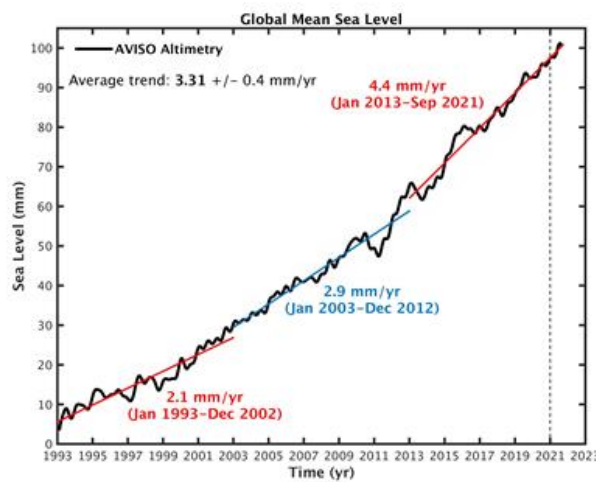
(πηγή: WEF, 2021)



Εικόνα 4: Προβλέψεις για την αίσθηση της θερμοκρασίας μέχρι το 2100

(πηγή: IPCC, 2023)

2. Ακραία καιρικά φαινόμενα: Καταστροφικές καταιγίδες μεγαλύτερες σε συχνότητα και ένταση και πλημμύρες, κυκλώνες και τυφώνες λόγω της εξάτμισης του νερού των ωκεανών από την αυξανόμενη θερμοκρασία.
3. Ξηρασία: Έλλειψη νερού για την αγροτική παραγωγή και τις ανάγκες ζώων και ανθρώπων.
4. Αύξηση της στάθμης θάλασσας: Ανύψωση λόγω της αύξησης του όγκου των υδάτων από την αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά και το λιώσιμο των πάγων. Σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη (UNFCCC, 2021), η μέση στάθμη της θάλασσας μεταξύ του 1993 και το 2002 αυξήθηκε κατά 2,1 mm/έτος και με διπλάσιο ρυθμό μεταξύ του 2013 και 2021 (4,4 mm/έτος) (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Άνοδος μέσης στάθμης θάλασσας τα τριάντα τελευταία χρόνια

(Πηγή: UNFCCC, 2021)

5. Εξαφάνιση ειδών: 1.000 φορές περισσότερο σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια, λόγω των εκτεταμένων πυρκαγιών, των ακραίων καιρικών φαινομένων και των επιδημιών που εμφανίζονται λόγω της κλιματικής αλλαγής.
6. Έλλειψη τροφής: Επισιτιστική κρίση λόγω καταστροφής των σοδειών, της αλιείας και της ζωικής παραγωγής.
7. Επιβάρυνση της δημόσιας υγείας: Υγειονομικοί κίνδυνοι και θάνατοι λόγω ρύπανσης, επιδημιών, ψυχικών νόσων, ακραίων καιρικών φαινομένων, αναγκαστικής μετανάστευσης και επισιτιστικής κρίσης.

Η ΕΕ παρουσίασε τους σημαντικότερους υγειονομικούς κινδύνους από την προβλεπόμενη κλιματική αλλαγή:

- Θάνατοι και ασθένειες από ακραίες συνθήκες ζέστης και κρύου.

- Κίνδυνοι ατυχημάτων από ακραία καιρικά φαινόμενα.
 - Αλλαγές στο δυναμικό ορισμένων ασθενειών, πχ ιογενών, λόγω κακής ποιότητας τροφής και νερού.
 - Αλλαγές στην εποχιακή κατανομή των αλλεργιών, των ιών και των επιδημιών.
 - Αναδυόμενες και επανεμφανιζόμενες ασθένειες σε ζώα.
 - Ασθένειες οφειλόμενες στην ποιότητα της ατμόσφαιρας και το όζον.
8. Ένδεια και αναγκαστική μετανάστευση.

Σύμφωνα με το World Economic Forum (WEF, 2023b), παρόλο που τα κράτη με χαμηλότερο κατά κεφαλήν Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) συμβάλλουν μόνο κατά 10% στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, είναι αυτά που πλήττονται περισσότερο από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Την τελευταία δεκαετία, τα κράτη με χαμηλότερα εισοδήματα βίωσαν φυσικές καταστροφές μεγαλύτερες κατά οκτώ φορές σε σχέση με τη δεκαετία του '80. Εκτιμάται ότι το 2050, 200 εκατομμύρια άνθρωποι θα αναγκαστούν να μεταναστεύσουν, ενώ 130 εκατομμύρια θα βιώσουν ένδεια λόγω των ακραίων φυσικών καταστροφών. Επιπλέον, σύμφωνα με μελέτη του National Bureau of Economic Research (2024²), η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1 °C θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ΑΕΠ μέχρι και 12% (Bilal et al., 2024).

4. ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΕΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

4.1 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία- Ευρωπαϊκός Κλιματικός Νόμος

Με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal), η ΕΕ φιλοδοξεί να γίνει η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος το 2050. Η νομοθετική δέσμευση της Πράσινης Συμφωνίας είναι ο Ευρωπαϊκός Κλιματικός Νόμος (European Climate Law), με ενδιάμεσους στόχους τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ κατά 55% το 2030 και κατά 90% το 2040 σε σχέση με το 1990, ώστε να συγκρατηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας κάτω από τον 1,5 °C. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία περιλαμβάνει ένα πακέτο μέτρων, το «Fit for 55 Package», που αφορά σε όλους τους κρίσιμους τομείς της οικονομίας. Νομοθετική δέσμευση της ΕΕ είναι η τήρηση στόχων που περιλαμβάνουν:

1. Μειώσεις εκπομπών σε μεγάλο εύρος παραγωγικών τομέων.
2. Στόχους, ώστε να ενισχυθούν οι καταβόθρες άνθρακα.
3. Αναθεώρηση του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών, μέσω της αύξησης της τιμής άνθρακα και προώθησης της καινοτομίας για επίτευξη της πράσινης μετάβασης.
4. Χρηματοδότηση καινοτόμων «πράσινων» τεχνολογιών».
5. Οικονομική στήριξη μικρών επιχειρήσεων και πολιτών.

4.2 Fit for 55 package

Το πακέτο μέτρων «Fit for 55» είναι προτάσεις αναθεώρησης νομοθετημάτων της ΕΕ, με σκοπό την ευθυγράμμισή τους με τους στόχους που τέθηκαν στην Πράσινη Συμφωνία. Το νομοθετικό πλαίσιο που προτείνεται στοχεύει:

- ο Στην εξασφάλιση κοινωνικά δίκαιης μετάβασης.
- ο Στη διατήρηση και ενδυνάμωση της καινοτομίας και της ανταγωνιστικότητας της ευρωπαϊκής βιομηχανίας σε σχέση με τρίτες χώρες.
- ο Στη θεμελίωση της ηγετικής θέσης της ΕΕ στην κλιματική ουδετερότητα.

Τα κυριότερα νομοθετήματα που αναθεωρούνται στα πλαίσια του Fit for 55 package είναι:

4.2.1 Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (Emissions Trading System, ETS)

Το ETS είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της ΕΕ για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αποτελεί ένα σύστημα εμπορίας (cap and trade) δικαιωμάτων εκπομπών. Δηλαδή, σύμφωνα με την Οδηγία του ETS, οι ενεργοβόρες βιομηχανίες και οι αεροπορικές μεταφορές είναι υποχρεωμένες να αγοράζουν τα δικαιώματα των ποσοτήτων των αερίων

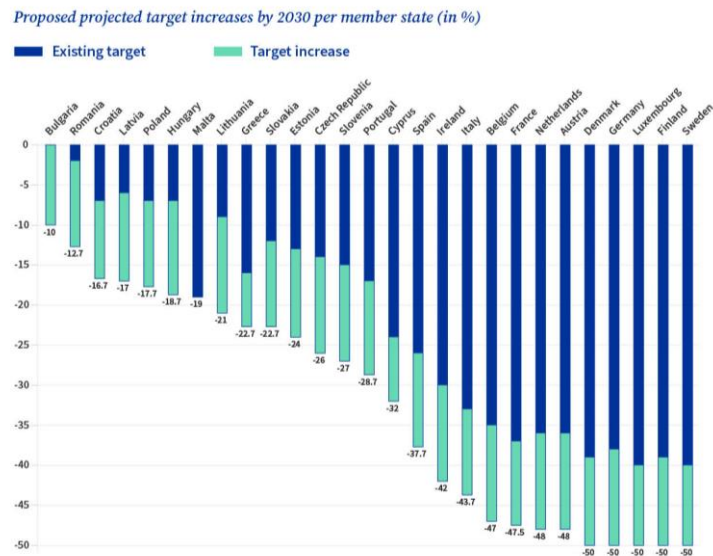
που εκπέμπουν. Το Σύστημα προστατεύει, ωστόσο, τις βιομηχανίες εκείνες που διατρέχουν κίνδυνο επιβίωσης λόγω της φορολόγησης των εκπομπών τους, ώστε να μην επιδιώκεται η μεταφορά τους εκτός ΕΕ (carbon leakage). Στον κατάλογο των τομέων «διαρροής άνθρακα» (carbon leakage list) περιλαμβάνονται τα διυλιστήρια, οι τσιμεντοβιομηχανίες, οι χαλυβουργίες και διάφορες χημικές βιομηχανίες. Στους τομείς αυτούς δίδεται δωρεάν ποσοστό δικαιωμάτων εκπομπής. Η ποσότητα των δωρεάν δικαιωμάτων που δικαιούται κάθε βιομηχανία καθορίζεται από τον κανονισμό FAR (EU, 2018a).

Το ETS θεσμοθετήθηκε το 2005 και μέχρι σήμερα έχει καταφέρει να μειώσει τις ευρωπαϊκές εκπομπές κατά 41% (EU, 2003). Η αναθεώρησή του περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την επέκταση στη ναυσιπλοΐα, τη μείωση και σταδιακή κατάργηση των δωρεάν δικαιωμάτων σε ορισμένους τομείς και την αντιστάθμιση εκπομπών άνθρακα στις διεθνείς αερομεταφορές. Σημαντικό κομμάτι της αναθεώρησης είναι και η αύξηση της χρηματοδότησης για την καινοτομία και τον εκσυγχρονισμό των εγκαταστάσεων, η ενίσχυση μικρών επιχειρήσεων και ευπαθών κοινωνικών ομάδων για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, αλλά και ο κανονισμός CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) ο οποίος αφορά στη φορολόγηση ορισμένων προϊόντων που εισέρχονται στην ΕΕ από τρίτες χώρες, ώστε τα ευρωπαϊκά προϊόντα να είναι ανταγωνιστικά. Για τους τομείς που εξάγουν αυτά τα προϊόντα προς τρίτες χώρες, έχει προβλεφθεί σταδιακή μείωση των δωρεάν δικαιωμάτων μέχρι και τον μηδενισμό τους έως το 2030 (EU, 2019a). Τέλος, η αναθεώρηση περιλαμβάνει τη θεσμοθέτηση ενός νέου, ξεχωριστού συστήματος (ETS2) το οποίο θα τεθεί σε πλήρη εφαρμογή το 2027 και θα περιλαμβάνει τις εκπομπές από τα κτίρια, τις οδικές μεταφορές και άλλους τομείς (EU, 2023a).

4.2.2 Επιμερισμός προσαθειών μείωσης εκπομπών στα κράτη - μέλη (Effort Sharing Regulation)

Ο Κανονισμός ESR καθόρισε στόχους μείωσης των εκπομπών μέχρι το 2030 για τους τομείς των οδικών μεταφορών, της γεωργίας, των κτιρίων, των μικρών επιχειρήσεων και της διαχείρισης αποβλήτων (EU, 2023b). Η αναθεώρηση επαναπροσδιόρισε τον συνολικό στόχο της ΕΕ από 29% σε 40% μέχρι το 2030. Οι εθνικοί στόχοι για την επίτευξη του 40% έχουν τεθεί λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική κατάσταση κάθε κράτους-μέλους, ενώ τίθενται και ετήσια όρια για την επίτευξή τους. Το 2025 προβλέπεται πιθανή αναπροσαρμογή των εθνικών στόχων, λόγω των επιπτώσεων της πανδημίας COVID και άλλων απρόβλεπτων καταστάσεων. Η αναθεώρηση τέθηκε σε εφαρμογή τον Μάρτιο του

2023. Η Εικόνα 6 παρουσιάζει την προτεινόμενη από τη νέα Οδηγία αύξηση των εθνικών στόχων.



Εικόνα 6: Προτεινόμενη αύξηση εθνικών στόχων στην Οδηγία ESR

(πηγή: EEA, 2023b)

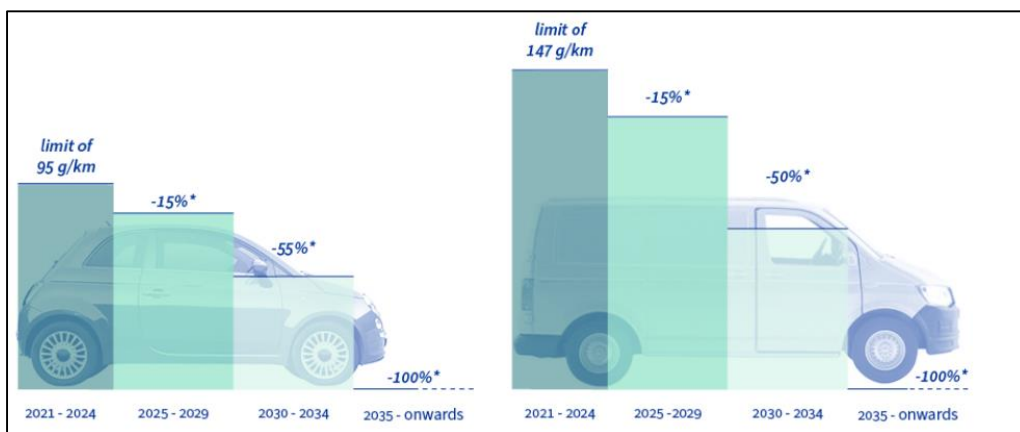
Για την επίτευξη των στόχων του ESR και την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των τομέων, έχουν προβλεφθεί ευέλικτα μέτρα.

4.2.3 Εκπομπές / απορροφήσεις λόγω χρήσεων γης (Land Use, Land Use Change and Forestry Regulation , LULUCF)

Ο Κανονισμός LULUCF αναφορικά με τις χρήσεις γης, την αλλαγή χρήσεων γης και τη δασοπονία έχει σκοπό την αύξηση της δέσμευσης αερίων του θερμοκηπίου από γεωργικές, λιβαδικές και δασικές εκτάσεις (EU, 2018b). Η αναθεώρησή της αφορά στη διεύρυνση των στόχων δέσμευσης από 225 εκ. τόνους σε 310 εκ. τόνους CO₂eq. Τίθενται, επίσης, φιλόδοξοι δεσμευτικοί στόχοι σε κάθε κράτος-μέλος.

4.2.4 Πρότυπα εκπομπών επιβατικών οχημάτων και ημιφορτηγών

Ο Κανονισμός 2019/631/EU (EU, 2019b) αναφορικά με την επίδοση των οχημάτων σε εκπομπές CO₂ αναθεωρήθηκε με σκοπό τη σταδιακή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι και 100% μετά το 2035 σε σχέση με τους στόχους του 2021, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Μείωση στόχων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου στα οχήματα σε σχέση με τους στόχους του 2021

(πηγή: EEA, 2023b)

4.2.5 Μείωση εκπομπών CH₄ στον τομέα ενέργειας

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το CH₄ είναι το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου μετά το CO₂, η ΕΕ κατέθεσε πρόταση η οποία εγκρίθηκε τον Μάιο του 2024 από το Συμβούλιο της ΕΕ. Σημειώνεται ότι στην ΕΕ ο ενεργειακός τομέας είναι υπεύθυνος για το 1/5 των εκπομπών, λόγω της εξόρυξης, διακίνησης και χρήσης ορυκτών καυσίμων. Στην πρόταση περιλαμβάνονται για τον τομέα της ενέργειας:

1. Μετρήσεις και υποβολή εκθέσεων επαλήθευσης εκπομπών και έλεγχος των αποτελεσμάτων από ανεξάρτητους ελεγκτές. Επίσης, προβλέπεται η υποχρέωση τακτικής παρακολούθησης του εξοπλισμού από τις επιχειρήσεις για τυχόν διαρροές και δημόσια απογραφή των ανενεργών φρεατίων και ανθρακωρυχείων.
2. Μείωση των εκπομπών μέσω κατάρτισης σχεδίων μετριασμού από τα κράτη-μέλη, παρακολούθησης των διαρροών και περιορισμού του εξαερισμού και της καύσης σε πυρσούς (venting/flaring) στις εγκαταστάσεις. Επίσης, προβλέπονται δράσεις για τη μείωση των εκπομπών από ανενεργές εγκαταστάσεις εξόρυξης.
3. Παρακολούθηση και υποχρεωτική ανίχνευση των εκπομπών από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων.

4.2.6 Βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα (ReFuelEU Aviation)

Η Οδηγία 2023/2405/EU (EU, 2023c) εκδόθηκε τον Οκτώβριο του 2023, με σκοπό να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των αεροπορικών μεταφορών. Οι εκπομπές από τις αεροπορικές μεταφορές αποτελούν το 14,4% των συνολικών εκπομπών στην ΕΕ και ως εκ

τούτου η χρήση βιώσιμων καυσίμων (ως μίγμα με ορυκτά καύσιμα) είναι σημαντική για την επίτευξη των στόχων κλιματικής ουδετερότητας. Σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό, οι εταιρείες προμήθειας αεροπορικών καυσίμων υποχρεούνται να αυξήσουν το ποσοστό χρήσης βιώσιμων καυσίμων από 2% το 2025 σε 20% το 2035 και 70% το 2050. Με το κοινό ενωσιακό σύστημα σήμανσης, οι καταναλωτές θα μπορούν να επιλέγουν τις «πράσινες» πτήσεις. Επιπλέον, είναι υποχρεωτικός ο αναγκαίος ανεφοδιασμός για την εκάστοτε πτήση, προκειμένου να αποφεύγονται εκπομπές από το επιπλέον βάρος των καυσίμων. Τέλος, με τη νέα οδηγία, οι αερολιμένες είναι υποχρεωμένοι να διαθέτουν τις αναγκαίες υποδομές για την αποθήκευση και διακίνηση βιώσιμων καυσίμων.

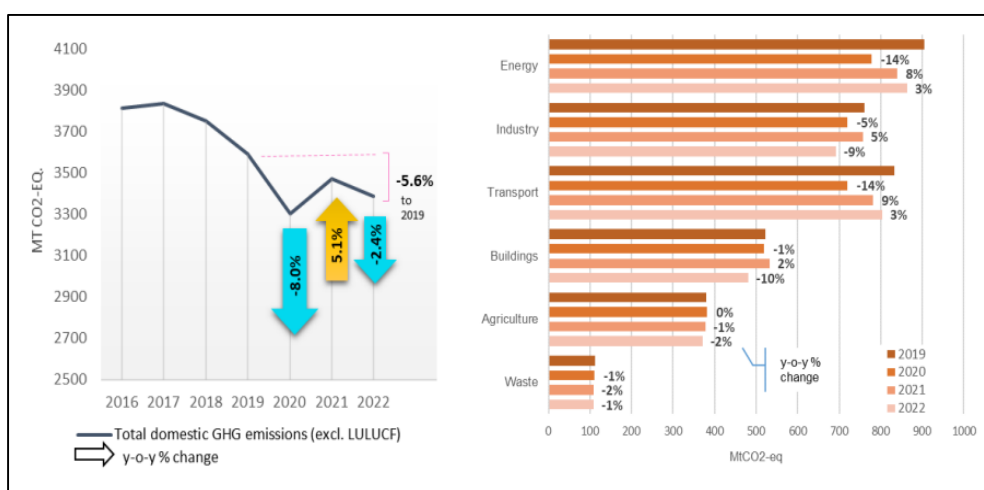
4.2.7 Καύσιμα χαμηλών εκπομπών από τη ναυτιλία (Fuel EU Maritime)

Ο τομέας της ναυτιλίας είναι ίσως ο μοναδικός τομέας που βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στα ορυκτά καύσιμα. Για τον λόγο αυτόν, η πρωτοβουλία Fuel EU Maritime έθεσε ως στόχο τη μείωση της έντασης των εκπομπών έως 80% το 2050, προωθώντας την αύξηση του ποσοστού χρήσης ανανεώσιμων και με χαμηλές εκπομπές άνθρακα καυσίμων. Η Οδηγία υιοθετήθηκε από το Συμβούλιο της ΕΕ το 2021 και βρίσκεται σε προσωρινή συμφωνία με το Συμβούλιο Μεταφορών από τον Μάρτιο του 2023.

Στο πακέτο Fit for 55 συμπεριλαμβάνονται και άλλα νομοθετήματα και αναθεωρήσεις παλαιότερων Οδηγιών. Τα κυριότερα από αυτά αφορούν στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, στη φορολόγηση ενεργειακών προϊόντων και ηλεκτρικής ενέργειας, σε μέτρα για την προώθηση μη ανθρακούχων καυσίμων όπως το υδρογόνο και στην αύξηση της ενέργειας από ΑΠΕ. Τέλος, προβλέπεται η δημιουργία ενός κοινωνικού ταμείου για το κλίμα, όπου οι ευάλωτες επιχειρήσεις και τα νοικοκυριά που διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο να πληγούν από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής θα χρηματοδοτούνται από τα έσοδα της ΕΕ από τα παραπάνω νομοθετήματα.

5. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΣΤΟΧΩΝ ΣΤΗΝ ΕΕ

Η αναφορά προόδου της δράσης για το κλίμα στην ΕΕ του 2023 (EU, 2023d) δείχνει μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ, παρά την παγκόσμια αύξηση των εκπομπών. Συγκεκριμένα, το 2022 παρατηρήθηκε ότι οι παγκόσμιες εκπομπές συνέχισαν την ανοδική τους πορεία μετά την κρίση της πανδημίας κατά 1,4%, ενώ το ΑΕΠ αυξήθηκε κατά 3,4% σε σχέση με το 2021. Αντίθετα, στην ΕΕ το 2022 παρατηρήθηκε μείωση των εκπομπών (εκτός από τις εκπομπές λόγω των χρήσεων γης) κατά 2,4% σε σχέση με το 2021, ενώ υπήρξε αύξηση στο ΑΕΠ κατά 3,5%. Η μείωση των εγκαταστάσεων στα πλαίσια του ETS ήταν σε ποσοστό 0,2% και αυτών εκτός του ETS στο 2,9%. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η μείωση των συνολικών εκπομπών από το 2016 και η μείωση των εκπομπών ανά τομέα από το 2019, σύμφωνα με την αναφορά της ΕΕ για το 2023. Παρατηρείται ότι, από το 2016 έως σήμερα, οι συνολικές εκπομπές μειώθηκαν κατά 5,6%, με τη μεγαλύτερη μείωση να έχει επιτευχθεί το 2020 σε σχέση με το 2019. Αυτό, ωστόσο, δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική εικόνα, διότι οφείλεται στην πανδημία, κατά την οποία οι επιχειρήσεις εμφάνισαν χαμηλότερη παραγωγικότητα. Σε ό,τι αφορά στους παραγωγικούς τομείς, η μεγαλύτερη μείωση επιτεύχθηκε στον ενεργειακό τομέα.

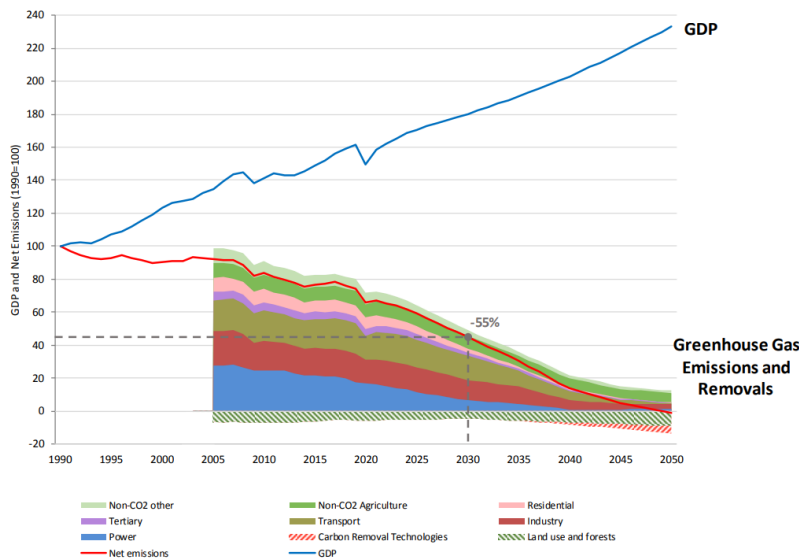


Εικόνα 8: Μείωση συνολικών εκπομπών και ανά τομέα στην ΕΕ

(πηγή: EU, 2023d)

Στην παραπάνω αναφορά, παρουσιάζεται και η πρόοδος των στόχων προς την κλιματική ουδετερότητα. Παράλληλα, σημειώνεται ότι οι πολιτικές που οδηγούν στις μειωμένες ανθρακικές εκπομπές οδηγούν, παράλληλα, και σε οικονομική ανάπτυξη. Αυτό συμβαίνει,

διότι παρουσιάζονται ευκαιρίες για βιώσιμες θέσεις εργασίας, ενώ βελτιώνεται η ενεργειακή ασφάλεια και η αυτονομία. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες εκπομπές αλλά και το σχετικό ΑΕΠ με την εφαρμογή των πολιτικών και των στρατηγικών της ΕΕ τα επόμενα χρόνια.



Εικόνα 9: Στόχοι της ΕΕ για κλιματική ουδετερότητα σε συνδυασμό με την οικονομική ευημερία

(πηγή: EU, 2023)

6. ΕΘΝΙΚΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Ο Εθνικός Κλιματικός Νόμος (Νόμος 4936/2022) τέθηκε σε ισχύ το 2022, με στόχο τη δημιουργία ενός πλαισίου για την κλιματική ανθεκτικότητα και τη σταδιακή μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα έως το 2050, προκειμένου να ευθυγραμμιστεί η χώρα με τα προβλεπόμενα του Ευρωπαϊκού Κλιματικού Νόμου. Στα πλαίσια του νόμου, ορίστηκαν ενδιάμεσοι κλιματικοί στόχοι για μείωση των εκπομπών από εγχώριες ανθρωπογενείς πηγές κατά 55% το 2030 και κατά 80% το 2040 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Η εφαρμογή του νόμου καθορίζεται από το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, το οποίο τέθηκε σε ισχύ το 2019 (ΦΕΚ 4893/2019) και αναθεωρήθηκε τον Οκτώβριο του 2023. Στο Σχέδιο παρουσιάζεται ο αναλυτικός οδικός χάρτης για την επίτευξη των στόχων έως το 2030 και η μακροχρόνια στρατηγική για το 2050.

Με την εφαρμογή του Εθνικού Κλιματικού Νόμου, νομοθετήθηκε η απαγόρευση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα μετά το 2028 και η σταδιακή μετάβαση σε οχήματα μηδενικών ρύπων μετά το 2026. Αναφορικά με τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, τέθηκαν όροι για τις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων νέων έργων και δραστηριοτήτων, όπου στα περιεχόμενά τους οφείλουν να περιλαμβάνονται ανάλυση της ευπάθειας στην κλιματική αλλαγή και εκτιμήσεις έμμεσων και άμεσων εκπομπών. Επιπλέον, οι επιχειρήσεις περιβαλλοντικής κατάταξης A1/A2 (σ.σ. εγκαταστάσεις με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον) έχουν την υποχρέωση μείωσης του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος κατά 30% το 2030 σε σχέση με το 2019. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι εγκαταστάσεις υποχρεούνται να παρακολουθούν και να υποβάλλουν ετησίως το ανθρακικό τους αποτύπωμα και το 2026 να υποβάλουν έκθεση συμμόρφωσης με τους στόχους μείωσης των εκπομπών.

7. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΤΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑΣ

7.1 Νομοθετική πράξη για τη βιομηχανία καθαρών εκπομπών

Η πράξη για τη βιομηχανία καθαρών εκπομπών (NZIA, Net-Zero Industry Act) είναι μια πρόταση που προέρχεται από το Σχέδιο Μείωσης Βιομηχανικών Εκπομπών για την επίτευξη των κλιματικών στόχων της ΕΕ και προβλέπει την υποστήριξη και ανάπτυξη των νέων «καθαρών» τεχνολογιών στη βιομηχανία (EU, 2023e). Εκδόθηκε τον Μάρτιο του 2023, ενώ από τον Φεβρουάριο του 2024 υπάρχει συμφωνία μεταξύ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και αναμένεται να τεθεί σε ισχύ ο Κανονισμός. Σύμφωνα με την πρόταση, σε μια περίοδο έντονης γεωπολιτικής και ενεργειακής κρίσης, η ΕΕ αναζητά την απανθρακοποίηση, σε συνδυασμό με την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των βιομηχανιών της και τη βελτίωση της επενδυτικής της ασφάλειας. Η μετάβαση σε παραγωγή καθαρής ενέργειας και η παραγωγή των τεχνολογιών εντός ΕΕ, εκτός από την κλιματική ουδετερότητα, διασφαλίζει και την πρόσβαση των βιομηχανιών της σε αυτές και την ενεργειακή αυτονομία της ΕΕ. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση «καθαρών» τεχνολογιών στη βιομηχανία, μεταξύ άλλων, προσφέρει στους κατασκευαστές τους ευκαιρίες για ανάπτυξη, όπως χρηματοδοτήσεις, επενδύσεις εντός και εκτός ΕΕ και νέες θέσεις εργασίας. Η πράξη προβλέπει ακόμη την πλατφόρμα Net-Zero Europe Platform, όπου τα μέτρα που θα υιοθετούνται από τη βιομηχανία του πεδίου εφαρμογής της θα επιβλέπονται σε σχέση με την επίτευξη των στόχων. Επιπλέον, μέσω της πλατφόρμας, θα υπάρχει δυνατότητα διαβούλευσης μεταξύ εκπρόσωπων των βιομηχανιών και ειδικών τεχνικών και επιστημονικών ομάδων.

Ορισμένες τεχνολογίες καθαρών εκπομπών που προβάλλονται από τη νομοθετική πράξη Net-Zero Industrial Act αφορούν:

- ο στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας,
- ο στην ανάπτυξη δικτύων,
- ο στην παραγωγή βιώσιμων εναλλακτικών καυσίμων,
- ο στην παραγωγή υδρογόνου και
- ο στις ΑΠΕ.

Κυρίως, όμως, η δράση για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας NZIA εστιάζεται στις δυο παρακάτω τεχνολογίες:

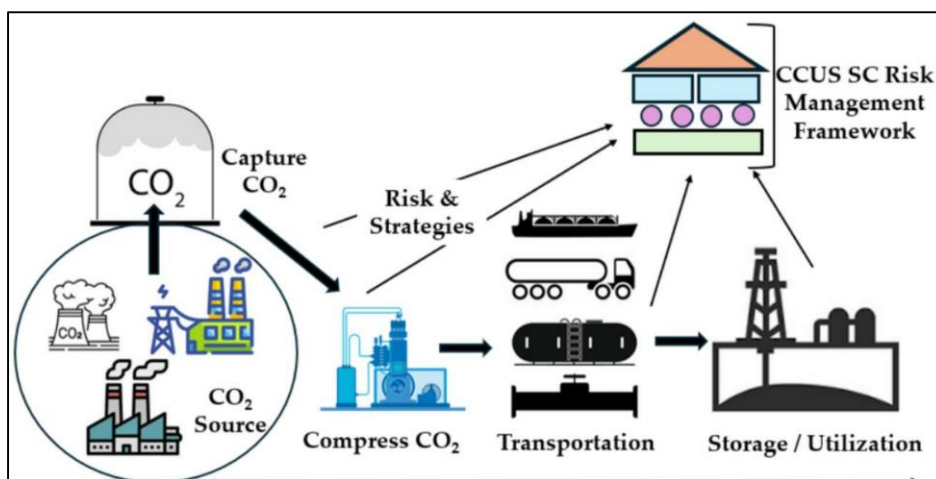
- ο τις τεχνολογίες δέσμευσης, χρήσης και αποθήκευσης CO₂ και
- ο τις τεχνολογίες ανανεώσιμων καυσίμων μη βιολογικής προέλευσης.

7.2 Στρατηγική βιομηχανικής διαχείρισης άνθρακα

Η δέσμευση της ΕΕ για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 απαιτεί και περαιτέρω μέτρα για να επιτευχθεί, δεδομένου ότι δεν είναι δυνατή η μείωση των εκπομπών σε απαραίτητες για τη βιομηχανία διεργασίες. Η τεχνολογία που προκρίνεται είναι η απευθείας δέσμευση των εκπομπών CO₂ από την ατμόσφαιρα και η μόνιμη αποθήκευσή ή η χρήση τους σε άλλες εφαρμογές. Στις 6 Φεβρουαρίου 2024, η ΕΕ υιοθέτησε τη στρατηγική βιομηχανικής διαχείρισης άνθρακα, η οποία περιλαμβάνει λεπτομέρειες για τις τεχνολογίες που απαιτούνται, καταρχήν για την επίτευξη του ενδιάμεσου στόχου μείωσης κατά 90% το 2040 (EU, 2024). Το 2021 δημιουργήθηκε πλατφόρμα διαβούλευσης μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών (forum CCUS), η οποία επικεντρώθηκε σε βασικά ζητήματα σχετικά με την ανάπτυξη της αγοράς διαχείρισης άνθρακα, και η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και μελλοντικά, αξιοποιώντας τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί. Η βιομηχανική διαχείριση του άνθρακα, παρόλο που έχει αρχίσει να εφαρμόζεται με τη στήριξη των κρατών-μελών, συναντά σημαντικές προκλήσεις, με αποτέλεσμα η εφαρμογή της σε μεγάλης κλίμακας επιχειρησιακά έργα να είναι περιορισμένη. Ορισμένες από τις προκλήσεις που απαντώνται είναι:

- Δυσκολία ανάπτυξης ενός βιώσιμου επιχειρηματικού μοντέλου για τα προϊόντα χαμηλών εκπομπών άνθρακα.
- Έλλειψη ολοκληρωμένου νομοθετικού πλαισίου σε όλη την αξιακή αλυσίδα (Value Chain), κυρίως όσον αφορά στις βιομηχανικές απορροφήσεις και ορισμένες χρήσεις του CO₂.
- Κατά τη δημιουργία αξιακών αλυσίδων άνθρακα, ανακύπτουν κίνδυνοι διαρροών, καθώς και απουσία κατάλληλων υποδομών αποθήκευσης.
- Έλλειψη ολοκληρωμένου σχεδιασμού σε διασυνοριακό πλαίσιο.
- Έλλειψη κινήτρων για επενδύσεις επιχειρηματικών σχεδίων για τη βιομηχανική διαχείριση του άνθρακα.

Η αξιακή αλυσίδα βιομηχανικής διαχείρισης άνθρακα παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Αξιακή αλυσίδα διαχείρισης άνθρακα

(πηγή: Kabir et. al., 2024)

Παγκοσμίως, και για την ανάπτυξη των έργων δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, έχει συσταθεί το Global CCS Institute (GCCSI), το οποίο αποτελεί έναν οργανισμό ανταλλαγής απόψεων, προώθησης πολιτικών και στρατηγικών και χρηματοδοτήσεων αναφορικά με τα έργα και τις τεχνολογίες CCS. Τα μέλη του είναι κυβερνήσεις, επιχειρήσεις, επενδυτικοί οργανισμοί αλλά και επιστημονικές κοινότητες και μη κυβερνητικές οργανώσεις. Σύμφωνα με την αναφορά του έτους 2023, παρατηρήθηκε παγκοσμίως σημαντική αύξηση στις πολιτικές που στηρίζουν την ανάπτυξη των τεχνολογιών δέσμευσης, στους χώρους αποθήκευσης άνθρακα αλλά και στην κατασκευή δικτύων μεταφοράς. Ωστόσο, στην ΕΕ παρατηρείται καθυστέρηση στην ανάπτυξη των γεωλογικών σχηματισμών αποθήκευσης άνθρακα σε σχέση με τη μελλοντική απαιτούμενη δυναμικότητα.

Σύμφωνα με την αναφορά (Εικόνα 11), το 2023 σημειώθηκε σημαντική αύξηση των εμπορικών εγκαταστάσεων δέσμευσης και αποθήκευσης σε σχέση με το 2022 και ως εκ τούτου αύξηση της ικανότητας δέσμευσης παγκοσμίως. Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης διακρίνονται σε πρώιμης ανάπτυξης (early development), προχωρημένης ανάπτυξης (advanced development), υπό κατασκευή (in construction) και σε λειτουργία (operational). Το 2023 τέθηκαν σε λειτουργία 67 εγκαταστάσεις, αυξάνοντας την πραγματική ικανότητα δέσμευσης σε 81 Μτπα.



Εικόνα 11: Εγκαταστάσεις CCS και ικανότητα δέσμευσης (Μtpa) το 2023 σε σχέση με το 2022 (πηγή: GCCSI, 2023)

8. ΔΕΣΜΕΥΣΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO₂ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

8.1 Τεχνολογίες δέσμευσης και απομάκρυνσης

Οι τεχνολογίες δέσμευσης είναι το πρώτο στάδιο απομάκρυνσης του CO₂ από την ατμόσφαιρα. Θεωρείται κρίσιμο, δεδομένου ότι θα πρέπει να κατακρατηθεί η μέγιστη δυνατή συγκέντρωση του ρύπου, η οποία θα πρέπει να είναι απαλλαγμένη από ξένες ύλες, όπως σκόνη και υγρασία. Η τεχνολογία που επιλέγεται εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται, τη διεργασία και τις ενεργειακές καταναλώσεις που απαιτούνται για τη λειτουργία της και το κόστος εγκατάστασης. Σημαντικό στοιχείο είναι η διεργασία να μπορεί να εφαρμοστεί και σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Σε κάθε περίπτωση, και προκειμένου να θεωρηθεί βιώσιμη η επένδυση, θα πρέπει να είναι περιβαλλοντικά φιλική και οικονομικά βιώσιμη σε σχέση με την αποτελεσματικότητά της (cost-effective). Οι κυριότερες τεχνολογίες διαχωρισμού/απομάκρυνσης του CO₂ σε εγκαταστάσεις καύσης που χρησιμοποιούν γαιάνθρακα, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο είναι:

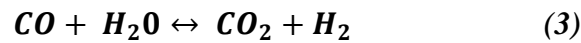
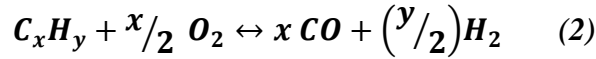
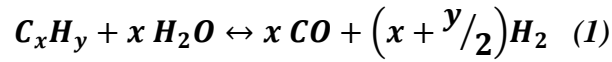
- Προ- καύσης (Pre-combustion technique).
- Μετά-καύσης (Post-combustion technique), η οποία συνοδεύεται και από κατάλληλη τεχνολογία διαχωρισμού του CO₂, ώστε το αέριο να διαχωριστεί από άλλα προϊόντα. Οι κυριότερες τεχνολογίες διαχωρισμού είναι:
 - απορρόφηση,
 - προσρόφηση,
 - διαχωρισμός με μεμβράνες,
 - κρυογενικός διαχωρισμός,
 - διαχωρισμός με στερεό βρόγχο (solid / calcium looping , CaL),
 - φυσικές διεργασίες (π.χ. άλγη και καταλυτική υδρόλυση με ένζυμα) και
 - ηλεκτροχημικές μέθοδοι.
- Καύσης με παρουσία οξυγόνου (Oxy-fuel combustion technique).
- Χημικής δέσμευσης (Chemical looping technique).

Η κάθε τεχνολογία δέσμευσης παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

8.1.1 Pre-combustion technique

Η διεργασία pre-combustion επεξεργάζεται το καύσιμο πριν την καύση μέσω: α) αναμόρφωσης με ατμό (steam reforming), β) μερικής οξειδωσης με οξυγόνο, σύμφωνα με τις αντιδράσεις (1) και (2). Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και οι δυο τρόποι αναμόρφωσης (με ατμό και οξυγόνο) (auto-thermal reforming). Τέλος, κατόπιν αντίδρασης

με νερό (3), παράγεται CO₂ και H₂ (αέριο σύνθεσης, syngas). Όλες οι αντιδράσεις είναι ενδόθερμες.



Η παραγωγή του syngas γίνεται μέσω θέρμανσης στους 1700 °C, με O₂ και H₂, παράγοντας 11% CO, 43% H₂, 21% H₂O και 6% CO₂ (Baskaran et al., 2024). Στη συνέχεια, το syngas μετατρέπεται σε CO₂ και H₂. Το CO₂ διαχωρίζεται από το H₂ μέσω υγρών πλυντηρίδων (wet scrubbers). Ο διαχωρισμός γίνεται είτε με χημικό τρόπο (κυρίως με προϊόντα που βασίζονται σε αμίνες) είτε με φυσικό τρόπο. Η χρήση χημικών διαλυτών ευνοεί την απορρόφηση και τη λειτουργία σε χαμηλότερες πιέσεις. Οι φυσικοί διαλύτες έχουν ως μειονεκτήματα τη χαμηλή απόδοση, ενώ θεωρούνται θερμικά ασταθείς, τοξικοί και εύφλεκτοι. Σύμφωνα με τους Baskaran et al. (2024), οι μεμβράνες διαχωρισμού αλλά και οι τεχνικές προσρόφησης είναι καινοτόμες τεχνολογίες που κερδίζουν έδαφος λόγω της υψηλής κατακράτησης CO₂ και της οικονομικής βιωσιμότητάς τους. Ωστόσο έχουν ως μειονεκτήματα τη μόλυνση από θείο και τις χαμηλότερες αποδόσεις.

Γενικά η τεχνική προ-καύσης είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη από τη χημική βιομηχανία, λόγω του ότι είναι σχετικά πιο οικονομική και η μέθοδος χρησιμοποιείται ήδη σε πολλές διεργασίες. Επίσης, το H₂ που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Ωστόσο, παρουσιάζει περιορισμούς εφαρμογής σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις, ενώ απαιτεί μεγάλες ενεργειακές καταναλώσεις.

8.1.2 Post-combustion technique

Η μέθοδος απομακρύνει το CO₂ από τα καυσαέρια μετά τη διαδικασία της καύσης, με τεχνικές διαχωρισμού όπως απορρόφηση, προσρόφηση, μεμβράνες και χημικές αντιδράσεις, αλλά και καινοτόμες μεθόδους κρυογενικής επεξεργασίας ή μέσω μικροοργανισμών (Chao et al., 2021). Σημαντικό κομμάτι της διεργασίας είναι ο καθαρισμός των καυσαερίων από αζωτούχες και θειούχες ενώσεις και σωματίδια πριν τη δέσμευση του CO₂. Μετά τον καθαρισμό, τα καυσαέρια οδεύουν προς διαχωρισμό, με τις κυριότερες τεχνικές να παρουσιάζονται παρακάτω:

ο Διεργασίες απορρόφησης: Η απορρόφηση του αερίου γίνεται με τροφοδοσία ψυχρών καυσαερίων στο κάτω μέρος στήλης, η οποία περιέχει χημικό διάλυμα απορρόφησης (π.χ. αμίνες, άλατα αμινοξέων, αμμωνία). Κατά τη διεργασία της απορρόφησης, το αέριο ενώνεται με το υγρό. Στη συνέχεια, το υγρό, που είναι πλούσιο σε CO₂, εισέρχεται σε στήλη απογύμνωσης (stripper), όπου με ατμό διαχωρίζεται σε διαλύτη και ρεύμα CO₂. Ο διαλύτης επαναχρησιμοποιείται. Η επιλογή του διαλύτη γίνεται με βάση την τοξικότητά του, τη δυνατότητα αναγέννησης και το κόστος του. Συνήθως χρησιμοποιούμενοι διαλύτες είναι οι MDEA και DEA. Σύμφωνα με τους Vaz et al. (2022), τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών απορρόφησης είναι ότι είναι αποδοτικές και λειτουργικές, εφαρμόζονται σε βιομηχανική κλίμακα και έχουν αποδοτικότητα σε βάθος χρόνου. Τα μειονεκτήματά τους κυρίως εστιάζονται στη χρήση χημικών διαλυτών μη φιλικών για το περιβάλλον και στη διάβρωση του εξοπλισμού. Επίσης, έχουν αυξημένο κόστος, λόγω της μεγάλης ποσότητας διαλύτη που καταναλώνεται.

ο Διεργασίες προσρόφησης: Κατά την προσρόφηση, το CO₂ κατακρατείται από μεγάλης επιφάνειας υλικό και το απαλλαγμένο από CO₂ αέριο οδεύει προς την ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια, με τη συνδρομή ατμού γίνεται εκρόφηση για τον διαχωρισμό του CO₂. Οι προσροφητές μπορεί να είναι χημικοί και φυσικοί, με τους φυσικούς να θεωρούνται καλύτεροι. Αυτό συμβαίνει, γιατί έχουν μεγάλη σταθερότητα, είναι ανθεκτικοί στη θερμοκρασία, διαθέτουν υψηλό πορώδες και μεγάλη επιφάνεια και το κόστος παραγωγής τους είναι μικρό. Ο ενεργός άνθρακας είναι ένας συνήθης φυσικός προσροφητής, ο οποίος εκτός των άλλων απαιτεί λιγότερη ενέργεια, για να αναγεννηθεί. Η απόδοση σε δέσμευση άνθρακα εξαρτάται από την επιλεκτικότητα (selectivity) του προσροφητή, δηλαδή τον λόγο προσρόφησης CO₂ προς την προσρόφηση N₂ και CH₄. Το N₂ και το CH₄ κατακρατούνται από τον προσροφητή με λιγότερο ισχυρούς δεσμούς από ό,τι το CO₂. Οι Vaz et al. (2022) παρουσίασαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου. Ως πλεονεκτήματα αναγνωρίζονται ότι έχουν απλή λειτουργία, χωρίς υγρά απόβλητα, με λιγότερες απαιτήσεις ενέργειας για αναγέννηση και χωρίς διάβρωση του εξοπλισμού. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η χαμηλή αποδοτικότητα στη δέσμευση, η χαμηλή επιλεκτικότητα των προσροφητών και η ακαταλληλότητα για μεγάλους όγκους καυσαερίων.

ο Διαχωρισμός με ηλεκτροχημικές μεθόδους: Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το CO₂ ερχέεται σε ηλεκτρολύτη. Στο δεύτερο στάδιο, ο ηλεκτρολύτης αναγεννάται μέσω αγωγού ιόντων και παράγεται CO₂. Σημαντικές παράμετροι για την αποδοτικότητα της διεργασίας είναι η

ικανότητα παροχής ρεύματος (current capacity) και η κατανάλωση ηλεκτροχημικής ενέργειας. Η κατανάλωση ηλεκτροχημικής ενέργειας και κατ' επέκταση η απόδοση εξαρτώνται από το κατά πόσο ο σχεδιασμός της κυψέλης είναι ευθυγραμμισμένος με την κάθε μέθοδο ηλεκτρόλυσης. Επίσης, η αύξηση της απόδοσης του ρεύματος οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης της ηλεκτροχημικής ενέργειας. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η απόδοση διαφόρων ηλεκτροχημικών μεθόδων και των λειτουργικών τους παραμέτρων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Απόδοση ηλεκτροχημικών μεθόδων σε συνδυασμό με τις λειτουργικές τους παραμέτρους

(πηγή: *Baskaran et al., 2024*)

Μέθοδος	Ηλεκτροχημική ενέργεια	Ικανότητα παροχής ρεύματος (mA/m ²)	Απόδοση απομάκρυνσης CO ₂ (%)
Hydrogen cycling electrochemical cell	374 kJ/mol CO ₂	-	95
Bipolar membranes electro dialysis	242 kJ/mol CO ₂	1-3	<70
pH swing combined proton-electrotransfer (PCET)	0,49 GJ/t CO ₂	10	95,8
Potassium carbonate electrolysis	290-350 kJ/mol KOH	100	95
Electrodialysis in sodium bicarbonate and sodium carbonate medium	92-123 kJ/mol	2,4-9,5	70-75
Gas fed cell	208 kJ/mol	1,9	69

ο Διαχωρισμός με μεμβράνες: Είναι νεότερη τεχνολογία, όπου το αέριο διαχωρίζεται επιλεκτικά από το υγρό. Κρίσιμη στην περίπτωση αυτή είναι η επιλογή του υλικού της μεμβράνης (οργανικές, ανόργανες και μικτών ανόργανων και οργανικών υλών). Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής, σύμφωνα με τους Vaz et al. (2022), είναι ότι θεωρείται φιλική για το περιβάλλον, με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, έχει απλή εγκατάσταση και ο διαχωρισμός του CO₂ από άλλα αέρια είναι υψηλός (~80%). Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πολλές παράμετροι λειτουργίας της δεν έχουν ερευνηθεί ακόμη.

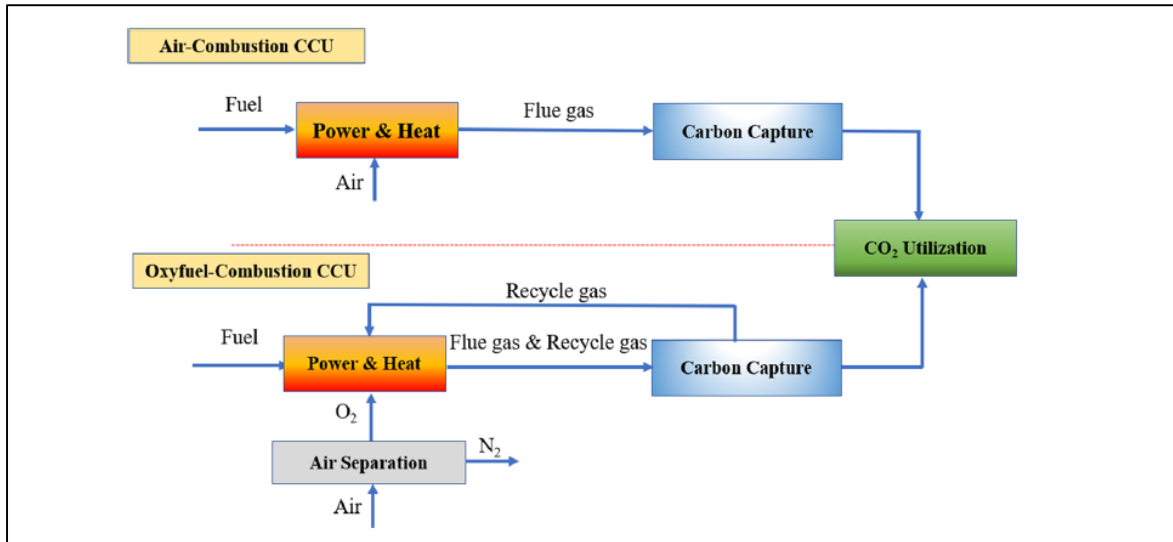
ο Κρυογενική μέθοδος διαχωρισμού: Η διαδικασία δέσμευσης αφορά στην ψύξη του καυσαερίου σε θερμοκρασία 100-135 °C, ώστε το CO₂ να βρεθεί στο σημείο λίγο πριν τη στερεοποίηση. Στη συνέχεια και αφού το CO₂ κατακρημνιστεί και συμπιεστεί, δημιουργείται υγρή φάση πλούσια σε CO₂ και αέρια φάση με άζωτο. Τα κρυογενικά συστήματα είναι δυο τύπων: α) διαχωρισμού μέσω αποστακτικής στήλης και β) διαχωρισμού υπό πίεση (flash separation) με εσωτερική ψύξη. Η απόδοση της μεθόδου είναι εξαιρετικά υψηλή (90-95%), ωστόσο είναι υψηλού κόστους, είτε ως προς την εγκατάσταση είτε ως προς τη λειτουργία, δεδομένου ότι απαιτούνται υψηλές ενεργειακές καταναλώσεις, για να ψυχθούν τα καυσαέρια. Επίσης, απαιτείται μεγάλη επιφάνεια για την εγκατάστασή τους, κάτι που τις κάνει απαγορευτικές για υφιστάμενες μονάδες, ενώ χρειάζεται αρκετός χρόνος, για να γίνει η δέσμευση του CO₂.

ο Φυσικές μέθοδοι διαχωρισμού: Οι φυσικές μέθοδοι διαχωρισμού θεωρούνται φιλικές για το περιβάλλον, διότι επιτυγχάνουν τη δέσμευση του CO₂ με μεγάλη απόδοση, χωρίς οποιαδήποτε προσθήκη χημικών, και με χαμηλό κόστος. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα για παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η πιο αναπτυγμένη φυσική μέθοδος διαχωρισμού είναι η σταθεροποίηση του CO₂ των καυσαερίων σε άλγη, με δυνατότητα απευθείας χρήσης του αποθηκευμένου CO₂. Σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, μπορούν να αποφευχθούν υψηλά κόστη εξοπλισμού, διαρροές και δυσκολίες επιλογής τοποθεσιών για την αποθήκευση του CO₂. Η άλγη έχει τη δυνατότητα να μεταβολίζει τον ανόργανο άνθρακα σε σάκχαρα, λιπαρά οξέα και αμινοξέα μέσω του κύκλου του Calvin. Παράλληλα, η άλγη, που θεωρείται βιομάζα τρίτης γενιάς, κατόπιν δέσμευσης CO₂, μπορεί να παράγει βιοκαύσιμο και άλλα προϊόντα προστιθέμενης αξίας (αντιοξειδωτικά, χρωστικές ουσίες, λιπαρά οξέα, ένζυμα, πολυμερή, πεπτίδια, βιταμίνες και στερόλες) που αποτελούν σημαντικές πρώτες ύλες για τις φαρμακευτικές βιομηχανίες και τις βιομηχανίες τροφίμων και ζωοτροφών. Σημαντικές παράμετροι σύμφωνα με τους Yang et al. (2024) για την καλλιέργεια της άλγης και την απόδοση δέσμευσης είναι το pH, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση του CO₂ και η μεταφορά μάζας του.

8.1.3 Oxy -fuel technique

Η μέθοδος καύσης με παρουσία οξυγόνου προσομοιάζει της τεχνικής post-combustion, με τη διαφορά ότι, αντί της παρουσίας αέρα για την καύση, χρησιμοποιείται καθάρο οξυγόνο, με αποτέλεσμα την αυξημένη συγκέντρωση CO₂ στο προϊόν. Ο διαχωρισμός του οξυγόνου και του αζώτου από τον αέρα απαιτεί ξεχωριστή μονάδα (air separation unit). Με την απομάκρυνση του αζώτου, δημιουργείται το πλεονέκτημα της μείωσης των

αζωτοξειδίων, τα οποία επηρεάζουν την καθαρότητα του τελικού προϊόντος, ενώ παράλληλα αποφεύγεται η εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα. Οι Talei et al. (2024), παρουσίασαν τις διαφορές μεταξύ των τεχνολογιών post-combustion και oxy-fuel (Εικόνα 12) σε μονάδες παραγωγής ενέργειας.



Εικόνα 12: Σχηματική σύγκριση διεργασιών τεχνολογιών post-combustion και oxy-fuel (πηγή: Talei et al., 2024)

Σύμφωνα με τους Baskaran et al. (2024), το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση για την παραγωγή οξυγόνου. Ωστόσο, νέες τεχνολογίες έχουν προταθεί για την κάλυψη των αναγκών σε οξυγόνο, όπως μεμβράνες μεταφοράς και μεταφορά ιόντων μέσω χημικών βρόγχων, με την καλύτερη τεχνολογία να είναι η κρυογενική απόσταξη με χρήση αγωγίμων μεμβρανών ιόντων-ηλεκτρονίων. Η εξοικονόμηση με τη χρήση των τεχνολογιών αυτών είναι 19-50%. Επίσης, το υψηλό κόστος για την παραγωγή οξυγόνου μπορεί να μειωθεί με τη χρήση βιοκαυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, η οποία προωθεί και την κυκλική οικονομία.

8.1.4 Chemical looping technique

Η τεχνολογία βασίζεται στην ίδια μέθοδο με την τεχνική oxy-fuel, με τη διαφορά ότι το οξυγόνο για την καύση είναι στη μορφή οξειδίων μετάλλων (*oxygen carriers*) όπως Fe_2O_3 , NiO , CaO ή Mn_2O_3 . Είναι μια κυκλική διαδικασία όπου εναλλάσσονται η αναγωγή και η οξείδωση. Αρχικά το καύσιμο οξειδώνεται προς CO_2 και νερό, μέσω της αναγωγής του μεταλλικού οξειδίου. Στη συνέχεια, μέσω της οξείδωσής του σε άλλο στάδιο, ο oxygen carrier ανακυκλώνεται.

Πρόκειται για μια τεχνική που είναι σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης και προτείνεται για την απανθρακοποίηση αερίων καυσίμων. Ωστόσο, λόγω της δυνατότητάς της να μειώσει τα λειτουργικά κόστη και τους κινδύνους ασφαλείας που πιθανώς να προκύψουν από τη διαχείριση του οξυγόνου στην τεχνική oxy-fuel, η ΕΕ έχει επενδύσει στη σχετική έρευνα, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα. Σύμφωνα με τους Baskaran et al. (2024), το ποσό που έχει δοθεί μέχρι στιγμής για την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής είναι 45 εκ. €. Σημεία στα οποία αναμένεται να εστιάσει η μελλοντική έρευνα είναι η παραγωγή των oxygen carriers σε βιομηχανική κλίμακα και η αναζήτηση νέων υλικών, καθώς και η ανάπτυξη μοντέλων είτε για τον σχεδιασμό των αντιδραστήρων είτε για την ανάπτυξη των μηχανισμών αντίδρασης και των λειτουργικών παραμέτρων.

Γενικά, οι παραπάνω τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία κυρίως αφορούν στην απόδοση σε σχέση με την ποσότητα και την ποιότητα του τελικού προϊόντος, στο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας (το οποίο εστιάζεται στην ενεργειακή κατανάλωση κυρίως) αλλά και στην ωριμότητα της τεχνολογίας, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα και σε μεγάλους όγκους και διαφορετικές ποιότητες τροφοδοσίας. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Pre-combustion	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εφαρμοσμένη σε βιομηχανική κλίμακα και δοκιμασμένη τεχνολογία 2. Γίνεται δέσμευση του CO₂ από το καύσιμο πριν την καύση 3. Η υψηλή συγκέντρωση CO₂ απαιτεί λιγότερη κατανάλωση ενέργειας 4. Σε σχέση με την post-combustion τεχνική απαιτείται λιγότερη κατανάλωση νερού 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Υψηλό κόστος εγκατάστασης 2. Υψηλές ενεργειακές καταναλώσεις 3. Σε περίπτωση αστοχίας της διεργασίας, απαιτείται συνολική διακοπή της λειτουργίας της μονάδας 4. Διάβρωση εξοπλισμού
Post-combustion	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ωριμη τεχνολογία 2. Εφαρμογή και σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις 3. Λιγότεροι «ρυπαντές» στο παραγόμενο προϊόν 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις CO₂ στην τροφοδοσία έχουν χαμηλότερη αποδοτικότητα 2. Απαιτείται προεπεξεργασία για την απομάκρυνση NO_x, SO_x,

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
		<p>σωματιδίων και υγρασίας από τα καυσαέρια</p> <p>3. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, απαιτείται η χρήση ογκώδους εξοπλισμού και ψυκτικών συστημάτων</p>
Oxy-fuel combustion	<p>1. Υψηλή απόδοση</p> <p>2. Απαιτείται παραγωγή καθαρού οξυγόνου για την καύση των καυσαερίων</p> <p>3. Λιγότερες λειτουργικές παράμετροι</p> <p>4. Χαμηλό κόστος εξοπλισμού</p>	<p>1. Μικρή ανάπτυξη σε βιομηχανική κλίμακα</p> <p>2. Πιθανότητα διάβρωσης εξοπλισμού</p> <p>3. Η παραγωγή οξυγόνου με κρυογενετική μέθοδο έχει υψηλό κόστος</p> <p>4. Η απόδοση μειώνεται, όταν η ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται</p>
Chemical looping combustion	<p>1. Η χρήση στερεών μεταλλικών οξειδίων για την καύση του καυσίμου μειώνει τις πιθανότητες ατυχημάτων</p> <p>2. Στην περίπτωση που γίνεται συνδρομή τεχνολογίας μεμβρανών, μειώνεται το ενεργειακό κόστος</p>	<p>1. Ισχυρά ενδόθερμη διαδικασία αεριοποίησης, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους εγκατάστασης</p> <p>2. Σε στάδιο ανάπτυξης, με δυσκολίες εφαρμογής σε βιομηχανική κλίμακα</p>

8.2 Μεταφορά και αποθήκευση

8.2.1 Δίκτυα μεταφοράς

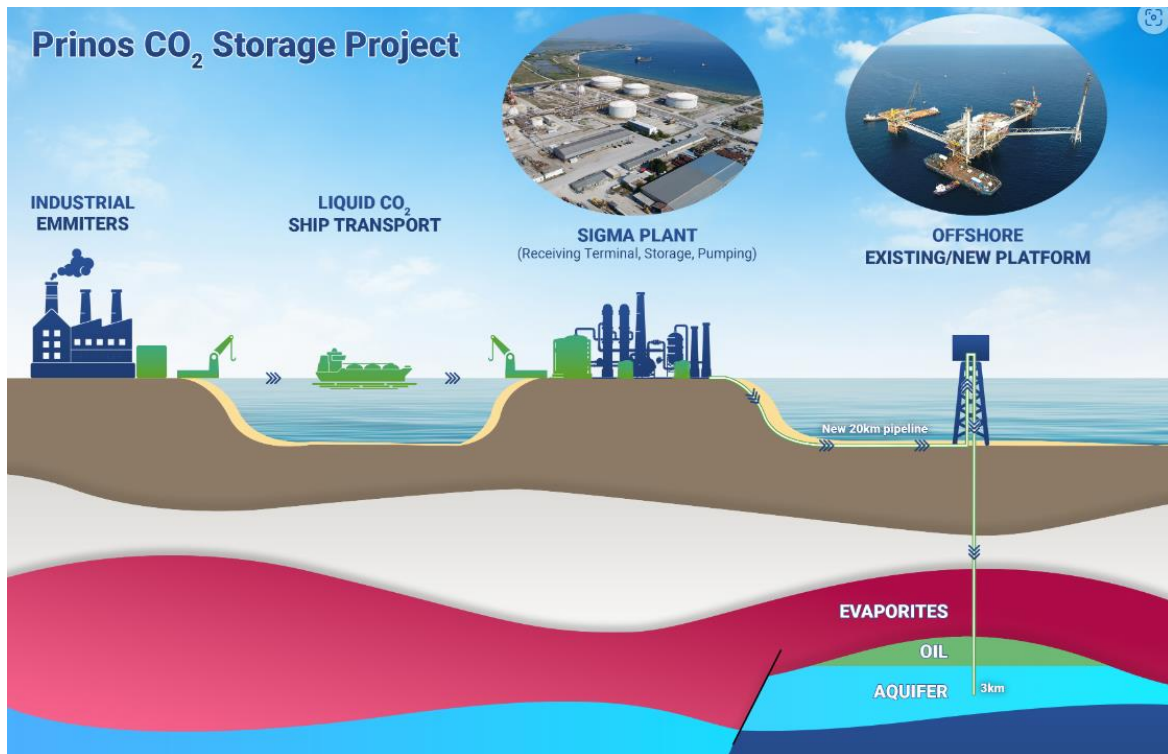
Η ανάπτυξη δικτύων μεταφοράς και αποθήκευσης του δεσμευμένου CO₂ θεωρείται η ραχοκοκαλιά της βιομηχανίας διαχείρισης άνθρακα. Η αύξηση της ανάγκης δέσμευσης άνθρακα δημιούργησε αντίστοιχες ανάγκες αύξησης της δυναμικότητας των δικτύων μεταφοράς και αποθήκευσής του. Προκειμένου να μειωθεί το κόστος, ο κυρίαρχος τρόπος είναι η δημιουργία κοινών δικτύων μεταφοράς και χώρων αποθήκευσης οι οποίοι εξυπηρετούν επιχειρήσεις από μια συγκεκριμένη περιοχή. Η δημιουργία αυτής της νέας κατηγορίας ανεξάρτητων εγκαταστάσεων (CCS sites) παρουσιάζει ιδιαίτερη ανάπτυξη και, σύμφωνα με κάποια μοντέλα, η δημιουργία 160 CCS sites παγκοσμίως με δυναμικότητα 4,2

Γτρα μπορεί να μειώσει το κόστος σε λιγότερο από \$85 ανά τόνο CO₂ (GCCSI, 2023). Στην Ευρώπη, η πρώτη ανοικτή υποδομή μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ είναι η Northern Lights (Εικόνα 13) η οποία θα τεθεί σε λειτουργία το 2024.



Εικόνα 13: Υποδομή μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ στη Νορβηγία-Northern Lights
(πηγή: <https://norlights.com/>)

Στην Ελλάδα, αντίστοιχη υποδομή η οποία φιλοδοξεί να αποτελέσει κομβικό σημείο για την απανθρακοποίηση των βιομηχανιών της Μεσογείου είναι αυτή της ENERGEAN, στον Πρίνο Καβάλας (Εικόνα 14). Η μονάδα αδειοδοτήθηκε για έρευνα γεωλογικών σχηματισμών το 2022 και χρηματοδοτήθηκε από το Ελληνικό Κράτος ως μεγάλη στρατηγική επένδυση. Επίσης, περιλαμβάνεται στο Στρατηγικό Σχέδιο για τη Δέσμευση και Αποθήκευση Άνθρακα στη Μεσόγειο (Mediterranean CCS Strategic Plan) μεταξύ Γαλλίας, Ιταλίας και Ελλάδας. Η εκτιμώμενη χωρητικότητα του γεωλογικού σχηματισμού είναι 3 εκατομμύρια τόνοι ετησίως για 25 χρόνια, ενώ εξετάζεται η δυνατότητα μεγαλύτερης χωρητικότητας για λιγότερα χρόνια, ώστε να μπορούν να εξυπηρετηθούν περισσότερες εγκαταστάσεις.



Εικόνα 14: Σχέδιο μονάδας υποδοχής και αποθήκευσης CO₂ Πρίνου

(πηγή: <https://www.energean.com/>)

Σύμφωνα με την IPCC (IPCC, 2005), ο σχεδιασμός των αγωγών εξαρτάται από φυσικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Λαμβάνονται υπόψη τα φυσικά χαρακτηριστικά του ρευστού σε σχέση με το βέλτιστο μέγεθος του αγωγού, καθώς και ο απαιτούμενος εξοπλισμός μεταφοράς. Επιπλέον, συνεκτιμώνται η γεωγραφία της περιοχής που θα οδεύσει ο αγωγός και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Σημαντική παράμετρος είναι, επίσης, τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της περιοχής (χερσαίας ή θαλάσσιας) που θα εγκατασταθεί ο αγωγός, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σεισμική δραστηριότητα, το βάθος της θάλασσας ή οι υδροφορείς και τα προστατευόμενα είδη χλωρίδας και πανίδας. Τέλος, το έργο σχεδιάζεται και βάσει της εκτίμησης επικινδυνότητας που μπορεί να προκύψει σε περίπτωση όδευσης του αγωγού από κατοικημένες περιοχές. Στα παραπάνω λαμβάνεται υπόψη και το κόστος. Το κόστος των αγωγών κατηγοριοποιείται ως εξής:

- Κόστος κατασκευής, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος εξοπλισμού και υλικών (εκσκαφής κ.ά.) και τα αντίστοιχα εργατικά κόστη.
- Κόστος λειτουργίας, συντήρησης και παρακολούθησης.
- Κόστη όπως διαχείρισης σχεδιασμού, κρατικά τέλη και άλλα.

Οι αγωγοί, που μπορεί να είναι χερσαίοι και υποθαλάσσιοι, κατασκευάζονται βάσει προτύπων όμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται για τους αγωγούς που διακινούν υδρογονάνθρακες, ώστε να είναι ανθεκτικοί στις διαβρώσεις και να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος διαρροών, ενώ πριν τη λειτουργία ο αγωγός υποβάλλεται σε υδραυλικές δοκιμές. Μετά την εγκατάσταση των χερσαίων αγωγών κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, η περιοχή αποκαθίσταται. Στην περίπτωση των υποθαλάσσιων αγωγών, βασικές παράμετροι για τη διάμετρο του αγωγού είναι, εκτός από τον όγκο του διακινούμενου υγρού, και το βάθος της θάλασσας. Σύμφωνα με την IPCC (IPCC, 2005), οι αγωγοί με μεγάλες διαμέτρους (>750 mm) δεν μπορούν να εγκαθίστανται σε βάθη μεγαλύτερα των 500 m.

Κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων, οι διαδικασίες κινούνται σε τρία επίπεδα: α) καθημερινή λειτουργία διακίνησης, β) συντήρηση και γ) διασφάλιση περιβαλλοντικών θεμάτων και θεμάτων ασφαλείας. Οι αγωγοί καθαρίζονται με ειδικές συσκευές («rigs») σε όλο το μήκος τους. Η τεχνολογία των rigs έχει εξελιχθεί, ώστε εκτός από τον καθαρισμό των αγωγών να ιχνηλατούν και εσωτερικές και εξωτερικές διαβρώσεις και άλλες μηχανικές παραμορφώσεις του αγωγού. Στην περίπτωση των χερσαίων αγωγών, γίνεται και εξωτερική επιθεώρηση.

Σημαντική παράμετρος της διαδικασίας μεταφοράς μέσω αγωγών είναι και η ποιότητα του διακινούμενου υγρού. Στις εγκαταστάσεις λειτουργούν και δεξαμενές, οι οποίες αποθηκεύουν προσωρινά το CO₂, έως ότου τροφοδοτηθεί στον αγωγό. Για την αποφυγή τυχόν διαβρώσεων και επιπτώσεων στο περιβάλλον, οι τυπικές προδιαγραφές που πρέπει να έχει το διακινούμενο προϊόν φαίνονται στον Πίνακα 3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Τυπικές προδιαγραφές διακινούμενου προϊόντος σε αγωγούς

(πηγή: IPCC, 2005)

Χαρακτηριστικό	Προδιαγραφή
CO₂	> 95%
Νερό	< 0,489 m ³ στην αέρια φάση
H₂S	< 1500 ppmw
Συνολικό θείο	< 1450 ppmw
Θερμοκρασία	< 48,9 °C
Αζωτο	< 4%
Υδρογονάνθρακες	< 5 % - dew point -28,9 °C
Οξυγόνο	< 10 ppmw

Χαρακτηριστικό	Προδιαγραφή
Γλυκόλη	$< 4 \times 10^{-5} \text{ Lm}^{-3}$ (η γλυκόλη δεν πρέπει να βρίσκεται σε υγρή φάση στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας λειτουργίας του αγωγού)

Παράλληλα με τους κοινούς αγωγούς, υπάρχει ανάπτυξη και στις τεχνολογίες μεταφοράς CO₂ που το μεταφέρουν στις εγκαταστάσεις CCS. Οι τρόποι μεταφοράς είναι μέσω πλοίων, φορτηγών οχημάτων και τρένων, είτε με σύνθετους τρόπους. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι τρέχουσες δυναμικότητες κάθε μεθόδου μεταφοράς, οι συνθήκες στις οποίες μεταφέρεται το CO₂ και συγκριτική τεχνική και οικονομική αξιολόγηση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Συγκριτική τεχνική και οικονομική αξιολόγηση μεθόδων μεταφοράς CO₂

(πηγή: GCCSI, 2023)

Μέθοδος μεταφοράς	Τρέχουσα ετήσια δυναμικότητα (Mt CO ₂)*	Κατάσταση CO ₂	Συνθήκες μεταφοράς		Συγκριτική αξιολόγηση
			Πίεση (barg**)	Θερμοκρασία (°C)	
Πλοίο	> 3	Υγρό	7-45	-52 έως 10	<ol style="list-style-type: none"> Υψηλά λειτουργικά κόστη και χαμηλότερα κόστη κεφαλαίου σε σχέση με τη μεταφορά μέσω αγωγού Ευρεία χρήση για μικρές ποσότητες διακίνησης στις βιομηχανίες τροφίμων και ποτών Προσφέρεται ευελιξία στον διακινούμενο όγκο και τις οδούς μεταφοράς
Φορτηγό	>1	Υγρό	17-20	-30 έως -20	<ol style="list-style-type: none"> Μικρές διακινούμενες ποσότητες 2-30 t/φορτίο Υψηλό κόστος για μεταφορές μεγάλης κλίμακας Τα αέρια που δημιουργούνται λόγω της φόρτωσης/εκφόρτωσης

Μέθοδος μεταφοράς	Τρέχουσα ετήσια δυναμικότητα (Mt CO ₂)*	Κατάσταση CO ₂	Συνθήκες μεταφοράς		Συγκριτική αξιολόγηση
			Πίεση (barg**)	Θερμοκρασία (°C)	
					(boil-off gases) εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα (~10% του φορτίου)
Σιδηρόδρομος	>1	Υγρό	7-26	-50 έως -20	<ol style="list-style-type: none"> 1. Δεν υπάρχουν μεγάλης κλίμακας μεταφορές 2. Απαιτούνται ειδικές υποδομές για τις φορτοεκφορτώσεις 3. Για χαμηλότερο κόστος, απαιτείται η χρήση των υφιστάμενων δικτύων 4. Πλεονεκτεί για μεσαίες ή μεγάλες μεταφορές

*περιλαμβάνονται και οι μεταφορές CO₂ για χρήσεις στην αγροτική βιομηχανία και τη βιομηχανία τροφίμων

** σχετική πίεση προς την ατμοσφαιρική

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4, σημαντικό πλεονέκτημα στα μεταφορικά μέσα έχουν τα πλοία. Τα πλοία αυτά είναι εξειδικευμένα και προσομοιάζουν με εκείνα που μεταφέρουν LPG και LNG. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Φόρτωση από τις δεξαμενές μέσω αντλιών: Το φορτίο γεμίζει το πλοίο και στο κενό που προκύπτει γίνεται υπερπλήρωση με αέριο CO₂, για να αποφευχθεί η επιμόλυνση με αέρα και ξηρό πάγο. Οι αντλίες φόρτωσης είναι ειδικού τύπου, ώστε να είναι ανθεκτικές σε υψηλές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες.
- Μεταφορά στον χώρο αποθήκευσης: Η διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος και υγρού κατά τη μεταφορά οδηγεί στη δημιουργία αερίων (boil off gases) τα οποία αυξάνουν την πίεση του φορτίου. Για λόγους αποφυγής υπερπίεσης, τα αέρια θα πρέπει να εκλυθούν στην ατμόσφαιρα. Επίσης, τα απαέρια, λόγω της καύσης για την κίνηση του πλοίου, εκπέμπουν CO₂. Ως εκ τούτου, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα της διαδικασίας CCS αυξάνεται. Σημαντική λύση για τη μείωσή του, είναι η χρήση ψυκτικών μέσων, τα οποία υγροποιούν το εκπεμπόμενο CO₂ και το αποθηκεύουν.
- Εκφόρτωση: Κατά την εκφόρτωση και το άδειασμα των δεξαμενών του πλοίου, γίνεται πλήρωσή τους με ξηρό CO₂, ώστε να αποφεύγεται η επιμόλυνση της δεξαμενής με υγρασία.

Στη συνέχεια, το ξηρό CO₂ ανακυκλώνεται μέσω υγροποίησης, όταν η δεξαμενή γεμίζει εκ νέου.

Όταν το πλοίο επιθεωρείται ή επισκευάζεται, το ξηρό CO₂ πρέπει να αντικατασταθεί με αέρα, έτσι ώστε να είναι ασφαλής η είσοδος των εργαζομένων. Μετά από την τακτική επιθεώρηση ή την επισκευή και για να είναι έτοιμο το πλοίο να δεχθεί νέο φορτίο, επαναλαμβάνεται η πλήρωση των δεξαμενών του με ξηρό CO₂.

8.2.2 Αποθήκευση

Η γεωλογική αποθήκευση του CO₂ είναι το σημαντικότερο και δυσκολότερο κομμάτι της διαδικασίας δέσμευσής του από τα καυσαέρια της βιομηχανίας. Το νομοθετικό πλαίσιο για τη γεωλογική αποθήκευση του άνθρακα έχει θεσμοθετηθεί από το 2009, με την Carbon Capture and Storage Directive (EU, 2009). Με την Οδηγία αυτή καθορίζονται οι προδιαγραφές για την επιλογή των γεωλογικών σχηματισμών, με σκοπό την αποφυγή πιθανών διαρροών CO₂ και δυσμενών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ο αποθηκευτικός χώρος θα πρέπει να λάβει αδειοδότηση, κατόπιν εκπόνησης μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η συνολική διαθεσιμότητα των χώρων αποθήκευσης, σύμφωνα με το Διεθνές Πρακτορείο Ενέργειας (IEA, 2021), βάσει γεωλογικών δεδομένων, εκτιμάται ότι είναι μεταξύ 8.000 και 55.000 Gt και θεωρείται ότι είναι ικανή για να επιτευχθεί ο στόχος της συγκράτησης της θερμοκρασίας του πλανήτη σε επίπεδα χαμηλότερα του 1,5 °C που τέθηκε κατά τη Σύνοδο των Παρισίων. Οι περισσότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί που συμβάλλουν στη δυναμικότητα αποθήκευσης είναι παράκτιοι, ωστόσο σημαντική συμβολή (2.000-13.000 Gt) έχουν και οι υπεράκτιοι χώροι αποθήκευσης. Σύμφωνα με το EIA, η παραπάνω δυναμικότητα δεν αντικατοπτρίζει την ικανότητα εμπορικής ανάπτυξης όλων των χώρων αποθήκευσης, λόγω περιορισμών στη χρήση γης, αλλά και τεχνικών περιορισμών που σχετίζονται με τη γεωλογία του χώρου. Οι Dziejarski et al. (2023) παρουσίασαν τη διαθεσιμότητα αποθήκευσης ανά τον κόσμο, όπου τα μεγαλύτερα ποσοστά βρίσκονται στις ΗΠΑ και στην Κίνα (62,2% και 23,75%), ενώ η Αυστραλία και ο Καναδάς κατέχουν ποσοστά της τάξης του 3%.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η έγχυση και η κατακράτηση του CO₂ σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η μέθοδος εφαρμόζεται από τη δεκαετία του '70, κυρίως για την ανάκτηση πετρελαίου, ωστόσο το 1966 δοκιμάστηκε αποκλειστικά για την αποθήκευση δεσμευμένου CO₂. Η κατακράτηση του CO₂ είναι μια φυσική διαδικασία που προσομοιάζει με αυτή του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Η έγχυση του CO₂ στο υπέδαφος, σε

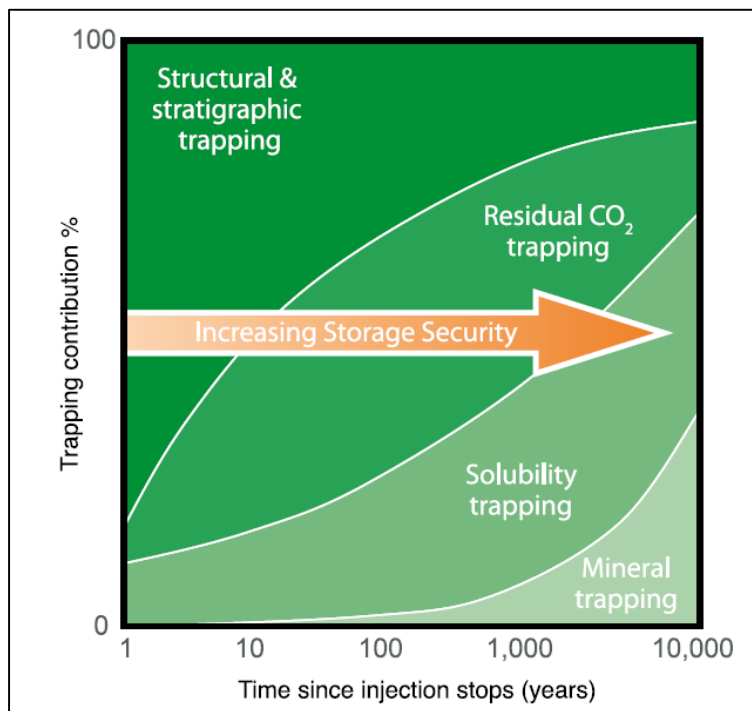
κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς και σε συγκεκριμένο βάθος, είναι η μοναδική μέχρι σήμερα αποδεκτή μέθοδος. Το CO₂ που εγχέεται κατακρατείται/παγιδεύεται με φυσικούς και γεωχημικούς μηχανισμούς. Είναι προφανές ότι η απόδοση της μεθόδου, δηλαδή η αποφυγή έκλυσης του CO₂ στη διάρκεια του χρόνου στο περιβάλλον, εξαρτάται από αυτόν τον μηχανισμό. Η μεγαλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται, όταν το κατακρατούμενο CO₂ δεν κινείται, λόγω της παγίδευσής του από μη διαπερατά πετρώματα ή λόγω της απορρόφησής του σε πορώδη υλικά ή λόγω της δημιουργίας φυσικών και χημικών δεσμών με τα πετρώματα. Οι μηχανισμοί κατακράτησης είναι οι παρακάτω:

- Φυσική κατακράτηση: Μπορεί να επιτευχθεί μέσω στρωμάτωσης (stratigraphic) ή λόγω δομής (structural) ή σε αλατούχους σχηματισμούς (saline formations). Στην πρώτη περίπτωση, το CO₂ παγιδεύεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι στο πάνω μέρος εμφανίζουν μη διαπερατά πετρώματα (caprocks), όπως είναι οι σχιστόλιθοι ή οι κλίνες αλάτων. Η δομική κατακράτηση επιτυγχάνεται μέσω αναδιπλούμενων ή κατεστραμμένων πετρωμάτων. Η υδροδυναμική κατακράτηση μπορεί να πραγματοποιηθεί κατόπιν έγχυσης του CO₂ σε αλατούχους σχηματισμούς. Στην περίπτωση αυτή, το CO₂ δεν παγιδεύεται, αλλά μεταναστεύει σε μεγάλες αποστάσεις. Οι αλατούχοι σχηματισμοί είναι πορώδεις σχηματισμοί πετρωμάτων, κορεσμένοι με αλμόλοιπο (νερό με μεγάλη ποσότητα αλάτων). Το εγχέομενο CO₂ εκτοπίζει το αλμόλοιπο που περιέχει το πέτρωμα και μετακινείται προς τα πάνω, έως ότου παγιδευτεί στους δομικούς σχηματισμούς. Μεγάλες ποσότητες μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα διαλύονται μαζί με το νερό και καταλήγουν στους υδροφορείς.
- Γεωχημική κατακράτηση: Το CO₂ διαλύεται στο νερό του γεωλογικού σχηματισμού και δεν υφίσταται ως ξεχωριστή φάση σε αυτόν, με αποτέλεσμα να μην οδηγείται προς την επιφάνεια. Στη συνέχεια, δημιουργούνται ιόντα αλάτων, με συνέπεια την αύξηση του pH. Η αντίδραση της διάλυσης στο νερό του γεωλογικού σχηματισμού, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας, είναι:



Τέλος, το παραγόμενο ανθρακικό οξύ αντιδρά με ανόργανα πυριτικά ή ανθρακικά άλατα και ορυκτά που βρίσκονται στον γεωλογικό σχηματισμό, δημιουργώντας ανόργανα ανθρακικά υλικά (mineral trapping). Οι αντιδράσεις μπορεί να γίνουν άμεσα στην περίπτωση των ανθρακικών αλάτων ή παρά πολύ αργά (εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια, στην περίπτωση των πυριτικών αλάτων). Η τεχνική αυτή κατακράτησης θεωρείται η πιο αποτελεσματική, λόγω της σταθερότητάς της στο πέρασμα του χρόνου και της θεωρητικά μεγάλης δυνατότητας αποθήκευσης που διαθέτει, παρόλο που πρόκειται για αρκετά αργή

διαδικασία. Η IPCC (2021) παρουσίασε την ικανότητα ασφαλούς αποθήκευσης του CO₂ στο πέρασμα του χρόνου, ανάλογα με τον μηχανισμό κατακράτησης (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Δυνατότητα μόνιμης αποθήκευσης στον χρόνο σε σχέση με τον μηχανισμό κατακράτησης

(πηγή: IPCC, 2021)

Η γεωλογική αποθήκευση του CO₂ πραγματοποιείται κατόπιν συμπύκνωσής του έως τη λεγόμενη υπερκρίσιμη φάση, δηλαδή το σημείο εκείνο που η υγρή και η αέρια φάση βρίσκονται σε ισορροπία. Ανάλογα με τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος, υπάρχει αύξηση της πυκνότητάς του και σε βάθος >800 m θα βρεθεί στην υπερκρίσιμη φάση.

Οι γεωλογικοί χώροι που θεωρούνται κατάλληλοι για αποθηκευτικοί χώροι είναι οι παρακάτω:

- Εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου.
- Μερικώς εξαντλημένα ή ανεκμετάλλευτα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, με δυνατότητα ανάκτησής τους (*Enhanced oil recovery, CO₂-EOR/ Enhanced gas recovery CO₂-EGR*).
- Βαθιά, μη εξορυζιμα κοιτάσματα άνθρακα ή ανθρακικές φλέβες - κλίνες άνθρακα ενισχυμένου CH₄ (*CO₂-ECBM*).
- Βαθείς αλατούχοι υδροφορείς.

Από τους παραπάνω εναλλακτικούς χώρους αποθήκευσης, τα μερικώς ή ανεκμετάλλευτα εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου και οι αλατούχοι υδροφορείς είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την αποθήκευση CO₂. Η αποθήκευση CO₂ μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσω έγχυσης στους ωκεανούς και διάλυσής του στο νερό ή σε ορυκτούς σχηματισμούς. Οι ωκεανοί απορροφούν σημαντικές ποσότητες CO₂ κατά τον κύκλο του άνθρακα, ως εκ τούτου η εναλλακτική αυτή δύναται να αυξήσει σημαντικά τη συνολική αποθηκευτική ικανότητα. Παράμετροι για την αποδοτική και ασφαλή αποθήκευση είναι το βάθος έγχυσης, η διασπορά της συγκέντρωσης CO₂ και η διάρκεια παραμονής του CO₂, μέχρι να επιστραφεί στην ατμόσφαιρα. Οι μέθοδοι αποθήκευσης στους ωκεανούς είναι η έγχυσή του: α) στην επιφάνεια του βυθού και β) στο υδατικό σώμα του ωκεανού. Στην πρώτη περίπτωση δημιουργούνται πλούμια, ενώ στη δεύτερη πραγματοποιείται αντίδραση με το θαλασσινό νερό προς ένυδρες ενώσεις. Η αποθήκευση σε ωκεανούς, ωστόσο, μπορεί να δημιουργήσει περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ υπάρχουν τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί για την υλοποίησή της. Η κυριότερη περιβαλλοντική επίπτωση είναι η επίδραση στους θαλάσσιους οργανισμούς από την οξίνιση και η μείωση του οξυγόνου στο θαλασσινό νερό. Σύμφωνα με την IPCC (2021), οι κυριότερες διεργασίες της θαλάσσιας ζωής που μπορεί να επηρεαστούν από την αποθήκευση CO₂ φαίνονται στον Πίνακα 5. Συνολικά, αναφέρεται διαταραχή του οικοσυστήματος, καθώς και επίδραση στους βιοχημικούς κύκλους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Επίδρασεις ωκεάνιας αποθήκευσης CO₂ στο θαλάσσιο οικοσύστημα
(πηγή: IPCC, 2021)

Επίδραση	Επηρεαζόμενα είδη
Ασβεστοποίηση	<ul style="list-style-type: none"> ○ Κοράλλια ○ Ασβεστολιθικό βένθος και πλαγκτόν
Οξειδοαναγωγικές ρυθμίσεις / Βιοσύνθεση πρωτεΐνης/ Ιοντική ομοιόσταση	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ψάρια ○ Καρκινοειδή ○ Sipunculids
Θνησιμότητα	<ul style="list-style-type: none"> ○ Οστρακοειδή ○ Ψάρια ○ Κωπήποδα ○ Εχινόδερμα/γαστρόποδα ○ Sipunculids
N-μεταβολισμός	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sipunculids
Ανάπτυξη	<ul style="list-style-type: none"> ○ Οστρακοειδή

Επίδραση	Επηρεαζόμενα είδη
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ψάρια ○ Εχινόδερμα/γαστρόποδα ○ Οστρακοειδή ○ Μύδια
Αναπαραγωγή	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ψάρια ○ Κωπήποδα ○ Εχινόδερμα/γαστρόποδα
Αναπνευστικό	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ψάρια
Φωτοσύνθεση	<ul style="list-style-type: none"> ○ Φυτοπλαγκτόν

Η αρνητική επίδραση που μπορεί να έχει στο θαλάσσιο οικοσύστημα η αποθήκευση του CO₂ στους ωκεανούς θέτει επιτακτική την ανάγκη παρακολούθησής του. Μέσω της ποσοτικοποίησης της διασποράς του CO₂ στον τόπο αποθήκευσής του και της μέτρησης βιολογικών και γεωχημικών παραμέτρων, η παρακολούθηση έχει στόχο τον εντοπισμό πιθανών διαρροών και την διασφάλιση ότι αυτές δεν θα συμβούν. Συνολικά, η τεχνοοικονομική σύγκριση των εναλλακτικών μόνιμης αποθήκευσης και η τρέχουσα κατάσταση ετοιμότητάς τους παρουσιάστηκε από τους Dziejarski et al. (2023) (Πίνακας 6).

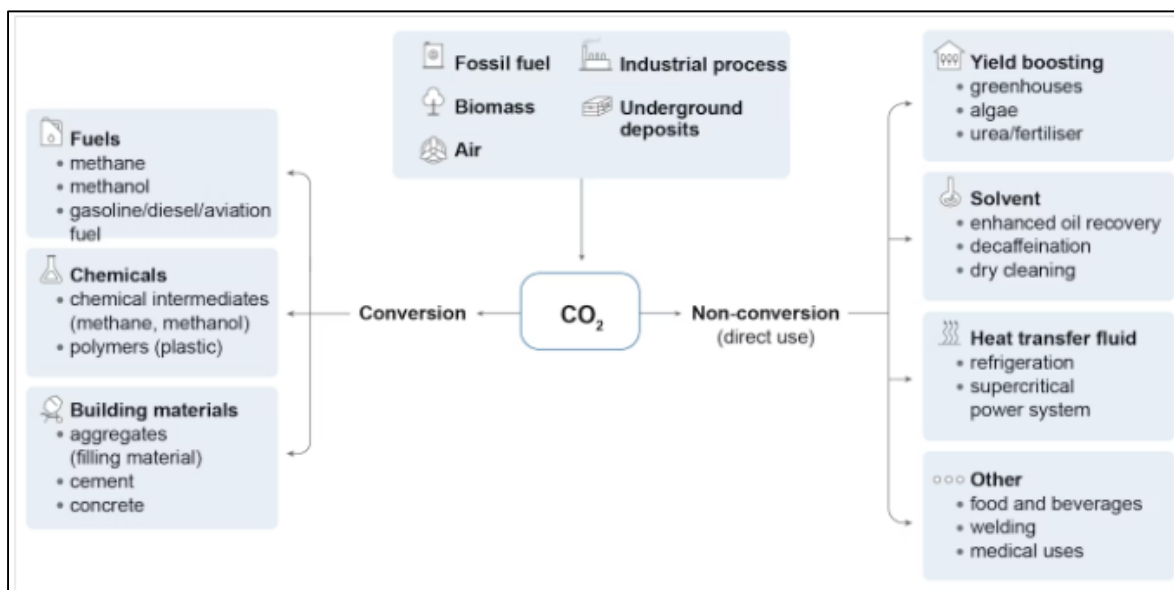
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Σύγκριση χώρων αποθήκευσης και τρέχουσα κατάσταση εφαρμογής
(πηγή: Dziejarski et al., 2023)

Χώρος αποθήκευσης	Τρέχουσα κατάσταση	Επίπεδο ετοιμότητας - Technology readiness level (TRL)
Αλατούχοι σχηματισμοί	Ικανοποιητικός ρυθμός έγχυσης (1 Μτρα), με μόνιμη αποθήκευση και χαμηλό κόστος. Δυνατότητα παρακολούθησης.	Εμπορική εφαρμογή
CO ₂ -EOR	Αποδεδειγμένοι αποθηκευτικοί χώροι που μπορεί να αυξήσουν την ανάκτηση πετρελαιοειδών. Απαιτείται ανάπτυξη προγράμματος παρακολούθησης για τη διασφάλιση της μόνιμης αποθήκευσης του CO ₂	Εμπορική εφαρμογή
CO ₂ -EGR	Υφιστάμενοι αποθηκευτικοί χώροι που μπορεί να αυξήσουν την ανάκτηση	Εμπορική εφαρμογή

Χώρος αποθήκευσης	Τρέχουσα κατάσταση	Επίπεδο ετοιμότητας - Technology readiness level (TRL)
	φυσικού αερίου. Ασφάλεια αποθήκευσης.	
Εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου	Τεχνικά ώριμες μέθοδοι, με ασφάλεια αποθήκευσης. Ωστόσο, έχουν πεπερασμένη χωρητικότητα και δεν έχουν ακόμη εμπορική εφαρμογή	Σε φάση ανάπτυξης για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση
CO ₂ -ECBM	Αύξηση δυνατότητας ανάκτησης CH ₄ , με δυνατότητα επιπρόσθετου κέρδους. Εφαρμογή σε ανεκμετάλλευτα ανθρακικά κοιτάσματα. Περιορισμένη δυνατότητα παρακολούθησης του πλουμίου. Μείωση της διαπερατότητας των ανθρακικών πετρωμάτων. Αυξημένα κόστη και σύνθετη λειτουργία.	Σε φάση διερεύνησης σε εργαστηριακή κλίμακα
Ωκεανοί	Μη νομοθετημένη μέθοδος, με πολλές επικινδυνότητες και μη προβλέψιμα αποτελέσματα.	Σε φάση διερεύνησης

9. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η αξιοποίηση του CO₂ για την ανάπτυξη νέων προϊόντων είναι μια ευκαιρία περιορισμού της κλιματικής αλλαγής και ενίσχυσης της κυκλικής οικονομίας που έχει προσελκύσει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της βιομηχανίας και των επενδυτών, καθώς και των νομοθετικών μηχανισμών. Η αξιοποίηση αυτή μπορεί να υποστηρίξει σημαντικά τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, με την προϋπόθεση ότι είναι δυνατή η εφαρμογή σε εμπορική κλίμακα και η παραγωγή προϊόντων με χαμηλότερες εκπομπές στον συνολικό κύκλο ζωής τους. Σύμφωνα με το Διεθνές Πρακτορείο Ενέργειας (International Energy Agency) (IEA, 2019), η αξιοποίηση δύναται να συμβάλει στην απομάκρυνση CO₂ από το περιβάλλον κατά 10 MtCO₂/έτος, ωστόσο υπάρχουν ακόμη περιορισμοί στην εφαρμογή σε εμπορική κλίμακα και από τη νομοθεσία. Παγκοσμίως, 230 Mtpa δεσμευμένου CO₂ χρησιμοποιούνται, με κυριότερες διεργασίες την παραγωγή ουρίας και την ανάκτηση πετρελαιοειδών (130 και 70-80 Mtpa, αντίστοιχα). Επιπλέον, χρήση του CO₂ γίνεται στην παραγωγή τροφίμων και ποτών, μετάλλων, πυροσβεστικών μέσων και στη βιομηχανία φαρμακευτικών και ιατρικών ειδών. Αναδυόμενες χρήσεις είναι η παραγωγή καυσίμων, χημικών και δομικών υλικών και η ενίσχυση των καλλιεργειών. Η αξιοποίηση του CO₂ μπορεί να γίνει είτε απευθείας (*direct use*) είτε κατόπιν μετατροπής (*conversion*). Ο IEA (2019) παρουσίασε τις δυνατότητες αξιοποίησης, κατηγοριοποιώντας αυτές τις διεργασίες σύμφωνα με τον διαχωρισμό της Εικόνας 16).



Εικόνα 16: Άμεσες και κατόπιν μετατροπής χρήσεις δεσμευμένου CO₂

(πηγή: IEA, 2019)

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότεροι τομείς όπου μπορεί να αξιοποιηθεί το CO₂ και οι σχετικές διαθέσιμες τεχνολογίες.

9.1 Δομικά υλικά

Η κυριότερη χρήση CO₂ στον τομέα των κατασκευών αφορά στην παραγωγή τσιμέντου και αδρανών υλικών (χαλίκι, άμμος ή θρυμματισμένες πέτρες) για την παραγωγή σκυροδέματος. Τα «πράσινα» υλικά κατασκευής κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος τα τελευταία χρόνια, ενώ η ετήσια παραγωγή σκυροδέματος (25 δις. τόνοι) και αδρανών υλικών (*aggregates*, 40 δις. τόνοι) έχει αναδείξει τα δομικά υλικά ως έναν από τους τομείς όπου το CO₂ μπορεί να αξιοποιηθεί σε μεγάλες ποσότητες και με βιώσιμο τρόπο. Η ανθρακοποίηση μπορεί να αντικαταστήσει φυσικά και υφιστάμενα συνθετικά δομικά υλικά κατασκευής, παράγοντας αδρανή υλικά και σκυρόδεμα. Το CO₂ μπορεί να αξιοποιηθεί στην παραγωγή σκυροδέματος, του περισσότερο χρησιμοποιούμενου βιομηχανικού υλικού παγκοσμίως. Η πρόσθεση CO₂ στο σκυρόδεμα μπορεί να γίνει με έγχυση σε φρέσκο υλικό για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα ή με έκθεση σε αέριο CO₂ σε αντιδραστήρα για μερικές ώρες ή ημέρες. Επιπλέον, τα αδρανή υλικά, τα οποία αποτελούν το 60-80% κατά όγκο του σκυροδέματος, προέρχονται κυρίως από φυσικές πηγές. Δεδομένου ότι οι πηγές αυτές έχουν μια μειωμένη διαθεσιμότητα, αναζητήθηκαν τρόποι παραγωγής ανακυκλωμένων ή συνθετικών *aggregates*. Τα ανακυκλωμένα *aggregates* μπορούν να προέλθουν από απόβλητα εκσκαφών και κατεδαφίσεων (*AEKK*), ενώ τα συνθετικά από την ένωση/συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων. Και στις δυο περιπτώσεις η ανθρακοποίηση βελτιστοποιεί τις μηχανικές ιδιότητες των *aggregates*.

Η ανθρακοποίηση (*mineral carbonation*) των δομικών υλικών συνήθως αφορά στην αντίδραση αλκαλικών στερεών (συνήθως περιέχονται Ca ή Mg, με το CO₂ σε ρευστή μορφή), σε κανονικές συνθήκες πίεσης και υγρασίας, παράγοντας ανθρακικά άλατα. Κατά την αντίδραση, το αλκαλικό στοιχείο διαλύεται από το υπόστρωμα, το CO₂ διαλύεται στην υγρή φάση και το ανθρακικό άλας καθιζάνει από το υπερκορεσμένο διάλυμα. Συνήθη αντιδρώντα δομικά υλικά είναι το τσιμέντο Πόρτλαντ (*Portland Cement, PC*), τα βιομηχανικά στερεά απόβλητα και τα μαγνησιούχα τσιμεντοειδή υλικά, όπου το Ca και το Mg βρίσκονται σε αφθονία και με τη δυνατότητα αντίδρασης. Το τσιμέντο PC περιέχει περισσότερο από 60% πυριτικό ασβέστιο, κάτι που το καθιστά ιδανικό για την αντίδραση με CO₂ και νερό προς ανθρακικό ασβέστιο. Κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, τα άνυδρα συστατικά του διαλύονται στο νερό, με αποτέλεσμα την αύξηση του στερεού υλικού και τη

μείωση του πορώδους του, οδηγώντας στην αύξηση της σκληρότητάς του. Κατά την ανθρακοποίηση, το CO₂ σε αέρια φάση διαχέεται και διαλύεται στο διάλυμα των πόρων του τσιμέντου και αντιδρά με το ασβέστιο και το πυρίτιο προς σχηματισμό CaCO₃ και silica gel. Η αντίδραση αυτή έχει το ίδιο αποτέλεσμα με την ενυδάτωση, δηλαδή την ενίσχυση της σκληρότητας του τσιμέντου. Η ανθρακοποίηση, λόγω του κορεσμού των πόρων του με νερό, μπορεί να έχει αργή εξέλιξη σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος.

Τα στερεά απόβλητα από βιομηχανικές διεργασίες παραγωγής μετάλλων, εξόρυξης, ηλεκτρονικού εξοπλισμού και αποτέφρωσης αποβλήτων, όπως σκωρία, ιπτάμενη τέφρα, σκόνη κλιβάνων κλπ, περιέχουν αλκαλικά στοιχεία (Al, Ca, Mg, Si κ.ά.) τα οποία μπορούν να ανθρακοποιηθούν με CO₂. Ο μηχανισμός ανθρακοποίησης γίνεται με πέντε τρόπους: α) διάχυση CO₂ και Ca²⁺ από και προς τις περιοχές αντίδρασης με ελεγχόμενο τρόπο, β) επιφανειακά με κρυσταλλοποίηση σωματιδίων, γ) διάλυση του υδροξειδίου του ασβεστίου στην επιφάνεια, δ) σύνδεση στην επιφάνεια. Το μειονέκτημα των βιομηχανικών αποβλήτων είναι η ετερογένειά τους, με αποτέλεσμα τις αργές αντιδράσεις. Τέλος, τα τσιμεντοειδή υλικά που περιέχουν MgO αποτελούν τα τελευταία χρόνια μια καλή εναλλακτική για την αξιοποίηση του CO₂. Καταρχήν πραγματοποιείται αντίδραση με νερό για την παραγωγή Mg(OH)₂, το οποίο γίνεται συνδετικός κρίκος, και στη συνέχεια η αντίδραση με το CO₂ για την παραγωγή ανθρακικού μαγνησίου και άλλων ανθρακούχων ενώσεων του μαγνησίου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις παραπάνω αντιδράσεις παρουσιάστηκαν από τους Li et al. (2022) και συνοψίζονται στον Πίνακα 7.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Παράγοντες επίδρασης ανθρακοποίησης δομικών υλικών*(πηγή: Li et al., 2022)*

Παράγοντες		Επίδραση
Συνθήκες αντίδρασης	Συνθήκες CO ₂	<ul style="list-style-type: none">• Ανθρακοποίηση σε χαμηλές (συνθήκες κενού) και υψηλές (υπερκρίσιμη φάση) πιέσεις• Οι υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ και πιέσεις οδηγούν σε υψηλούς ρυθμούς ανθρακοποίησης. Ωστόσο, υπάρχει κίνδυνος μη βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος, λόγω των πολύ αυξημένων συγκεντρώσεων
	Θερμοκρασία	<ul style="list-style-type: none">• Οι υψηλές θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερη διάλυση του Ca αλλά μειωμένη διαλυτότητα CO₂• Η δέσμευση του CO₂ είναι αυξημένη σε θερμοκρασίες >60 °C και σε ατμοσφαιρική πίεση• Το ανθρακικό ασβέστιο είναι σταθερότερο σε χαμηλές θερμοκρασίες
	Σχετική υγρασία	<ul style="list-style-type: none">• Η σχετική υγρασία της τάξης των 50-70% είναι η βέλτιστη για την ανθρακοποίηση των μειγμάτων PC• Η χαμηλή σχετική υγρασία περιορίζει την κινητικότητα της ανθρακοποίησης, ενώ η υψηλή σχετική υγρασία μειώνει τη διάχυση του CO₂
Ιδιότητες υποστρώματος	Επιφάνεια	<ul style="list-style-type: none">• Η μεγάλη επιφάνεια προκρίνεται για μεγαλύτερης έκτασης ανθρακοποίηση, ωστόσο μπορεί να έχει μειωμένη ενεργειακή απόδοση
	Σύσταση	<ul style="list-style-type: none">• Οι υψηλές συγκεντρώσεις Ca/Mg έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένη ανθρακοποίηση• Μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά υλικά, όπως ποζολανικές ενώσεις, γύψος ή άλλα υλικά που περιέχουν βαρέα μέταλλα
	Πορώδες	<ul style="list-style-type: none">• Το χαμηλό πορώδες έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη διάχυση του CO₂ και πιθανώς οδηγεί σε σχηματισμό συμπυκνωμάτων
	Περιεχόμενο νερό	<ul style="list-style-type: none">• Η συγκέντρωση του νερού πρέπει να ελέγχεται, ώστε να μην παρεμποδίζεται η διάχυση του CO₂

9.2 Καύσιμα/Χημικά/Πλαστικά

Η αξιοποίηση σε τομείς παραγωγής καυσίμων, χημικών και πλαστικών εμφανίζει σημαντική δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης και απομάκρυνσης CO₂. Σε αντίθεση με τα δομικά υλικά, απαιτείται περισσότερη ενέργεια για την παραγωγή τους. Γίνεται με δυο τρόπους: α) απευθείας υδρογόνωση και β) υδρογόνωση κατόπιν μετατροπής. Στην πρώτη περίπτωση, η απευθείας πρόσθεση του υδρογόνου έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεθανόλης, μεθανίου και άλλων χημικών ουσιών. Η μεθανόλη μπορεί να μετατραπεί σε βενζίνη και άλλα χημικά. Επίσης, τα βασικά δομικά στοιχεία των πλαστικών, τα πολυμερή, παράγονται από τις παραπάνω ενώσεις ή με απευθείας πρόσθεση CO₂ στη δομή τους προς παραγωγή αφρωδών υλικών (π.χ. στρώματα). Η μετατροπή προς μεθανόλη, ωστόσο, έχει αυξημένο κόστος, λόγω της χρήσης καταλυτών για να ενεργοποιηθούν τα αντιδρώντα, και υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα παραγωγής υδρογόνου. Η αναστροφή του κόστους μπορεί να γίνει με παραγωγή καταλυτών με καλύτερες αποδόσεις και παραγωγή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Στη δεύτερη περίπτωση, το προϊόν υδρογόνωσης παράγεται κατόπιν μετατροπής του CO₂ σε CO, το οποίο είναι χημικά πιο ενεργό. Η μετατροπή προς CO μπορεί να γίνει μέσω καταλυτικών διεργασιών, με αναμόρφωση, χρησιμοποιώντας CH₄ (ή άλλους ελαφρούς υδρογονάνθρακες) ή με ηλεκτροχημικές μεθόδους. Και σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να αναζητηθεί η χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων και εκπομπών άνθρακα παραγωγή υδρογόνου.

9.3 Προϊόντα βασισμένα σε άλγη

Η αξιοποίηση του CO₂ για την παραγωγή προϊόντων που βασίζονται σε άλγη θεωρείται υποσχόμενη διεργασία στον τομέα των βιολογικών λιπασμάτων, των ζωοτροφών και σε πρόσθετα διατροφής, λόγω του ότι δεν απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη διεργασιών, για να μειωθούν τα κόστη παραγωγής. Η άλγη, ένας μικροοργανισμός με μεγάλη φωτοσυνθετική ικανότητα, παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως:

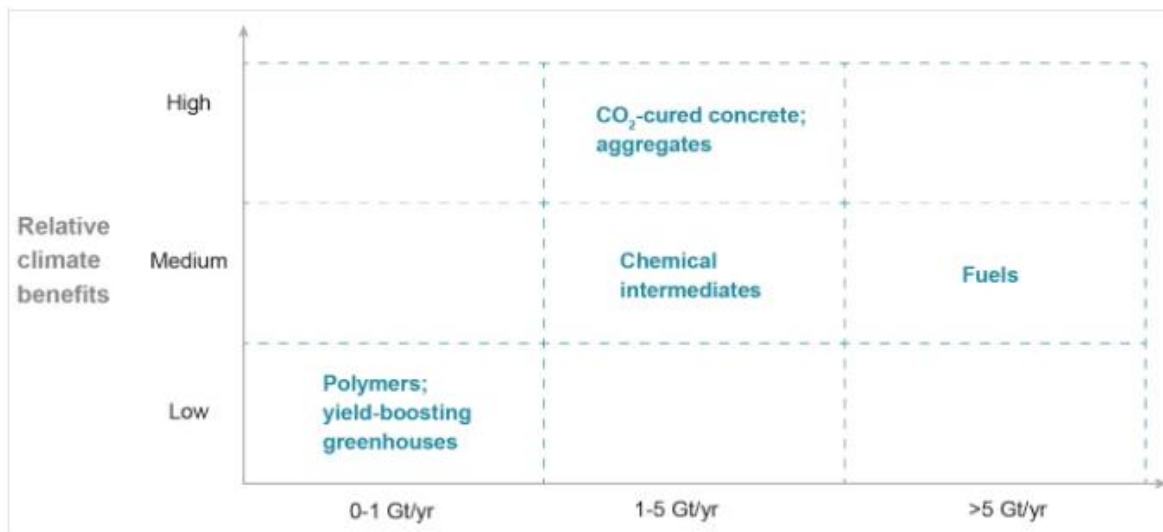
- Απευθείας τροφοδοσία καυσαερίων στην άλγη, με αποτέλεσμα την αποφυγή συστημάτων δέσμευσης και κατακράτηση και άλλων ρύπων όπως SOx, NOx.
- Χαμηλή απαίτηση καθαρότητας δεσμευμένου CO₂.
- Αντιστάθμιση κόστους εγκατάστασης και λειτουργικού κόστους, λόγω της δυνατότητας εμπορικής αξιοποίησης των προϊόντων.
- Δυνατότητα ανάπτυξης καλλιεργειών άλγης σε διαφορετικούς χώρους, είτε ανοιχτούς είτε σε αντιδραστήρες, είτε σε χώρους ακατάλληλους για αγροτική καλλιέργεια και υφάλμυρα νερά ή λύματα.
- Ευκολία μετατροπής σε καύσιμα και άλλα χημικά.

Η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας αξιοποίησης του CO₂, όσον αφορά στη συνεισφορά της στους κλιματικούς στόχους, είναι σύνθετη διαδικασία, αφού πρέπει να αξιολογηθεί συνολικά ο κύκλος ζωής του παραγόμενου προϊόντος. Για να εξεταστεί το κλιματικό όφελος κάθε τεχνολογίας αξιοποίησης του δεσμευμένου CO₂, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κάτωθι:

1. Οι απαιτούμενοι πόροι για να παραχθεί το προϊόν (ενέργεια, νερό κ.ά.).
2. Τα θέματα ασφάλειας και επιβάρυνσης του περιβάλλοντος που πιθανώς να προκύψουν κατά τη διεργασία παραγωγής.
3. Το επίπεδο ετοιμότητας της τεχνολογίας.
4. Η δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης του προϊόντος.
5. Η διάρκεια δέσμευσης του CO₂ στο προϊόν, μέχρι να επανέλθει στην ατμόσφαιρα.

Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει ο ΙΕΑ (2019) είναι ότι οι μέθοδοι αξιοποίησης του δεσμευμένου CO₂ δεν αποτελούν εναλλακτική λύση στη μόνιμη αποθήκευσή του, αλλά συμπληρωματικές τεχνικές απομάκρυνσής του από την ατμόσφαιρα. Η διεργασία θα πρέπει να εξεταστεί διεξοδικά σε όλο τον κύκλο ζωής του παραγόμενου προϊόντος, προκειμένου να αποφευχθεί περαιτέρω επίδραση στο κλίμα. Σημειώνεται δε η επιτακτική ανάγκη θεσμοθέτησης κοινών και αποδεκτών προδιαγραφών για την αξιολόγηση των εκπομπών άνθρακα σε όλη την αλυσίδα αξίας του κάθε προϊόντος. Στη σχετική αναφορά (ΙΕΑ, 2019) εξετάζεται το δυναμικό απομάκρυνσης ως προς την ποσότητα αλλά και το σχετικό κλιματικό όφελος της αξιοποίησης του δεσμευμένου CO₂ σε πέντε μεγάλες κατηγορίες εφαρμογών: α) καύσιμα, β) χημικά, γ) δομικά υλικά από ορυκτά και δ) απόβλητα και ε) ενισχυτικά καλλιεργειών. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 17, όπου η παραγωγή δομικών υλικών και τα καύσιμα θεωρούνται οι πιο αποδοτικές εφαρμογές ως προς την

ποσότητα απομάκρυνσης και ως προς το κλιματικό όφελος, αντίστοιχα. Η πρόκριση των δομικών υλικών οφείλεται στη μόνιμη δέσμευση του CO₂.



Εικόνα 17: Δυναμικό αξιοποίησης CO₂ ως προς την ποσότητα ανάκτησης και το συνολικό κλιματικό όφελος

(πηγή: IEA, 2019)

Στην παραπάνω ανάλυση προστίθεται και ένας τρίτος σημαντικός παράγοντας, το εμπορικό όφελος που έχει το κάθε προϊόν, δηλαδή το μέγεθος της αγοράς (market size) που μπορεί να απευθυνθεί το νέο προϊόν. Ο οργανισμός CCES (Center for Climate and Energy Solution) αναγνωρίζει την αξιοποίηση του δεσμευμένου CO₂ ως σημαντική εναλλακτική λύση για τη μόνιμη απομάκρυνσή του από την ατμόσφαιρα, η οποία μπορεί να υποστηρίξει την κυκλική οικονομία και τη βιωσιμότητα των επιχειρήσεων. Ως εκ τούτου, θεωρεί ότι η ανάπτυξη τέτοιων προϊόντων θα πρέπει να υποστηριχθεί από θεσμοθετημένες προδιαγραφές και μέτρα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η προβλεπόμενη οικονομική ανάπτυξη των αγορών τους. Στην αναφορά του για το έτος 2019 (Bobeck et al., 2019), παρουσίασε την πρόβλεψη των τάσεων περιορισμού του CO₂ και τη σχετική δυνατότητα εμπορική αξιοποίησης (market size), σε μεθόδους αξιοποίησης του δεσμευμένου CO₂ μέχρι το 2030 (Πίνακας 8). Και σε αυτή την ανάλυση, φαίνεται ότι τα δομικά υλικά και τα καύσιμα χαμηλού άνθρακα, προκρίνονται στην εμπορικότητα αλλά και στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Τάσεις μεθόδων αξιοποίησης CO₂ ως προς τη δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης και την απομάκρυνση CO₂ από την ατμόσφαιρα.

(πηγή: *Bobeck et al., 2019*)

Δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης (δισ. \$)	2020	2025	2030		Αποφυγή CO₂ (δισ. MT)	2020	2025	2030
Σκυρόδεμα	60	200	400		Σκυρόδεμα	<0,5	0,7	1,4
Καύσιμα	5	60	250		Καύσιμα	<0,5	<0,5	2,1
Αδρανή δομικά υλικά	4	30	150		Αδρανή δομικά υλικά	<0,5	0,7	3,6
Ζωοτροφές βασισμένες σε άλγη	3	10	120		Ζωοτροφές βασισμένες σε άλγη	<0,5	<0,5	1,2
Καύσιμα/χημικά βασισμένα σε άλγη	2	4	200		Καύσιμα/χημικά βασισμένα σε άλγη	<0,5	<0,5	2,0

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κλίμα του πλανήτη έχει αλλάξει σημαντικά τα τελευταία χρόνια, αλλαγή που προβλέπεται να συνεχιστεί με αλματώδεις ρυθμούς τον αιώνα που διανύουμε. Η έκταση των αλλαγών θα εξαρτηθεί κυρίως από τις ανθρωπογενείς εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και από το πόσο ο πλανήτης θα μπορέσει να ανταποκριθεί σε αυτές. Ήδη τις τελευταίες δεκαετίες η αλλαγή του κλίματος έχει προκαλέσει καταστροφές στην πανίδα και τη χλωρίδα, αλλά και στην ανθρώπινη υγεία και τις υποδομές.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτές οι καταστροφικές συνέπειες, είναι θεμελιώδες να μειωθούν οι ανθρωπογενείς εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με την επιστημονική κοινότητα, η συγκράτηση της αύξησης της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας σε επίπεδα μικρότερα του 1,5 °C μέχρι το 2050 είναι ένα ικανοποιητικό επίπεδο, για να αντιμετωπιστεί η αλλαγή του κλίματος. Επομένως, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη πολιτικών αποφάσεων και η λήψη μέτρων για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας. Σε αυτά τα μέτρα θα πρέπει να συμπεριληφθούν δραστικές μειώσεις των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου από όλες τις παραγωγικές διεργασίες. Ωστόσο, η απόλυτη μείωση των εκπομπών θα έχει και άλλες προεκτάσεις οι οποίες άπτονται της οικονομικής δραστηριότητας και της κοινωνικής ευμάρειας. Η απόλυτη μείωση των εκπομπών θα οδηγήσει σε μείωση της παραγωγικής δραστηριότητας, της ενεργειακής κατανάλωσης και των μεταφορών. Επιπλέον, προϋποθέτει κόστος και τεχνογνωσία για την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, κάτι το οποίο θέτει εμπόδια στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη. Οι πολιτικές, επομένως, θα πρέπει να λάβουν υπόψη και αυτούς τους παράγοντες, χωρίς να πληγεί η προσπάθεια μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

Από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες που εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου, η βιομηχανία κατέχει την πρώτη θέση. Αυτό συμβαίνει, γιατί η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού και η πολιτισμική ανάπτυξη προκάλεσαν αύξηση της ζήτησης προϊόντων και υπηρεσιών. Η αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη βιομηχανική δραστηριότητα μετά το 1990 είναι σχεδόν ανάλογη της αύξησης της θερμοκρασίας της Γης, κάτι που αναδεικνύει τη σημαντική επίδρασή της. Το δίλημμα που τίθεται, επομένως, είναι κατά πόσο ο περιορισμός των εκπομπών από τη βιομηχανία θα επηρεάσει την παραγωγική δραστηριότητα και κατά συνέπεια την οικονομική και κοινωνική ευμάρεια.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο όρος που υιοθετήθηκε για την ισορροπία περιβαλλοντικής, κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης είναι «βιώσιμη ανάπτυξη». Στα πλαίσια της

βιώσιμης ανάπτυξης, η ΕΕ φιλοδοξεί να γίνει η πρώτη ήπειρος με μηδενικό ισοζύγιο άνθρακα μέχρι το 2050. Υλοποίησε και υλοποιεί στρατηγικές που, εκτός από τη θέσπιση στόχων για απόλυτες μειώσεις εκπομπών, προωθούν και ενισχύουν οικονομικά καινοτόμες τεχνολογίες για την επίτευξή τους. Στο εκτενές πακέτο μέτρων για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνεται και η προσαρμογή στην υφιστάμενη κατάσταση του κλίματος, με θέσπιση μέτρων προστασίας και αποκατάστασης των βλαβών από τα ακραία καιρικά φαινόμενα και ενίσχυση των πληγεισών κοινωνικών ομάδων. Τα μέτρα σχεδιάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη μελέτες ανάλυσης κινδύνου όσον αφορά στην κλιματική προσαρμογή αλλά και στην οικονομική δραστηριότητα. Στα αποτελέσματα των μελετών ανάλυσης κινδύνου συμπεριλαμβάνεται η ανάπτυξη τεχνολογιών δέσμευσης, αποθήκευσης και αξιοποίησης CO₂ ως θεμελιώδης προτεραιότητα, προκειμένου να επιτευχθούν οι κλιματικοί στόχοι το 2050.

Η Στρατηγική Net-Zero Act έθεσε ως στόχο την απομάκρυνση τουλάχιστον 50 εκατομμυρίων τόνων CO₂ ως το 2030 στην ΕΕ, με προϋπόθεση την εφαρμογή αποδοτικών και βιώσιμων τεχνολογιών CCUS σε όλη την αλυσίδα αξίας. Η αναφορά του οργανισμού Clean Energy Technology Observatory (Itul et al., 2023) παρουσίασε ανάλυση SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) της αλυσίδας αξίας CCUS (Πίνακας 9). Από την ανάλυση, καθίσταται σαφές ότι οι τεχνολογίες αυτές έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα και προσφέρουν ευκαιρίες ανάπτυξης, ενώ είναι εφικτή η άρση των περιορισμών, αρκεί να υποστηριχθούν περαιτέρω οι τεχνολογίες για εφαρμογή έργων μεγάλης κλίμακας και για μείωση του οικονομικού κόστους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: Ανάλυση κυριότερων πλεονεκτημάτων, μειονεκτημάτων, κινδύνων και ευκαιριών (*SWOT analysis*) αλυσίδας αξίας CCUS

(πηγή: Itul et al., 2023)

Πλεονεκτήματα (Strengths)	Μειονεκτήματα (Weaknesses)
<ul style="list-style-type: none"> • Ευρεία εφαρμογή • Ισχυρή στήριξη από τους κοινωνικούς εταίρους και τις πολιτικές ηγεσίες • Σημαντική ανάπτυξη δικτύων υποδομής μέχρι το 2030 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλές επενδύσεις, λόγω έλλειψης εμπιστοσύνης των επενδυτών • Υψηλό κόστος • Εφαρμογή κυρίως σε μικρής κλίμακας έργα και έλλειψη δεδομένων • Πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις
Ευκαιρίες (Opportunities)	Κίνδυνοι (Treats)
<ul style="list-style-type: none"> • Απανθρακοποίηση τομέων που δεν μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές τους 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρειάζεται περαιτέρω μείωση του κόστους για ευρεία εφαρμογή

<ul style="list-style-type: none"> • Διεθνείς συνεργασίες για επιτάχυνση της ανάπτυξης έργων • Ευκαιρίες απασχόλησης και δημιουργίας επιχειρήσεων • Χαμηλότερο κόστος ανανεώσιμης ενέργειας • Τα κόστη για τη λειτουργία του CCUS μπορούν να μειωθούν με την αύξηση της δυναμικότητας των έργων • Οι νομοθετικές ρυθμίσεις μπορούν να βοηθηθούν από την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων 	<ul style="list-style-type: none"> • Έλλειψη νομοθετικών προδιαγραφών και επενδύσεων • Αποδοχή κοινωνικών εταίρων • Πιθανές διαταραχές, λόγω γεωπολιτικών και οικονομικών συνθηκών
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Η αλυσίδα αξίας του CCUS περιλαμβάνει τη δέσμευση, την αποθήκευση και την αξιοποίηση του CO₂. Επίσης, περιλαμβάνεται η μεταφορά του CO₂ από την εγκατάσταση παραγωγής του προς την εγκατάσταση αποθήκευσης ή αξιοποίησης. Σε κάθε κομμάτι της αλυσίδας αξίας, υπάρχουν κρίσιμοι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την επιλογή της κατάλληλης τεχνικής/μεθόδου για τη βέλτιστη απόδοση απομάκρυνσης. Οι παράγοντες αυτοί άπτονται κυρίως της απόδοσης απομάκρυνσης σε σχέση με το οικονομικό κόστος, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και την τεχνολογική ετοιμότητα της μεθόδου, καθώς και την προστιθέμενη αξία των προϊόντων που προέρχονται από το δεσμευμένο CO₂.

Οι τεχνολογίες δέσμευσης εφαρμόζονται ήδη σε μεγάλη κλίμακα με ικανοποιητικές αποδόσεις. Κατηγοριοποιούνται κυρίως σε σχέση με το στάδιο της καύσης (pre- και post-combustion) και τις συνθήκες που βρίσκεται το οξυγόνο που χρησιμοποιείται για την καύση (oxy-fuel και chemical looping). Στις τεχνολογίες που εφαρμόζονται μετά την καύση, απαιτείται διαχωρισμός του CO₂ από άλλα υλικά. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεθόδους που ήδη εφαρμόζονται σε άλλες διεργασίες, π.χ. απορρόφηση και προσρόφηση, είτε με καινοτόμες τεχνικές, π.χ. με μεμβράνες και μικροοργανισμούς. Οι τελευταίες πλεονεκτούν από τις παραδοσιακές μεθόδους ως προς την απόδοση, τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο και το οικονομικό κόστος, ωστόσο βρίσκονται ακόμη σε φάση ανάπτυξης και έρευνας. Γενικά, η σύγκριση των μεθόδων κατακράτησης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι καινοτόμες τεχνολογίες είναι ικανές να υπερβούν τα εμπόδια της μειωμένης απόδοσης, των υψηλών ενεργειακών καταναλώσεων, των χωροταξικών περιορισμών και των παράπλευρων περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με την προϋπόθεση ότι θα τους δοθεί η δυνατότητα να εφαρμοστούν σε μεγάλης κλίμακας έργα όπου θα είναι δυνατόν να διερευνηθούν και να ξεπεραστούν και άλλοι πιθανοί περιορισμοί.

Η αποθήκευση του CO₂ έχει ως σημαντική προϋπόθεση τη μεταφορά του σε κατάλληλες υποδομές. Η μεταφορά CO₂ από διαφορετικού τύπου βιομηχανικών διεργασιών εγκαταστάσεις, σε διαφορετικές ποσότητες και από διαφορετικά σημεία, ανέδειξε την ανάγκη δημιουργίας κατάλληλων υποδομών οι οποίες θα έχουν τη δυνατότητα συγκέντρωσης του προϊόντος και κατάλληλης προετοιμασίας του, πριν οδηγηθεί σε μόνιμη αποθήκευση. Ο βέλτιστος τρόπος μεταφοράς στις εγκαταστάσεις αυτές είναι μέσω αγωγών, οι οποίοι πλεονεκτούν ως προς την εύκολη πρόσβαση, το οικονομικό κόστος και τη μέγιστη δυνατή ποσότητα του προϊόντος προς αποθήκευση. Ωστόσο, η σύνδεση με αγωγούς μπορεί να περιορίζεται από γεωπολιτικές συνθήκες και επιπρόσθετο οικονομικό κόστος. Εναλλακτικά αναπτύσσονται και άλλοι τρόποι μεταφοράς (πλοία, οχήματα και τρένα), από τους οποίους πλεονεκτούν τα πλοία, λόγω της μεγαλύτερης αποθηκευτικής ικανότητας και της δυνατότητας κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων, άρα και μειωμένου οικονομικού κόστους.

Η αποθήκευση και η αξιοποίηση του δεσμευμένου CO₂ αποτελούν συμπληρωματικές λύσεις για την κατά το δυνατόν μόνιμη απομάκρυνσή του από την ατμόσφαιρα. Η αποθήκευση συνίσταται στην έγχυσή του σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς και εφαρμόζεται ήδη σε πολλές περιπτώσεις, κυρίως για την ανάκτηση πετρελαιοειδών από την ατμόσφαιρα. Η παραμονή του αποθηκευμένου CO₂ στον γεωλογικό σχηματισμό στο πέρασμα του χρόνου εξαρτάται από τον μηχανισμό συγκράτησής του. Η μεγαλύτερη απόδοση κατακράτησης επιτυγχάνεται με τη γεωχημική κατακράτηση, όπου το CO₂ απορροφάται από τα φυσικά πετρώματα και δημιουργεί χημικούς δεσμούς με αυτά. Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι η επιλογή του κατάλληλου γεωλογικού σχηματισμού είναι σημαντική. Μέχρι σήμερα έχουν εμπορική εφαρμογή, λόγω ωριμότητας των τεχνολογιών και μειωμένου οικονομικού κόστους, με σχετικά ασφαλή αποθήκευση, τα μερικώς ή ανεκμετάλλευτα κοιτάσματα πετρελαίου και οι αλατούχοι σχηματισμοί. Τα πρώτα συνοδεύονται από ανάκτηση πετρελαιοειδών. Ωστόσο, λόγω της πεπερασμένης χωρητικότητας των κοιτασμάτων, υπάρχει ανάγκη εύρεσης νέων χώρων. Μεταξύ άλλων, εξετάζεται και η αποθήκευση στους βαθείς ωκεανούς, οι οποίοι εκτιμάται ότι έχουν ευρεία αποθηκευτική ικανότητα. Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα, παρόλη τη δυνητικά μεγάλη χωρητικότητα, δεν είναι ικανοποιητικά, καθώς ενέχεται να προκύψει σημαντική διαρροή προς το θαλάσσιο οικοσύστημα, με σοβαρές συνέπειες για τους θαλάσσιους οργανισμούς.

Όσον αφορά στην αξιοποίηση, τέλος, η προοπτική αυτή δίνει δυνατότητες για επίτευξη των στόχων, σε συνδυασμό με την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας. Χρησιμοποιώντας το

δεσμευμένου CO₂ ως πρώτη ύλη για την παραγωγή προϊόντων, δημιουργείται προστιθέμενη αξία, όχι μόνο λόγω της δημιουργίας νέων επιχειρηματικών δράσεων, αλλά και λόγω της μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της αρχικής βιομηχανικής διεργασίας από όπου προήλθε το απόβλητο. Το εύρος των εφαρμογών όπου μπορεί να αξιοποιηθεί το δεσμευμένο CO₂ είναι αρκετά μεγάλο και εκτείνεται σε διάφορους τομείς της παραγωγικής δραστηριότητας. Τα προϊόντα αυτά έχουν τη δυνατότητα να αντικαταστήσουν παραδοσιακά υλικά που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα και ενεργοβόρες διεργασίες, ακόμα και με απευθείας χρήση του δεσμευμένου CO₂ από την εγκατάσταση παραγωγής του. Ήδη μεγάλες ποσότητες λιπασμάτων προέρχονται από ουρία παραγόμενη μέσω της αξιοποίησης δεσμευμένου CO₂, ενώ και η βιομηχανία τροφίμων και ποτών το χρησιμοποιεί ως πρόσθετο. Παράλληλα, ερευνώνται νέες εφαρμογές οι οποίες, όχι μόνο θα απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες CO₂, αλλά και θα μπορούν να αποφέρουν οικονομικό όφελος που θα καλύπτει την παραγωγή των προϊόντων αυτών σε όλη την αλυσίδα αξίας τους. Επιπλέον παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη είναι το συνολικό κλιματικό όφελος σε όλη την αλυσίδα, μέχρι και τις εκπομπές από τη χρήση του προϊόντος, με σκοπό τη βέλτιστη δυνατότητα αποφυγής έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Η ανάλυση των παραπάνω παραγόντων κατέδειξε ως βέλτιστη διαδικασία την αξιοποίηση του δεσμευμένου CO₂ σε υλικά κατασκευής, χημικά, καύσιμα, πλαστικά και προϊόντα που βασίζονται στην άγλη και χρησιμοποιούνται κυρίως ως ζωοτροφές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Λιαδικτυακές πηγές

1. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/overview>
2. <https://norlights.com>
3. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/co2-transport-infrastructure-key-achieving-climate-neutrality-2050-2024-02-06_en
4. <https://www.energean.com>
5. [The European Green Deal - European Commission \(europa.eu\)](#)
6. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Νόμος 4936/2022 (Α'105): Εθνικός Κλιματικός Νόμος – Μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, επείγουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και την προστασία του περιβάλλοντος
2. ΦΕΚ 4893/2019: Κύρωση του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

1. Baskaran D., Saravanan P., Nagarajan L., Byun H.-S., 2024. An overview of technologies for capturing, storing, and utilizing carbon dioxide: Technology readiness, large-scale demonstration, and cost, Chemical Engineering Journal 491, 151998
2. Bilal A., Känzig D.R., 2024. The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature, NBER Working Paper No. 32450
3. Bobeck J., Peace J., Ahmad F. M., Munson R., 2019. Carbon Utilization: A vital and effective pathway for decarbonization. Center for Climate and Energy Solutions
4. CATF (2023) A Vision for Carbon Capture, Utilisation and Storage in the EU. Prepared for the European Union's CCUS Forum by the CCUS Vision Working Group. Clean Air Task Force
5. Chao C., Deng Y., Dewil R., Baeyens J., Fan X., 2021. Post-combustion carbon capture. Renewable and Sustainable Energy Reviews 138, 110490
6. Dziejarski B., Krzyzyska R., Andersson K., 2023. Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. Fuel 342, 127776
7. EEA (2023a) GHG emissions by country and sector (infographic). Directorate General for Communication European Parliament

8. EEA (2023b) National progress towards greenhouse gas emission targets under the ESR. European Environment Agency
9. EU, 2003. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC
10. EU, 2009. Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006
11. EU, 2018a. Delegated Regulation 2019/331 of 19 December 2018 determining transitional Union-wide rules for harmonised free allocation of emission allowances pursuant to Article 10a of Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council
12. EU, 2018b. Regulation (2018/841 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework, and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU
13. EU, 2019a. Regulation 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')
14. EU, 2019b. Regulation 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO₂ emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011 (recast)
15. EU, 2023a. Regulation 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism
16. EU, 2023b. Regulation 2023/857 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2018/842 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement, and Regulation (EU) 2018/1999
17. EU, 2023c. Regulation 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport

18. EU, 2023d. Report from the Commission to the European Parliament and the Council
EU: Climate Action Progress Report 2023
19. EU, 2023e. Net Zero Industry Act - Proposal for a regulation of the European Parliament
and of the Council on establishing a framework of measures for strengthening Europe's
net-zero technology products manufacturing ecosystem. COM (2023) 161
20. EU, 2024. Communication from the Commission to the European Parliament, the
Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the
Region Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU. COM(2024)
146 final
21. GCCSI (2023) Global Status of CCS 2023: Scaling up through 2030. Global CCS
Institute
22. IEA (2019) Putting CO₂ to Use. International Energy Agency
23. IEA (2021) The world has vast capacity to store CO₂: Net zero means we'll need it.
International Energy Agency
24. IPCC (2005) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by
Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O.
Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University
Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp
25. IPCC, 2023. Synthesis Report AR6. Intergovernmental Panel on Climate Change
26. Itul, A., Rincon D., Eulaerts A., Georgakaki O.D., Grabowska A., Kapetaki M., Ince Z.,
Letout E., Kuokkanen S., Mountrak A., Shtjefni A. D., Jaxa-Rozen, M., 2023. Clean
Energy Technology Observatory: Carbon capture utilisation and storage in the European
Union - Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets,
Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/882666,
JRC134999
27. Kabir, M.A., Khan, S.A., Kabir, G., 2024. Carbon Capture, Utilization, and Storage
Risks from Supply Chain Perspective: A Review of the Literature and Conceptual
Framework Development, C 10(1), 15
28. Li N., Mo L., Unluer C., 2022. Emerging CO₂ utilization technologies for construction
materials: A review. Journal of CO₂ Utilization 65, 102237.
29. Talei S., Fozer D., Varbanov P.S., Szanyi A., Mizsey P., 2024. Oxyfuel Combustion
Makes Carbon Capture More Efficient. ACS Omega, 9, 3250–3261
30. UNFCCC (2021) Extreme Events and Major Impacts. United Nations Climate Change

31. WEF (2021) Global Warming Chart - Here's How Temperatures Have Risen Since 1950.
World Economic Forum
32. WEF (2023a) The climate crisis disproportionately hits the poor. How can we protect them? World Economic Forum
33. WEF (2023b) This is what the climate crisis is costing economies around the world,
World Economic Forum
34. Vaz S.Jr., Rodrigues de Souza A.P, Baeta B.E.L., 2022. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. Cleaner Engineering and Technology 8, 100456
35. Yang Y., Tang S., Chen J.P., 2024. Carbon capture and utilization by algae with high concentration CO₂ or bicarbonate as carbon source. Science of the Total Environment 918, 170325

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.