



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Το θεσμικό πλαίσιο για την δέσμευση και
αποθήκευση των αέριων ρύπων στην Ευρώπη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέργιος Ι. Σωτηρόπουλος

Επιβλέπων: Ευγενία Τζαννίνη
Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 25



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Το θεσμικό πλαίσιο για την δέσμευση και
αποθήκευση των αέριων ρύπων στην Ευρώπη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέργιος Ι. Σωτηρόπουλος

Επιβλέπων: Ευγενία Τζαννίνη
Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Μαρτίου 2025

.....
Ε.Τζαννίνη
Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Π.Τσανάκας
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δ.Σούντρης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 25

.....

Στέργιος Ι. Σωτηρόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Στέργιος Ι. Σωτηρόπουλος, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη των διαδικασιών της δέσμευσης και της αποθήκευσης των αέριων ρύπων στην Ευρώπη. Αναπτύχθηκαν οι λόγοι που το καθιστούν την αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα χρήσιμη. Αναλύθηκε το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επίσης το τεχνικό πλαίσιο για δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα. Έπειτα οι συνθήκες και οι συμβάσεις που έχουν σχέση με τα προηγούμενα. Στην συνέχεια παρουσιάστηκε η σχέση της δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα με την ΕΕ. Ακολούθως αναλύθηκε το οικονομικό πλαίσιο της δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα. Ακόμη αναφέρθηκαν οι ιδιαίτερες περιπτώσεις της Αυστραλίας, των ΗΠΑ, της Νορβηγίας και της Ολλανδίας. Ακολούθησε η περίπτωση της Ελλάδας. Τέλος οι προκλήσεις της δέσμευσης και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα.

Λέξεις Κλειδιά

Θεσμικό πλαίσιο, δέσμευση, αποθήκευση, διοξείδιο του άνθρακα, φαινόμενο του θερμοκηπίου, αέριοι ρύποι, πρωτόκολλο του Κιότο

Abstract

The purpose of the thesis was to develop the processes of capturing and storing air pollutants in Europe. The reasons that make carbon dioxide storage useful were developed. The greenhouse effect was analyzed. Also the technical framework for capturing, transporting and storing carbon dioxide. Then the conditions and contracts related to the previous ones. Then the relationship of carbon dioxide capturing and storing with the EU was presented. Then the economic framework of capturing, transporting and storing carbon dioxide was analyzed. The special cases of Australia, the USA, Norway and the Netherlands were also mentioned. The case of Greece followed. Finally, the challenges of capturing and storing carbon dioxide.

Key Words

CCS, EU ETS, GHG, framework, capture, Kyoto Protocol

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή	12
1.1 Ορισμοί.....	12
1.2 Ιστορικά στοιχεία	13
1.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	13
1.4 Συνήθεις αέριοι ρύποι.....	15
1.4.1 Εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO ₂).....	15
1.4.2 Εκπομπές οξείδια του αζώτου (NO _x).....	15
1.4.3 Εκπομπές λεπτών σωματιδίων (PM _{2.5})	16
1.4.4 Εκπομπές αμμωνίας (NH ₃).....	16
1.4.5 Εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC).....	16
1.4.6 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂)	16
2.Το φαινόμενο του θερμοκηπίου	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Επιδράσεις ακτινοβολίας	17
2.3 Ποια αέρια είναι κλιματικά σημαντικά και γιατί;	19
2.3.1 Τι καθορίζει τα μήκη κύματος της απορρόφησης	19
2.3.2 Τι καθορίζει το μέγεθος της συνεισφοράς στο φαινόμενο του θερμοκηπίου; 19	
2.4 Αλλαγές στις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου	20
2.4.1 Υδρατμοί (H ₂ O).....	20
2.4.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂).....	21
2.4.3 Μεθάνιο (CH ₄).....	22
2.4.4 Οξείδιο του αζώτου (N ₂ O).....	23
2.4.5 Χλωροφθορομεθάνια (CFC11 και CFC12)	23
2.4.6 Όζον (O ₃).....	24
2.4.7 Γενικά.....	24
3.Τεχνικό πλαίσιο.....	25
3.1 Γιατί το ενδιαφέρον για τη δέσμευση και αποθήκευση CO ₂ ;	25
3.2 Πηγές CO ₂	26
3.2.1 Τρέχουσες πηγές CO ₂ και χαρακτηριστικά.....	26
3.2.2 Μελλοντικές πηγές εκπομπών.....	27
3.3 Δέσμευση CO ₂	29
3.3.1 Δέσμευση CO ₂ : κίνδυνοι, ενέργεια και περιβάλλον	31
3.4 Μεταφορά CO ₂	31
3.4.1 Μέθοδοι μεταφοράς CO ₂	31

3.4.2	Θέματα περιβάλλοντος, ασφάλειας και κινδύνου	32
3.5	Αποθήκευση	33
3.5.1	Γεωλογική αποθήκευση	33
3.5.1.1	Τεχνολογία και μηχανισμοί αποθήκευσης	33
3.5.1.2	Γεωγραφική κατανομή και χωρητικότητα αποθηκευτικών χώρων	35
3.5.1.3	Κριτήρια και μέθοδοι επιλογής τοποθεσίας	35
3.5.1.4	Εκτίμηση κινδύνου και περιβαλλοντικές επιπτώσεις	36
3.5.2	Ωκεάνια αποθήκευση	37
3.5.2.1	Μηχανισμοί και τεχνολογία αποθήκευσης	38
3.5.2.2	Οικολογικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κίνδυνοι	39
3.6	Ανθράκωση ορυκτών και βιομηχανικές χρήσεις	39
3.6.1	Ανθράκωση ορυκτών: τεχνολογία, επιπτώσεις	40
3.6.2	Βιομηχανικές χρήσεις (CCUS)	40
4.	Διεθνής συμφωνίες και συμβάσεις	42
4.1	Εισαγωγή	42
4.2	Το Πρωτόκολλο του Λονδίνου	42
4.3	Σύμβαση OSPAR	46
4.4	Το καθεστώς του Πρωτοκόλλου του Κιότο και η “κυοφορία” του διαδόχου του	49
4.5	Οδηγίες IPCC για αποθέματα αερίων του θερμοκηπίου	50
4.6	Συμφωνία του Παρισιού	51
5.	CCS και Ευρωπαϊκή Ένωση	53
5.1	Εισαγωγή	53
5.2	Προϋποθέσεις θεσμικού πλαισίου	53
5.2.1	CCS και περιβάλλον	53
5.2.2	Παροχή κινήτρων	54
5.2.3	Προώθηση σχεδίου δράσης	55
5.2.4	Ανάπτυξη ρυθμιστικού πλαισίου	55
5.2.5	Αποθήκευση CCS	56
5.2.6	Άδειες αποθήκευσης	57
5.2.7	Παρακολούθηση διαδικασιών	58
5.2.8	Κλείσιμο τοποθεσίας αποθήκευσης	59
5.2.9	Μεταβίβαση ευθύνης	59
5.2.10	Θεσμική και νομοθετική διαμόρφωση	60
5.3	Θεσμικό πλαίσιο	61
5.4	Ανάπτυξη και Πρόοδος της CCS στη Ευρωπαϊκή Ένωση	63

6.Οικονομικό Πλαίσιο CCS.....	64
6.1 Δέσμευση και συμπίεση	64
6.2 Μεταφορά	66
6.3 Αποθήκευση.....	67
6.3.1 Γεωλογική αποθήκευση	67
6.3.2 Ωκεάνια αποθήκευση.....	68
6.3.3 Αποθήκευση μέσω ανθράκωσης ορυκτών.....	69
6.4 Ενσωματωμένα συστήματα	69
6.5 Σύστημα Δικαιωμάτων Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU ETS).....	70
7.Ειδικές περιπτώσεις CCS.....	75
7.1 Εισαγωγή.....	75
7.2 Νομικό και ρυθμιστικό τοπίο Αυστραλίας	75
7.2.1 Το υπεράκτιο καθεστώς της Κοινοπολιτείας	76
7.2.1.1 Ρυθμιστικό πλαίσιο για τις διαδικασίες αποθήκευσης αερίων θερμοκηπίου (GHG)	76
7.2.1.2 Αξιοπιστία και η διαδικασία μετά το κλείσιμο.....	77
7.2.2 Νόμος και κανονισμοί σε επίπεδο αυστραλιανής πολιτείας	78
7.2.3 Ειδική νομοθεσία για το έργο.....	80
7.3 Ρυθμιστικό πλαίσιο Ηνωμένων Πολιτειών	81
7.4 Νορβηγία.....	85
7.4.1. Εισαγωγή.....	85
7.4.2 Δυναμική του νορβηγικού συστήματος καινοτομίας CCS	86
7.4.2.1 Περίοδος 1988–1999.....	86
7.4.2.2 Περίοδος 2000–2007.....	89
7.5 Ολλανδία: το πρόγραμμα Rotterdam Nucleus	93
7.5.1 Εισαγωγή.....	93
7.5.2 Ανάλυση του έργου	94
7.5.3 Το κανονιστικό πλαίσιο και ο νόμος περί σχεδιασμού.....	95
7.5.3.1 Ολλανδικός κανονισμός	95
8.CCS και Ελλάδα.....	98
8.1 Εκπομπές στην Ελλάδα	98
8.2 Δέσμευση και μεταφορά CO ₂ στην Ελλάδα	98
8.3 Επιλογές αποθήκευσης CO ₂ στην Ελλάδα	99
8.4 Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο	101
9.Προκλήσεις	103

9.1 Προκλήσεις στην ανάπτυξη του CCS.....	103
9.1.1 Κόστος CCS	104
9.1.2 Κυβερνητικοί και βιομηχανικοί παράγοντες.....	105
9.1.2.1 Αρμόδια ρυθμιστική εποπτεία	105
9.1.2.2 Κατάλληλα πλαίσια αξιολόγησης κινδύνου και διαχείρισης κινδύνου .	106
9.1.2.3 Υποστηρικτικά πλαίσια δημόσιας πολιτικής.....	106
9.1.3 Γεω-αποθηκευτική ικανότητα	107
9.1.4 Ταίριασμα πηγής-καταβόθρας.....	109
9.1.5 Αλυσίδα προμηθειών και ρυθμός δόμησης.....	110
9.1.6 Δημόσια αποδοχή	111
10.Συμπεράσματα	113
Bibliography	115

1.Εισαγωγή

1.1 Ορισμοί

Ρύπανση είναι η εισαγωγή ουσιών ή ενέργειας (όπως φως ή θερμότητα) στο φυσικό περιβάλλον σε ποσότητες ή συγκεντρώσεις που μπορεί να είναι επιβλαβής για ανθρώπους, ζώα και φυτά. Η ρύπανση μπορεί να μειώσει την υγεία των οικοσυστημάτων βλάπτοντας ή ακόμα και προκαλώντας θάνατο στα ζωντανά όντα που αποκαλούν αυτά τα οικοσυστήματα «σπίτι». Οι αρνητικές επιπτώσεις της ρύπανσης μπορεί να κυμαίνονται σε σοβαρότητα ανάλογα με το ποιος είναι ο ρύπος, τα χαρακτηριστικά του ρύπου και πού βρίσκεται ο ρύπος.¹

Η ρύπανση συνήθως αποτελείται από συνθετικές ή ανθρωπογενείς ουσίες (όπως το πλαστικό, για παράδειγμα), αν και ακόμη και φυσικές ουσίες όπως τα ιζήματα, τα θρεπτικά συστατικά και το διοξείδιο του άνθρακα μπορούν να γίνουν ρύποι όταν υπερβούν ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Εάν και οι φυσικές ουσίες υπερβαίνουν τα υγιή επίπεδα, ωστόσο, είναι πολύ πιθανό να είναι το αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων.¹

Ο τρόπος με τον οποίο κατηγοριοποιείται, μελετάται και διαχειρίζεται η ρύπανση εξαρτάται από το σύστημα της Γης που επηρεάζεται. Μέρη των συστημάτων της Γης που μπορούν να επηρεαστούν από τη ρύπανση περιλαμβάνουν τη γη, τις πλωτές οδούς (όπως τα υπόγεια ύδατα, τα ποτάμια, τις λίμνες, τους κόλπους και τους ωκεανούς), τον αέρα και το κλίμα.¹

Η ρύπανση του νερού, του αέρα και της γης είναι τρεις κύριες κατηγορίες ρύπανσης. Μερικές φορές η ρύπανση είναι εύκολο να ανιχνευθεί και είναι εμφανής, όπως μια πετρελαιοκηλίδα από ένα πλοίο στον ωκεανό. Ωστόσο, η ρύπανση μπορεί επίσης να είναι δύσκολο να διαπιστωθεί, όπως στην περίπτωση πολλών τύπων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.¹

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα μείγμα αερίων και στερεών σωματιδίων στον αέρα. Η ατμοσφαιρική ρύπανση προέρχεται από τα καυσαέρια που παράγουν τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά όταν καίνε βενζίνη για καύσιμα, χημικά από εργοστάσια, σκόνη, μούχλα, αιθαλομίχλη και άλλες πηγές. Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να φτάσει σε επιβλαβείς συγκεντρώσεις τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους.¹

¹ Science, University of Maryland Center for Environmental. *What is Pollution?Types and environmental impacts.*

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Τα φυσικά προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη γη είναι τόσο παλιά όσο η ίδια η Γη. Τα ηφαίστεια, οι φυσικές πυρκαγιές και η σκόνη της ερήμου έχουν συμβάλει στη φυσική ατμοσφαιρική ρύπανση. Οι άνθρωποι εξέπεμψαν για πρώτη φορά ατμοσφαιρικούς ρύπους όταν έκαψαν ξύλα και αποψύλωσαν τη γη (αυξημένη σκόνη από τον αέρα). (1)

Η συνειδητοποίηση ότι το ακάθαρτο νερό προκαλεί ασθένειες συνέβη στην ανθρωπότητα πριν από περίπου 4000 χρόνια και κατά πάσα πιθανότητα Ινδοί επιστήμονες πρωτοστάτησαν σε αυτήν. Το *Susruta Samhita* που γράφτηκε εκείνη την περίοδο αναγνωρίζεται ως η παλαιότερη γνωστή καταγραφή της ανθρώπινης γνώσης σχετικά με τις επιπτώσεις του ακάθαρτου νερού. Το *Samhita* έδωσε επίσης στον κόσμο μια τεχνολογία καθαρισμού νερού που εξακολουθεί να αναγνωρίζεται ως μια από τις πιο αξιόπιστες για τη θανάτωση παθογόνων: το βρασμό! (2)

Αρκετές αραβικές ιατρικές πραγματείες μεταξύ του 9ου και του δέκατου τρίτου αιώνα (πολλές από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως εγχειρίδια σε πανεπιστήμια της Δυτικής Ευρώπης, συμπεριλαμβανομένων των πανεπιστημίων της Οξφόρδης και του Κέιμπριτζ), έχουν ασχοληθεί με θέματα ρύπανσης του αέρα, του νερού και του εδάφους, της διαχείρισης στερεών αποβλήτων ακόμη και εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. (2)

Παρόλο που η μεγάλης κλίμακας εξόρυξη ορυκτών καυσίμων ξεκίνησε πολύ αργότερα, στα μέσα του δέκατου όγδοου αιώνα, υπήρχαν επιφανειακά κοιτάσματα άνθρακα και κηροζίνης που εξαγόμενα από ρηγά πηγάδια ήταν σε χρήση από αρκετούς αιώνες νωρίτερα. Τόσο που η χρήση ορυκτών καυσίμων είχε γίνει μια αναγνωρισμένη πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις πόλεις ήδη από τον ένατο αιώνα. Το 1272 ο βασιλιάς Εδουάρδος Α΄ της Αγγλίας εξέδωσε μια διακήρυξη που απαγόρευε την καύση άνθρακα αφού ο καπνός του είχε γίνει δημόσια απειλή. (2)

1.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Για πολύ, η ανθρωπότητα θεωρούσε τα ποτάμια, τις λίμνες και τους ωκεανούς ως δεδομένα, πιστεύοντας ότι μπορούμε να βάλουμε σε αυτά όσα λύματα επιθυμούμε, ενώ είχαμε θεωρήσει δεδομένο και τον αέρα. Μέχρι πριν από μερικές δεκαετίες το μόνο που θεωρείτο απαραίτητο για να αποφύγουμε την ατμοσφαιρική ρύπανση ήταν «να ανοίξουμε τα παράθυρα και να αφήσουμε λίγο καθαρό αέρα». (2)

Ως αποτέλεσμα, η παγκόσμια αφύπνιση σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση ξεκίνησε πολύ αργότερα από ό,τι για τη ρύπανση των υδάτων. (2)

Μια πτυχή διαχωρίζει κρίσιμα τα προβλήματα που συνδέονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση από τις προκλήσεις που δημιουργούν τα λύματα και τα στερεά απόβλητα. Είναι ότι, ενώ μικρότερα ρεύματα υδατικών ή στερεών αποβλήτων μπορούν να συγκεντρωθούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία σε μεγάλης κλίμακας κεντρικές εγκαταστάσεις —όπως εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και χώροι υγειονομικής ταφής— είναι αδύνατο να αντιμετωπιστεί η ατμοσφαιρική ρύπανση με μια τέτοια στρατηγική. Εάν πρέπει να ελεγχθεί η ατμοσφαιρική ρύπανση, είναι απαραίτητο να ελέγχεται κάθε πηγή που προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση. Εν μέρει λόγω αυτού του

λόγου και εν μέρει λόγω της πολύ μεγαλύτερης ικανότητας του αέρα να διασπείρει, κατά συνέπεια να αραιώνει τους ρύπους του με την πάροδο του χρόνου, ο έλεγχος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ήταν πολύ χαμηλότερος στην ανθρώπινη ατζέντα από τον έλεγχο της ρύπανσης των υδάτων. (2)

Μέχρι τις αρχές του 1990, η τυπική μέθοδος για την «λύση» του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλείται από τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια και τις χημικές βιομηχανίες ήταν η απελευθέρωση του μολυσμένου αέρα από φουγάρα ύψους πολλών μέτρων. Όσο μεγαλύτερη ήταν η ποσότητα των αέριων ρύπων προς διάθεση, τόσο ψηλότερο είναι το φουγάρο. (2)

Αλλά όπως συνέβη με τα ποτάμια και τις λίμνες, έτσι συνέβη και με τον αέρα: η ικανότητα του περιβάλλοντος να αραιώνει και να αφομοιώνει τη ρύπανση είχε όρια. Στην περίπτωση του αέρα, το όριο πέρασε αργότερα από ό,τι για τα υδάτινα ρεύματα, αλλά όταν έγινε, οι παγκόσμιες επιπτώσεις ήταν πολύ σοβαρές: όξινη βροχή, τρύπα του όζοντος, υπερθέρμανση του πλανήτη και οξίνιση των ωκεανών. (2)

Αυτή η πολύ καθυστερημένη αφύπνιση συνέβη παρά το γεγονός ότι ακραία γεγονότα ατμοσφαιρικής ρύπανσης συμβαίνουν από τότε που ξεκίνησε η μεγάλης κλίμακας χρήση άνθρακα κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής επανάστασης. Η καύση άνθρακα παρήγαγε αιθάλη και συνέβαλε στο σχηματισμό αιθαλομίχλης. Και οι δύο προκάλεσαν αναπνευστικά προβλήματα. Αυτό που εκτιμήθηκε ελάχιστα από το λαό τότε ήταν ότι η καύση του άνθρακα απελευθέρωσε επίσης οξείδια θείου και αζώτου που σχηματίζουν οξύ, εκτός από ενώσεις αρσενικού και αντιμονίου και σωματίδια μετάλλου. Όλα αυτά τα στοιχεία ήταν αργόι και σιωπηλοί, αλλά σίγουροι δολοφόνοι. Ενώ εκατομμύρια άνθρωποι πρέπει να υπέστησαν κακή υγεία και πρόωρο θάνατο λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εκείνη την εποχή, λίγοι συνειδητοποίησαν ότι ήταν η ατμοσφαιρική ρύπανση που κρυβόταν πίσω από τη δυστυχία τους. Μόνο όταν συνέβησαν ακραία γεγονότα συζητήθηκαν. Ένα τέτοιο ακραίο γεγονός έλαβε χώρα το 1948 στη Donora της Πενσυλβάνια, όταν 20 άτομα ασφυξιώθηκαν και 7.000 αρρώστησαν πολύ εξαιτίας της αιθαλομίχλης που δεν διασκορπίστηκε αρκετά γρήγορα. Η Μεγάλη αιθαλομίχλη του Λονδίνου το 1952 σκότωσε τουλάχιστον 4.000 ανθρώπους σε μόλις μερικές μέρες. (2)

Η ατμοσφαιρική ρύπανση συνεχίζει να είναι ένας σιωπηλός δολοφόνος. Εκτιμάται ότι 7 εκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως πεθαίνουν κάθε χρόνο ως συνέπεια της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η εναέρια ρύπανση των εσωτερικών χώρων και η κακή ποιότητα του αέρα των πόλεων είναι από τα πιο διαδεδομένα προβλήματα ρύπανσης στον κόσμο. Το 90% του παγκόσμιου πληθυσμού αναπνέει βρώμικο αέρα σε κάποιο βαθμό. Οι απώλειες παραγωγικότητας και η επιβάρυνση του συστήματος ιατροφαρμακευτικής περίθαλψης λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εκτιμάται ότι κοστίζουν στην παγκόσμια οικονομία 5 τρισεκατομμύρια δολάρια ετησίως. (2)

Είναι ενδιαφέρον όταν ο κόσμος άρχισε να λαμβάνει σοβαρά υπόψη την ατμοσφαιρική ρύπανση από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 και μετά, η εστίαση ήταν στην αφαίρεση των SO_x, NO_x και SPM(αιωρούμενα σωματίδια). Το διοξείδιο του άνθρακα δεν θεωρήθηκε καθόλου ρύπος! Ούτε έγιναν προσπάθειες για τη μείωση της παραγωγής CO₂ ή την αντιμετώπισή του μετά τη δημιουργία του. Μόνο μετά την εμφάνιση αδιαμφισβήτητων στοιχείων για την υπερθέρμανση του πλανήτη και την οξίνιση των ωκεανών τον παρόντα αιώνα αρχίσαμε να αντιμετωπίζουμε το CO₂ ως

πρόβλημα! Έγινε μεγάλη έρευνα για την ενέργεια του υδρογόνου και την απεξάρτηση από άνθρακα των ορυκτών καυσίμων, χωρίς να έχει μεγάλη επίδραση. (2)

1.4 Συνήθειες αέριοι ρύποι

Στη θεματική στρατηγική της για την ατμοσφαιρική ρύπανση (TSAP) του 2005, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή περιέγραψε έναν οδικό χάρτη για την επίτευξη «επιπέδων ποιότητας του αέρα που δεν προκαλούν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις και κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον». Καθόρισε στόχους υγείας και περιβάλλοντος και στόχους μείωσης των εκπομπών για τους κύριους ρύπους. Το 2011, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ξεκίνησε μια συνολική αναθεώρηση και αναθεώρηση της πολιτικής της για τον αέρα, ιδίως της θεματικής στρατηγικής του 2005 για την ατμοσφαιρική ρύπανση και των σχετικών νομικών πράξεων. Για να υποστηρίξει την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στην αναθεώρηση, αυτή η έκθεση παρουσιάζει ένα προσχέδιο βασικού σεναρίου που περιγράφει την πιθανή εξέλιξη των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων, την ποιότητα του αέρα και τις συνακόλουθες επιπτώσεις. (3)

Εκτός από τις ενεργειακές, κλιματικές και γεωργικές πολιτικές που επηρεάζουν τα μελλοντικά επίπεδα δραστηριότητας, η βασική γραμμή TSAP εξετάζει μια λεπτομερή απογραφή της εθνικής νομοθεσίας για τον έλεγχο των εκπομπών (συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς της νομοθεσίας σε επίπεδο ΕΕ). Προϋποθέτει ότι αυτοί οι κανονισμοί θα τηρούνται πλήρως σε όλα τα κράτη μέλη σύμφωνα με το προβλεπόμενο χρονοδιάγραμμα. Για το CO₂, οι κανονισμοί περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς PRIMES² καθώς επηρεάζουν τη δομή και τους όγκους της κατανάλωσης ενέργειας. Για τα αέρια θερμοκηπίου που δεν περιέχουν CO₂ και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, η ΕΕ και τα κράτη μέλη έχουν εκδώσει ένα ευρύ σώμα νομοθεσίας που περιορίζει τις εκπομπές από συγκεκριμένες πηγές ή έχει έμμεσες επιπτώσεις στις εκπομπές επηρεάζοντας τα ποσοστά δραστηριότητας. (3)

Κάποιοι από τους αέριους ρύπους είναι οι ακόλουθοι.

1.4.1 Εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂)

Οι περισσότερες εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂) από τις ανθρώπινες δραστηριότητες προέρχονται από την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Έτσι, οι όγκοι τέτοιων καυσίμων που καίγονται καθώς και η εφαρμογή και η αποτελεσματικότητα των αποκλειστικών τεχνολογιών ελέγχου των εκπομπών είναι βασικοί καθοριστικοί παράγοντες των συνολικών εκπομπών. Το 2005, περισσότερα από τα δύο τρίτα των εκπομπών SO₂ της ΕΕ-27 παρήχθησαν στον τομέα της ενέργειας και το 21% από βιομηχανικές πηγές. (3)

1.4.2 Εκπομπές οξειδία του αζώτου (NO_x)

Το 2005, οι κινητές πηγές ήταν η μεγαλύτερη πηγή εκπομπών NO_x στην ΕΕ-27. Οι οδικές μεταφορές συνεισέφεραν 44% στις συνολικές εκπομπές και τα μη οδικά κινητά μηχανήματα κατά 15%. Το 22% του NO_x προέρχεται από τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, το 13% από τη βιομηχανία και το 6% από τα νοικοκυριά. (3)

² PRIMES: Energy Systems Model of the National Technical University of Athens

1.4.3 Εκπομπές λεπτών σωματιδίων (PM_{2.5})

Το 2005, μικρές πηγές στον οικιακό τομέα και στον τομέα των υπηρεσιών συνεισέφεραν περίπου το 30% των συνολικών εκπομπών PM_{2.5} στην ΕΕ-27, ακολουθούμενες από κινητές πηγές (οδικές μεταφορές 15%, μη οδικά κινητά μηχανήματα 9%), βιομηχανία (23%) και στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας (9%). (3)

1.4.4 Εκπομπές αμμωνίας (NH₃)

Η γεωργία είναι η κυρίαρχη πηγή εκπομπών NH₃ στην Ευρώπη. Το 2005, περισσότερο από το 90% των εκπομπών NH₃ στην ΕΕ προέρχονταν από αυτόν τον τομέα. Το 44% των γεωργικών εκπομπών προκλήθηκαν από την εκτροφή βοοειδών, το 20% προήλθε από χοίρους και το 20% από τη χρήση και παραγωγή λιπασμάτων. (3)

1.4.5 Εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC)

Το 2005, η χρήση διαλυτών ήταν υπεύθυνη για το 37% των συνολικών εκπομπών VOC. Τα οδικά οχήματα και οι μη οδικές κινητές πηγές συνεισέφεραν 23% και 9%, αντίστοιχα, και οι βιομηχανικές πηγές 16%. (3)

1.4.6 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

Ξεκινώντας με τη «Earth Summit» του 1992 στο Ρίο ντε Τζανέιρο και στη συνέχεια, με το πρωτόκολλο του Κιότο που συμφωνήθηκε το 1997, οι ανεπτυγμένες χώρες δεσμεύτηκαν να δράσουν κατά της κλιματικής αλλαγής και αποφάσισαν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένου του CO₂. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) συμπεριφέρθηκε ως παγκόσμιος ηγέτης σε αυτόν τον τομέα και εφάρμοσε διαφορετικά νομοθετικά πακέτα για το κλίμα και την ενέργεια και περιβαλλοντικούς κανονισμούς για την επίτευξη των συμφωνηθέντων στόχων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. (4)

2. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

2.1 Εισαγωγή

Ο πλανήτης μας γίνεται κατοικήσιμος από την παρουσία ορισμένων αερίων που παγιδεύουν την ακτινοβολία μακρών κυμάτων που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης, δίνοντας μια παγκόσμια μέση θερμοκρασία 15°C , σε αντίθεση με την εκτιμώμενη -18°C απουσία ατμόσφαιρας. Αυτό το φαινόμενο είναι ευρέως γνωστό ως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Με διαφορά το πιο σημαντικό αέριο θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί. Ωστόσο, υπάρχει μια σημαντική συμβολή από το διοξείδιο του άνθρακα και μικρότερη συμβολή από το όζον, το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου. (5)

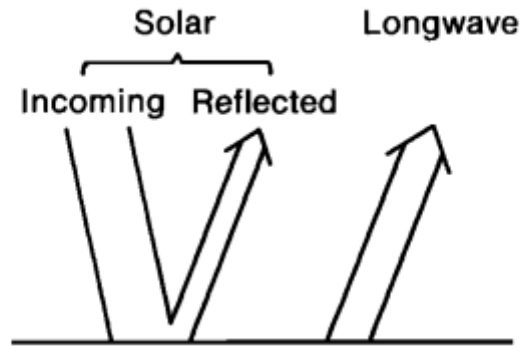
Οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου και του υποξειδίου του αζώτου είναι γνωστό ότι αυξάνονται και τα τελευταία χρόνια, άλλα αέρια θερμοκηπίου, κυρίως χλωροφθοράνθρακες (CFCs), έχουν προστεθεί σε σημαντικές ποσότητες στην ατμόσφαιρα. Υπάρχουν πολλές αβεβαιότητες στην εξαγωγή των επακόλουθων κλιματικών επιπτώσεων. Συνήθως, εκτιμάται ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις αυτών των αερίων από το 1860 μπορεί να έχουν αυξήσει τις μέσες παγκόσμιες επιφανειακές θερμοκρασίες κατά $0,5^{\circ}\text{C}$ περίπου και οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις θα μπορούσαν να προκαλέσουν θέρμανση περίπου $1,5^{\circ}\text{C}$ τα επόμενα 40 χρόνια. Μαθηματικά κλιματικά μοντέλα δείχνουν ότι επιπλέον κλιματικές αλλαγές θα συνοδεύουν την αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, με δυνητικά σοβαρές επιπτώσεις σε πολλές κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες. (5)

2.2 Επιδράσεις ακτινοβολίας

Το σύστημα Γης-ατμόσφαιρας θερμαίνεται από ηλιακή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων με μέσο ρυθμό $S_0=(1-\alpha)/4$, όπου το S_0 είναι η ηλιακή "σταθερά", α είναι το κλάσμα της ακτινοβολίας που αντανακλάται από τη Γη και την ατμόσφαιρα και τον παράγοντα 4 που επιτρέπει τη σφαιρική γεωμετρία της Γης. Αυτό πρέπει να εξισορροπηθεί από την εκπομπή μακρών κυμάτων (θερμικής ή υπέρυθρης) ακτινοβολίας στο διάστημα (Εικόνα α). Το ποσοστό της ψύξης δίνεται από το σT^4 , όπου σ είναι η σταθερά του Stefan, T είναι η ενεργός θερμοκρασία ακτινοβολίας του συστήματος. Στο ισοζύγιο

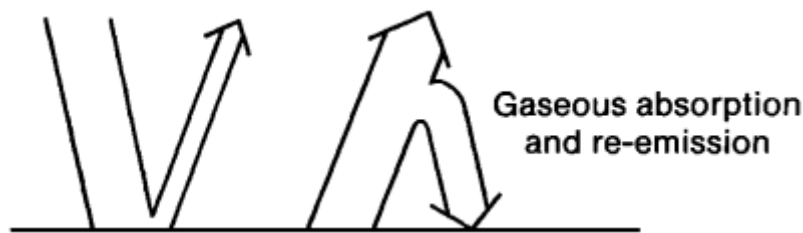
$$S_0=(1-\alpha)/4=\sigma T^4 \quad (1)$$

το οποίο υποθέτοντας την παρούσα λευκαύγεια 0,30 δίνει την τιμή της T που αντιστοιχεί σε 255 K (-18°C). Ελλείψει μιας ατμόσφαιρας, η T θα είναι η θερμοκρασία επιφάνειας της Γης. (5)



(a) No atmosphere (5)

Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου που δείχνει (a) καμία ατμόσφαιρα, όπου η ακτινοβολία μακρών κυμάτων διαφεύγει απευθείας στο διάστημα και (b) μια απορροφητική ατμόσφαιρα, όπου η ακτινοβολία μακρών κυμάτων από την επιφάνεια απορροφάται και εκπέμπεται εκ νέου τόσο προς τα κάτω, θερμαίνοντας επιφάνεια και χαμηλότερη ατμόσφαιρα, και προς τα πάνω, διατηρώντας την ισορροπία της ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας. (5)



(b) With atmosphere

Ένας τέλειος πομπός, ή μαύρο σώμα, εκπέμπει ακτινοβολία σε ένα εύρος μηκών κύματος. Η κατανομή της ενέργειας που εκπέμπεται με το μήκος κύματος είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του πομπού: όσο θερμότερος είναι ο πομπός, τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος της εκπομπής κορυφής. Έτσι ο Ήλιος, ο οποίος έχει επιφανειακή θερμοκρασία 6000 K, εκπέμπει την περισσότερη ακτινοβολία στην περιοχή 0,2-4 μm , (συμπεριλαμβανομένων των μηκών κύματος υπεριώδους, ορατού και κοντά στο υπέρυθρο), ενώ η Γη στους 255 K εκπέμπει κυρίως στην περιοχή 4-100 μm (ακτινοβολία μακρών κυμάτων). (5)

Οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια θερμοκηπίου είναι σχετικά αναποτελεσματικοί απορροφητές της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, απορροφούν την ακτινοβολία μακρών κυμάτων που εκπέμπεται από την επιφάνεια και εκπέμπουν ξανά πίσω στην επιφάνεια, προκαλώντας επιπλέον θέρμανση, και στο διάστημα, διατηρώντας την ισορροπία με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα, η τρέχουσα παγκόσμια μέση θερμοκρασία επιφάνειας είναι σημαντικά υψηλότερη από την πραγματική θερμοκρασία ακτινοβολίας T . Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας πάνω από το T είναι γνωστή ως «φαινόμενο του θερμοκηπίου». Ο όρος θερμοκήπιο εφαρμόζεται σε ατμοσφαιρικά αέρια που είναι σχετικά διαφανή στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά απορροφούν την ακτινοβολία μεγάλων κυμάτων, με τρόπο παρόμοιο με το γυαλί σε ένα θερμοκήπιο. Ωστόσο, άλλες διεργασίες συμβάλλουν στη θέρμανση ενός θερμοκηπίου, ειδικά η συγκράτηση του αέρα που είναι θερμότερος από

το περιβάλλον και ο οποίος διαφορετικά θα ανέβαινε και θα αντικατασταθεί από αέρα σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Έτσι ο όρος «θερμοκήπιο» είναι παραπλανητικός, καθώς το ατμοσφαιρικό φαινόμενο του θερμοκηπίου οφείλεται αποκλειστικά σε διεργασίες ακτινοβολίας. Ωστόσο, ο όρος είναι παγκοσμίως αποδεκτός και θα χρησιμοποιείται στη συνέχεια. (5)

2.3 Ποια αέρια είναι κλιματικά σημαντικά και γιατί;

Η συμβολή ενός αερίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου εξαρτάται από το μήκος κύματος στο οποίο το αέριο απορροφά την ακτινοβολία, τη συγκέντρωση του αερίου, την ισχύ απορρόφησης ανά μόριο (ισχύς γραμμής) και από το εάν άλλα αέρια απορροφούν έντονα στα ίδια μήκη κύματος. Κατά συνέπεια, ένα μόριο διχλωροδιφθορομεθανίου (CFC12) είναι περίπου 104 φορές πιο αποτελεσματικό στην «παγίδευση» ακτινοβολίας μακρών κυμάτων από ένα μόριο διοξειδίου του άνθρακα στην παρούσα ατμόσφαιρα. (5)

2.3.1 Τι καθορίζει τα μήκη κύματος της απορρόφησης

Τα αέρια απορροφούν και εκπέμπουν ακτινοβολία σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε μεταβάσεις μεταξύ επιπέδων διακριτικής ενέργειας. Η σχέση μεταξύ της μεταβολής του ενεργειακού επιπέδου ΔE και του μήκους κύματος λ της σχετικής ακτινοβολίας δίνεται από:

$$\Delta E = h/2\pi\lambda$$

όπου h είναι η σταθερά Planck. Ως εκ τούτου, κάθε μετάβαση συνδέεται με ένα διακριτό μήκος κύματος και τα μεγαλύτερα ενεργειακά άλματα αντιστοιχούν σε μικρότερα μήκη κύματος. Τα διατομικά συμμετρικά αέρια όπως το οξυγόνο δεν έχουν μόνιμη διπολική ροπή, επομένως οι πιθανές μεταβάσεις περιορίζονται σε αλλαγές στην ηλεκτρονική κατάσταση που περιλαμβάνουν μεγάλες ενέργειες και επομένως μικρά μήκη κύματος. Αφ' ετέρου, τα τριατομικά μόρια όπως το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα έχουν επιπλέον μικρότερες μεταπτώσεις δόνησης και περιστροφικής ενέργειας που αντιστοιχούν σε υπέρυθρα μήκη κύματος. Οι υδρατμοί απορροφούν ισχυρά κοντά στα 6,3 μm και 2,7 μm λόγω αλλαγών στη μοριακή δονητική ενέργεια και σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από περίπου 18 μm λόγω αλλαγών σε περιστροφική ενέργεια. Το διοξείδιο του άνθρακα απορροφά έντονα περίπου 15 μm κοντά στην κορυφή του φάσματος των μακρών κυμάτων. (5)

2.3.2 Τι καθορίζει το μέγεθος της συνεισφοράς στο φαινόμενο του θερμοκηπίου;

Αν και κάθε μετάβαση σχετίζεται με ένα διακριτό μήκος κύματος, το διάστημα στο οποίο λαμβάνει χώρα η απορρόφηση "διευρύνεται" με την προσθήκη ή αφαίρεση ενέργειας λόγω μοριακών συγκρούσεων (διεύρυνση πίεσης) ή τη μετατόπιση

συχνότητας Doppler λόγω των τυχαίων ταχυτήτων των μορίων (διεύρυνση Doppler) . Εάν η απορρόφηση είναι ισχυρή, μπορεί να υπάρχει πλήρης απορρόφηση (κορεσμός) γύρω από το κεντρικό μήκος κύματος της φασματικής γραμμής. (5)

Τόσο οι υδρατμοί όσο και το διοξείδιο του άνθρακα απορροφούν ακτινοβολία μακρών κυμάτων σε ένα εύρος συχνοτήτων και η σχετικά υψηλή συγκέντρωση αυτών των δύο αερίων διασφαλίζει ότι πολλές από τις φασματικές γραμμές είναι κορεσμένες. Οποιαδήποτε αύξηση της απορρόφησης λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης αυτών των αερίων περιορίζεται στα φτερά των γραμμών απορρόφησης. Κατά συνέπεια, η θέρμανση με ακτινοβολία λόγω αυτών των αερίων αυξάνεται λογαριθμικά, όχι γραμμικά, με τη συγκέντρωση. (5)

Η απορρόφηση από τους υδρατμούς και το διοξείδιο του άνθρακα είναι τόσο ισχυρή, που άλλα αέρια που απορροφούν παρόμοια μήκη κύματος θα συμβάλλουν ελάχιστα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, εκτός εάν έχουν συγκρίσιμες συγκεντρώσεις. Ωστόσο, υπάρχει μια περιοχή του φάσματος μακρών κυμάτων από περίπου 8 μm έως 12 μm γνωστή ως «ατμοσφαιρικό παράθυρο» όπου η απορρόφηση από το νερό και το CO_2 είναι ασθενής. Άλλα ιχνοαέρια, συμπεριλαμβανομένου του όζοντος, το οποίο έχει μέγιστη απορρόφηση στα 9,6 μm , του μεθανίου και του υποξειδίου του αζώτου, έχουν ζώνες απορρόφησης εντός ή κοντά σε αυτό το εύρος και συμβάλλουν στην παγίδευση ακτινοβολίας μακρών κυμάτων, παρά τις σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις τους. Η απορρόφηση από αυτά τα αέρια είναι σχετικά ισχυρή και κοντά στον κορεσμό και οι γραμμές απορρόφησής τους επικαλύπτουν εν μέρει αυτές άλλων αερίων. Η επίδρασή τους αυξάνεται όσο η τετραγωνική ρίζα των συγκεντρώσεών τους. (5)

Τέλος, υπάρχουν μερικά αέρια που υπάρχουν σε πολύ μικρές ποσότητες που έχουν ισχυρές γραμμές απορρόφησης στο ατμοσφαιρικό παράθυρο και ελάχιστη επικάλυψη με άλλα αέρια. (5)

2.4 Αλλαγές στις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου

2.4.1 Υδρατμοί (H_2O)

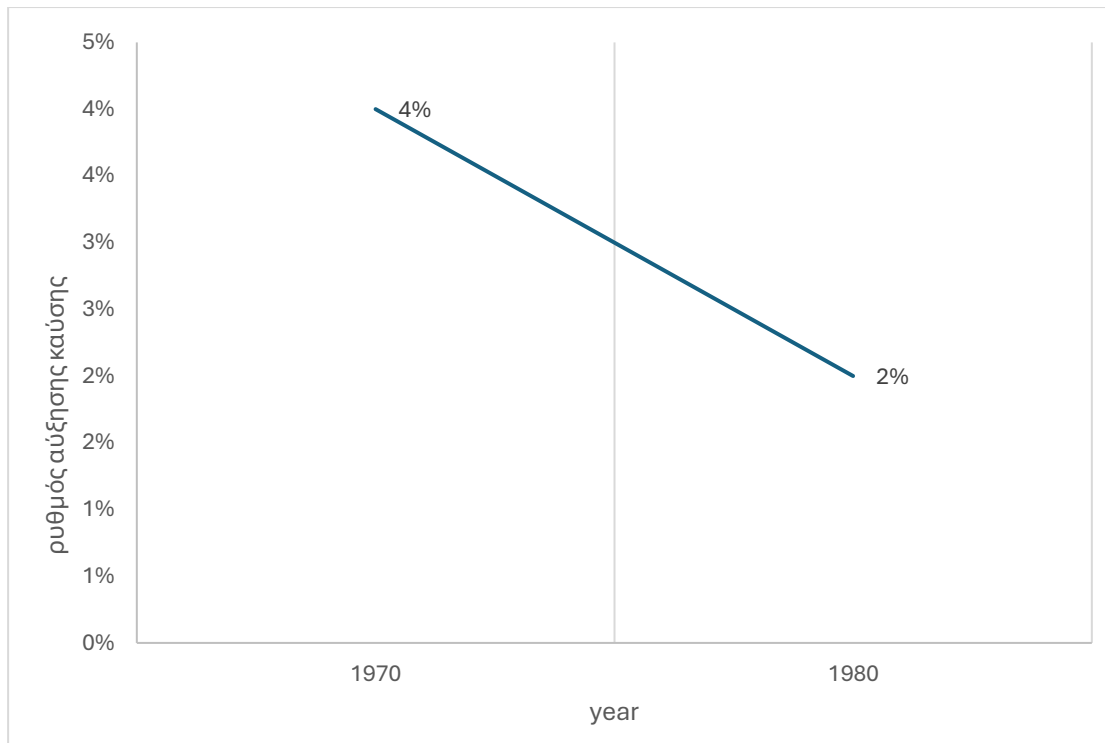
Τα περισσότερα από τα αέρια που εξετάζονται εδώ αναμειγνύονται καλά σε όλη την τροπόσφαιρα και τη στρατόσφαιρα. Συνεπώς, οι παγκόσμιες συγκεντρώσεις τους μπορούν να προσδιοριστούν με μετρήσεις σε μερικές επιλεγμένες τοποθεσίες. Από την άλλη πλευρά, η συγκέντρωση υδρατμών (ειδική υγρασία) κυμαίνεται από έως και 15.000 μέρη ανά εκατομμύριο κατ' όγκο (ppm) κοντά στην επιφάνεια στις τροπικές περιοχές έως 3 ppm στην κατώτερη στρατόσφαιρα και ποικίλλει σημαντικά σε ημερήσιες, συνοπτικές και εποχιακές κλίμακες χρόνου καθώς και με την τοποθεσία. Ωστόσο, στοιχεία τόσο από την παρατηρούμενη εποχιακή διακύμανση όσο και από αριθμητικές μελέτες δείχνουν ότι, σε μια πρώτη προσέγγιση, η σχετική υγρασία της τροπόσφαιρας είναι σταθερή. Χρησιμοποιώντας αυτή την υπόθεση στην εξίσωση Clausius Clapeyron, μια αύξηση 1 K στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία θα συσχετιστεί

με μια αύξηση 6% στους υδρατμούς. Η αύξηση των υδρατμών ενισχύει την καθαρή θέρμανση μακρών κυμάτων της τροπόσφαιρας και της επιφάνειας και οδηγεί σε περαιτέρω θέρμανση, δίνοντας θετική ανάδραση μεταξύ της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και των υδρατμών. Η τρέχουσα θέρμανση του θερμοκηπίου λόγω των υδρατμών είναι περίπου 100 W m^{-2} . (5)

Η συγκέντρωση των υδρατμών φτάνει τουλάχιστον τα 3 ppm στην κατώτερη στρατόσφαιρα. Θεωρείται ότι αυτό το ελάχιστο οφείλεται στη χαμηλή θερμοκρασία στην τροπική τροπόπαυση που περιορίζει τη συγκέντρωση των υδρατμών στον τροποσφαιρικό αέρα που αναμιγνύεται στη στρατόσφαιρα, οπότε η συγκέντρωση των υδρατμών της στρατόσφαιρας θα πρέπει να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της τροπόσφαιρας. Το μεθάνιο που προέρχεται από την τροπόσφαιρα παρέχει μια περαιτέρω πηγή υδρατμών της στρατόσφαιρας επειδή η οξείδωση των ατόμων υδρογόνου στο μεθάνιο παράγει δύο μόρια υδρατμών για κάθε μόριο μεθανίου. Η τρέχουσα συγκέντρωση μεθανίου (1,7 ppm) φαίνεται να ευθύνεται για την εμφάνιση υδρατμών που υπερβαίνουν τα 6 ppm σε μέρη της στρατόσφαιρας. Εάν συμβαίνει αυτό, οι αυξήσεις στη συγκέντρωση του μεθανίου μπορεί να προκαλέσουν αυξήσεις στους υδρατμούς της στρατόσφαιρας. (5)

2.4.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα έχει υποστεί σημαντικές φυσικές διακυμάνσεις. Ο άνθρακας ανακυκλώνεται ανάμεσα σε τρεις κύριες δεξαμενές: την ατμόσφαιρα που περιέχει 720 Gt ($1 \text{ Gt} = 10^9$ μετρικούς τόνους) άνθρακα με τη μορφή διοξειδίου του άνθρακα, τη γήινη βιόσφαιρα (1500 Gt) και τους ωκεανούς (38.000 Gt). Οι εκτιμήσεις της προβιομηχανικής ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα με βάση τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων σε φυσαλίδες παγιδευμένες σε στρώματα πάγου της ξηράς ποικίλλουν από 265 έως 290 ppm. Έκτοτε, οι συγκεντρώσεις έχουν αυξηθεί κατά περίπου 25%, αρχικά λόγω της αποψίλωσης των δασών και πιο πρόσφατα λόγω της αυξημένης καύσης ανθρακοφόρων ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα από το 1958, όταν ξεκίνησαν οι πρώτες τακτικές μετρήσεις, αντιπροσωπεύει μόνο το 58% αυτού που απελευθερώνεται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Οι ωκεανοί είναι η κύρια καταβόθρα για την περίσσεια διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Οι τρέχουσες προσπάθειες για τη μοντελοποίηση της απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα από τους ωκεανούς απέτυχαν να λάβουν υπόψη το σύνολο του «πλεονάζοντος» CO_2 στην ατμόσφαιρα. Αυτό είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα στην κατανόηση του φυσικού κύκλου του άνθρακα και ως εκ τούτου στην ικανότητά μας να προβλέψουμε μελλοντικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα. Ο ρυθμός αύξησης της καύσης ορυκτών καυσίμων μειώθηκε από περίπου 4% ετησίως στις αρχές της δεκαετίας του 1970 σε 2% ετησίως στη δεκαετία του 1980. Η τρέχουσα θέρμανση του θερμοκηπίου λόγω του διοξειδίου του άνθρακα είναι περίπου 50 W m^{-2} . Αυτό έχει αυξηθεί κατά περίπου $1,3 \text{ W m}^{-2}$ από το 1860. (5)

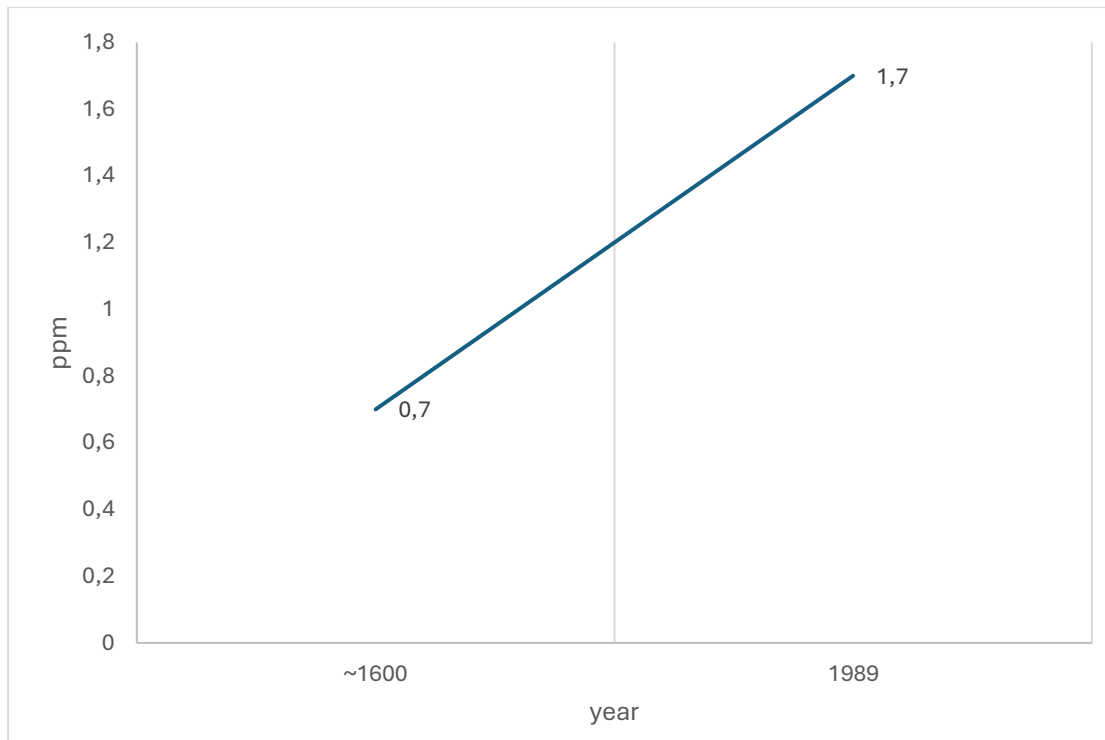


Διάγραμμα 1: Ρυθμός αύξησης καύσης ορυκτών καυσίμων ανά έτος

Οι εκτιμήσεις των μελλοντικών συγκεντρώσεων ποικίλλουν σημαντικά. Επί του παρόντος, οι συγκεντρώσεις CO_2 αυξάνονται με ρυθμό 1,5 ppm (που ισοδυναμεί με 0,48%) ετησίως, το οποίο, εάν διατηρηθεί, θα δώσει συγκέντρωση 420 ppm έως το 2035. Τα περισσότερα σενάρια προϋποθέτουν σταδιακή αύξηση των ρυθμών εκπομπών. Μια αύξηση των ρυθμών εκπομπών κατά 1,4% ετησίως υποθέτοντας ότι το 50% των ορυκτών καυσίμων CO_2 παραμένει στην ατμόσφαιρα θα έδινε συγκέντρωση περίπου 475 ppm έως το 2035. Αυτό θα ενίσχυε τη θέρμανση της τροπόσφαιρας/επιφανείας κατά επιπλέον $1,8 \text{ W m}^{-2}$. (5)

2.4.3 Μεθάνιο (CH_4)

Η συγκέντρωση του μεθανίου ήταν περίπου 0,7 ppm πριν από 400 χρόνια και τώρα είναι 1,7 ppm, συνεισφέροντας περίπου $1,7 \text{ W m}^{-2}$ στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η αύξηση από το 1860 μόνο έχει προσθέσει περίπου $0,4 \text{ W m}^{-2}$. Την τελευταία δεκαετία, τα ποσά αυξήθηκαν κατά περίπου 1% ετησίως. Οι κύριες φυσικές πηγές για το ατμοσφαιρικό μεθάνιο πιστεύεται ότι είναι ορυζώνες, μηρυκαστικά και υγρότοποι. Μια πρόσφατη ανάλυση των αναλογιών $14_c/12_c$ και $13_c/12_c$ υποδηλώνει ότι περίπου το 32% του ατμοσφαιρικού μεθανίου προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η κύρια γνωστή καταβόθρα είναι η φωτοχημική οξείδωση στην τροπόσφαιρα από τη ρίζα υδροξυλίου OH. Καθώς ο τρέχων προϋπολογισμός του μεθανίου δεν είναι επακριβώς γνωστός, η πρόβλεψη των μελλοντικών συγκεντρώσεων είναι δύσκολη. Εάν διατηρηθεί ο τρέχων ρυθμός αύξησης, οι συγκεντρώσεις θα φτάσουν τα 2,8 ppm τα επόμενα 50 χρόνια, συμβάλλοντας επιπλέον $0,5 \text{ W m}^{-2}$ στη θέρμανση με ακτινοβολία. (5)



Διάγραμμα 2: Συγκέντρωση μεθανίου (ppm) ανά έτος

2.4.4 Οξείδιο του αζώτου (N_2O)

Η προβιομηχανική συγκέντρωση έχει υπολογιστεί ότι είναι 0,28 ppm, αν και έχουν αναφερθεί χαμηλότερες. Η αύξηση στο παρόν ποσό αντιστοιχεί σε επιπλέον θέρμανση $0,05 \text{ W m}^{-2}$. Ο τρέχων ρυθμός αύξησης είναι 0,2% ετησίως, ο οποίος, εάν διατηρηθεί, θα παρήγαγε συγκέντρωση 0,332 ppm το 2035. Οι πηγές του τροποσφαιρικού N_2O πιστεύεται ότι περιλαμβάνουν μικροβιακές διεργασίες στο έδαφος και το νερό, αζωτούχα λιπάσματα, και ορυκτά καύσιμα και καύση γεωργικών προϊόντων. Η κύρια καταβόθρα είναι η φωτόλυση στη στρατόσφαιρα με την κατάσταση $\text{O}(^1\text{D})$ του ατομικού οξυγόνου. Δεδομένης της πρόχειρης φύσης της αντίληψής μας για τον προϋπολογισμό N_2O , η προβολή των μελλοντικών συγκεντρώσεων πρέπει να θεωρηθεί ως κερδοσκοπική. Υποθέστε μια τιμή του 2030 0,375 ppm με βάση το απλό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε από τον Weiss [1981] (6). Εδώ υιοθετούμε μια συγκέντρωση 0,38 ppm έως το 2035, συμβάλλοντας επιπλέον $0,15 \text{ W m}^{-2}$ στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. (5)

2.4.5 Χλωροφθορομεθάνια (CFC11 και CFC12)

Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των CFC11 και CFC12 μπορούν να αποδοθούν στη βιομηχανική παραγωγή, επιτρέποντας την καταστροφή τους στη στρατόσφαιρα και την απορρόφησή τους από τους ωκεανούς. Η σημερινή συμβολή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μικρή. Εάν η παραγωγή διατηρηθεί στα σημερινά επίπεδα, η συγκέντρωση των CFC11 και CFC12 θα αυξηθεί σε 0,5 και 1,0 μέρη ανά δισεκατομμύριο (ppb) μέσα σε 40 χρόνια και σε 0,7 και 2,1 ppb σε ισορροπία.

Η συγκέντρωση αυτών των δύο αερίων αυξάνεται επί του παρόντος κατά 5% ετησίως. Εάν διατηρηθεί αυτός ο ρυθμός αύξησης, οι συγκεντρώσεις θα φτάσουν τα 2,7 και 4,6 ppb. Υποτίθεται ότι η συγκέντρωση θα αυξηθεί κατά 4% ετησίως, προσθέτοντας $1,04 \text{ W m}^{-2}$ στον καθαρό ρυθμό παγκόσμιας θέρμανσης έως το 2035. (5)

Σημειώστε ότι η πιθανή συμβολή αυτών των δύο αερίων είναι πολύ ευαίσθητη στον υποτιθέμενο ρυθμό ανάπτυξης. Χωρίς αύξηση στους ρυθμούς εκπομπών θα μπορούσαν να προσθέσουν $0,5 \text{ W m}^{-2}$ στον ρυθμό θέρμανσης του θερμοκηπίου μέσα στα επόμενα 50 χρόνια. Οι μειώσεις που προτείνονται στο Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ του 1987 θα μείωναν σε περίπου $0,3 \text{ W m}^{-2}$. (5)

2.4.6 Όζον (03)

Το τροποσφαιρικό όζον τείνει να θερμαίνει την επιφάνεια της Γης μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου, αλλά το όζον της στρατόσφαιρας έχει το αντίθετο αποτέλεσμα λόγω της απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας (μικρών κυμάτων). Υπάρχουν ενδείξεις για μια ελαφρά μείωση των συνολικών ποσοτήτων όζοντος κατά την περίοδο 1978-1985 λόγω κυρίως μειώσεων στη στρατόσφαιρα. Περίπου το 10% του ατμοσφαιρικού όζοντος βρίσκεται στην τροπόσφαιρα. Υπάρχουν ενδείξεις μεγάλων τοπικών αυξήσεων του όζοντος στην επιφάνεια, κυρίως από τοποθεσίες κοντά σε βιομηχανικές περιοχές στο βόρειο ημισφαίριο. Η διάρκεια ζωής των μορίων του όζοντος στην τροπόσφαιρα είναι σύντομη και οι διακυμάνσεις στο χώρο είναι μεγάλες, επομένως είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι παγκόσμιες τάσεις κατά μέσο όρο. Μόνο οι αυξήσεις του επιφανειακού όζοντος θα είχαν μικρό φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλά μια αύξηση 25% μέσω του βάθους της τροπόσφαιρας θα πρόσθετε $0,2 \text{ W m}^{-2}$ στη θέρμανση του θερμοκηπίου. (5)

2.4.7 Γενικά

Πολλά άλλα ιχνοαέρια θεωρήθηκαν από τους Ramanathan et al. [1985] (7), αλλά η πιθανή συμβολή τους είναι αμελητέα. Το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου και το όζον υφίστανται χημικούς κύκλους που περιλαμβάνουν άλλα αέρια (για παράδειγμα, μονοξείδιο του άνθρακα και νιτρικό υπεροξυακετύλιο) που είναι επίσης γνωστό ότι αυξάνονται σε συγκέντρωση. (5)

Η εκτιμώμενη αύξηση της θέρμανσης μακρών κυμάτων της τροπόσφαιρας και της επιφάνειας από την αρχή της Βιομηχανικής Επανάστασης είναι περίπου $1,9 \text{ W m}^{-2}$ (αγνοώντας τις επιπτώσεις των αλλαγών του όζοντος). Μια περαιτέρω αύξηση $3,5 \text{ W m}^{-2}$ φαίνεται πιθανή μέχρι το 2035, αν και οι εκτιμήσεις για τα επόμενα 60 χρόνια κυμαίνονται από $2,2 \text{ W m}^{-2}$ έως $7,2 \text{ W m}^{-2}$. Ενώ είναι σχετικά εύκολο να εκτιμηθεί η αύξηση της θέρμανσης δεδομένων των ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου, είναι λιγότερο εύκολο να εκτιμηθούν οι προκύπτουσες αλλαγές στη θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει επειδή η ατμόσφαιρα προσαρμόζεται στους διαταραγμένους ρυθμούς θέρμανσης με τρόπους που μπορεί να ενισχύσουν ή να μειώσουν το μέγεθος της απόκρισης (θετικές και αρνητικές ανατροφοδοτήσεις) και η θερμική αδράνεια των ωκεανών επιβραδύνει τον ρυθμό με τον οποίο ζεσταίνεται η ατμόσφαιρα και η επιφάνεια της γης. (5)

3.Τεχνικό πλαίσιο

3.1 Γιατί το ενδιαφέρον για τη δέσμευση και αποθήκευση CO₂;

Το 1992, η διεθνής ανησυχία για την κλιματική αλλαγή οδήγησε στη Σύμβαση Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC)³. Ο απώτερος στόχος αυτής της Σύμβασης είναι η «σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε επίπεδο που να αποτρέπει την επικίνδυνη ανθρωπογενή παρέμβαση στο κλιματικό σύστημα». Από αυτή την άποψη, το πλαίσιο για την εξέταση του CCS (Carbon Capture and Storage) είναι εκείνο ενός κόσμου που περιορίζεται στις εκπομπές CO₂, σύμφωνα με τον διεθνή στόχο της σταθεροποίησης των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών αερίων του θερμοκηπίου. Τα περισσότερα σενάρια για την παγκόσμια χρήση ενέργειας προβλέπουν σημαντική αύξηση των εκπομπών CO₂ καθ' όλη τη διάρκεια αυτού του αιώνα, απουσία συγκεκριμένων ενεργειών για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Προτείνουν επίσης ότι η παροχή πρωτογενούς ενέργειας θα συνεχίσει να κυριαρχείται από ορυκτά καύσιμα τουλάχιστον μέχρι τα μέσα του αιώνα. Το μέγεθος της μείωσης των εκπομπών που απαιτείται για τη σταθεροποίηση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του CO₂ θα εξαρτηθεί τόσο από το επίπεδο των μελλοντικών εκπομπών (η βασική γραμμή) όσο και από τον επιθυμητό στόχο για μακροπρόθεσμη συγκέντρωση CO₂: όσο χαμηλότερος είναι ο στόχος σταθεροποίησης και υψηλότερες οι βασικές εκπομπές, τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη μείωση των εκπομπών CO₂. Η Τρίτη Έκθεση Αξιολόγησης (TAR)⁴ της IPCC⁵ αναφέρει ότι, ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο, θα πρέπει να αποτραπούν σωρευτικές εκπομπές εκατοντάδων ή και χιλιάδων γιγατόνων CO₂ κατά τη διάρκεια αυτού του αιώνα για να σταθεροποιηθεί η συγκέντρωση CO₂ στα 450 έως 750 ppmv⁶. Το TAR διαπιστώνει επίσης ότι «τα περισσότερα αποτελέσματα μοντέλων υποδεικνύουν ότι οι γνωστές τεχνολογικές επιλογές θα μπορούσαν να επιτύχουν ένα ευρύ φάσμα επιπέδων σταθεροποίησης ατμοσφαιρικού CO₂», αλλά ότι «καμία μεμονωμένη τεχνολογική επιλογή δεν θα προσφέρει όλες τις απαραίτητες μειώσεις εκπομπών». Αντίθετα, θα χρειαστεί ένας συνδυασμός μέτρων μετριασμού για να επιτευχθεί σταθεροποίηση. Αυτές οι γνωστές τεχνολογικές επιλογές είναι διαθέσιμες για σταθεροποίηση, αν και το TAR προειδοποιεί ότι «η εφαρμογή θα απαιτούσε συναφείς κοινωνικοοικονομικές και θεσμικές αλλαγές». (8)

³ UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

⁴ TAR: Third Assessment Report

⁵ IPCC: The Intergovernmental Panel on Climate Change

⁶ ppmv: parts per million by volume

3.2 Πηγές CO₂

Αυτή η ενότητα περιγράφει τις κύριες τρέχουσες ανθρωπογενείς πηγές εκπομπών CO₂ και τη σχέση τους με πιθανούς χώρους αποθήκευσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι εκπομπές CO₂ από την ανθρώπινη δραστηριότητα προέρχονται από διάφορες πηγές, κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τις μεταφορές, τις βιομηχανικές διεργασίες και τα οικιστικά και εμπορικά κτίρια. Το CO₂ εκπέμπεται επίσης κατά τη διάρκεια ορισμένων βιομηχανικών διεργασιών όπως η παραγωγή τσιμέντου ή η παραγωγή υδρογόνου και κατά την καύση βιομάζας. Οι μελλοντικές εκπομπές συζητούνται επίσης σε αυτή την ενότητα. (8)

3.2.1 Τρέχουσες πηγές CO₂ και χαρακτηριστικά

Για να αξιολογηθεί το δυναμικό του CCS ως επιλογή για τη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, εξετάστηκε η τρέχουσα παγκόσμια γεωγραφική σχέση μεταξύ μεγάλων σταθερών πηγών εκπομπών CO₂ και της εγγύτητάς τους σε πιθανούς χώρους αποθήκευσης. Οι εκπομπές CO₂ στους τομείς της κατοικίας, του εμπορίου και των μεταφορών δεν έχουν ληφθεί υπόψη σε αυτήν την ανάλυση, επειδή αυτές οι πηγές εκπομπών είναι μεμονωμένες μικρές και συχνά κινητές, και επομένως ακατάλληλες για σύλληψη και αποθήκευση. Η συζήτηση εδώ περιλαμβάνει επίσης μια ανάλυση των πιθανών μελλοντικών πηγών CO₂ με βάση διάφορα σενάρια μελλοντικής παγκόσμιας χρήσης ενέργειας και εκπομπών κατά τον επόμενο αιώνα. (8)

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι εκπομπές CO₂ από τη χρήση ορυκτών καυσίμων το έτος 2000 ανήλθαν συνολικά σε περίπου 23,5 GtCO₂ yr⁻¹ (6 GtC yr⁻¹). Από αυτό, σχεδόν το 60% αποδόθηκε σε μεγάλες (>0,1 MtCO₂ yr⁻¹) σταθερές πηγές εκπομπών. Ωστόσο, δεν είναι όλες αυτές οι πηγές επιδεκτικές δέσμευσης CO₂. Αν και οι πηγές που αξιολογήθηκαν διανέμονται σε όλο τον κόσμο, η βάση δεδομένων αποκαλύπτει τέσσερις συγκεκριμένες ομάδες εκπομπών: Βόρεια Αμερική (μεσοδυτικές και ανατολικές ΗΠΑ), Ευρώπη (βορειοδυτική περιοχή), Ανατολική Ασία (ανατολική ακτή της Κίνας) και Νότια Ασία (ινδική υποήπειρος). Αντίθετα, οι πηγές βιομάζας μεγάλης κλίμακας είναι πολύ μικρότερες σε αριθμό και λιγότερο κατανομημένες παγκοσμίως.

Επί του παρόντος, η συντριπτική πλειοψηφία των μεγάλων πηγών εκπομπών έχει συγκεντρώσεις CO₂ μικρότερες από 15% (σε ορισμένες περιπτώσεις, σημαντικά μικρότερες). Ωστόσο, ένα μικρό μέρος (λιγότερο από 2%) των βιομηχανικών πηγών που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα έχουν συγκεντρώσεις CO₂ άνω του 95%. Οι πηγές υψηλής συγκέντρωσης είναι πιθανές υποψήφιες για την πρώιμη εφαρμογή του CCS επειδή θα απαιτούνταν μόνο αφυδάτωση και συμπίεση στο στάδιο της σύλληψης. Μια ανάλυση αυτών των πηγών υψηλής καθαρότητας που βρίσκονται σε απόσταση 50 km από σχηματισμούς αποθήκευσης και που έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν έσοδα (μέσω της χρήσης CO₂ για ενισχυμένη παραγωγή υδρογονανθράκων μέσω ECBM⁷ ή EOR⁸) δείχνει ότι τέτοιες πηγές εκπέμπουν επί του παρόντος περίπου 360

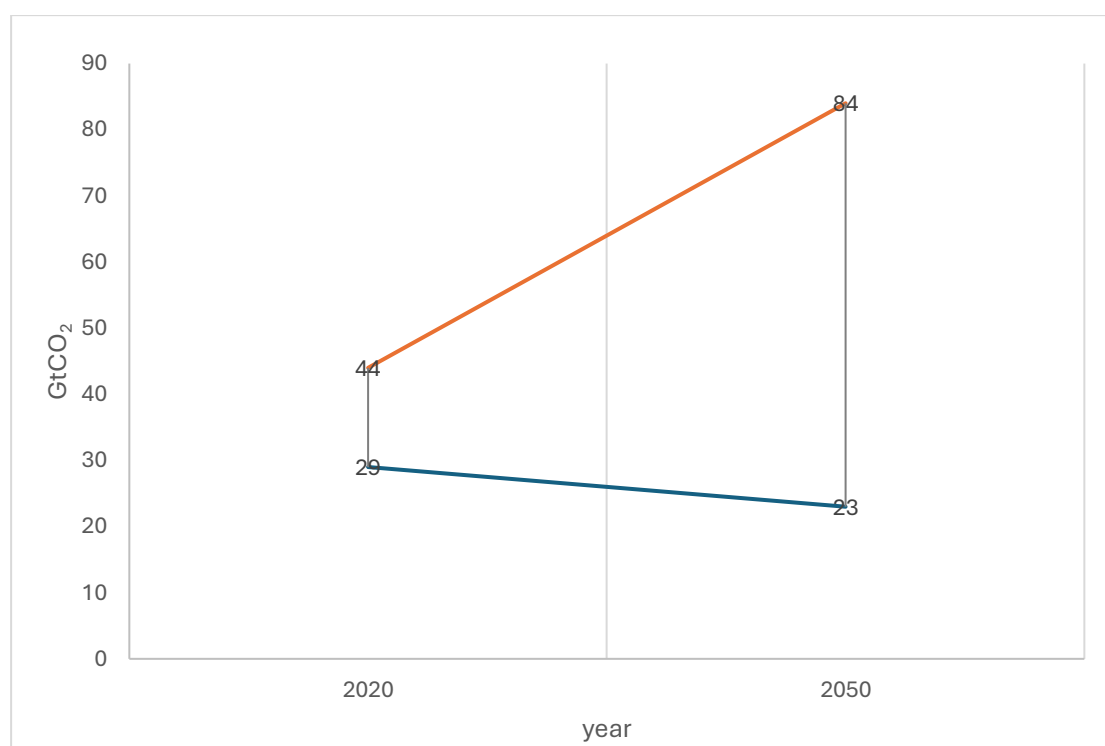
⁷ ECBM: Enhanced Coal Bed Methane Recovery

⁸ EOR: Enhanced Oil Recovery

MtCO₂ ετησίως. Ορισμένες πηγές βιομάζας, όπως η παραγωγή βιοαιθανόλης, παράγουν επίσης πηγές CO₂ υψηλής συγκέντρωσης που θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε παρόμοιες εφαρμογές. (8)

3.2.2 Μελλοντικές πηγές εκπομπών

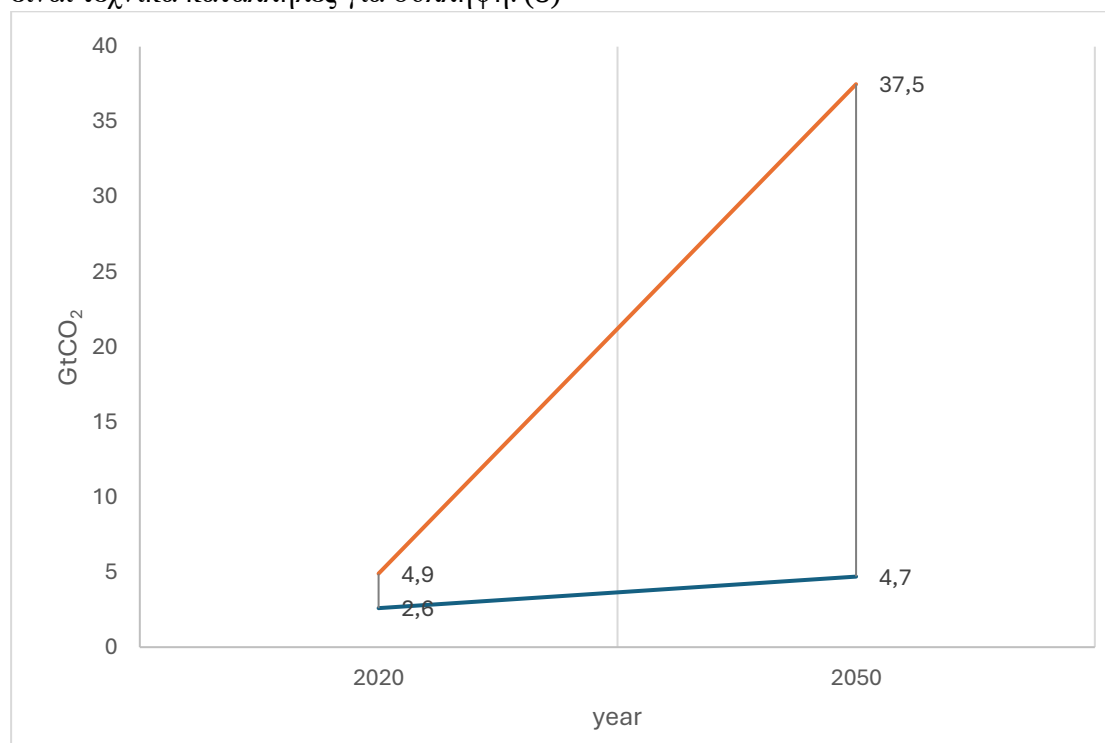
Στην Ειδική Έκθεση της IPCC για τα σενάρια εκπομπής (SRES)⁹, οι μελλοντικές εκπομπές CO₂ προβλέπονται με βάση έξι ενδεικτικά σενάρια στα οποία οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ κυμαίνονται από 29 έως 44 GtCO₂ (8–12 GtC) ετησίως το 2020 και από 23 έως 84 GtCO₂ (6–23 GtC) ετησίως το 2050. Προβλέπεται ότι ο αριθμός των πηγών εκπομπών CO₂ από τους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας και της βιομηχανίας θα αυξηθεί σημαντικά έως το 2050, κυρίως στη Νότια και Ανατολική Ασία. Αντίθετα, ο αριθμός τέτοιων πηγών στην Ευρώπη ενδέχεται να μειωθεί ελαφρώς. Το ποσοστό των πηγών με υψηλή και χαμηλή περιεκτικότητα σε CO₂ θα είναι συνάρτηση του μεγέθους και του ρυθμού εισαγωγής εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν αεριοποίηση ή υγροποίηση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή υδρογόνου ή άλλων υγρών και αέριων προϊόντων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός αυτών των εγκαταστάσεων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πηγών με υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ τεχνικά κατάλληλες για σύλληψη. (8)



Διάγραμμα 1: Πρόβλεψη τάσης παραγωγής CO₂.

⁹ SRES: Special Report on Emissions Scenarios

Το προβλεπόμενο δυναμικό δέσμευσης CO₂ που σχετίζεται με τα παραπάνω εύρη εκπομπών έχει εκτιμηθεί σε ετήσια 2,6 έως 4,9 GtCO₂ έως το 2020 (0,7–1,3 GtC) και 4,7 έως 37,5 GtCO₂ έως το 2050 (1,3–10 GtC). Αυτοί οι αριθμοί αντιστοιχούν στο 9–12% και στο 21–45% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ το 2020 και το 2050, αντίστοιχα. Οι περιοχές εκπομπής και σύλληψης αντικατοπτρίζουν τις εγγενείς αβεβαιότητες των αναλύσεων σεναρίων και μοντελοποίησης, καθώς και τους τεχνικούς περιορισμούς της εφαρμογής CCS. Αυτά τα σενάρια λαμβάνουν υπόψη μόνο τη δέσμευση CO₂ από ορυκτά καύσιμα και όχι από πηγές βιομάζας. Ωστόσο, οι εκπομπές από εγκαταστάσεις μετατροπής βιομάζας μεγάλης κλίμακας θα μπορούσαν επίσης να είναι τεχνικά κατάλληλες για σύλληψη. (8)



Διάγραμμα 2: Πρόβλεψη τάσης δέσμευσης CO₂.

Η πιθανή ανάπτυξη ενεργειακών φορέων χαμηλών εκπομπών άνθρακα σχετίζεται με τον μελλοντικό αριθμό και το μέγεθος μεγάλων, σταθερών πηγών CO₂ με υψηλές συγκεντρώσεις. Τα σενάρια δείχνουν επίσης ότι η μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενεργειακών φορέων χαμηλών εκπομπών άνθρακα, όπως η ηλεκτρική ενέργεια ή το υδρογόνο, θα μπορούσε, μέσα σε αρκετές δεκαετίες, να αρχίσει να εκτοπίζει τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα από μικρές, κατανεμημένες πηγές σε κατοικίες και εμπορικά κτίρια και στον τομέα των μεταφορών. Αυτοί οι φορείς ενέργειας θα μπορούσαν να παραχθούν από ορυκτά καύσιμα ή/και βιομάζα σε μεγάλες εγκαταστάσεις που θα παράγουν μεγάλες σημειακές πηγές CO₂ (σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής ή εγκαταστάσεις παρόμοιες με τις σημερινές μονάδες που παράγουν υδρογόνο από φυσικό αέριο). Αυτές οι πηγές θα ήταν κατάλληλες για δέσμευση CO₂. Τέτοιες εφαρμογές του CCS θα μπορούσαν να μειώσουν τις διάσπαρτες εκπομπές CO₂ από τις μεταφορές και από τα κατανεμημένα συστήματα παροχής ενέργειας. Προς το παρόν, ωστόσο, είναι δύσκολο να προβλεφθεί ο πιθανός αριθμός, το μέγεθος ή η γεωγραφική κατανομή των πηγών που σχετίζονται με τέτοιες εξελίξεις. (8)

3.3 Δέσμευση CO₂

Ο σκοπός της δέσμευσης CO₂ είναι να παραχθεί ένα συγκεντρωμένο ρεύμα CO₂ σε υψηλή πίεση που μπορεί εύκολα να μεταφερθεί σε ένα χώρο αποθήκευσης. Αν και, κατ' αρχήν, ολόκληρο το ρεύμα αερίου που περιέχει χαμηλές συγκεντρώσεις CO₂ θα μπορούσε να μεταφερθεί και να εγχυθεί υπόγεια, το ενεργειακό κόστος και άλλα συναφή έξοδα καθιστούν γενικά αυτή την προσέγγιση μη πρακτική. Επομένως, είναι απαραίτητο να παραχθεί ένα ρεύμα σχεδόν καθαρού CO₂ για μεταφορά και αποθήκευση. Εφαρμογές διαχωρισμού CO₂ σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των μονάδων επεξεργασίας φυσικού αερίου και των εγκαταστάσεων παραγωγής αμμωνίας, βρίσκονται ήδη σε λειτουργία σήμερα. Επί του παρόντος, το CO₂ συνήθως αφαιρείται για τον καθαρισμό άλλων βιομηχανικών ρευμάτων αερίου. Η αφαίρεση έχει χρησιμοποιηθεί για σκοπούς αποθήκευσης μόνο σε λίγες περιπτώσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το CO₂ εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Οι διαδικασίες δέσμευσης έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τη λήψη εμπορικά χρήσιμων ποσοτήτων CO₂ από ρεύματα καυσαερίων που παράγονται από την καύση άνθρακα ή φυσικού αερίου. Μέχρι σήμερα, ωστόσο, δεν έχουν υπάρξει εφαρμογές δέσμευσης CO₂ σε μεγάλες (π.χ. 500 MW) σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. (8)

Ανάλογα με τη διαδικασία ή την εφαρμογή του εργοστασίου παραγωγής ενέργειας, υπάρχουν τρεις κύριες προσεγγίσεις για τη δέσμευση του CO₂ που παράγεται από ένα πρωτογενές ορυκτό καύσιμο (άνθρακας, φυσικό αέριο ή πετρέλαιο), βιομάζα ή μείγματα αυτών των καυσίμων:

Τα συστήματα μετά την καύση διαχωρίζουν το CO₂ από τα καυσαέρια που παράγονται από την καύση του πρωτογενούς καυσίμου στον αέρα. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως έναν υγρό διαλύτη για τη δέσμευση του μικρού κλάσματος CO₂ (συνήθως 3–15% κατ' όγκο) που υπάρχει σε ένα ρεύμα καυσαερίων στο οποίο το κύριο συστατικό είναι άζωτο (από τον αέρα). Για μια σύγχρονη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με κονιοποιημένο άνθρακα (PC)¹⁰ ή μια μονάδα παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (NGCC)¹¹, τα τρέχοντα συστήματα δέσμευσης μετά την καύση θα χρησιμοποιούν συνήθως έναν οργανικό διαλύτη όπως η μονοαιθανολαμίνη (MEA). (8)

Τα συστήματα προκαύσης επεξεργάζονται το πρωτογενές καύσιμο σε έναν αντιδραστήρα με ατμό και αέρα ή οξυγόνο για να παραχθεί ένα μείγμα που αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο («αέριο σύνθεσης»). Επιπλέον υδρογόνο, μαζί με το CO₂, παράγεται με την αντίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα με ατμό σε έναν δεύτερο αντιδραστήρα (έναν «αντιδραστήρα μετατόπισης»). Το προκύπτον μίγμα υδρογόνου και CO₂ μπορεί στη συνέχεια να διαχωριστεί σε ρεύμα αερίου CO₂ και σε ρεύμα υδρογόνου. Εάν το CO₂ αποθηκεύεται, το υδρογόνο είναι

¹⁰ PC: Pulverized Coal

¹¹ NGCC: Natural Gas Combined Cycle

ένας ενεργειακός φορέας χωρίς άνθρακα που μπορεί να καεί για να παράγει ενέργεια ή/και θερμότητα. Αν και τα αρχικά στάδια μετατροπής καυσίμου είναι πιο περίπλοκα και δαπανηρά από ότι στα συστήματα μετά την καύση, οι υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ που παράγεται από τον αντιδραστήρα μετατόπισης (συνήθως 15 έως 60% κατ' όγκο σε ξηρή βάση) και οι υψηλές πιέσεις που συναντώνται συχνά σε αυτές τις εφαρμογές είναι πιο ευνοϊκές για το διαχωρισμό του CO₂. Η προκαύση θα χρησιμοποιείται σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου ολοκληρωμένης αεριοποίησης (IGCC)¹². (8)

Τα συστήματα καύσης οξυγόνου χρησιμοποιούν οξυγόνο αντί για αέρα για την καύση του πρωτογενούς καυσίμου για την παραγωγή καυσαερίων που είναι κυρίως υδρατμοί και CO₂. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα καυσαέριο με υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ (μεγαλύτερες από 80% κατ' όγκο). Στη συνέχεια, οι υδρατμοί απομακρύνονται με ψύξη και συμπίεση του ρεύματος αερίου. Η καύση οξυγόνου απαιτεί τον ανάντη διαχωρισμό του οξυγόνου από τον αέρα, με καθαρότητα 95–99% οξυγόνου που θεωρείται στα περισσότερα σύγχρονα σχέδια. Μπορεί να χρειαστεί περαιτέρω επεξεργασία των καυσαερίων για την απομάκρυνση των ατμοσφαιρικών ρύπων και των μη συμπεκνωμένων αερίων (όπως το άζωτο) από τα καυσαέρια πριν το CO₂ αποσταλεί στην αποθήκευση. Ως μέθοδος δέσμευσης CO₂ σε λέβητες, τα συστήματα καύσης οξυγόνου βρίσκονται στη φάση επίδειξης. Τα συστήματα οξυγόνου μελετώνται επίσης σε συστήματα αεριοστροβίλων, αλλά οι εννοιολογικοί σχεδιασμοί για τέτοιες εφαρμογές βρίσκονται ακόμη σε ερευνητική φάση. (8)

Οι κύριες διαδικασίες και συστήματα δέσμευσης απαιτούν ένα βήμα που περιλαμβάνει το διαχωρισμό CO₂, H₂ ή O₂ από ένα ρεύμα αερίου χύδην (όπως καυσαέρια, αέριο σύνθεσης, αέρας ή ακατέργαστο φυσικό αέριο). Αυτά τα στάδια διαχωρισμού μπορούν να επιτευχθούν με τη βοήθεια φυσικών ή χημικών διαλυτών, μεμβρανών, στερεών ροφητών ή με κρυογονικό διαχωρισμό. Η επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας σύλληψης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες της διαδικασίας υπό τις οποίες πρέπει να λειτουργεί. Τα τρέχοντα συστήματα μετά την καύση και προκαύσης για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής θα μπορούσαν να δεσμεύσουν το 85-95% του CO₂ που παράγεται. Είναι δυνατές υψηλότερες αποδόσεις σύλληψης, αν και οι συσκευές διαχωρισμού γίνονται σημαντικά μεγαλύτερες, πιο ενεργοβόρες και πιο δαπανηρές. Η σύλληψη και η συμπίεση χρειάζονται περίπου 10-40% περισσότερη ενέργεια από την αντίστοιχη εγκατάσταση χωρίς σύλληψη, ανάλογα με τον τύπο του συστήματος. Λόγω των σχετικών εκπομπών CO₂, η καθαρή ποσότητα CO₂ που δεσμεύεται είναι περίπου 80–90%. Τα συστήματα καύσης οξυγόνου είναι, καταρχήν, ικανά να δεσμεύουν σχεδόν όλο το παραγόμενο CO₂. Ωστόσο, η ανάγκη για πρόσθετα συστήματα επεξεργασίας αερίων για την απομάκρυνση ρύπων όπως το θείο και τα οξείδια του αζώτου μειώνει το επίπεδο του CO₂ που δεσμεύεται σε λίγο περισσότερο από 90%. (8)

Η δέσμευση CO₂ χρησιμοποιείται ήδη σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Οι ίδιες τεχνολογίες που θα χρησιμοποιούνταν για τη δέσμευση πριν από την καύση χρησιμοποιούνται για τη μεγάλης κλίμακας παραγωγή υδρογόνου (το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή αμμωνίας και λιπασμάτων και για εργασίες διυλιστηρίων πετρελαίου). Ο διαχωρισμός του CO₂ από το ακατέργαστο φυσικό αέριο (το οποίο συνήθως περιέχει σημαντικές ποσότητες CO₂) εφαρμόζεται επίσης σε μεγάλη

¹² IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle

κλίμακα, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για τη δέσμευση μετά την καύση. Αν και εμπορικά συστήματα είναι επίσης διαθέσιμα για μεγάλης κλίμακας διαχωρισμό οξυγόνου, η καύση οξυγόνου για τη δέσμευση CO₂ βρίσκεται επί του παρόντος στη φάση επίδειξης. Επιπλέον, διεξάγεται έρευνα για την επίτευξη υψηλότερων επιπέδων ολοκλήρωσης συστημάτων, αυξημένης απόδοσης και μειωμένου κόστους για όλους τους τύπους συστημάτων σύλληψης. (8)

3.3.1 Δέσμευση CO₂: κίνδυνοι, ενέργεια και περιβάλλον

Η παρακολούθηση, ο κίνδυνος και οι νομικές επιπτώσεις των συστημάτων δέσμευσης CO₂ δεν φαίνεται να παρουσιάζουν θεμελιωδώς νέες προκλήσεις, καθώς αποτελούν όλα στοιχεία τακτικών πρακτικών ελέγχου υγείας, ασφάλειας και περιβάλλοντος στη βιομηχανία. Ωστόσο, τα συστήματα δέσμευσης CO₂ απαιτούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας για τη λειτουργία τους. Αυτό μειώνει την καθαρή απόδοση των εγκαταστάσεων, επομένως οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής απαιτούν περισσότερα καύσιμα για την παραγωγή κάθε κιλοβατώρας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Με βάση μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, η αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου ανά kWh για εγκαταστάσεις που δεσμεύουν 90% CO₂ χρησιμοποιώντας την καλύτερη τρέχουσα τεχνολογία κυμαίνεται από 24–40% για τις νέες υπερκρίσιμες εγκαταστάσεις PC, 11–22% για τις εγκαταστάσεις NGCC και 14–25% για συστήματα IGCC με βάση τον άνθρακα σε σύγκριση με παρόμοιες εγκαταστάσεις χωρίς CCS. Η αυξημένη απαίτηση καυσίμου οδηγεί σε αύξηση των περισσότερων άλλων περιβαλλοντικών εκπομπών ανά kWh που παράγονται σε σχέση με νέες υπερσύγχρονες μονάδες χωρίς δέσμευση CO₂ και, στην περίπτωση του άνθρακα, αναλογικά μεγαλύτερες ποσότητες στερεών αποβλήτων. Επιπλέον, υπάρχει αύξηση στην κατανάλωση χημικών ουσιών όπως η αμμωνία και ο ασβεστόλιθος που χρησιμοποιούνται από εργοστάσια PC για τον έλεγχο των εκπομπών οξειδίου του αζώτου και διοξειδίου του θείου. Οι προηγμένοι σχεδιασμοί εγκαταστάσεων που μειώνουν περαιτέρω τις ενεργειακές απαιτήσεις CCS θα μειώσουν επίσης τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και το κόστος. Σε σύγκριση με πολλές παλαιότερες υπάρχουσες εγκαταστάσεις, πιο αποτελεσματικές νέες ή ανακατασκευασμένες μονάδες με CCS μπορεί να αποφέρουν στην πραγματικότητα καθαρές μειώσεις στις περιβαλλοντικές εκπομπές σε επίπεδο εγκατάστασης. (8)

3.4 Μεταφορά CO₂

Εκτός εάν οι μονάδες παραγωγής βρίσκονται ακριβώς πάνω από μια γεωλογική τοποθεσία αποθήκευσης, το δεσμευμένο CO₂ πρέπει να μεταφέρεται από το σημείο δέσμευσης σε μια τοποθεσία αποθήκευσης. (8)

3.4.1 Μέθοδοι μεταφοράς CO₂

Οι αγωγοί σήμερα λειτουργούν ως μια ώριμη τεχνολογία της αγοράς και είναι η πιο κοινή μέθοδος μεταφοράς CO₂. Το αέριο CO₂ συμπιέζεται συνήθως σε πίεση πάνω από 8 MPa προκειμένου να αποφευχθούν τα καθεστώτα ροής δύο φάσεων και να αυξηθεί η πυκνότητα του CO₂, καθιστώντας έτσι ευκολότερη και λιγότερο δαπανηρή

τη μεταφορά. Το CO₂ μπορεί επίσης να μεταφερθεί ως υγρό σε πλοία, οδικά ή σιδηροδρομικά βυτιοφόρα που μεταφέρουν CO₂ σε μονωμένες δεξαμενές σε θερμοκρασία πολύ χαμηλότερη του περιβάλλοντος και σε πολύ χαμηλότερες πιέσεις.

Ο πρώτος αγωγός CO₂ μεγάλων αποστάσεων τέθηκε σε λειτουργία στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, πάνω από 2.500 km αγωγού μεταφέρουν περισσότερα από 40 MtCO₂ ετησίως από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές, κυρίως σε τοποθεσίες στο Τέξας, όπου το CO₂ χρησιμοποιείται για EOR. Αυτοί οι αγωγοί λειτουργούν σε λειτουργία «πυκνής φάσης» (στην οποία υπάρχει μια συνεχής εξέλιξη από αέριο σε υγρό, χωρίς διακριτή αλλαγή φάσης) και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και υψηλή πίεση. Στους περισσότερους από αυτούς τους αγωγούς, η ροή οδηγείται από συμπίεστες στο ανάντη άκρο, αν και ορισμένοι αγωγοί έχουν ενδιάμεσους (ενισχυτικούς) σταθμούς συμπίεσης. (8)

Σε ορισμένες περιπτώσεις ή τοποθεσίες, η μεταφορά CO₂ με πλοίο μπορεί να είναι οικονομικά πιο ελκυστική, ιδιαίτερα όταν το CO₂ πρέπει να μετακινηθεί σε μεγάλες αποστάσεις ή στο εξωτερικό. Τα υγροποιημένα αέρια πετρελαίου (LPG, κυρίως προπάνιο και βουτάνιο) μεταφέρονται σε μεγάλη εμπορική κλίμακα με θαλάσσια δεξαμενόπλοια. Το CO₂ μπορεί να μεταφερθεί με το πλοίο με τον ίδιο σχεδόν τρόπο (συνήθως σε πίεση 0,7 MPa), αλλά αυτή τη στιγμή πραγματοποιείται σε μικρή κλίμακα λόγω περιορισμένης ζήτησης. Οι ιδιότητες του υγροποιημένου CO₂ είναι παρόμοιες με εκείνες του υγραερίου και η τεχνολογία θα μπορούσε να κλιμακωθεί σε μεγάλους φορείς CO₂ εάν επρόκειτο να υλοποιηθεί η ζήτηση για τέτοια συστήματα. (8)

Τα οδικά και σιδηροδρομικά βυτιοφόρα είναι επίσης τεχνικά εφικτές επιλογές. Αυτά τα συστήματα μεταφέρουν CO₂ σε θερμοκρασία -20°C και σε πίεση 2 MPa. Ωστόσο, είναι αντιοικονομικά σε σύγκριση με αγωγούς και πλοία, εκτός από πολύ μικρή κλίμακα, και είναι απίθανο να σχετίζονται με μεγάλης κλίμακας CCS. (8)

3.4.2 Θέματα περιβάλλοντος, ασφάλειας και κινδύνου

Ακριβώς όπως υπάρχουν πρότυπα για το φυσικό αέριο που γίνονται δεκτά στους αγωγούς, έτσι και ελάχιστα πρότυπα για την «ποιότητα αγωγών» CO₂ θα πρέπει να προκύψουν καθώς η υποδομή του αγωγού CO₂ αναπτύσσεται περαιτέρω. Τα τρέχοντα πρότυπα, που αναπτύχθηκαν σε μεγάλο βαθμό στο πλαίσιο των εφαρμογών EOR, δεν είναι απαραίτητα πανομοιότυπα με αυτά που θα απαιτούνταν για το CCS. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε άζωτο είναι σημαντική για το EOR, αλλά δεν θα ήταν τόσο σημαντική για το CCS. Ωστόσο, ένας αγωγός CO₂ μέσω κατοικημένων περιοχών μπορεί να χρειαστεί χαμηλότερη καθορισμένη μέγιστη περιεκτικότητα σε H₂S. Η μεταφορά CO₂ μέσω αγωγών μέσω κατοικημένων περιοχών απαιτεί επίσης λεπτομερή επιλογή διαδρομής, προστασία από υπερπίεση, ανίχνευση διαρροών και άλλους σχεδιαστικούς παράγοντες. Ωστόσο, δεν προβλέπονται σημαντικά εμπόδια στο σχεδιασμό του αγωγού για CCS. (8)

Το CO₂ θα μπορούσε να διαρρεύσει στην ατμόσφαιρα κατά τη μεταφορά, αν και οι απώλειες διαρροής από τους αγωγούς είναι πολύ μικρές. Το ξηρό (χωρίς υγρασία) CO₂ δεν είναι διαβρωτικό για τους χάλυβες άνθρακα-μαγγανίου που χρησιμοποιούνται συνήθως για αγωγούς, ακόμα κι αν το CO₂ περιέχει ρύπους όπως οξυγόνο, υδρόθειο και οξείδια θείου ή αζώτου. Το φορτωμένο με υγρασία CO₂, από την άλλη πλευρά, είναι εξαιρετικά διαβρωτικό, επομένως ένας αγωγός CO₂ σε αυτή την περίπτωση θα

πρέπει να είναι κατασκευασμένος από κράμα ανθεκτικό στη διάβρωση ή να είναι εσωτερικά επενδυμένος με ένα κράμα ή μια συνεχή επίστρωση πολυμερούς. Ορισμένοι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από κράματα ανθεκτικά στη διάβρωση, αν και το κόστος των υλικών είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από τους χάλυβες άνθρακα-μαγγανίου. Για τα πλοία, οι συνολικές απώλειες στην ατμόσφαιρα είναι μεταξύ 3 και 4% ανά 1000 km, μετρώντας τόσο το boil-off όσο και τα καυσαέρια από τους κινητήρες των πλοίων. Το boil-off θα μπορούσε να μειωθεί με τη σύλληψη και την υγροποίηση και η επανασύλληψη θα μειώσει την απώλεια σε 1 έως 2% ανά 1000 km. (8)

Μπορούν επίσης να συμβούν ατυχήματα. Στην περίπτωση των υφιστάμενων αγωγών CO₂, οι οποίοι είναι ως επί το πλείστον σε περιοχές χαμηλής πυκνότητας πληθυσμού, έχουν αναφερθεί λιγότερα από ένα περιστατικά ετησίως (0,0003 ανά km-έτος) και κανένας τραυματισμός ή θάνατος. Αυτό είναι σύμφωνο με την εμπειρία με τους αγωγούς υδρογονανθράκων και ο αντίκτυπος πιθανότατα δεν θα είναι σοβαρότερος από ό,τι για τα ατυχήματα με φυσικό αέριο. Στις θαλάσσιες μεταφορές, τα δεξαμενόπλοια αερίου υδρογονανθράκων είναι δυνητικά επικίνδυνα, αλλά ο αναγνωρισμένος κίνδυνος έχει οδηγήσει σε πρότυπα σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας και τα σοβαρά περιστατικά είναι σπάνια. (8)

3.5 Αποθήκευση

3.5.1 Γεωλογική αποθήκευση

Αυτή η ενότητα εξετάζει τρεις τύπους γεωλογικών σχηματισμών που έχουν λάβει εκτεταμένη προσοχή για τη γεωλογική αποθήκευση CO₂: δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου, σχηματισμοί βαθιάς άλατος και μη εξορυκτικές κοίτες άνθρακα. Σε κάθε περίπτωση, η γεωλογική αποθήκευση CO₂ επιτυγχάνεται με έγχυση σε πυκνή μορφή σε σχηματισμό βράχου κάτω από την επιφάνεια της γης. Οι πορώδεις σχηματισμοί πετρωμάτων που συγκρατούν ή (όπως στην περίπτωση των εξαντλημένων δεξαμενών πετρελαίου και αερίου) έχουν προηγουμένως συγκρατήσει ρευστά, όπως φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή άλμη, είναι πιθανοί υποψήφιοι για αποθήκευση CO₂. Κατάλληλοι σχηματισμοί αποθήκευσης μπορούν να εμφανιστούν τόσο σε χερσαίες όσο και σε υπεράκτιες ιζηματογενείς λεκάνες (φυσικές κοιλότητες μεγάλης κλίμακας στον φλοιό της γης που είναι γεμάτοι με ιζήματα). Οι κλίνες άνθρακα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση CO₂ όπου είναι απίθανο να εξορυχθεί αργότερα ο άνθρακας και υπό την προϋπόθεση ότι η διαπερατότητα είναι επαρκής. Η επιλογή αποθήκευσης CO₂ σε κοίτες άνθρακα και ενίσχυσης της παραγωγής μεθανίου βρίσκεται ακόμη σε φάση επίδειξης. (8)

3.5.1.1 Τεχνολογία και μηχανισμοί αποθήκευσης

Η έγχυση CO₂ σε βαθιά γεωλογικούς σχηματισμούς περιλαμβάνει πολλές από τις ίδιες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί στη βιομηχανία εξερεύνησης και παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η τεχνολογία γεώτρησης, η τεχνολογία έγχυσης, η προσομοίωση σε υπολογιστή της δυναμικής της δεξαμενής αποθήκευσης και οι μέθοδοι παρακολούθησης από υπάρχουσες εφαρμογές αναπτύσσονται περαιτέρω για το σχεδιασμό και τη λειτουργία της γεωλογικής αποθήκευσης. Άλλες πρακτικές

υπόγειας έγχυσης παρέχουν επίσης σχετική επιχειρησιακή εμπειρία. Συγκεκριμένα, η αποθήκευση φυσικού αερίου, η βαθιά έγχυση υγρών αποβλήτων και η διάθεση όξινων αερίων (μείγματα CO_2 και H_2S) διεξάγονται στον Καναδά και τις ΗΠΑ από το 1990, επίσης σε κλίμακα μεγάλων. (8)

Η αποθήκευση CO_2 σε δεξαμενές υδρογονανθράκων ή σε βαθύς αλατούχους σχηματισμούς αναμένεται γενικά να πραγματοποιείται σε βάθη κάτω των 800 m, όπου οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος συνήθως θα έχουν ως αποτέλεσμα το CO_2 να βρίσκεται σε υγρή ή υπερκρίσιμη κατάσταση. Υπό αυτές τις συνθήκες, η πυκνότητα του CO_2 θα κυμαίνεται από 50 έως 80% της πυκνότητας του νερού. Αυτή είναι κοντά στην πυκνότητα ορισμένων ακατέργαστων λιπαντικών, με αποτέλεσμα δυνάμεις άνωσης που τείνουν να οδηγούν το CO_2 προς τα πάνω. Κατά συνέπεια, ένα καλά σφραγισμένο πέτρωμα καπακιού πάνω από την επιλεγμένη δεξαμενή αποθήκευσης είναι σημαντικό για να διασφαλιστεί ότι το CO_2 παραμένει παγιδευμένο υπόγεια. Όταν εγχέεται υπόγεια, το CO_2 συμπιέζει και γεμίζει το χώρο των πόρων μετατοπίζοντας εν μέρει τα υγρά που υπάρχουν ήδη (τα «in situ υγρά»). Στις δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου, η μετατόπιση των in situ υγρών από το εγχυόμενο CO_2 μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του όγκου των πόρων να είναι διαθέσιμο για αποθήκευση CO_2 . Στους αλατούχους σχηματισμούς, οι εκτιμήσεις για τον δυνητικό όγκο αποθήκευσης είναι χαμηλότερες και κυμαίνονται από ένα μικρό ποσοστό έως και πάνω από 30% του συνολικού όγκου πετρωμάτων. (8)

Μόλις εγχυθεί στον σχηματισμό αποθήκευσης, το κλάσμα που διατηρείται εξαρτάται από έναν συνδυασμό φυσικών και γεωχημικών μηχανισμών παγίδευσης. Η φυσική παγίδευση για την παρεμπόδιση της ανοδικής μετανάστευσης του CO_2 παρέχεται από ένα στρώμα σχιστόλιθου και αργίλου πάνω από τον σχηματισμό αποθήκευσης. Αυτό το αδιαπέραστο στρώμα είναι γνωστό ως "βράχος καπακιού". Πρόσθετη φυσική παγίδευση μπορεί να παρέχεται από τριχοειδείς δυνάμεις που συγκρατούν το CO_2 στους χώρους πόρων του σχηματισμού. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, μία ή περισσότερες πλευρές του σχηματισμού παραμένουν ανοιχτές, επιτρέποντας την πλευρική μετανάστευση του CO_2 κάτω από το βράχο του καπακιού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, πρόσθετοι μηχανισμοί είναι σημαντικοί για τη μακροπρόθεσμη παγίδευση του εγχυόμενου CO_2 . (8)

Ο μηχανισμός που είναι γνωστός ως γεωχημική παγίδευση συμβαίνει καθώς το CO_2 αντιδρά με τα in situ ρευστά και το πέτρωμα ξενιστή. Πρώτον, το CO_2 διαλύεται στο in situ νερό. Μόλις συμβεί αυτό (με την πάροδο του χρόνου σε κλίμακες εκατοντάδων ετών έως χιλιάδων ετών), το φορτωμένο με CO_2 νερό γίνεται πιο πυκνό και επομένως βυθίζεται στον σχηματισμό (αντί να ανεβαίνει προς την επιφάνεια). Στη συνέχεια, οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του διαλυμένου CO_2 και των ορυκτών πετρωμάτων σχηματίζουν ιοντικά είδη, έτσι ώστε ένα κλάσμα του εγχυόμενου CO_2 θα μετατραπεί σε στερεά ανθρακικά ορυκτά για εκατομμύρια χρόνια. (8)

Ένας άλλος τύπος παγίδευσης συμβαίνει όταν το CO_2 προσροφάται κατά προτίμηση σε άνθρακα ή σχιστόλιθους πλούσιους σε οργανικά, αντικαθιστώντας αέρια όπως το μεθάνιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το CO_2 θα παραμείνει παγιδευμένο όσο οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες παραμένουν σταθερές. Αυτές οι διεργασίες θα πραγματοποιούνταν κανονικά σε μικρότερα βάθη από την αποθήκευση CO_2 σε δεξαμενές υδρογονανθράκων και σχηματισμούς αλατούχου διαλύματος. (8)

3.5.1.2 Γεωγραφική κατανομή και χωρητικότητα αποθηκευτικών χώρων

Περιοχές με ιζηματογενείς λεκάνες που είναι δυνητικά κατάλληλες για αποθήκευση CO₂ υπάρχουν σε όλο τον κόσμο, τόσο στην ξηρά όσο και στην υπεράκτια. Αυτή η έκθεση επικεντρώνεται σε ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, βαθύς αλατούχους σχηματισμούς και μη εξορυκτικά κοιτές άνθρακα. Άλλοι πιθανοί γεωλογικοί σχηματισμοί ή δομές (όπως βασάλτες, σχιστόλιθοι πετρελαίου ή φυσικού αερίου, σπήλαια αλατιού και εγκαταλελειμμένα ορυχεία) αντιπροσωπεύουν εξειδικευμένες ευκαιρίες ή έχουν μελετηθεί ανεπαρκώς αυτή τη στιγμή για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων τους. (8)

Οι εκτιμήσεις και τα επίπεδα εμπιστοσύνης βασίζονται σε μια αξιολόγηση της βιβλιογραφίας, τόσο των περιφερειακών εκτιμήσεων από κάτω προς τα πάνω όσο και των παγκόσμιων εκτιμήσεων από πάνω προς τα κάτω. Δεν υπάρχει πιθανολογική προσέγγιση για την αξιολόγηση των εκτιμήσεων χωρητικότητας στη βιβλιογραφία, και αυτό θα απαιτούνταν για να ποσοτικοποιηθούν τα επίπεδα αβεβαιότητας με αξιοπιστία. Οι συνολικές εκτιμήσεις, ιδιαίτερα του ανώτατου ορίου του δυναμικού, ποικίλλουν ευρέως και περιλαμβάνουν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, αντανakλώντας αντικρουόμενες μεθοδολογίες στη βιβλιογραφία και το γεγονός ότι οι γνώσεις μας για τους σχηματισμούς αλατούχου είναι αρκετά περιορισμένες στα περισσότερα μέρη του κόσμου. Για τις δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου, είναι διαθέσιμες καλύτερες εκτιμήσεις που βασίζονται στην αντικατάσταση των όγκων υδρογονανθράκων με όγκους CO₂. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, με εξαίρεση την EOR, αυτές οι δεξαμενές δεν θα είναι διαθέσιμες για αποθήκευση CO₂ έως ότου εξαντληθούν οι υδρογονάνθρακες και ότι οι αλλαγές πίεσης και οι γεωμηχανικές επιπτώσεις λόγω της παραγωγής υδρογονανθράκων στη δεξαμενή ενδέχεται να μειώσουν την πραγματική χωρητικότητα. (8)

Ένας άλλος τρόπος εξέτασης του δυναμικού αποθήκευσης, ωστόσο, είναι να αναρωτηθεί κανείς εάν είναι πιθανό να είναι επαρκές για τις ποσότητες CO₂ που θα πρέπει να αποφευχθούν με χρήση CCS σε διαφορετικά σενάρια σταθεροποίησης αερίων θερμοκηπίου και υποθέσεις σχετικά με την ανάπτυξη άλλων επιλογών μετριασμού. Το εκτιμώμενο εύρος οικονομικών δυνατοτήτων για CCS τον επόμενο αιώνα είναι περίπου 200 έως 2000 GtCO₂. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι υπάρχουν 200 GtCO₂ χωρητικότητας γεωλογικής αποθήκευσης και πιθανόν ότι υπάρχουν τουλάχιστον περίπου 2000 GtCO₂. (8)

3.5.1.3 Κριτήρια και μέθοδοι επιλογής τοποθεσίας

Ο χαρακτηρισμός της τοποθεσίας, η επιλογή και η πρόβλεψη απόδοσης είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή γεωλογική αποθήκευση. Πριν από την επιλογή μιας τοποθεσίας, η γεωλογική ρύθμιση πρέπει να χαρακτηριστεί για να προσδιοριστεί εάν ο υπερκείμενος βράχος του καλύμματος θα παρέχει αποτελεσματική σφράγιση, εάν υπάρχει επαρκώς ογκώδης και διαπερατός σχηματισμός αποθήκευσης και εάν τυχόν εγκαταλελειμμένα ή ενεργά φρεάτια θα θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα της σφράγισης. (8)

Οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν για την εξερεύνηση δεξαμενών πετρελαίου και φυσικού αερίου, τοποθεσιών αποθήκευσης φυσικού αερίου και τοποθεσιών διάθεσης

υγρών αποβλήτων είναι κατάλληλες για τον χαρακτηρισμό των γεωλογικών χώρων αποθήκευσης CO₂. Παραδείγματα περιλαμβάνουν σεισμική απεικόνιση, δοκιμές άντλησης για την αξιολόγηση σχηματισμών αποθήκευσης και σφραγίδων και κορμούς ακεραιότητας τσιμέντου. Προγράμματα υπολογιστών που μοντελοποιούν την υπόγεια κίνηση CO₂ χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη δραστηριοτήτων χαρακτηρισμού και επιλογής τοποθεσίας. Αυτά τα προγράμματα αναπτύχθηκαν αρχικά για εφαρμογές όπως η μηχανική δεξαμενών πετρελαίου και φυσικού αερίου και οι έρευνες για τους υπόγειους υδάτινους πόρους. Αν και περιλαμβάνουν πολλές από τις φυσικές, χημικές και γεωμηχανικές διεργασίες που απαιτούνται για την πρόβλεψη τόσο της βραχυπρόθεσμης όσο και της μακροπρόθεσμης απόδοσης της αποθήκευσης CO₂, απαιτείται περισσότερη εμπειρία για να εδραιωθεί η εμπιστοσύνη στην αποτελεσματικότητά τους στην πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης απόδοσης όταν προσαρμόζονται για αποθήκευση CO₂. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα καλών δεδομένων χαρακτηρισμού τοποθεσίας είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία των μοντέλων. (8)

3.5.1.4 Εκτίμηση κινδύνου και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι κίνδυνοι λόγω διαρροής από την αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς ταμιευτήρες εμπίπτουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: παγκόσμιους κινδύνους και τοπικούς κινδύνους. Οι παγκόσμιοι κίνδυνοι περιλαμβάνουν την απελευθέρωση CO₂ που μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην κλιματική αλλαγή εάν κάποιο κλάσμα διαρρεύσει από τον σχηματισμό αποθήκευσης στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, εάν διαρρεύσει CO₂ από έναν σχηματισμό αποθήκευσης, ενδέχεται να υπάρχουν τοπικοί κίνδυνοι για τον άνθρωπο, τα οικοσυστήματα και τα υπόγεια ύδατα. Αυτοί είναι οι τοπικοί κίνδυνοι. (8)

Όσον αφορά τους παγκόσμιους κινδύνους, με βάση τις παρατηρήσεις και την ανάλυση των σημερινών τόπων αποθήκευσης CO₂, φυσικών συστημάτων, μηχανικών συστημάτων και μοντέλων, το κλάσμα που διατηρείται σε κατάλληλα επιλεγμένους και διαχειριζόμενους ταμιευτήρες είναι πολύ πιθανό να υπερβεί το 99% σε 100 χρόνια και είναι πιθανό να υπερβεί το 99% σε 1000 χρόνια. Παρόμοια κλάσματα που διατηρούνται είναι πιθανό για ακόμη μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, καθώς ο κίνδυνος διαρροής αναμένεται να μειωθεί με την πάροδο του χρόνου καθώς άλλοι μηχανισμοί παρέχουν πρόσθετη παγίδευση. (8)

Όσον αφορά τους τοπικούς κινδύνους, υπάρχουν δύο τύποι σεναρίων στα οποία μπορεί να προκύψει διαρροή. Στην πρώτη περίπτωση, αστοχίες στο φρεάτιο έγχυσης ή διαρροή σε εγκαταλελειμμένα φρεάτια θα μπορούσαν να δημιουργήσουν μια ξαφνική και ταχεία απελευθέρωση CO₂. Αυτός ο τύπος απελευθέρωσης είναι πιθανό να ανιχνευθεί γρήγορα και να σταματήσει να χρησιμοποιεί τεχνικές που είναι διαθέσιμες σήμερα για τον περιορισμό των εκρήξεων πηγαδιού. Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με αυτόν τον τύπο απελευθέρωσης επηρεάζουν κυρίως τους εργαζόμενους που βρίσκονται κοντά στην απελευθέρωση τη στιγμή που συμβαίνει ή αυτούς που καλούνται να ελέγξουν την έκρηξη. Μια συγκέντρωση CO₂ μεγαλύτερη από 7–10% στον αέρα θα προκαλούσε άμεσους κινδύνους για τη ζωή και την υγεία του ανθρώπου. Η περιεκτικότητα αυτού του είδους εκλύσεων μπορεί να διαρκέσει ώρες έως ημέρες και η συνολική ποσότητα CO₂ που απελευθερώνεται είναι πιθανό να είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με τη συνολική ποσότητα που εγχύεται. Αυτοί οι τύποι κινδύνων

αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά σε τακτική βάση στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου χρησιμοποιώντας μηχανικούς και διοικητικούς ελέγχους. (8)

Στο δεύτερο σενάριο, η διαρροή θα μπορούσε να συμβεί μέσω μη ανιχνευμένων σφαλμάτων, θραυσμάτων ή μέσω διαρροών φρεατίων όπου η απελευθέρωση στην επιφάνεια είναι πιο σταδιακή και διάχυτη. Σε αυτήν την περίπτωση, οι κίνδυνοι επηρεάζουν κυρίως τους υδροφορείς και τα οικοσυστήματα πόσιμου νερού όπου το CO₂ συσσωρεύεται στη ζώνη μεταξύ της επιφάνειας και της κορυφής του υδροφόρου ορίζοντα. Τα υπόγεια ύδατα μπορούν να επηρεαστούν τόσο από τη διαρροή CO₂ απευθείας σε έναν υδροφόρο ορίζοντα όσο και από τις άλμης που εισέρχονται στον υδροφόρο ορίζοντα ως αποτέλεσμα της εκτόπισής τους από το CO₂ κατά τη διαδικασία έγχυσης. Μπορεί επίσης να υπάρξει οξίνιση των εδαφών και μετατόπιση οξυγόνου στα εδάφη σε αυτό το σενάριο. Επιπλέον, εάν επρόκειτο να συμβεί διαρροή στην ατμόσφαιρα σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο με ελάχιστο άνεμο ή σε φρεάτια και υπόγεια που επικαλύπτουν αυτές τις διάχυτες διαρροές, οι άνθρωποι και τα ζώα θα βλάπτονταν εάν μια διαρροή παρέμενε απαρατήρητη. Οι άνθρωποι θα επηρεάζονταν λιγότερο από διαρροές από υπεράκτιες τοποθεσίες αποθήκευσης παρά από χερσαίες τοποθεσίες αποθήκευσης. Οι οδοί διαρροής μπορούν να εντοπιστούν με διάφορες τεχνικές και με χαρακτηρισμό της δεξαμενής. (8)

Ο προσεκτικός σχεδιασμός και η τοποθέτηση του συστήματος αποθήκευσης, μαζί με μεθόδους για την έγκαιρη ανίχνευση της διαρροής (κατά προτίμηση πολύ πριν φτάσει το CO₂ στην επιφάνεια της γης), είναι αποτελεσματικοί τρόποι μείωσης των κινδύνων που σχετίζονται με τη διάχυτη διαρροή. Οι διαθέσιμες μέθοδοι παρακολούθησης είναι ελπιδοφόρες, αλλά απαιτείται περισσότερη εμπειρία για τον καθορισμό των επιπέδων ανίχνευσης και ανάλυσης. Μόλις εντοπιστούν διαρροές, υπάρχουν διαθέσιμες κάποιες τεχνικές αποκατάστασης για να τις σταματήσουν ή να τις ελέγξουν. Ανάλογα με τον τύπο της διαρροής, αυτές οι τεχνικές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τυπικές τεχνικές επισκευής φρεατίων ή την εξόρυξη CO₂ παρεμποδίζοντας τη διαρροή του σε έναν ρηχό υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Τεχνικές για την απομάκρυνση του CO₂ από το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα είναι επίσης διαθέσιμες, αλλά είναι πιθανό να είναι δαπανηρές. Θα χρειαστεί εμπειρία για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα και να εξακριβωθεί το κόστος αυτών των τεχνικών για χρήση στην αποθήκευση CO₂. (8)

3.5.2 Ωκεάνια αποθήκευση

Μια πιθανή επιλογή αποθήκευσης CO₂ είναι η έγχυση του δεσμευμένου CO₂ απευθείας στον ωκεανό (σε βάθη μεγαλύτερα από 1.000 m), όπου το μεγαλύτερο μέρος του θα ήταν απομονωμένο από την ατμόσφαιρα για αιώνες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη μεταφορά CO₂ μέσω αγωγών ή πλοίων σε χώρο αποθήκευσης ωκεανών, όπου εγχέεται στη στήλη νερού του ωκεανού ή στον πυθμένα της θάλασσας. Το διαλυμένο και διεσπαρμένο CO₂ θα γίνει στη συνέχεια μέρος του παγκόσμιου κύκλου του άνθρακα. Η αποθήκευση των ωκεανών δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί ή αποδειχθεί σε πιλοτική κλίμακα και βρίσκεται ακόμη σε ερευνητική φάση. Ωστόσο, υπήρξαν μικρής κλίμακας πειράματα πεδίου και 25 χρόνια θεωρητικών, εργαστηριακών μελετών και μελετών μοντελοποίησης σκόπιμης αποθήκευσης CO₂ στους ωκεανούς. (8)

3.5.2.1 Μηχανισμοί και τεχνολογία αποθήκευσης

Οι ωκεανοί καλύπτουν πάνω από το 70% της επιφάνειας της γης και το μέσο βάθος τους είναι 3.800 μέτρα. Επειδή το διοξείδιο του άνθρακα είναι διαλυτό στο νερό, υπάρχουν φυσικές ανταλλαγές CO₂ μεταξύ της ατμόσφαιρας και των υδάτων στην επιφάνεια του ωκεανού που συμβαίνουν μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία. Εάν η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του CO₂ αυξηθεί, ο ωκεανός θα απορροφήσει σταδιακά επιπλέον CO₂. Με αυτόν τον τρόπο, οι ωκεανοί έχουν απορροφήσει περίπου 500 GtCO₂ (140 GtC) από τα συνολικά 1.300 GtCO₂ (350 GtC) ανθρωπογενών εκπομπών που απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 200 χρόνια. Ως αποτέλεσμα των αυξημένων ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων CO₂ από τις ανθρώπινες δραστηριότητες σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, οι ωκεανοί προσλαμβάνουν επί του παρόντος CO₂ με ρυθμό περίπου 7 GtCO₂ yr⁻¹ (2 GtC yr⁻¹). (8)

Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του διοξειδίου του άνθρακα βρίσκεται τώρα στον άνω ωκεανό και μέχρι στιγμής έχει οδηγήσει σε μείωση του pH περίπου 0,1 στην επιφάνεια του ωκεανού λόγω της όξινης φύσης του CO₂ στο νερό. Μέχρι σήμερα, ωστόσο, δεν έχει υπάρξει ουσιαστικά καμία αλλαγή στο pH στα βαθιά του ωκεανού. Τα μοντέλα προβλέπουν ότι τους επόμενους αρκετούς αιώνες οι ωκεανοί θα πάρουν τελικά το μεγαλύτερο μέρος του CO₂ που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα καθώς το CO₂ διαλύεται στην επιφάνεια του ωκεανού και στη συνέχεια αναμιγνύεται με βαθιά ωκεάνια νερά. (8)

Δεν υπάρχει πρακτικό φυσικό όριο στην ποσότητα του ανθρωπογενούς CO₂ που θα μπορούσε να αποθηκευτεί στον ωκεανό. Ωστόσο, σε μια χιλιετία χρονική κλίμακα, η ποσότητα που αποθηκεύεται θα εξαρτηθεί από την ωκεάνια ισορροπία με την ατμόσφαιρα. Η σταθεροποίηση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων CO₂ μεταξύ 350 ppmv και 1000 ppmv θα υπονοούσε ότι μεταξύ 2.000 και 12.000 GtCO₂ θα διέμεναν τελικά στον ωκεανό εάν δεν υπάρχει σκόπιμη έγχυση CO₂. Αυτό το εύρος επομένως αντιπροσωπεύει το ανώτατο όριο για την ικανότητα του ωκεανού να αποθηκεύει CO₂ μέσω ενεργού έγχυσης. Η χωρητικότητα θα επηρεαστεί επίσης από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η μέγιστη επιτρεπόμενη αλλαγή του pH. (8)

Η ανάλυση των παρατηρήσεων και των μοντέλων των ωκεανών δείχνει ότι το CO₂ που εγχέεται θα απομονωθεί από την ατμόσφαιρα για τουλάχιστον αρκετές εκατοντάδες χρόνια και ότι το κλάσμα που διατηρείται τείνει να είναι υψηλότερο με βαθύτερη έγχυση. Οι ιδέες για την αύξηση του κλάσματος που κατακρατείται περιλαμβάνουν το σχηματισμό στερεών ένυδρων CO₂ και/ή υγρών λιμνών CO₂ στον πυθμένα της θάλασσας και τη διάλυση αλκαλικών ορυκτών όπως ο ασβεστόλιθος για την εξουδετέρωση του όξινου CO₂. Η διάλυση ορυκτών ανθρακικών αλάτων, εάν είναι πρακτική, θα μπορούσε να επεκτείνει τη χρονική κλίμακα αποθήκευσης σε περίπου 10.000 χρόνια, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις αλλαγές στο pH των ωκεανών και τη μερική πίεση του CO₂. Ωστόσο, μεγάλες ποσότητες ασβεστόλιθου και ενέργειας για το χειρισμό υλικών θα απαιτηθούν για αυτήν την προσέγγιση (περίπου η ίδια τάξη μεγέθους με τις ποσότητες ανά τόνο εγχυόμενου CO₂ που απαιτούνται για την ενανθράκωση ορυκτών). (8)

3.5.2.2 Οικολογικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κίνδυνοι

Η έγχυση λίγων GtCO_2 θα παρήγαγε μια μετρήσιμη αλλαγή στη χημεία των ωκεανών στην περιοχή της έγχυσης, ενώ η έγχυση εκατοντάδων GtCO_2 θα προκαλούσε μεγαλύτερες αλλαγές στην περιοχή της έγχυσης και τελικά θα προκαλούσε μετρήσιμες αλλαγές σε ολόκληρο τον όγκο του ωκεανού. Προσομοιώσεις μοντέλων που προϋποθέτουν απελευθέρωση από επτά τοποθεσίες σε βάθος 3.000 m και αποθήκευση ωκεανών που παρέχουν το 10% της προσπάθειας μετριασμού για σταθεροποίηση στα 550 ppmv CO_2 προβλεπόμενες αλλαγές οξύτητας (μεταβολές pH) άνω του 0,4 σε περίπου 1% του όγκου του ωκεανού. Συγκριτικά, σε μια περίπτωση σταθεροποίησης 550 ppmv χωρίς αποθήκευση ωκεανού, υπολογίστηκε μια αλλαγή pH μεγαλύτερη από 0,25 στην επιφάνεια του ωκεανού λόγω της εξισορρόπησης με τις αυξημένες συγκεντρώσεις CO_2 στην ατμόσφαιρα. Και στις δύο περιπτώσεις, μια αλλαγή του pH από 0,2 έως 0,4 είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις προβιομηχανικές διακυμάνσεις στην οξύτητα των ωκεανών. Με την πάροδο των αιώνων, η ανάμειξη των ωκεανών θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της απομόνωσης του εγχύμενου CO_2 . Καθώς περισσότερο CO_2 φθάνει στα επιφανειακά ύδατα του ωκεανού, οι εκλύσεις στην ατμόσφαιρα θα συμβούν σταδιακά από μεγάλες περιοχές του ωκεανού. Δεν υπάρχουν γνωστοί μηχανισμοί για ξαφνική ή καταστροφική απελευθέρωση CO_2 που εγχέεται από τον ωκεανό στην ατμόσφαιρα. (8)

Τα πειράματα δείχνουν ότι η προσθήκη CO_2 μπορεί να βλάψει τους θαλάσσιους οργανισμούς. Οι επιδράσεις των αυξημένων επιπέδων CO_2 έχουν ως επί το πλείστον μελετηθεί σε χρονικές κλίμακες έως και αρκετούς μήνες σε μεμονωμένους οργανισμούς που ζουν κοντά στην επιφάνεια του ωκεανού. Τα παρατηρούμενα φαινόμενα περιλαμβάνουν μειωμένους ρυθμούς ασβεστοποίησης, αναπαραγωγής, ανάπτυξης, παροχής οξυγόνου στο κυκλοφορικό και κινητικότητας, καθώς και αυξημένη θνησιμότητα με την πάροδο του χρόνου. Σε ορισμένους οργανισμούς αυτές οι επιδράσεις παρατηρούνται ως απόκριση σε μικρές προσθήκες CO_2 . Αναμένεται άμεση θνησιμότητα κοντά σε σημεία έγχυσης ή λίμνες CO_2 . Οι χρόνιες επιπτώσεις της άμεσης έγχυσης CO_2 στον ωκεανό σε ωκεάνιους οργανισμούς ή οικοσυστήματα σε μεγάλες ωκεάνιες περιοχές και μεγάλες χρονικές κλίμακες δεν έχουν ακόμη μελετηθεί. (8)

Δεν έχουν πραγματοποιηθεί ελεγχόμενα πειράματα οικοσυστήματος στα βαθιά του ωκεανού, επομένως μπορεί να δοθεί μόνο μια προκαταρκτική αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων στο οικοσύστημα. Αναμένεται ότι οι συνέπειες του οικοσυστήματος θα αυξηθούν με την αύξηση των συγκεντρώσεων CO_2 και τη μείωση του pH, αλλά η φύση τέτοιων συνεπειών δεν είναι προς το παρόν κατανοητή και δεν έχουν ακόμη προσδιοριστεί περιβαλλοντικά κριτήρια για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων. Επί του παρόντος, δεν είναι επίσης σαφές πώς ή εάν τα είδη και τα οικοσυστήματα θα προσαρμοστούν στις συνεχείς χημικές αλλαγές. (8)

3.6 Ανθράκωση ορυκτών και βιομηχανικές χρήσεις

Αυτή η ενότητα ασχολείται με δύο μάλλον διαφορετικές επιλογές αποθήκευσης CO_2 . Το πρώτο είναι η ανθράκωση ορυκτών, η οποία περιλαμβάνει τη μετατροπή του

CO₂ σε στερεά ανόργανα ανθρακικά άλατα χρησιμοποιώντας χημικές αντιδράσεις. Η δεύτερη επιλογή είναι η βιομηχανική χρήση του CO₂, είτε άμεσα είτε ως πρώτη ύλη για την παραγωγή διαφόρων χημικών ουσιών που περιέχουν άνθρακα. (8)

3.6.1 Ανθράκωση ορυκτών: τεχνολογία, επιπτώσεις

Η ανθράκωση ορυκτών αναφέρεται στη στερέωση του CO₂ με τη χρήση οξειδίων αλκαλικών και αλκαλικών γαιών, όπως το οξείδιο του μαγνησίου (MgO) και το οξείδιο του ασβεστίου (CaO), τα οποία υπάρχουν σε φυσικά απαντώμενα πυριτικά πετρώματα όπως η σερπεντίνη και η ολιβίνη. Οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ αυτών των υλικών και του CO₂ παράγουν ενώσεις όπως το ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO₃) και το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃, κοινώς γνωστό ως ασβεστόλιθος). Η ποσότητα των οξειδίων μετάλλων στα πυριτικά πετρώματα που μπορεί να βρεθεί στον φλοιό της γης υπερβαίνει τις ποσότητες που απαιτούνται για να σταθεροποιηθεί όλο το CO₂ που θα παραγόταν από την καύση όλων των διαθέσιμων αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. Αυτά τα οξείδια υπάρχουν επίσης σε μικρές ποσότητες σε ορισμένα βιομηχανικά απόβλητα, όπως οι σκωρίες και η τέφρα από ανοξείδωτο χάλυβα. Η ανθράκωση ορυκτών παράγει πυρίτιο και ανθρακικά άλατα που είναι σταθερά σε μεγάλες χρονικές κλίμακες και επομένως μπορούν να απορριφθούν σε περιοχές όπως ορυχεία πυριτίου ή να επαναχρησιμοποιηθούν για κατασκευαστικούς σκοπούς, αν και αυτή η επαναχρησιμοποίηση είναι πιθανό να είναι μικρή σε σχέση με τις παραγόμενες ποσότητες. Μετά την ανθράκωση, το CO₂ δεν θα απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Κατά συνέπεια, θα υπήρχε μικρή ανάγκη παρακολούθησης των χώρων διάθεσης και οι σχετικοί κίνδυνοι θα ήταν πολύ χαμηλοί. Το δυναμικό αποθήκευσης είναι δύσκολο να εκτιμηθεί σε αυτήν την πρώιμη φάση ανάπτυξης. Θα περιοριζόταν από το κλάσμα των αποθεμάτων πυριτικού που μπορούν να αξιοποιηθούν τεχνικά, από περιβαλλοντικά ζητήματα όπως ο όγκος της διάθεσης του προϊόντος και από νομικούς και κοινωνικούς περιορισμούς στην τοποθεσία αποθήκευσης. (8)

Η διαδικασία της ανθράκωσης ορυκτών συμβαίνει φυσικά, όπου είναι γνωστή ως «καιρικές συνθήκες». Στη φύση, η διαδικασία συμβαίνει πολύ αργά. Πρέπει επομένως να επιταχυνθεί σημαντικά για να είναι μια βιώσιμη μέθοδος αποθήκευσης του CO₂ που δεσμεύεται από ανθρωπογενείς πηγές. Συνεπώς, η έρευνα στον τομέα της ανθράκωσης ορυκτών επικεντρώνεται στην εύρεση οδών διεργασίας που μπορούν να επιτύχουν ρυθμούς αντίδρασης βιώσιμους για βιομηχανικούς σκοπούς και να κάνουν την αντίδραση πιο ενεργειακά αποδοτική. Η τεχνολογία ανθράκωσης ορυκτών με χρήση φυσικών πυριτικών αλάτων βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας, αλλά ορισμένες διεργασίες που χρησιμοποιούν βιομηχανικά απόβλητα βρίσκονται σε φάση επίδειξης. (8)

3.6.2 Βιομηχανικές χρήσεις (CCUS)

Οι βιομηχανικές χρήσεις του CO₂ περιλαμβάνουν χημικές και βιολογικές διεργασίες όπου το CO₂ είναι ένα αντιδραστήριο, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ουρίας και μεθανόλης, καθώς και διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν απευθείας CO₂, για παράδειγμα στη βιομηχανία κηπευτικών, ψύξη, συσκευασία τροφίμων, συγκόλληση, ποτά και πυροσβεστήρες. Επί του παρόντος, το

CO₂ χρησιμοποιείται με ρυθμό περίπου 120 MtCO₂ ετησίως (30 MtC έτος⁻¹) παγκοσμίως, εξαιρουμένης της χρήσης για EOR. Το μεγαλύτερο μέρος (τα δύο τρίτα του συνόλου) χρησιμοποιείται για την παραγωγή ουρίας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή λιπασμάτων και άλλων προϊόντων. Μέρος του CO₂ εξάγεται από φυσικά πηγάδια και κάποιο άλλο προέρχεται από βιομηχανικές πηγές –κυρίως πηγές υψηλής συγκέντρωσης όπως μονάδες παραγωγής αμμωνίας και υδρογόνου– που δεσμεύουν το CO₂ ως μέρος της παραγωγικής διαδικασίας. (8)

Οι βιομηχανικές χρήσεις του CO₂ μπορούν, κατ' αρχήν, να συμβάλουν στη διατήρηση του CO₂ μακριά από την ατμόσφαιρα αποθηκεύοντάς το στη «χημική δεξαμενή άνθρακα» (δηλαδή, στο απόθεμα των παραγόμενων προϊόντων που περιέχουν άνθρακα). Ωστόσο, ως μέτρο για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, αυτή η επιλογή έχει νόημα μόνο εάν η ποσότητα και η διάρκεια του αποθηκευμένου CO₂ είναι σημαντικές και εάν υπάρχει πραγματική καθαρή μείωση των εκπομπών CO₂. Η τυπική διάρκεια ζωής του μεγαλύτερου μέρους του CO₂ που χρησιμοποιείται επί του παρόντος από βιομηχανικές διεργασίες έχει χρόνους αποθήκευσης μόνο από ημέρες έως μήνες. Ο αποθηκευμένος άνθρακας στη συνέχεια αποικοδομείται σε CO₂ και εκπέμπεται ξανά στην ατμόσφαιρα. Τέτοιες σύντομες χρονικές κλίμακες δεν συμβάλλουν ουσιαστικά στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, ο αριθμός της συνολικής βιομηχανικής χρήσης των 120 MtCO₂ ετησίως είναι μικρός σε σύγκριση με τις εκπομπές από μεγάλες ανθρωπογενείς πηγές. Ενώ ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες αποθηκεύουν ένα μικρό ποσοστό CO₂ (συνολικά περίπου 20 MtCO₂ yr⁻¹) για έως και αρκετές δεκαετίες, η συνολική ποσότητα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης (κλίμακας αιώνα) είναι επί του παρόντος της τάξης του 1 MtCO₂ yr⁻¹ ή λιγότερο, χωρίς προοπτικές για σημαντικές αυξήσεις. (8)

Ένα άλλο σημαντικό ερώτημα είναι εάν οι βιομηχανικές χρήσεις του CO₂ μπορούν να οδηγήσουν σε συνολική καθαρή μείωση των εκπομπών CO₂ με υποκατάσταση άλλων βιομηχανικών διεργασιών ή προϊόντων. Αυτό μπορεί να αξιολογηθεί σωστά μόνο με την εξέταση των κατάλληλων ορίων του συστήματος για τα ισοζύγια ενέργειας και υλικών των διαδικασιών χρήσης CO₂ και με τη διεξαγωγή λεπτομερούς ανάλυσης κύκλου ζωής της προτεινόμενης χρήσης του CO₂. Η βιβλιογραφία σε αυτόν τον τομέα είναι περιορισμένη, αλλά δείχνει ότι τα ακριβή στοιχεία είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και ότι σε πολλές περιπτώσεις οι βιομηχανικές χρήσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αύξηση των συνολικών εκπομπών παρά σε καθαρή μείωση. Λόγω του χαμηλού κλάσματος CO₂ που κατακρατείται, των μικρών όγκων που χρησιμοποιούνται και της πιθανότητας η υποκατάσταση να οδηγήσει σε αυξήσεις στις εκπομπές CO₂, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η συμβολή των βιομηχανικών χρήσεων του δεσμευμένου CO₂ στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να είναι μικρή. (8)

4. Διεθνής συμφωνίες και συμβάσεις

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα ακόλουθα:

- Στο Πρωτόκολλο του Λονδίνου (1996)
- Στη σύμβαση OSPAR (1992)
- Στο Πρωτόκολλο του Κιότο (1997)
- Στις οδηγίες της IPCC (2006)
- Στη συμφωνία του Παρισιού (2015)

Τα παραπάνω έχουν να κάνουν με αποφάσεις για την προστασία του περιβάλλοντος καθώς και την CCS.

4.2 Το Πρωτόκολλο του Λονδίνου

Η Σύμβαση του Λονδίνου (1972) και το Πρωτόκολλο του Λονδίνου (1996) είναι οι παγκόσμιες συμφωνίες που ρυθμίζουν την απόρριψη αποβλήτων στη θάλασσα (δηλαδή όλα τα θαλάσσια ύδατα εκτός από τα εσωτερικά ύδατα των κρατών, καθώς και τον βυθό και το υπέδαφός τους). Η Σύμβαση αποτελείται από 87 χώρες και το Πρωτόκολλο έχει 45 χώρες (από τον Νοέμβριο του 2014). Το Πρωτόκολλο είναι μια ενημερωμένη και πιο αυστηρή έκδοση της Σύμβασης. Η γραμματεία της Σύμβασης του Λονδίνου και του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου παρέχεται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO¹³). Το Πρωτόκολλο του Λονδίνου επικυρώθηκε από αρκετές χώρες, ώστε να τεθεί σε ισχύ τον Μάρτιο του 2006 και προορίζεται να αντικαταστήσει τελικά τη Σύμβαση. Το Πρωτόκολλο απαγορεύει την απόρριψη όλων των αποβλήτων ή άλλων υλικών στη θάλασσα ή την αποθήκευση στο βυθό και το υπέδαφος της θάλασσας, εκτός από αυτά που καθορίζονται στο Παράρτημα 1 του, και αυτά απαιτούν άδεια και ρύθμιση. Παραδείγματα απορριμμάτων ή άλλου υλικού που μπορεί να απορριφθεί περιλαμβάνουν βυθοκόρηση, απόβλητα ψαριών και αδρανές γεωλογικό υλικό. Ωστόσο, φάνηκε ότι το Πρωτόκολλο, επειδή περιλάμβανε τον υποθαλάσσιο βυθό στο πεδίο εφαρμογής του, θα μπορούσε να απαγορεύσει την αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς σε διάφορα σενάρια έργων CCS, συμπεριλαμβανομένου του CO₂ από μια χερσαία πηγή σε μια υπεράκτια πλατφόρμα για έγχυση σε γεωλογικό σχηματισμό υποθαλάσσιου βυθού. Να σημειωθεί ότι το ντάμπινγκ δεν περιλαμβάνει την τοποθέτηση της ύλης για άλλο σκοπό εκτός από την απλή διάθεση, πράγμα που σημαίνει ότι η έγχυση CO₂ για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (και η φυσική του κατακράτηση στο υπέδαφος) δεν εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής και επομένως δεν καλύπτεται από αυτές τις απαγορεύσεις. Το 2004, ιδρύθηκε μια Νομική Ομάδα

Εργασίας για το CO₂ για να διευκρινίσει το ζήτημα, σε διαβούλευση με όλα τα Μέρη της Σύμβασης του Λονδίνου. Το συμπέρασμα αυτής της Ομάδας Εργασίας ήταν ότι υπήρχε πρόβλημα για το CCS επειδή υπήρχε αβεβαιότητα με διαφορετικές νομικές ερμηνείες σε διαφορετικές πτυχές του ζητήματος. (9)

Το 2004, η Επιστημονική Ομάδα της Σύμβασης και του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου ανέλαβε να αξιολογήσει τους πιθανούς κινδύνους και τα οφέλη για το θαλάσσιο περιβάλλον του CCS, να εντοπίσει κενά στη γνώση και να καταλήξει σε μια άποψη για τις επιπτώσεις αυτής της τεχνολογίας στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η εξέταση της CCS από την Επιστημονική Ομάδα ξεκίνησε με ένα ειδικό εργαστήριο CCS στο Λονδίνο τον Μάιο του 2005 που διοργάνωσε το Ηνωμένο Βασίλειο, ακολουθούμενο από τη σύσταση μιας Τεχνικής Ομάδας Εργασίας που συνεδρίασε τον Μάιο του 2005, τον Απρίλιο του 2006 και τον Απρίλιο του 2007 (στη Νορβηγία και το Ηνωμένο Βασίλειο). Σε αυτήν την ομάδα εργασίας, ειδικοί του CCS και του θαλάσσιου περιβάλλοντος παρείχαν πληροφορίες για να βοηθήσουν την Επιστημονική Ομάδα στην αξιολόγηση των κινδύνων και των οφελών για το θαλάσσιο περιβάλλον στο πλαίσιο της αυξανόμενης απορρόφησης ατμοσφαιρικού CO₂ από τους ωκεανούς. Για παράδειγμα, περίπου το 30-40% του CO₂ που εκπέμπεται από τη βιομηχανική επανάσταση έχει απορροφηθεί από τους ωκεανούς, με μεγάλες και σημαντικές συνέπειες για τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Οι επιπτώσεις είναι τόσο γνωστές, όπως αυτές στο ασβεστοποιούμενο φυτοπλαγκτόν, όσο και άγνωστες, ως αποτέλεσμα του συμπλέγματος αλληλεπιδράσεων της θαλάσσιας χημείας και των διεργασιών του οικοσυστήματος. (9)

Η έγχυση και αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς κάτω από τον βυθό θα μπορούσε επίσης να δημιουργήσει κινδύνους επιπτώσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον σε περίπτωση διαρροής CO₂. Ωστόσο, το συμπέρασμα της αξιολόγησης της Επιστημονικής Ομάδας ήταν ότι το CCS είναι τεχνικά εφικτό με κινδύνους που είναι τοπικοί και λιγότεροι σε σύγκριση με αυτούς που προκύπτουν από το ατμοσφαιρικό CO₂ και είναι δυνητικά διαχειρίσιμοι με κατάλληλες κατευθυντήριες γραμμές. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η ομάδα εργασίας ετοίμασε τις λεπτομερείς κατευθυντήριες γραμμές για την αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως περιγράφεται παρακάτω σε αυτήν την ενότητα. (9)

Η ετήσια συνάντηση της Σύμβασης του Λονδίνου τον Οκτώβριο του 2005 εξέτασε αυτό το έργο και το νομικό έργο που έχει ήδη αναληφθεί για την ερμηνεία της Σύμβασης και του Πρωτοκόλλου, και στα συμπεράσματά της: «(1) αναγνώρισε ότι η δέσμευση CO₂ είχε έναν ρόλο να παίζει, ως μέρος μιας σειράς μέτρων για την αντιμετώπιση της πρόκλησης της κλιματικής αλλαγής και της οξίνισης των ωκεανών (2) συμφώνησαν ότι η Σύμβαση του Λονδίνου και το Πρωτόκολλο ήταν κατάλληλα παγκόσμια μέσα για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της δέσμευσης CO₂ στο θαλάσσιο περιβάλλον (3) πώς εφαρμόζονται και τα δύο μέσα σε διαφορετικές περιστάσεις για τη δέσμευση CO₂ και (4) συμφώνησαν να εξετάσουν τον καλύτερο τρόπο για τη διευκόλυνση και/ή τη ρύθμιση της δέσμευσης CO₂ σε γεωλογικές δομές υποθαλάσσιου βυθού σύμφωνα με το Πρωτόκολλο και τη Σύμβαση». Στη συνέχεια, μια ομάδα εργασίας ανέλαβε νομική εργασία με την υποστήριξη τεχνικών εμπειρογνομόνων για να καταλήξει σε συμπέρασμα σχετικά με τον καλύτερο τρόπο για την άρση της αβεβαιότητας σχετικά με τις απαγορεύσεις. Αυτή η ομάδα συνέταξε μια τροποποίηση του Πρωτοκόλλου της Σύμβασης του Λονδίνου και προτάθηκε τον

Απρίλιο του 2006 από την Αυστραλία και υποστηρίχθηκε από το ΗΒ, τη Νορβηγία, τη Γαλλία και την Ισπανία. Αυτό ψηφίστηκε και συμφωνήθηκε τον Νοέμβριο του 2006 και τέθηκε σε ισχύ στις 10 Φεβρουαρίου 2007. Όλα αυτά έγιναν σε χρονικά διαστήματα πολύ πιο γρήγορα από ό,τι αναμενόταν, λόγω των πρόσφατα αναγνωρισμένων επιπτώσεων του ατμοσφαιρικού CO₂ στους ωκεανούς. Τα βασικά στοιχεία αυτής της τροπολογίας είναι τα εξής: προστίθεται στον κατάλογο των ουσιών που μπορούν να απορρίπτονται:

"Ροές CO₂ από διαδικασίες δέσμευσης CO₂ για δέσμευση" με τις σημαντικές επιφυλάξεις ότι:

«Τα ρεύματα διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να ληφθούν υπόψη για ντάμπινγκ μόνο εάν:

1. Η διάθεση γίνεται σε γεωλογικό σχηματισμό υποθαλάσσιου βυθού.
2. αποτελούνται κατά κύριο λόγο από διοξείδιο του άνθρακα. Μπορεί να περιέχουν παρεμπίπτουσες σχετικές ουσίες που προέρχονται από το αρχικό υλικό και τις διαδικασίες δέσμευσης και δέσμευσης που χρησιμοποιούνται και
3. δεν προστίθενται απόβλητα ή άλλη ύλη για τον σκοπό της διάθεσης αυτών των αποβλήτων ή άλλης ύλης». (9)

Αυτό σήμαινε ότι η αβεβαιότητα σχετικά με την πιθανή απαγόρευση της αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς σύμφωνα με το πρωτόκολλο καταργήθηκε – δηλαδή η αποθήκευση CO₂ δεν απαγορεύεται, υπό την προϋπόθεση ότι η αποθήκευση γίνεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς και το CO₂ μπορεί να περιέχει ακαθαρσίες εφόσον δεν χρησιμοποιείται ως ένα μέσο απόρριψης άλλων απορριμμάτων. (9)

Επιπλέον, η Επιστημονική Ομάδα παρήγαγε δύο σετ λεπτομερών κατευθυντήριων γραμμών για την αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς στο θαλάσσιο περιβάλλον. Για την αξιολόγηση και τη διαχείριση κινδύνου τέτοιων δραστηριοτήτων, παρήγαγαν το Πλαίσιο Αξιολόγησης και Διαχείρισης Κινδύνου για τη δέσμευση CO₂ σε γεωλογικές δομές υποθαλάσσιου βυθού (γνωστό ως RAMF)¹⁴, το οποίο βοήθησε επίσης την Επιστημονική Ομάδα να κατανοήσει και να εξηγήσει καλύτερα τους κινδύνους και διαδικασίες αξιολόγησης. Στη συνέχεια παρήγαγαν ειδικές κατευθυντήριες γραμμές για την αξιολόγηση των ρευμάτων CO₂ για διάθεση σε γεωλογικούς σχηματισμούς υποθαλάσσιου βυθού (γνωστές ως ειδικές κατευθυντήριες γραμμές CO₂ ή μερικές φορές ως κατευθυντήριες γραμμές αξιολόγησης αποβλήτων CO₂ - WAG). Και οι δύο αυτές κατευθυντήριες γραμμές παρέχουν μια διαδικασία εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ειδικά για δραστηριότητες αποθήκευσης CO₂. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές βασίστηκαν στην καλύτερη διαθέσιμη γνώση από επιστημονικούς εμπειρογνώμονες και καθοδήγηση από πηγές της IPCC, συμπεριλαμβανομένης της Ειδικής Έκθεσης και των Κατευθυντήριων Γραμμών της IPCC για Απογραφές GHG. (9)

Οι κατευθυντήριες γραμμές της RAMF προσφέρουν καθοδήγηση σχετικά με τον χαρακτηρισμό της τοποθεσίας, την εκτίμηση της έκθεσης, την εκτίμηση επιπτώσεων και τον χαρακτηρισμό και τη διαχείριση κινδύνου. Συνολικά, η κύρια εστίαση του

¹⁴ RAMF: Risk Assessment and Management Framework for CO₂ Sequestration in Sub-seabed Geological Structures

RAMF είναι στη γεωλογική αποθήκευση σε εξαντλημένους ταμειωτήρες υδρογονανθράκων και αλατούχους υδροφορείς. Δεν καλύπτουν ρητά τις κοίτες άνθρακα, τους βασάλτες και τα σπήλαια αλατιού. Δίνεται έμφαση ότι οι δραστηριότητες παρακολούθησης πρέπει να αναθεωρηθούν υπό το πρίσμα των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης και σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της IPCC GHG η συχνότητα παρακολούθησης μπορεί να μειωθεί καθώς αυξάνεται η εμπιστοσύνη στην ασφάλεια της αποθήκευσης. Επίσης, ακολουθώντας τις κατευθυντήριες γραμμές της IPCC, η RAMF αναγνωρίζει ότι κάθε τοποθεσία αποθήκευσης θα είναι διαφορετική και επομένως ο χαρακτηρισμός της τοποθεσίας και οι αξιολογήσεις κινδύνου θα πρέπει να γίνονται ανά τοποθεσία. Επίσης αναγνωρίζουν ότι η αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς κάτω από βαθύτερα νερά (π.χ. μεγαλύτερα από 500 m) θα απαιτούσε αναθεωρημένες κατευθυντήριες γραμμές. (9)

Οι ειδικές κατευθυντήριες γραμμές για το CO₂ είναι η μεταφορά και η τελειοποίηση του RAMF στην τυπική δομή των κατευθυντήριων γραμμών αξιολόγησης αποβλήτων της Σύμβασης του Λονδίνου για να βοηθήσουν τις ρυθμιστικές αρχές στις αποφάσεις τους για την αδειοδότηση. Αυτά απαιτούν μια «υπόθεση επιπτώσεων» που πρέπει να παραχθεί ως δήλωση των αναμενόμενων συνεπειών της διάθεσης. Οι ειδικές κατευθυντήριες γραμμές καλύπτουν:

- Χαρακτηρισμός του ρεύματος CO₂.
- Έλεγχος για αποδοχή των προς διάθεση ουσιών, σε αυτήν την περίπτωση το ρεύμα CO₂ συμπεριλαμβανομένων των ακαθαρσιών.
- Επιλογή και χαρακτηρισμός τοποθεσίας, που καλύπτει τόσο τον σχηματισμό αποθήκευσης όσο και τη θαλάσσια περιοχή, βάσει της Ειδικής Έκθεσης, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης της πιθανής έκθεσης στο CO₂ και των ουσιών που κινητοποιούνται από το CO₂, του προσδιορισμού των οδών και των πιθανοτήτων διαρροής, της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του CO₂
- Εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων, η οποία συγκεντρώνει τα παραπάνω σε μια εκτίμηση κινδύνου για τη δημιουργία μιας υπόθεσης επιπτώσεων.
- Παρακολούθηση και διαχείριση κινδύνου για την επαλήθευση ότι πληρούνται οι προϋποθέσεις διαχείρισης του χώρου και αδειοδότησης και ότι υπάρχει λεπτομερές πρόγραμμα παρακολούθησης που ορίζεται από τα αποτελέσματα της υπόθεσης επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένου ενός σχεδίου μετριασμού σε περίπτωση διαρροής.
- Οι πληροφορίες που απαιτούνται για και σε μια άδεια. (9)

Οι βελτιώσεις που προστέθηκαν στις ειδικές κατευθυντήριες γραμμές για το CO₂ περιλάμβαναν έναν περαιτέρω ορισμό της ροής CO₂ που διευκρινίζει ότι μπορούν να προστεθούν ουσίες για να βοηθήσουν το CCS. «το ρεύμα CO₂, που αποτελείται από: 1 CO₂· 2 παρεμπίπτουσες ουσίες που προέρχονται από το αρχικό υλικό και τις χρησιμοποιούμενες διαδικασίες δέσμευσης και δέσμευσης: 2.1 ουσίες που προέρχονται από την πηγή και τη διεργασία· και 2.2 προστιθέμενες ουσίες (δηλαδή ουσίες που προστίθενται στο ρεύμα CO₂ για να καταστεί δυνατή ή να βελτιώσουν τις διαδικασίες σύλληψης και δέσμευσης)». (9)

Σχετικά με τη σύνθεση του ρεύματος CO₂, η Επιστημονική Ομάδα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, αντί να ορίζει ένα γενικό πρότυπο για την καθαρότητα του ρεύματος, δεδομένου ότι η συνολική απαίτηση είναι η περιβαλλοντική ασφάλεια, τα επίπεδα αυτών των ακαθαρσιών θα πρέπει να σχετίζονται με πιθανές επιπτώσεις στην

ακεραιότητα της αποθήκευσης και της μεταφοράς, και αξιολογείται κατά περίπτωση, αναγνωρίζοντας τη φυσική διακύμανση στα χαρακτηριστικά του χώρου αποθήκευσης και σε διαφορετικές κατασκευές μεταφοράς. Αυτή η αρχή περιγράφεται στις Ειδικές Κατευθυντήριες Γραμμές και γι' αυτό χρησιμοποιείται στη νομική τροποποίηση η γενική φράση "αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από διοξείδιο του άνθρακα". (9)

Οι ειδικές κατευθυντήριες γραμμές παρέχουν καθοδήγηση σχετικά με τα περιεχόμενα αδειοδότησης και άδειας. Μια βασική απαίτηση που προσδιορίστηκε είναι ότι οι άδειες (και οι αιτήσεις αδειών) πρέπει να περιέχουν πληροφορίες για τη σύνθεση του ρεύματος CO₂ και ένα σχέδιο διαχείρισης κινδύνου το οποίο πρέπει να περιλαμβάνει: ένα σχέδιο παρακολούθησης (επιχειρησιακό και μακροπρόθεσμο) και απαιτήσεις υποβολής εκθέσεων. Ένα σχέδιο μετριασμού και αποκατάστασης (για την περίπτωση διαρροής): και ένα σχέδιο κλεισίματος τοποθεσίας με παρακολούθηση μετά το κλείσιμο. Οι άδειες θα πρέπει να επανεξετάζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα και θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τυχόν αλλαγές που εντοπίζονται από την παρακολούθηση και τις ενημερωμένες αξιολογήσεις κινδύνου. (9)

4.3 Σύμβαση OSPAR¹⁵

Το OSPAR (1992) είναι η σύμβαση για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος στον Βορειοανατολικό Ατλαντικό, με 15 έθνη και την ΕΚ ως συμβαλλόμενα μέρη. Ομοίως με το Πρωτόκολλο του Λονδίνου, το OSPAR συντάχθηκε χωρίς να ληφθεί υπόψη το CCS. Όπως και το Πρωτόκολλο του Λονδίνου, το OSPAR καθορίζει τι επιτρέπεται να γίνει ντάμπινγκ και θεωρείται πιο περιοριστικό από το Πρωτόκολλο του Λονδίνου. Σε αντίθεση με το Λονδίνο, η νομική εξέταση του CCS κατέληξε σε πιο συγκεκριμένα συμπεράσματα και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ορισμένες διαμορφώσεις έργων CCS απαγορεύονταν ανάλογα με τη διαδρομή που ακολουθούσε το CO₂ στον χώρο αποθήκευσης. Απαγόρευε τη μεταφορά CO₂ στην ξηρά σε μια τοποθεσία αποθήκευσης μέσω μιας υπεράκτιας πλατφόρμας σχετικής με το πετρέλαιο (ένα πιθανό σενάριο έργου CCS για τη Βόρεια Θάλασσα για παράδειγμα) και τη μεταφορά με πλοίο για έγχυση ανοικτής θάλασσας. Η μεταφορά μέσω αγωγού από την ξηρά σε μια τοποθεσία αποθήκευσης που δεν απαιτούσε τη χρήση πλατφόρμας τοποθετημένης στη θαλάσσια περιοχή για εξερεύνηση πετρελαίου και φυσικού αερίου ήταν επιτρεπτή. (9)

Τα μέρη του OSPAR άρχισαν να εξετάζουν το ενδεχόμενο CCS μετά από ένα σεμινάριο τον Οκτώβριο του 2003 στο ΗΒ σχετικά με τις επιπτώσεις του CCS στο θαλάσσιο περιβάλλον. Το 2004, πραγματοποιήθηκε στη Νορβηγία ένα ειδικό εργαστήριο OSPAR για το CCS. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η παραγωγή δύο ενημερωτικών εγγράφων για συναφή θέματα: μια τεχνική ανασκόπηση και μια ανασκόπηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του CO₂. Υπό το πρίσμα των εργασιών για την τροποποίηση του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου, η OSPAR ξεκίνησε νομικές εργασίες για να εξετάσει τη δική της τροποποίηση, ξεκινώντας μια τεχνική ομάδα για την αξιολόγηση και τη βελτίωση για τους σκοπούς της OSPAR του RAMF του Λονδίνου. Αυτή η εργασία κατέληξε σε καθοδήγηση που ονομάζεται Πλαίσιο OSPAR

¹⁵ OSPAR: "OS" for Oslo and "PAR" for Paris

για την αξιολόγηση κινδύνου και τη διαχείριση της αποθήκευσης ρευμάτων CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς (γνωστός ως FRAM¹⁶). (9)

Η δομή του OSPAR FRAM αντικατοπτρίζει αυτή του London RAMF, με τον ίδιο σκοπό. Οι αρχές που θεσπίστηκαν για το CCS στην καθοδήγηση της Σύμβασης του Λονδίνου επαναλήφθηκαν επίσης στο FRAM. (9)

Μόλις αναπτύχθηκε το FRAM, μια νομική ομάδα εργασίας OSPAR που συνεδρίασε στην Ολλανδία εξέτασε και συνέταξε τις κατάλληλες νομικές τροποποιήσεις. Απαιτήθηκαν δύο τροποποιήσεις, για το Παράρτημα II της OSPAR που ασχολείται με το ντάμπινγκ και για το Παράρτημα III που αφορά τις υπεράκτιες πηγές. Αυτές οι τροπολογίες προτάθηκαν το 2007 από τη Νορβηγία και συγχρηματοδοτήθηκαν από το Ηνωμένο Βασίλειο, τις Κάτω Χώρες και τη Γαλλία. Εκτός από το FRAM, δημιουργήθηκαν οδηγίες σχετικά με τον τρόπο χρήσης του FRAM, αυτές ήταν οι OSPAR κατευθυντήριες γραμμές για την εκτίμηση κινδύνου και τη διαχείριση της αποθήκευσης ρευμάτων CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς (γνωστές ως OSPAR Guidelines), οι οποίες περιλάμβαναν το FRAM ως αναπόσπαστο παράρτημα. (9)

Το OSPAR τροποποιήθηκε τον Ιούνιο του 2007 με συναίνεση. Οι νομικές τροποποιήσεις ήταν παρόμοιες με αυτές του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου, αλλά με έναν επιπλέον όρο:

"Ροές CO₂ από διαδικασίες δέσμευσης CO₂ για αποθήκευση υπό την προϋπόθεση:

- Σε υποεδafικό γεωλογικό σχηματισμό.
- Αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από CO₂. Μπορεί να περιέχει τυχαίες σχετικές ουσίες που προέρχονται από το αρχικό υλικό και τις διαδικασίες δέσμευσης και δέσμευσης που χρησιμοποιούνται
- Δεν προστίθενται απόβλητα ή άλλα υλικά για σκοπούς διάθεσης
- Προορίζονται να διατηρηθούν μόνιμα και δεν θα οδηγήσουν σε σημαντικές δυσμενείς συνέπειες για το θαλάσσιο περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία και άλλους χρήστες" (9)

Η αναφορά στη μόνιμη διατήρηση θα μπορούσε να ερμηνευθεί ότι τοποθεσίες με ακόμη και πολύ χαμηλά επίπεδα διαρροής δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και αν υπάρχει καθαρό όφελος για το κλίμα. (9)

Ταυτόχρονα, τα Μέρη της OSPAR υιοθέτησαν νομική απόφαση για την υποχρεωτική χρήση των κατευθυντήριων γραμμών OSPAR κατά την έκδοση αδειών για γεωλογική αποθήκευση CO₂. Στη Σύμβαση και το Πρωτόκολλο του Λονδίνου, οι παρόμοιες κατευθυντήριες γραμμές είναι μόνο για καθοδήγηση (αν και το Πρωτόκολλο του Λονδίνου περιλαμβάνει πιο λεπτομερείς διατάξεις για την έκδοση αδειών σε ένα γενικό παράρτημα). Η απόφαση OSPAR 2007/2 περιλαμβάνει απαιτήσεις άδειας παρόμοιες με αυτές στις Ειδικές Κατευθυντήριες Γραμμές του Λονδίνου, αλλά με περισσότερες λεπτομέρειες:

Κάθε άδεια ή έγκριση που εκδίδεται πρέπει να περιέχει τουλάχιστον:

1. περιγραφή της επέμβασης, συμπεριλαμβανομένων των ρυθμών έγχυσης·

¹⁶ FRAM: Framework for Risk Assessment and Management of Storage of CO₂ Streams in Geological Formations

2. τους προγραμματισμένους τύπους, τις ποσότητες και τις πηγές των ρευμάτων CO₂, συμπεριλαμβανομένων των παρεπόμενων σχετικών ουσιών, που θα αποθηκευτούν στον γεωλογικό σχηματισμό·
3. τη θέση της εγκατάστασης ένεσης·
4. χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών·
5. τις μεθόδους μεταφοράς του ρεύματος CO₂· και
6. ένα σχέδιο διαχείρισης κινδύνου που περιλαμβάνει:
 - i. απαιτήσεις παρακολούθησης και υποβολής εκθέσεων·
 - ii. επιλογές μετριασμού και αποκατάστασης, συμπεριλαμβανομένων των φάσεων πριν από το κλείσιμο· και
 - iii. απαίτηση για σχέδιο κλεισίματος τοποθεσίας, συμπεριλαμβανομένης περιγραφής της παρακολούθησης μετά το κλείσιμο και των επιλογών μετριασμού και αποκατάστασης· Η παρακολούθηση συνεχίζεται έως ότου επιβεβαιωθεί ότι η πιθανότητα τυχόν μελλοντικών δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων έχει μειωθεί σε ασήμαντο επίπεδο. (9)

Το σημείο στο μέρος 6.iii σχετικά με την παρακολούθηση σημαίνει ότι η παρακολούθηση μπορεί να σταματήσει όταν υπάρχει εμπιστοσύνη στην ασφάλεια της αποθήκευσης CO₂, αντισταθμίζοντας τις κατευθυντήριες γραμμές της IPCC για τα GHG. Η απόφαση OSPAR περιλάμβανε επίσης την απαίτηση για υποβολή εκθέσεων, συμπεριλαμβανομένων των αναφορών μετά το κλείσιμο, και ένα πρότυπο αναφοράς. (9)

Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές OSPAR θα πρέπει να αξιολογούνται και, εάν χρειάζεται, να αναθεωρούνται, υπό το φως της εμπειρίας κάθε 5 χρόνια. Οι κατευθυντήριες γραμμές OSPAR περιγράφουν τους εαυτούς τους ότι παρέχουν "γενική καθοδήγηση" και "δεν είναι απαραίτητα όλα τα στοιχεία τους και εφαρμόζονται σε κάθε έργο αποθήκευσης CO₂" αλλά θα πρέπει "να εφαρμόζονται στο μέτρο του δυνατού". Οι κατευθυντήριες γραμμές δεν είναι γραμμένες για να παρέχουν απαντήσεις ναι/όχι ή κατώτατα όρια, αλλά για να βοηθήσουν τη ρυθμιστική αρχή να κατανοήσει ποια ζητήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη και πώς. Επομένως, οι κατευθυντήριες γραμμές OSPAR απαιτείται να χρησιμοποιούνται από τα συμβαλλόμενα μέρη της OSPAR, αλλά οι λεπτομέρειές τους είναι για «καθοδήγηση» και επομένως η εφαρμογή τους επιτρέπει κάποια ευελιξία. (9)

Επιπλέον, στην ίδια συνεδρίαση, η OSPAR ενέκρινε μια άλλη απόφαση για την έγκριση γερμανικής πρότασης για την απαγόρευση της αποθήκευσης ωκεανών «Η τοποθέτηση ρευμάτων διοξειδίου του άνθρακα στη στήλη του νερού ή στον βυθό της θάλασσας απαγορεύεται». Έτσι, αποκλείεται η αποθήκευση των ωκεανών για τις χώρες OSPAR, εκτός εάν πρόκειται για πειραματικούς σκοπούς. (9)

Όσον αφορά τα χρονοδιαγράμματα, η απόφαση OSPAR για χρήση των κατευθυντήριων γραμμών OSPAR και η απόφαση για την αποθήκευση των ωκεανών, τέθηκαν σε ισχύ στις 15 Ιανουαρίου 2008, για όλα τα έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ στο θαλάσσιο περιβάλλον, εκτός από εκείνα για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου ή από κανονικές λειτουργίες ή πειραματικών σκοπών, που δεν εμπίπτουν στην κάλυψη του OSPAR. Οι νομικές τροποποιήσεις για την άρση των απαγορεύσεων αποθήκευσης

στον υποθαλάσσιο βυθό τέθηκαν σε ισχύ μετά την επικύρωσή τους από επτά μέρη OSPAR, κάτι που επιτεύχθηκε στις 23 Ιουλίου 2011.

Σημειώστε ότι η OSPAR δεν έχει την απαγόρευση εξαγωγής απορριμμάτων. (9)

4.4 Το καθεστώς του Πρωτοκόλλου του Κιότο και η “κυοφορία” του διαδόχου του

Το Πρωτόκολλο του Κιότο που εγκρίθηκε τον Δεκέμβριο του 1997 και ισχύει από τον Φεβρουάριο του 2005, είναι η πρώτη διεθνής συμφωνία που επιβάλλει δεσμευτικούς στόχους για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Κιότο, 37 βιομηχανικές χώρες και η ΕΕ δεσμεύτηκαν να μειώσουν τις εκπομπές τους κατά μέσο όρο κατά 5% έναντι των επιπέδων του 1990, κατά την περίοδο 2008–2012. Κάθε χώρα είχε τον δικό της στόχο εκπομπών (ΕΕ: – 8%, Ιαπωνία: – 6%: Αυστραλία: +8% κ.λπ.), ο οποίος –κυρίως– είχε τεθεί μέσω μιας διαδικασίας διαπραγμάτευσης αντί να είχε καθοριστεί μονομερώς. Ο χαρακτηρισμός του Πρωτοκόλλου του Κιότο ως καθεστώς από πάνω προς τα κάτω σχετίζεται κυρίως με αυτή τη διαπραγμάτευση, όπου συμφωνήθηκε εξ αρχής η ακριβής κατανομή των προσπάθειών. (10)

Το Πρωτόκολλο του Κιότο έδωσε στις χώρες έναν ορισμένο βαθμό ευελιξίας στην εκπλήρωση των δεσμεύσεών τους για τον μετριασμό του κλίματος μέσω τριών μηχανισμών που βασίζονται στην αγορά: Διεθνούς Εμπορίας Εκπομπών (IET), Μηχανισμού Καθαρής Ανάπτυξης (CDM)¹⁷ και Κοινή Εφαρμογή (JI). Η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας ήταν η οικονομική αρχή που στήριζε τους τρεις μηχανισμούς, οι οποίοι μοιράζονταν τη λογική «μειώστε τις εκπομπές όπου είναι φθηνότερο». Για τις χώρες με στόχους εκπομπών, τις λεγόμενες χώρες του Παραρτήματος-B, το IET επέτρεψε τις ανταλλαγές των Εκχωρημένων Μονάδων Ποσού (AAU) που διατίθενται από εκείνους που υπερβαίνουν τους στόχους τους. Το CDM και το JI, αντίθετα, παρήγαγαν πιστώσεις εκπομπών σε βάση έργου, δηλαδή έναντι μεμονωμένων έργων που αποδείχθηκε ότι είχαν μειωμένες εκπομπές. Το CDM περιλάμβανε επενδύσεις σε έργα βιώσιμης ανάπτυξης που μείωσαν τις εκπομπές στις αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ το JI αφορούσε ανάλογα έργα σε ανεπτυγμένες χώρες, συνήθως οικονομίες σε μεταβατικό στάδιο. Μαζί με τα AAU και τις Μονάδες Αφαίρεσης (RMU) που δημιουργούνται από έργα αφαίρεσης εκπομπών στον τομέα χρήσης γης, αλλαγής χρήσης γης και δασοκομίας, οι πιστώσεις CDM και JI, που ονομάζονται Certified Emission Reductions (CERs) και Emission Reduction Units (ERUs), αντίστοιχα, ήταν οι εμπορεύσιμες μονάδες του Κιότο. (10)

Αν και στηριζόταν σε ισχυρά νομικά και οικονομικά θεμέλια, το Πρωτόκολλο του Κιότο είχε σημαντικό περιορισμό στο μέτριο μερίδιο των παγκόσμιων εκπομπών που υπόκεινταν σε στόχους μείωσης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο, από τότε που τέθηκε σε ισχύ το Πρωτόκολλο του Κιότο, το κύριο ερώτημα που αντιμετώπιζε το καθεστώς του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή ήταν τι να κάνει μετά το 2012, δηλαδή μετά τη λήξη των στόχων εκπομπών του Κιότο. Η ΕΕ τάχθηκε υπέρ ενός νέου καθεστώτος τύπου Κιότο, που αυτή τη φορά περιλαμβάνει στόχους εκπομπών και για

¹⁷ CDM: Clean Development Mechanisms

τις αναπτυσσόμενες χώρες. Ωστόσο, η υποστήριξη για αυτήν τη λύση από άλλες χώρες δεν ήταν επαρκής. Εκ των υστέρων, η 15η Διάσκεψη των Μερών της UNFCCC (COP15), που πραγματοποιήθηκε στην Κοπεγχάγη (Δανία) τον Δεκέμβριο του 2009, ήταν τόσο χαμηλό όσο και σημείο καμπής στις διεθνείς διαπραγματεύσεις για την κλιματική αλλαγή. Το επιθυμητό αποτέλεσμα της διάσκεψης ήταν μια νέα νομική συμφωνία για την περίοδο μετά το 2012. Μια τέτοια συμφωνία, ωστόσο, δεν επετεύχθη. Αντίθετα, η COP15 παρήγαγε μια σύντομη, ευρεία πολιτική συμφωνία. Το σημαντικότερο είναι ότι η Συμφωνία της Κοπεγχάγης ξεκίνησε μια διαδικασία από κάτω προς τα πάνω που επέτρεψε σε κάθε συμμετέχουσα χώρα να ορίσει τις δικές της δεσμεύσεις και δράσεις μονομερώς. (10)

Μετά την COP15, οι διεθνείς διαπραγματεύσεις προχώρησαν σταθερά προς τη δημιουργία ενός καθεστώτος για την κλιματική αλλαγή που θα βασίζεται στην προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω. Η οικοδόμηση στη Συμφωνία της Κοπεγχάγης, η COP16, στο Κανκούν (Μεξικό), ήταν καθοριστική για την επιτάχυνση της διαδικασίας προς αυτή την κατεύθυνση. Στο COP17, στο Durban (Νότια Αφρική), μεταξύ άλλων σημαντικών αποτελεσμάτων ήταν η απόφαση για έγκριση έως το 2015 (COP21)¹⁸ μιας νέας συμφωνίας για την περίοδο μετά το 2020. Η μελλοντική συμφωνία θα περιλαμβάνει μονομερώς καθορισμένους στόχους εκπομπών για όλες τις χώρες. Εν τω μεταξύ, η δεύτερη περίοδος δέσμευσης του Πρωτοκόλλου του Κιότο (2013–2020) θα λειτουργήσει ως γέφυρα προς το καθεστώς μετά το 2020. Ωστόσο, οι χώρες που υιοθέτησαν νέους στόχους μείωσης των εκπομπών για την περίοδο 2013–2020 αντιπροσώπευαν μαζί λιγότερο από το 15% των παγκόσμιων εκπομπών. (10)

4.5 Οδηγίες IPCC για αποθέματα αερίων του θερμοκηπίου

Παράλληλα με τις εργασίες για την Ειδική Έκθεση για την CCS, η IPCC ανέπτυξε ένα νέο κεφάλαιο αφιερωμένο στην CCS για τις Κατευθυντήριες γραμμές της IPCC του 2006 για τις εθνικές απογραφές αερίων θερμοκηπίου. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές της IPCC αποτελούν τη βάση για τη λογιστική εκπομπών στις χώρες του Παραρτήματος I της UNFCCC μετά από έγκριση από τα κυβερνητικά μέρη, και για την CCS έχουν την ακόλουθη απαίτηση: «Όταν οι εκπομπές CO₂ δεσμεύονται από βιομηχανικές διεργασίες ή μεγάλες πηγές καύσης, οι εκπομπές θα πρέπει να κατανέμονται στον τομέα παραγωγής το CO₂ εκτός εάν μπορεί να αποδειχθεί ότι το CO₂ αποθηκεύεται σε κατάλληλα παρακολουθούμενες γεωλογικές τοποθεσίες αποθήκευσης». Αυτό σημαίνει ότι οι κυβερνήσεις μπορούν να διεκδικήσουν μη εκπομπές από εγκαταστάσεις πηγής μόνο στους καταλόγους αερίων θερμοκηπίου της UNFCCC, εάν επιβάλλουν τις υποχρεώσεις παρακολούθησης και αναφοράς που περιγράφονται στις Κατευθυντήριες γραμμές της IPCC του 2006. (9)

Επιπλέον, το κεφάλαιο CCS στις κατευθυντήριες γραμμές της IPCC του 2006 αναφέρει ότι: «... δεν υπάρχουν επαρκή εμπειρικά στοιχεία για την παραγωγή παραγόντων εκπομπής που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε ταμειωτές γεωλογικής αποθήκευσης». Στη συνέχεια δηλώνει ότι: «Η καταλληλότητα και η

¹⁸ COP21: Conference Of the Parties

αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών παρακολούθησης μπορεί να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από τη γεωλογία και τις πιθανές οδούς εκπομπών σε επιμέρους τοποθεσίες αποθήκευσης, επομένως η επιλογή των επιμέρους απαιτήσεων παρακολούθησης θα πρέπει να γίνεται ανά τοποθεσία. ". Κατά συνέπεια, το έγγραφο υποστηρίζει τη χρήση μιας διαδικασίας παρακολούθησης εκπομπών ειδικά για το έργο, με στόχο: «... να υποστηρίξει όχι μόνο εκτιμήσεις μηδενικών εκπομπών αλλά και να ανιχνεύσει διαρροές, ακόμη και σε χαμηλά επίπεδα, εάν συμβεί». Μια άλλη αρχή που καθιερώθηκε είναι ότι εάν το CO₂ σταθεροποιηθεί στην προβλεπόμενη μακροπρόθεσμη κατανομή του στη δεξαμενή, τότε η παρακολούθηση μπορεί να μειωθεί ή να διακοπεί. (9)

Στο πλαίσιο των κατευθυντήριων γραμμών GHG της IPCC του 2006, παρέχεται στη συνέχεια μια μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των εκπομπών του χώρου αποθήκευσης σε συγκεκριμένη βάση για το έργο. Οι αρχές σε αυτήν τη μεθοδολογία – του χαρακτηρισμού της τοποθεσίας, της αξιολόγησης κινδύνου, της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του CO₂, της παρακολούθησης και της ενημέρωσης της μοντελοποίησης με αποτελέσματα παρακολούθησης – είναι πολύ σημαντικές και ακολουθούνται σε μεταγενέστερους κανονισμούς για το CCS. (9)

4.6 Συμφωνία του Παρισιού

Η Συμφωνία του Παρισιού, που εγκρίθηκε τον Δεκέμβριο του 2015 και ισχύει από τον Νοέμβριο του 2016, αποτελεί το νομικό θεμέλιο του διεθνούς καθεστώτος για την κλιματική αλλαγή μετά το 2020. Η Συμφωνία του Παρισιού υπεγράφη από 195 χώρες, αντιπροσωπεύοντας το 99% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ο απώτερος στόχος της Συμφωνίας του Παρισιού είναι να διατηρήσει την αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας πολύ κάτω από τους 2 °C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα, «συνεχίζοντας προσπάθειες για περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας σε 1,5 °C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα». Ουσιαστικά, η Συμφωνία του Παρισιού ορίζει ένα μακροπρόθεσμο πλαίσιο για την αντιμετώπιση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής με οριστικό τρόπο. (10)

Η Συμφωνία του Παρισιού διαφέρει ριζικά από το Πρωτόκολλο του Κιότο από πολλές απόψεις. Πρώτα και κύρια, η Συμφωνία του Παρισιού υποχρεώνει όλες τις χώρες να αναλάβουν δράση για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη, ξεπερνώντας έτσι τον κύριο περιορισμό του Πρωτοκόλλου του Κιότο. Δεύτερον, η συμβολή κάθε χώρας στη συλλογική προσπάθεια σταθεροποίησης του κλίματος καθορίζεται μονομερώς. Αυτή η πτυχή τονίζεται από τον όρο Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές (NDCs), που είναι ο τρόπος με τον οποίο ονομάζονται οι εθελοντικές δεσμεύσεις ή οι επίσημες δεσμεύσεις των χωρών. Ως εκ τούτου, οι χώρες δεν έπρεπε να συμφωνήσουν εκ των προτέρων για τον επιμερισμό του βάρους, κάτι που θα ήταν πολύ δύσκολο με μεγάλο αριθμό συμμετεχόντων. Τρίτον, τα NDC μπορεί να είναι ετερογενή, πράγμα που σημαίνει ότι δεν χρειάζεται απαραίτητα να προσδιορίζονται ως προς τους στόχους μείωσης των εκπομπών. Τέταρτον, η Συμφωνία του Παρισιού είναι εγγενώς δυναμική, δεδομένου ότι η επίτευξη του στόχου μετριασμού της κλιματικής αλλαγής βασίζεται σε έναν μηχανισμό καστανίας με τον οποίο τα NDCs επανεξετάζονται και αυξάνονται ανά πενταετία. Πράγματι, οι αρχικές NDCs συνολικά

έπεσαν πολύ κάτω από τον στόχο (UNEP¹⁹ 2017). Η Συμφωνία του Παρισιού στο σύνολό της έχει περιγραφεί ως μια υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει χαρακτηριστικά από κάτω προς τα πάνω και από πάνω προς τα κάτω. Τα πρώτα σχετίζονται με την ελευθερία των εθνικών κυβερνήσεων στον καθορισμό των NDC τους. Το δεύτερο αναφέρεται στις υποχρεώσεις που εξακολουθούν να έχουν οι κυβερνήσεις, όπως καθήκοντα παρακολούθησης και αναφοράς μεταξύ άλλων. (10)

Η Συμφωνία του Παρισιού μπορεί να θεωρηθεί η επιτυχής έκβαση μιας διαδικασίας που προέκυψε από τη διπλωματική αποτυχία της UNFCCC COP15. Ωστόσο, το καθεστώς που θεσπίστηκε με τη Συμφωνία του Παρισιού ανέχεται σημαντική αβεβαιότητα σχετικά με την αποτελεσματικότητά του στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Και οι δύο προοπτικές είναι αναμφισβήτητα αληθείς, κάτι που θα εξηγούσε το εύρος των απόψεων σχετικά με τη Συμφωνία του Παρισιού: θεωρούνται από ορισμένους ως «Σχέδιο Α» και από άλλους ως ένα εντελώς ανεπαρκές πλαίσιο για την πραγματικότητα της κλιματικής αλλαγής. Η τελική επιτυχία ή αποτυχία της Συμφωνίας του Παρισιού θα εξαρτηθεί από την υλοποίηση μιας δυναμικής διαδικασίας πολλών δεκαετιών. Όπως το έθεσαν οι Keohane και Oppenheimer (2016) (11), «η Συμφωνία του Παρισιού είναι λιγότερο επίτευγμα παρά μέρος μιας συνεχιζόμενης διαδικασίας». Ως εκ τούτου, η παρακολούθηση της εξέλιξης αυτής της διαδικασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική. (10)

¹⁹ UNEP: United Nations Environment Programme

5.CCS και Ευρωπαϊκή Ένωση

5.1 Εισαγωγή

Το CCS Directive 2009/31/EC δημοσιεύθηκε στις 23 Απριλίου 2009. Προτάθηκε ως στοιχείο της ευρύτερης δέσμης πολιτικής της ΕΕ για το κλίμα και την καθαρή ενέργεια, η οποία περιλάμβανε μέτρα για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, την αναθεώρηση του συστήματος εμπορίας εκπομπών και τη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας και ανταγωνιστικότητας της ΕΕ. Το σχέδιο Οδηγία κυκλοφόρησε για σχολιασμό τον Ιανουάριο του 2008 και ήταν συνεπές με τις απαιτήσεις της τροποποίησης OSPAR για CCS (καθώς πολλά από τα μέλη OSPAR ήταν κράτη μέλη της ΕΕ) η οποία βασιζόταν στην τροποποίηση του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου CCS. Ο στόχος της οδηγίας, όπως ορίζεται στο άρθρο 1, είναι η θέσπιση νομικού πλαισίου για την περιβαλλοντικά ασφαλή αποθήκευση του CO₂, ώστε να «συμβάλει στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής». Απαιτείται μόνιμη συγκράτηση του εγχυόμενου CO₂, ώστε να «προληφθούν και, όπου αυτό δεν είναι δυνατό, να εξαλειφθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι αρνητικές επιπτώσεις και κάθε κίνδυνος για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία». (9)

Η οδηγία ορίζει ένα ρυθμιστικό καθεστώς για την άδεια εξερεύνησης και αποθήκευσης και θεσπίζει κριτήρια για την επιλογή των τόπων αποθήκευσης. Σύμφωνα με την Οδηγία, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ρόλο στην επανεξέταση και την υποβολή σχολίων για τυχόν σχέδια αδειών αποθήκευσης. Μολονότι αυτή η γνώμη δεν είναι δεσμευτική για τα κράτη μέλη, απαιτείται από αυτά να αιτιολογήσουν εάν αποφασίσουν κατά της γνώμης της Επιτροπής. (9)

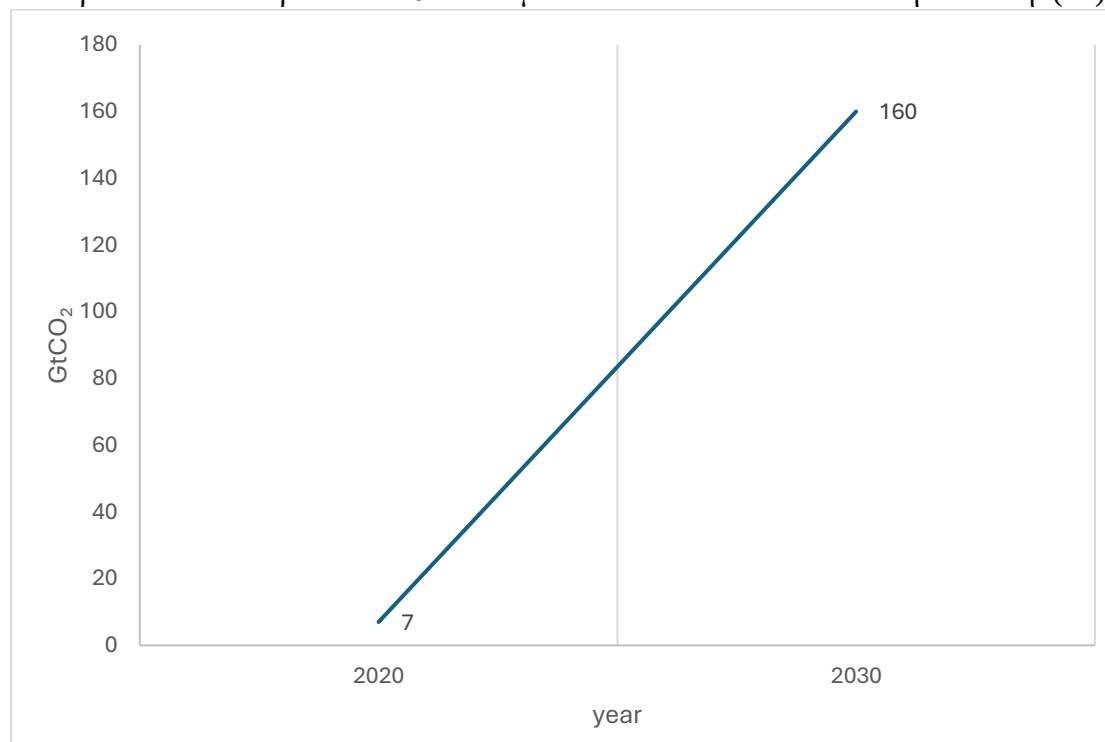
5.2 Προϋποθέσεις θεσμικού πλαισίου

Οι προϋποθέσεις του θεσμικού πλαισίου προκύπτει αναλύονται στο DIRECTIVE 2009/31/EC ακολούθως:

5.2.1 CCS και περιβάλλον

Οι προκαταρκτικές εκτιμήσεις, που έγιναν με σκοπό την αξιολόγηση του αντίκτυπου της οδηγίας και αναφέρονται στην εκτίμηση επιπτώσεων της Επιτροπής, δείχνουν ότι επτά εκατομμύρια τόνοι CO₂ θα μπορούσαν να αποθηκευτούν έως το 2020 και έως 160 εκατομμύρια τόνοι έως το 2030, εάν μειωθούν κατά 20% οι εκπομπές θερμοκηπίου έως το 2020 και εάν η τεχνολογία CCS κερδίσει ιδιωτική, εθνική και κοινοτική υποστήριξη και αποδειχθεί ότι είναι μια περιβαλλοντικά ασφαλής

τεχνολογία. Οι εκπομπές CO₂ που θα αποφευχθούν το 2030 θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν περίπου το 15% των μειώσεων που απαιτούνται στην Ένωση. (12)



Διάγραμμα 1: Εκτίμηση αποθήκευσης CO₂

Σε κοινοτικό επίπεδο, υπάρχει ήδη ένα σύνολο νομοθετικών μέσων για τη διαχείριση ορισμένων από τους περιβαλλοντικούς κινδύνους της CCS, ιδίως όσον αφορά τη δέσμευση και τη μεταφορά CO₂, και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερο. (12)

Είναι σκόπιμο να θεσπιστούν διατάξεις σχετικά με την ευθύνη για ζημιές που προκαλούνται στο τοπικό περιβάλλον και για ζημιές στο κλίμα που προκύπτουν από αστοχία μόνιμης δέσμευσης CO₂. Επιπλέον, η παρούσα οδηγία θα πρέπει να απαιτεί από τον ιδιοκτήτη των τόπων αποθήκευσης να λαμβάνει διορθωτικά μέτρα σε περίπτωση διαρροών ή σημαντικών παρατυπιών, σύμφωνα με σχέδιο που υποβάλλεται και εγκρίνεται από την αρμόδια εθνική αρχή. Εάν ο ιδιοκτήτης δεν λάβει τα απαραίτητα διορθωτικά μέτρα, εναπόκειται στην αρμόδια αρχή, η οποία θα διεκδικήσει τα ανάλογα έξοδα από τον ιδιοκτήτη. (12)

5.2.2 Παροχή κινήτρων

Η δέσμευση άνθρακα και η γεωλογική αποθήκευση (CCS) είναι μια τεχνολογία μετάβασης που θα βοηθήσει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Συνίσταται στη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που εκπέμπεται από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, στη μεταφορά του σε αποθηκευτικό χώρο και στην έγχυσή του σε κατάλληλο υπόγειο γεωλογικό σχηματισμό για μόνιμη αποθήκευση. Αυτή η τεχνολογία δεν θα πρέπει να αποτελεί κίνητρο για την αύξηση του ποσοστού των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Η ανάπτυξή του δεν πρέπει να οδηγήσει στη μείωση των προσπαθειών υποστήριξης πολιτικών

εξοικονόμησης ενέργειας, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και άλλων ασφαλών και βιώσιμων τεχνολογιών με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, ούτε στον τομέα της έρευνας ούτε στον χρηματοοικονομικό τομέα. (12)

Κάθε ένα από τα διαφορετικά συστατικά του CCS, δηλαδή η δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση CO₂, έχει δοκιμαστεί σε πιλοτική κλίμακα από αυτή που απαιτείται για βιομηχανική εφαρμογή. Η ενσωμάτωση αυτών των στοιχείων σε μια πλήρη διαδικασία CCS εξακολουθεί να είναι απαραίτητη, το τεχνολογικό κόστος πρέπει να μειωθεί και να συγκεντρωθούν περισσότερες και καλύτερες επιστημονικές γνώσεις. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό η Κοινότητα να αναπτύξει προσπάθειες επίδειξης το συντομότερο δυνατό σε έναν ολοκληρωμένο τομέα πολιτικής, συμπεριλαμβανομένου ειδικότερα ενός νομικού πλαισίου για την περιβαλλοντικά ασφαλή εφαρμογή της αποθήκευσης CO₂, καθώς και κινήτρων, ιδίως με στόχο την ενίσχυση της έρευνας και της ανάπτυξης, και προσπάθειες για έργα επίδειξης και μέτρα ευαισθητοποίησης του κοινού. (12)

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Ιουνίου 2008 κάλεσε την Επιτροπή να αναπτύξει το συντομότερο δυνατό μηχανισμό για την παροχή κινήτρων για επενδύσεις από τα κράτη μέλη και τον ιδιωτικό τομέα ώστε να διασφαλιστεί η κατασκευή και η θέση σε λειτουργία έως το 2015 έως και 12 μονάδων επίδειξης CCS. (12)

5.2.3 Προώθηση σχεδίου δράσης

Η δεύτερη φάση του ευρωπαϊκού προγράμματος για την αλλαγή του κλίματος, που αναφέρεται στην ανακοίνωση της Επιτροπής της 9ης Φεβρουαρίου 2005 με τίτλο «Κερδίζοντας τη μάχη κατά της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής», προκειμένου να προετοιμαστεί και να επανεξεταστεί η μελλοντική πολιτική για την κλιματική αλλαγή, οδήγησε στη δημιουργία μιας ομάδας εργασίας σχετικά με τη δέσμευση άνθρακα και τη γεωλογική αποθήκευση. Αυτή η Ομάδα Εργασίας είχε εντολή να μελετήσει τις δυνατότητες που προσφέρει η CCS ως μέσο για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Η Ομάδα δημοσίευσε λεπτομερή έκθεση για τη ρύθμιση, η οποία εγκρίθηκε τον Ιούνιο του 2006. Η έκθεση τόνιζε την ανάγκη προώθησης ενός πολιτικού και ρυθμιστικού πλαισίου για την CCS και προέτρεψε την Επιτροπή να συνεχίσει να εμβαθύνει σε αυτόν τον τομέα. (12)

5.2.4 Ανάπτυξη ρυθμιστικού πλαισίου

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Μαρτίου 2007 κάλεσε επίσης τα κράτη μέλη και την Επιτροπή να ενισχύσουν την έρευνα και την ανάπτυξη και να καθορίσουν το απαραίτητο τεχνικό, οικονομικό και ρυθμιστικό πλαίσιο για την άρση των υφιστάμενων νομικών εμποδίων και την εφαρμογή φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα του περιβάλλοντος εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής ορυκτών καυσίμων, ει δυνατόν έως το 2020. (12)

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Μαρτίου 2008 υπενθύμισε ότι ο στόχος της πρότασης για ένα ρυθμιστικό πλαίσιο για το CCS ήταν να διασφαλιστεί ότι αυτή η νέα τεχνολογία μπορεί να αναπτυχθεί με περιβαλλοντικά ασφαλή τρόπο. (12)

5.2.5 Αποθήκευση CCS

Η παρούσα οδηγία θα πρέπει να εφαρμόζεται στη γεωλογική αποθήκευση CO₂ στην επικράτεια των κρατών μελών, στις αποκλειστικές οικονομικές ζώνες τους και στην υφαλοκρηπίδα τους. Η οδηγία δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται σε έργα που αναλαμβάνονται για σκοπούς έρευνας, ανάπτυξης ή δοκιμής νέων προϊόντων και διαδικασιών των οποίων η συνολική προγραμματισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης είναι μικρότερη από 100 κιλοτόνους. Αυτό το όριο φαίνεται επίσης κατάλληλο για τους σκοπούς άλλων σχετικών κοινοτικών κανονισμών. Η αποθήκευση CO₂ σε συγκροτήματα αποθήκευσης που βρίσκονται εκτός του εδαφικού πεδίου εφαρμογής της παρούσας οδηγίας, καθώς και στη στήλη νερού, θα πρέπει να απαγορευθεί. (12)

Τα κράτη μέλη θα πρέπει να διατηρήσουν το δικαίωμα να καθορίζουν τις περιοχές της επικράτειάς τους στις οποίες ενδέχεται να βρίσκονται οι χώροι αποθήκευσης. Αυτό περιλαμβάνει το δικαίωμα των κρατών μελών να μην επιτρέπουν την αποθήκευση στην επικράτειά τους ή σε ορισμένες περιοχές της ή να δίνουν προτεραιότητα σε κάποια άλλη χρήση του υπεδάφους, όπως η εξερεύνηση, η παραγωγή ή η αποθήκευση υδρογονανθράκων ή η γεωθερμική χρήση υδροφορέων. Στο πλαίσιο αυτό, τα κράτη μέλη θα πρέπει, ειδικότερα, να λαμβάνουν δεόντως υπόψη άλλες επιλογές που σχετίζονται με την ενέργεια για τη χρήση μιας πιθανής τοποθεσίας αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων στρατηγικών επιλογών που σχετίζονται με την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού του οικείου κράτους μέλους πηγές. Η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας αποθήκευσης είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι το αποθηκευμένο CO₂ θα παραμείνει εντελώς και μόνιμα περιορισμένο. Τα κράτη μέλη θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα γεωλογικά χαρακτηριστικά τους, για παράδειγμα τη σεισμικότητά τους, όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικά και αποτελεσματικά κατά την επιλογή των τόπων αποθήκευσης. Η επιλεγμένη τοποθεσία αποθήκευσης πρέπει να διασφαλίζει ότι δεν υπάρχει σημαντικός κίνδυνος διαρροής και ότι δεν υπάρχουν σημαντικές συνέπειες για το περιβάλλον ή την ανθρώπινη υγεία για να φοβηθούμε εάν συμβεί διαρροή. Για το σκοπό αυτό, ο χαρακτηρισμός και η αξιολόγηση πιθανών συμπλεγμάτων αποθήκευσης θα πραγματοποιηθεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες. (12)

Η ενισχυμένη ανάκτηση υδρογονανθράκων (EHR) αναφέρεται στην ανάκτηση υδρογονανθράκων που επιτυγχάνεται επιπλέον αυτών που εξορύσσονται με έγχυση ύδατος ή άλλα μέσα. Το EHR ως τέτοιο δεν περιλαμβάνεται στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας οδηγίας. Ωστόσο, όταν το EHR συνδυάζεται με γεωλογική αποθήκευση CO₂, ισχύουν οι διατάξεις της παρούσας οδηγίας σχετικά με την περιβαλλοντικά ασφαλή αποθήκευση CO₂. Στην περίπτωση αυτή, οι διατάξεις της παρούσας οδηγίας σχετικά με τις διαρροές δεν προορίζονται να ισχύουν για ποσότητες CO₂ που εκλύονται από υπέργειες εγκαταστάσεις που δεν υπερβαίνουν ό,τι είναι απαραίτητο στην κανονική διαδικασία εξόρυξης υδρογονανθράκων, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια της γεωλογικής αποθήκευσης ή με δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Τέτοιες διαρροές ρυθμίζονται από τη συμπερίληψη των τόπων αποθήκευσης στην Οδηγία 2003/87/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 13ης Οκτωβρίου 2003, για τη θέσπιση ενός συστήματος για την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου στην Κοινότητα το οποίο απαιτεί την παράδοση δικαιωμάτων εκπομπής σε περίπτωση διαρροών. (12)

Τα κράτη μέλη πρέπει να διαθέτουν στο κοινό περιβαλλοντικές πληροφορίες σχετικά με την αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς σύμφωνα με την ισχύουσα κοινοτική νομοθεσία. (12)

Τα κράτη μέλη που σκοπεύουν να επιτρέψουν την αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς στην επικράτειά τους πρέπει να προβούν σε αξιολόγηση της διαθέσιμης χωρητικότητας αποθήκευσης εκεί. Η Επιτροπή θα πρέπει να οργανώσει την ανταλλαγή πληροφοριών και καλών πρακτικών μεταξύ των κρατών μελών, στο πλαίσιο της ανταλλαγής πληροφοριών που καθορίζεται στην παρούσα οδηγία. (12)

Τα κράτη μέλη πρέπει να καθορίσουν σε ποιες περιπτώσεις είναι σκόπιμο να πραγματοποιηθεί εξερεύνηση για να ληφθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για την επιλογή της τοποθεσίας. Η εξερεύνηση, δηλαδή οι δραστηριότητες υπόγειας διείσδυσης, πρέπει να υπόκεινται στην υποχρέωση αδειοδότησης. Τα κράτη μέλη δεν χρειάζεται να ορίσουν κριτήρια επιλεξιμότητας για τις διαδικασίες για τη χορήγηση αδειών εξερεύνησης, αλλά όπου το πράττουν θα πρέπει τουλάχιστον να διασφαλίζουν ότι οι διαδικασίες για τη χορήγηση αδειών εξερεύνησης είναι ανοικτές σε όλους τους φορείς που διαθέτουν τις απαραίτητες δυνατότητες. Τα κράτη μέλη πρέπει επίσης να διασφαλίζουν ότι οι άδειες χορηγούνται σύμφωνα με αντικειμενικά, δημόσια και αμερόληπτα κριτήρια. Προκειμένου να προστατευθούν και να ενθαρρυνθούν οι επενδύσεις στην εξερεύνηση, θα πρέπει να χορηγούνται άδειες εξερεύνησης για ορισμένο όγκο και για περιορισμένη περίοδο, κατά την οποία ο κάτοχος της άδειας θα έχει το αποκλειστικό δικαίωμα να εξερευνήσει το δυνητικό συγκρότημα αποθήκευσης CO₂. Τα κράτη μέλη θα πρέπει να διασφαλίσουν ότι οι αντικρουόμενες χρήσεις του συγκροτήματος δεν επιτρέπονται κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Εάν δεν πραγματοποιηθεί καμία δραστηριότητα εντός εύλογου χρονικού διαστήματος, τα κράτη μέλη πρέπει να εξασφαλίσουν την ανάκληση της άδειας εξερεύνησης ώστε να μπορεί να χορηγηθεί σε άλλους φορείς. (12)

5.2.6 Άδειες αποθήκευσης

Δεν πρέπει να γίνεται εκμετάλλευση των χώρων αποθήκευσης χωρίς άδεια αποθήκευσης. Μια τέτοια άδεια θα πρέπει να αποτελεί το θεμελιώδες μέσο για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τις βασικές απαιτήσεις της παρούσας οδηγίας και ότι, κατά συνέπεια, η αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς δεν προκαλεί ζημιά στο περιβάλλον. Κατά τη χορήγηση της άδειας αποθήκευσης, πρέπει να δίνεται προτεραιότητα στον κάτοχο της άδειας εξερεύνησης έναντι των ανταγωνιστών, δεδομένου ότι ο κάτοχος θα έχει γενικά πραγματοποιήσει σημαντικές επενδύσεις. (12)

Κατά την πρώτη φάση εφαρμογής της παρούσας οδηγίας, προκειμένου να διασφαλιστεί η συνεπής εφαρμογή των απαιτήσεων της παρούσας οδηγίας σε ολόκληρη την Κοινότητα, όλες οι αιτήσεις για άδειες αποθήκευσης θα πρέπει να υποβάλλονται στην Επιτροπή κατά την παραλαβή τους. Όλα τα σχέδια αδειών αποθήκευσης θα πρέπει να διαβιβάζονται στην Επιτροπή, ώστε να μπορεί να εκδώσει γνώμη για αυτά τα σχέδια εντός τεσσάρων μηνών από την παραλαβή τους. Οι εθνικές αρχές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη γνώμη αυτή όταν λαμβάνουν την απόφασή τους για την άδεια και να αιτιολογούν τυχόν αποκλίσεις με τη γνώμη της Επιτροπής. Είναι απαραίτητο η αξιολόγηση που πραγματοποιείται σε κοινοτικό επίπεδο να ευνοεί επίσης την προώθηση της εμπιστοσύνης του κοινού στην τεχνολογία CCS. (12)

Συνιστάται η αρμόδια αρχή να αξιολογεί και, κατά περίπτωση, να επικαιροποιεί ή να ανακαλεί την άδεια αποθήκευσης, ιδίως εάν υποπέσει στην αντίληψή της σημαντικές διαρροές ή παρατυπίες, εάν οι αναφορές που υποβάλλονται από τους κατόχους ή οι επιθεωρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αποκαλύπτουν μη συμμόρφωση με την όρους της άδειας ή εάν αντιληφθείτε οποιαδήποτε άλλη παράλειψη συμμόρφωσης με τους όρους της άδειας. Μετά την ανάκληση μιας άδειας, η αρμόδια αρχή πρέπει να αποφασίσει να χορηγήσει νέα άδεια ή να κλείσει τον χώρο αποθήκευσης. Ταυτόχρονα, είναι απαραίτητο η αρμόδια αρχή να αναλάβει την ευθύνη για τον χώρο αποθήκευσης και τις συγκεκριμένες νομικές υποχρεώσεις. Είναι σκόπιμο τα έξοδα που πραγματοποιήθηκαν να επιστραφούν από τον προηγούμενο ιδιοκτήτη. (12)

Υπάρχει ανάγκη να επιβληθούν περιορισμοί στη σύνθεση της ροής CO₂ που να συνάδουν με τον πρωταρχικό σκοπό της γεωλογικής αποθήκευσης, που είναι η απομόνωση των εκπομπών CO₂ από την ατμόσφαιρα, και ότι αυτοί οι περιορισμοί υπαγορεύονται από τους κινδύνους που μπορεί να θέσει η μόλυνση στο αξιοπιστία και ασφάλεια του δικτύου μεταφοράς και αποθήκευσης και για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Για να γίνει αυτό, συνιστάται να ελέγχετε τη σύνθεση της ροής CO₂ πριν από την έγχυση και την αποθήκευση. Η σύνθεση του ρεύματος CO₂ είναι το αποτέλεσμα των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στις εγκαταστάσεις δέσμευσης. Επιπλέον, σύμφωνα με την παρούσα οδηγία, ο φορέας εκμετάλλευσης του χώρου αποθήκευσης θα πρέπει να δέχεται και να εγγχεί ρεύματα CO₂ μόνο εάν έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση της σύνθεσης, συμπεριλαμβανομένων των διαβρωτικών ουσιών, των ρεμάτων και αξιολόγηση κινδύνου και εάν αυτό έχει δείξει ότι τα επίπεδα ρύπανσης των ροών CO₂ είναι σύμφωνα με τα κριτήρια σύνθεσης που προβλέπονται στην παρούσα οδηγία. (12)

5.2.7 Παρακολούθηση διαδικασιών

Η παρακολούθηση είναι απαραίτητη για να αξιολογηθεί εάν το CO₂ που εγχύεται συμπεριφέρεται όπως αναμένεται, να ανιχνευθεί η ύπαρξη πιθανών διαρροών και να καθοριστεί εάν η διαρροή που ανιχνεύεται συνιστά κίνδυνο για το περιβάλλον ή την ανθρώπινη υγεία. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο τα κράτη μέλη να διασφαλίσουν ότι κατά τη φάση λειτουργίας ο φορέας εκμετάλλευσης διενεργεί παρακολούθηση του συγκροτήματος αποθήκευσης και των εγκαταστάσεων έγχυσης σύμφωνα με σχέδιο παρακολούθησης που καταρτίζεται σύμφωνα με ειδικές απαιτήσεις. Το σχέδιο πρέπει να υποβληθεί στην αρμόδια αρχή και να εγκριθεί από αυτήν. Σε περίπτωση που ο γεωλογικός χώρος αποθήκευσης βρίσκεται κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, η παρακολούθηση πρέπει επίσης να προσαρμόζεται στις ειδικές συνθήκες διαχείρισης των δραστηριοτήτων CCS στο θαλάσσιο περιβάλλον. (12)

Ο φορέας εκμετάλλευσης θα πρέπει να διαβιβάζει, μεταξύ άλλων, τα αποτελέσματα της παρακολούθησης στην αρμόδια αρχή τουλάχιστον μία φορά το χρόνο. Επιπλέον, τα κράτη μέλη θα πρέπει να θεσπίσουν σύστημα επιθεωρήσεων για να διασφαλίζουν ότι η λειτουργία του χώρου αποθήκευσης πραγματοποιείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της παρούσας οδηγίας. (12)

5.2.8 Κλείσιμο τοποθεσίας αποθήκευσης

Ένας χώρος αποθήκευσης πρέπει να κλείσει μόλις πληρούνται οι σχετικοί όροι που ορίζονται στην άδεια, κατόπιν αιτήματος του κατόχου μετά από άδεια της αρμόδιας αρχής ή όταν η αρμόδια αρχή το αποφασίσει μετά την ανάκληση άδειας αποθήκευσης. (12)

Μετά το κλείσιμο ενός χώρου αποθήκευσης, ο φορέας εκμετάλλευσης θα πρέπει να παραμένει υπεύθυνος για τη συντήρηση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο, την αναφορά και τη διορθωτική δράση σύμφωνα με τις απαιτήσεις της παρούσας οδηγίας, βάσει σχεδίου που υποβάλλεται και εγκρίνεται από την αρμόδια αρχή, καθώς και όσον αφορά όλες τις υποχρεώσεις που απορρέουν από άλλες κοινοτικές διατάξεις, έως ότου η ευθύνη για τον χώρο μεταβιβαστεί στην αρμόδια αρχή. (12)

Θα πρέπει να γίνουν οικονομικές ρυθμίσεις για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τις υποχρεώσεις κλεισίματος και μετά το κλείσιμο. Τα κράτη μέλη θα πρέπει να διασφαλίζουν ότι ο δυνητικός φορέας εκμετάλλευσης έχει λάβει οικονομικά μέτρα, παρέχοντας οικονομική εγγύηση ή οποιοδήποτε άλλο ισοδύναμο μέτρο, ώστε να είναι έγκυρα και αποτελεσματικά πριν από την έναρξη της ένεσης. (12)

5.2.9 Μεταβίβαση ευθύνης

Η ευθύνη για τον τόπο αποθήκευσης και οι συγκεκριμένες νομικές υποχρεώσεις θα πρέπει να μεταβιβάζονται στην αρμόδια αρχή μόνο όταν όλα τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν ότι το αποθηκευμένο CO₂ θα παραμείνει πλήρως και μόνιμα περιορισμένο. Για το σκοπό αυτό, καλό είναι ο κάτοχος να υποβάλει αναφορά στην αρμόδια αρχή για έγκριση της μεταβίβασης. Κατά την πρώτη φάση εφαρμογής της παρούσας οδηγίας, προκειμένου να διασφαλιστεί η συνεπής εφαρμογή των απαιτήσεων της παρούσας οδηγίας σε ολόκληρη την Κοινότητα, όλες οι εκθέσεις θα πρέπει να παρέχονται στην Επιτροπή μόλις παραληφθούν. Τα σχέδια εγκριτικών αποφάσεων θα πρέπει να διαβιβάζονται στην Επιτροπή ώστε να μπορεί να εκδώσει γνώμη επ' αυτών εντός τεσσάρων μηνών από την παραλαβή τους. Οι εθνικές αρχές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη γνώμη αυτή όταν λαμβάνουν την απόφασή τους για την έγκριση και να αιτιολογούν τυχόν αποκλίσεις με τη γνώμη της Επιτροπής. Η επανεξέταση των σχεδίων εγκριτικών αποφάσεων θα πρέπει, όπως και η επανεξέταση των σχεδίων κοινοτικών αδειών αποθήκευσης, να συμβάλλει επίσης στην οικοδόμηση της εμπιστοσύνης του κοινού στην τεχνολογία CCS.

Άλλες ευθύνες εκτός από το κλείσιμο του χώρου αποθήκευσης και την περίοδο μετά τη μεταφορά των νομικών υποχρεώσεων στην αρμόδια αρχή θα πρέπει να αντιμετωπίζονται σε εθνικό επίπεδο. (12)

Μετά τη μεταβίβαση της ευθύνης, η παρακολούθηση θα πρέπει να μειωθεί σε επίπεδο που εξακολουθεί να επιτρέπει τον εντοπισμό μεγάλων διαρροών ή ανωμαλιών, αλλά θα πρέπει να εντατικοποιείται ξανά εάν εντοπιστούν μεγάλες διαρροές ή ανωμαλίες. Ομοίως, μετά τη μεταβίβαση της ευθύνης, η αρμόδια αρχή δεν θα απαιτήσει από τον προηγούμενο ιδιοκτήτη τα έξοδα που πραγματοποιήθηκαν, εκτός από την περίπτωση υπαιτιότητας ή αμέλειας του ιδιοκτήτη πριν από τη μεταφορά του χώρου αποθήκευσης. (12)

Μετά τη μεταβίβαση της ευθύνης, οι εθνικές αρχές ενδέχεται να αναλάβουν δαπάνες, όπως το κόστος παρακολούθησης, που σχετίζεται με την αποθήκευση CO₂. Ως εκ τούτου, ο φορέας εκμετάλλευσης πρέπει να καταβάλει οικονομική συνεισφορά στην αρμόδια αρχή πριν από τη μεταφορά της ευθύνης, σύμφωνα με τις λεπτομέρειες που θα καθορίσουν τα κράτη μέλη. Αυτή η χρηματοδοτική συνεισφορά πρέπει να καλύπτει, τουλάχιστον, το αναμενόμενο κόστος παρακολούθησης για μια περίοδο 30 ετών. Το επίπεδο της χρηματοδοτικής συνεισφοράς θα πρέπει να καθοριστεί σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές που θα εγκρίνει η Επιτροπή προκειμένου να συμβάλει στη διασφάλιση της συνέπειας στην εφαρμογή των απαιτήσεων της παρούσας οδηγίας σε ολόκληρη την Κοινότητα. (12)

5.2.10 Θεσμική και νομοθετική διαμόρφωση

Η πρόσβαση σε δίκτυα μεταφοράς και χώρους αποθήκευσης CO₂, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική θέση των δυνητικών χρηστών στην Ένωση, θα μπορούσε να εξαρτήσει την είσοδο ή την ανταγωνιστικότητα στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και ενέργειας, ιδίως ως συνάρτηση των σχετικών τιμών άνθρακα και CCS. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να ληφθούν οι απαραίτητες διατάξεις για να δοθεί η δυνατότητα στους δυνητικούς χρήστες να αποκτήσουν τέτοια πρόσβαση. Κάθε κράτος μέλος θα πρέπει να καθορίσει τον τρόπο με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί αυτό, σύμφωνα με τους στόχους της δίκαιης, ανοικτής και χωρίς διακρίσεις πρόσβασης και λαμβάνοντας υπόψη, ιδίως, τη δυνατότητα μεταφοράς και αποθήκευσης που είναι ή μπορεί να είναι εύλογα διαθέσιμη καθώς και το ποσοστό των υποχρεώσεων μείωσης του CO₂ βάσει των διεθνών νομικών πράξεων και των κοινοτικών κανονισμών που πρέπει να εκπληρώσει χάρη στο CCS. Οι αγωγοί μεταφοράς CO₂ θα πρέπει να σχεδιάζονται, στο μέτρο του δυνατού, για να διευκολύνουν την πρόσβαση για ροές CO₂ που πληρούν λογικά ελάχιστα όρια σύνθεσης. Τα κράτη μέλη θα πρέπει επίσης να δημιουργήσουν μηχανισμούς επίλυσης διαφορών που να επιτρέπουν την ταχεία επίλυση διαφορών που σχετίζονται με την πρόσβαση σε δίκτυα μεταφορών και χώρους αποθήκευσης. (12)

Θα πρέπει να θεσπιστούν διατάξεις που να διασφαλίζουν ότι σε περιπτώσεις διασυνοριακής μεταφοράς CO₂ και διασυνοριακών τόπων ή συγκροτημάτων αποθήκευσης, οι αρμόδιες αρχές του κράτους μέλους συμμορφώνονται από κοινού με τις απαιτήσεις της παρούσας οδηγίας και της άλλης κοινοτικής νομοθεσίας. (12)

Η αρμόδια αρχή θα πρέπει να καταρτίσει και να τηρεί μητρώο των χορηγηθεισών αδειών αποθήκευσης και όλων των κλειστών χώρων αποθήκευσης και των γύρω συγκροτημάτων αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των χαρτών της χωρικής τους έκτασης, τους οποίους οι εθνικές αρχές λαμβάνουν υπόψη κατά τις διαδικασίες σχεδιασμού και αδειοδότησης. Συνιστάται η κοινοποίηση αυτής της καταχώρισης στην Επιτροπή. (12)

Είναι απαραίτητο τα κράτη μέλη να υποβάλουν έκθεση σχετικά με την εφαρμογή της παρούσας οδηγίας με βάση τα ερωτηματολόγια που καταρτίζει η Επιτροπή, σχετικά με την τυποποίηση και τον εξορθολογισμό των εκθέσεων που σχετίζονται με την εφαρμογή ορισμένων περιβαλλοντικών οδηγιών. (12)

Τα κράτη μέλη πρέπει να θεσπίσουν το σύστημα κυρώσεων που θα επιβάλλεται για παραβάσεις των εθνικών διατάξεων που θεσπίζονται σύμφωνα με την παρούσα

οδηγία. Αυτές οι κυρώσεις πρέπει να είναι αποτελεσματικές, αναλογικές και αποτρεπτικές. (12)

Ειδικότερα, η Επιτροπή θα πρέπει να εξουσιοδοτηθεί να τροποποιεί τα παραρτήματα. (12)

Η έκδοση της παρούσας οδηγίας θα πρέπει να διασφαλίζει υψηλό επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας έναντι των κινδύνων της αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς. (12)

Η μετάβαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα απαιτεί, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με ορυκτά καύσιμα, να γίνονται νέες επενδύσεις που υποστηρίζουν σημαντικές μειώσεις των εκπομπών. Η οικονομική σκοπιμότητα της μεταφοράς και της μετασκευής θα πρέπει να αξιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη το αναμενόμενο κόστος του CO₂ που αποφεύγεται υπό ειδικές τοπικές συνθήκες σε περίπτωση μετασκευής και το αναμενόμενο κόστος κατανομής CO₂ στην Κοινότητα. Οι προβλέψεις πρέπει να βασίζονται στα πιο πρόσφατα δεδομένα που έχουν ληφθεί. Πρέπει επίσης να πραγματοποιηθεί επανεξέταση των τεχνικών επιλογών και ανάλυση των αβεβαιοτήτων στις διαδικασίες αξιολόγησης. Η αρμόδια αρχή πρέπει να καθορίσει εάν πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις βάσει αξιολόγησης που διενεργεί ο φορέας εκμετάλλευσης και άλλων διαθέσιμων πληροφοριών, ιδίως πληροφοριών σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας. (12)

Η Επιτροπή θα πρέπει να προβεί σε αναθεώρηση της παρούσας οδηγίας έως τις 30 Ιουνίου 2015, λαμβάνοντας υπόψη την πείρα που αποκτήθηκε στην αρχική φάση της εφαρμογής της, και να υποβάλει προτάσεις για τροποποιήσεις, εάν χρειάζεται. (12)

Δεδομένου ότι ο στόχος της παρούσας οδηγίας, δηλαδή η δημιουργία ενός νομικού πλαισίου για την περιβαλλοντικά ασφαλή αποθήκευση του CO₂, δεν μπορεί να επιτευχθεί επαρκώς από τα κράτη μέλη και, κατά συνέπεια, λόγω των διαστάσεων ή των επιπτώσεων της δράσης, ο εν λόγω στόχος μπορεί να επιτευχθεί καλύτερα σε κοινοτικό επίπεδο, η Κοινότητα μπορεί να θεσπίζει μέτρα, σύμφωνα με την αρχή της επικουρικότητας που κατοχυρώνεται στο άρθρο 5 της Συνθήκης. Σύμφωνα με την αρχή της αναλογικότητας που ορίζεται στο εν λόγω άρθρο, η παρούσα οδηγία δεν υπερβαίνει τα αναγκαία όρια για την επίτευξη αυτού του στόχου. (12)

Σύμφωνα με το σημείο 34 της διοργανικής συμφωνίας για τη βελτίωση της νομοθεσίας, τα κράτη μέλη ενθαρρύνονται να καταρτίσουν, προς το συμφέρον τους και προς το συμφέρον της Κοινότητας, τους δικούς τους πίνακες, οι οποίοι να παρουσιάζουν, στο μέτρο του δυνατού, τη συμφωνία μεταξύ της παρούσας Οδηγίας και τα μέτρα μεταφοράς στο εθνικό δίκαιο και να δημοσιοποιηθούν. (12)

5.3 Θεσμικό πλαίσιο

Το θεσμικό πλαίσιο αναλύεται στο DIRECTIVE 2009/31/EC σε 41 άρθρα.

Στο Άρθρο 1 αναφέρεται το αντικείμενο και ο σκοπός δηλαδή η αποθήκευση του CO₂ με σκοπό την προφύλαξη ανθρώπων και περιβάλλοντος. (12)

Στο Άρθρο 2 αναφέρεται το πεδίο εφαρμογής, δηλαδή οι γεωλογικοί σχηματισμοί μέσα σε κάθε κράτος μέλος καθώς και που απαγορεύεται η αποθήκευση CO₂. (12)

Στο Άρθρο 4 αναφέρεται η επιλογή των τόπων αποθήκευσης δηλαδή υπάρχουν περιορισμοί σε συγκεκριμένους τόπους για αποθήκευση εάν πληρούν τα κατάλληλα κριτήρια. (12)

Στο Άρθρο 5 αναφέρεται πως είναι απαραίτητες οι άδειες εξερεύνησης πριν την εξερευνητική εργασία προκειμένου να αποθηκευτεί το CO₂. Σημειώνεται πως οι άδειες οφείλουν να πληρούν αξιόπιστα κριτήρια καθώς επίσης να περιορίζονται χρονικά και χωρικά αλλά ούτε να υπάρχουν αντικρουόμενες χρήσεις του πεδίου αποθήκευσης. (12)

Στο Άρθρο 8 επισημαίνεται πως για να αδειοδοτηθεί ένας πεδίο αποθήκευσης πρέπει να πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις του σχετικού νόμου και ο φορέας εκμετάλλευσης να πληρεί κριτήρια ικανότητας. (12)

Στο Άρθρο 9 για το περιεχόμενο των αδειών αποθήκευσης αναφέρεται πως πρέπει να είναι ορισμένα η συνολική ποσότητα CO₂, η δυνατότητα του ταμειυτήρα, ο ρυθμός έγχυσης, η παρακολούθηση της διαδικασίας και η απαίτηση γνωστοποίησης οποιαδήποτε αστοχίας. (12)

Στο Άρθρο 12 που αναφέρονται τα κριτήρια και η διαδικασία αποδοχής ρεύματος CO₂, σημειώνεται πως οφείλεται να υπάρχει σεβασμός προς το περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία και την κοινοτική νομοθεσία. Ενώ ο φορέας εκμετάλλευσης να αναλαμβάνει ευθύνη για τυχόν κίνδυνο γεωλογικής αλλοίωσης. (12)

Στο Άρθρο 13 προβλέπεται πως ο φορέας εκμετάλλευσης οφείλει να παρακολουθεί τυχόν αστοχίες του ρεύματος CO₂, καθώς και μετανάστευσης και διαρροής του καθώς και ενημέρωσης της ασφάλειας και ακεραιότητας του συγκροτήματος αποθήκευσης. (12)

Στο Άρθρο 14 προβλέπεται η υποβολή εκθέσεων από τον φορέα εκμετάλλευσης. (12)

Στο Άρθρο 15 προβλέπονται επιθεωρήσεις από της αρμόδιες αρχές τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά του πεδίου εκμετάλλευσης. (12)

Στο Άρθρο 16 μεριμνούνται μέτρα σε περίπτωση διαρροών η σημαντικών ανωμαλιών με την αρμόδια αρχή να λαμβάνει μέτρα στην περίπτωση τους. Εάν δεν αναλάβει μέτρα ο φορέας αναλαμβάνει η αρμόδια αρχή προς όφελος της ανθρώπινης υγείας. (12)

Στο Άρθρο 17 αναφέρονται οι υποχρεώσεις κατά το κλείσιμο και μετά το κλείσιμο με τον φορέα εκμετάλλευσης να παραμένει υπεύθυνος για τυχόν διαρροές και μετά το κλείσιμο ενώ στο Άρθρο 18 υποτυπώνεται η μεταβίβαση ευθύνης από τον φορέα εκμετάλλευσης, όχι σε χρόνο λιγότερο από 20 χρόνια και ενώ πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. (12)

Στα Άρθρα 19 και 20 αναλύονται οι χρηματικές εγγυήσεις που πρέπει να πληρούνται από τον φορέα εκμετάλλευσης ώστε να αναλάβει την εκπόνηση του έργου και ο χρηματοδοτικός μηχανισμός όσον αφορά τον φορέα εκμετάλλευσης αντίστοιχα. (12)

Στο Άρθρο 21 αναφέρεται η πρόσβαση στο δίκτυο μεταφοράς και τους τόπους αποθήκευσης όσον αφορά δυνητικούς χρήστες. (12)

Στο Άρθρο 22 προβλέπεται η επίλυση διαφορών ακόμη και αν αυτές είναι διασυνοριακές. (12)

Στο Άρθρο 26 προβλέπεται η ενημέρωση του κοινού όσον αφορά περιβαλλοντικές πληροφορίες που σχετίζονται με την αποθήκευση του CO₂. (12)

Στο Άρθρο 27 προβλέπεται η υποβολή εκθέσεων από τα κράτη μέλη στην Επιτροπή ενώ στο Άρθρο 28 αναφέρεται η επιβολή κυρώσεων προς τα κράτη μέλη στις περιπτώσεις παράβασης των εθνικών διατάξεων που ακολουθούν την παρούσα οδηγία. (12)

5.4 Ανάπτυξη και Πρόοδος της CCS στη Ευρωπαϊκή Ένωση

Ενώ πολλά κράτη μέλη επιτρέπουν τη γεωλογική αποθήκευση CO₂, οι κυβερνήσεις έχουν εφαρμόσει τουλάχιστον προσωρινούς περιορισμούς στην αποθήκευση CO₂ σε αρκετές χώρες. (13)

Στη Δανία, οι κανονισμοί έχουν απαγορεύσει την αποθήκευση έως το 2020, με εξαίρεση την υπεράκτια ανάκτηση πετρελαίου ενισχυμένη με CO₂ (EOR). Η αποθήκευση CO₂ έχει προσωρινά απαγορευτεί στην Τσεχική Δημοκρατία έως το 2020. Η αποθήκευση CO₂ απαγορεύεται στην Πολωνία έως το 2024, εκτός από έργα επίδειξης. (13)

Ο όγκος της περιοχής εξερεύνησης για αποθήκευση CO₂ είναι περιορισμένος σε τρεις χώρες. Ενώ η Πορτογαλία περιορίζει απευθείας τον όγκο, η Βουλγαρία και η Ουγγαρία περιορίζουν το έδαφος της επιφάνειας. Στη Γερμανία, θα επιτρέπεται μόνο περιορισμένη αποθήκευση CO₂ έως το 2018 (έως 4 Mt CO₂ ετησίως και μέγιστο 1,3 Mt ανά έργο). Η αποθήκευση CO₂ απαγορεύεται εκτός από την έρευνα και ανάπτυξη στην Εσθονία, τη Φινλανδία, το Λουξεμβούργο, δύο περιφέρειες στο Βέλγιο (περιφέρεια της πρωτεύουσας των Βρυξελλών και το Βέλγιο ανοικτής θάλασσας) και τη Σλοβενία λόγω των γεωλογικών συνθηκών τους, αλλά επίσης απαγορεύεται εκτός από την R&D²⁰ στην Αυστρία, την Ιρλανδία και τη Λετονία. (13)

Επιπλέον, η αποθήκευση CO₂ δεν επιτρέπεται σε σεισμικά ενεργές περιοχές στην Ιταλία και στην Ελλάδα σε περιοχές όπου το συγκρότημα αποθήκευσης εκτείνεται πέρα από την ελληνική επικράτεια. (13)

Η υπεράκτια αποθήκευση CO₂ επιτρέπεται στη Σουηδία σύμφωνα με τη νέα νομοθεσία που ισχύει από τον Μάρτιο του 2013, και στη Νορβηγία που ρυθμίζεται από τους υπάρχοντες νόμους για την εξερεύνηση πετρελαίου. (13)

²⁰ R&D: Research and Development

6.Οικονομικό Πλαίσιο CCS

6.1 Δέσμευση και συμπίεση

Για τις περισσότερες μεγάλες πηγές CO₂ (π.χ. σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής), το κόστος δέσμευσης CO₂ είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα του συνολικού κόστους CCS. Σε αυτήν την αναφορά, το κόστος δέσμευσης περιλαμβάνει το κόστος συμπίεσης του CO₂ σε πίεση κατάλληλη για μεταφορά μέσω αγωγού (συνήθως περίπου 14 MPa). Ωστόσο, το κόστος τυχόν πρόσθετων ενισχυτικών συμπιεστών που μπορεί να χρειαστούν περιλαμβάνεται στο κόστος μεταφοράς ή/και αποθήκευσης. (8)

Το συνολικό κόστος της δέσμευσης CO₂ περιλαμβάνει τις πρόσθετες κεφαλαιακές απαιτήσεις, συν το πρόσθετο κόστος λειτουργίας και συντήρησης που προκύπτει για οποιαδήποτε συγκεκριμένη εφαρμογή. Για τις τρέχουσες τεχνολογίες, ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους οφείλεται στις ενεργειακές απαιτήσεις για τη σύλληψη και τη συμπίεση. Ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών και οικονομικών παραγόντων που σχετίζονται με το σχεδιασμό και τη λειτουργία τόσο του συστήματος δέσμευσης CO₂ όσο και του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ή της βιομηχανικής διαδικασίας στην οποία εφαρμόζεται, επηρεάζουν το συνολικό κόστος δέσμευσης. Για το λόγο αυτό, το αναφερόμενο κόστος δέσμευσης CO₂ ποικίλλει ευρέως, ακόμη και για παρόμοιες εφαρμογές. (8)

Τα πιο ευρέως μελετημένα συστήματα είναι οι νέοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται στην καύση άνθρακα ή την αεριοποίηση. Για μια σύγχρονη (υψηλής απόδοσης) μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα, η δέσμευση CO₂ με χρήση πλυντηρίου με βάση την αμίνη αυξάνεται το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (COE) κατά περίπου 40 έως 70 τοις εκατό, ενώ μειώνει τις εκπομπές CO₂ ανά κιλοβατώρα (kWh) κατά περίπου 85%. Η ίδια τεχνολογία δέσμευσης CO₂ που εφαρμόζεται σε μια νέα μονάδα συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (NGCC) αυξάνει το COE κατά περίπου 40 έως 70 τοις εκατό. Για μια νέα μονάδα με βάση τον άνθρακα που χρησιμοποιεί σύστημα ολοκληρωμένης αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου (IGCC), μια παρόμοια μείωση του CO₂ χρησιμοποιώντας την τρέχουσα τεχνολογία (στην περίπτωση αυτή, ένας αντιδραστήρας μετατόπισης υδατρίου ακολουθούμενος από ένα σύστημα φυσικής απορρόφησης) αυξάνει το COE κατά 20 σε 55 %. Το χαμηλότερο πρόσθετο κόστος για τα συστήματα IGCC οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στους χαμηλότερους όγκους αερίου και στις χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για τη δέσμευση CO₂ σε σχέση με τα συστήματα που βασίζονται στην καύση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η απουσία βιομηχανικής εμπειρίας με μεγάλης κλίμακας δέσμευση CO₂ στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας σημαίνει ότι αυτοί οι αριθμοί υπόκεινται σε αβεβαιότητες. (8)

Μελέτες δείχνουν ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μονάδες IGCC είναι ελαφρώς υψηλότερες σε κόστος χωρίς δέσμευση και ελαφρώς χαμηλότερες σε κόστος με δέσμευση από τις εγκαταστάσεις PC παρόμοιου μεγέθους που διαθέτουν σύστημα CCS. Κατά μέσο όρο, τα συστήματα NGCC έχουν χαμηλότερο COE από τους δύο

τύπους νέων εγκαταστάσεων με βάση τον άνθρακα με ή χωρίς δέσμευση για λειτουργία βασικού φορτίου. Ωστόσο, το COE για καθένα από αυτά τα συστήματα μπορεί να ποικίλλει σημαντικά λόγω των περιφερειακών διακυμάνσεων στο κόστος καυσίμου, τη χρήση της εγκατάστασης και μια σειρά άλλων παραμέτρων. Το κόστος του NGCC είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην τιμή του φυσικού αερίου, η οποία έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Επομένως, οι συγκρίσεις του κόστους εναλλακτικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν ένα συγκεκριμένο πλαίσιο για να έχουν νόημα. (8)

Για υπάρχοντες σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται στην καύση, η δέσμευση CO₂ μπορεί να επιτευχθεί με την εκ των υστέρων τοποθέτηση ενός καθαριστή αμίνης στην υπάρχουσα μονάδα. Ωστόσο, ένας περιορισμένος αριθμός μελετών δείχνει ότι η επιλογή μετασκευής μετά την καύση είναι πιο οικονομική όταν συνοδεύεται από μια σημαντική ανακατασκευή του λέβητα και του στροβίλου για αύξηση της απόδοσης και της απόδοσης της υπάρχουσας εγκατάστασης μετατρέποντάς την σε υπερκρίσιμη μονάδα. Για ορισμένες εγκαταστάσεις, παρόμοια οφέλη μπορούν να επιτευχθούν με την επανατροφοδότηση με ένα σύστημα IGCC που περιλαμβάνει τεχνολογία δέσμευσης CO₂. Η σκοπιμότητα και το κόστος οποιασδήποτε από αυτές τις επιλογές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις συγκεκριμένες περιστάσεις της τοποθεσίας, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους, της ηλικίας και του τύπου της μονάδας και της διαθεσιμότητας χώρου για την υποδοχή ενός συστήματος δέσμευσης CO₂. Δεν έχει γίνει ακόμη καμία συστηματική σύγκριση της σκοπιμότητας και του κόστους εναλλακτικών επιλογών μετασκευής και ανανέωσης ισχύος για υπάρχουσες εγκαταστάσεις, καθώς και της δυνατότητας για πιο οικονομικά αποδοτικές επιλογές που χρησιμοποιούν προηγμένη τεχνολογία όπως η καύση οξυγόνου. (8)

Επιπλέον, υπάρχει δέσμευση CO₂ στην παραγωγή H₂, ένα προϊόν που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα για καύσιμα και χημική παραγωγή, αλλά επίσης θεωρείται ευρέως ως δυνητικός φορέας ενέργειας για μελλοντικά ενεργειακά συστήματα. Εδώ, το κόστος δέσμευσης CO₂ οφείλεται κυρίως στο κόστος συμπίεσης του CO₂, καθώς ο διαχωρισμός του CO₂ πραγματοποιείται ήδη ως μέρος της διαδικασίας παραγωγής H₂. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι το κόστος δέσμευσης CO₂ για τις τρέχουσες διεργασίες προσθέτει περίπου 5 έως 30 τοις εκατό στο κόστος του προϊόντος H₂. (8)

Εκτός από τις διαδικασίες μετατροπής ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά, το CO₂ θα μπορούσε επίσης να δεσμευτεί σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας που τροφοδοτούνται με βιομάζα. Επί του παρόντος, οι μονάδες βιομάζας είναι μικρής κλίμακας (<100 MWe). Ως εκ τούτου, το προκύπτον κόστος δέσμευσης CO₂ είναι σχετικά υψηλό σε σύγκριση με τα ορυκτά εναλλακτικά. Για παράδειγμα, η δέσμευση 0,19 MtCO₂ ετησίως σε μια μονάδα IGCC βιομάζας 24 MWe εκτιμάται ότι είναι περίπου 82 US\$/tCO₂ (300 US\$/tC), που αντιστοιχεί σε αύξηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας λόγω δέσμευσης περίπου 80 US\$ MWh⁻¹. Ομοίως, το CO₂ θα μπορούσε να δεσμευτεί σε μονάδες H₂ που τροφοδοτούνται από βιομάζα. Το κόστος αναφέρεται ότι είναι μεταξύ 22 και 25 US\$/tCO₂ που αποφεύγεται (80-92 US\$/tC) σε μια μονάδα που παράγει 1 εκατομμύριο Nm³ d⁻¹ H₂. Αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση του κόστους προϊόντος H₂ κατά περίπου 2,7 US\$ GJ⁻¹ (δηλαδή, 20% του κόστους του H₂ χωρίς CCS). Η ανταγωνιστικότητα των συστημάτων CCS βιομάζας είναι πολύ ευαίσθητη στην αξία των μειώσεων των εκπομπών CO₂ και στις σχετικές πιστώσεις

που λαμβάνονται με συστήματα που έχουν ως αποτέλεσμα αρνητικές εκπομπές. Επιπλέον, σημαντικά μεγαλύτερες μονάδες βιομάζας θα μπορούσαν να επωφεληθούν από οικονομίες κλίμακας, μειώνοντας το κόστος των συστημάτων CCS σε γενικά παρόμοια επίπεδα με εκείνα των μονάδων άνθρακα. Ωστόσο, υπάρχει πολύ λίγη εμπειρία με εγκαταστάσεις βιομάζας μεγάλης κλίμακας ακόμη, έτσι ώστε η σκοπιμότητά τους να μην έχει ακόμη αποδειχθεί και το κόστος τους είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. (8)

Οι τεχνολογίες CCS μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Δεδομένου ότι αυτές οι άλλες βιομηχανικές διεργασίες παράγουν αέρια που διαφέρουν πολύ από την άποψη της πίεσης και της συγκέντρωσης CO₂, το κόστος ποικίλλει πολύ ευρέως. Σε ορισμένες από αυτές τις μη ενεργειακές εφαρμογές όπου παράγεται ένα σχετικά καθαρό ρεύμα CO₂ ως υποπροϊόν της διαδικασίας (π.χ. επεξεργασία φυσικού αερίου, παραγωγή αμμωνίας), το κόστος δέσμευσης είναι σημαντικά χαμηλότερο από τη δέσμευση από ορυκτά καύσιμα σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε άλλες διεργασίες όπως η παραγωγή τσιμέντου ή χάλυβα, το κόστος δέσμευσης είναι παρόμοιο, ή ακόμη και υψηλότερο από τη δέσμευση από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση ορυκτών καυσίμων. (8)

Νέες ή βελτιωμένες τεχνολογίες δέσμευσης CO₂, σε συνδυασμό με προηγμένα συστήματα ισχύος και σχεδιασμούς βιομηχανικών διεργασιών, μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος δέσμευσης CO₂ στο μέλλον. Ενώ υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα σχετικά με το μέγεθος και το χρονοδιάγραμμα των μελλοντικών μειώσεων του κόστους, οι μελέτες υποδεικνύουν ότι οι βελτιώσεις στις τρέχουσες εμπορικές τεχνολογίες θα μπορούσαν να μειώσουν το κόστος δέσμευσης CO₂ κατά τουλάχιστον 20-30%, ενώ οι νέες τεχνολογίες που βρίσκονται επί του παρόντος υπό ανάπτυξη ενδέχεται να επιτρέψουν πιο ουσιαστική μείωση του κόστους το μέλλον. Η προηγούμενη εμπειρία δείχνει ότι η πραγματοποίηση μειώσεων κόστους στο μέλλον απαιτεί συνεχή R&D σε συνδυασμό με την ανάπτυξη και υιοθέτηση εμπορικών τεχνολογιών. (8)

6.2 Μεταφορά

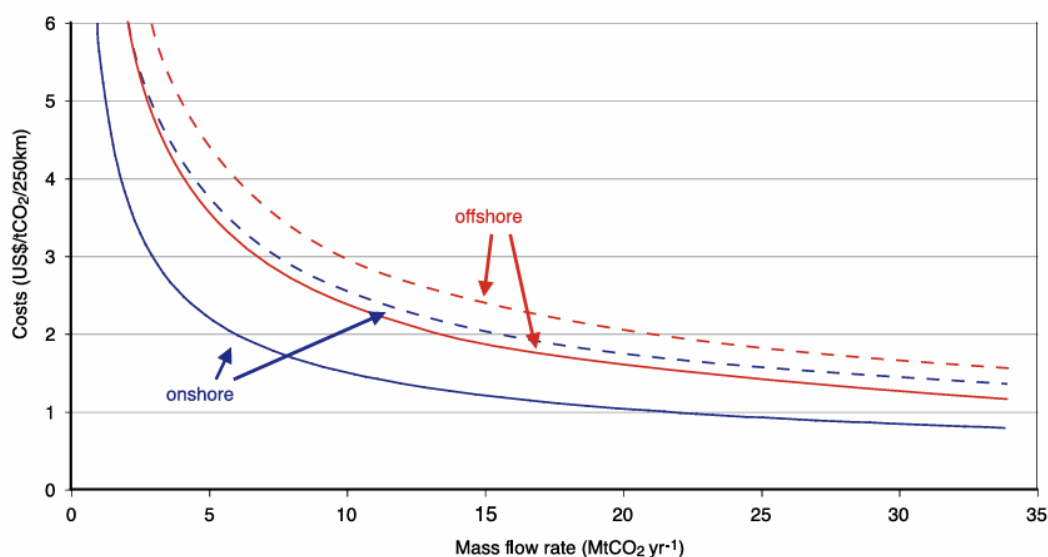
Η πιο κοινή και συνήθως η πιο οικονομική μέθοδος μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων CO₂ είναι μέσω αγωγών. Μια ανταγωνιστική επιλογή κόστους μεταφοράς για μεγαλύτερες αποστάσεις στη θάλασσα μπορεί να είναι η χρήση μεγάλων δεξαμενόπλοιων. (8)

Τα τρία κύρια στοιχεία κόστους για τους αγωγούς είναι το κόστος κατασκευής (π.χ. υλικό, εργασία, πιθανός σταθμός ενίσχυσης), το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (π.χ. παρακολούθηση, συντήρηση, πιθανό κόστος ενέργειας) και άλλα κόστη (π.χ. σχεδιασμός, ασφάλιση, τέλη, δικαίωμα διέλευσης). Ειδικές συνθήκες γης, όπως πυκνοκατοικημένες περιοχές, προστατευόμενες περιοχές όπως εθνικά πάρκα ή διέλευση μεγάλων πλωτών οδών, μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο κόστος. Οι υπεράκτιοι αγωγοί είναι περίπου 40% έως 70% πιο δαπανηροί από τους χερσαίους σωλήνες ίδιου μεγέθους. Η κατασκευή αγωγών θεωρείται μια ώριμη τεχνολογία και η βιβλιογραφία δεν προβλέπει πολλές μειώσεις κόστους. (8)

Οι οικονομίες κλίμακας μειώνουν δραματικά το κόστος, αλλά η μεταφορά σε ορεινές ή πυκνοκατοικημένες περιοχές θα μπορούσε να αυξήσει το κόστος. (8)

Τα βυτιοφόρα θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά. Εδώ, τα κύρια στοιχεία κόστους είναι τα ίδια τα δεξαμενόπλοια (ή το κόστος ναύλωσης), οι εγκαταστάσεις φόρτωσης και εκφόρτωσης, οι ενδιάμεσες εγκαταστάσεις αποθήκευσης, τα λιμενικά τέλη και τα καύσιμα καυσίμων. Το κόστος κατασκευής μεγάλων δεξαμενόπλοιων CO₂ ειδικού σκοπού δεν είναι επακριβώς γνωστό αφού κανένα δεν έχει κατασκευαστεί μέχρι σήμερα. Με βάση τα προκαταρκτικά σχέδια, το κόστος των δεξαμενόπλοιων CO₂ υπολογίζεται σε 34 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ για πλοία 10.000 τόνων, 58 εκατομμύρια δολάρια για πλοία 30.000 τόνων και 82 εκατομμύρια δολάρια για πλοία χωρητικότητας 50.000 τόνων. (8)

Η μεταφορά 6 MtCO₂ ετησίως, μια απόσταση 500 km με πλοίο θα κόστιζε περίπου 10 US\$/tCO₂ (37 US\$/tC) ή 5 US\$/tCO₂/250km (18 US\$/tC/250km). Ωστόσο, δεδομένου ότι το κόστος είναι σχετικά μη ευαίσθητο στην απόσταση, η μεταφορά των ίδιων 6 MtCO₂ σε απόσταση 1250 km θα κόστιζε περίπου 15 US\$/tCO₂ (55 US\$/tC) ή 3 US\$/tCO₂/250km (11 US\$/tC /250 χλμ.). Αυτό είναι κοντά στο κόστος της μεταφοράς με αγωγούς, υποδεικνύοντας το σημείο ότι η μεταφορά με πλοίο γίνεται ανταγωνιστική από πλευράς κόστους με τη μεταφορά με αγωγούς εάν χρειάζεται να μεταφερθεί CO₂ σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Ωστόσο, το νεκρό σημείο πέρα από το οποίο η μεταφορά των πλοίων γίνεται φθηνότερη από τη μεταφορά με αγωγούς δεν είναι απλώς θέμα απόστασης. περιλαμβάνει πολλές άλλες πτυχές. (8)



Διάγραμμα 1: Το εύρος του κόστους μεταφοράς CO₂ για χερσαίους και υπεράκτιους αγωγούς ανά 250 km, «κανονικές» συνθήκες εδάφους. Το σχήμα δείχνει χαμηλές (συμπαγείς γραμμές) και υψηλές περιοχές (διακεκομμένες γραμμές). (8)

6.3 Αποθήκευση

6.3.1 Γεωλογική αποθήκευση

Επειδή οι τεχνολογίες και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούνται για τη γεωλογική αποθήκευση χρησιμοποιούνται ευρέως στις βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού

αερίου, οι εκτιμήσεις κόστους μπορούν να γίνουν με σιγουριά. Ωστόσο, θα υπάρχει σημαντικό εύρος και μεταβλητότητα του κόστους λόγω συγκεκριμένων παραγόντων της τοποθεσίας: ξηρά έναντι υπεράκτιων, το βάθος της δεξαμενής και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού αποθήκευσης (π.χ. διαπερατότητα, πάχος κ.λπ.). Οι αντιπροσωπευτικές εκτιμήσεις για το κόστος αποθήκευσης σε σχηματισμούς αλατούχου και αχρησιμοποίητα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι συνήθως μεταξύ 0,5–8,0 US\$/tCO₂ αποθηκευμένο (2–29 US\$/tC). Το χαμηλότερο κόστος αποθήκευσης θα σχετίζεται με χερσαίες, ρηχές δεξαμενές υψηλής διαπερατότητας ή/και την επαναχρησιμοποίηση γεωτρήσεων και υποδομών σε αχρησιμοποίητα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. (8)

Το πλήρες φάσμα των εκτιμήσεων κόστους για μεμονωμένες επιλογές είναι πολύ μεγάλο. Οι πληροφορίες κόστους για την παρακολούθηση της αποθήκευσης είναι επί του παρόντος περιορισμένες, αλλά η παρακολούθηση εκτιμάται ότι θα προσθέσει 0,1–0,3 US\$ ανά τόνο αποθηκευμένου CO₂ (0,4–1,1 US\$/tC). Αυτές οι εκτιμήσεις δεν περιλαμβάνουν καμία αποκατάσταση φρέατος ή μακροπρόθεσμες υποχρεώσεις. Το κόστος της παρακολούθησης της αποθήκευσης θα εξαρτηθεί από το ποιες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για πόσο καιρό, τις κανονιστικές απαιτήσεις και πώς θα εξελιχθούν οι μακροπρόθεσμες στρατηγικές παρακολούθησης. (8)

Όταν η αποθήκευση συνδυάζεται με EOR, ενισχυμένη ανάκτηση αερίου (EGR) ή ECBM, τα οφέλη της βελτιωμένης παραγωγής μπορούν να αντισταθμίσουν μέρος του κόστους δέσμευσης και αποθήκευσης. Οι χερσαίες επιχειρήσεις EOR έχουν πληρώσει στην περιοχή από 10–16 US\$ ανά τόνο CO₂ (37–59 US\$/tC). Το οικονομικό όφελος της ενισχυμένης παραγωγής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε ως βάση για αυτήν την έκθεση δεν έλαβε υπόψη την άνοδο των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου που ξεκίνησε το 2003. Για παράδειγμα, το πετρέλαιο στα 50 US\$/βαρέλι θα μπορούσε να δικαιολογήσει πίστωση 30 US\$/tCO₂ (110 US\$/tC). Τα οικονομικά οφέλη από τη βελτιωμένη παραγωγή καθιστούν το EOR και το ECBM πιθανές πρώιμες οικονομικά αποδοτικές επιλογές για γεωλογική αποθήκευση. (8)

6.3.2 Ωκεάνια αποθήκευση

Το κόστος αποθήκευσης των ωκεανών είναι συνάρτηση της απόστασης από τη θάλασσα και του βάθους έγχυσης. Οι συνιστώσες του κόστους περιλαμβάνουν την υπεράκτια μεταφορά και την έγχυση του CO₂. Έχουν εξεταστεί διάφορα σχέδια για την αποθήκευση των ωκεανών. Περιλαμβάνουν:

- βυτιοφόρα για τη μεταφορά υγρού CO₂ χαμηλής θερμοκρασίας (–55 έως –50°C), υψηλής πίεσης (0,6–0,7 MPa) σε μια πλατφόρμα, από όπου θα μπορούσε να απελευθερωθεί μέσω κατακόρυφου σωλήνα σε βάθος 3000 m·
- πλοία μεταφοράς για τη μεταφορά υγρού CO₂, με έγχυση μέσω ενός συρόμενου σωλήνα από ένα κινούμενο πλοίο διανομής·
- υποθαλάσσιους αγωγούς για τη μεταφορά CO₂ σε σημείο έγχυσης. (8)

6.3.3 Αποθήκευση μέσω ανθράκωσης ορυκτών

Η ενανθράκωση ορυκτών βρίσκεται ακόμα στη φάση R&D, επομένως το κόστος είναι αβέβαιο. Περιλαμβάνουν τη συμβατική εξόρυξη και τη χημική επεξεργασία. Το κόστος εξόρυξης περιλαμβάνει εξόρυξη μεταλλεύματος, σύνθλιψη και άλεση, αποκατάσταση ορυχείων και διάθεση απορριμμάτων και ανθρακικών αλάτων. Πρόκειται για συμβατικές εργασίες εξόρυξης και αρκετές μελέτες έχουν παράγει εκτιμήσεις κόστους 10 US\$/tCO₂ (36 US\$/tC) ή λιγότερο. Δεδομένου ότι αυτές οι εκτιμήσεις βασίζονται σε παρόμοιες ώριμες και αποτελεσματικές λειτουργίες, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα ισχυρό χαμηλότερο όριο στο κόστος αποθήκευσης ορυκτών. Το κόστος ανθράκωσης περιλαμβάνει τη χημική ενεργοποίηση και την ανθράκωση. Η μετάφραση των σημερινών εργαστηριακών εφαρμογών σε βιομηχανική πρακτική αποφέρει χονδρικές εκτιμήσεις κόστους περίπου 50–100 US\$/tCO₂ αποθηκευμένο (180–370 US\$/tC). Το κόστος και οι ενεργειακές κυρώσεις (30–50% της παραγωγής της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής) κυριαρχούνται από την ενεργοποίηση του μεταλλεύματος που είναι απαραίτητο για την επιτάχυνση της αντίδρασης ενανθράκωσης. Για να γίνει πρακτική η αποθήκευση ορυκτών, η πρόσθετη έρευνα πρέπει να μειώσει το κόστος του σταδίου ανθράκωσης κατά τρεις έως τέσσερις φορές και να εξαλείψει ένα σημαντικό μέρος της ενεργειακής ποινής, για παράδειγμα, αξιοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερο τη θερμότητα της ανθράκωσης. (8)

6.4 Ενσωματωμένα συστήματα

Το κόστος εξαρτημάτων που δίνεται σε αυτή την ενότητα παρέχει μια βάση για τον υπολογισμό του κόστους του ενσωματωμένου συστήματος. Ωστόσο, το κόστος του μετριασμού των εκπομπών CO₂ δεν μπορεί να υπολογιστεί απλώς αθροίζοντας το κόστος εξαρτημάτων για δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση σε μονάδες «US\$/tCO₂». Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ποσότητα του CO₂ που δεσμεύεται θα είναι διαφορετική από την ποσότητα των ατμοσφαιρικών εκπομπών CO₂ που «αποφεύγονται» κατά την παραγωγή μιας δεδομένης ποσότητας ενός χρήσιμου προϊόντος (π.χ. μια κιλοβατώρα ηλεκτρικής ενέργειας ή ένα κιλό H₂). Επομένως, κάθε κόστος που εκφράζεται ανά τόνο CO₂ θα πρέπει να ορίζεται με σαφήνεια ως προς τη βάση του, π.χ. είτε ως βάση δέσμευσης είτε ως βάση αποφυγής. Το κόστος μετριασμού αντιπροσωπεύεται καλύτερα ως κόστος αποφυγής. (8)

Το κόστος μετριασμού (αποφεύγεται US\$/tCO₂) εξαρτάται από το πλαίσιο και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τι επιλέγεται ως μονάδα αναφοράς. Το κόστος μετριασμού εδώ αντιπροσωπεύει το πρόσθετο κόστος δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ από έναν συγκεκριμένο τύπο εγκατάστασης. (8)

Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι χρήσιμο να υπολογιστεί το κόστος του CO₂ που αποφεύγεται με βάση μια μονάδα αναφοράς που είναι διαφορετική από τη μονάδα CCS (π.χ. μια μονάδα PC ή IGCC με CCS χρησιμοποιώντας μια μονάδα αναφοράς NGCC).

Ένα κόστος μετριασμού του CO₂ μπορεί επίσης να καθοριστεί για μια συλλογή εγκαταστάσεων, όπως ένα εθνικό ενεργειακό σύστημα, με την επιφύλαξη ενός δεδομένου επιπέδου μείωσης του CO₂. Σε αυτήν την περίπτωση, το κόστος προϊόντος

σε επίπεδο εργοστασίου που παρουσιάζεται σε αυτήν την ενότητα θα χρησιμοποιηθεί ως βασικές εισροές σε ενεργειακά-οικονομικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως για ανάλυση πολιτικής και για τον ποσοτικό προσδιορισμό των συνολικών στρατηγικών μετριασμού και του κόστους για τη μείωση του CO₂. (8)

6.5 Σύστημα Δικαιωμάτων Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU ETS)

Σε λειτουργία από το 2005, το Σύστημα Δικαιωμάτων Εκπομπών της ΕΕ (EU ETS) είναι το παλαιότερο ETS για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής στο εσωτερικό. Πιο συγκεκριμένα, το EU ETS είναι ένα σύστημα cap-and-trade: επιβάλλει ανώτατο όριο στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, υποξειδίου του αζώτου και υπερφουορανθράκων από περίπου 10.000 εγκαταστάσεις και αεροσκάφη που καταναλώνουν βαριά ενέργεια και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, καλύπτοντας περίπου το 40% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) της ΕΕ. Με απλά λόγια, το ανώτατο όριο ενός ETS δίνεται από την προσφορά δικαιωμάτων εκπομπής, ενώ η ζήτηση για δικαιώματα εξαρτάται από τα επίπεδα παραγωγής και την ένταση εκπομπών των ρυθμιζόμενων φορέων, μεταξύ άλλων παραγόντων. Η αλληλεπίδραση της ζήτησης και της προσφοράς δικαιωμάτων εκπομπής καθορίζει την τιμή των δικαιωμάτων, δηλαδή την τιμή του άνθρακα. Το ανώτατο όριο, και μαζί του οι εκπομπές, μειώνονται με την πάροδο του χρόνου. Στο EU ETS, υποθέτοντας ότι το ανώτατο όριο θα προσαρμοστεί στο νέο επίπεδο φιλοδοξίας της ΕΕ για το κλίμα στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, το ίδιο το ανώτατο όριο θα φτάσει το 2030 σε επίπεδο 61% χαμηλότερο από αυτό των εκπομπών του 2005. (10)

Τα προγράμματα δικαιωμάτων εκπομπών έχουν αναλάβει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στην περιβαλλοντική πολιτική τις τελευταίες δεκαετίες. Το 2021, το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξακολουθούσε να είναι το μεγαλύτερο πρόγραμμα ανώτατων ορίων και εμπορίας στον κόσμο με βάση την αξία συναλλαγών. Το EU ETS ξεκίνησε το 2005, χορηγώντας άδειες εμπορεύσιμων εκπομπών σε περισσότερους από 12.000 σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και βιομηχανικές εγκαταστάσεις σε 31 χώρες, που αντιπροσωπεύουν πάνω από το 40% των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου της ΕΕ. (14)

Μεταξύ 2005 και 2012, οι επαληθευμένες εκπομπές από ελεγχόμενες εγκαταστάσεις μειώθηκαν κατά 17% σε σταθερό εύρος, αλλά αυτή η μείωση μπορεί να μην προκλήθηκε από το EU ETS, επειδή πολλοί άλλοι παράγοντες επηρέασαν τις τάσεις εκπομπών, όπως η οικονομική κρίση του 2008, οι τιμές των καυσίμων και τις βιομηχανικές τάσεις ως συνήθως. Αυτοί οι παράγοντες, σε συνδυασμό με τις σχετικά χαμηλές τιμές άνθρακα στην αγορά ETS της ΕΕ, έχουν οδηγήσει πολλούς να αναρωτιούνται εάν οι εκπομπές θα ήταν υψηλότερες χωρίς την πολιτική. (14)

Όπως όλες οι νέες πρωτοβουλίες δικαιωμάτων εκπομπών σε όλο τον κόσμο, το EU ETS αναμενόταν να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα με οικονομικά αποδοτικό τρόπο και να δώσει ώθηση στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Ωστόσο, ήδη από την εισαγωγή του, υπήρξαν ανησυχίες σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις του EU ETS στην ανταγωνιστικότητα των ρυθμιζόμενων επιχειρήσεων.

Πράγματι, οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί μπορεί να προσθέτουν κόστος στις εταιρείες και να εκτρέπουν τους πόρους μακριά από παραγωγικές δραστηριότητες, επιβραδύνοντας έτσι την αύξηση της παραγωγικότητας. Ορισμένοι, επομένως, περίμεναν ότι το EU ETS θα επηρεάσει την ανταγωνιστικότητα της ευρωπαϊκής βιομηχανίας, ιδίως επειδή η αυστηρότητα των πολιτικών για την κλιματική αλλαγή είναι χαμηλότερη εκτός Ευρώπης, θέτοντας τις εταιρείες που ρυθμίζονται βάσει του EU ETS σε μειονεκτική θέση σε σχέση με τους ξένους ανταγωνιστές τους. Κατά συνέπεια, οι ευρωπαϊκές επιχειρήσεις μπορεί να μετακινήσουν την παραγωγική τους ικανότητα σε χώρες με σχετικά χαλαρότερες πολιτικές, προκαλώντας διαρροή ρύπανσης που προκαλείται από την πολιτική, όπως προβλέπεται από την υπόθεση του καταφυγίου της ρύπανσης. (14)

Μια εναλλακτική άποψη, που διατυπώθηκε από τον Michael Porter (15), είναι ότι οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί όπως το EU ETS ενδέχεται να οδηγήσουν τις ρυθμιζόμενες επιχειρήσεις και την οικονομία στο σύνολό της να γίνουν πιο ανταγωνιστικές διεθνώς, παρέχοντας κίνητρα για φιλική προς το περιβάλλον καινοτομία που δεν θα είχε συνέβη ελλείψει πολιτικής. Και οι δύο αυτές απόψεις έχουν λάβει μεγάλη προσοχή από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της χρηματοπιστωτικής κρίσης του 2008. Πράγματι, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής της ΕΕ έχουν συχνά διατυπώσει το όραμά τους ότι το EU ETS θα ήταν η κινητήρια δύναμη της καινοτομίας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα και της οικονομικής ανάπτυξης. Εμπειρικά στοιχεία έδειξαν ότι το EU ETS αύξησε τη δραστηριότητα καινοτομίας σε τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα μεταξύ των ρυθμιζόμενων οντοτήτων έως και 30% σε σύγκριση με ένα αντίθετο σενάριο, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι η ανταγωνιστικότητα των ρυθμιζόμενων εταιρειών έχει κατά συνέπεια βελτιωθεί. (14)

Το EU ETS προσφέρει μια μοναδική ευκαιρία για τη διερεύνηση της αιτιώδους επίδρασης μιας περιβαλλοντικής πολιτικής στις περιβαλλοντικές επιδόσεις και τα οικονομικά αποτελέσματα των επιχειρήσεων, επειδή η πολιτική σχεδιάστηκε για να καλύπτει μόνο εγκαταστάσεις πάνω από ένα ορισμένο όριο παραγωγικής ικανότητας. Οι εγκαταστάσεις που πέφτουν κάτω από αυτό το όριο δεν καλύπτονται από τους κανονισμούς EU ETS, παρόλο που μπορεί να είναι πολύ παρόμοιες με ρυθμιζόμενες οντότητες. Μπορούμε επομένως να εκμεταλλευτούμε αυτά τα κριτήρια ένταξης σε επίπεδο εγκατάστασης για να συγκρίνουμε εγκαταστάσεις ή εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην ίδια χώρα και τομέα και με παρόμοια χαρακτηριστικά, αλλά που έχουν ενταχθεί σε διαφορετικά ρυθμιστικά καθεστώτα το 2005. Αυτό παρέχει την ευκαιρία να εφαρμοστεί το είδος των οιονεί πειραματικών τεχνικών που ταιριάζουν περισσότερο στην αξιολόγηση των αιτιακών επιπτώσεων των περιβαλλοντικών πολιτικών. Συγκρίνουμε οντότητες ETS και μη ETS τόσο πριν όσο και μετά την έναρξη του EU ETS, εφαρμόζοντας ένα σχέδιο μελέτης αντίστοιχης διαφοράς στις διαφορές που μας επιτρέπει να ελέγχουμε συγχυτικούς παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τις ρυθμιζόμενες όσο και τις μη ρυθμιζόμενες οντότητες (συνθήκες ζήτησης, τιμές εισροών, τομέας - και πολιτικές για συγκεκριμένες χώρες, κ.λπ.), καθώς και ετερογένεια σε επίπεδο εγκατάστασης και εταιρείας. (14)

Τα αλληλένδετα στοιχεία υποστηρίζουν την περιγραφή των τεσσάρων συστατικών στοιχείων του EU ETS: [i] Στόχοι πολιτικής που επιδιώκονται από την αρμόδια δημόσια αρχή (η Ευρωπαϊκή Ένωση, με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (ΕΚ) ως εν

ενεργεία διοίκηση), [ii] Κόστος μείωσης για την επίτευξη των επιδιωκόμενων στόχων, [iii] Τιμολόγηση των εκπομπών άνθρακα, [iv] Κατανομές εμπορεύσιμων αδειών εκπομπών. (16)

Μια απλή ματιά στα δεδομένα σε επίπεδο τομέα δείχνει ότι οι εκπομπές CO₂ μειώνονται ταχύτερα μετά την εφαρμογή του EU ETS σε κάθε τομέα που καλύπτεται από την πολιτική. Για την αξιολόγηση της αιτιώδους επίδρασης του EU ETS στις εκπομπές άνθρακα, χρησιμοποιούμε δεδομένα εκπομπών σε επίπεδο εγκατάστασης από τα εθνικά Μητρώα Έκλυσης και Μεταφοράς Ρύπανσης (PRTR) της Γαλλίας, της Ολλανδίας, της Νορβηγίας και του Ηνωμένου Βασιλείου. Σε αντίθεση με τις περισσότερες άλλες ευρωπαϊκές χώρες, τα PRTR αυτών των τεσσάρων χωρών χαρακτηρίζονται από χαμηλό όριο αναφοράς για εκπομπές άνθρακα (κάτω από 10 kt ετησίως) και επομένως περιλαμβάνουν δεδομένα για πολλές εγκαταστάσεις που δεν καλύπτονται από το EU ETS, το οποίο μπορεί να προσφέρει κατάλληλη ομάδα ελέγχου έναντι της οποίας θα συγκρίνονται οι επιδόσεις εκπομπών των ελεγχόμενων εγκαταστάσεων. Τα αποτελέσματά μας για τις εκπομπές βασίζονται σε 240 ζεύγη EU ETS και παρόμοιες εγκαταστάσεις εκτός EU ETS στις τέσσερις χώρες. Αυτό το μέγεθος δείγματος είναι αναμφισβήτητα μικρό, αλλά αυτό είναι ένα σύνηθες χαρακτηριστικό των μελετών αντιστοίχισης: περιορίζοντας το δείγμα σε εγκαταστάσεις που είναι στενά συγκρίσιμες, μειώνεται απαραίτητα το μέγεθος του δείγματος (εξαιρουμένων των μεγαλύτερων εταιρειών), αλλά προς όφελος του ακριβούς προσδιορισμού του πολιτικού αντίκτυπου γύρω από το όριο ένταξης. (14)

Για να αξιολογήσουμε τον αντίκτυπο του EU ETS στην απόδοση της επιχείρησης, χρησιμοποιούμε ένα νέο σύνολο δεδομένων που συνδυάζει οικονομικά δεδομένα από την Orbis που καταγράφει βασικά χαρακτηριστικά της εταιρείας, συμπεριλαμβανομένων του τομέα δραστηριότητας, των εσόδων, των περιουσιακών στοιχείων, των κερδών και του αριθμού εργαζομένων - με τη Συναλλαγή της Ευρωπαϊκής Ένωσης Ημερολόγιο (EUTL), το οποίο καταγράφει το ρυθμιστικό καθεστώς σε σχέση με το EU ETS. Το σύνολο δεδομένων μας περιλαμβάνει πληροφορίες για περισσότερες από 1 εκατομμύριο εταιρείες σε 31 χώρες, από τις οποίες προσδιορίζουμε περισσότερες από 8200 εταιρείες που ελέγχονται βάσει του EU ETS. Χρησιμοποιώντας αυτό το σύνολο δεδομένων, είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε ρυθμιζόμενες και μη ρυθμιζόμενες εταιρείες τόσο πριν όσο και μετά την κυκλοφορία του EU ETS. Η διαδικασία αντιστοίχισης μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε μια ομάδα 1787 εταιρειών ETS της ΕΕ που να αντιστοιχίζονται με τις πλησιέστερες εταιρείες ETS εκτός ΕΕ με βάση τα χαρακτηριστικά της εταιρείας σε επίπεδο χώρας, τομέα και πριν από το ETS. (14)

Τα αποτελέσματά μας υποδηλώνουν ότι η εισαγωγή του EU ETS συνδέθηκε με στατιστικά σημαντική μείωση των εκπομπών άνθρακα της τάξης του - 10% στις δύο πρώτες φάσεις εμπορίας μεταξύ 2005 και 2012, με δοκιμές ευαισθησίας να υποδεικνύουν επιπτώσεις μεταξύ -7% και - 16%. Αν και αυτά τα ευρήματα περιορίζονται από το μικρό μέγεθος του δείγματος και ενδέχεται να μην είναι εξωτερικά έγκυρα πέρα από αυτό το σύνολο εγκαταστάσεων στις τέσσερις καλυπτόμενες χώρες, προσθέτουν σε ένα αυξανόμενο σύνολο στοιχείων που υποδεικνύουν σημαντικές επιπτώσεις του ETS της ΕΕ με βάση τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης χώρας. μελέτες δεδομένων και δεδομένα σε επίπεδο τομέα. Το μεγαλύτερο μέρος της μείωσης των εκπομπών παρατηρείται στη

δεύτερη φάση εμπορίας του EU ETS: ο αντίκτυπος είναι – 6% για την πρώτη φάση και – 15% στη δεύτερη φάση. Το αποτέλεσμα είναι ισχυρότερο για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, σύμφωνα με την ιδέα ότι ο έλεγχος της ρύπανσης είναι έντασης κεφαλαίου και συνεπάγεται υψηλό πάγιο κόστος. Τέλος, τα αποτελέσματά μας υποδηλώνουν ότι μια λιγότερο γενναιόδωρη κατανομή των δωρεάν δικαιωμάτων δημιουργεί ισχυρότερο κίνητρο για τη μείωση των εκπομπών, καθώς οι υποκατανεμημένες εγκαταστάσεις φαίνεται να έχουν μειωμένες εκπομπές σε μεγαλύτερο βαθμό. (14)

Όσον αφορά την απόδοση των εταιριών, διαπιστώνουμε ότι – αντίθετα με ό,τι θα περίμενε κανείς – το EU ETS οδήγησε σε στατιστικά σημαντική αύξηση των εσόδων και των πάγιων περιουσιακών στοιχείων των ρυθμιζόμενων εταιριών και δεν είχε στατιστικά σημαντική επίδραση στον αριθμό εργαζομένων των ρυθμιζόμενων εταιριών και το κέρδος. Αυτά τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι το EU ETS ώθησε τις ρυθμιζόμενες εταιρίες να αυξήσουν τις επενδύσεις που, με τη σειρά τους, μπορεί να έχουν αυξημένη παραγωγικότητα (παραγωγή ανά εργαζόμενο). Από την ανάλυσή μας συμπεραίνουμε ότι το EU ETS, στην πρώτη και στη δεύτερη φάση του, οδήγησε σε μειώσεις των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα χωρίς να επηρεάσει αρνητικά τις οικονομικές επιδόσεις των ρυθμιζόμενων επιχειρήσεων και συνεπώς την ανταγωνιστικότητα της ευρωπαϊκής βιομηχανίας. (14)

Μια σημαντική τροποποίηση που προβλέπεται στην προτεινόμενη οδηγία για την αποθήκευση θα αφορά την οδηγία για την εμπορία εκπομπών, η οποία πρόκειται να συμπεριλάβει τις λειτουργίες CCS στο μέλλον. Στην πρότασή της τον Ιανουάριο του 2008 για αναθεώρηση του EU ETS, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έκρινε ότι από το 2013 και μετά, οι εγκαταστάσεις που δεσμεύουν, μεταφέρουν ή αποθηκεύουν CO₂ θα πρέπει να καλύπτονται από το σύστημα εμπορίας «με εναρμονισμένο τρόπο», προκειμένου να ενθαρρύνονται και να δίνονται κίνητρα σε μεγάλες ανάπτυξη κλίμακας της επιλογής. Μετά το 2013 δεν θα υπήρχε δωρεάν κατανομή δικαιωμάτων εκπομπών για εγκαταστάσεις στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας και όλα τα δικαιώματα θα δημοπρατηθούν και το CO₂ που δεσμεύεται και μεταδίδεται για αποθήκευση δεν θα εκπέμπεται σύμφωνα με το ETS. Αυτό θα ενίσχυε τα κίνητρα για λειτουργίες CCS σε εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς οι αποθηκευμένες εκπομπές πιστώνονται στο πλαίσιο του ETS, πρέπει να υπάρχει αντίστοιχη χρέωση για τυχόν διαρροές εκπομπών από τα στοιχεία της αλυσίδας CCS, και αυτό διασφαλίζεται με τη συμπερίληψη των εργασιών δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ στο ETS, είναι η σημασία του για την αντιμετώπιση των κινδύνων τυχόν διαρροής στην ατμόσφαιρα. Οι άδειες αερίων θερμοκηπίου στο πλαίσιο του EU ETS απαιτούν την ύπαρξη ενός συστήματος παρακολούθησης προσαρμοσμένο στις διάφορες πηγές εκπομπών GHG σε μια εγκατάσταση ETS και τυχόν εκπομπές σε αυτό θα πρέπει να αντισταθμίζονται βάσει του EU ETS επιστρέφοντας αντίστοιχη ποσότητα πιστοποιητικών εκπομπών στην αρμόδια εθνική αρχή. Εν αναμονή της υιοθέτησης ενός αναθεωρημένου ETS στο οποίο θα περιλαμβάνονται οι εργασίες δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂, οι αλυσίδες CCS μπορούν στο σύνολό τους να συμμετέχουν στο σύστημα εμπορίας μέσω του άρθρου 24 της οδηγίας ETS. Και πάλι, οι εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν μια πλήρη αλυσίδα CCS δεν θα χρειάζεται να παραδίδουν δικαιώματα για τυχόν αποθηκευμένο CO₂. (17)

Η συμπερίληψη του CCS στο ETS περιέλαβε την ανάγκη για κατευθυντήριες γραμμές παρακολούθησης και αναφοράς για τις λειτουργίες CCS στο ETS της ΕΕ. Ενώ ένα σημαντικό στοιχείο της προτεινόμενης οδηγίας για την αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς είναι η επιλογή τοποθεσιών χωρίς διαρροές, και η πρόταση απαιτεί επίσης παρακολούθηση για τον εντοπισμό και μέτρα για τη διόρθωση οποιασδήποτε διαρροής, οι ποσοτικοί προσδιορισμοί οποιασδήποτε διαρροής από εργασίες αποθήκευσης στο ETS χρειάζονται ακόμη προς αντιμετώπιση. Η IPCC έδωσε ήδη ένα περίγραμμα για τις λογιστικές διαδικασίες για CCS στις Κατευθυντήριες γραμμές του 2006, οι οποίες θα πρέπει να παρέχουν δεσμευτικές οδηγίες για τη λογιστική στα εθνικά αποθέματα. Αυτά καλύπτουν τον χαρακτηρισμό της τοποθεσίας, την παρακολούθηση και τη χρήση αντιστοίχισης ιστορικού για πρόσβαση στην απόδοση της τοποθεσίας. Εάν οι μειώσεις εκπομπών που πραγματοποιούνται σε λειτουργίες CCS στο πλαίσιο του EU ETS πρόκειται να αφαιρεθούν από τις εθνικές εκπομπές, αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές θα πρέπει να αποτελούν το σημείο εκκίνησης για την παρακολούθηση και την αναφορά αυτών των εκπομπών. (17)

7.Ειδικές περιπτώσεις CCS

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται κάποιες αξιοσημείωτες περιπτώσεις CCS. Είναι οι ακόλουθες:

- Νομικό και ρυθμιστικό τοπίο Αυστραλίας
- Ρυθμιστικό πλαίσιο Ηνωμένων Πολιτειών
- Νορβηγία
- Ολλανδία: το πρόγραμμα Rotterdam Nucleus

7.2 Νομικό και ρυθμιστικό τοπίο Αυστραλίας

Η κυβέρνηση της Αυστραλιανής Κοινοπολιτείας έχει παράσχει σημαντική πολιτική, νομική και ρυθμιστική υποστήριξη στην CCS. Το εθνικό περιβάλλον πολιτικής για την τεχνολογία, την τελευταία δεκαετία, είχε ως αποτέλεσμα τόσο οι κυβερνήσεις της Κοινοπολιτείας όσο και οι κυβερνήσεις των Πολιτειών να σημειώσουν σημαντική πρόοδο στην ανάπτυξη και εφαρμογή της νομοθεσίας και των κανονισμών για το CCS. Μια περαιτέρω σημαντική βάση για αυτήν την εξέλιξη, ωστόσο, ήταν η δημοσίευση τον Νοέμβριο του 2005, των Αυστραλιανών Ρυθμιστικών Αρχών για τη δέσμευση και τη γεωλογική αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα. Οι κατευθυντήριες γραμμές, που εγκρίθηκαν από το πρώην Υπουργικό Συμβούλιο Ορυκτών και Πετρελαϊκών Πόρων (MCMPR) και αναπτύχθηκαν μετά από εκτεταμένη περίοδο διαβουλεύσεων με ένα ευρύ φάσμα ενδιαφερομένων, στοχεύουν να «διευκολύνουν μια εθνική συνεπή προσέγγιση για την εφαρμογή της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα και της γεωλογικής αποθήκευσης». σε όλες τις δικαιοδοσίες. Οι Κατευθυντήριες Αρχές υπογραμμίζουν έξι ζητήματα, τα οποία καθορίστηκαν ως βασικά στοιχεία στο σχεδιασμό της νομοθεσίας και των κανονισμών για τις δραστηριότητες CCS:

- Διαδικασία αξιολόγησης και εγκρίσεων·
- Δικαιώματα πρόσβασης και ιδιοκτησίας·
- Συγκοινωνιακά θέματα·
- Παρακολούθηση και επαλήθευση·
- Αξιοπιστία και ευθύνες μετά το κλείσιμο· και
- Οικονομικά θέματα.

Αν και δεν είναι νομικά δεσμευτικές, αυτές οι αρχές έχουν ληφθεί υπόψη τόσο από τις κυβερνήσεις της Κοινοπολιτείας όσο και από τις κυβερνήσεις των Πολιτειών, κατά το σχεδιασμό και την εφαρμογή των νομικών και κανονιστικών πλαισίων τους για την τεχνολογία. (9)

Παρά την ανάπτυξη αυτών των Κατευθυντήριων Αρχών και τη δέσμευση του Συμβουλίου των Κυβερνήσεων της Αυστραλίας (COAG) να διασφαλίσουν ότι "οι δικαιοδοσίες θα επισπεύσουν την εισαγωγή εθνικά συνεπούς κανονισμού για την αποθήκευση δέσμευσης άνθρακα, συμπεριλαμβανομένης της γεωλογικής αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα", υπήρξε ένας βαθμός ασυνέπειας στα μοντέλα που υιοθετήθηκαν από φορείς χάραξης πολιτικής και ρυθμιστικές αρχές σε όλη την Αυστραλία. (9)

7.2.1 Το υπεράκτιο καθεστώς της Κοινοπολιτείας

Το 2008, η Αυστραλιανή Ομοσπονδιακή Κυβέρνηση θέσπισε τον Νόμο περί Αποθήκευσης Πετρελαίου και αερίων Θερμοκηπίου 2006 (Cth) (OPGGS Act) για τη ρύθμιση των υπεράκτιων δραστηριοτήτων CCS εντός των υδάτων της Κοινοπολιτείας. Σύμφωνα με το ομοσπονδιακό σύστημα διακυβέρνησης της Αυστραλίας, η Κυβέρνηση της Κοινοπολιτείας διατηρεί τη ρυθμιστική ευθύνη για δραστηριότητες σε υπεράκτια ύδατα, που εκτείνονται από τρία ναυτικά μίλια μέχρι την άκρη της υφαλοκρηπίδας της Αυστραλίας. Τα παράκτια ύδατα μέχρι το όριο των τριών ναυτικών μιλίων και τα οποία γειτνιάζουν με ένα κράτος ή έδαφος, παραμένουν στην αρμοδιότητα της αντίστοιχης πολιτείας ή εδάφους. (9)

Ο νόμος OPGGS επιδιώκει να αυξήσει τη βεβαιότητα για τους φορείς εκμετάλλευσης, ιδίως όσον αφορά την πρόσβαση και τον τίτλο σε υπεράκτιες τοποθεσίες και σχηματισμούς, καθώς και να διασφαλίσει ότι η αποθήκευση είναι ασφαλής. Ο νόμος περιλαμβάνει επίσης λεπτομερείς διατάξεις σχετικά με τη διαχείριση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των δραστηριοτήτων CCS και της βιομηχανίας πετρελαίου. (9)

Η προσέγγιση της κυβέρνησης βάσει του νόμου OPGGS διατηρεί πολλά από τα χαρακτηριστικά, τις διαδικασίες και την ορολογία που υπάρχουν στο υπάρχον μοντέλο πετρελαίου και τα εφαρμόζει σε δραστηριότητες υπεράκτιας αποθήκευσης. Πράγματι, πολλοί από τους νέους τίτλους που θεσπίστηκαν βάσει του νόμου αντικατοπτρίζουν τους υπάρχοντες τίτλους που χρησιμοποιούνται για τις πετρελαϊκές δραστηριότητες. (9)

7.2.1.1 Ρυθμιστικό πλαίσιο για τις διαδικασίες αποθήκευσης αερίων θερμοκηπίου (GHG)

Ο νόμος OPGGS μαζί με μια ολοκληρωμένη σειρά κανονισμών, τροποποιεί το υπάρχον καθεστώς πετρελαίου της Κοινοπολιτείας για να εισαγάγει ένα μοντέλο που ρυθμίζει τις δραστηριότητες μεταφοράς, έγχυσης και αποθήκευσης αγωγών εντός της υπεράκτιας περιοχής. Ένας φορέας εκμετάλλευσης που επιδιώκει να αναλάβει δραστηριότητες αποθήκευσης βάσει του νόμου OPGGS θα πρέπει να αποκτήσει μια σειρά τίτλων κατά τη μετάβαση από τη φάση εξερεύνησης στο επιχειρησιακό στάδιο ενός έργου. (9)

Προκειμένου να διερευνηθεί ένας κατάλληλος υπεράκτιος σχηματισμός αποθήκευσης ή για την ανάληψη δραστηριοτήτων που σχετίζονται με τη διαδικασία εξερεύνησης, ένας φορέας εκμετάλλευσης θα πρέπει να λάβει "άδεια αξιολόγησης GHG". Αυτή η άδεια δίνει το δικαίωμα στον κάτοχο να αναλάβει μια σειρά δραστηριοτήτων εντός περιοχών που έχουν «απελευθερωθεί» από την κυβέρνηση για εξερεύνηση. Καθιερώνεται μια λεπτομερής διαδικασία αίτησης άδειας και ο αιτών καλείται να αποδείξει τους οικονομικούς πόρους και την τεχνική του ικανότητα. Πέρα από τυχόν πρόσθετους όρους που μπορεί να επιλέξει ο Ομοσπονδιακός Υπουργός για τη χορήγηση άδειας αξιολόγησης, ο αιτών πρέπει να λάβει έγκριση από τον Υπουργό για να αναλάβει μια βασική "λειτουργία GHG". (9)

Όταν ο κάτοχος άδειας αξιολόγησης προσδιορίζει κατάλληλο σχηματισμό αποθήκευσης, ο φορέας εκμετάλλευσης μπορεί να υποβάλει αίτηση στον Υπουργό για "μίσθωση εκμετάλλευσης αερίων του θερμοκηπίου". Αυτός ο τίτλος επιτρέπει στον αιτούντα να "κρατήσει" μια περιοχή, η οποία έχει αποτελέσει αντικείμενο άδειας αξιολόγησης, έως ότου είναι σε θέση να ξεκινήσει δραστηριότητες έγχυσης και αποθήκευσης. (9)

Η έγχυση και η μόνιμη αποθήκευση αερίου θερμοκηπίου επιτρέπεται βάσει «άδειας έγχυσης GHG». Οι άδειες αυτές μπορούν να χορηγούνται μόνο σε σχέση με αποθηκευτικούς σχηματισμούς που έχουν «δηλωθεί» από τον Υπουργό ως αναγνωρισμένοι αποθηκευτικοί σχηματισμοί GHG. Ως μέρος της διαδικασίας αίτησης, ο αιτών πρέπει να παράσχει λεπτομερές σχέδιο τοποθεσίας, το οποίο περιλαμβάνει προβλέψεις σχετικά με τη συμπεριφορά της εγχυόμενης ουσίας και προτεινόμενες μεθοδολογίες για την αξιολόγηση και την παρακολούθηση του κινδύνου. (9)

Οι άδειες έγχυσης χορηγούνται για αόριστο χρονικό διάστημα και παραμένουν σε ισχύ μέχρι τη στιγμή που παραδίδονται ή ακυρώνονται. Η άδεια που χορηγείται βάσει του Νόμου μπορεί να εκδοθεί με την επιφύλαξη «όποιων όρων κρίνει σκόπιμο ο αρμόδιος υπουργός Κοινοπολιτείας». (9)

Οι κανονισμοί που εκδόθηκαν βάσει του νόμου OPGGS εισάγουν ορισμένες πρόσθετες απαιτήσεις σχετικά με τη χορήγηση τίτλων. Ένα παράδειγμα βρίσκεται στους Περιβαλλοντικούς Κανονισμούς του 2009, όπου διαπράττεται αδίκημα από τον κάτοχο τίτλου, όταν μια δραστηριότητα αναλαμβάνεται χωρίς εγκεκριμένο περιβαλλοντικό σχέδιο. (9)

7.2.1.2 Αξιοπιστία και η διαδικασία μετά το κλείσιμο

Ο νόμος OPGGS εισάγει επίσης σημαντικές διατάξεις σχετικά με τη μακροπρόθεσμη ευθύνη και τη διαχείριση των ευθυνών τόσο του διαχειριστή του χώρου αποθήκευσης όσο και της κυβέρνησης της Κοινοπολιτείας στη φάση μετά το κλείσιμο. Αυτές οι διατάξεις αποδείχθηκαν ιδιαίτερα αμφιλεγόμενες και συζητήθηκαν ευρέως κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της εφαρμογής του νόμου. Το μοντέλο που προκύπτει έρχεται σε αντίθεση με τη διαχείριση της μακροπρόθεσμης ευθύνης σύμφωνα με τα νομικά πλαίσια που έχουν αναπτυχθεί στις πολιτείες της Βικτόρια και του Κουίνσλαντ. (9)

Σύμφωνα με τις εργασίες πετρελαίου, ο κάτοχος άδειας έγχυσης θα φέρει ορισμένες νομικές και κοινές υποχρεώσεις καθ' όλη τη φάση λειτουργίας ενός έργου. Ωστόσο, οι διατάξεις που εισήχθησαν βάσει του νόμου OPGGS επιτρέπουν την

ενδεχόμενη μεταβίβαση της μακροπρόθεσμης ευθύνης στην κυβέρνηση της Κοινοπολιτείας, μετά το κλείσιμο μιας τοποθεσίας αποθήκευσης και την επιτυχή ολοκλήρωση μιας "περιόδου διασφάλισης κλεισίματος". (9)

Το πρώτο στάδιο αυτής της διαδικασίας μεταβίβασης, ξεκινά όταν ο κάτοχος άδειας υποβάλλει αίτηση στον Υπουργό για «Πιστοποιητικό Κλείσιμου Χώρου», μετά την ολοκλήρωση των δραστηριοτήτων έγχυσης και αποθήκευσης. Μια αίτηση για πιστοποιητικό κλεισίματος θα απαιτεί επίσης την παροχή μιας αναφοράς κλεισίματος τοποθεσίας, η οποία θα αφορά, μεταξύ άλλων, τη συνεχή παρακολούθηση του χώρου αποθήκευσης και τη μοντελοποιημένη συμπεριφορά των εγχυόμενων αερίων θερμοκηπίου. Η απόφαση για την έκδοση ή όχι πιστοποιητικού πρέπει να λαμβάνεται από τον Υπουργό, εντός πέντε ετών από την υποβολή της αίτησης. (9)

Πολλά θέματα πρέπει να ληφθούν υπόψη από τον Υπουργό κατά τη λήψη απόφασης για τη χορήγηση του πιστοποιητικού. Ωστόσο, όταν ένας Υπουργός είναι πεπεισμένος ότι έχουν αντιμετωπιστεί επιτυχώς από τον κάτοχο του τίτλου, μπορεί να εκδοθεί «Ειδοποίηση Προ-Πιστοποιητικού». Η παρούσα ειδοποίηση καθορίζει τις συνεχιζόμενες δραστηριότητες παρακολούθησης που πρέπει να αναλαμβάνει η Κοινοπολιτεία κατά την περίοδο μετά το κλείσιμο και την ασφάλεια που πρέπει να παρέχεται από τον κάτοχο του τίτλου για την κάλυψη του κόστους αυτών των σχεδίων. Μετά την καταβολή της σχετικής ασφάλειας, θα εκδοθεί πλήρες Πιστοποιητικό Κλείσιμου Χώρου από τον Υπουργό και ο χειριστής μπορεί να παραδώσει την άδεια έγχυσης. (9)

Μετά τη συμπλήρωση μιας περιόδου τουλάχιστον 15 ετών, από την έκδοση του Πιστοποιητικού Κλείσιμου Χώρου, ο κάτοχος του τίτλου μπορεί να υποβάλει αίτηση στον Υπουργό για δήλωση επιβεβαίωσης της λήξης της «Περίόδου Διασφάλισης Κλεισίματος». Μια δήλωση στο τέλος αυτής της περιόδου ολοκληρώνει την ευθύνη του κατόχου του τίτλου για τον χώρο αποθήκευσης. Είναι σημαντικό ότι ο νόμος OPGGS παρέχει επίσης στον πρώην κάτοχο του τίτλου αποζημίωση από την Κυβέρνηση της Κοινοπολιτείας για κάθε υποχρέωση που έχει συσσωρευτεί μετά την Περίοδο διασφάλισης κλεισίματος. (9)

7.2.2 Νόμος και κανονισμοί σε επίπεδο αυστραλιανής πολιτείας

Το αυστραλιανό ομοσπονδιακό σύστημα διακυβέρνησης παρέχει στις πολιτείες τη δικαιοδοσία να ρυθμίζουν τις δραστηριότητες αποθήκευσης, τόσο στην ξηρά όσο και υπεράκτια, μέχρι το όριο των 3 ναυτικών μιλίων. Από τον Ιανουάριο του 2015, οι πολιτείες της Βικτώριας, του Κουίνσλαντ, της Νότιας Αυστραλίας και της Δυτικής Αυστραλίας έχουν πλέον θεσπίσει νομοθεσία για τη ρύθμιση της γεωλογικής αποθήκευσης αερίων του θερμοκηπίου ή άλλων διακριτών πτυχών της διαδικασίας CCS. Μαζί με τη θέσπιση του Νόμου της Κοινοπολιτείας, αυτές οι ρυθμιστικές δραστηριότητες έχουν οδηγήσει σε τρία διαφορετικά αυστραλιανά πλαίσια αποθήκευσης. νομοθεσία περί ξηράς πολιτείας ή επικράτειας· πολιτειακής ή επικράτειας υπεράκτιας νομοθεσίας και της Κοινοπολιτείας υπεράκτιας νομοθεσίας. (9)

Η Πολιτεία της Βικτώριας ανέπτυξε ένα από τα πρώτα νομικά και ρυθμιστικά καθεστώτα στον κόσμο για το CCS, το οποίο θεσπίστηκε με τη μορφή του νόμου για τη γεωλογική δέσμευση αερίων θερμοκηπίου του 2008 ("onshore Act"). Ο Νόμος για την αποθήκευση πετρελαίου και αερίων θερμοκηπίου υπεράκτιων πετρελαίου του 2010

("νόμος εκτός ακτών"), ο οποίος διέπει τις εργασίες αποθήκευσης στα ύδατα της Πολιτείας της Βικτώριας, τέθηκε σε ισχύ τον Ιανουάριο του 2012. Και οι δύο αυτοί νόμοι έχουν πλέον υποστηριχθεί από δευτερεύοντες κανονισμούς. Οι δύο Πράξεις υιοθετούν αντικρουόμενες προσεγγίσεις στη ρύθμιση των δραστηριοτήτων αποθήκευσης στο κράτος. Ο υπεράκτιος νόμος τροποποιεί την υφιστάμενη νομοθεσία για τα πετρέλαια και περιλαμβάνει πρόβλεψη για δραστηριότητες γεωλογικής αποθήκευσης στα κρατικά ύδατα, ενώ ο νόμος για την ξηρά δημιουργεί ένα αυτόνομο ρυθμιστικό μοντέλο που βασίζεται στη μορφή του υφιστάμενου νόμου περί πετρελαίου του κράτους. Και οι δύο Πράξεις, ωστόσο, περιλαμβάνουν διατάξεις που κατοχυρώνουν την κυριότητα πιθανών σχηματισμών αποθήκευσης στο Στέμμα, απαιτώντας επομένως από το Στέμμα να παραχωρήσει το δικαίωμα εξερεύνησης ή έγχυσης και αποθήκευσης αερίων θερμοκηπίου. (9)

Ο νόμος για τις υπεράκτιες περιοχές της Βικτώριας υιοθετεί μια πολύ παρόμοια προσέγγιση με τον νόμο περί υπεράκτιων κοινοτήτων της Κοινοπολιτείας. Οι συνοδευτικοί Κανονισμοί του Νόμου της Βικτώριας του 2011, που τέθηκαν σε ισχύ τον Ιανουάριο του 2012, σχεδιάστηκαν επίσης για να αντικατοπτρίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη νομοθεσία της Κοινοπολιτείας προκειμένου να αποφευχθούν ρυθμιστικά προβλήματα και προβλήματα πολιτικής όπου οι δραστηριότητες CCS διασχίζουν τα όρια δικαιοδοσίας. Αν και υπάρχουν κάποιες ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δύο συνόλων Κανονισμών, «δεν είναι αρκετά σημαντικές ώστε να θέσουν σε κίνδυνο τον καθρέφτη χαρακτήρα των βικτωριανών κανονισμών» (IEA²¹). (9) Τα βικτωριανά καθεστώτα χερσαίας και βικτωριανής υπεράκτιας πολιτείας καθιερώνουν αρκετούς νέους τίτλους στην Πολιτεία, οι οποίοι αφορούν τις φάσεις εξερεύνησης, διατήρησης, έγχυσης και παρακολούθησης των δραστηριοτήτων CCS στο χερσαίο και υπεράκτιο περιβάλλον. Ενώ το μοντέλο θητείας της βικτωριανής νομοθεσίας είναι παρόμοιο με αυτό του νόμου περί υπεράκτιων κοινοτήτων, υπάρχουν ορισμένες σημαντικές διακρίσεις. Δεν είναι δυνατόν εντός των ορίων αυτής της εργασίας να εξεταστούν όλες οι ομοιότητες και οι αντικρουόμενες προσεγγίσεις που βρίσκονται σε αυτά τα τρία καθεστώτα. Ωστόσο, μια σημαντική διάκριση είναι η διαχείριση της μακροπρόθεσμης ευθύνης του Victorian Act. (9)

Οι νόμοι της Βικτώριας για την ξηρά και οι υπεράκτιοι επιτρέπουν και οι δύο την παράδοση μιας αρχής στο τέλος των δραστηριοτήτων έγχυσης και αποθήκευσης, και λεπτομερείς διατάξεις ορίζονται στις Πράξεις που περιγράφουν πώς θα πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία. Με την παράδοση μιας άδειας έγχυσης, το Στέμμα γίνεται ο ιδιοκτήτης οποιασδήποτε ουσίας αερίου θερμοκηπίου που εγχέεται. Ωστόσο, δεν προσφέρεται αποζημίωση για μακροπρόθεσμες υποχρεώσεις. Καμία αστική ευθύνη δεν εκχωρείται, και επομένως ο φορέας εκμετάλλευσης θα μπορούσε να παραμείνει δυνητικά υπεύθυνος σε μια αστική αξίωση που προκύπτει μετά την παραίτηση ενός τίτλου. Ενώ η νομοθεσία της Βικτώριας σιωπά ως προς το ποιες ακριβώς υποχρεώσεις μεταβιβάζονται στο κράτος στο σημείο της παράδοσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν βαρύνουν περαιτέρω διοικητικές υποχρεώσεις ο πρώην κάτοχος του τίτλου μετά τη μεταβίβαση. (9)

Η Πολιτεία του Κούνινσλαντ έχει επίσης θεσπίσει ένα αυτόνομο ρυθμιστικό πλαίσιο για τη ρύθμιση της χερσαίας έγχυσης και αποθήκευσης αερίων θερμοκηπίου. Ο νόμος για την αποθήκευση αερίων θερμοκηπίου τέθηκε σε ισχύ τον Νοέμβριο του

²¹ IEA: International Energy Agency

2009 και υποστηρίζεται από τους Κανονισμούς Αποθήκευσης Αερίων Θερμοκηπίου του 2010. Ο Νόμος του Κουίνσλαντ στοχεύει κυρίως στη μείωση των επιπτώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στο περιβάλλον, διευκολύνοντας την ανάπτυξη αποθήκευσης αερίων θερμοκηπίου. (9)

Παρόμοια με τα καθεστώτα που συζητήθηκαν προηγουμένως, ο νόμος του Κουίνσλαντ εισάγει δύο νέους τύπους κατοχής, τις άδειες εξερεύνησης GHG και τις μισθώσεις έγχυσης και αποθήκευσης GHG, για τη ρύθμιση των δραστηριοτήτων έγχυσης και αποθήκευσης. Η μορφή και οι διαδικασίες για την απόκτηση αυτών των τίτλων που καθορίζονται στο Νόμο είναι σε μεγάλο βαθμό συγκρίσιμες με αυτές που υπάρχουν στη νομοθεσία της Βικτώριας και της Κοινοπολιτείας. (9)

Ο νόμος του Κουίνσλαντ περιλαμβάνει επίσης διατάξεις για την παράδοση μίσθωσης, όπου ο αρμόδιος Υπουργός του Κουίνσλαντ είναι ικανοποιημένος ότι έχουν ολοκληρωθεί οι δραστηριότητες έγχυσης και έχει γίνει πλήρης παροπλισμός όλων των φρεατίων έγχυσης αερίων θερμοκηπίου στην περιοχή μίσθωσης. Με την ολοκλήρωση των δραστηριοτήτων παροπλισμού, η Πολιτεία θα αναλάβει την κυριότητα του ρεύματος αερίων θερμοκηπίου που εγχέεται και των φρεατίων έγχυσης. Παρά τη μεταβίβαση της κυριότητας των γεωτρήσεων αερίου και έγχυσης, η Πολιτεία του Κουίνσλαντ δεν προσφέρει αποζημίωση για μακροπρόθεσμες υποχρεώσεις βάσει του νόμου. Σε μια υποβολή σε έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας το 2011, η κυβέρνηση του Κουίνσλαντ δήλωσε ότι «το θέμα της μακροπρόθεσμης ευθύνης παραμένει περίπλοκο». (9)

Η κυβέρνηση της Νότιας Αυστραλίας έκανε τροποποιήσεις στη νομοθεσία της Πολιτείας το 2009, για να ενσωματώσει δραστηριότητες CCS στο υπάρχον ρυθμιστικό μοντέλο για το πετρέλαιο και άλλους πόρους. Σύμφωνα με τον νόμο του 2000 για το πετρέλαιο και τη γεωθερμική ενέργεια της Πολιτείας, οι άδειες εξερεύνησης αποθήκευσης αερίου, οι άδειες διατήρησης αποθήκευσης αερίου και οι άδειες αποθήκευσης αερίου παρέχουν πλέον το απαραίτητο σύστημα τίτλων για τη ρύθμιση των δραστηριοτήτων CCS στη Νότια Αυστραλία (χερσαία). (9)

Ο Νόμος της Νότιας Αυστραλίας κατοχυρώνει την κυριότητα των δεξαμενών αποθήκευσης στο Στέμμα και κατά τη φάση της επιχειρησιακής αποθήκευσης, ο κάτοχος της άδειας θα φέρει την ευθύνη για το εγχυόμενο αέριο θερμοκηπίου. Κατά τρόπο παρόμοιο με τις διατάξεις της νομοθεσίας της Βικτώριας και του Κουίνσλαντ, η ιδιοκτησία του αποθηκευμένου αερίου θα περιέλθει στο κράτος όταν η παράδοση ή η ακύρωση του τίτλου εγκριθεί από τον αρμόδιο Υπουργό. (9)

7.2.3 Ειδική νομοθεσία για το έργο

Η Δυτική Αυστραλία δεν έχει ακόμη θεσπίσει νομικό και ρυθμιστικό πλαίσιο σε όλη την Πολιτεία. Ωστόσο, το 2003, η πολιτειακή κυβέρνηση ενέκρινε νομοθεσία για συγκεκριμένο έργο για να υποστηρίξει την ανάπτυξη του έργου κοινής επιχείρησης Gorgon. Ο νόμος Barrow Island Act 2003 που προκύπτει, ρυθμίζει αποκλειστικά τις δραστηριότητες απόρριψης διοξειδίου του άνθρακα, που θα πραγματοποιούνται ως μέρος των δραστηριοτήτων του έργου Gorgon. (9)

Ο νόμος περιλαμβάνει μια σειρά από διατάξεις που σχετίζονται με την έγχυση CO₂ και τροποποιεί τη νομοθεσία του κράτους για τους αγωγούς πετρελαίου για να

ρυθμίσει τις πτυχές της μεταφοράς. Ο ίδιος ο νόμος δεν περιλαμβάνει διατάξεις σχετικά με τη μετά το κλείσιμο ή τη μακροπρόθεσμη ευθύνη, ωστόσο, το 2009 η πολιτεία Δυτική Αυστραλία και οι ομοσπονδιακές κυβερνήσεις δήλωσαν ότι θα αποζημιώσουν τους φορείς εκμετάλλευσης του έργου για τυχόν μακροπρόθεσμες υποχρεώσεις που σχετίζονται με την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα. (9)

7.3 Ρυθμιστικό πλαίσιο Ηνωμένων Πολιτειών

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η έγχυση υγρών στο υπέδαφος ρυθμίζεται μέσω του προγράμματος Underground Injection Control (UIC), το οποίο διαχειρίζεται η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA). Το Κογκρέσο ζήτησε από την EPA να καθορίσει απαιτήσεις για υπόγεια έγχυση μέσω του νόμου για το ασφαλές πόσιμο νερό (SDWA)²² του 1974 ως απάντηση σε πολλαπλές αστοχίες φρεατίων διάθεσης απορριμμάτων τις δεκαετίες του 1960 και του 1970, εκ των οποίων υπήρχαν εκατοντάδες σε λειτουργία εκείνη την εποχή. Ο στόχος του προγράμματος UIC είναι να προστατεύσει τις Υπόγειες Πηγές Πόσιμου Νερού (USDWs) που τροφοδοτούν ή θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν ένα δημόσιο σύστημα πόσιμου νερού. Το πρόγραμμα EPA UIC θέτει ελάχιστες απαιτήσεις για κρατικά προγράμματα και, όπου τα κράτη δεν έχουν λάβει την πρωταρχική ευθύνη επιβολής (δηλαδή την "πρωταρχία") για το πρόγραμμα UIC, η EPA επιβάλλει επίσης αυτούς τους ελάχιστους κανόνες. (9)

Οι κανόνες του προγράμματος UIC επικεντρώνονται στην τοποθέτηση, το σχεδιασμό και την κατασκευή, τη λειτουργία και την εγκατάλειψη φρεατίων που εγχέουν υγρά στο υπέδαφος προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος των USDW. Έτσι, οι κανόνες UIC είναι συγκεκριμένοι για τη φύση του εγχυόμενου υγρού και το βάθος της έγχυσης σε σχέση με τα USDW. Πριν από τη δημοσίευση κανόνων προσαρμοσμένων στην έγχυση CO₂ για αποθήκευση – ή δέσμευση, όπως συνήθως αναφέρεται στις ΗΠΑ – υπήρχαν πέντε «κατηγορίες πηγαδιών» που αφορούσαν την έγχυση υγρών που κυμαίνονταν από επεξεργασμένα αστικά λύματα έως επικίνδυνα απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων ραδιενεργών υλικών. Αξίζει να σημειωθεί, ότι παραμένει μια κατηγορία «catch-all» για δραστηριότητες έγχυσης που δεν εμπίπτουν στις άλλες κατηγορίες πηγαδιών, συμπεριλαμβανομένων των πειραματικών δραστηριοτήτων. Οι κανόνες Τάξης II ορίζουν απαιτήσεις για την έγχυση υγρών που σχετίζονται με την παραγωγή πετρελαίου και αερίου, που περιλαμβάνει CO₂ όταν εγχέεται για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR), αλλά, ως αποτέλεσμα του νόμου για την ενεργειακή πολιτική του 2005, αποκλείει την αποθήκευση φυσικού αερίου και τις περισσότερες υδραυλικές ρωγμές δραστηριότητες. Το 2011, επιτρέπονταν σχεδόν 170.000 φρεάτια έγχυσης σύμφωνα με τους κανόνες Τάξης II στις ΗΠΑ, τα περισσότερα από τα οποία έγχυαν νερό που παράγεται παράλληλα με το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο. (9)

Η παλαιότερη δημοσιευμένη εργασία για την εξέταση της ρύθμισης αποθήκευσης CO₂ στις ΗΠΑ ξεκίνησε εξετάζοντας εάν το πρόγραμμα UIC θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της αποθήκευσης και, εάν ναι, πώς μπορεί να χρειαστεί να προσαρμοστεί. Αυτή η εργασία κατέληξε στο συμπέρασμα, μεταξύ άλλων, ότι οι

²² SDWA: Safe Drinking Water Act

σχετικά υψηλοί ρυθμοί έγχυσης που σχετίζονται με την αποθήκευση CO₂ και οι φυσικές (και χημικές) ιδιότητες του CO₂ στο υπέδαφος σήμαιναν ότι, τουλάχιστον, ο κόσμος του προγράμματος UIC πρέπει να προσαρμοστεί για να γίνει κατάλληλα για το σκοπό. (9)

Μέχρι το 2005, ο ρυθμός συλλογής πληροφοριών από την EPA είχε επιταχυνθεί και, τον Οκτώβριο του 2007, η EPA έκανε μια επίσημη ανακοίνωση ότι θα δημιουργήσει κανόνες στο πλαίσιο του προγράμματος UIC για τη γεωλογική αποθήκευση. Την περίοδο μεταξύ 2005 και 2008, η EPA χρηματοδότησε πολλαπλά ερευνητικά έργα με στόχο την απάντηση συγκεκριμένων ερωτημάτων σχετικά με τη ρύθμιση της αποθήκευσης CO₂, όπως εάν το εγχυόμενο CO₂ θα μπορούσε να κινητοποιήσει μέταλλα, και πραγματοποιήσει εννέα τεχνικά εργαστήρια ή εργαστήρια ενδιαφερομένων. Αυτές οι δραστηριότητες οδήγησαν στην πρόταση αυτού που συνήθως αναφέρεται ως κανόνας Τάξης VI στα μέσα του 2008. Η EPA έλαβε δημόσια σχόλια σχετικά με τον προτεινόμενο κανόνα τόσο μέσω δημόσιων ακροάσεων όσο και μέσω γραπτών υποβολών και, βάσει αυτών των σχολίων, δημοσίευσε μια περαιτέρω "ειδοποίηση διαθεσιμότητας δεδομένων" (NODA). Το NODA παρείχε πρόσθετες πληροφορίες που προέκυψαν από ερευνητικά έργα που επηρέασαν τη θέσπιση κανόνων και ζήτησε δημόσιο σχολιασμό για συγκεκριμένα θέματα, ιδίως τις απαιτήσεις βάθους έγχυσης για έργα αποθήκευσης. Ο τελικός κανόνας εκδόθηκε τον Δεκέμβριο του 2010. (9)

Ο κανόνας Τάξης VI ορίζει μια νέα, έκτη κατηγορία πηγαδιού έγχυσης στο πλαίσιο του προγράμματος UIC και τεχνικά κριτήρια που προσαρμόζουν το υπάρχον κανονιστικό πλαίσιο UIC για την αντιμετώπιση των παραγόντων που διαχωρίζουν την έγχυση CO₂ από άλλες δραστηριότητες που ρυθμίζονται από το πρόγραμμα UIC. Καθορίζει απαιτήσεις για, μεταξύ άλλων:

- Χαρακτηρισμός τοποθεσίας, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης των γεωλογικών, υδρογεωλογικών, γεωχημικών και γεωμηχανικών ιδιοτήτων του προτεινόμενου χώρου αποθήκευσης για να διασφαλιστεί ότι η αποθήκευση πραγματοποιείται σε κατάλληλους σχηματισμούς.
- Μια περιοχή ανασκόπησης (AoR) για έργα γεωλογικής αποθήκευσης εντός της οποίας ο χειριστής πρέπει να εντοπίσει τεχνητές διεισδύσεις (δηλαδή φρεάτια) και φυσικά χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να επιτρέψουν στο CO₂ ή στα υγρά σχηματισμού να φτάσουν σε USDW. Εάν είναι απαραίτητο, ο χειριστής πρέπει να προβεί σε διορθωτικές ενέργειες εντός του AoR που θα αποτρέψουν τη μετανάστευση υγρών.
- Περιοδική επαναξιολόγηση του AoR για να ενσωματωθούν δεδομένα παρακολούθησης και λειτουργίας και να επαληθευτεί ότι το νέφος CO₂ και η σχετική περιοχή της αυξημένης πίεσης εξελίσσονται όπως είχε προβλεφθεί.
- Σχεδιασμός και κατασκευή φρεατίων, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής υλικών φρεατίων, για την αποφυγή μετακίνησης ρευστών σε USDW.
- Λειτουργία φρεατίων έγχυσης, συμπεριλαμβανομένων περιορισμών στις πιέσεις έγχυσης, συστημάτων αυτόματης απενεργοποίησης και απαιτήσεων πίεσης δακτυλίου.
- Παρακολούθηση της σύστασης του ρεύματος CO₂, των πιέσεων έγχυσης, της ακεραιότητας του φρεατίου έγχυσης, της ποιότητας και της γεωχημείας των υπόγειων

υδάτων, και της κατανομής του εγχυόμενου CO₂ και της υποεπιφανειακής πίεσης κατά την έγχυση.

- Παρακολούθηση μετά την έγχυση και φροντίδα στο σημείο μετά τη διακοπή της έγχυσης, κατά την οποία ο χειριστής πρέπει να αποδείξει ότι ούτε το εγχυόμενο CO₂ ούτε τα υγρά σχηματισμού υπό πίεση είναι πιθανό να επηρεάσουν τα USDW.
- Απαιτήσεις οικονομικής ευθύνης που καλύπτουν διορθωτικές ενέργειες, απόφραξη φρεατίου έγχυσης, φροντίδα στο σημείο μετά την έγχυση, κλείσιμο του σημείου και απόκριση έκτακτης ανάγκης και επανόρθωσης. (9)

Ο τρόπος με τον οποίο ο φορέας εκμετάλλευσης σκοπεύει να εκπληρώσει αυτές τις (και άλλες) απαιτήσεις Τάξης VI τεκμηριώνεται σε πέντε σχέδια που υποβάλλονται στον οργανισμό αδειοδότησης μαζί με την αίτηση άδειας. Οι άδειες κατηγορίας VI που εκδίδονται σύμφωνα με τον κανόνα θα πρέπει να ισχύουν για όλη τη διάρκεια του έργου, αλλά εξαρτώνται από την τακτική ενημέρωση του AoR και του σχεδίου διορθωτικών ενεργειών, του σχεδίου δοκιμών και παρακολούθησης και του σχεδίου αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης και αποκατάστασης από τον φορέα εκμετάλλευσης με βάση τις συνθήκες του χώρου. Η διάρκεια της περιόδου φροντίδας στο σημείο μετά την έγχυση (PISC) ορίζεται ως προεπιλογή 50 ετών, αλλά μπορεί να προσαρμοστεί κατά την κρίση του διευθυντή προγράμματος UIC (σε οποιοδήποτε σημείο κατά τη διάρκεια του έργου). Στις πρώτες άδειες που εκδόθηκαν σύμφωνα με τους κανόνες της Τάξης VI, η αναμενόμενη διάρκεια του PISC ποικίλλει από 10 έως τα προεπιλεγμένα 50 έτη. Στο τέλος του PISC, τα χρηματοοικονομικά μέσα που κατέχει η αδειοδοτούσα αρχή επιστρέφονται στον φορέα εκμετάλλευσης και απαλλάσσονται από άλλες απαιτήσεις SDWA. Ωστόσο, ο ιδιοκτήτης ή ο χειριστής παραμένει υπεύθυνος σε περίπτωση που η απροσδόκητη μετανάστευση του CO₂ ή των ρευστών σχηματισμού επηρεάσει ένα USDW στο μέλλον. Επιπλέον, ο φορέας εκμετάλλευσης θα παραμένει υπεύθυνος βάσει άλλων ομοσπονδιακών και πολιτειακών καταστατικών, καθώς και βάσει του κοινού δικαίου. Η EPA έχει αναπτύξει μια σειρά εγγράφων καθοδήγησης για όσους υποβάλλουν αίτηση και αξιολογούν αιτήσεις αδειών που εξηγούν τις απαιτήσεις για φρεάτια Κατηγορίας VI και καθορίζουν τις προσδοκίες για τα σχέδια. (9)

Περίπου την ίδια περίοδο με την ανάπτυξη του κανόνα Τάξης VI, η EPA ανέπτυξε επίσης έναν στενά συνδεδεμένο κανόνα σχετικά με την αναφορά εκπομπών από έργα γεωλογικής αποθήκευσης. Επειδή το πρόγραμμα UIC μπορεί να αντιμετωπίσει μόνο το ενδεχόμενο κινδύνου των USDWs, οι απαιτήσεις παρακολούθησης που δεν σχετίζονται με την προστασία των υπόγειων υδάτων –ακόμα και αν είναι κεντρικές για τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας της γεωλογικής αποθήκευσης– δεν απαιτούνται από τον κανόνα της Τάξης VI. Έτσι, τον Μάιο του 2010, η EPA πρότεινε έναν κανόνα στο πλαίσιο του Προγράμματος Αναφοράς Αερίων Θερμοκηπίου για την απαίτηση παρακολούθησης και αναφοράς αερίων θερμοκηπίου από εγκαταστάσεις γεωλογικής αποθήκευσης, που κοινώς αναφέρεται ως ο κανόνας υποτμήματος RR²³. Όπως και ο κανόνας Τάξης VI, αυτός ο κανόνας κυκλοφόρησε επίσης τον Δεκέμβριο του 2010. (9)

Ο κανόνας υποτμήματος RR ισχύει για οποιονδήποτε φορέα εκμετάλλευσης έχει άδεια πηγαδιού Κατηγορίας VI (ή χειριστή Κατηγορίας II που επιλέγει να συμμετέχει στο πρόγραμμα) και απαιτεί από τον χειριστή να προετοιμάσει ένα σχέδιο

²³ RR: Relative Risk

παρακολούθησης, αναφοράς και επαλήθευσης (MRV). Το σχέδιο MRV πρέπει να περιλαμβάνει:

- ταυτοποίηση και αξιολόγηση των πιθανών μονοπατιών επιφανειακής διαρροής και εκτίμηση της πιθανότητας, του μεγέθους και του χρόνου επιφανειακής διαρροής CO₂ μέσω αυτών των οδών·
- μια στρατηγική για τον εντοπισμό και τον ποσοτικό προσδιορισμό της επιφανειακής διαρροής CO₂ σε περίπτωση διαρροής·
- μια προσέγγιση για τον καθορισμό των αναμενόμενων βασικών γραμμών για την παρακολούθηση της επιφανειακής διαρροής CO₂· και
- περιγραφή των μεθόδων και των παραδοχών που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση ισοζυγίου μάζας. (9)

Το προτεινόμενο σχέδιο MRV από τους χειριστές υποβάλλεται στην EPA, αναθεωρείται όπως απαιτείται και, όταν εγκριθεί, καθορίζει τις απαιτήσεις για το έργο. Στη συνέχεια, ο φορέας εκμετάλλευσης καλείται να υποβάλλει έκθεση σε ετήσια βάση έως ότου ζητήσει και η EPA τους απαλλάξει από αυτήν την απαίτηση – για πηγάδια που επιτρέπονται σύμφωνα με τον κανόνα της Κλάσης VI, μια τέτοια απελευθέρωση θα μπορούσε πιθανώς να αναμένεται μέχρι το τέλος της περιόδου PISC. Επειδή οι απαιτήσεις παρακολούθησης του κανόνα της κλάσης VI εστιάζονται στην προστασία των USDW, η EPA θεωρεί τον κανόνα RR ως συμπληρωματικό σε μεγάλο βαθμό με σχετικά μικρή επικάλυψη. Συνολικά, ο κανόνας κλάσης VI και το τμήμα RR δημιουργούν το βασικό ομοσπονδιακό πλαίσιο για τη ρύθμιση των γεωλογικών αποθήκευσης στις ΗΠΑ. (9)

Τσως η πιο αξιοσημείωτη πτυχή του προγράμματος UIC σε σχέση με άλλα ρυθμιστικά πλαίσια CCS παγκοσμίως είναι η σχέση μεταξύ των πολιτειών, που μπορούν να υποβάλουν αίτηση για υπεροχή, και της EPA. Αυτό έρχεται σε σαφή αντίθεση με το αυστραλιανό μοντέλο που συζητήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αλλά έχει κάποιες ομοιότητες με τον τρόπο που εφαρμόζεται η Οδηγία της ΕΕ από τα κράτη μέλη. Πριν από την οριστικοποίηση του κανόνα της Τάξης VI, τουλάχιστον πέντε πολιτείες είχαν υιοθετήσει κανονισμούς σχετικά με κάποια πτυχή της γεωλογικής αποθήκευσης. Ενώ υπάρχουν κοινά σημεία μεταξύ των κανόνων της πολιτείας και του τελικού κανόνα EPA, όπως η ανάγκη προστασίας των υπόγειων υδάτων και ορισμένες πτυχές του σχεδιασμού παρακολούθησης, υπάρχουν επίσης αξιοσημείωτες διαφορές σε θέματα όπως η σύνθεση του ρεύματος CO₂ και τα κενά που είναι να αντιμετωπιστούν είτε από την ομοσπονδιακή είτε από την πολιτειακή νομοθεσία. Η πρώτη πολιτεία που επιχείρησε να εναρμονίσει προϋπάρχοντες κανονισμούς για τη γεωλογική αποθήκευση με τις ελάχιστες απαιτήσεις του προγράμματος Τάξης VI είναι η Βόρεια Ντακότα. Από τις αρχές του 2015, εκκρεμούσε η αίτηση της πολιτείας για πρωτοκαθεδρία στην Τάξη VI. (9)

7.4 Νορβηγία

7.4.1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη βιομηχανικής κλίμακας CCS στη Νορβηγία, ξεκινώντας με το έργο Sleipner το 1996, παρέχει ένα μοναδικό μακρύ ιστορικό εμπειρίας με το CCS και παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την προβλεπόμενη παγκόσμια ανάπτυξη του CCS. Μέχρι το τέλος του 2017, το έργο Sleipner CCS είχε αποθηκεύσει 17 εκατομμύρια τόνους (Mt) CO₂, το οποίο μαζί με το έργο Snøhvit CCS, το οποίο έχει αποθηκεύσει επιπλέον 5 Mt από τότε που ξεκίνησε το 2008, δίνει συνολικά 22 Mt αποθηκευμένους σε αλατούχους υδροφορείς υπερακτίως της Νορβηγίας. Οι παρατηρήσεις παρακολούθησης και τα αποτελέσματα μοντελοποίησης από αυτά τα έργα παρέχουν σημαντικές μετρήσεις απόδοσης αποθήκευσης CO₂ σχετικά με τη χωρητικότητα αποθήκευσης, τους μηχανισμούς παγίδευσης και τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του CO₂ στο υπέδαφος. Πιο πρόσφατα, το έργο Sleipner CCS έχει επίσης χειριστεί και αποθηκεύσει ροές δέσμευσης CO₂ από γειτονικά κοιτάσματα αερίου, δίνοντάς του μια αρχική κατάσταση διανομέα CCS. Το 2016, η νορβηγική κυβέρνηση ξεκίνησε σχέδια για την ανάπτυξη ενός νέου έργου δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ πλήρους κλίμακας, που συνδέει τις χερσαίες βιομηχανικές πηγές CO₂ με την υπεράκτια αποθήκευση. Η μελέτη σκοπιμότητας ολοκληρώθηκε το 2016 για ένα έργο με προδιαγραφή σχεδιασμού για διαχείριση 1,3 Mt CO₂ ετησίως για 25 χρόνια. Η προτεινόμενη τοποθεσία αποθήκευσης, που ονομάζεται Smeaheia, είναι μια ομάδα δομικών κλεισιμάτων σε αλμυρούς υδροφορείς περίπου 60 χιλιόμετρα βορειοδυτικά του Μπέργκεν. Οι προτεινόμενες δεξαμενές αποθήκευσης είναι οι σχηματισμοί Jurassic Sognefjord, Fensfjord και Krossfjord της ομάδας Viking σε ένα εύρος βάθους μεταξύ 1200 m έως 1700 m. (18)

Τα έργα CCS βιομηχανικής κλίμακας στη Νορβηγία είναι σημαντικά για την ανάπτυξη και την επίδειξη των πολλών τεχνολογιών που εμπλέκονται στο CCS ως μέρος του αναδυόμενου ενεργειακού μείγματος χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Στο Sleipner, αναπτύχθηκε η πρώτη στον κόσμο εγκατάσταση δέσμευσης CO₂ (αμινών) με βάση την υπεράκτια πλατφόρμα, ως μέρος της ανάπτυξης κοιτασμάτων αερίου και συμπυκνωμάτων Sleipner, που βρίσκεται 250 χιλιόμετρα ανοικτά της νότιας Νορβηγίας. Το CO₂ εγχέεται και αποθηκεύεται στον σχηματισμό Utsira σε βάθος 800-1000m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ένα ρηχό πηγάδι με εκτροπή μεγάλης απόστασης χρησιμοποιείται για την έγχυση του CO₂ 2,4 km από τα φρεάτια παραγωγής και την πλατφόρμα παραγωγής. Η παρακολούθηση του χώρου αποθήκευσης έχει πραγματοποιηθεί κυρίως χρησιμοποιώντας μια σειρά από σεισμικά σύνολα δεδομένων χρόνου παρέλευσης που παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την αξία και τις δυνατότητες ανίχνευσης των μεθόδων απομακρυσμένης γεωφυσικής παρακολούθησης και για βελτιωμένη ποσοτικοποίηση των διεργασιών ροής που σχετίζονται με την αποθήκευση σε αλατούχους σχηματισμούς. Η 22ετής ιστορία απόδοσης του ενιαίου φρεατίου έγχυσης μεγάλης απόστασης στη Sleipner αποτελεί επίσης απόδειξη της αξίας του προσεκτικού σχεδιασμού και μηχανικής του φρεατίου. (18)

Το έργο Snøhvit CCS, το οποίο ξεκίνησε το 2008, αποτελεί μέρος της ανάπτυξης του κοιτάσματος αερίου Snøhvit στη Θάλασσα του Μπάρεντς. Το CO₂ αφαιρείται από το αέριο στην χερσαία μονάδα επεξεργασίας αερίου (Melkøya) και στη συνέχεια

μεταφέρεται μέσω ενός αγωγού μήκους 150 km σε ένα υποθαλάσσιο πρότυπο έγχυσης. Μέχρι το τέλος του 2017 σχεδόν 5 Mt CO₂ είχαν εγχυθεί στο υπέδαφος. Αρχικά, το CO₂ εγχύθηκε στον σχηματισμό Tubåen, έναν αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα κάτω από τον σχηματισμό Stø που φέρει αέριο. Ωστόσο, κατά τα πρώτα 3 χρόνια της έγχυσης παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση της πίεσης, κυρίως λόγω γεωλογικών φραγμών που περιόρισαν την πρόσβαση στον διαθέσιμο χώρο πόρων. Αυτό οδήγησε στην απόφαση να πραγματοποιηθεί μια παρέμβαση στο φρεάτιο το 2011 που οδήγησε σε ένα τροποποιημένο σχέδιο έγχυσης με το CO₂ να εγχέεται στον υδροφόρο ορίζοντα του σχηματισμού Stø. Η έγχυση συνεχίστηκε από τότε με σταθερή τάση πίεσης. Κρίσιμη σε αυτήν την αξιολόγηση ήταν η χρήση σεισμικών δεδομένων 4D, μετρητών κάτω οπών και μοντελοποίησης δεξαμενής που επέτρεψαν τη βελτιστοποίηση του σχεδίου έγχυσης CO₂. (18)

Από πολλές απόψεις, το έργο Snøhvit CCS, με ένα χερσαίο εργοστάσιο σύλληψης συνδεδεμένο μέσω υποθαλάσσιου αγωγού με υποθαλάσσιο φρεάτιο έγχυσης, έθεσε το τεχνικό πλαίσιο για το νέο πλήρους κλίμακας έργο Νορβηγικής Επίδειξης CCS (NCD), το οποίο θα χρησιμοποιεί παρόμοια σχεδιαστική διάταξη. Το κύριο νέο χαρακτηριστικό του έργου NCD είναι η συλλογή CO₂ από πολλαπλές χερσαίες τοποθεσίες δέσμευσης και η μεταφορά με πλοίο σε μια χερσαία ενδιάμεση τοποθεσία αποθήκευσης, με επακόλουθη συμπίεση και μεταφορά μέσω αγωγού σε υποθαλάσσιες κεφαλές έγχυσης. Μαζί, αυτά τα τρία έργα παρέχουν μια εξαιρετική βάση για τον σχεδιασμό μελλοντικών έργων υπεράκτιας αποθήκευσης CO₂, παρά τις σημαντικές γνώσεις που αποκτήθηκαν από τα πολλά χερσαία έργα χρήσης και αποθήκευσης CO₂. (18)

7.4.2 Δυναμική του νορβηγικού συστήματος καινοτομίας CCS

Αυτή η ενότητα συζητά τη δυναμική του νορβηγικού συστήματος καινοτομίας CCS ανακατασκευάζοντας την εμφάνιση και την εξέλιξή του (ανάπτυξη) τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Η αφήγηση οργανώνεται χρονολογικά σε δύο περιόδους. Κάθε περίοδος καλύπτει δύο επεισόδια που χαρακτηρίζονται από ένα συγκεκριμένο μοτίβο αλληλεπίδρασης μεταξύ των λειτουργιών. (19)

7.4.2.1 Περίοδος 1988–1999

Η έννοια του CCS στη Νορβηγία ξεκίνησε μεταξύ 1986 και 1988, όταν ερευνητές από το νορβηγικό ερευνητικό ίδρυμα SINTEF πρότειναν τη δέσμευση και αποθήκευση CO₂ σε μια μελέτη που διεξήχθη για τη μεγαλύτερη εταιρεία πετρελαίου της Νορβηγίας Statoil. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, δημοσιεύθηκε η έκθεση «το κοινό μας μέλλον» της Επιτροπής Brundtland σχετικά με την αυξανόμενη ένταση μεταξύ της οικονομικής ανάπτυξης και της οικολογικής επιδείνωσης. Μετά την προεδρία της επιτροπής, η Brundtland επανεξελέγη πρωθυπουργός της Νορβηγίας το 1990 και 1 χρόνο αργότερα εισήγαγε φόρο άνθρακα για διαφορετικά καύσιμα και τομείς. Αυτό σηματοδοτεί την έναρξη μιας εποχής όπου η Νορβηγία εκπληρώνει έναν πρωτοποριακό ρόλο στον τομέα της CCS. (19)

7.4.2.1.1 Επεισόδιο 1: πρωτοποριακές δραστηριότητες

Η εισαγωγή φόρου άνθρακα για υπεράκτιες δραστηριότητες πετρελαίου (περίπου €40 ανά εκπεμπόμενο τόνο CO₂) ώθησε την Statoil να διερευνήσει επιλογές για οικονομικά αποδοτικό χειρισμό του CO₂ στο υπεράκτιο κοιτάσμα φυσικού αερίου Sleipner West, συμπεριλαμβανομένης της υπόγειας αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Αυτό το πεδίο φυσικού αερίου περιέχει περίπου 9% CO₂ που πρέπει να αφαιρεθεί για να χρησιμοποιηθεί το αέριο για εμπορικούς σκοπούς. Εάν εξαεριζόταν, το CO₂ όχι μόνο θα είχε αυξήσει τις εκπομπές CO₂ της Νορβηγίας κατά 3%, αλλά θα επέβαλε επίσης οικονομική επιβάρυνση στο έργο λόγω του φόρου άνθρακα. (19)

Το 1992, η Statoil επέλεξε να εγχύσει το CO₂ στον σχηματισμό Utsira, έναν μεγάλο υδροφόρο ορίζοντα νοτιοδυτικά της Νορβηγίας με χωρητικότητα πιθανώς περισσότερο από εκατοντάδες φορές τις ευρωπαϊκές ετήσιες εκπομπές CO₂. Για να υλοποιήσει τα σχέδιά της, η Statoil διέθεσε έναν ερευνητικό προϋπολογισμό 1,25-2,5 εκατομμυρίων ετησίως για την προσομοίωση της κατανομής του CO₂ στον σχηματισμό Utsira. Με το παρόν, η Statoil συνεργάστηκε με το SINTEF και το τεχνικό πανεπιστήμιο NTNU με έδρα το Τρόντχάιμ. Επιπλέον, η Statoil ξεκίνησε εμπορικές προσπάθειες R&D για την εφαρμογή μιας μονάδας διαχωρισμού CO₂ υπεράκτια. Σε αυτή τη διαδικασία R&D ευθυγραμμίστηκαν με τον Kvaerner· έναν από τους μεγαλύτερους προμηθευτές τεχνολογίας της Νορβηγίας. Μετά από αυτά τα προγράμματα R&D, η Statoil επένδυσε 94 εκατομμύρια € στη μονάδα διαχωρισμού και ξεκίνησε τη λειτουργία της το 1996, δεσμεύοντας 1 Mt CO₂ κάθε χρόνο. (19)

Την ίδια χρονιά που η Statoil ανακοίνωσε τα σχέδιά της για δέσμευση CO₂ στον σχηματισμό Utsira (1992), η εταιρεία ξεκίνησε αρχικές συζητήσεις με την Kvaerner για να βρει μια οικονομικά αποδοτική λύση για τις εκπομπές CO₂ από υπεράκτιους αεριοστρόβιλους. Αυτές οι εκπομπές αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 80% της απόρριψης CO₂ από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου της Νορβηγίας και επομένως υπόκεινται σε υψηλούς φόρους άνθρακα. Λόγω αυτού του φόρου άνθρακα, ο Kvaerner γνώριζε την εμπορική αξία της τεχνολογίας δέσμευσης CO₂ και ξεκίνησε την R&D μιας τεχνικής μετά την καύση που βασίζεται στην απορρόφηση αμινών χρησιμοποιώντας επαφές μεμβράνης. Αυτή η R&D έγινε εν μέρει σε συνεργασία, αλλά και σε ανταγωνισμό με παρόμοιες εξελίξεις στο εξωτερικό. Κατά τη διάρκεια του έργου, η Kvaerner δημιούργησε μια συνεργασία με την Gore Industries και συμμετείχε έξι άλλες διεθνείς εταιρείες πετρελαίου εκτός από τη Statoil. (19)

Κατά τη διάρκεια των προσπαθειών R&D του Kvaerner, η Νορβηγική Ένωση Βιομηχανίας Πετρελαίου επέκρινε τη δέσμευση CO₂ σε υπεράκτιους αεριοστρόβιλους επισημαίνοντας τις απώλειες ενέργειας στη διαδικασία δέσμευσης και το αδύνατον υψηλό κόστος. Επιπλέον, ορισμένες περιβαλλοντικές ομάδες, συμπεριλαμβανομένης της Greenpeace, έθεσαν μια κριτική σημείωση για την αποθήκευση CO₂ στον σχηματισμό Utsira, καθώς ισχυρίστηκαν ότι η Statoil παραβίαζε τη Σύμβαση του Λονδίνου όταν «έριχνε» CO₂ κάτω από τον βυθό της θάλασσας. (19)

7.4.2.1.2 Επεισόδιο 2: CCS, μια τεχνολογία που συζητήθηκε έντονα

Το 1997, η Νορβηγία υιοθέτησε —αλλά δεν έχει ακόμη επικυρώσει— το Πρωτόκολλο του Κιότο. Για να επιτύχει τους στόχους του Κιότο—δηλ. μια αύξηση των εκπομπών GHG περιορισμένη στο 1% μεταξύ 2008 και 2012 σε σύγκριση με το επίπεδο του 1990 (NME, 1997)—δημιουργήθηκε το πρόγραμμα χρηματοδότησης

KLIMATEK. Αυτό το πρόγραμμα διαχειρίστηκε το Συμβούλιο Έρευνας της Νορβηγίας και προώθησε την R&D διαφόρων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών. Στα πρώτα 4 χρόνια του προγράμματος, σχεδόν το ήμισυ του προϋπολογισμού της KLIMATEK, ύψους 3 εκατομμυρίων ετησίως, πήγαινε σε έργα που σχετίζονται με την CCS. Αυτή η χρηματοδότηση συνήθως οδήγησε σε συσσωρευμένο κύκλο εργασιών από ιδιώτες 3-4 φορές μεγαλύτερο από τη χρηματοδοτούμενη αξία. (19)

Μεταξύ άλλων, η τεχνολογία σύλληψης μετά την καύση του Kvaerner έλαβε χρηματοδότηση μέσω της KLIMATEK για τη δημιουργία μιας εργαστηριακής ερευνητικής μονάδας στο SINTEF και μιας μεγαλύτερης πιλοτικής μονάδας στις εγκαταστάσεις «K-lab» της Statoil στον τερματικό σταθμό αερίου στο Karstø. Αυτό το πρώτο πιλοτικό έργο στη Νορβηγία για τη δέσμευση CO₂ από τα καυσάερια έληξε το 1999 και κατέληξε σε πολλά διπλώματα ευρεσιτεχνίας. Την ίδια περίοδο, η άλλη μεγάλη εταιρεία τεχνολογίας της Νορβηγίας «Aker Technology» ξεκίνησε ένα έργο έρευνας και ανάπτυξης δέσμευσης οξυγόνου βασισμένο σε έναν αεριοστρόβιλο συνδυασμένου κύκλου. Σε αυτό το έργο E&A, η Aker δημιούργησε μια συνεργασία με τη γαλλική εταιρεία ανάπτυξης στροβίλων Alstom και (οικονομικά) ευθυγραμμίστηκαν με αρκετές εταιρείες ενέργειας. Αυτή η κοινοπραξία κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την τεχνολογία «High Oxygen» το 1999. (19)

Η πρώτη σημαντική δημόσια και ιδιωτική ερευνητική προσπάθεια σχετικά με την αποθήκευση CO₂ είναι το έργο αποθήκευσης CO₂ του υδροφόρου ορίζοντα φυσιολογικού ορού, το οποίο διεξήχθη μεταξύ 1998-1999. Αυτό το συγχρηματοδοτούμενο από την ΕΕ έργο ύψους 5 εκατομμυρίων ευρώ συντονίστηκε από την Statoil και περιλάμβανε έναν μακρύ κατάλογο διεθνών εταιρειών πετρελαίου, φυσικού αερίου και ενέργειας, καθώς και ερευνητικών ινστιτούτων. Ο κύριος στόχος αυτού του προγράμματος ήταν η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του CO₂ στη θέση αποθήκευσης της Statoil στον σχηματισμό Utsira, η οποία οδήγησε στην πρώτη στον κόσμο 3D σεισμική έρευνα του CO₂ σε έναν υδροφόρο ορίζοντα. (19)

Το 1998, η δεύτερη μεγαλύτερη εταιρεία πετρελαίου της Νορβηγίας, η Norsk Hydro, ξεκίνησε το έργο Hydrokraft. Αυτό κατανόησε την ανάπτυξη μιας τεχνολογίας δέσμευσης πριν από την καύση με έναν ολοκληρωμένο συνδυασμένο κύκλο αναμόρφωσης για μια προτεινόμενη μονάδα παραγωγής ενέργειας 1200 MW. Οι Larsen και Ruud (2005) (19) εξηγούν ότι το έργο Hydrokraft ταίριαζε σωστά στη σφοδρή πολιτική συζήτηση σχετικά με τις δύο παραχωρήσεις που έλαβε η εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας Naturkraft - μια κοινοπραξία των Statoil, Norsk Hydro και Statkraft - για την κατασκευή σταθμών παραγωγής ενέργειας με αέριο. Αυτή η συζήτηση αφορούσε αρχικά το αν έπρεπε να κατασκευαστούν ή όχι αυτές οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου, αλλά αφού αρκετές περιβαλλοντικές ΜΚΟ με επιρροή — συμπεριλαμβανομένων των Bellona και Nature and Youth— εισήγαγαν την έννοια του CCS στο δημόσιο τομέα, άλλαξε γρήγορα στο εάν θα κατασκευαστούν αυτές οι εγκαταστάσεις με ή χωρίς CCS. Ιδιαίτερα αφότου η Norsk Hydro ξεκίνησε το «οικονομικό» έργο Hydrokraft, το οποίο έκανε οποιαδήποτε άλλη επιλογή να μοιάζει με «τεχνολογία λίθινης εποχής». (19)

Αυτό διευκρινίζει ότι οι συνεχιζόμενες δραστηριότητες R&D είχαν τεράστιο αντίκτυπο στην πολιτική και δημόσια νομιμότητα της τεχνολογίας CCS. Επηρεασμένη από την «Κοινή δράση κατά των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με αέριο», η οποία θεωρείται ως η ευρύτερη εκστρατεία περιβαλλοντικής κίνησης της δεκαετίας, η

νορβηγική αρχή ελέγχου της ρύπανσης (SFT) αρνήθηκε να εκδώσει τις πλήρεις άδειες εκπομπών που απαιτούνται από τη Naturkraft για την ανάπτυξη ενέργειας φυσικού αερίου στο Νορβηγία. Αυτό σήμαινε ότι ο μόνος τρόπος συμμόρφωσης ήταν η κατασκευή μιας εγκατάστασης CCS ως αναπόσπαστο μέρος του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, αυτό το υπονοούμενο προκάλεσε ισχυρή κοινοβουλευτική αντιπολίτευση. Ειδικά μετά την απόφαση της Norsk Hydro το 1999 να θέσει προσωρινά σε αναμονή το έργο της Hydrokraft, λόγω τεχνικών και οικονομικών δυσκολιών. Αυτή η πολιτική κρίση είχε ως αποτέλεσμα την παραίτηση της κυβέρνησης μειοψηφίας υπό τον Bondevik τον Μάρτιο του 2000. (19)

7.4.2.2 Περίοδος 2000–2007

Η κατάσταση σχετικά με την ανάπτυξη ηλεκτρικής ενέργειας φυσικού αερίου στη Νορβηγία άλλαξε αμέσως μετά την παραίτηση της κυβέρνησης Bondevik το 2000. Η προσωρινή κυβέρνηση, με επικεφαλής τον Stoltenberg, ευνόησε την ηλεκτρική ενέργεια φυσικού αερίου και αποφάσισε να εκδώσει πλήρεις άδειες εκπομπών για τους δύο σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής της Naturkraft και έναν άλλο για την Industrikraft Midt- Norge. Ωστόσο, οι εκλογές του 2001 επανέφεραν τον Μπόντεβικ στην εξουσία, η νέα διοίκηση του οποίου ήταν ακόμη πιο αφοσιωμένη στην ανάπτυξη του CCS. Αυτό σηματοδοτεί την έναρξη της δεύτερης περιόδου αυτής της ανάλυσης, η οποία διαρκεί μέχρι το 2008. (19)

7.4.2.2.1 Επεισόδιο 3: αφιέρωση στο CCS

Παρόλο που ο Μπόντεβικ δεν μπόρεσε να ανατρέψει τις αποφάσεις που έλαβε η κυβέρνηση Στόλτενμπεργκ, οι ενεργειακές πολιτικές άλλαξαν γρήγορα όταν επέστρεψε στην εξουσία το 2001. Μετά τις διαπραγματεύσεις πολιτικής μετά τις εκλογές, ανακοινώθηκε ότι "δεν θα χορηγούνταν περαιτέρω παραχωρήσεις για τα εργοστάσια ορυκτών καυσίμων χωρίς CCS". Αυτή δεν ήταν μόνο μια σαφής δήλωση προς οποιονδήποτε οργανισμό που σχεδιάζει να αναπτύξει ενέργεια σε φυσικό αέριο, αλλά υπονοούσε επίσης ότι η νορβηγική κυβέρνηση έπρεπε να υποστηρίξει την ανάπτυξη του CCS για να καταστεί βιώσιμη η ανάπτυξή του. Κατά συνέπεια, ο προϋπολογισμός για την ανάπτυξη τεχνολογιών περιβαλλοντικού ήχου στο πρόγραμμα χρηματοδότησης KLIMATEK αυξήθηκε σημαντικά και διατέθηκε σε μεγάλο βαθμό στην R&D της CCS. (19)

Το 2002 ξεκίνησε το έργο KMB CO₂. Η πρώτη φάση (2002–2006) αυτού του εθνικού έργου ανάπτυξης ικανοτήτων έλαβε χρηματοδότηση ύψους 13 εκατομμυρίων € και επικεντρώθηκε κυρίως στην υπόγεια αποθήκευση CO₂ και την ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR). Την ίδια χρονιά, το έργο SACS-II διαδέχθηκε το 3ετές πρόγραμμα CO₂Store. Αυτό το πρόγραμμα, το οποίο επικεντρώθηκε στην αποθήκευση CO₂ σε υδροφόρους ορίζοντες, συγχρηματοδοτήθηκε από την ΕΕ και συμμετείχαν 19 διεθνείς οργανισμοί από τη βιομηχανία και τα ερευνητικά ιδρύματα. Εκτός από αυτές τις εξελίξεις στην έρευνα αποθήκευσης CO₂, το πρόσφατα διαθέσιμο πρόγραμμα χρηματοδότησης υποστήριξε επίσης την επέκταση των μελετών σχετικά με τη δέσμευση CO₂. (19)

Αφού η Norsk Hydro έθεσε στο ράφι την τεχνολογία της Hydrokraft, ξεκίνησε το έργο Advanced Zero Emission Power (AZEP), το οποίο περιελάμβανε την ανάπτυξη

ενός αεριοστρόβιλου υψηλής θερμοκρασίας οξυκαυσίμου με τεχνολογία διαχωρισμού μεμβράνης. Αυτό το έργο ήταν μέρος του προγράμματος δέσμευσης άνθρακα (CCP), ενός διεθνούς προγράμματος που διευθύνεται από 8–10 εταιρείες πετρελαίου, με δημόσια υποστήριξη από το 5ο Πρόγραμμα Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ και το Συμβούλιο Έρευνας της Νορβηγίας. Μια άλλη μικρότερη συνεισφορά της Νορβηγίας στο CCP ήταν το πρόγραμμα NORCAP, το οποίο δοκίμασε πολλές υποσχόμενες τεχνολογίες δέσμευσης CO₂. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών δέσμευσης συνεχίστηκε όταν εισήλθαν στην αγορά σχετικά μικρές εταιρείες που βασίζονται στην τεχνολογία, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα το έργο Zero Emission Gas (ZEG) και το πρόγραμμα Zero Emission Norwegian Gas (ZENG). Επιπλέον, η νορβηγική εταιρεία τεχνολογίας Sargas, μια άλλη νέα εταιρεία το 2003, ξεκίνησε το σχεδιασμό μιας τεχνολογίας σύλληψης μετά την καύση, βασισμένη σε διπλώματα ευρεσιτεχνίας της Siemens. (19)

Δίπλα σε αυτές τις συνεχιζόμενες προσπάθειες R&D, η Statoil ανακοίνωσε το δεύτερο εμπορικό της έργο CCS σχετικά με τη διαχείριση φυσικού αερίου το 2001. Η ανάπτυξη αυτού του έργου που ονομάζεται Snøhvit («Χιονάτη») υποκινήθηκε από το έργο Sleipner της Statoil και τον υφιστάμενο ακόμη φόρο άνθρακα. Το έργο περιλαμβάνει τη μεταφορά φυσικού αερίου από το κοιτάσμα αερίου Snøhvit σε ένα χερσαίο διυλιστήριο LNG που βρίσκεται στο Hammerfest. Εκεί, το CO₂ διαχωρίζεται από το αέριο και συμπιέζεται. Αντί να εξαερίζεται το CO₂ στην ατμόσφαιρα, που θα αύξανε τις εκπομπές GHG της Νορβηγίας κατά 2%, 700 kt CO₂/έτος μεταφέρονται πίσω στην υποθαλάσσια εγκατάσταση με αγωγό και εγχέονται σε έναν υπεράκτιο γεωλογικό σχηματισμό κάτω από τη δεξαμενή αερίου. (19)

Η νορβηγική κυβέρνηση δεν διέθετε συγκεκριμένο νομικό πλαίσιο για την αποθήκευση CO₂ όταν η Statoil ξεκίνησε τα έργα Sleipner και Snøhvit. Ως εκ τούτου, ισχύουν οι υφιστάμενοι κανονισμοί εξόρυξης σε αυτά. Αυτό σημαίνει ότι η Statoil είναι υπεύθυνη για το αποθηκευμένο CO₂ όσο το πεδίο βρίσκεται σε λειτουργία. Μετά από αυτό, θα προετοιμάσει το πεδίο για να το παραδώσει στη νορβηγική κυβέρνηση, η οποία στη συνέχεια είναι υπεύθυνη για το δεσμευμένο CO₂. Στο επόμενο και πιο πρόσφατο επεισόδιο, η μεταβίβαση της ευθύνης για το αποθηκευμένο CO₂ βελτιώθηκε περαιτέρω όταν αυτό το θέμα συμπεριλήφθηκε στις ευρωπαϊκές οδηγίες. Επιπλέον, σημαντικά διεθνή νομικά ζητήματα που σχετίζονται με το περιβάλλον κατέστησαν σαφή σύμφωνα με τη Σύμβαση του Λονδίνου και τις συνθήκες OSPAR. (19)

7.4.2.2 Επεισόδιο 4: προβλέψεις για το μέλλον

Η προσωρινή κυβέρνηση υπό τον Στόλτενμπεργκ έδωσε άδεια για την κατασκευή τριών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με αέριο χωρίς CCS το έτος 2000. Όταν επέστρεψε στην εξουσία το 2005, η δεύτερη κυβέρνησή του έθεσε πολύ φιλόδοξους στόχους μείωσης των εκπομπών, δηλαδή μείωση των εκπομπών GHG κατά 30% έως το 2020 και να είναι ουδέτερος ο άνθρακας το 2050. Αυτό έδωσε αφορμή για πολλές διαφωνίες σχετικά με την ανάγκη εφαρμογής CCS στους νέους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, κατά τις διαπραγματεύσεις πολιτικής τον Σεπτέμβριο του 2005. Στο τέλος, η «πολιτική δήλωση της Σόρια Μόρια» ανέφερε ότι έπρεπε να γίνουν νέες παραχωρήσεις για την ηλεκτρική ενέργεια με καύση αερίου με βάση το CCS. Πρότεινε επίσης ότι η κυβέρνηση θα πρέπει να μετασκευάσει το εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής Naturkraft στο Karstø (420 MW) με δικά του έξοδα και να στηρίξει οικονομικά τις μονάδες

σύλληψης των άλλων δύο σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, εάν θα κατασκευαστούν. Επιπλέον, η δήλωση διαβεβαίωσε ότι η κυβέρνηση θα ενίσχυε διάφορα μέτρα πολιτικής και τη δημόσια χρηματοδότηση για να προωθήσει την υλοποίηση της υποδομής και των εγκαταστάσεων δοκιμών για CCS. (19)

Σε συνέχεια αυτής της δήλωσης, η κυβέρνηση υποστήριξε οικονομικά ένα επίγειο εργαστήριο για την έρευνα αποθήκευσης CO₂ σχετικά με τις οδούς διαρροής CO₂ και τις τεχνικές παρακολούθησης. Αυτό το ερευνητικό κέντρο διευθύνεται από το SINTEF και περιλαμβάνει άλλες επτά Νορβηγικές ερευνητικές ομάδες. Επιπλέον, η κυβέρνηση και η Statoil συμφώνησαν τον Οκτώβριο του 2006 να ιδρύσουν ένα κέντρο δοκιμών τεχνολογίας σύλληψης στο Mongstad. Το σημαντικότερο βιομηχανικό διωλιστήριο της Νορβηγίας και πηγή εκπομπών CO₂. Αυτό ήταν μέρος της έγκρισης της κυβέρνησης για έναν νέο αεριοστρόβιλο συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος (CHP) (630 MW) στο Mongstad. Το πρώτο βήμα στη συμφωνία είναι η υλοποίηση των εγκαταστάσεων δοκιμών το 2010. με ικανότητα δέσμευσης 100 kt CO₂/έτος. Το επόμενο στάδιο, το οποίο ξεκινά το 2014, περιλαμβάνει την κατασκευή μιας πλήρους κλίμακας εγκατάστασης δέσμευσης CO₂ μετά την καύση σε σύνδεση με τη μονάδα CHP, που δεσμεύει περισσότερους από 1,5 Mt CO₂ ετησίως. (19)

Εκτός από την ίδρυση αυτών των κέντρων δοκιμών και την περαιτέρω εγγραφή νορβηγικών οργανισμών σε μεγάλα διεθνή προγράμματα R&D, πολλά από τα έργα R&D που ξεκίνησαν στις αρχές της χλιετίας ενισχύθηκαν σε αυτό το επεισόδιο. Σημαντική από αυτή την άποψη είναι η δεύτερη φάση του κύρους KMB CO₂. Αυτό το πρόγραμμα ύψους 29 εκατομμυρίων οχημάτων με το όνομα «BIG CO₂» εκτελείται από το 2007 έως το 2011. Επιπλέον, η κοινοπραξία υπό την ηγεσία της Norsk Hydro ξεκίνησε το 2005 με την κατασκευή μιας μονάδας επίδειξης 100 kW της τεχνολογίας oxyfuel που αναπτύχθηκε στο έργο AZEP. Ωστόσο, το έργο σταμάτησε 2 χρόνια αργότερα λόγω μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων. Το πιο επιτυχημένο πρόγραμμα ZENG εργάζεται για την επίδειξη ενός συστήματος καύσης οξυγόνου σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με αέριο ισχύος 50–70 MW· και η ανάπτυξη ενός συστήματος παραγωγής υδρογόνου με ολοκληρωμένη δέσμευση CO₂ συνεχίζεται εντός της κοινοπραξίας ZEG. (19)

Το πρόγραμμα χρηματοδότησης CLIMIT υποστηρίζει οικονομικά το μεγαλύτερο μέρος αυτής της R&D. Το CLIMIT εστιάζει μόνο στις τεχνολογίες CCS και ο προϋπολογισμός του είναι περίπου 17,5 εκατ. € ετησίως. Ο προϋπολογισμός διαχειρίζεται από το Συμβούλιο Έρευνας της Νορβηγίας και της Gassnova (2006). Ο τελευταίος είναι ένας ενδιάμεσος οργανισμός που ενεργεί για λογαριασμό της κυβέρνησης σχετικά με την υλοποίηση έργων επίδειξης CCS. Αντίστοιχα, η Gassnova είναι ένας σημαντικός εταίρος χρηματοδότησης στην ανάπτυξη της τεχνολογίας «Just Catch» της AkerKværner, η οποία περιλαμβάνει μια τεχνολογία μετά την καύση που βασίζεται σε αμίνες για αεριοστρόβιλους συνδυασμένου κύκλου. Η AkerKværner και οι εταίροι της στην κοινοπραξία επένδυσαν 4 εκατομμύρια € σε αυτήν την τεχνολογία, η οποία πρέπει να επιδειχθεί στον αεριοστρόβιλο 420 MW της Naturkraft στο Karstø το 2009, δεσμεύοντας 100 kt CO₂ ετησίως. Εάν είναι επιτυχής, η τεχνολογία θα κλιμακωθεί σε χωρητικότητα 1 Mt CO₂/έτος το 2012. Οι υπεράκτιοι σχηματισμοί Utsira και Johansen αξιολογούνται για αποθήκευση CO₂ από το Karstø (και το Mongstad). (19)

Ο Aker Kværner συμμετείχε επίσης —μαζί με τη Statoil, τη Shell Norway, τη Norsk Hydro και το ερευνητικό ίδρυμα για την κλιματική αλλαγή CICERO— σε μια μελέτη που ονομάζεται «αλυσίδα αξίας CO₂» το 2005, με επίκεντρο τη δέσμευση CO₂ και το EOR. Τα ελπιδοφόρα αποτελέσματα αυτής της μελέτης οδήγησαν στην ανακοίνωση του «έργου Halten CO₂» από τη Statoil και τη Shell Νορβηγίας τον Μάρτιο του 2006. Το έργο αφορούσε ένα εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής με αέριο ισχύος 860 MW με CCS στο Tjeldbergodden για την τροφοδοσία ενός εργοστασίου μεθανόλης και υπεράκτιων δραστηριοτήτων. Το δεσμευμένο CO₂ θα χρησιμοποιηθεί για EOR στα κοιτάσματα πετρελαίου Draugen και Heidrun. Αν και η Shell και η Statoil επένδυσαν ήδη 50 εκατομμύρια € στο έργο, αυτό τέθηκε σε αναμονή τον Ιούνιο του 2007, καθώς μελέτες έδειξαν ότι στην περίπτωση αυτή το EOR δεν θα ήταν εμπορικά βιώσιμο. (19)

Δίπλα στο ενδιαφέρον της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου για την ανάπτυξη νέων εμπορικών έργων CCS, αρκετές νορβηγικές εταιρείες κοινής ωφελείας, καθώς και βιομηχανίες έντασης ενέργειας, υπέβαλαν αίτηση για άδειες κατασκευής σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα με CCS. Η πρώτη εφαρμογή προήλθε από τη Hammerfest Energi τον Ιανουάριο του 2005, η οποία σχεδίαζε να κατασκευάσει μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με αέριο ισχύος 100 MW βασισμένη στην τεχνολογία μετά την καύση Sargas. Ωστόσο, τον Ιούνιο του 2007, η Νορβηγική Διεύθυνση Υδάτινων Πόρων και Ενέργειας (NVE) αποφάσισε να μην χορηγήσει παραχώρηση λόγω κακής ενεργειακής απόδοσης του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με πλήρη δέσμευση CO₂ θα μπορούσε να είναι έτοιμος το 2015, όλοι οι αιτούντες εξακολουθούν να περιμένουν την απόφαση της NVE. (19)

Αυτό οδηγεί στην περιέργη περίπτωση όπου η νορβηγική κυβέρνηση είναι επί του παρόντος το μόνο μέρος που επενδύει σε πλήρη ανάπτυξη CCS που σχετίζεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (στο Mongstad και στο Karstø). Αυτό είναι εν μέρει το αποτέλεσμα μιας ευρείας πολιτικής συναίνεσης ότι η CCS θα διαδραματίσει βασικό ρόλο στο μέλλον της Νορβηγίας με χαμηλές εκπομπές. Μια ευρωπαϊκή έρευνα έδειξε ότι από όλες τις ευρωπαϊκές χώρες, το CCS διαδραματίζει μακράν τον μεγαλύτερο -και εξακολουθεί να αυξάνεται- ρόλο στην εθνική συζήτηση για την κλιματική αλλαγή στη Νορβηγία. Το τελευταίο απεικονίζεται ωραία από τον Πρωθυπουργό Στόλτενμπεργκ στην πρωτοχρονιά του ομιλία την 1η Ιανουαρίου 2007, στην οποία συνέκρινε τις εξελίξεις του CCS στη Νορβηγία με την προσγείωση των ΗΠΑ στο φεγγάρι το 1969. «Το όραμά μας είναι ότι μέσα σε επτά χρόνια θα έχει θέσει σε εφαρμογή τεχνολογία σύλληψης και αποθήκευσης. Αυτό θα είναι μια σημαντική σημαντική ανακάλυψη στις προσπάθειες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη Νορβηγία, και μόλις τα καταφέρουμε, είμαι πεπεισμένος ότι και ο υπόλοιπος κόσμος θα ακολουθήσει το παράδειγμά μας. Αυτό είναι ένα μεγάλο έργο για τη χώρα μας. Είναι η προσγείωση μας στο φεγγάρι». (19)

7.5 Ολλανδία: το πρόγραμμα Rotterdam Nucleus

7.5.1 Εισαγωγή

Ο Πυρήνας του Ρότερνταμ (το «Πιλοτικό Έργο») σχεδιάστηκε στην Ολλανδία, εξετάζοντας τις αναφορές της εθνικής και περιφερειακής νομοθεσίας στο σύμπλεγμα του διεθνούς καθεστώτος. Ο πυρήνας του Ρότερνταμ είναι ένα έργο CCS μεγάλης κλίμακας που στοχεύει στη μεταφορά CO₂ από το λιμάνι του Ρότερνταμ και την αποθήκευση του στον βυθό της Βόρειας Θάλασσας. Περιλαμβάνει επίσης τη μεταφορά CO₂ από μη ολλανδικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στη Βόρεια Θάλασσα. Ο στόχος του πυρήνα του Ρότερνταμ είναι να αποθηκεύσει αρκετές εκατοντάδες μεγατόνων CO₂ σε υπεράκτιες γραμμές εντός ενός καθορισμένου χρονικού ορίζοντα 20 ετών. Εάν το έργο επιτύχει, οι τεχνολογίες CCS στον ευρωπαϊκό υποθαλάσσιο βυθό θα μπορούσαν να γίνουν πρότυπα προς μίμηση για περαιτέρω επενδύσεις εντός του μπλοκ. (20)

Το πιλοτικό έργο μπορεί να επηρεάσει τη νομική δομή μελλοντικών έργων με διασυννοριακό χαρακτήρα. Η ύπαρξη μιας αλυσίδας δημόσιων επενδύσεων για την υποστήριξη έργων CCS στην Ευρωπαϊκή Ένωση προκαλεί κριτική στους φωνητικούς περιβαλλοντολόγους εναντίον της ΕΕ επειδή δεν δίνει προτεραιότητα σε άλλα μέσα μετριασμού στο σχέδιο εργασίας της. Οι μελετητές σημειώνουν ότι οι τεχνολογίες CCS υποθαλάσσιου βυθού θα μπορούσαν να έχουν ευρύτερο αντίκτυπο στο θαλάσσιο περιβάλλον από τη μείωση των εκπομπών CO₂. Οι φορείς εκμετάλλευσης έχουν διεθνή υποχρέωση να προστατεύουν το θαλάσσιο περιβάλλον από δραστηριότητες στον βυθό της θάλασσας βάσει των διεθνών συνθηκών. Παρά το γεγονός ότι διαθέτει ένα ισχυρό σύνολο εθνικών κανόνων που ρυθμίζουν την χερσαία φάση του έργου, η Ολλανδία είναι κράτος μέλος των σχετικών διεθνών συνθηκών για την προστασία του βυθού και της βιοποικιλότητάς του. Ως εκ τούτου, οι εργολάβοι που λειτουργούν με ολλανδική άδεια, και το ολλανδικό δίκαιο, θα πρέπει να συνάδουν με το διεθνές δίκαιο. Η ad hoc ανάλυση έδειξε ότι μεγάλο μέρος της υπάρχουσας ολλανδικής νομοθεσίας προέρχεται από ευρωπαϊκά πρότυπα για την εφαρμογή CCS. (20)

Το διασυννοριακό CCS υποθαλάσσιου βυθού απαιτεί εκτεταμένη συνεργασία μεταξύ των κρατών που συμμετέχουν στην επιχείρηση. Η Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για το Δίκαιο της Θάλασσας [UNCLOS] δημιουργεί υποχρεώσεις για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος στο Μέρος XII εντός των θαλάσσιων ορίων των παράκτιων κρατών ή περιοχών πέραν της εθνικής δικαιοδοσίας (ABNJ). Ωστόσο, η UNCLOS δεν αναφέρει την έγχυση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς για αποθήκευση. Οι συνθήκες υπό την αιγίδα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) έγιναν πηγή κανονισμών CCS και περιφερειακών συμφωνιών, όπως η Σύμβαση για την Προστασία του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος του Βορειοανατολικού Ατλαντικού (OSPAR). Ωστόσο, ορισμένοι μελετητές υποστηρίζουν ότι ο κατακερματισμός του διεθνούς δικαίου στη ρύθμιση των δραστηριοτήτων στον βυθό της θάλασσας, όπως το CCS υποθαλάσσιου βυθού, αποκαλύπτει την ανάγκη υιοθέτησης ενός πιο ολοκληρωμένου συνόλου κανόνων για το CCS πριν γίνει μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία σε όλο τον κόσμο. (20)

Οι πρωταρχικές αρχές που διέπουν το CCS στο διεθνές σενάριο είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία του πυρήνα του Ρότερνταμ. Η ενέργεια έχει πολλαπλά

εννοιολογικά αντικείμενα, συμπεριλαμβανομένης της δράσης ως (I) προϊόν, (II) ως πόρος (III) ως τεχνολογία ή (IV) μιας δραστηριότητας. Να σημειωθεί ότι πριν από τη λειτουργία οποιουδήποτε ενεργειακού έργου, πρέπει να γίνει αξιολόγηση του «ενεργειακού αντικειμένου» σύμφωνα με το διεθνές δίκαιο για να προσδιοριστούν οι κανόνες και τα πλαίσια που υποστηρίζουν την επένδυση. Συγκεκριμένα, οι διεθνείς συμφωνίες δεν προέβλεπαν πρόβλεψη στο CCS μέχρι τον 21ο αιώνα. Επομένως, δεν είναι αυτονόητο εάν ένα έργο CCS θα ταξινομηθεί ως προϊόν, πόρος, τεχνολογία ή ως δραστηριότητα. Για αυτόν τον λόγο, ο επείγων χαρακτήρας της ύπαρξης νομικού πλαισίου για τις τεχνολογίες CCS στον ενεργειακό τομέα απαιτεί έναν «εκσυγχρονισμό» τέτοιων μέσων. Η πιο σημαντική περίπτωση είναι οι διαπραγματεύσεις στο πλαίσιο της Συνθήκης για τον Χάρτη Ενέργειας (ECT). Τα πιλοτικά σχέδια, όπως ο πυρήνας του Ρότερνταμ, θα ενσωματώσουν τελικά ένα ενεργειακό κριτήριο στην ECT και θα απαιτήσουν συνεργασία μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών τομέων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ανάλυση των πρωταρχικών αρχών βοηθά στη μεταφορά ενός ή περισσότερων ενεργειακών αντικειμένων στη μελέτη περίπτωσης. (20)

7.5.2 Ανάλυση του έργου

Το 2018, ο πυρήνας του Ρότερνταμ ξεκίνησε τη μελέτη σκοπιμότητας και τη φάση προσχεδιασμού στο λιμάνι του Ρότερνταμ. Αποτελείται από ένα one-stop-shop για ένα δίκτυο μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ ανοιχτής πρόσβασης. Επίσης, περιλαμβάνει τρεις συνδεδεμένους μεγάλου μεγέθους αγωγούς από το λιμάνι του Ρότερνταμ σε πολλές αποθηκευτικές περιοχές στη νότια Βόρεια Θάλασσα και συγκεντρώνει έναν χερσαίο ολλανδικό όμιλο ετερογενών δραστηριοτήτων. Το έργο αποτελεί μέρος ενός φιλόδοξου ευρωπαϊκού σχεδίου εργασίας για τα Διευρωπαϊκά Δίκτυα για την Ενέργεια (TEN-E), συμπεριλαμβανομένης της χρήσης διασυνοριακών γεωλογικών σχηματισμών υποθαλάσσιου βυθού. Αρκετά ευρωπαϊκά επενδυτικά προγράμματα, συμπεριλαμβανομένου του πυρήνα του Ρότερνταμ, αποτελούν μέρος μιας ευρύτερης ενεργειακής στρατηγικής για το «Διασυνοριακό δίκτυο CO₂ προτεραιότητας». (20)

Το έργο CCS περιλαμβάνει τρεις φάσεις: (I) δέσμευση CO₂ σε μεγάλους τελικούς εκπομπούς, (II) συμπίεση και μεταφορά του CO₂ σε έναν προορισμό αποθήκευσης και (III) έγχυση του υπό πίεση σε ένα κοίτασμα πετρελαίου/φυσικού αερίου στον χώρο των πόρων κατάλληλων γεωλογικών σχηματισμών. Ο πυρήνας του Ρότερνταμ περιλαμβάνει τρεις κύριους τομείς: (I) κρατικές εταιρείες, δηλαδή, Port of Rotterdam, EBN, Gasonie, είναι υπεύθυνες για την επένδυση στην υποδομή του CCS· (II) ιδιωτικές εταιρείες που ενδιαφέρονται να συμμετάσχουν σε κοινές συμφωνίες με κρατικές εταιρείες· (III) οι δημόσιες αρχές, όσον αφορά την ΕΕ, εξασφαλίζουν χρηματοδότηση και θεσπίζουν τις Οδηγίες για την ευθύνη για τους φορείς που εμπλέκονται στην επιχείρηση. Ως εκ τούτου, ο ρόλος της ΕΕ στην περιφερειακή ανάπτυξη των δικτύων CCS είναι να χρηματοδοτεί ενεργειακές υποδομές για τη δέσμευση CO₂ για θέματα ασφάλειας και να παρέχει στοιχεία της θεμελιώδους προσέγγισης. (20)

Τρεις κύριοι αγωγοί είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά στην ξηρά της Ολλανδίας. Το πιλοτικό έργο λειτουργεί μόνο στο τμήμα αποθήκευσης CO₂ και δεν συνεπάγεται

την έγχυση CO₂ ως μέσο ενισχυμένης ανάκτησης υδρογονανθράκων (EHR) ή οποιαδήποτε άλλη ανάκτηση πετρελαίου. Η εφαρμογή του πιλοτικού σχεδίου δεν εξαρτάται μόνο από τη συμμόρφωση με το ad hoc πλαίσιο. Ωστόσο, πρέπει να συμμορφώνεται με τα πρότυπα και τους κανονισμούς του διεθνούς δικαίου. Η Ολλανδία είναι μέλος της ECT και της Σύμβασης/Πρωτοκόλλου του Λονδίνου (LP/LP). Είναι επίσης μέλος της Task Force της Λεκάνης της Βόρειας Θάλασσας (NSBTRF), η οποία περιλαμβάνει μια πλατφόρμα δημόσιου-ιδιωτικού τομέα για συνεργασία σε διασυνοριακές CCS. Το NSBTRF αναπτύσσει κοινές αρχές για τη διαχείριση και τη ρύθμιση της μεταφοράς, της έγχυσης και της μόνιμης αποθήκευσης CO₂ στον υποθαλάσσιο βυθό της Βόρειας Θάλασσας. Το υπό ανάπτυξη κανονιστικό πλαίσιο για το πιλοτικό έργο είναι συνεπές με το διεθνές δίκαιο. Δεν είναι αυτό το πρόβλημα. Και πάλι, η δομή που σχεδιάστηκε για το έργο επωφελείται από ελλείποντα κενά στον νομικό σκελετό που διέπει τα διασυνοριακά έργα CCS. Για το λόγο αυτό, η παρούσα μελέτη στοχεύει στον εντοπισμό των κοινών αρχών και σημείων εκτροπής με το διεθνές δίκαιο πλαίσιο με τις διεθνείς υποχρεώσεις για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. (20)

7.5.3 Το κανονιστικό πλαίσιο και ο νόμος περί σχεδιασμού

Το 2007, η πλατφόρμα CCS Business οραματίστηκε την έναρξη της εγκατάστασης CSS και την παροχή οικονομικής βοήθειας, μετά την ανακοίνωση του πακέτου ευρωπαϊκής δράσης για το κλίμα τον Ιανουάριο του 2008. Το χρονοδιάγραμμα έχει τέσσερις φάσεις. Οι φάσεις 3 και 4 πραγματοποιήθηκαν από το 2008 έως το 2011. Οι ιδιωτικές εταιρείες, όπως η Shell, αναμένεται να λειτουργήσουν το 2024. Ο Πυρήνας του Ρότερνταμ ζήτησε οικονομική στήριξη από την ΕΕ βάσει της πρότασης NER της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και διερευνά την πιθανότητα να γίνει μέλος του Ευρωπαϊκού Σχέδιου επιδότησης NER300. (20)

Η διαδικασία αδειοδότησης απαιτεί αρκετές συμμορφώσεις με περιβαλλοντικές πράξεις και από τις δύο πλευρές. Κατά τις φάσεις 3 και 4, τέθηκαν σε ισχύ πέντε νέες νομοθεσίες, συμπεριλαμβανομένου του νόμου για τον εκσυγχρονισμό της εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων (EIA) τον Ιούλιο του 2010, την τροποποίηση του νόμου περί εξόρυξης (εφαρμογή της EU CCS Directive 2009/31/EC) τον Σεπτέμβριο του 2011, και την απόφαση για την EIA τον Απρίλιο του 2011. Οι γενικές αρχές προτείνουν ότι η ρύθμιση διαμετακόμισης και μεταφοράς CO₂ δεν είναι για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου [EOR] ή η ενισχυμένη ανάκτηση υδρογόνου [EHR] δεν είναι διαφανή ως προς το πεδίο εφαρμογής τους στις τεχνολογίες CCS. Πρέπει το πιλοτικό έργο να περιλαμβάνει EHR ή EOR στην εφαρμογή σχεδιασμού του; Στην πράξη, αυτός είναι ένας τομέας στον οποίο οι ασυνέπειες ενδέχεται να επηρεάσουν το έργο βάσει του διεθνούς νομικού πλαισίου. Δεν υπάρχει συνεκτική εφαρμογή του νόμου όσον αφορά το CCS offshore για τους σκοπούς του EHR, ειδικά για το διασυνοριακό CCS. (20)

7.5.3.1 Ολλανδικός κανονισμός

Ο ολλανδικός νόμος απαγορεύει τη χερσαία αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς και η διαδικασία αδειοδότησης έχει τρία διαφορετικά στάδια: δέσμευση, μεταφορά μέσω αγωγού και αποθήκευση. Το Εθνικό Σχέδιο Συντονισμού διέπει τις δύο τελευταίες διαδικασίες αδειοδότησης βάσει του νόμου περί χωροταξίας. Σε εθνικό

επίπεδο, στη δεύτερη φάση προεπεξεργασίας, το ολλανδικό Υπουργείο Περιβάλλοντος και η Πρωτοβουλία για το Κλίμα του Ρότερνταμ (RCI) υπέγραψαν συμφωνία συνεργασίας (Μνημόνιο Συνεργασίας ή ΜΥ) για την προώθηση της ολοκλήρωσης της CCS Technologies στο λιμάνι του Ρότερνταμ. (20)

Το ολλανδικό ρυθμιστικό πλαίσιο, συμπεριλαμβανομένων των αδειών και των αρχών για τον πυρήνα του Ρότερνταμ, είναι: (1) σε εθνικό και τοπικό επίπεδο, συμμόρφωση με τον νόμο περί προστασίας του περιβάλλοντος μέσω της διενέργειας ΕΙΑ· (2) υπό την Ολλανδική Αρχή Εκπομπών, την υποβολή αδειών εκπομπών (για σύλληψη, μεταφορά και αποθήκευση). Η δέσμευση του CO₂ απαιτεί τέσσερις ειδικούς κανονισμούς βάσει της ολλανδικής νομοθεσίας. Πρώτον, υπάρχει μια άδεια "όλα σε ένα" για φυσικές πτυχές σύμφωνα με τους νόμους για τους γενικούς περιβαλλοντικούς όρους (τοπικό επίπεδο). Δεύτερον, οι περιβαλλοντικές οικοδομικές άδειες απευθύνονται στην εθνική υπηρεσία που είναι αρμόδια για τη χορήγηση δικαιωμάτων σύλληψης στις Κάτω Χώρες. Τρίτον, βάσει του νόμου περί προστασίας της φύσης του 1998, η άδεια απευθύνεται σε τοπικό επίπεδο (επαρχία της Νότιας Ολλανδίας). Τέλος, βάσει του νόμου για τα ύδατα, η άδεια για τη δέσμευση CO₂ για το νερό απευθύνεται σε εθνικό επίπεδο (Υπουργείο Υποδομών και Περιβάλλοντος), που έχει ανατεθεί στην Κρατική Αρχή Υδάτων στην Ολλανδία. (20)

Το χρονοδιάγραμμα κατά το οποίο ο Υπουργός θα συντομεύσει ή θα παρατείνει την άδεια εάν ο φορέας εκμετάλλευσης δεν παραδώσει τα δικαιώματα εκπομπών βάσει του ETS είναι αβέβαιο. Ο νόμος παρέχει στον Υπουργό τη διακριτική ευχέρεια να τροποποιεί την περίοδο του κόστους για τον φορέα εκμετάλλευσης. Αυτό οδηγεί σε σοβαρή αβεβαιότητα για τους εργολάβους. Στη φάση των μεταφορών, το ρυθμιστικό πλαίσιο χωρίζεται σε επαρχιακούς και εθνικούς (κεντρικούς) νόμους. Πρώτον, βάσει του νόμου περί χωροταξικού σχεδιασμού, ένα Κρατικό Ζωνικό Σχέδιο θα απευθύνεται στο Υπουργείο Οικονομικών Υποθέσεων, Γεωργίας και Καινοτομίας και στο Υπουργείο Υποδομών και Περιβάλλοντος (εθνικό επίπεδο). Δεύτερον, βάσει του Νόμου για την Προστασία του Περιβάλλοντος, μια ΕΙΑ θα απευθύνεται τόσο στα Υπουργεία Οικονομικών Υποθέσεων όσο και στα Υπουργεία Υποδομών σε εθνικό επίπεδο. Τρίτον, η Υδατική Άδεια και η Σιδηροδρομική Άδεια είναι αρμοδιότητα του Υπουργείου Υποδομών και του τμήματος ProRail, που απευθύνεται στο Υπουργείο Οικονομικών και Γεωργίας (εθνικό επίπεδο). Οι περιβαλλοντικοί νόμοι στην Ολλανδία τροποποιήθηκαν το 2017, στο οποίο ο νόμος για τη διατήρηση της φύσης αντικατέστησε τρεις περιβαλλοντικούς νόμους, συμπεριλαμβανομένου του νόμου για την πανίδα και τη χλωρίδα. (20)

Στη φάση αποθήκευσης, παρουσιάζονται δύο εκτιμήσεις του ρυθμιστικού πλαισίου που ισχύουν για την περίπτωση. Πρώτον, η άδεια "όλα σε ένα" για φυσικές πτυχές σύμφωνα με το GECA. Δεύτερον, ο νόμος περί εξόρυξης κατευθύνει την άδεια αποθήκευσης στο Υπουργείο Οικονομικών Υποθέσεων (εθνικό επίπεδο). Με την υιοθέτηση αυτής της συμφωνίας πακέτου ως μέρος της περιβαλλοντικής αδειοδότησης υπάρχει κίνδυνος να αφήσει ορισμένα διαδικαστικά στοιχεία της αξιολόγησης κινδύνου Επίσης, δεν είναι σαφές εάν υπάρχει ασυμφωνία μεταξύ του νόμου περί πανίδας και χλωρίδας και της νομοθεσίας της ΕΕ για το περιβαλλοντικό δίκαιο. Σημειωτέον, το ίδιο πρόβλημα παρατηρείται σε ορισμένες από τις πιο σημαντικές διεθνείς νομικές συμφωνίες για δραστηριότητες CCS. Πολλές από τις εξωτερικές

επιδράσεις που διέπονται από το διεθνές δίκαιο της ενέργειας δεν λαμβάνουν κρίσιμες κοινωνικές αξιολογήσεις πριν από την έναρξη της αδειοδότησης. (20)

Ο ολλανδικός κανονισμός προσφέρει μια «απαλλαγή» για εργασιακές δραστηριότητες, παρουσιάζοντας «κίνδυνο για τη φύση». Αυτό το «ειδικό αίτημα» υποτίθεται ότι αποτελεί «εξαίρεση από τους κανόνες για αυτήν τη δραστηριότητα». Η προσαρμογή του ολλανδικού νόμου περί εξόρυξης στην Οδηγία της ΕΕ του 2009 για τη γεωλογική αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα (2009) αξίζει δύο σκέψεις. Δεν υπάρχει διευκρίνιση από την Οδηγία της ΕΕ για τους γενικούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και την ασφάλεια. Είναι προβληματικό σχετικά με πιθανές διαρροές από το χώρο αποθήκευσης. Οι ιατρικοί σύλλογοι υπογραμμίζουν ότι οι πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία του CCS περιλαμβάνουν ασφυξία ανθρώπων και ζώων, παραβίαση της παροχής ασφαλούς πόσιμου νερού, επιπλέον της γνωστής καρδιοαναπνευστικής νόσου και θνησιμότητας των συνεπειών της συνεχιζόμενης καύσης άνθρακα. Εξάλλου, διεθνείς συμφωνίες, όπως η UNCLOS, ορίζουν τη «ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος» ως «βλαβερές επιπτώσεις ως βλάβες στους έμβιους πόρους και τη θαλάσσια ζωή, κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία». Η μη ύπαρξη ρητού πλαισίου για την ανθρώπινη ασφάλεια μπορεί να παραβιάζει πολλές διεθνείς υποχρεώσεις που περιέχονται σε πολυμερείς συμφωνίες, αποτρέποντας το θαλάσσιο περιβάλλον να υποστεί ζημιά από τη ρύπανση. (20)

Συμπερασματικά, η Οδηγία υποστηρίζει ένα μορατόριουμ 20 ετών προτού η ευθύνη για τον τόπο αποθήκευσης μπορεί να μετατεθεί από τον φορέα εκμετάλλευσης στην αρμόδια αρχή. Συμπερασματικά, οι μεταφερόμενοι νόμοι της ΕΕ στην ολλανδική νομοθεσία είναι απίστευτα ωφέλιμοι από την άποψη της προστασίας του περιβάλλοντος. Ωστόσο, δεν είναι κάθε μεταφορά στο εθνικό δίκαιο εντελώς θετική και υποστηρίζει αυστηρότερους κανόνες για την ανάπτυξη CCS. Ο κίνδυνος κοινωνικής αξιολόγησης είναι ένα από τα σημεία που οι αναφορές στο μορατόριουμ της ΕΕ, για παράδειγμα, αναφέρουν μόνο έργα που βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης. Επομένως, το καθεστώς εξακολουθεί να ισχύει για έργα που βρίσκονται σε εξέλιξη (με όλες τις αβεβαιότητες). (20)

8.CCS και Ελλάδα

8.1 Εκπομπές στην Ελλάδα

Η Ελλάδα μπορεί να μην φημίζεται για τη βαριά βιομηχανία της σε σύγκριση με ορισμένους από τους Ευρωπαίους ομολόγους της. Ωστόσο, κάτω από την επιφάνεια βρίσκεται ένα σύνθετο βιομηχανικό τοπίο που συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές σε διάφορους τομείς. Αυτοί οι τομείς περιλαμβάνουν την παραγωγή τσιμέντου, χημικών προϊόντων, βιομηχανία μετάλλων και χάλυβα, εξόρυξη (παραγωγή αλουμινίου και μέχρι πρόσφατα νικέλιο) και την ολοένα αυξανόμενη επικράτηση των μηχανοκίνητων οχημάτων. Επιπλέον, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει μια κρίσιμη πηγή εκπομπών, κυρίως λόγω της εξάρτησής της από συμβατικά ορυκτά καύσιμα, όπως ο λιγνίτης και το αέριο. (21)

Η τσιμεντοβιομηχανία, αναπόσπαστο κομμάτι της ανάπτυξης των κατασκευών και των υποδομών, διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην ελληνική οικονομία. Ωστόσο, έχει επίσης σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ιδίως όσον αφορά τις εκπομπές άνθρακα και την κατανάλωση πόρων. Ομοίως, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα, συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στην ατμοσφαιρική ρύπανση, επηρεάζοντας τόσο το τοπικό περιβάλλον όσο και το παγκόσμιο κλίμα. (21)

Ο χημικός τομέας και η διύλιση πετρελαίου, αν και είναι κρίσιμοι για διάφορες διαδικασίες παραγωγής, θέτει περιβαλλοντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τις εκπομπές αερίων. Η παραγωγή χάλυβα και αλουμινίου είναι δύο άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες που παράγουν σημαντικές εκπομπές. (21)

Αυτός ο περίπλοκος ιστός βιομηχανικών δραστηριοτήτων και οι περιβαλλοντικές τους συνέπειες υπογραμμίζει την επιτακτική ανάγκη για την Ελλάδα να αντιμετωπίσει το προφίλ εκπομπών της και ως εκ τούτου η CCUS μπορεί να θεωρηθεί ως ένας κατάλληλος μηχανισμός για την καταπολέμηση των βιομηχανικών εκπομπών που μπορούν να εντοπιστούν, να συλληφθούν και να αποθηκευτούν υπόγεια. (21)

8.2 Δέσμευση και μεταφορά CO₂ στην Ελλάδα

Μελέτες έχουν δείξει ότι σήμερα η βιομηχανική ανάπτυξη CCUS μπορεί δυνητικά να συλλάβει 30 Mt και μπορεί να κλιμακωθεί σε 4.000 Mt έως το 2040. (21)

Μέχρι πρόσφατα, στην Ελλάδα, η καύση άνθρακα παρήγαγε το 39% των ακαθάριστων εκπομπών CO₂ της χώρας. Συγκεκριμένα, τρεις ενεργοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής συνδέονται με αυτές τις μεγάλες εκπομπές CO₂. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν στη Δυτική Μακεδονία είναι οι σταθμοί Άγιος Δημήτριος, Καρδιά και Μελίτη και βρίσκονται στη βιομηχανική επικράτεια της Δυτικής Μακεδονίας. Ωστόσο, σύμφωνα με το Ελληνικό Εθνικό Σχέδιο

Ενέργειας και Κλίματος, οι προαναφερθέντες σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής θα αποσυρθούν έως το 2023 και θα αντικατασταθούν από έναν νέο σταθμό, την Πτολεμαΐδα V, ο οποίος θα περιλαμβάνει δυνητικά το CCS στη λειτουργία του. (21)

Μέχρι σήμερα, δεν έχουν εισαχθεί άλλα σχέδια δέσμευσης CO₂ που αφορούν ελληνικές τοποθεσίες κρουσμάτων. Ωστόσο, ελληνικά Ινστιτούτα και Οργανισμοί έχουν συμμετάσχει ενεργά σε ευρωπαϊκά έργα που μελετούν και εφαρμόζουν τεχνολογίες δέσμευσης CO₂. (21)

8.3 Επιλογές αποθήκευσης CO₂ στην Ελλάδα

Οι υπόγειοι χώροι αποθήκευσης είναι το κλειδί στη στρατηγική της Ελλάδας για ανάπτυξη CCUS. Ωστόσο, δεν είναι ζωτικής σημασίας για αυτές τις τοποθεσίες να βρίσκονται αυστηρά στην Ελλάδα, καθώς το κόστος αποστολής CO₂ δεν είναι απαγορευτικό και το CO₂ θα μπορούσε να μεταφερθεί σε υπόγειες τοποθεσίες αλλού στη Μεσόγειο ή πιο μακριά. (21)

Η επιλογή των υπόγειων χώρων αποθήκευσης στην Ελλάδα βασίζεται σε τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, τη γεωλογία, την ύπαρξη γεωτρήσεων και τις διαθέσιμες σεισμικές πληροφορίες, την γειτνίαση με βιομηχανικές δραστηριότητες που εκπέμπουν CO₂ και την εγγύτητα σε μεταφορικές εγκαταστάσεις όπως σωλήνες ή/και λιμάνια. (21)

Η Μακεδονία έχει το πλεονέκτημα ότι βρίσκεται κοντά σε εγκαταστάσεις διύλισης καθώς και κοντά σε χερσαίους και παράκτιους κόμβους συγκοινωνιών της Θεσσαλονίκης στα ανατολικά και του Ballsh και του Fier (Αλβανία) στα δυτικά. Επιπλέον, μπορεί να εξυπηρετήσει την Αλβανία, τη Βόρεια Μακεδονία και τη Βουλγαρία. Από εμπορική άποψη, οι διασυνδέσεις του οδικού δικτύου Εγνατίας, Στερεάς Ελλάδας και Ιονίου, η διαδρομή του αγωγού φυσικού αερίου TAP²⁴ από τα βόρεια σύνορα της Δυτικής Μακεδονίας, οι αναμενόμενοι σταθμοί επαναεριοποίησης σε Θεσσαλονίκη, Καβάλα και Αλεξανδρούπολη, όλα υποδηλώνουν σημαντικό στρατηγικό ενδιαφέρον για τις Περιφέρειες της Μακεδονίας. (21)

Γεωγραφικά, τέσσερις περιοχές παρουσιάζουν κύριο ενδιαφέρον για την υπόγεια αποθήκευση CO₂ και βρίσκονται στη Δυτική, Κεντρική και Ανατολική Μακεδονία. Ειδικά η Δυτική Μακεδονία είναι η μεγαλύτερη πηγή CO₂ στην Ελλάδα λόγω της παρουσίας των λιγνιτικών σταθμών. Αν και η χρήση του λιγνίτη ήταν λανθάνουσα, αυτές οι μονάδες συνεχίζουν να «καίνε» για άλλη μια φορά λιγνίτη και μαζούτ μέχρι τη στιγμή που θα αντικατασταθούν πλήρως από φυσικό αέριο. (21)

Οι τύποι των συμπλεγμάτων αποθήκευσης περιλαμβάνουν σχηματισμούς αλατούχου, ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, μη εξορυκτικές περιοχές άνθρακα και σχιστόλιθους πλούσιους σε οργανικά. Νοτιότερα, η περιοχή του Βόλου στη Στερεά Ελλάδα αποτελεί μια επιπλέον υποψήφια για αποθήκευση σε βασάλτες λόγω της γειτνίασης με την τσιμεντοβιομηχανία και του έργου της εγκατάστασης FSRU κοντά στο λιμάνι του Βόλου και στο Εθνικό Δίκτυο Αερίου. Ωστόσο, αυτή η βασική τοποθεσία θα απαιτήσει περισσότερες μελέτες για την κατανόηση της διαδικασίας. Ως εκ τούτου, τα πιο εύλογα συμπλέγματα αποθήκευσης είναι:

²⁴ TAP: Trans Adriatic Pipeline

- η Μεσοελληνική Γούρνα στη Δυτική Μακεδονία, με αποθηκευτικά παιχνίδια σε μικρά βάθη και πιθανές δεξαμενές αερίου σε βαθύτερα σημεία της γούρνας
- η μεγάλη γεωθερμική λεκάνη της Δυτικής Θεσσαλονίκης και το κοίτασμα Επανομής στην Κεντρική Μακεδονία με γνωστές ανακαλύψεις κοιτασμάτων αερίου και CO₂
- Πρίνος και Ν. Καβάλας στην Ανατολική Μακεδονία, με σειρά μερικώς διαγραμμένων δεξαμενών πετρελαίου και φυσικού αερίου. (21)

Και τα τρία συμπλέγματα ικανοποιούν τα αυστηρά κριτήρια επιλογής: (α) μια περιοριστική ζώνη που περιλαμβάνει ένα παχύ (ή πολλά) στρώματα στεγανοποίησης πάνω από τη ζώνη αποθήκευσης, που διαχωρίζει το αποθηκευμένο CO₂ από τις πηγές πόσιμου νερού και την επιφάνεια. (β) επαρκής ακεραιότητα εντός του σχηματισμού αποθήκευσης και των στρωμάτων σφράγισης· γ) επαρκές πορώδες και διαπερατότητα για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων CO₂. και (δ) βρίσκονται σε υπερκρίσιμο βάθος ώστε να επιτρέπεται η αποθήκευση συμπυκνωμένου CO₂. Το λεκανοπέδιο της Φλώρινας στη Δυτική Μακεδονία θα πρέπει να χρησιμεύσει ως χρήσιμη περίπτωση φυσικής διαρροής CO₂ στην επιφάνεια. (21)



Σχήμα 1: Υπόγειες θέσεις αποθήκευσης στην Ελλάδα με εκτιμώμενη αποθηκευτική ικανότητα σε Mt CO₂. (21)

8.4 Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο

Η Ελλάδα ως μέρος της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν μπορεί να απέχει πολύ από αυτό που προτείνει η Οδηγία της ΕΕ ως βάση σε ένα κανονιστικό πλαίσιο για τη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα. Ωστόσο, κατά την προετοιμασία του εθνικού πλαισίου για το CCUS υπάρχουν ορισμένα ιδιαίτερα ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. (21)

Καταρχάς, είναι σημαντικό για τον εθνικό νομοθέτη να αποφασίσει εάν οι δραστηριότητες του CCUS θα πρέπει να θεωρούνται – τουλάχιστον εν μέρει – ως πετρελαϊκές δραστηριότητες, με την έννοια ότι τέτοιες δραστηριότητες είναι κυρίως χρήσιμες για την απεξάρτηση της παραγωγής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα· ή όχι, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δραστηριότητες CCUS μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε βαριές βιομηχανίες, η ροή εργασίας των οποίων περιλαμβάνει υψηλές εκπομπές CO₂. Είτε έτσι είτε αλλιώς, το υπουργείο στην εξουσία του οποίου θα

υπαγόταν το CCUS, στην Ελλάδα, είναι το Ελληνικό Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ενώ η κύρια σύνδεση με τη νομοθεσία για τα πετρέλαια θα ήταν η εκμετάλλευση συγκεκριμένων χώρων και ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να διοικηθεί. (21)

Επιπλέον, είναι επίσης σημαντικό για τον νομοθέτη να καθορίσει εάν το CO₂ μπορεί να ταξινομηθεί ως απόβλητο ή επικίνδυνο απόβλητο ή εάν πρέπει να αντιμετωπιστεί ως εμπόρευμα. Σε όλη την παγκόσμια πρακτική, αρκετές εκθέσεις και υποστηρικτές του CCUS έχουν σημειώσει ότι πρέπει να αντιμετωπίζεται ως εμπόρευμα και όχι ως ρύπος ή ως απόβλητο. Ως προς αυτό, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι διεθνώς, το ατμοσφαιρικό CO₂ δεν θεωρείται απόβλητο σύμφωνα με τη Σύμβαση της Βασιλείας για τον έλεγχο των διασυνοριακών μετακινήσεων επικίνδυνων αποβλήτων και τη διάθεσή τους (1989). Ωστόσο, οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που προκύπτουν από την ανεπαρκή διαχείρισή του δεν πρέπει να αγνοηθεί. (21)

Στην πραγματικότητα, εάν το CO₂ θα αντιμετωπίζεται ως εμπόρευμα ή ως απόβλητο είναι υψίστης σημασίας, δεδομένου ότι η νομική φύση του CO₂ που δεσμεύεται και αποθηκεύεται επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό ζητήματα που σχετίζονται με την ευθύνη των εμπλεκόμενων φορέων. Ειδικότερα, εάν το CO₂ που δεσμεύεται θεωρείται απόβλητο, πρέπει να αντιμετωπιστεί μόνο το ζήτημα της ευθύνης σχετικά με τις πιθανές συνέπειες στο περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, εάν θεωρείται εμπόρευμα, σημαίνει ότι κάποιος από τους εμπλεκόμενους φορείς θα έχει δικαιώματα ιδιοκτησίας σε αυτό, καθώς και δικαίωμα να το χρησιμοποιεί κατά βούληση. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει επίσης να καθοριστεί ποιος από τους εμπλεκόμενους φορείς θα πρέπει να έχει τέτοια δικαιώματα ιδιοκτησίας μεταξύ του παραγωγού CO₂ και του φορέα αποθήκευσης, καθώς και πώς θα πρέπει να πλαισιώνεται η αλληλεπίδρασή τους. Επιπλέον, εάν το CO₂ αντιμετωπίζεται ως εμπόρευμα, θα πρέπει επίσης να αντιμετωπιστούν και προκλητικά ρυθμιστικά ζητήματα ασυμβατότητας με το EU ETS. (21)

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η τόνωση των επενδύσεων σε CCUS θα πρέπει να δοθούν επαρκώς κίνητρα στη χώρα, ο νομοθέτης θα πρέπει να πλαισιώσει τον τρόπο με τον οποίο το CO₂ που δεσμεύεται μπορεί να εξαιρεθεί από την υποχρέωση καταβολής ποσοστώσεων εντός του EU ETS. Μια διάταξη που θα ενθαρρύνει όχι μόνο τις εταιρείες του ενεργειακού τομέα να ασχοληθούν με το CCUS αλλά και τις βαριές βιομηχανίες και τις βιομηχανίες έντασης ενέργειας που είτε θα χρησιμοποιούν το CCUS για να μετριάσουν τις δικές τους εκπομπές CO₂ είτε θα τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου χρησιμοποιείται CCUS. Με αυτόν τον τρόπο, οι Ενεργοβόρες Βιομηχανίες θα έχουν την επιλογή να καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια από παραγωγούς που έχουν ήδη μειώσει τις εκπομπές CO₂ από τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και αν η παραγωγή τους βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα. Από την άλλη πλευρά, αυτές οι βιομηχανίες που έχουν μακροχρόνιες διεργασίες ροής εργασίας που περιλαμβάνουν στάδια καύσης υλικού και εκπομπής CO₂ επί τόπου, το CCUS θα πρέπει να προβλεφθεί ως εναλλακτική λύση για να ελαχιστοποιήσουν τις εκπομπές CO₂ και να μειώσουν αντίστοιχα τα έξοδα των ποσοστώσεων τους. (21)

9. Προκλήσεις

9.1 Προκλήσεις στην ανάπτυξη του CCS

Πολλές τεχνολογίες μείωσης επηρεάζουν τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Το φάσμα των επιλογών είναι μεγάλο και περιλαμβάνει και τις δύο άμεσες προσεγγίσεις, που επηρεάζουν τη χρήση ορυκτών καυσίμων ή τις εκπομπές τους στην ατμόσφαιρα (π.χ. ενισχυμένη ενεργειακή απόδοση και εξοικονόμηση ενέργειας, αντικατάσταση άνθρακα από φυσικό αέριο, μεγαλύτερη χρήση πυρηνικής ενέργειας, δέσμευση άνθρακα, χρήση και αποθήκευση)· και έμμεσες προσεγγίσεις, αυξάνοντας τον υπολειπόμενο προϋπολογισμό άνθρακα (όπως η ανάπτυξη τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μαζικής αγοράς, η δάσωση και η αναδάσωση). Σε σενάρια εξαιρετικά περιορισμένων εκπομπών (π.χ. καθαρές μηδενικές εκπομπές στο δεύτερο μισό αυτού του αιώνα, όπως προτάθηκαν στην COP21), τα έμμεσα μέτρα θα είναι αναποτελεσματικά απλώς και μόνο επειδή δεν θα υπάρχει προϋπολογισμός άνθρακα για άνοιγμα. (22)

Η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα αναφέρεται σε μια διαδικασία που διαχωρίζει το CO₂ από ένα ρεύμα αερίου και το αποθηκεύει υπόγεια. Το CCS μπορεί να εφαρμοστεί σε ηλεκτροπαραγωγή και βιομηχανικές εγκαταστάσεις και περιλαμβάνει τρία κύρια στάδια που είναι ο διαχωρισμός του CO₂ από το ρεύμα αερίου, η συμπίεση και μεταφορά του (μέσω αγωγού ή ναυτιλίας) και η αποθήκευση του σε κατάλληλη γεωλογική τοποθεσία (π.χ. δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου). Το CCS κατηγοριοποιείται ανάλογα με την κατηγορία της διαδικασίας σύλληψης (μετά-καύση, προ-καύση και οξυ-καύση) και τον τύπο της τεχνολογίας διαχωρισμού (απορρόφηση, προσρόφηση, μεμβράνες, κρυογονική απόσταξη, ένυδρες αέριες και χημικός βρόχος). Ενώ οι τεχνολογίες σύλληψης μετά την καύση και την προ-καύση χρησιμοποιούνται ευρέως (μεταξύ TRL²⁵ 1 και 5), η σύλληψη οξυ-καύσης είναι ακόμα υπό ανάπτυξη και δεν είναι ακόμη εμπορική, ενώ η προ-καύση είναι πιθανό να απέχει «δεκαετίες από την εμπορική πραγματικότητα». (22)

Η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα μπορεί να ενσωματωθεί σε διαδικασίες οι οποίες μπορούν επομένως να ταξινομηθούν ως θετικές για τον άνθρακα, σχεδόν ουδέτερες από άνθρακα ή αρνητικό άνθρακα. Οι θετικές στον άνθρακα διεργασίες εξακολουθούν να εκπέμπουν CO₂ στην ατμόσφαιρα, ενώ οι σχεδόν ουδέτεροι σε άνθρακα δεν εκπέμπουν και οι αρνητικές σε άνθρακα διεργασίες μειώνουν την ποσότητα CO₂ που βρίσκεται ήδη στην ατμόσφαιρα. Ένα παράδειγμα διεργασιών αρνητικών σε άνθρακα είναι οι διεργασίες Bio-Energy with CCS (BECCS), οι οποίες συνήθως περιλαμβάνουν είτε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε βιοκαυσίμων. Τα BECCS αποτελούν μέρος μιας κατηγορίας τεχνολογιών που είναι γνωστές ως Τεχνολογίες αρνητικών εκπομπών (NETs), οι οποίες περιλαμβάνουν επίσης

²⁵ TRL: Technology Readiness Level

αναδάσωση, διάφορες μορφές γεωμηχανικής, Αφαίρεση διοξειδίου του άνθρακα (CDR) όπως η δέσμευση CO₂ από τον αέρα και τη γονιμοποίηση των ωκεανών. Το BECCS και η αναδάσωση θα ήταν αναμφισβήτητα οι πιο ελκυστικές επιλογές για τη δημιουργία αρνητικών εκπομπών. Σύμφωνα με τη McLaren, τα NET δεν αναμένεται να προσφέρουν μια οικονομικά βιώσιμη εναλλακτική λύση για τον μετριασμό τις επόμενες δεκαετίες. Ταυτόχρονα, η περιορισμένη ανάπτυξή τους (10–20 GtCO₂/έτος) μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ έως το 2030–2050. (22)

Οι κύριες προκλήσεις για την απορρόφηση του CCS είναι το κόστος και η ενεργειακή του επιβάρυνση, ακολουθούμενα από τη θέση και τη χωρητικότητα των τοποθεσιών αποθήκευσης. Υπάρχουν πολλά μη τεχνικά εμπόδια, συμπεριλαμβανομένης της έλλειψης μηχανισμών αγοράς και κινήτρων, λιγότεροι αποτελεσματικοί μηχανισμοί τιμωρίας των μεγάλων πηγών εκπομπής CO₂, ανεπαρκές νομικό πλαίσιο που επιτρέπει τη μεταφορά και αποθήκευση (τόσο στην ενδοχώρα όσο και υπεράκτια) και την ευαισθητοποίηση και αντίληψη του κοινού. (22)

Με τον τρέχοντα ρυθμό δέσμευσης CO₂ (που αντιπροσωπεύει το ποσοστό του CO₂ που εκπέμπεται από τη διαδικασία που θα δεσμευτεί), δεν υπάρχουν σημαντικά αμιγώς τεχνολογικά εμπόδια για τη δέσμευση, τη μεταφορά και την αποθήκευση του CO₂. Πράγματι, ο διαχωρισμός και η επανέγχυση CO₂ είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό των τακτικών εργασιών της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ταυτόχρονα, το κόστος δέσμευσης CO₂ σε μια μη ρυθμιζόμενη αγορά εμποδίζει την πρόοδο. (22)

Όσον αφορά τη θέση και τη χωρητικότητα των τοποθεσιών αποθήκευσης, οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν τη σωρευτική χωρητικότητα αποθήκευσης άνθρακα, τους ρυθμούς απελευθέρωσης και πρόσληψης, τη σύνδεση από πηγή σε αποθήκευση και τις κλιματικές επιπτώσεις του χρονοδιαγράμματος αποθήκευσης. (22)

9.1.1 Κόστος CCS

Το κόστος του CCS έχει αναγνωριστεί ως η κύρια πρόκληση που εμποδίζει την ευρεία υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας. Η εκτίμηση του πραγματικού κόστους CCS και η έκφρασή του με σαφή τρόπο είναι πρόκληση. Αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη εμπειρικών δεδομένων (επί του παρόντος, στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν μόνο δύο μονάδες CCS πλήρους κλίμακας σε λειτουργία), δυσκολία επιλογής της γραμμής βάσης κατά τη σύγκριση διαφορετικών μονάδων CCS, ποικιλία νομισμάτων και ετών βάσης νομισμάτων στα αναφερόμενα βιβλιογραφία, διαφορές κόστους λόγω της διαθεσιμότητας της υποδομής μεταφοράς και αποθήκευσης και μιας ποικιλίας διαδικασιών, συνθηκών λειτουργίας και διαδικασιών σύλληψης. Το κόστος έχει αναφερθεί στα \$2015 με τη μετατροπή μεμονωμένων νομισμάτων σε δολάρια ΗΠΑ και στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τον πληθωρισμό. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν μεγάλη μεταβλητότητα μεταξύ των πηγών, με έλλειψη δεδομένων για συγκεκριμένες διεργασίες ή τεχνολογίες σύλληψης, και προσδιορίζουν το βήμα σύλληψης ως το πιο ακριβό βήμα της αλυσίδας CCS. (22)

9.1.2 Κυβερνητικοί και βιομηχανικοί παράγοντες

9.1.2.1 Αρμόδια ρυθμιστική εποπτεία

Τα έργα CCS είναι απαραίτητως πολύπλοκες πολυφασικές επιχειρήσεις, που συνεπάγονται σημαντικούς κινδύνους υψηλών επιπτώσεων ή υψηλών συνεπειών (οι πιθανότητες των οποίων μπορούν φυσικά να εκτιμηθούν ως χαμηλές), απαιτώντας έτσι εποπτεία από τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές σε όλα τα έθνη και περιοχές όπου έργα μπορεί να αναπτυχθούν. Πολλές δικαιοδοσίες στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη ήταν πολύ προορατικές ως προς αυτό, αν και υπάρχουν ακόμη περισσότερα που πρέπει να γίνουν καθώς αποκτάται εμπειρία με έργα επίδειξης για CCS. (23)

Το ζήτημα της μακροπρόθεσμης ευθύνης για το αποθηκευμένο διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα σημαντικό θέμα στην ανάπτυξη των κυβερνητικών ρυθμιστικών δομών για την CCS. Σε καθεμία από τις νομικές και ρυθμιστικές αναθεωρήσεις του IEA, αναφέρεται εθνική πρόοδος σχετικά με τη μακροπρόθεσμη ευθύνη για το αποθηκευμένο CO₂. Όπως εξηγείται από την IEA (2011, σελ. 9):

"Η μακροπρόθεσμη ευθύνη χρησιμοποιείται γενικά για να αναφέρεται σε οποιοσδήποτε υποχρεώσεις που προκύπτουν μετά την οριστική διακοπή της έγχυσης CO₂ και την ενεργή παρακολούθηση της τοποθεσίας."

"Γενικά, πριν μεταβιβαστεί η ευθύνη από τον χειριστή, επιβάλλονται τρεις απαιτήσεις: απόδειξη ότι δεν υπάρχει σημαντικός κίνδυνος φυσικής διαρροής ή διαρροής αποθηκευμένου CO₂. ελάχιστο χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από τη διακοπή της ένεσης· και μια οικονομική συνεισφορά στη μακροπρόθεσμη διαχείριση του ιστότοπου, για την ελαχιστοποίηση της χρηματοοικονομικής έκθεσης της οντότητας που έχει οριστεί να αναλάβει μακροπρόθεσμη ευθύνη."

"Οι συνεισφορές σε αυτήν την έκδοση δείχνουν ότι, σε δικαιοδοσίες που προβλέπουν μεταβίβαση ευθύνης, οι χειριστές πρέπει γενικά να αποδείξουν πριν από τη μεταφορά ότι το αποθηκευμένο CO₂ συμπεριφέρεται με προβλέψιμο τρόπο και δεν αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον. «Οι συνεισφορές σε αυτήν την έκδοση δείχνουν ότι, σε δικαιοδοσίες που προβλέπουν μεταβίβαση ευθύνης, οι χειριστές πρέπει γενικά να αποδείξουν πριν από τη μεταφορά ότι το αποθηκευμένο CO₂ συμπεριφέρεται με προβλέψιμο τρόπο και δεν αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον. " (23)

Τόσο στην Ευρώπη όσο και στη Βόρεια Αμερική, οι περισσότερες κυβερνήσεις συμφωνούν γενικά ότι, εάν οι προαναφερθείσες προϋποθέσεις πληρούνται ικανοποιητικά, η ευθύνη σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία αποθήκευσης θα μεταφερθεί από βιομηχανία σε κυβέρνηση σε καθορισμένη χρονική στιγμή (π.χ. 20 χρόνια μετά τη διακοπή της ένεσης). Σχεδόν όλες οι δικαιοδοσίες ακολουθούν αυτήν την προσέγγιση (23)

9.1.2.2 Κατάλληλα πλαίσια αξιολόγησης κινδύνου και διαχείρισης κινδύνου

Η αξιολόγηση κινδύνου για CCS έχει διπλό χαρακτήρα:

1. γενικοί κίνδυνοι στις διαστάσεις σύλληψης, μεταφοράς και έγχυσης, οι οποίοι είναι παρόμοιοι με καλά χαρακτηρισμένους κινδύνους και εμπειρία πολλών δεκαετιών, σε άλλους βιομηχανικούς τομείς
2. κινδύνους για τους επιμέρους γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους προβλέπεται αποθήκευση. (23)

Λεπτομερείς εκτιμήσεις για πολλές προτεινόμενες συγκεκριμένες τοποθεσίες θα πρέπει να προετοιμαστούν τα επόμενα χρόνια, καθώς τόσο η επίσημη συμμόρφωση με τους νόμους και τους κανονισμούς περιβαλλοντικής αξιολόγησης, αφενός, όσο και η πίστη του κοινού στην ουσιαστική ασφάλεια αυτών των εργασιών, αφετέρου, θα απαιτήσουν αυστηρή πρακτικές διαχείρισης κινδύνου. (23)

Βεβαίως, έχει ήδη καταβληθεί σημαντικό επίπεδο προσπάθειας για την ανάπτυξη πλαισίων για την αξιολόγηση κινδύνου και τη διαχείριση κινδύνου του CCS, σε επιμέρους υποεθνικές δικαιοδοσίες, σε εθνικό επίπεδο και από οργανισμούς που εκπροσωπούν τα κράτη μέλη. Αυτά τα πλαίσια ποικίλλουν σημαντικά σε επίπεδο λεπτομέρειας, αλλά έχουν επίσης πολλά κοινά στοιχεία. Μια συνεχής ανησυχία σε αυτόν τον τομέα είναι η διακύμανση της βασικής τεχνικής ορολογίας και των χρήσεων σε όλο τον κόσμο: Αυτό εμποδίζει την ανάπτυξη μιας κοινής γλώσσας στην αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων που σχετίζονται με το CCS και έτσι παρουσιάζει πιθανές δυσκολίες στην κοινοποίηση του κινδύνου στο κοινό. (23)

Μια άλλη σημαντική διάσταση αυτού του ζητήματος είναι η πολυπλοκότητα της αξιολόγησης κινδύνου για CCS, η οποία είναι συνάρτηση της πολυδιάστατης πτυχής της τεχνολογίας (δηλαδή, η ενοποίηση της σύλληψης, της μεταφοράς, της έγχυσης και της αποθήκευσης). Αυτή η πολυπλοκότητα απαιτεί μια απάντηση όσον αφορά την ιεράρχηση της σχετικής σοβαρότητας των διαφόρων σεναρίων επιπτώσεων, ειδικά εκείνων που είναι περιπτώσεις υψηλού αντίκτυπου και χαμηλής πιθανότητας. (23)

9.1.2.3 Υποστηρικτικά πλαίσια δημόσιας πολιτικής

Η ανάγκη για CCS και μάλιστα ολόκληρο το σκεπτικό για να δικαιολογήσει το κόστος αυτής της περίπλοκης παγκόσμιας επιχείρησης είναι αυστηρά συνάρτηση της ανάγκης ελέγχου ή μετριασμού των εκπομπών GHG ως απάντηση στις ανησυχίες της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Η πολιτική για την αλλαγή του κλίματος είναι αναγκαστικά το ευρύτερο πλαίσιο στο οποίο πρέπει να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση CCS και η δέσμευση με τους τοπικούς ενδιαφερόμενους φορείς. Τα οφέλη της CCS σε αυτό το πλαίσιο, επομένως, είναι η μία πλευρά της οικονομικής ανάλυσης οφέλους-κόστους της CCS. Επιπλέον, δεδομένου ότι πρέπει να επιτευχθεί επαρκής πολιτική για την κλιματική αλλαγή σε παγκόσμιο επίπεδο, γιατί διαφορετικά δεν μπορεί να πετύχει καθόλου, το ίδιο ισχύει και για το CCS. Κατά την περίοδο της Συμφωνίας του Κιότο, τα μεμονωμένα έθνη και η διεθνής κοινότητα αντιμετώπισαν μεγάλες δυσκολίες στην υιοθέτηση της πολιτικής για την κλιματική αλλαγή. Αν και δεν είναι ακόμη δεσμευτικές, οι εθνικά καθορισμένες συνεισφορές στους σταθερούς και φιλόδοξους στόχους της Συμφωνίας του Παρισιού ενδέχεται να αρχίσουν να

μειώνουν τις αβεβαιότητες σχετικά με την αιτιολόγηση της πλήρους ανάπτυξης έργων CCS για τον μετριασμό των εκπομπών GHG σε ορισμένους τομείς. (23)

Η πιθανή αλληλεπίδραση μεταξύ CCS και σκεπτικισμού για την κλιματική αλλαγή είναι μια πιθανή συνάρτηση του βαθμού της προθυμίας του κοινού να πληρώσει για το μη ασήμαντο κόστος του CCS, για παράδειγμα, μέσω των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας ή ενός φόρου άνθρακα. Αυτό οφείλεται στο προφανές σκεπτικό για το CCS, δηλαδή τη δέσμευση του άνθρακα που παράγεται από τον άνθρωπο υπόγεια, ώστε να αποφευχθεί η έκλυσή του στην ατμόσφαιρα ως αέριο θερμοκηπίου. Στο βαθμό στον οποίο αυτά τα κόστη φαίνονται επαχθή, η ευκολότερη απάντηση από όλες είναι να αρνηθούμε ότι απαιτείται η όλη, περίπλοκη και δαπανηρή προσπάθεια CCS, επειδή οι δυσμενείς επιπτώσεις από την επιβολή του κλίματος μέσω των αερίων του θερμοκηπίου είναι είτε «μη αποδεδειγμένες» ή «φάρσες». (23)

Στο βαθμό στον οποίο αυτή η πρόκληση λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, θα είναι απαραίτητο για τα μέλη της επιστημονικής κοινότητας που θα επικοινωνούν σχετικά με τους κινδύνους του CCS να συμμετέχουν επίσης ενεργά στην επικοινωνία σχετικά με την επιστήμη της κλιματικής αλλαγής συνολικά. Επομένως, η απάντηση σε αυτήν την πρόκληση μέσω της αποτελεσματικής επικοινωνίας για την επιστήμη της κλιματικής αλλαγής θα πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της δημόσιας δέσμευσης της CCS από την αρχή. Θα ήταν υπερβολικά επικίνδυνο και ανεύθυνο να μην γίνει κάτι τέτοιο και η αποφυγή αυτής της πρόκλησης θα έθετε σε κίνδυνο τις πολύ μεγάλες προκαταβολικές επενδύσεις στα αρχικά έργα CCS που θα πραγματοποιήσουν τόσο οι κυβερνήσεις όσο και η βιομηχανία. (23)

9.1.3 Γεω-αποθηκευτική ικανότητα

Η παγκόσμια ζήτηση για αποθήκευση CO₂ σε κλιματικά σενάρια που διατηρούν τις συγκεντρώσεις CO₂ στα 400–500 ppm εκτιμάται σε συσσωρευμένο απόθεμα 600–2000 GtCO₂ έως το 2100. Ορισμένες μελέτες έχουν συγκεντρώσει περιφερειακές εκτιμήσεις των πόρων αποθήκευσης CO₂ για να προτείνουν ότι οι σωρευτικοί πόροι πρέπει να είναι το εύρος των 10.000–30.000 GtCO₂ συμπεριλαμβανομένων 1000 Gt σε εξαντλημένους ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτό υποδηλώνει άφθονη χωρητικότητα αποθήκευσης σε σχέση με τη ζήτηση κατά τη διάρκεια του αιώνα. (22)

Οι περιφερειακές μελέτες ποικίλλουν ευρέως ως προς την προσέγγισή τους στην εκτίμηση. Πιο πρόσφατα, οι προσπάθειες της Εταιρείας Μηχανικών Πετρελαίου και της Οικονομικής Επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη ανέπτυξαν συστήματα ταξινόμησης πόρων αποθήκευσης που θα επιτρέψουν τη διενέργεια συγκρίσιμων περιφερειακών εκτιμήσεων, με ταξινομήσεις ενδεικτικές της βεβαιότητας σχετικά με την εμπορική βιωσιμότητα. Οι εκτιμήσεις της παγκόσμιας διαθεσιμότητας αποθήκευσης ταξινομούνται ως μελλοντικές σύμφωνα με αυτά τα σχήματα, με ελάχιστο έως καθόλου χαρακτηρισμό φυσικής δεξαμενής για τη συντριπτική πλειονότητα των πιθανών τοποθεσιών. Αυτό αφήνει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας ως προς τις τελικές δυνατότητές τους. Θα απαιτηθεί η ανάπτυξη πολλών έργων προτού αυτή η αβεβαιότητα μπορεί να μειωθεί σημαντικά. (22)

Σε αλμυρούς υδροφορείς (δηλαδή πεδία χωρίς παραγωγή υδρογονανθράκων) η πίεση των ταμειυτήρων θα περιορίσει την προσβάσιμη χωρητικότητα γεω-αποθήκευσης CO₂ ελλείψει στρατηγικών διαχείρισης της πίεσης. Πρόσφατη δουλειά

χρησιμοποιώντας την προσομοίωση ταμειυτήρα διαπιστώθηκε ότι μόνο το 0,01-1% του όγκου πόρων των αλατούχων υδροφορέων θα είναι διαθέσιμο για αποθήκευση σε χρονικά διαστήματα περίπου 50 ετών έγχυσης, απουσία παραγωγής άλμης από τη δεξαμενή. Αυτό οφείλεται στην απαίτηση οι πιέσεις στη δεξαμενή να παραμένουν κάτω από αυτές που θα προκαλούσαν σπασίματα ή θα επανενεργοποιούσαν σφάλματα σε ένα στεγανοποιητικό καπάκι. Ωστόσο, η πρώτη γενιά αποθηκευτικής ικανότητας υποστηρίζεται από την πιθανή χρήση υφιστάμενων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου και ταμειυτήρων αλατούχου υδροφορέα υψηλής ποιότητας. Ως αποτέλεσμα, η συμπίεση της δεξαμενής είναι απίθανο να παρουσιάσει σημαντικά εμπόδια για την πρώτη γενιά εμπορικής αποθήκευσης CO₂. (22)

Μόνο λίγες μελέτες αξιολογούν τον αντίκτυπο ενός πιθανού ορίου στη χωρητικότητα αποθήκευσης στην ανάπτυξη του CCS σε ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης. Στο Koelbl et al. (24) τα διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης του CCS σε 12 ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης αξιολογήθηκαν με βάση διάφορες παραδοχές, συμπεριλαμβανομένης της ύπαρξης παγκόσμιων και περιφερειακών περιορισμών χωρητικότητας, που κυμαίνονταν από 3500 έως 20.000 Gt. Η μέγιστη σωρευτική ζήτηση αποθήκευσης ήταν 3000 GtCO₂ έως το 2100. Επειδή δεν επιτεύχθηκε η οριακή χωρητικότητα, τα διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης στα μοντέλα δεν συσχετίστηκαν με τη συνολική προσφορά αποθήκευσης CO₂. Μια μελέτη ευαισθησίας ενός μοντέλου στο Koelbl et al. (24) έδειξε επίσης ότι η ανάπτυξη της αποθήκευσης CO₂ μέχρι το 2050 δεν ήταν ευαίσθητη σε εκτιμήσεις περιφερειακής χωρητικότητας αποθήκευσης που κυμαίνονταν από 4500 έως 10.000 GtCO₂. Ο κύριος λόγος ήταν και πάλι επειδή η χωρητικότητα στις περισσότερες περιοχές δεν είχε προσεγγιστεί μέχρι το 2050. Από την άλλη πλευρά, η μελέτη διαπίστωσε ότι η αποθήκευση θα μπορούσε να περιοριστεί πέρα από 100 χρόνια πλήρους κλίμακας ανάπτυξης σε περίπτωση σημαντικής απορρόφησης CCS. (22)

Οι Kerppö και van der Zwaan (25) ανέλυσαν τον αντίκτυπο των πιο σοβαρών περιορισμών στη χωρητικότητα αποθήκευσης CO₂ μέχρι το 2100, συγκρίνοντας ένα βασικό σενάριο με ένα απαισιόδοξο σενάριο όπου η χωρητικότητα περιορίζεται στο μισό από εκείνη που είναι διαθέσιμη μόνο στα εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτό αντιστοιχεί σε μείωση της παγκόσμιας χωρητικότητας από περίπου 10.000 σε 500 GtCO₂ (όταν συγκρίνονται οι πόροι αποθήκευσης υδρογονανθράκων και μη υδρογονανθράκων). Μέχρι το 2100 η ανάπτυξη CCS είναι πολύ περιορισμένη λόγω των περιορισμών χωρητικότητας. Ωστόσο, η πρόωρη ανάπτυξη του CCS έως το 2050, πριν από την προσέγγιση των περιορισμών χωρητικότητας, δεν επηρεάζεται ως επί το πλείστον. Υπονοείται ότι οι ογκομετρικές εκτιμήσεις της παγκόσμιας χωρητικότητας αποθήκευσης είναι μόνο μια τάξη μεγέθους από τα επίπεδα όπου θα επηρεάζονταν η ανάπτυξη κατά τον επόμενο αιώνα. (22)

Υπολογίζεται ότι χωρητικότητα αποθήκευσης 1000 Gt είναι διαθέσιμη μόνο σε δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η ανάλυση των μοντέλων ολοκληρωμένης αξιολόγησης στο Koelbl et al. (24) έδειξε ότι από το 2010 έως το 2050 μεταξύ 100 και 500 Gt ζήτησης αποθήκευσης θα ήταν σύμφωνη με μια διαδρομή 2°C. Αυτό υποδηλώνει ότι θα υπάρχουν λίγα όρια χωρητικότητας αποθήκευσης για την πρώτη γενιά εμπορικής ανάπτυξης CCS, ακόμη και σε σενάρια υψηλής ζήτησης για CCS, καθώς όλη η ζήτηση μπορεί να καλυφθεί με επιλογές αποθήκευσης πολύ χαμηλού κόστους, όπως κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. (22)

Τα ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης ενσωματώνουν πιθανούς περιορισμούς κόστους αποθήκευσης μέσω ενός συνόλου κανόνων που γενικά αγνοούν τα ζητήματα της πίεσης και της διαχείρισης της πίεσης. Οι πιο ευέλικτες καμπύλες προσφοράς κόστους αποθήκευσης έχουν αναπτυχθεί από τους Dooley και Friedman (26) για τη Βόρεια Αμερική και από τον Dahowski et al. (27) για την Κίνα. Μια καμπύλη κόστους προσφοράς που χρησιμοποιείται συνήθως σε περιφερειακό επίπεδο για τον υπόλοιπο κόσμο αναπτύχθηκε από τους Hendriks και Graus (28). Συγκεκριμένα, αυτά τα σύνολα δεδομένων αναπτύχθηκαν πριν από την εργασία που έγινε από τους Birkholzer και Zhou (29), καταδεικνύοντας τις επιπτώσεις πρώτης τάξης από τη συσσώρευση περιφερειακής πίεσης στη χωρητικότητα αποθήκευσης. Οι βασικοί περιορισμοί χωρητικότητας που ενσωματώνονται στις καμπύλες προσφοράς περιλαμβάνουν τη συνολική χωρητικότητα και την απαίτηση ότι η προσφορά πρέπει να είναι διαθέσιμη για μια συγκεκριμένη πηγή για τουλάχιστον 10 χρόνια. Η πίεση λαμβάνεται εν μέρει υπόψη με τον περιορισμό της ποσότητας CO₂ που μπορεί να εγχυθεί σε ένα μεμονωμένο φρεάτιο – ένας δείκτης για τον κίνδυνο θραύσης κοντά στο φρεάτιο. Ο αντίκτυπος αυτού του ορίου, ωστόσο, είναι η κατασκευή ενός νέου φρεάτος στη λεκάνη αποθήκευσης όταν το κόστος είναι δικαιολογημένο. Αν και η τοπική εγχυτική δράση μπορεί να αντιμετωπιστεί με αυτόν τον τρόπο, είναι σαφές ότι η περιφερειακή πίεση του πόρου αποθήκευσης δεν μπορεί να γίνει. Επομένως, θα πρέπει να ενσωματωθεί ένας πρόσθετος περιορισμός στα μοντέλα στα οποία η περιφερειακή πίεση μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης της πίεσης. Η διαχείριση της πίεσης και ο χειρισμός απορριμμάτων άλμης είναι μακροχρόνιες πρακτικές στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ως εκ τούτου, οι εκτιμήσεις κόστους που είναι κατάλληλες για χρήση σε ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης θα πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμες από την υπάρχουσα βιβλιογραφία ή από συνεντεύξεις με σχετικούς φορείς εκμετάλλευσης κοιτασμάτων πετρελαίου. (22)

9.1.4 Ταίριασμα πηγής-καταβόθρας

Ορισμένες μελέτες έχουν αξιολογήσει τον αντίκτυπο ενός πιθανού ορίου στη χωρητικότητα αποθήκευσης στην ανάπτυξη του CCS σε ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης. Ο Koelbl et al. (24) αντιμετωπίζει το ζήτημα της περιφερειακής κατανομής της αποθήκευσης. Στη μελέτη του, η προσφορά αποθήκευσης βρέθηκε περιορισμένη στην Κίνα, την Ιαπωνία και τη Νότια Κορέα. Η χωρητικότητα αποθήκευσης στην Ιαπωνία και τη Νότια Κορέα είναι εξαιρετικά αβέβαιη, καθώς ορισμένοι εκτιμούν σημαντικούς πόρους στην ανοικτή θάλασσα, ιδιαίτερα στην Ιαπωνία που θα παρείχαν επαρκή εφοδιασμό για τουλάχιστον δεκαετίες. Στην περίπτωση της Κίνας, το μοντέλο φαίνεται να χρησιμοποιεί τιμές για χωρητικότητα αποθήκευσης κατά τρεις φορές μικρότερες από αυτές που αναφέρονται στα δεδομένα πηγής του Dahowski et al. (27) και CCS επιδιώκεται ενεργά ως τεχνολογία μετριασμού μεγάλης κλίμακας. (22)

Γενικά, όπου οι εκτιμήσεις για την παροχή περιφερειακής αποθήκευσης είναι πιο ανεπτυγμένες (π.χ. Βόρεια Αμερική, Ευρώπη, συμπεριλαμβανομένης της Σκανδιναβίας, της Βραζιλίας), η αντιστοίχιση πηγής-καταβόθρας δείχνει ότι το CCS δεν θα περιοριστεί από την τοπική διαθεσιμότητα πόρων αποθήκευσης. Εκτός αυτών των περιοχών, η διαθεσιμότητα αποθήκευσης είναι πολύ αβέβαιη, αν και η παγκόσμια

κατανομή των ιζηματογενών λεκανών είναι τέτοια που είναι πιθανό να υπάρχουν λίγες τοποθεσίες όπου η διαθεσιμότητα τοπικής αποθήκευσης θα είναι περιοριστικός παράγοντας. (22)

9.1.5 Αλυσίδα προμηθειών και ρυθμός δόμησης

Στη βιβλιογραφία, ο ρυθμός ανάπτυξης τεχνολογίας και η μείωση του κόστους του CCS έχει συγκριθεί με τα χρονοδιαγράμματα ανάπτυξης στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου (π.χ. 3-5 χρόνια για τη δημιουργία ενός τεράστιου κοιτάσματος φυσικού αερίου), καθώς και στην πιο πρόσφατη εμπειρία εφαρμογής της δέσμευσης μετά την καύση οξειδίων του θείου και οξειδίων του αζώτου σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα που εδρεύουν στις ΗΠΑ. (22)

Το 2012, η IEAGHG²⁶ ανέθεσε μια μελέτη σχετικά με πιθανούς περιορισμούς εφοδιασμού και χωρητικότητας που σχετίζονται με εξοπλισμό για μονάδες CCS. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε παγκόσμια κλίμακα και περιλάμβανε την πλήρη αλυσίδα CCS (σύλληψη, μεταφορά και αποθήκευση), αλλά απέκλεισε τον εξοπλισμό ηλεκτρικής ενέργειας ή βιομηχανίας. Μέρος του σκοπού αυτής της μελέτης ήταν να κατανοήσει εάν ο οδικός χάρτης CCS που προτάθηκε από τον IEA θα μπορούσε να αντιμετωπίσει σημαντικά εμπόδια λόγω περιορισμών προσφοράς ή χωρητικότητας. Τα αποτελέσματα της μελέτης έχουν προσδιορίσει ως σημαντικούς πιθανούς περιορισμούς στην αλυσίδα εφοδιασμού υδρογονοστρόβιλους για το βήμα σύλληψης, αγωγούς για το βήμα μεταφοράς, διαθεσιμότητα μηχανικών γεωτρήσεων και γεωτρήσεων για το στάδιο αποθήκευσης και, τέλος, διαθεσιμότητα μηχανικών πετρελαιοειδών σε ολόκληρη την αλυσίδα CCS. Το συμπέρασμα της μελέτης δεν εντόπισε ανυπέρβλητα εμπόδια για την ανάπτυξη του CCS όπως προτείνει η IEA. Ωστόσο, ο συντελεστής κατασκευής για CCS που εφαρμόζεται στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι χαμηλότερος από τους ιστορικούς ρυθμούς κατασκευής σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον, η προτεινόμενη ανάπτυξη CCS στους βιομηχανικούς τομείς (δέσμευση του 65% των τρεχουσών εκπομπών έως το 2050) έχει θεωρηθεί αισιόδοξη. Συνολικά, ο σημαντικότερος κίνδυνος αντιπροσωπεύεται από τον ανταγωνισμό μεταξύ της CCS και του τομέα πετρελαίου και φυσικού αερίου για έμπειρο προσωπικό και εξοπλισμό γεώτρησης που είναι απαραίτητος για τις ερευνητικές δραστηριότητες. Παρόμοια ζητήματα έχουν εντοπιστεί σε μια μελέτη που επικεντρώνεται στην αγορά του Ηνωμένου Βασιλείου. (22)

Παρόμοιες προκλήσεις έχουν συζητηθεί σε μια συνέντευξη με προγραμματιστές CCS κατά τη διάρκεια αυτού του έργου, όπου τα ακόλουθα ζητήματα αναφέρθηκαν ως σημαντικά όταν εξετάζονται τα εμπόδια στο CCS: γεωλογική εκτίμηση και κατασκευή σταθμού παραγωγής ενέργειας· διαθεσιμότητα ειδικευμένου εργατικού δυναμικού· και ρυθμιστικές ελλείψεις. Η γεωλογική αξιολόγηση μιας καταβόθρας διαρκεί 3-4 χρόνια, ενώ η κατασκευή ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής διαρκεί 3-4 χρόνια για τους αεριοστρόβιλους και 5-6 χρόνια για τα συστήματα στερεών καυσίμων (αυτά τα χρονοδιαγράμματα είναι αντιπροσωπευτικά για μια μονάδα που εδρεύει στην ΕΕ ή τις ΗΠΑ, αλλά θα μπορούσε ποικίλλουν για τις αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Κίνα). Επομένως, εάν η αξιολόγηση και η κατασκευή σταθμού

²⁶ IEAGHG: International Energy Agency (IEA) GHG

παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ταυτόχρονα, η πτυχή CCS μπορεί να βρίσκεται στην κρίσιμη διαδρομή. Αλλά εάν η κατασκευή του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την καταλληλότητα του αποθηκευτικού χώρου, μπορεί να χρειαστεί να προχωρήσει η αξιολόγηση πριν από την κατασκευή του σταθμού παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, εάν η εθνική υποδομή μεταφοράς CO₂ ήταν ήδη παρούσα, οποιαδήποτε εξάρτηση θα εξαλειφόταν σε μεγάλο βαθμό. Η διαθεσιμότητα επαρκούς ειδικευμένου εργατικού δυναμικού θα μπορούσε να αποτελέσει εμπόδιο μακροπρόθεσμα. Ωστόσο, βραχυπρόθεσμα, μπορεί να υπάρξει μεγαλύτερη διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού λόγω των πρόσφατων συμπιεσμένων τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου με αποτέλεσμα την απώλεια θέσεων εργασίας. Για παράδειγμα, το έργο White Rose στο Ηνωμένο Βασίλειο εκτιμήθηκε ότι χρειαζόταν κατά μέσο όρο 4.000–5.000 άτομα για περίπου πέντε χρόνια, με μέγιστη τιμή τα 9.000 άτομα. Τέλος, επί του παρόντος το ρυθμιστικό περιβάλλον για την υποδομή CCS δεν είναι καλά ανεπτυγμένο, οδηγώντας σε αβεβαιότητα σχετικά με τα χρονοδιαγράμματα ανάπτυξης και τα μοντέλα τιμών. (22)

Η διαδικασία της περιόδου αξιολόγησης 3-4 ετών για μια τοποθεσία CCS δεν είναι νέα και ήδη αναλαμβάνεται τακτικά από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Συνολικά, τα εμπόδια που σχετίζονται με τις κατασκευές στην ανάπτυξη CCS φαίνεται να είναι ένα ήσσονος σημασίας ζήτημα, πράγμα που σημαίνει ότι ο κίνδυνος είναι σε μεγάλο βαθμό μη τεχνικός, πράγμα που θα μπορούσε να σημαίνει ότι τα οικονομικά περιβάλλοντα ή/και οι κανονισμοί θα αλλάξουν σημαντικά κατά την περίοδο κατασκευής. (22)

9.1.6 Δημόσια αποδοχή

Η δημόσια αποδοχή διαδραματίζει βασικό ρόλο στην ανάπτυξη της δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο. Δεν υπάρχει γενικό μοντέλο που να μπορεί να εξηγήσει τη δημόσια αποδοχή της νέας τεχνολογίας, ωστόσο έχει προταθεί ένα πλαίσιο που περιλαμβάνει μια σειρά διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν την αποδοχή. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν την αποδοχή και τη στάση, τη γνώση, την εμπειρία, την εμπιστοσύνη, τη δικαιοσύνη, την επίδραση, το αντιληπτό κόστος, τον κίνδυνο και τα οφέλη, την αποτελεσματικότητα του αποτελέσματος και την αντίληψη του προβλήματος. (22)

Αυτό το πλαίσιο έχει προσαρμοστεί στο CCS από τον Seigo et al. (30), ο οποίος έχει αναθεωρήσει τις αναλύσεις σχετικά με την αντίληψη του κοινού. Σύμφωνα με τον Seigo et al. (30), το κοινό γνωρίζει ότι η κλιματική αλλαγή υπάρχει, αλλά δεν είναι σίγουρο για το τι την προκαλεί και τις διάφορες επιλογές μετριασμού. Ειδικότερα, οι εκτιμήσεις για τη μείωση των εκπομπών που απαιτούνται υποτιμούνται, ενώ ο ρόλος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπερεκτιμάται. Η αντίληψη κινδύνου επικεντρώνεται στη βιωσιμότητα του CCS, τις διαρροές και την υπερπίεση των τοποθεσιών αποθήκευσης. (22)

Επιπλέον, μια περαιτέρω ανησυχία είναι ότι οι δημόσιες επενδύσεις σε CCS θα μείωναν τον προϋπολογισμό για εναλλακτικές πηγές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια έρευνα με 60 συμμετέχοντες από το Πίτσμπουργκ (Πενσυλβάνια, ΗΠΑ) σχετικά με τις προτιμήσεις για μειώσεις εκπομπών ανέφερε ότι το πιο προτιμώμενο χαρτοφυλάκιο περιελάμβανε την ενεργειακή απόδοση, ακολουθούμενη από την

πυρηνική ενέργεια, την ολοκληρωμένη αεριοποίηση συνδυασμένου κύκλου άνθρακα με CCS και άνεμο. Ως εκ τούτου, αυτές οι μελέτες αναφέρουν μια μέτρια δημόσια αποδοχή του CCS, εφόσον αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου χαρτοφυλακίου επιλογών μείωσης των εκπομπών άνθρακα. (22)

Η σημασία της ενημέρωσης του κοινού με επαρκή και ουδέτερο τρόπο τονίζεται από τους Seigo et al. (30) και άλλες δημοσιεύσεις. Για παράδειγμα οι van Alphen et al. (31) διερεύνησε την επίδραση των μέσων ενημέρωσης (ιδίως του ολλανδικού Τύπου) στην αντίληψη του κοινού για το CCS και ανέφερε ότι τα μέσα ενημέρωσης και οι ενδιαφερόμενοι φορείς (κυβέρνηση, βιομηχανία, ΜΚΟ) μοιράζονται τις ίδιες ανησυχίες για το CCS, συμπεριλαμβανομένης της προαναφερθείσας βιωσιμότητας, διαρροών από τον χώρο αποθήκευσης και μείωση των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ταυτόχρονα, η έλλειψη γνώσης φαίνεται σε ορισμένες περιπτώσεις να ευθύνεται για τη μειωμένη υποστήριξη, και σε άλλες, για τον αυξημένο κίνδυνο και τη μειωμένη αντίληψη οφέλους. Αυτό υποδηλώνει την ανάγκη στενότερης συνεργασίας μεταξύ ειδικών από τη μηχανική και τις επικοινωνίες για την ενημέρωση του κοινού. (22)

10.Συμπεράσματα

Η ατμοσφαιρική ρύπανση ξεκίνησε μαζί με την ύπαρξη της γης. Με την ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού, ο άνθρωπος ξεκίνησε να συμβάλλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση του πλανήτη. Οι εκτιμήσεις για τη θέρμανση του ισοζυγίου λόγω αλλαγών από το 1860 κυμαίνονται από 1 έως 2 K, αλλά η πραγματική θέρμανση υπολογίζεται περίπου στο ήμισυ αυτών των τιμών λόγω της θερμικής αδράνειας των ωκεανών. Αυτό δεν είναι ασυμβίβαστο με το αρχείο παρατήρησης, αλλά δεν μπορεί κανείς να αποδείξει ότι έχει ανιχνευθεί υπερθέρμανση του θερμοκηπίου λόγω της χρονικής μεταβλητότητας του κλίματος. Οι εκτιμήσεις της αλλαγής τα επόμενα 50 χρόνια εξαρτώνται από τις προβλεπόμενες αυξήσεις στα ίχνη αερίων και τις υποθέσεις που γίνονται σχετικά με την ευαισθησία του κλίματος και τη θερμική αδράνεια, αλλά μια θέρμανση 1 K ή περισσότερο φαίνεται πιθανή.

Το 2005 λίγες χώρες είχαν αναπτύξει ειδικά νομικά και ρυθμιστικά πλαίσια για τη γεωλογική αποθήκευση CO₂, οι θαλάσσιες συνθήκες δεν προέβλεπαν αποθήκευση CO₂ στον υποθαλάσσιο βυθό και υπήρχαν πολλά εκκρεμή ερωτήματα που έπρεπε να απαντηθούν, τα οποία δημιούργησαν αβεβαιότητα για την ανάπτυξη της αποθήκευσης σε γεωλογικούς σχηματισμούς και έτσι, για CCS.

Οι θετικές εξελίξεις από το 2005 έχουν συμβάλει σημαντικά στην επίλυση των ζητημάτων. Αυτές οι εξελίξεις έχουν συμβεί σε διεθνές επίπεδο, όπως η ανάπτυξη κατευθυντήριων γραμμών της IPCC για αποθέματα αερίων του θερμοκηπίου, οι τροποποιήσεις του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου και οι τρόποι και διαδικασίες CDM της UNFCCC, σε περιφερειακό επίπεδο, όπως τροποποιήσεις OSPAR και οδηγία της ΕΕ· και σε εθνικό και υποεθνικό επίπεδο, όπως το πλαίσιο της Αυστραλιανής Κοινοπολιτείας και των πολιτειών, και το ομοσπονδιακό πλαίσιο των ΗΠΑ. Φυσικά, υπήρξαν και άλλες εξελίξεις όπως αυτές στον Καναδά, την Ιαπωνία και τη Νορβηγία, καθώς και προσπάθειες τυποποίησης σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Παρά αυτές τις θετικές εξελίξεις, υπάρχει ακόμη πολλή δουλειά να γίνει. Πολλές χώρες που έχουν εκφράσει ενδιαφέρον για τη χρήση CCS για τη μείωση των εκπομπών δεν έχουν ακόμη αναπτύξει ρυθμιστικά πλαίσια, ιδίως η Νότια Αφρική και το Μεξικό, ενώ σε άλλες, τα ρυθμιστικά πλαίσια παραμένουν αδοκίμαστα.

Επιπλέον, θα χρειαστεί να δημιουργηθούν περισσότεροι δεσμοί μεταξύ των αναδυόμενων συστημάτων μείωσης των εκπομπών και των κανονισμών CCS, όπως συνέβη στην ΕΕ μεταξύ του ETS και της Οδηγίας. Καθώς τα τοπικά και περιφερειακά συστήματα μείωσης των εκπομπών συνδέονται, μπορεί επίσης να είναι χρήσιμο να εναρμονιστούν οι κανονιστικές απαιτήσεις όπου είναι δυνατόν.

Στην Ελλάδα, υπάρχουν αρκετές τοποθεσίες που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως πιθανοί χώροι συλλογής και αποθήκευσης CO₂, ενώ αρκετές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στις πιο ρυπογόνες βιομηχανίες περιλαμβάνουν πλέον το CCUS στα σχέδιά τους για την ενεργειακή μετάβαση, μια τάση που αναμένεται να επιταχυνθεί από το συνεχώς αυξανόμενο κόστος των εκπομπών CO₂ και την ευρύτερη διαθεσιμότητα τεχνολογιών CCUS.

Ακρωνύμια

CDM-Clean Development Mechanisms

COP21-Conference Of the Parties

ECBM-Enhanced coal bed methane recovery

EIA- Environmental Impact Assessment

EOR-Enhanced oil recovery

FRAM-Framework for Risk Assessment and Management of Storage of CO₂ Streams in Geological For

FSRU-Floating Storage and Regasification Unit

IEAGHG-International Energy Agency (IEA) GHG

IEA-International Energy Agency

IGCC-Integrated gasification combined cycle

IPCC-The Intergovernmental Panel on Climate Change

LNG- Liquefied Natural Gas

NGCC-Natural gas combined cycle

PC-Pulverized coal

R&D-Research and development

RAMF-Risk Assessment and Management Framework for CO₂ Sequestration in Sub-seabed Geological

RR-relative risk

SDWA-Safe Drinking Water Act

SRES-Special Report on Emissions Scenarios

TAP-Trans Adriatic Pipeline

TAR-Third Assessment Report

TRL-Technology Readiness Level

UNEP-United Nations Environment Programme

UNFCCC-United Nations Framework Convention on Climate Change

Bibliography

1. **Jacobson, Mark Z.** *Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation*. s.l. : Cambridge University Press, 2002.
2. *Pollution and Its Control: A Historical Perspective*. **Tabassum-Abbasi, Tasneem Abbasi, and S. A. Abbasi**. 2022.
3. **Amann, Markus**. *Future emissions of air pollutants in Europe-Current legislation baseline and the scope for further reductions*. s.l. : International Institute for Applied Systems Analysis IIASA, 2012.
4. **Claudiu Tiberiu Albuлесcu, Alin Emanuel Artene, Caius Tudor Luminosu, Matei Tămășilă**. *CO2 emissions, renewable energy, and environmental regulations in the EU countries*. 2019.
5. **Mitchell, John F. B.** *THE "GREENHOUSE" EFFECT AND CLIMATE CHANGE*. Bracknell, England : Meteorological Office, 1989.
6. *Credit Rationing in Markets with Imperfect Information*. **Joseph E. Stiglitz, Andrew Weiss**. s.l. : American Economic Association, 1981, Vol. 71.
7. *Trace Gas Trends and Their Potential Role in Climate Change*. **V. RAMANATHAN, R. J. CICERONE, H. B. SINGH, AND J. T. KIEHL**. Colorado : s.n., 1985.
8. **(IPCC), Intergovernmental Panel on Climate Change**. *CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STORAGE*. New York : CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2005.
9. *Legal and Regulatory Developments on CCS*. **Tim Dixona, Sean T. McCoy, Ian Havercroft**. s.l. : International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015.
10. **Stefano F. Verde, Simone Borghesi**. *The International Dimension of the EU Emissions Trading System: Bringing the Pieces Together*. 2022.
11. *Paris: Beyond the Climate Dead End through Pledge and Review?* **Robert O. Keohane, Michael Oppenheimer**. 2016, Politics and Governance, Vol. 4.
12. *DIRECTIVE 2009/31/EC. COUNCIL, THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE*. 2009.
13. **Alla Shogenova, Kris Piessens, Sam Holloway, Michelle Bentham, Roberto Martinez, Kristin M. Flornes, Niels E. Poulsen, Adam Wójcicki, Saulius Sliupa, Ludovít Kucharič, Alexandra Dudu, Sergio Persoglia, Vit Hladik, Bruno Saftic, Astri Kvassnes, Kazbulat Shogenov etc.** *Implementation of the EU CCS Directive in Europe: results and development in 2013*. s.l. : Elsevier Ltd, 2014.
14. *The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance*. **Antoine Dechezlepretre, Daniel Nachtigall, Frank Venmans**. s.l. : Elsevier Inc., 2022, Vol. Journal of Environmental Economics and Management.
15. **Michael, Porter**. *The competitive Advantage Of Nations* Macmillan. 1990.
16. **Aviel Verbruggen, Erik Laes, Edwin Woerdman**. 2019.
17. **Sina Wartmann, Heleen Groenberg, Scott Brockett**. *Monitoring and reporting of GHG emissions from CCS operations under the EU ETS*. s.l. : Elsevier Ltd., 2009.
18. *The CCS hub in Norway: some insights from 22 years of saline aquifer storage*. **Ringrose, Philip S.** Reykjavik, Iceland : Elsevier Ltd., 2018.

19. **Klaas van Alphen, Jochem van Ruijven, Sjur Kasa, Marko Hekkert, Wim Turkenburg.** *The performance of the Norwegian carbon dioxide, capture and storage innovation system.* s.l. : Reykjavik, Iceland, 2008.
20. **Almeida, Laisa Branco de.** The International Law of Energy of Offshore Carbon Capture and Storage: The Rotterdam Nucleus Project case study. *Environmental Law Review.* 2022.
21. **Dr. Yannis Bassias, Dr. Eugenia Giannini, Dr. Nikolaos Koukouzas, Dimitris Mezartasoglou, Costis Stambolis.** *Prospects for the Implementation of CCUS Technologies in Greece -Extended Summary.* Athens : s.n., 2023.
22. **Sara Budinisa, Samuel Krevor, Niall Mac Dowell, Nigel Brandon, Adam Hawkes.** *An assessment of CCS costs, barriers and potential.* s.l. : Elsevier Ltd., 2018.
23. **Environmental scan and issue awareness: risk management challenges for CCS. William Leiss, Daniel Krewski.** *Int. J. Risk Assessment and Management,* 2019, Vol. 22.
24. *Worldwide look at reserves and production.* **Koelbl.** s.l. : Oil & Gas Journal, 2014.
25. *The Impact of Uncertainty in Climate Targets and CO₂ Storage Availability on Long-Term Emissions Abatement.* **Ilkka Keppo, Bob van der Zwaan.** 2012, *Environmental Modeling and Assessment,* Vol. 17.
26. *A Global but Regionally Disaggregated Accounting of CO₂ Storage Capacity: Data and Assumptions for Compiling Regional CO₂ Storage Capacity Supply Curves for Incorporation within ObjECTS->MiniCAM.* **J. J. Dooley, S. J. Friedman.** 2005.
27. *CCUS in China's mitigation strategy: insights from integrated assessment modeling.* **Sha Yu, Jill Horing, Qiang Liu, Robert Dahowski, Casie Davidson, James Elmond, Bo Liu, Haweon Mcjeon,, Jeff McLeod, Pralit Patel, Leon Clarke.** s.l. : Elsevier Ltd., 2019, *International Journal of Greenhouse Gas Control.*
28. **Chris Hendriks, Wina Graus.** *GLOBAL CARBON DIOXIDE STORAGE POTENTIAL AND COSTS.* 2004.
29. *CO₂ migration and pressure evolution in deep saline aquifers.* **Jens T. Birkholzer, Curtis M. Oldenburg, Quanlin Zhou.** s.l. : Elsevier Ltd., 2015, *International Journal of Greenhouse Gas Control,* Vol. 40.
30. *Public perception of carbon capture and storage (CCS): A review.* **Selma L'Orange Seigo, Simone Dohle, Michael Siergrst.** s.l. : Elsevier Ltd., 2014, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Vol. 38.
31. *Societal acceptance of carbon capture and storage technologies.* **Klaas van Alpen, Quirine van Voorst tot Voorst, Marko P. Hekkert, Ruud E.H.M. Smits.** s.l. : Elsevier Ltd., 2007, *Energy Policy,* Vol. 8.