



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση : Μηχανικών Περιβάλλοντος

## **“ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO<sub>2</sub> ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ”**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΗΣ**

**ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΓΕΝΙΑΣ**

Τριμελής Επιτροπή :

Καρατζάς Γεώργιος (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Νικολαΐδης Νικόλαος

Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Χανιά, Οκτώβρης 2023

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια ένα από τα προβλήματα που απασχολούν την παγκόσμια κοινότητα είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη. Έχει διαπιστωθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας της γης οφείλεται κατά κύριο λόγο στα αέρια του θερμοκηπίου, με πρωταγωνιστή το διοξείδιο του άνθρακα, γνωστό ως CO<sub>2</sub>. Η μεγάλη του αύξηση, τις τελευταίες δεκαετίες έχει προκαλέσει παγκόσμια ανησυχία, με τις προσπάθειες περιορισμού και διαχείρισης του ολοένα να αυξάνονται. Μια τέτοια προσπάθεια αξιοποίησης και περιορισμού του CO<sub>2</sub> που αποδεσμεύεται σε τεράστιες ποσότητες από τις βιομηχανικές δραστηριότητες, με άμεση επιθυμητή συνέπεια την μετρίαση της κλιματικής αλλαγής, αποτελεί η Δέσμευση και Αποθήκευση του CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Capture and Storage, CCS). Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε σε θεωρητικό επίπεδο με την κατανόηση την προαναφερθείσας τεχνικής, με την αναγκαιότητα αύξησης της παρουσίας της σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά και με το πού και με ποιο τρόπο μπορεί μια τέτοια τεχνική να εφαρμοστεί. Αναφέρονται επίσης αντίστοιχα έργα CCS ανά τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, με το πρώτο ελληνικό έργο να είναι έτοιμο για λειτουργία μέσα στα επόμενα δύο χρόνια.

## **Abstract**

In recent years, one of the problems that concern the world community is global warming. It has been established that the increase in temperature is mainly due to greenhouse gases, within carbon dioxide, known as CO<sub>2</sub>, as the main protagonist. The large increase of this gas in recent decades has caused global concern, with efforts to limit and manage it ever increasing. One such effort to utilize and limit CO<sub>2</sub>, which released in huge quantities from industrial activities, with the immediate desired consequence of mitigating climate change, is CO<sub>2</sub> Capture and Storage (CCS). In this thesis we will deal at a theoretical level with the understanding of the aforementioned technique, with the necessity of increasing its presence on a global level, but also with where and how such a technique can be implemented. Corresponding CCS projects around the world, including Greece, are also mentioned, with the first Greek project to be ready for operation within the next two years.

## **Ευχαριστίες**

Με αφορμή την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Καρατζά, για την βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια συγγραφής αλλά και την οικογένεια και το περιβάλλον μου για την υπομονή και την στήριξη.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	2
Abstract .....	3
Ευχαριστίες .....	4
Περιεχόμενα.....	5
Εισαγωγή.....	7
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....</b>	<b>9</b>
<b>Διοξείδιο του Άνθρακα (CO<sub>2</sub>)</b>	
1.1 Γενικά Στοιχεία .....	9
1.2 Κύκλος του Άνθρακα.....	10
1.3 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου.....	11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>14</b>
<b>Δέσμευση CO<sub>2</sub></b>	
2.1 Διεθνείς Συμφωνίες για την κλιματική αλλαγή .....	14
Συμφωνία των Παρισίων .....	17
2.2 Αναγκαιότητα Αποθήκευσης CO <sub>2</sub> στο υπέδαφος .....	17
2.3 Δέσμευση CO <sub>2</sub> .....	20
2.3.1 Συστήματα Δέσμευση CO <sub>2</sub> .....	20
2.3.1.1 Pre-Combustion Capture.....	20
2.3.1.2 Post-Combustion Capture.....	22
2.3.1.3 Oxy-Fuel Combustion.....	23
2.3.1.4 Capture from Industrial Process Steams .....	24
2.3.2 Τεχνολογίες Δέσμευσης CO <sub>2</sub> .....	25
2.3.2.1 Διαχωρισμός με χρήση Μembranών.....	25
2.3.2.2 Διαχωρισμός με χρήση ροφητικών ουσιών/διαλυτών.....	26
2.3.2.3 Διαχωρισμός με χρήση κρυογονικής απόσταξης.....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>29</b>
<b>Μεταφορά και Αποθήκευση CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος</b>	
3.1 Μεταφορά δεσμευμένου CO <sub>2</sub> .....	29
3.1.1 Μεταφορά CO <sub>2</sub> μέσω αγωγών .....	30
3.1.2 Μεταφορά CO <sub>2</sub> μέσω πλοίων .....	31
3.2 Αποθήκευση CO <sub>2</sub> εντός Γεωλογικών Σχηματισμών .....	32
Έγχυση CO <sub>2</sub> .....	32

3.2.1 Μηχανισμοί Αποθήκευσης.....	33
3.2.1.1 Δομική Παγίδευση.....	34
3.2.1.2 Υπολειμματική Παγίδευση.....	34
3.2.1.3 Παγίδευση Διάλυσης.....	34
3.2.1.4 Ορυκτολογική Παγίδευση .....	35
3.2.2 Γεωλογικοί Σχηματισμοί Κατάλληλοι προς Αποθήκευση.....	36
3.2.2.1 Αλατούχοι Υδροφορείς.....	38
Sleipner Project.....	39
Χαρακτηριστικά Utsira.....	41
3.2.2.2 Κοιτάσματα Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου.....	43
3.2.2.2.1 Εξαντλημένα Κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου.....	43
Πρώτες Δοκιμές Αποθήκευσης.....	44
3.2.2.2.2 Ενισχυμένη Ανάκτηση Πετρελαίου (EOR).....	44
Weyburn Project.....	47
3.2.2.3 Ανεκμετάλλευτες Φλέβες Άνθρακα.....	50
Allison Unit CO <sub>2</sub> - ECBM Pilot Project.....	54
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>56</b>
<b>Παραδείγματα Έργων Γεωλογικής Αποθήκευσης CO<sub>2</sub></b>	
4.1 Έργα Γεωλογικής Αποθήκευσης CO <sub>2</sub> Παγκοσμίως.....	56
4.2 Έργα Γεωλογικής Αποθήκευσης CO <sub>2</sub> στον Ελλαδικό Χώρο .....	60
4.2.1 Λεκάνη Πρίνου – Καβάλας.....	61
4.2.2 Μεσοελληνική Αύλακα.....	63
4.2.3 Λεκάνη Φλώρινας.....	64
4.2.4 Λεκάνη Δυτικής Θεσσαλονίκης.....	65
4.2.5 Λεκάνη Βόλου (Βασάλτες).....	65
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>67</b>
<b>Νομοθεσία και Κανονισμοί</b>	
5.1 Διεθνής Νομοθεσία και Κανονισμοί.....	67
5.2 Εθνική Νομοθεσία και Κανονισμοί.....	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....</b>	<b>68</b>
Συμπεράσματα.....	68
Βιβλιογραφία.....	70

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα επίπεδα CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, τα τελευταία χρόνια, έχουν αυξηθεί δραματικά. Η καύση των ορυκτών καυσίμων ευθύνεται για την παραγωγή του αερίου αυτού, με τα επίπεδα του να πλησιάζουν τα 38 δισεκατομμύρια τη παγκοσμίως. Καθώς, το CO<sub>2</sub> αποτελεί βασικό αέριο του θερμοκηπίου και ευθύνεται για την κλιματική αλλαγή, εμφανής ακόμη και σήμερα, ολόένα και καινούργιοι στόχοι τίθενται σε εφαρμογή για την μείωση της έκλυσης του στην ατμόσφαιρα. Η Συμφωνία του Παρισιού επισφράγισε την ανάγκη αυτή, με βασικό στόχο τον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας την γης κάτω από 1,5°C, φιλοδοξώντας να δημιουργηθεί έως το 2050 μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία και κοινωνία.

Τα τελευταία χρόνια μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία έχει έρθει να προστεθεί και να συμβάλλει στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, περιορίζοντας το εκλυόμενο CO<sub>2</sub>. Στην παρούσα διπλωματική θα αναλύσουμε σημαντικές πτυχές της τεχνολογίας αυτής, δίνοντας σαφή έμφαση στους υδροφορείς εκείνους που έχουν τη δυνατότητα να φιλοξενήσουν το CO<sub>2</sub>. Στο Κεφάλαιο 2, της διπλωματικής θα ασχοληθούμε με την δέσμευση του CO<sub>2</sub>, διαδικασία που προηγείται της αποθήκευσης. Ανάλογα με την παραγωγική διαδικασία της εκάστοτε βιομηχανίας, υπάρχουν τέσσερις τρόποι με τους οποίους είναι εφικτό να δεσμεύσουμε το CO<sub>2</sub>. Η δέσμευσή του πριν και μετά από την καύση (Pre and Post Combustion, αντίστοιχα), είναι δύο από τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Επίσης η καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (Oxy - Fuel Combustion) και ο κρυογονικός διαχωρισμός (Capture from Industrial Process) αποτελούν, επίσης, δύο από τις τεχνολογίες για τη δέσμευση του CO<sub>2</sub>. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ρεύματος CO<sub>2</sub> και της υπάρχουσας εγκατάστασης, οι σημαντικότερες τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν για την επίτευξη των παραπάνω διαδικασιών δέσμευσης είναι οι μεμβράνες, οι διαλύτες αλλά και η κρυογενική απόσταξη.

Στην αμέσως επόμενη ενότητα (Κεφάλαιο 3), αναλύεται και το βασικό μέρος της παρούσας διπλωματικής, η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος. Η μεταφορά του ρεύματος CO<sub>2</sub>, που έχει δημιουργηθεί με τις παραπάνω τεχνολογίες δέσμευσης, προηγείται της αποθήκευσης του και γίνεται είτε με τη χρήση ειδικών πλοίων είτε μέσω ειδικά σχεδιασμένων αγωγών μεταφοράς. Όταν το αέριο φτάσει στον κατάλληλα επιλεγμένο σχηματισμό, τότε ξεκινά η διαδικασία της έγχυσης. Ο τύπος των κατάλληλα επιλεγμένων σχηματισμών αναλύεται εκτενέστερα, όπως επίσης αναλύεται και ο τρόπος με τον οποίο το CO<sub>2</sub> μετά την έγχυση αποθηκεύεται. Οι αλατούχοι υδροφορείς, οι ενεργοί και εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου αλλά και τα ανεκμετάλλευτα κοιτάσματα άνθρακα αποτελούν τα τρία είδη γεωλογικών σχηματισμών που αναλύονται και δύναται να αποθηκεύουν με ασφάλεια μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> για εκατομμύρια χρόνια.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται διάφορα έργα δέσμευσης και αποθήκευσης CO (CCS) σε παγκόσμιο αλλά και σε εγχώριο επίπεδο. Στο τελευταίο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5) αναγράφονται οι νόμοι και οι κανόνες που διέπουν την τεχνολογία αυτή.

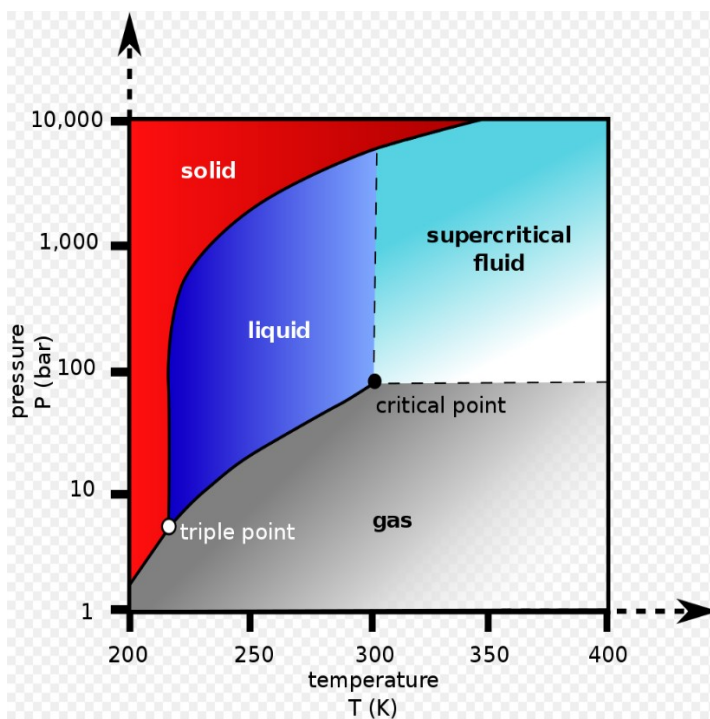


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### **Διοξείδιο του Άνθρακα (CO<sub>2</sub>)**

#### **1.1 Γενικά Στοιχεία**

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι χημική ένωση αποτελούμενη από ένα άτομο άνθρακα (C) και δύο άτομα οξυγόνου (O<sub>2</sub>) ενωμένα με ομοιοπολικό δεσμό ενώ θεωρείται ένα από τα πρώτα αέρια του θερμοκηπίου που μελετήθηκε ως συστατικό του αέρα. Ο συντακτικός του τύπος μπορεί να αποδοθεί ως εξής : O=C=O. Αποτελεί αέριο συστατικό της γήινης ατμόσφαιρας, άχρωμο, άοσμο και άγευστο, υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ενώ ταυτόχρονα είναι ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου, με ποσοστό που αγγίζει το 53% περίπου. Η μοριακή του μάζα είναι 44,01gr/mol, έχει σημείο τήξεως ίσο με -78°C και σημείο βρασμού -57°C, σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Η πυκνότητα του είναι 1,98kg/m<sup>3</sup>, 1,5 φορές δηλαδή πυκνότερο του αέρα (1,29 g/L) και η περιεκτικότητά του μεταβάλλεται χρονικά και τοπικά (περίπου 0,0355% κατ' όγκο ή 355ppm). Σε 1atm (στο επίπεδο της θάλασσας) μετατρέπεται απευθείας σε στερεό. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα (Εικόνα 1.1) φάσεων του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.<sup>[1]</sup>



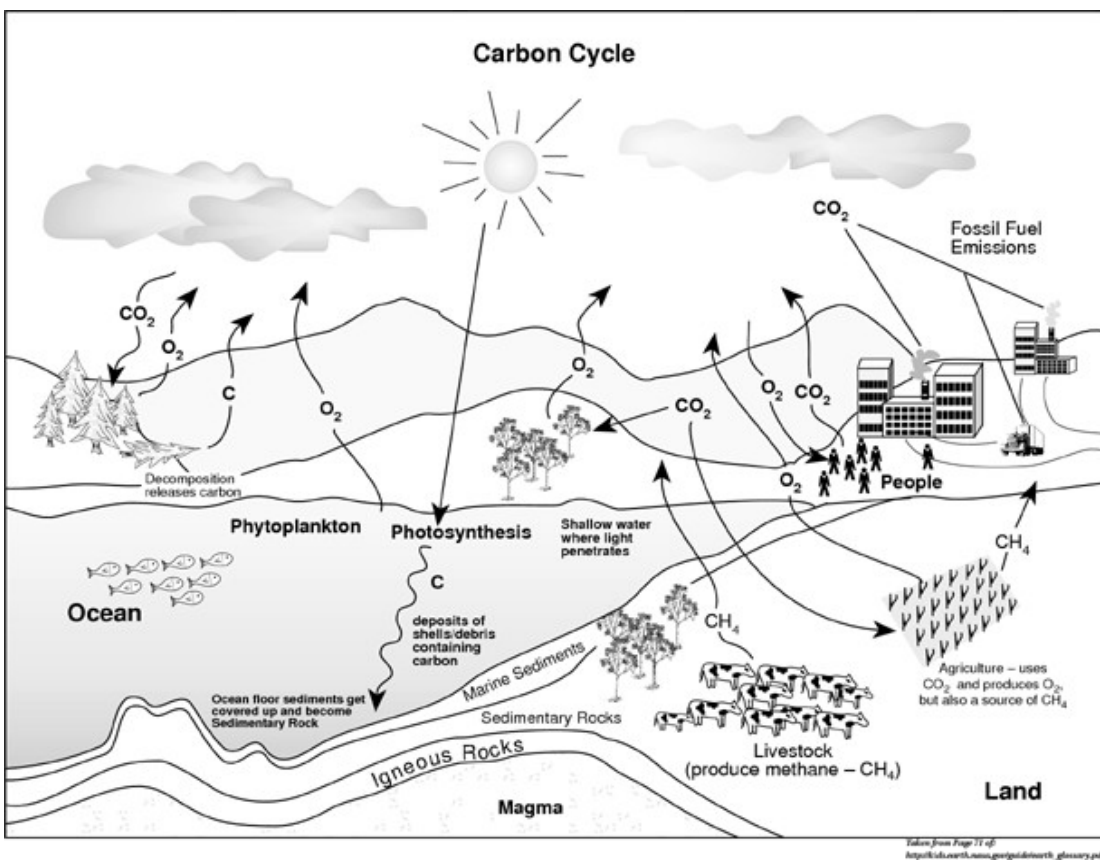
**Εικόνα 1.1 : Διάγραμμα φάσεων CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα**

(Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon\\_dioxide\\_pressure-temperature\\_phase\\_diagram](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_dioxide_pressure-temperature_phase_diagram))

Φυσικές δεξαμενές του  $\text{CO}_2$  αποτελούν οι ωκεανοί, τα ιζηματογενή ανθρακικά πετρώματα, η βιόσφαιρα και η ατμόσφαιρα. Στην ατμόσφαιρα το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) εισέρχεται είτε από φυσικές είτε ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Στις πρώτες κατατάσσονται οι βιολογικές διεργασίες της αναπνοής και του μεταβολισμού των ζώντων οργανισμών τόσο της ξηράς όσο και της θάλασσας, η αποσύνθεση των οργανικών στοιχείων μέσα στο έδαφος, οι θερμές πηγές από τις καύσεις της οργανικής ύλης (άνθρακας, πετρέλαιο, ξύλα, υγραέριο).<sup>[2]</sup>

## **1.2 Κύκλος του Άνθρακα**

Ο άνθρακας, λοιπόν, το πρωταρχικό στοιχείο της ζωής, δομή όλων των ενώσεων και των βιολογικών μακρομορίων, σχηματίζει τον τελειότερο από τους βιοχημικούς κύκλους, κατά τον οποίο ο άνθρακας ανταλλάσσεται μεταξύ της βιόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και των γεωλογικών σχηματισμών της γης. Οι κυριότερες ανόργανες μορφές παρουσίας άνθρακα στη φύση είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ). Το μέρος του άνθρακα που κυκλοφορεί με φυσικό τρόπο στη βιόσφαιρα ανταλλάσσεται μεταξύ ζωντανών οργανισμών και  $\text{CO}_2$ . Η φυτική παραγωγή της ξηράς πραγματοποιείται καταναλώνοντας το  $\text{CO}_2$  της ατμόσφαιρας, μέσω της φωτοσύνθεσης. Το  $\text{CO}_2$  επιστρέφει στην ατμόσφαιρα με την οξείδωση της οργανικής ύλης που συντελείται με την διαδικασία της αναπνοής. Επίσης ένα από τα κύρια μονοπάτια ανταλλαγής  $\text{CO}_2$  λαμβάνει χώρα μεταξύ της ατμόσφαιρας και των ωκεανών. Οι θαλάσσιοι ταμειυτήρες παίζουν ρυθμιστικό ρόλο στη λειτουργία του συστήματος καθώς περικλείουν ποσότητα  $\text{CO}_2$  που αγγίζει τους  $35000 \times 10^9$  tn, ποσότητα περίπου 50 φορές μεγαλύτερη από εκείνη που περιέχεται στην ατμόσφαιρα. Το  $\text{CO}_2$  που είναι διαλυμένο στα υδάτινα οικοσυστήματα βρίσκεται με την μορφή, κυρίως ανθρακώδους οξέος ( $\text{HCO}_3^-$ ) και επιτρέπει τη φωτοσύνθεση στα άλγη και στα φυτά ενώ ταυτόχρονα αποτελεί μια δεξαμενή που απορροφά και αποδίδει  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα. Σημαντικές επίσης ποσότητες άνθρακα βρίσκονται αποθηκευμένες στη βιομάζα των ζώντων οργανισμών ( $470 \times 10^9$  tn), στο έδαφος σαν νεκρή οργανική ύλη ( $3700 \times 10^9$  tn) και τέλος στα ορυκτά καύσιμα ( $10000 \times 10^9$  tn) με τις μεγαλύτερες ποσότητες να είναι αποθηκευμένες στα ανθρακικά πετρώματα,  $\text{CaCO}_3$ , με περιεχόμενη ποσότητα 40 φορές μεγαλύτερη από εκείνη της ατμόσφαιρας.<sup>[3]</sup>



**Εικόνα 1.2 Κύκλος του άνθρακα.**

(Πηγή: <https://rea.elke.uoa.gr/rea/lesson/C5934844-70BE-47EB-AF74-1799BD6F4320/eikona2.html>)

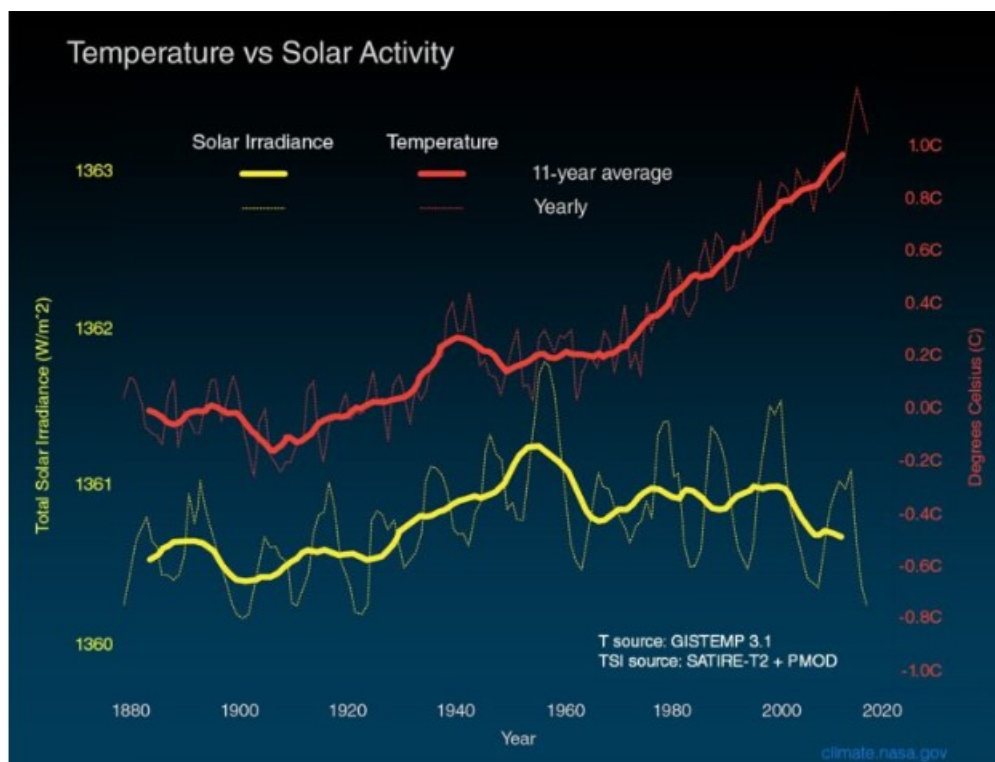
### **1.3 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Effect)**

Ο κύκλος του άνθρακα, όπως ήδη αναφέρθηκε, θεωρείται από τους τελειότερους σε ισορροπία βιοχημικούς κύκλους στη φύση. Για εκατομμύρια χρόνια επικρατούσε ισορροπία, κατά την οποία η παραγωγή των φυτών καταναλωνόταν σχεδόν εξολοκλήρου από την αναπνοή του συνόλου των ζώντων οργανισμών. Από την Βιομηχανική Επανάσταση (19ος αιώνας) και μετά, η ισορροπία αυτή έχει ανατραπεί. Η εκτεταμένη αποψίλωση των δασών και η χρήση υγρών και στερεών ορυκτών καυσίμων διοχετεύουν στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες άνθρακα, με μορφή  $\text{CO}_2$ . Η περίσσεια  $\text{CO}_2$  που δημιουργείται στην ατμόσφαιρα, προκαλεί αλλαγή στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας συμβάλλοντας στην ενδυνάμωση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Παρόλο που η γη κινείται μέσα στις εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες του διαστήματος, η επιφάνειά της διατηρεί μία θερμοκρασία ήπια και ευνοϊκή για τη ζωή, με μέση τιμή περίπου 15°C. Η άμεση θέρμανση της από τον ήλιο σε συνδυασμό με μια μικρή συνεισφορά θερμότητας από το εσωτερικό του πλανήτη, δικαιολογούν μια μέση θερμοκρασία που δεν ξεπερνά τους -18°C. Η διαφορά αυτή των 33°C οφείλεται στην φυσική διεργασία που ονομάζεται "φαινόμενο του θερμοκηπίου" και η οποία θερμαίνει την κατώτερη ατμόσφαιρα (τροπόσφαιρα) και συμβάλει στην δημιουργία ενός περιβάλλοντος πιο φιλικού για την ζωή. Συντελεστές του φαινομένου είναι ορισμένα αέρια της γήινης ατμόσφαιρας, γνωστά και ως αέρια του θερμοκηπίου. Τα αέρια αυτά είναι σχετικά διαφανή για την προσπίπτουσα ορατή και υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, απορροφούν όμως την υπέρυθρη ακτινοβολία με αποτέλεσμα να παγιδεύουν, σαν θερμοκήπιο, την εκπεμπόμενη από την επιφάνεια της Γης. Η Γη θερμαίνεται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και εκπέμπει πίσω στο διάστημα υπέρυθρη (Νόμος Stefan-Boltzmann), φτάνοντας έτσι σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Η ύπαρξη δηλαδή του φαινομένου αυτού επιτρέπει τη βιωσιμότητα του πλανήτη, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του κατά 33 βαθμούς.

Κάθε αύξηση όμως των αερίων θερμοκηπίου διαταράσσει το ισοζύγιο της ακτινοβολίας, προκαλώντας έτσι αλλαγές και στη θερμική ισορροπία, εξαιτίας του ότι περισσότερη ποσότητα ενέργειας παγιδεύεται στην τροπόσφαιρα. Περισσότερα βίαια ατμοσφαιρικά φαινόμενα τείνουν να λαμβάνουν χώρα, το κλίμα διαταράσσεται, με τη μέση θερμοκρασία της γης και των υδάτινων ταμιευτήρων, αναπόφευκτα, να αυξάνονται. <sup>[2] [24]</sup>

Τα βασικότερα αέρια του θερμοκηπίου των οποίων η αύξηση είναι ανθρωπογενής είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), οι υδροφθοράνθρακες (HFC<sub>s</sub>), οι υπερφθοράνθρακες (PFC<sub>s</sub>), το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), οξείδιο του αζώτου (N<sub>x</sub>O) και το εξαφθοριούχο θείο (SF<sub>6</sub>). <sup>[2][4]</sup>



**Εικόνα 1.3** Γράφημα σύγκρισης της επιφανειακής θερμοκρασίας της γης (κόκκινη γραμμή) και της ηλιακής ενέργειας που η γη προσλαμβάνει (κίτρινη γραμμή) σε  $W/m^2$ .

(Πηγή: [https://climate.nasa.gov/internal\\_resources/1896](https://climate.nasa.gov/internal_resources/1896))

Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2007) οι ανθρωπογενείς εκπομπές του  $CO_2$ , αύξησαν τις συγκεντρώσεις του  $CO_2$  κατά 35% τα τελευταία 200 χρόνια. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές του  $CO_2$ , αλλά και των προαναφερθέντων αερίων, συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και συνεπώς στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι ολοένα αυξανόμενες ανθρωπογενείς δραστηριότητες διαφαίνεται ότι θα αυξήσουν ταυτόχρονα και τις εκπομπές των αερίων αυτών κατά ποσοστό 70% έως το 2030. Οι εκπομπές  $CO_2$  που θα προέρχονται από την παραγωγή ενέργειας εκτιμάται ότι θα αγγίξουν τα 38 δισεκατομμύρια τόνους παγκοσμίως, αλλάζοντας το κλίμα ριζικά.

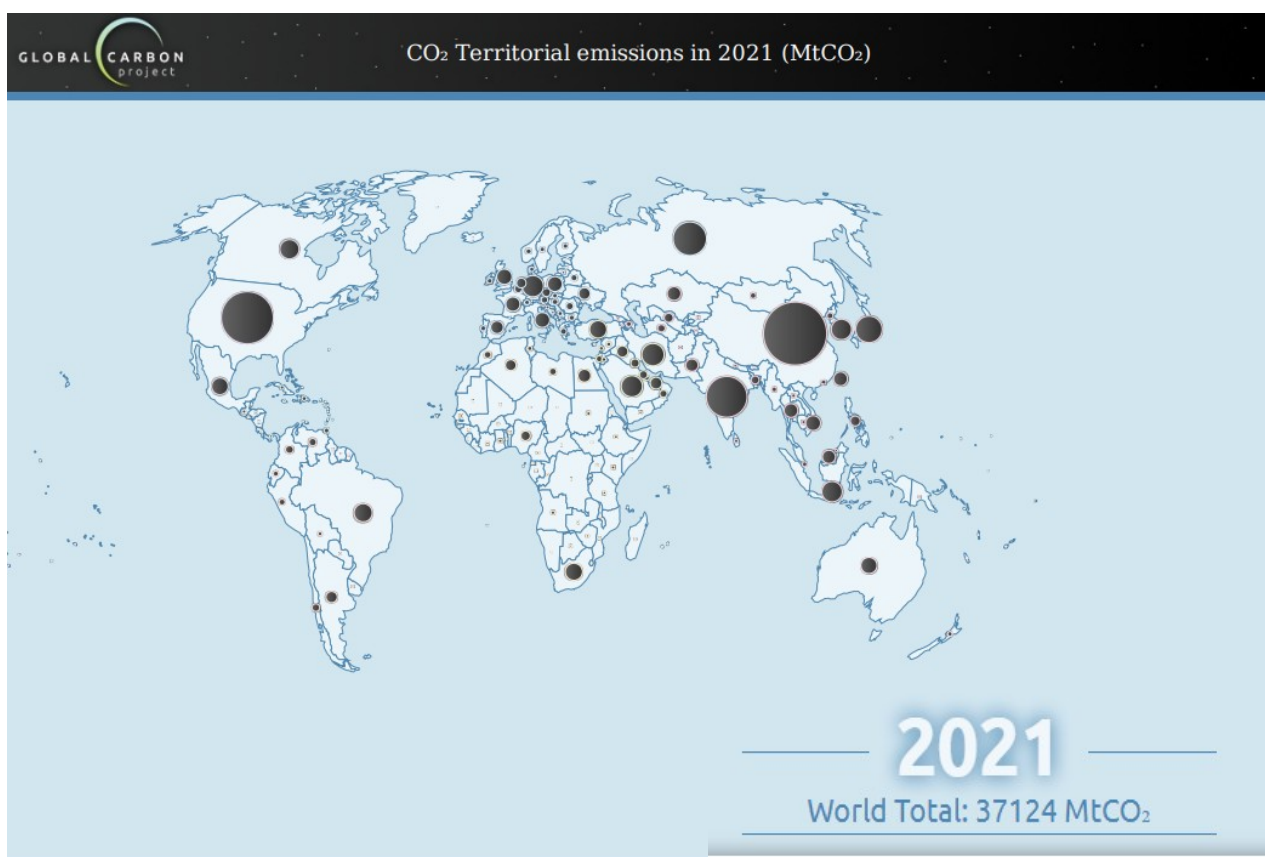
Η βασική κατεύθυνση πλέον ολόκληρης της ανθρωπότητας αποτελεί η διατήρηση της συγκέντρωσης του  $CO_2$  κάτω από 500 ppm. Συγκεκριμένα οι συγκεντρώσεις του  $CO_2$  πρέπει να μειωθούν κατά 50% μέχρι το 2030, κατά 60% μέχρι το 2040, με στόχο την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. <sup>[10]</sup>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Δέσμευση CO<sub>2</sub>

#### 2.1 Διεθνείς Συμφωνίες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής

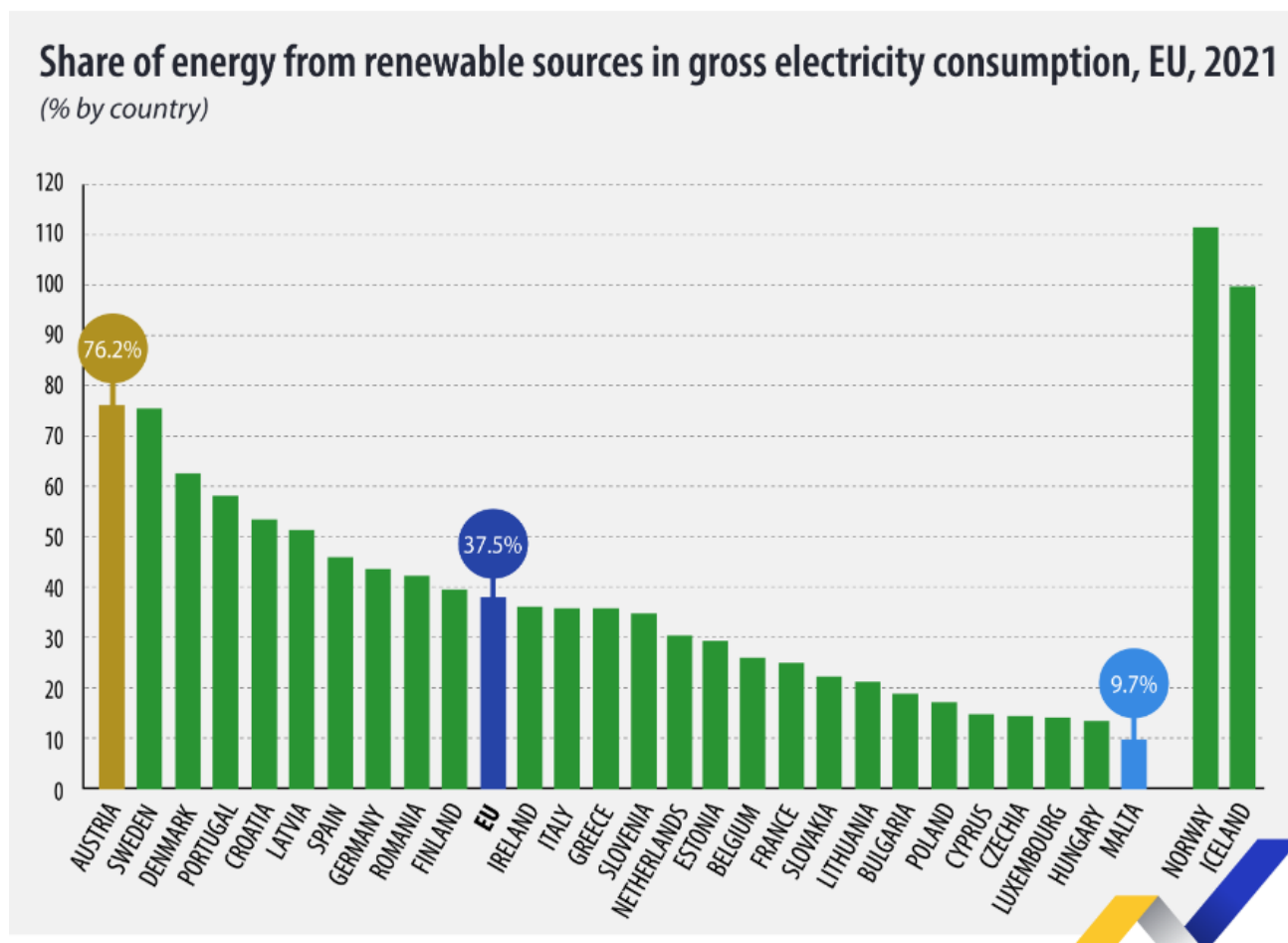
Είναι, πλέον, αναμφισβήτητο ότι η κλιματική αλλαγή είναι κάτι το υπαρκτό και απειλεί την ανθρώπινη ύπαρξη και το οικοσύστημα. Συνολικά το 2021 εκπέμφθηκαν 37124Mt CO<sub>2</sub>. Παγκόσμια ο μεγαλύτερος ρυπαντής CO<sub>2</sub>, μετά το 2005, θεωρείται η Κίνα με 11472Mt CO<sub>2</sub>, ενώ αμέσως μετά ακολουθούν οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με 5007Mt CO<sub>2</sub> και η Ινδία με 2710Mt CO<sub>2</sub>. Είναι σημαντικό ωστόσο να αναφερθεί και η θέση της Ελλάδας στην κατάταξη αυτή, κατέχοντας την 54η θέση με τις εκπομπές CO<sub>2</sub> να φτάνουν ετησίως τους 56Mt. <sup>[5]</sup>



**Εικόνα 2.1** Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα ανά χώρα-2021

(Πηγή: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/co2-emissions>)

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι η σημαντική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, συνολικά αλλά και για κάθε κράτος μεμονωμένα, από το έτος του 2017 και μετά, σύμφωνα με την αντίστοιχη έρευνα του έτους. Η συντονισμένη στροφή των κρατών προς τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι γεγονός και ολοένα και αυξάνεται τα τελευταία χρόνια.



**Εικόνα 2.2** Ποσοστά ακαθάριστης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Πηγή: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/DDN-20230127-1>)

Σύμφωνα με την στατιστική υπηρεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Eurostat, το 2018 το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας έφτασε το 18% στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.), από 17,5% το 2017, περισσότερο από διπλάσιο σε σχέση με το 2004 που ήταν 8,5%. Στην Ελλάδα, την ίδια χρονιά, το ίδιο ποσοστό έφτασε το 18%, το 2018, 17% το 2017 και 7,2% το 2004.

Όσον αφορά τους στόχους του 2020, η Ε.Ε. ήθελε να φτάσει το 20% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Μεταξύ των 28 κρατών μελών της, 12 κράτη μέλη είχαν ήδη φτάσει σε ένα μερίδιο ίσο ή μεγαλύτερο από τους εθνικούς τους στόχους για το 2020, με την Ελλάδα να έχει φτάσει ήδη από το 2018 τον στόχο του 2020 (18%).

Από το 2020 μέχρι το 2021 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην Ε.Ε. αυξήθηκε σχεδόν κατά 5%, με την υδροηλεκτρική και αιολική ενέργεια να αντιπροσωπεύουν τα δύο τρίτα της ενέργειας αυτής. Το υπόλοιπο ένα τρίτο προερχόταν από την ηλιακή ενέργεια, στερεά βιοκαύσιμα και λοιπές ανανεώσιμες πηγές. Τα υψηλότερα ποσοστά κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές, το 2021, είχε η Αυστρία (76,2%) ,η Σουηδία (75,7%), η Δανία (62,6%) και ακολουθούν, η Πορτογαλία (58,4%) και η Κροατία (53,5%). Στην άλλη άκρη της κλίμακας βρίσκονται οι χώρες, Λουξεμβούργο (14,2%), Ουγγαρία (13,7%) και Μάλτα (9,7%). Η χώρα μας παρόλο που δεν είναι πρωτοπόρος, βρίσκεται λίγο χαμηλότερα από τον μέσο όρο της Ε.Ε., με ποσοστό κατανάλωσης από ανανεώσιμες πηγές 36%, οκτώ ποσοστιαίες μονάδες πάνω από το προηγούμενο έτος. <sup>[6]</sup>

Είναι, λοιπόν, ξεκάθαρες οι συντονισμένες προσπάθειες που γίνονται τα τελευταία χρόνια με κατεύθυνση την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για μείωση των ποσοτήτων CO<sub>2</sub> και των υπόλοιπων αερίων του θερμοκηπίου. Χρόνια πριν, ξεκίνησαν οι πρώτες ενέργειες με τη Σύμβαση – Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές μεταβολές (United Nations Framework Convention on Climate Change -UNFCCC), εν έτη 1992. Υπογράψαν, αρχικά, 15 κράτη-μέλη της Ε.Ε και φυσικά με το πέρας των ετών συμπεριλήφθηκαν και τα υπόλοιπα 27 κράτη- μέλη, 165 χώρες στο σύνολο τους. Η, μη δεσμευτική, υποχρέωση των κρατών ήταν να επιτύχουν τη σταθεροποίηση των εκπομπών αερίων του φαινομένου στα επίπεδα του 1990, μέχρι το έτος 2000.

Το 1994 ήταν ήδη παραδεκτό ότι οι αρχικές δεσμεύσεις βάση της UNFCCC δεν επρόκειτο να επαρκέσουν ώστε να αναχαιτιστεί η παγκόσμια αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στις 11 Δεκεμβρίου του 1997, λοιπόν, οι κυβερνήσεις προχώρησαν ένα βήμα παραπέρα, εγκρίνοντας το πρωτόκολλο της UNFCCC στην πόλη Κιότο της Ιαπωνίας. Το πρωτόκολλο αυτό ορίζει νομικά δεσμευτικές οριακές τιμές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τις βιομηχανικές χώρες και προβλέπει μηχανισμούς υλοποίησης του σχεδίου με βάση τη λειτουργία των δυνάμεων της αγοράς. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) διαδραμάτισε πρωτεύοντα ρόλο στην επιτυχία των διαπραγματεύσεων για τις λεπτομέρειες των μηχανισμών που διέπουν το πρωτόκολλο και την υλοποίησή τους, κάτι που δεν ισχύει για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και τη Ρωσία (χώρες που κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών CO<sub>2</sub> παγκοσμίως), οι οποίες προέβησαν στην κύρωση του. <sup>[7]</sup>



## ***Συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement)***

Στις 12 Δεκεμβρίου του 2015 τέθηκαν νέοι φιλόδοξοι στόχοι κατά της κλιματικής αλλαγής. Η συνεργασία των χωρών παγκοσμίως αποτυπώθηκε με τη Συμφωνία του Παρισιού, το οποίο περιλαμβάνει συντονισμένο σχέδιο δράσης για τον περιορισμό τη υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η συμφωνία άρχισε να ισχύει στις 4 Νοεμβρίου του 2016, όταν εκπληρώθηκε η προϋπόθεση επικύρωσης από 55 τουλάχιστον χώρες, χώρες που να αντιπροσωπεύουν τουλάχιστον το 55% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η Ε.Ε. και όλα τα κράτη μέλη της, υπέγραψαν και επικύρωσαν τη Συμφωνία και βάση της δέσμευσης αυτής, συμφώνησαν ότι θα θέσουν την Ε.Ε. στην πορεία του να γίνει η πρώτη κλιματικά ουδέτερη οικονομία και κοινωνία έως το 2050. Η Ε.Ε. υπέβαλλε την στρατηγική της και τα προσανατολισμένα σχέδια της για το κλίμα πριν από το τέλος του 2020, περιλαμβάνοντας τη δέσμευση να μειώσει τις εκπομπές της κατά 55% συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990 έως το 2030.

Η συμφωνία έχει θέσει ως στόχο τον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της γης κάτω από τους 2°C. Μακροπρόθεσμα, υπάρχει ο στόχος να φτάσει η αύξηση αυτή στον 1.5°C, θερμοκρασία που θα μετριάσει την κλιματική αλλαγή.

Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι φέτος προγραμματίζεται συνάντηση κατά την οποία θα αξιολογηθεί η πρόοδος των κρατών και θα τεθούν νέοι στόχοι. <sup>[8] [9]</sup>

## **2.2Αναγκαιότητα μεθόδου CCS (Carbon Capture and Storage)**

Είναι, πλέον, αναμφισβήτητο ότι η κλιματική αλλαγή είναι κάτι το υπαρκτό και απειλεί τόσο τις ζωές μας όσο και το οικοσύστημα. Για την μείωση των ανθρωπογενών εκπομπών CO<sub>2</sub> έχουν εξεταστεί εκτενέστερα, από τη IPCC, διάφορες επιλογές, οι οποίες περιλαμβάνουν πέρα από τον περιορισμό κατανάλωσης ενέργειας και την χρήση άλλων μορφών ενέργειας (ανανεώσιμες μορφές ενέργειας), την ανάπτυξη τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> (Carbon Capture and Storage, CCS). Η χρήση κάθε μιας από τις επιλογές αυτές βασίζεται σε αρκετούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των στόχων για την μείωση των εκπομπών, τα κόστη, τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και την κοινωνική αποδοχή.

Οι τεχνολογίες CCS έχουν αναδειχθεί ως η πιο ισχυρή τεχνική για την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη των κλιματικών στόχων. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA) οι τεχνολογίες CCS θα αφαιρέσουν το 20-30% των συνολικών εκπομπών έως το 2050. Χρειάζεται όμως δέσμευση και αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων του αερίου για να θεωρηθεί επιτυχής η εφαρμογή της. Μαζί με τα υλικοτεχνικά ζητήματα της έγχυσης μεγάλων όγκων CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος, η δέσμευσή του, απαιτεί πρόσθετη ενέργεια – οι τρέχουσες τεχνολογίες δέσμευσης μπορεί να απαιτούν έως και το 30% της αρχικής ενεργειακής παραγωγής του σταθμού ενέργειας.

Η δέσμευση του CO<sub>2</sub> και η αποθήκευση του είναι πλέον δυνατό να επιτευχθούν με επιτυχία με τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Η σημαντικότητα της μεθόδου έγκειται στο ότι θεωρείται τεχνολογία “γέφυρα” γιατί επιτρέπει την χρήση ορυκτών καυσίμων αλλά με σημαντικά μειωμένες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Χρειάζεται να τονιστεί εδώ, πως η δέσμευση του CO<sub>2</sub> γίνεται από μεγάλες και σταθερές πηγές καθώς θα ήταν οικονομικά μη βιώσιμη λύση και ταυτόχρονα πολύ δύσκολη στην υλοποίηση της. Οι πηγές αυτές μπορούν να είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διάφορες βιομηχανίες. Όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα σε συνδυασμό με CCS (BECCS) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία αρνητικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, όπου η βιομάζα προσλαμβάνει CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα και το CCS χρησιμοποιείται κατά την καύση της βιομάζας για την εκτροπή του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα. <sup>[12] [21]</sup>

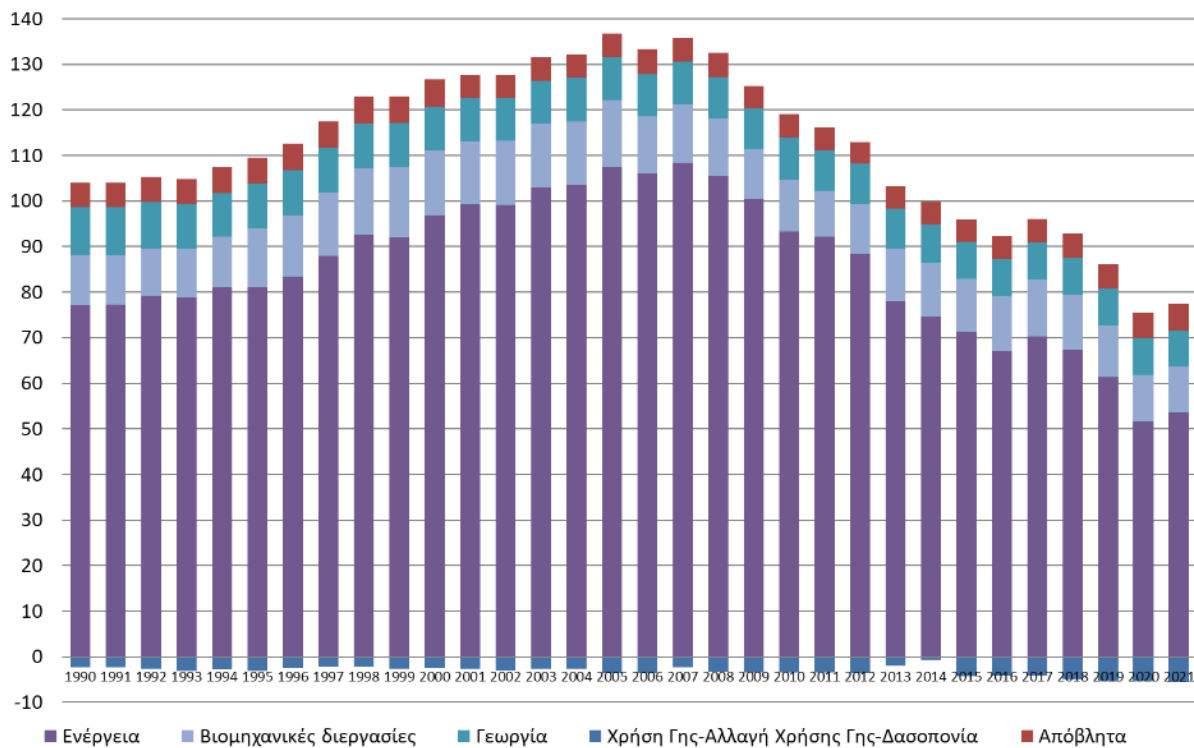
Τομείς	Βιομηχανίες
Μονάδες Παραγωγής Ενέργειας	Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί (άνθρακα, λιγνίτη, φυσικού αερίου)
Βιομηχανίες	Μεταλλευτικές, Χάρτου, Τσιμέντου, Βιομηχανίες Λιπασμάτων
Βιομηχανίες Καυσίμων	Διυλιστήρια, Πετροχημικές, Εγκαταστάσεις άντλησης Φ.Α.

**Πίνακας 2.1** Κύριες Πηγές εκπομπής CO<sub>2</sub>

([https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_chapter2-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_chapter2-1.pdf))

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 2.3) παρατίθενται οι εθνικές εκπομπές/απορροφήσεις των αερίων του θερμοκηπίου, από το 1990 έως και το 2021, σύμφωνα με την τελευταία έκθεση απογραφής που υποβλήθηκε το 2023. <sup>[11]</sup>

**Εκπομπές/απορροφήσεις αερίων του θερμοκηπίου, 1990-2021,  
σε εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>eq)**



**Εικόνα 2.3 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου 1990-2021**

(Πηγή: <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/ektheseis-kai-yfistameni-katastasi/>)

## **2.3 Δέσμευση CO<sub>2</sub>**

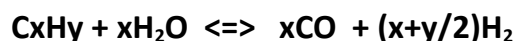
Οι διάφορες τεχνολογίες CCS, επί της ουσίας, δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα από τις πηγές που αναφέρθηκαν, πριν και μετά την καύση του. Οι ποσότητες αυτές στη συνέχεια μεταφέρονται μέσω αγωγών ή πλοίων σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς και στη συνέχεια αποθηκεύονται εκεί, αφού διασφαλιστεί η ασφαλής παραμονή του, για πολλά χρόνια. Η λογική δέσμευσης του είναι η δημιουργία ενός συμπυκνωμένου ρεύματος CO<sub>2</sub> συνεχούς ροής σε υψηλή πίεση ώστε να μπορεί να μεταφερθεί στον σχηματισμό απόρριψης/αποθήκευσης. Ανάλογα με την παραγωγική διαδικασία υπάρχουν τέσσερις προσεγγίσεις δέσμευσης του αερίου και αυτές είναι, προς το παρόν συνοπτικά, οι κάτωθι : <sup>[12]</sup> <sup>[23]</sup>

- Pre - Combustion Capture (Δέσμευση πριν την καύση)
- Post - Combustion Capture (Δέσμευση μετά την καύση)
- Oxy - Fuel Combustion (Δέσμευση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου)
- Capture from Industrial Process Steams (Δέσμευση από ροές βιομηχανικών διαδικασιών)

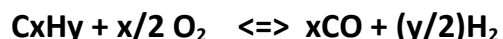
### **2.3.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ CO<sub>2</sub>**

#### **2.3.1.1 Pre -Combustion Capture (Δέσμευση πριν από την καύση)**

Στα συστήματα αυτά η καύση του καυσίμου γίνεται σε αντιδραστήρα είτε με οξυγόνο, είτε με αέρα είτε με ατμό, σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, για την παραγωγή ενός μίγματος (Synthesis gas/Fuel gas) που αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογόνο (H<sub>2</sub>) και από μικρές ποσότητες από CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων όπως το μεθάνιο. Το Synthesis gas παράγεται με δύο τρόπους, ο πρώτος είναι η αναμόρφωση αερίων και ελαφριών υδρογονανθράκων με χρήση ατμού. Η γενική (ενδόθερμη, ΔH>0) αντίδραση που πραγματοποιείται εντός του αντιδραστήρα είναι,

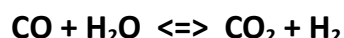


Ο δεύτερος τρόπος είναι η μερική οξείδωση αερίων και ελαφριών υδρογονανθράκων με εισαγωγή οξυγόνου αντί ατμού. Η αντίδραση που πραγματοποιείται είναι εξώθερμη ( $\Delta H < 0$ ).



Στην περίπτωση που το αρχικό καύσιμο είναι υγρό ή αέριο η διαδικασία αυτή ονομάζεται μερική οξείδωση, στην περίπτωση όμως που το αρχικό καύσιμο είναι στερεό, τότε η διεργασία ονομάζεται εξαερίωση.

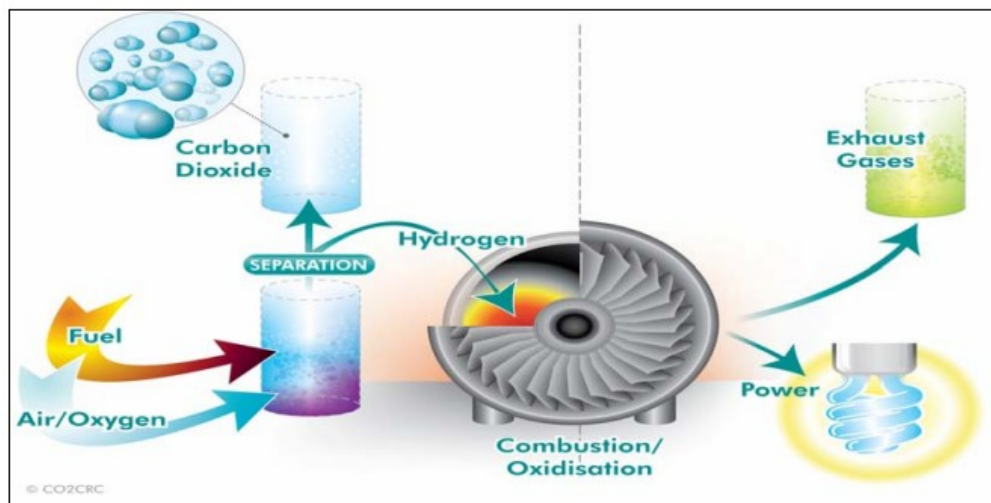
Το μονοξείδιο του άνθρακα που παράγεται αντιδρά με ατμό σε έναν καταλυτικό αντιδραστήρα (Shift Converter) προς δημιουργία  $\text{CO}_2$  και υδρογόνου.



$$\Delta H = -41 \text{ kJ mol}^{-1}$$

Το  $\text{CO}_2$  διαχωρίζεται με μια διαδικασία φυσικής ή χημικής προσρόφησης παράγοντας ένα καύσιμο πλούσιο σε υδρογόνο, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί χρήσιμο σε πολλές εφαρμογές όπως σε κινητήρες, λέβητες, κλιβάνους, κυψέλες καυσίμου. Η καινοτομία της τεχνικής αυτής είναι ακριβώς αυτή, ότι το αέριο καύσιμο πλέον είναι το υδρογόνο. Το παραγόμενο  $\text{CO}_2$  μπορεί να μεταφερθεί προς αποθήκευση. Η διαδικασία είναι επί της αρχής η ίδια και για τον άνθρακα, το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται, απλοποιημένα, η αρχή λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα, με δέσμευση  $\text{CO}_2$  προ της καύσης. <sup>[12] [15] [23]</sup>

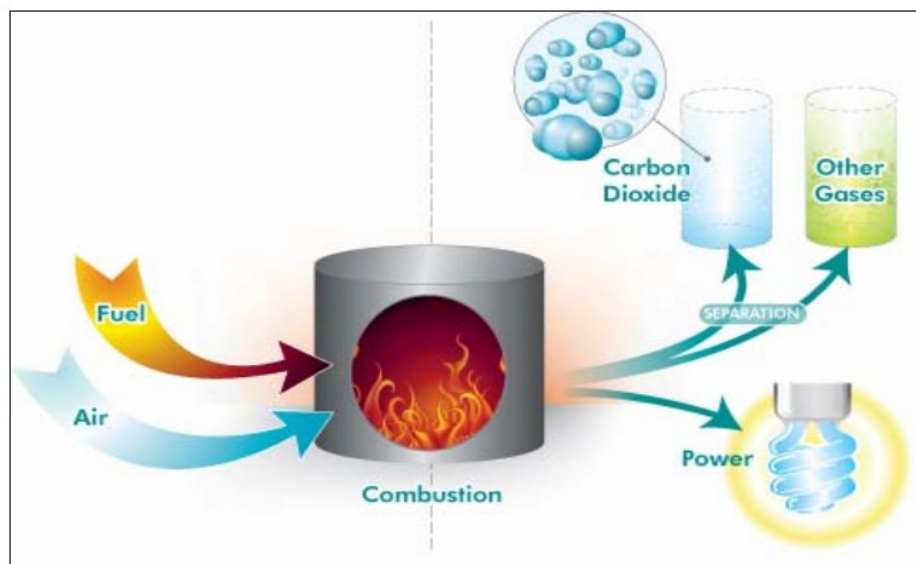


**Εικόνα 2.4** Αρχή λειτουργίας εργοστασίου με δέσμευση άνθρακα προ καύσης  
(Πηγή: <http://www.co2crc.com.au/>)

### 2.3.1.2 Post-Combustion Capture (Δέσμευση μετά από την καύση)

Τα συστήματα Post-Combustion διαχωρίζουν το CO<sub>2</sub> από τα απαέρια (Flue Gas) που δημιουργούνται μετά την καύση του πρωτογενούς καυσίμου. Τα προϊόντα της καύσης (Flue Gas/Exhaust Gas/Stack Gas) είναι τα αέρια εκείνα που απελευθερώνονται από τα εργοστάσια καύσης. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν συνήθως έναν διαλύτη, κυρίως αμίνες, για να συγκρατήσουν το μικρό κλάσμα CO<sub>2</sub> (συνήθως 3-15% κατ'όγκο) από τα απαέρια των εργοστασίων, όπου κύριο συστατικό είναι το άζωτο. Η μικρή συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια συνεπάγεται την επεξεργασία μεγάλων όγκων αερίου, κάτι το οποίο απαιτεί μεγάλο και ακριβό εξοπλισμό. Μετά την ανάμιξη, η αμίνη θερμαίνεται για να απελευθερώσει καθαρό και αφυδατωμένο ρεύμα CO<sub>2</sub> και η αμίνη επιστρέφει για να επαναχρησιμοποιηθεί. Οι διαλύτες που χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν για ένα τόσο μικρό κλάσμα CO<sub>2</sub> πρέπει να είναι ιδιαίτερα ισχυροί και η επαν-επεξεργασία τους ενεργοβόρα. Η διαδικασία διαχωρισμού του CO<sub>2</sub> με χρήση ροφητικών ουσιών/διαλυτών θα αναλυθεί εκτενέστερα στην παράγραφο 2.3.2.2. Αυτό που έχει σημασία να σημειωθεί είναι ότι, καθώς οι περισσότεροι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής καίνε απευθείας άνθρακα για να παράγουν ενέργεια, η Post-Combustion διαδικασία είναι μια πιο βιώσιμη επιλογή για τις υπάρχουσες παραγωγικές μονάδες, καθώς δεν απαιτούνται πολλές αλλαγές όσον αφορά τον σχεδιασμό. [16] [18] [23]

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα που περιγράφει τη διαδικασία δέσμευση CO<sub>2</sub> μετά την καύση.



**Εικόνα 2.5** Αρχή λειτουργίας εργοστασίου με δέσμευση άνθρακα μετά την καύσης  
(Πηγή: <http://www.co2crc.com.au/>)

### 2.3.1.3 Oxy-Fuel Combustion (Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου)

Ένας ακόμη τρόπος δέσμευσης  $\text{CO}_2$  θεωρείται η Oxy- Fuel Combustion (καύση με καθαρό οξυγόνο). Οι διεργασίες καύσης με καθαρό οξυγόνο χρησιμοποιούν οξυγόνο αντί για ατμοσφαιρικό αέρα για την καύση του καυσίμου. Αυτό παράγει καυσαέριο που αποτελείται κυρίως από υδρατμούς και  $\text{CO}_2$  (80% κατ' όγκο). Οι υδρατμοί μπορούν εύκολα να απομακρυνθούν με συμπίεση και ψύξη του καυσαερίου. Το αέριο που προκύπτει από την ψύξη απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία για την αφαίρεση των καταλοίπων καύσης και των μη επιθυμητών προσμίξεων (όπως είναι το άζωτο, άκαυστο οξυγόνο, διοξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου) με σκοπό να μείνει το καθαρό ρεύμα  $\text{CO}_2$  που προορίζεται για αποθήκευση.

Όταν ο άνθρακας καίγεται σε καθαρό οξυγόνο, η θερμοκρασία της φλόγας είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη θερμοκρασία της φλόγας όταν ο άνθρακας καίγεται σε αέρα. Η μέγιστη θερμοκρασία μπορεί να φτάσει τους  $2500^\circ\text{C}$  σε σύγκριση με τους  $1700^\circ\text{C}$  που θα έφτανε στην περίπτωση του ατμού. Σήμερα δεν υπάρχουν υλικά κατασκευής λεβήτων και καυστήρων που να μπορούν να αντέξουν τόσο μεγάλες θερμοκρασίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι το τελικά καθαρό οξυγόνο που χρησιμοποιείται για την καύση, διαχωρίζεται στην αρχή με τη διαδικασία ASU (Air Separation Unit), από τον ατμό, απομακρύνοντας πιθανά υπολείμματα αζώτου, για τη δημιουργία του καθαρού οξυγόνου που χρησιμοποιείται στην διαδικασία καύσης.

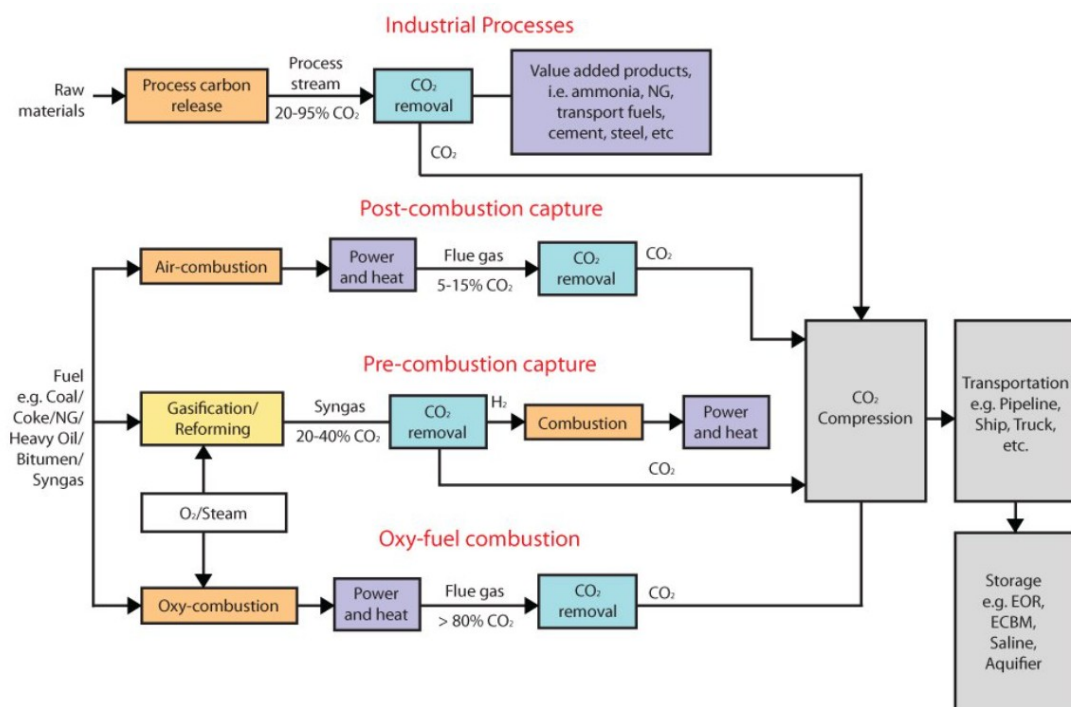
Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από αυτήν την εφαρμογή είναι ότι η τελική συγκέντρωση  $\text{CO}_2$  των καυσαερίων είναι μεγαλύτερη του 90%, οπότε χρειάζεται μόνο απλή διύλιση  $\text{CO}_2$ . Βασικό μειονέκτημα είναι ότι η παραγωγή οξυγόνου είναι ακριβή, τόσο σε όρους κόστους όσο και σε όρους κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο είναι δυνατή η ανακύκλωση του οξυγόνου μετά τη διαδικασία του διαχωρισμού από τα καυσαέρια, αυτό μειώνει το κόστος διαχωρισμού του οξυγόνου και βελτιώνει την απόδοση της διαδικασίας.

Η καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου είναι ήδη εφαρμοστέα στην βιομηχανία σιδήρου, χάλυβα και γυαλιού. Η εφαρμογή του σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας με γαιάνθρακα είναι σε πειραματικό στάδιο, χωρίς εμπορική εφαρμογή, όπως έγινε και με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα πλην του άνθρακα φυσικά. [12] [17] [23]

### 2.3.1.4 Κρυογενικός Διαχωρισμός (Capture from Industrial Process Steams)

Το CO<sub>2</sub> μπορεί να διαχωριστεί από άλλα αέρια με επαναλαμβανόμενα βήματα ψύξης και συμπίεσης (συμπύκνωσης) με ατμό. Ο κρυογενικός διαχωρισμός (cryogenics) χρησιμοποιείται εμπορικά για το διαχωρισμό αερίων με υψηλή συγκέντρωση CO<sub>2</sub> > 90% αλλά όχι για μείγματα με μικρότερη συγκέντρωση. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του κρυογενικού διαχωρισμού CO<sub>2</sub> είναι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παροχή της απαραίτητης ψύξης για την διαδικασία. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι κάποια συστατικά όπως το νερό πρέπει να απομακρυνθούν πριν το αέριο μείγμα ψυχθεί για την αποφυγή εμπλοκών στα μηχανήματα. Ο κρυογενικός διαχωρισμός έχει το πλεονέκτημα ότι παράγει απευθείας υγροποιημένο CO<sub>2</sub>, κάτι που είναι απαραίτητο για κάποιες μορφές μεταφοράς του (π.χ. με φορτηγά (βυτιοφόρα) ή πλοία). Ο κρυογενικός διαχωρισμός μπορεί να εφαρμοστεί σε αέρια υψηλής συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> και πίεσης (ή καυσαέρια) όπως στην περίπτωση της προ της καύσεως δέσμευση και σε εγκαταστάσεις με καύση σε συνθήκες καθαρού Οξυγόνου. [12] [23]

Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται ένα συνοπτικό διάγραμμα των τεσσάρων διαδικασιών δέσμευσης CO<sub>2</sub> που μια παραγωγική μονάδα μπορεί να αξιοποιεί.



**Εικόνα 2.6**  
**Συνοπτικό**  
**διάγραμμα**  
**Τεχνικών**  
**Δέσμευσης CO<sub>2</sub>.**  
(Πηγή: <https://stellaenergy.com/en/energy-solutions/ccs/carbon-capture/>)



### **2.3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ CO<sub>2</sub>**

Για τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται από κάθε μονάδα (Post or Pre Combustion, Oxy Fuel). Διακρίνονται σε τρεις βασικές τεχνολογίες που αφορούν :

- Διαχωρισμός με χρήση μεμβρανών
- Διαχωρισμός με χρήση ροφητικών ουσιών/διαλυτών
- Διαχωρισμός με χρήση κρυογονικής απόσταξης (Cryogenic Distillation)

#### **2.3.2.1 Διαχωρισμός με χρήση Μεμβρανών**

Με τον όρο μεμβράνη εννοούμε ένα υλικό σε λεπτό στρώμα ή στοιβάδα που παρεμβάλλεται ανάμεσα σε μίγματα ή διαλύματα και η οποία είναι διαπερατή από τα συστατικά τους. Κάθε συστατικό έχει διαφορετική ικανότητα διέλευσης μέσω της μεμβράνης, όπου με την επιβολή κατάλληλης κινητήριας δύναμης (π.χ. πίεσης) μπορούμε να επιτύχουμε την μετακίνηση του υλικού.

Η μέθοδος διαχωρισμού του CO<sub>2</sub> με τη χρήση μεμβρανών, έχει τη σημαντική ευκαιρία να αποτελέσει τη λύση χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για την δέσμευση του αερίου. Ήδη από το 1989 οι μεμβράνες στον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> είχαν προσελκύσει το ενδιαφέρον, με καμία όμως σιγουριά ως προς την αξιοπιστία τους και την οικονομική τους βιωσιμότητα σε πραγματικές συνθήκες δέσμευσης. Η χαμηλή συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> και η χαμηλή πίεση του αερίου τροφοδοσίας, σε συνδυασμό με τις τεράστιες ροές καυσαερίου σε μια παραγωγική μονάδα, αποτελούν τις δυσκολίες όσον αφορά την εφαρμογή μεθόδων διαχωρισμού ευρύτερα. Η τεράστια ογκομετρική ροή, λοιπόν, ενός ρεύματος καυσαερίων σε έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας σημαίνει, στην περίπτωση αυτή, ότι απαιτούνται εγκαταστάσεις με πολύ μεγάλες επιφάνειες μεμβρανών. Η παραγωγή ωστόσο τέτοιων μεμβρανών δεν αποτελεί το κύριο πρόβλημα που εμποδίζει την υιοθέτηση των συστημάτων αυτών. Τα πιο δύσκολα προβλήματα που χρειάζεται να ξεπεραστούν είναι η κλίμακα της διεργασίας και ο πολύ μεγάλος, ακριβός και ενεργοβόρος εξοπλισμός συμπίεσης που απαιτείται. Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως η δημιουργία της απαιτούμενης πίεσης που χρειάζεται να ασκηθεί κατά μήκος της μεμβράνης αποτελεί βασικό ζήτημα.

Μέχρι σήμερα οι περισσότεροι σχεδιαστές διεργασιών με μεμβράνες για τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> μετά την καύση έχουν προτείνει τη χρήση ενός μόνο σταδίου μεμβράνης για την εκτέλεση του διαχωρισμού. Για διαχωρισμούς ενός σταδίου απαιτείται συμπίεση του καυσαερίου με πίεση μεγαλύτερη των 10bar ή χρήση αντλιών κενού στο διαπερατό για την επίτευξη πιέσεων μικρότερων των 0,1bar ή κάποιος συνδυασμός συμπίεσης και κενού. Ο εξοπλισμός συμπίεσης που απαιτείται για τέτοια σχέδια χρησιμοποιεί την πλειονότητα της ενέργειας που παράγει ο σταθμός παραγωγής ενέργειας. Οι έρευνες μας δείχνουν ότι ένας λόγος πίεσης (πίεση τροφοδοσίας διαιρούμενη με την πίεση του διαπερατού) της τάξης του 5, έως ίσως το μέγιστο 10, είναι το μόνο που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτή την εφαρμογή.

Τα υλικά κατασκευής μπορεί να είναι πολυμερή, μεταλλικά ή κεραμικά υλικά. <sup>[18] [23]</sup>

### **2.3.2.2 Διαχωρισμός με χρήση ροφητικών ουσιών/διαλυτών**

Η μέθοδος της φυσικής και χημικής απορρόφησης με τη χρήση διαλυτών εμφανίζεται ως η πλησιέστερη προσέγγιση που μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα για τη δέσμευση του CO<sub>2</sub>. Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1930 έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμοι διαλύτες, ωστόσο οι βιομηχανικές διεργασίες, όπως η παραγωγή τσιμέντου, η κατασκευή σιδήρου και χάλυβα καθώς και οι μονάδες παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, απαιτούν νέες συνθέσεις διαλυτών οι οποίοι να μπορούν να αντιμετωπίσουν τους περιορισμούς που προκύπτουν. Οι περιορισμοί αυτοί, που δυσκολεύουν την ανάπτυξη των διαλυτών, είναι ο μεγάλος όγκος καυσαερίου, η χαμηλή συγκέντρωση CO<sub>2</sub> αλλά και η παρουσία ιχνοστοιχείων, όπως NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub> αλλά και οι ενεργειακές ανάγκες.

Κατά τη διαδικασία της απορρόφησης το ρεύμα καυσαερίου έρχεται σε επαφή με τον διαλύτη σε στήλη απορρόφησης και το CO<sub>2</sub> απορροφάται από τον διαλύτη. Ο διαλύτης, πλούσιος σε CO<sub>2</sub>, αναγεννάται για να επαναχρησιμοποιηθεί. Οι χημικοί διαλύτες συνήθως αναγεννιούνται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ όσον αφορά τους φυσικούς διαλύτες αρκεί να μειωθεί η πίεση. Συνήθως η αναγέννηση γίνεται σε αποστακτική στήλη (stripper). Χρησιμοποιείται, λοιπόν, κάποιο θερμό ρεύμα (ατμός) όταν γίνεται χρήση αποστακτικής στήλης. Το αέριο CO<sub>2</sub> που παράγεται μετά την έξοδο από την αποστακτική στήλη στέλνεται προς συμπίεση.

Όσον αφορά την διαδικασία φυσικής απορρόφησης συνίσταται ιδιαίτερα για τον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> στην Pre-combustion διεργασία. Αυτό συμβαίνει γιατί στην δέσμευση πριν την καύση υπάρχει υψηλή μερική πίεση αερίου (>7bar) και χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (<60 °C). Οι φυσικοί διαλύτες δεσμεύουν επιλεκτικά το CO<sub>2</sub> χωρίς να επέλθει οποιαδήποτε χημική αντίδραση. Στον πίνακα 2.2 παρατίθενται οι επτά διεργασίες οι οποίες χρησιμοποιούν εμπορικά διαθέσιμους φυσικούς διαλύτες. Αξίζει να σημειωθεί ότι βασικό πλεονέκτημα της φυσικής απορρόφησης είναι το χαμηλό ενεργειακό κόστος για την αναγέννηση του διαλύτη αλλά και το υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης και καθαρότητας του τελικού CO<sub>2</sub>.

Όσον αφορά την διαδικασία της χημικής απορρόφησης χρησιμοποιούνται πολλοί τύποι ροφητικών ουσιών και η δέσμευση βασίζεται στη χημική αντίδραση του διαλύτη με το CO<sub>2</sub>. Λαμβάνει χώρα στην Post-Combustion τεχνολογία καθώς χρειάζεται υψηλές πιέσεις αερίου (>150m<sup>3</sup>) και χαμηλή μερική πίεση (<7bar). Οι συνηθέστεροι χημικοί διαλύτες φαίνεται να είναι οι αμίνες που χρησιμοποιούνται κυρίως ως υδάτινα διαλύματα. Πέραν των συμβατικών διαλυτών με βάση τις αμίνες, MEA, DGA, DEA, DIPA, TEA, MDEA, προτείνονται και διαλύτες χωρίς την ύπαρξη αμινών όπως για παράδειγμα το ανθρακικό νάτριο (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), ιοντικοί διαλύτες (άλας με σημείο πήξεως <100°C), αλλά και μείγματα διαλυτών (ενίσχυση συμπεριφοράς διαλύτη και χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για την αναγέννηση του διαλύτη). Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει θεωρηθεί ότι η χρήση διφασικών διαλυτών αλλά και διαλυτών χωρίς παρουσία νερού, η νέα γενιά διαλυτών που προαναφέρθηκε, μειώνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις στο στάδιο της αναγέννησης και του όγκου του διαλύτη που αναγεννάτε. <sup>[19] [23]</sup>

### **2.3.2.3 Κρυογονική Απόσταξη**

Η διαδικασία της κρυογονικής απόσταξης αποτελεί μια διεργασία υγροποίησης και καθαρισμού του CO<sub>2</sub>. Χρησιμοποιείται για ροές υψηλής συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> (<90%) και υψηλή πίεση. Οι χαμηλές θερμοκρασίες είναι προαπαιτούμενο στη διεργασία αυτή, προκειμένου το CO<sub>2</sub> να υγροποιηθεί και ταυτόχρονα τα υπόλοιπα συστατικά του καυσαερίου να παραμείνουν στην αέρια μορφή τους. Ενδεικτικό σημείου λειτουργίας θεωρούνται οι -56,6°C και τα 5.18bar. Συνίσταται η εφαρμογή του σε Pre-Combustion φάση ή στην Oxy-Fuel -Combustion όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση CO<sub>2</sub> και υψηλές πιέσεις αερίου. Πλεονέκτημα της κρυογονικής απόσταξης είναι η παραγωγή υγρού CO<sub>2</sub>, το οποίο είναι εύκολο στη μεταφορά. Μειονέκτημα της διαδικασίας είναι η μεγάλη απαίτηση ενέργειας για τη συμπύκνωση και την αεριοποίηση του CO<sub>2</sub>. <sup>[23]</sup>

Διεργασίες Φυσικής Απορρόφησης	Διαλύτης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Selexol	Διμεθυλαιθέρας Πολυαιθυλενογλυκόλη	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μη διαβρωτικός διαλύτης</li> <li>Ο απορροφητής εξαγει ξηρό αέρα</li> </ul>	Πιο αποτελεσματική σε υψηλή πίεση
Rectisol	μεθανόλη	Ο διαλύτης δεν αφρίζει	Υψηλό κόστος ψύξης
Ifpexol	μεθανόλη	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μη διαβρωτικός διαλύτης</li> <li>Υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα.</li> </ul>	Υψηλό κόστος κεφαλαίου
Fluor	Ανθρακικό προπυλένιο (C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub> )/ Jeffsol PC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μη διαβρωτικός διαλύτης</li> <li>Απλή λειτουργία διεργασίας</li> <li>Υψηλή διαλυτότητα CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υψηλοί ρυθμοί κυκλοφορίας διαλυτών</li> <li>Ακριβά διαλυτικά</li> </ul>
Purisol	N-μεθυλοπυρρολιδόνη	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ο διαλύτης δεν αφρίζει</li> <li>Υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα.</li> <li>Μη διαβρωτικός διαλύτης</li> <li>Χαμηλή πτητικότητα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υψηλό κόστος συμπίεσης</li> <li>Πιο αποτελεσματική σε υψηλή πίεση</li> </ul>
Sulinal	DIPA,MDEA,SULFOLANE	Χαμηλός ρυθμός κυκλοφορίας διαλύτη	<ul style="list-style-type: none"> <li>Διαβρωτικός διαλύτης</li> <li>Ζητήματα αφρισμού</li> </ul>
Morphysorb	<ul style="list-style-type: none"> <li>N-φορμυλο μορφολίνη(NFM)</li> <li>N-ακετυλο μορφολίνη(NAM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλή απαίτηση ενέργειας</li> <li>Μη διαβρωτικός διαλύτης</li> <li>Χαμηλό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας</li> </ul>	Αποτελεί καινούργια διεργασία

**Πίνακας 2.2** Οι διαλύτες και τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών φυσικής απορρόφησης.

(Πηγή: <https://www.intechopen.com/chapters/57510>)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **Μεταφορά και Αποθήκευση CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος**

#### **3.1 Μεταφορά Δεσμευμένου CO<sub>2</sub>**

Μετά την δέσμευση, το διοξείδιο του άνθρακα, για να ολοκληρωθεί η CCS, χρειάζεται να μεταφερθεί σε πεδίο κατάλληλο προς αποθήκευση. Είναι το στάδιο εκείνο που συνδέει την πηγή με τον γεωλογικό σχηματισμό τελικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>. Η συμπίεση και η αφυδάτωση του αερίου καθιστούν πιο εύκολη και αποτελεσματική την μεταφορά του και μετέπειτα την αποθήκευση του. Η αφυδάτωση είναι απαραίτητη για την μη διάβρωση του εξοπλισμού και των υποδομών κάτω από μεγάλη πίεση, ενώ η συμπίεση πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την αφυδάτωση. Κατά την συμπίεση το CO<sub>2</sub> παίρνει τη μορφή πυκνού ρευστού, καταλαμβάνοντας έτσι λιγότερο χώρο σε σύγκριση με την αέρια μορφή του. Μείωση του όγκου του αερίου προσφέρει και η αύξηση πίεσης που μπορεί να υποβληθεί σε αυτό, καθώς σε ατμοσφαιρικές συνθήκες ο όγκος θα ήταν σημαντικά πιο μεγάλος. Κατάλληλα για την μεταφορά του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> θεωρούνται τα πλοία και οι αγωγοί για μεγάλες αποστάσεις καθώς και φορτηγά ή σιδηροδρομικά για μεταφορά σε πιο κοντινούς χώρους αποθήκευσης. <sup>[12] [23]</sup>

### 3.1.1 Μεταφορά μέσω αγωγών (transport through pipelines)

Στις περιπτώσεις όπου το ρεύμα CO<sub>2</sub> πρέπει να καλύψει μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιούνται είτε χερσαίοι (Onshore) είτε υπεράκτιοι (Offshore) αγωγοί, οι οποίοι προσφέρουν τη δυνατότητα μεταφοράς συνεχούς ροής μεγάλων ποσοτήτων. Οι αποστάσεις που καλύπτονται είναι χιλιάδων χιλιομέτρων, μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε παρακάμπτοντας φυσικά εμπόδια, βουνά και υδάτινα περάσματα. Φυσικά η μέθοδος μεταφοράς μέσω αγωγών δεν είναι καινούργια, χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την μεταφορά, όχι μόνο του CO<sub>2</sub> αλλά και του φυσικού αερίου, του πετρελαίου και του νερού. Όλοι οι υπάρχοντες αγωγοί CO<sub>2</sub> λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις υπό υπερκρίσιμες συνθήκες για το CO<sub>2</sub> (10-80MPa και 26,85°C-126,85°C) κάτω από τις οποίες αυτό συμπεριφέρεται σαν αέριο αλλά έχει την πυκνότητα υγρού. Το ρεύμα υγροποιημένου ρευστού που δημιουργείται πρέπει να είναι ξηρό καθώς η ξήρανση του CO<sub>2</sub> αποτρέπει την διάβρωση των χαλύβδινων αγωγών που χρησιμοποιούνται στη μεταφορά. Τα ίχνη σουφλιδίων και H<sub>2</sub>S (υδρόθειο) που μπορεί να υπάρχουν στο ρεύμα, διαβρώνουν επίσης τους αγωγούς και ιδανικά πρέπει να απομακρύνονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι η σχετική υγρασία δεν πρέπει να υπερβαίνει το 60% και φυσικά το ίδιο ισχύει για τις ποσότητες NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> και N<sub>2</sub> (Rogers & Mayhew 1980). Η μεταφορά του υγροποιημένου CO<sub>2</sub> διαμέσου πυκνοκατοικημένων περιοχών χρειάζεται στενή παρακολούθηση και ακριβή σχεδιασμό για την αποφυγή φυσικά ανεπιθύμητων διαρροών. Η ποσότητα ρεύματος που μπορεί να διαχειριστεί ένας αγωγός εξαρτάται από τη διάμετρο του αγωγού, την πίεση κατά μήκους αυτού και από το πάχος των τοιχωμάτων του. [12] [23] [26]



**Εικόνα 3.1** Δημιουργία δικτύου σωληνώσεων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG).

(Πηγή: <https://energymag.gr/news/energeia/fysiko-aerio/to-2024-se-leitourgia-o-agogos-fysikou-aeriou-dytikis-makedonias/>)

### 3.1.2 Μεταφορά μέσω πλοίων - Θαλάσσια Μεταφορά (marine traffic)

Η μεταφορά υγροποιημένων αερίων μέσω πλοίων είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται σε μεγαλύτερη κλίμακα τις τελευταίες δεκαετίες σε σύγκριση με το παρελθόν. Αποτελεί μια εναλλακτική λύση για πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο που δεν έχουν κοντινή πρόσβαση σε χώρο αποθήκευσης. Τα πλοία που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά υγροποιημένου αερίου πετρελαίου (LPG, κυρίως μίγμα προπανίου και βουτανίου) και υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) είναι κατάλληλα και για την μεταφορά του υγροποιημένου άνθρακα. Το πρώτο LNG πλοίο στην Ελλάδα κατασκευάστηκε το 2005, συνεχίζοντας την ίδια χρονιά με τη ναυπήγηση τεσσάρων επιπλέον. Μέχρι το 2021, ο παγκόσμιος στόλος δεξαμενόπλοιων υγροποιημένου φυσικού αερίου περιελάμβανε συνολικά 700 πλοία ενώ μέχρι τα τέλη του 2022 η Ευρώπη διέθετε 30 πλοία μεταφοράς του αερίου.

[12] [23]



**Εικόνα 3.2** Δεξαμενόπλοια όπως αυτό, που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά υγροποιημένου αερίου πετρελαίου (LPG), μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη μεταφορά CO<sub>2</sub>.

(Πηγή: <https://www.oedigital.com/news/500390-ag-p-converts-lng-carrier-into-fsu-for-lng-import-terminal-in-the-philippines>)

### **3.2 Αποθήκευση CO<sub>2</sub> εντός Γεωλογικών Σχηματισμών**

Για να αποτελέσει η δέσμευση και αποθήκευση CO<sub>2</sub> λύση ενάντια στην κλιματική αλλαγή, η αποθήκευση επιβάλλεται να γίνει για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια, να έχει μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χαμηλό κόστος και να συμμορφώνεται με τους διεθνείς κανονισμούς και νομοθεσίες. Η διαδικασία εύρεσης της τελικής θέσης αποθήκευσης του ρεύματος CO<sub>2</sub> είναι αρκετά σύνθετη και λεπτομερής.

#### ***Έγχυση CO<sub>2</sub>***

Μετά την έλευση του CO<sub>2</sub> στον κατάλληλο ταμιευτήρα, εγχέεται μέσα σε αυτόν με κύριο στόχο την μακροχρόνια αποθήκευση του. Ολόκληρο το σύστημα έγχυσης περιλαμβάνει επιφανειακές εγκαταστάσεις στο σημείο έγχυσης, π.χ. εγκαταστάσεις αποθήκευσης, τυχόν εγκαταστάσεις διανομής, συλλέκτη στο τέλος του αγωγού μεταφοράς, αγωγούς διανομής σε πηγάδια/γεωτρήσεις, πρόσθετες εγκαταστάσεις συμπίεσης, συστήματα μέτρησης και ελέγχου. Ο αριθμός πηγαδιών διαφέρει ανά περίπτωση και εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του αερίου που δύναται να αποθηκευτεί, από τον ρυθμό έγχυσης, το πάχος του ταμιευτήρα, τη διαπερατότητα του εδάφους αλλά και από τον τύπο της γεώτρησης που λαμβάνει χώρα. Μια τυπική τεχνική περιγράφεται από τους Wright και Majek (1998). Στην κεφαλή του πηγαδιού τοποθετούνται μετρητές οι οποίοι μετρούν τη θερμοκρασία, την πίεση και την παροχή του εγχόμενου ρευστού. Οι κεφαλές αυτές, περιέχουν επίσης χαρακτηριστικά ασφαλείας, για την αποφυγή διαρροών ή εκρήξεων των εισαγόμενων ρευστών.

Η σύσταση του ρεύματος CO<sub>2</sub>, που είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας δέσμευσης, παρουσιάζει συνεχώς μικρές διακυμάνσεις και αναλύεται με τη χρήση αερίου χρωματογράφου. Η παρουσία μικρών ποσοτήτων άλλων ουσιών, π.χ. νερού, υδρόθειου (H<sub>2</sub>S), οξειδίων του θείου και του αζώτου (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), αζώτου και οξυγόνου θα επηρεάσει τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του CO<sub>2</sub> και την επακόλουθη συμπεριφορά του. Οι χημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσα στον σχηματισμό αποθήκευσης κατά την έγχυση ποσότητας CO<sub>2</sub> μπορούν να επηρεάσουν τον ρυθμό έγχυσης. Ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος του ταμιευτήρα, τη σύσταση του ρευστού και τις συνθήκες του ταμιευτήρα (θερμοκρασία, πίεση, όγκος) είναι πιθανό να εμφανιστούν κοντά στη γεώτρηση διαδικασίες διαλυτοποίησης ορυκτών και απόθεσης νέων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένους ή μειωμένους ρυθμούς έγχυσης.



Μόλις γίνει η έγχυση του  $\text{CO}_2$ , ένα μέρος του διαλύεται στο αλμυρό νερό του ταμιευτήρα και μειώνεται ελαφρά το PH, ρυθμιζόμενο από τη διαλυτοποίηση ανθρακικών ορυκτών που υπάρχουν στο φιλοξενών πέτρωμα.

Τα ανθρακικά είναι τα πρώτα ορυκτά που διαλύονται γιατί έχουν υψηλό ρυθμό αντίδρασης και η διαλυτοποίηση ξεκινά μόλις ξεκινήσει η έγχυση. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αυξήσει το πόρωδες του πετρώματος στον σχηματισμό και την εγχυτότητα του  $\text{CO}_2$ . Ωστόσο μετά τη διαλυτοποίηση τα ανθρακικά ορυκτά ίσως επανατοποθετηθούν και προκαλέσουν συγκόλληση του σχηματισμού γύρω από την γεώτρηση. Πέραν, όμως, της διαλυτοποίησης, η ξήρανση είναι ένα ακόμα φαινόμενο που δύναται να προκληθεί εξαιτίας την έγχυσης. Μετά τη φάση της οξίνισης (μείωση του PH εξαιτίας της απορρόφησης του  $\text{CO}_2$ ), το νερό που έχει παραμείνει γύρω από την γεώτρηση διαλύεται στο εγχέόμενο ξερό αέριο, το οποίο με τη σειρά του συγκεντρώνει χημικά είδη στην άλμη. Ορυκτά, όπως τα άλατα, μπορούν να αποτεθούν όταν η άλμη είναι αρκετά συμπυκνωμένη, μειώνοντας έτσι τη διαπερατότητα γύρω από τη γεώτρηση. Η διαλυτοποίηση και η ξήρανση, λοιπόν, δημιουργούν θέματα εγχυτότητας τοπικά γύρω από την γεώτρηση και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τον χρόνο και την απόσταση από την γεώτρηση. Για την αξιολόγηση αυτών των φαινομένων χρησιμοποιούνται αριθμητικές προσομοιώσεις (CFD packages).

Όσον αφορά την πίεση έγχυσης, πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την πίεση του ταμιευτήρα ώστε να προκληθεί μετακίνηση του ρευστού μακριά από το σημείο που πραγματοποιείται η έγχυση. Υψηλοί ρυθμοί έγχυσης σημαίνουν και αυξημένες πιέσεις στο σημείο της έγχυσης, οι οποίες δεν πρέπει να υπερβαίνουν την πίεση θραύσης του πετρώματος στο σημείο αυτό, καθώς μπορεί να προκληθεί ζημία στον ταμιευτήρα ή στο υπερκείμενο στεγανό πέτρωμα. Για να υπολογιστεί με ακρίβεια η μέγιστη πίεση έγχυσης και να αποφευχθεί η διάρρηξη του σχηματισμού χρησιμοποιούνται γεωχημική ανάλυση και μοντέλα. <sup>[14] [21] [24]</sup>

### 3.2.1 Μηχανισμοί Αποθήκευσης

Η αποτελεσματικότητα της γεωλογικής αποθήκευσης έγκειται στον συνδυασμό φυσικών και γεωχημικών μηχανισμών παγίδευσης. Όταν εγχέεται, λοιπόν, το  $\text{CO}_2$  γεμίζει τα κενά των πόρων του πετρώματος, τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ήδη γεμάτα με αλμυρό νερό. Ιδανικές τοποθεσίες θεωρούνται εκείνες στις οποίες το  $\text{CO}_2$  παραμένει ακίνητο επειδή είναι μόνιμα αποθηκευμένο κάτω από μη διαπερατό πέτρωμα μεγάλου πάχους ή μετατρέπεται σε στερεά ορυκτά ή προσροφάται στην επιφάνεια μικροπόρων ορυκτού άνθρακα ή υπόκειται σε ένα συνδυασμό φυσικών και χημικών μηχανισμών παγίδευσης. Το αέριο καθώς εγχέεται στο υπέδαφος λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθοι μηχανισμοί. <sup>[14] [23]</sup>

### **3.2.1.1 Δομική Παγίδευση**

#### **Συγκέντρωση κάτω από το πέτρωμα-κάλυμμα**

Καθώς το πυκνό CO<sub>2</sub> είναι “ελαφρύτερο” από το νερό, αρχίζει να ανεβαίνει προς τα πάνω. Η κίνηση αυτή σταματά όταν το CO<sub>2</sub> συναντά ένα στρώμα πετρώματος χαμηλής διαπερατότητας (πέτρωμα-κάλυμμα). Αυτό το πέτρωμα-κάλυμμα που είναι συνήθως άργυλος ή άλας ενεργεί σαν παγίδα, εμποδίζοντας το CO<sub>2</sub> να μετακινείται προς τα πάνω, οδηγώντας στην συσσώρευση του ακριβώς κάτω από αυτό. Μακροπρόθεσμα, σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub> διαλύονται στο νερό που υπάρχει στον σχηματισμό και στη συνέχεια μετακινούνται ταυτόχρονα με τα υπόγεια ύδατα. Όταν η απόσταση από τη βαθιά θέση έγχυσης έως το τέλος του υπερκείμενου αδιαπερατού σχηματισμού είναι εκατοντάδες χιλιόμετρα, ο απαιτούμενος χρόνος για να φτάσει το ρευστό στην επιφάνεια είναι εκατομμύρια χρόνια (Bachu et al., 1994). <sup>[14] [23]</sup>

### **3.2.1.2 Υπολειμματική Παγίδευση**

#### **Ακινητοποίηση σε μικρούς πόρους**

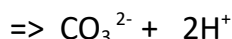
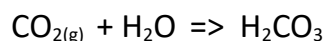
Η υπολειμματική ακινητοποίηση εμφανίζεται όταν τα κενά των πόρων στο πέτρωμα του ταμειυτήρα είναι τόσο στενά ώστε το CO<sub>2</sub>, δεν μπορεί πλέον να κινηθεί προς τα πάνω, παρά της διαφοράς πυκνότητας με το νερό του ταμειυτήρα. Αυτή η διαδικασία εμφανίζεται κυρίως κατά τη διάρκεια της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> και τυπικά μπορεί να ακινητοποιήσει ένα μικρό μέρος του πυκνού αερίου, ανάλογα με τις ιδιότητες του πετρώματος εντός του ταμειυτήρα. <sup>[14] [23]</sup>

### **3.2.1.3 Παγίδευση Διάλυσης**

#### **Διαλυτοποίηση**

Ένα μικρό ποσοστό του εγχεόμενου CO<sub>2</sub> διαλύεται ή μεταφέρεται μέσα στο διάλυμα άλμης που ήδη υπάρχει στα κενά των πόρων του ταμειυτήρα. Το νερό, στο οποίο έχει διαλυθεί το CO<sub>2</sub> είναι πιο βαρύ συγκριτικά με το καθαρό νερό και εξαιτίας αυτού τείνει να κινείται προς τα κάτω, στον πυθμένα του ταμειυτήρα. Η ποσότητα CO<sub>2</sub> που μπορεί να διαλυθεί προσδιορίζεται από μια μέγιστη συγκέντρωση και ο ρυθμός διαλυτοποίησης εξαρτάται από την επαφή μεταξύ του αερίου και της άλμης. Λόγω της συνεχούς κίνησης του CO<sub>2</sub> προς τα πάνω και της κίνησης της άλμης με το διαλυμένο CO<sub>2</sub> προς τα κάτω, υπάρχει μια συνεχής ανανέωση της επαφής μεταξύ της άλμης και του CO<sub>2</sub>, αυξάνοντας έτσι την ποσότητα που μπορεί να διαλυθεί. Η διαδικασία αυτή μπορεί να διαρκέσει αρκετά χρόνια εξαιτίας της στενότητας των πόρων του πετρώματος του σχηματισμού.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την διάλυση του CO<sub>2</sub> στα ύδατα του σχηματισμού είναι οι εξής:



Η διαλυτότητα του CO<sub>2</sub> στα ύδατα μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και η αλατότητα. Η διάλυση είναι ταχεία, όταν τα ύδατα του σχηματισμού και το CO<sub>2</sub> καταλαμβάνουν την ίδια έκταση πόρων, μόλις όμως κορεστεί με CO<sub>2</sub> το υγρό του σχηματισμού, ο ρυθμός μειώνεται και διέπεται από τους ρυθμούς διάχυσης και μεταφοράς. Η αποτελεσματική παγίδευση διαλυτότητας μειώνει τις πιθανότητες γρήγορης επιστροφής του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Βασικό πλεονέκτημά της είναι πως όταν διαλυθεί το CO<sub>2</sub>, δεν υφίσταται πλέον ως διακριτή φάση, επομένως ούτε οι δυνάμεις άνωσης δεν το ωθούν προς τα πάνω. Η αποτελεσματικότητα της παγίδευσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την αποδοτικότητα σάρωσης (αποδοτικότητα της μετατόπισης νερού ή πετρελαίου), της εισπίεσης του CO<sub>2</sub> και το σχηματισμό δακτύλων (μονοπάτια ροής αερίου).<sup>[14] [23]</sup>

#### 3.2.1.4 Ορυκτολογική Παγίδευση

##### Ορυκτοποίηση

Το CO<sub>2</sub>, ειδικά σε συνδυασμό με την άλμη στον ταμιευτήρα, μπορεί να αντιδράσει με τα ορυκτά δημιουργώντας το πέτρωμα. Ορισμένα ορυκτά μπορούν να διαλυθούν, ενώ κάποια άλλα μπορούν να αποτεθούν ανάλογα με το PH και τα ορυκτά που συνιστούν το πέτρωμα του ταμιευτήρα. Η ορυκτολογική παγίδευση, αποτελεί την πιο μόνιμη μορφή γεωλογικής αποθήκευσης, είναι όμως σχετικά αργή, αφού θεωρητικά διαρκεί χίλια ή και περισσότερα χρόνια. Παρόλα αυτά η μονιμότητα της ορυκτής αποθήκευσης, σε συνδυασμό με τη δυνητικά μεγάλη αποθήκευση ορισμένων γεωλογικών σχηματισμών, καθιστά τη δυνατότητα αυτή, επιθυμητή διαδικασία μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Το CO<sub>2</sub> που διαλύεται στο νερό, παράγει ασθενές οξύ, που αντιδρά με το βασικό πυριτικό νάτριο και κάλιο ή με τα ορυκτά ανθρακικού ή πυριτικού ασβεστίου, μαγνησίου ή σιδήρου του ταμιευτήρα, σχηματίζοντας ανθρακικά ιόντα με χημικές αντιδράσεις του τύπου :



Η αντίδραση των ορυκτών με το διαλυμένο  $\text{CO}_2$  μπορεί να είναι ταχεία (μέρες) ,στην περίπτωση κάποιων ανθρακικών ορυκτών ή αργή (εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια) στην περίπτωση των πυριτικών ορυκτών. Τα ανθρακικά ορυκτά σχηματίζονται από τη συνεχή αντίδραση των ανθρακικών ιόντων με το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το σίδηρο πυριτικών ορυκτών, όπως είναι οι άργιλοι, οι μίκες, οι χλωρίτες και οι άστριοι του πετρώματος. <sup>[14] [23]</sup>

### 3.2.2 Γεωλογικοί Σχηματισμοί Κατάλληλοι προς Αποθήκευση

Τα κριτήρια επιλογής πιθανών ταμιευτήρων για την εναπόθεση του ρεύματος αυτού είναι τα εξής:

- Επαρκές πορώδες, διαπερατότητα και αποθηκευτική ικανότητα
- Η παρουσία υπερκείμενου αδιαπερατού πετρώματος -"πέτρωμα κάλυμμα" που εμποδίζει τη μετακίνηση του  $\text{CO}_2$  προς τα πάνω. Τέτοια πετρώματα μπορεί να είναι ο άργιλος, ο αργιρόλιθος και το ορυκτό αλάτι.
- Η παρουσία ικανής δομής αποθήκευσης, έναν σχηματισμό δηλαδή πετρώματος τέτοιο που να μπορεί να ελέγξει την έκταση του  $\text{CO}_2$  μέσα στον ταμιευτήρα.
- Ικανοποιητικό βάθος αποθήκευσης (συνήθως  $>800\text{m}$ ), όπου οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλές ώστε να καθιστούν το  $\text{CO}_2$  σε μια συμπιεσμένη φάση ρευστού μεγιστοποιώντας έτσι τον συνολικό όγκο αποθήκευσης.
- Απουσία πόσιμου νερού

Η καταλληλότητα των ιζηματογενών λεκανών για αποθήκευση  $\text{CO}_2$  εξαρτάται εν μέρη και από την τοποθεσία τους στην ηπειρωτική πλάκα. Οι λεκάνες που έχουν σχηματιστεί κοντά ή μέσα στις άκρες σταθερών πλακών, θεωρούνται ιδανική επιλογή όσον αφορά την μακροχρόνια εναπόθεση  $\text{CO}_2$ , εξαιτίας της σταθερότητας της δομής τους. Παραδείγματα τέτοιων λεκανών υπάρχουν σε όλες τις ηπείρους, γύρω από τον Ατλαντικό, τον Αρκτικό και Ινδικό Ωκεανό. Οι λεκάνες που βρίσκονται κάτω από βουνά που έχουν σχηματιστεί από την σύγκρουση τεκτονικών πλακών έχουν πολλές δυνατότητες αποθήκευσης.

Στις Αμερικανικές Ηπείρους, τέτοιες λεκάνες υπάρχουν στις Άνδεις, στα Απαλάχια και στα Βραχχώδη Όρη, ενώ στην Ευρώπη οι λεκάνες βρίσκονται βόρεια των Άλπεων και των Καρπάθιων Ορών, δυτικά των Ουράλιων Ορών και στην Ασία νότια από τα Όρη Ζάγκρος και τα Ιμαλάια.

Όταν υπάρχει έντονη τεκτονική δραστηριότητα, όπως συμβαίνει στον Ατλαντικό Ωκεανό και στη βόρεια Μεσόγειο, η αποθήκευση στις λεκάνες αυτές δεν είναι ιδιαίτερα ασφαλής, εξαιτίας της πιθανότητας διαρροής του αερίου. Κάθε λεκάνη αποθήκευσης χρειάζεται να αξιολογείται ξεχωριστά και επιλέγεται προσεκτικά. Λεκάνες που δεν ενδείκνυνται για αποθήκευση CO<sub>2</sub> είναι όσες, είναι λεπτές, δεν έχουν καλή σχέση ταμιευτήρα με πέτρωμα καλύμματος, έχουν πολλά ρήγματα, βρίσκονται μέσα σε ζώνες πτύχωσης, έχουν έντονες ασυμφωνίες, έχουν υποστεί σημαντική διαγένεση ή έχουν υπερβολική πίεση στις δεξαμενές τους.

Η αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς, αυξάνεται όσο αυξάνεται η πυκνότητά του. Η ασφάλεια αποθήκευσης είναι επίσης συνάρτηση της πυκνότητας του CO<sub>2</sub>, καθώς όσο πιο “βαρύ” θεωρείται ένα ρευστό τόσο η ανοδική κίνηση της άνωσης δεν το επηρεάζει. Συνεπώς αποτρέπεται η κίνηση προς τα πάνω. Η πυκνότητα αυξάνει σημαντικά με το βάθος όσο το CO<sub>2</sub> είναι σε αέρια φάση, αυξάνει ελαφρά έως και καθόλου όταν το CO<sub>2</sub> περνάει από την υγρή στην αέρια φάση και μπορεί να μειωθεί με περαιτέρω αύξηση του βάθους, ανάλογα με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Οι χαμηλής θερμοκρασίας ιζηματογενείς λεκάνες είναι πιο κατάλληλες για αποθήκευση CO<sub>2</sub>, επειδή το CO<sub>2</sub> είναι πιο πυκνό σε μικρότερα βάθη (700m-1000m) σε σύγκριση με τις λεκάνες υψηλής θερμοκρασίας, πληρώνοντας τις σωστές συνθήκες πυκνότητας σε μεγαλύτερα βάθη (1000m-1500m). Το βάθος του σχηματισμού επηρεάζει την επιλογή της τελικής τοποθεσίας αποθήκευσης και φυσικά αυξάνει το τεχνικό κόστος κατασκευής της διαδικασίας.

Σε μεγάλο βαθμό, επίσης, λαμβάνονται υπόψη και το πάχος του σχηματισμού και η ύπαρξη πόρων (για τη χωρητικότητα της αποθήκευσης) και η διαπερατότητα (για την εισπνευσιμότητα). Οι πόροι με το βάθος μειώνονται, εξαιτίας της συμπίκνωσης και της συγκόλλησης, γεγονός που μειώνει την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης. Οι σχηματισμοί πρέπει να καλύπτονται από αδιαπερατά στρώματα (στρώματα αργιλικού σχιστόλιθου, άλατος ή ανυδριτών), ώστε να διασφαλίζεται ότι το CO<sub>2</sub> δεν θα διαφύγει εντός άλλων πετρωμάτων ή προς την επιφάνεια.

Αρκετά δύσκολη θεωρείται η έγχυση και τελικά η αποθήκευση σε σχηματισμούς όπου υπάρχει υψηλή πίεση λόγω συμπίκνωσης ή/και παραγωγής υδρογονανθράκων, καθώς τίθενται σημαντικά ζητήματα ασφαλείας και τεχνολογίας. Οι σχηματισμοί με χαμηλή πίεση σε λεκάνες στα μέσα των πλακών ή κοντά στις άκρες ή πίσω από όρη που έχουν σχηματιστεί από σύγκρουση πλακών κρίνονται ιδανικά σημεία για αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Η πιθανή παρουσία ορυκτών καυσίμων, επίσης, ορυκτών καυσίμων σε έναν γεωλογικό σχηματισμό και οι δυνατότητες εξερεύνησης αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την τελική επιλογή του χώρου αποθήκευσης. Λεκάνες οι οποίες δεν έχουν εξερευνηθεί ως προς την παρουσία υδρογονανθράκων αποτελούν αβέβαιους στόχους ως προς την αποθήκευση, εξαιτίας των περιορισμένων διαθέσιμων γεωλογικών πληροφοριών. <sup>[12] [23]</sup>

Υπάρχουν τρία είδη γεωλογικών σχηματισμών που είναι διαδεδομένα και έχουν τη δυνατότητα να δεσμεύουν και να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub>. Αυτοί είναι ,

- Αλατούχοι υδροφορείς (Saline Aquifers)
- Ενεργοί και εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου (Existing and Depleted Oil and Gas Fields)
- Ανεκμετάλλευτες φλέβες άνθρακα (Deep Unminable Coal -Seams)

### **3.2.2.1 Αλατούχοι Υδροφορείς**

Οι αλατούχοι υδροφόροι αποτελούν ένα είδος ταμιευτήρα που εμφανίζονται πολύ συχνά στο υπέδαφος. Αντιστοιχούν σε πετρώματα που αποτελούνται από το ορυκτό αλίτη (NaCl) ή γενικά ορυκτό αλάτι και έχουν σχηματιστεί ως αποτέλεσμα εξάτμισης αλμυρών νερών κυρίως μέσα σε (ημι)περιορισμένες λεκάνες. Το πάχος των σχηματισμών αυτών κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως εκατοντάδες μέτρα. Παρά το γεγονός ότι οι αλατούχοι υδροφορείς περιέχουν μεγάλες ποσότητες νερού, αυτό δεν θεωρείται πόσιμο. Το ογκομετρικό δυναμικό αποθήκευσης των υδροφορέων αυτών, είναι πραγματικά τεράστιο (Holloway 1997, Gunter et al. 1998), καθώς το αλάτι χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλή διαπερατότητα και θεωρείται διαπερατό για τις περισσότερες ουσίες. Διασφαλίζεται με αυτόν τον τρόπο η πολύ καλή συγκράτηση και απομόνωση των αποθηκευμένων ρευστών. Πολυάριθμες ερευνητικές εργασίες (Ennis-King and Paterson, 2003, 2005- Hesse et al., 2008- MacMinin et al., 2011) και η μελέτη της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC,2005) σχετικά με τη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα, περιγράφουν μια σειρά από στάδια κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας γεωλογικής δέσμευσης του CO<sub>2</sub>. Αρχικά, το CO<sub>2</sub> που διοχετεύεται σε βαθιά αλατούχα υδροφόρα στρώματα είτε παγιδεύεται μέσα σε δομικές παγίδες είτε μπορεί να ακινητοποιηθεί από τριχοειδείς δυνάμεις μέσα στους πόρους (MacMinin et al., 2011- Hesse et al ., 2008 - Woods and Farcas, 2009). Σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα, ωστόσο, έχει προταθεί ότι το CO<sub>2</sub> διαλύεται στο νερό σχηματίζοντας ένα σχετικά πυκνό υδατικό διάλυμα (3.2.1.3. Παγίδευση Διάλυσης) το οποίο στη συνέχεια κατεβαίνει προς τα κάτω διαμέσου του υδροφορέα (Ennis-King and Paterson, 2003, 2005). Στη συνέχεια, μπορεί να προκύψει καταβύθιση ορυκτών που οδηγεί σε γεωλογική δέσμευση. Παγκοσμίως, υπολογίζεται, ότι οι ποσότητες που δύναται να αποθηκευτούν στους αλατούχους σχηματισμούς αντιστοιχούν στο 20-500% του συνολικού εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub> έως το 2050 (Davidson et al 2001).

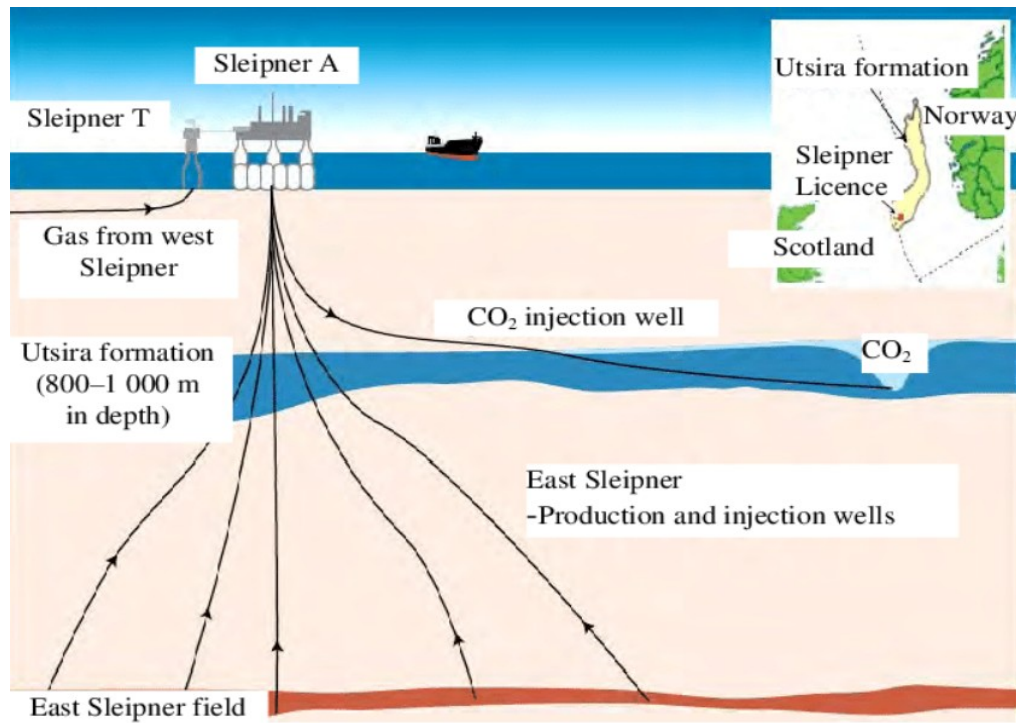
Έχει υπολογιστεί, ότι οι βαθείς αλατούχοι σχηματισμοί στις Η.Π.Α θα μπορούσαν να αποθηκεύσουν έως 500δισ tn CO<sub>2</sub>, ενώ ο σχηματισμός Bunter Sandstone<sup>[28]</sup> στη νότια Βόρεια Θάλασσα του Ηνωμένου Βασιλείου έχει αποθηκευτικό δυναμικό 7,8Gt CO<sub>2</sub>. Η συγκράτηση του CO<sub>2</sub> εντός του σχηματισμού έγκειται κυρίως στην ύπαρξη ενός αδιαπερατού πετρώματος (cap rock), όπως έχει ήδη αναφερθεί, τόσο για τους υδροφορείς όσο και για τους εξαντλημένους ταμιευτήρες. Κι αυτό επειδή το CO<sub>2</sub> μετακινείται εντός του σχηματισμού πολύ εύκολα κι έχει τάσεις άνωσης. Οπότε, ένα πέτρωμα-κάλυμμα είναι απαραίτητο για τη διατήρηση του CO<sub>2</sub> εντός του σχηματισμού. Το πέτρωμα αυτό πρέπει να μην έχει ρηγματωθεί ή/και να μην έχει διαρραγεί τουλάχιστον σε τέτοιο βαθμό που να μπορεί το CO<sub>2</sub> να διαφύγει. <sup>[12] [13] [23] [25]</sup>

### ***Sleipner Project***

Μια περίπτωση αποθήκευσης CO<sub>2</sub> σε αλατούχο σχηματισμό αποτελεί αυτή του ταμιευτήρα φυσικού αερίου Sleipner Vest, στη Βόρεια Θάλασσα. Είναι το πρώτο έργο CCS βιομηχανικής κλίμακας, μετρώντας μέχρι σήμερα 27 χρόνια λειτουργίας. Το έργο αυτό προέκυψε, έπειτα από συζητήσεις, με σκοπό την μείωση του ποσοστού CO<sub>2</sub> (9%) στο κοίτασμα φυσικού αερίου. Το υψηλό ποσοστό CO<sub>2</sub> στο κοίτασμα δεν πληρούσε τις εμπορικές και περιβαλλοντικές προδιαγραφές (επιβολή φόρου από την Νορβηγική νομοθεσία), με αποτέλεσμα η Statoil και οι εταίροι να αποφασίσουν να δεσμεύσουν και να εγχύσουν το CO<sub>2</sub> στον αλατούχο, εξαιρετικά πορώδες, σχηματισμό Utsira. Το έργο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), παρά την έλλειψη παρόμοιων εμπειριών, για την Οδηγία της Ε.Ε. σχετικά με τη γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> (εγκρίθηκε το 2009 από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο) και θεωρείται το μακροβιότερο παράδειγμα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> σε αλμυρό σχηματισμό. Κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους λειτουργίας του (1996), υπήρξαν προκλήσεις σχετικά με την ικανότητα έγχυσης, η οποία προκλήθηκε από την εισροή άμμου. Οι προκλήσεις αυτές αντιμετωπίστηκαν έναν χρόνο αργότερα, με την εκ νέου διάτρηση και εγκατάσταση ενός πακέτου χαλίκιων. Έκτοτε η έγχυση είναι σταθερή, με ετήσιο ρυθμό έγχυσης 0,9Mt κατά τα πρώτα έτη και ελαφρά λιγότερο κατά τα επόμενα, εξαιτίας της μειωμένης ροής αερίου από το Sleipner Vest.

Η διαδικασία δέσμευσης CO<sub>2</sub> από το ρεύμα φυσικού αερίου υψηλής πίεσης, που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο έργο, είναι βασισμένη στη χρήση αμινών. Το ρεύμα φυσικού αερίου εισέρχεται από τον πάτο και εξέρχεται από την κορυφή των συνδεδεμένων πύργων (Sleipner T- Sleipner A). Το διάλυμα αμινών (MDEA και νερό) έχει αντίστροφη ροή και όταν εξέρχεται από τους πύργους, έχει απορροφήσει την κύρια ποσότητα CO<sub>2</sub>.

Ο διαχωρισμός του CO<sub>2</sub> από το διάλυμα αμινών πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό που βρίσκεται σε μια από τις μονάδες Sleipner T. Η αμίνη διανέμεται εκ νέου για την περαιτέρω αφαίρεση του CO<sub>2</sub> από το φυσικό αέριο. Μια άλλη μονάδα του Sleipner T χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του φυσικού αερίου, το οποίο, έπειτα, είτε εξαγάγεται, είτε επανεισάγεται στην ανατολική πλευρά της μονάδας του έργου προκειμένου να βελτιωθεί η γενική παραγωγή φυσικού αερίου. [23] [29] [31]



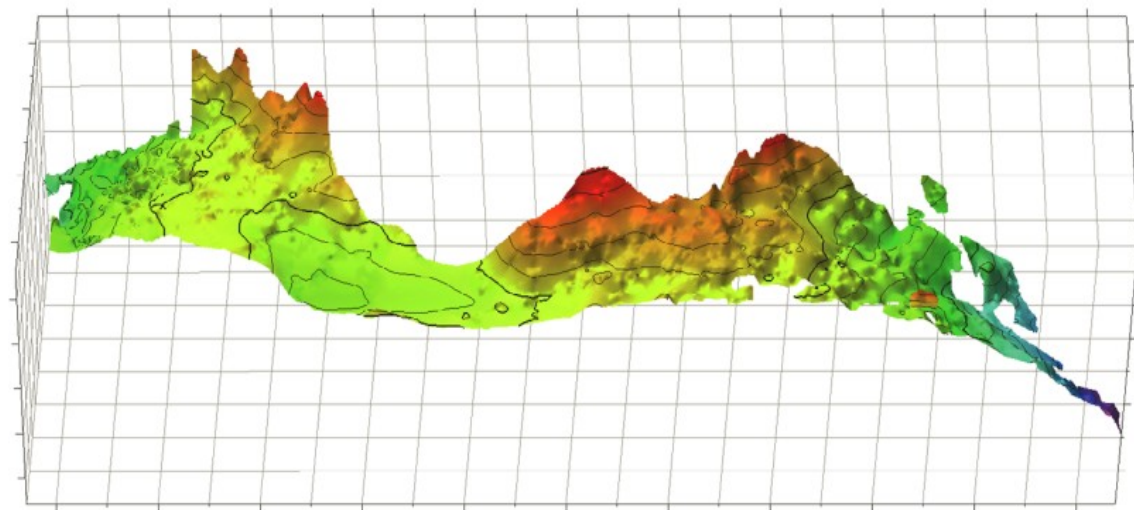
**Εικόνα 3.3** Διάγραμμα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> στον σχηματισμό Utsira στον ταμειυτήρα παραγωγής φυσικού αερίου Sleipner. (Πηγή: <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>)



### **Χαρακτηριστικά Utsira**

Ο ψαμμίτης Utsira είναι ένας εκτεταμένος (25.000 km<sup>2</sup>) και εξαιρετικά πορώδης σχηματισμός (35%-42,5%), γεμάτος με αλμυρό νερό. Βρίσκεται στη Βόρεια Θάλασσα, 800-1000m κάτω από την επιφάνεια του νερού, με τοπικό πάχος περίπου 200m. Η αποθηκευτική ικανότητα του σχηματισμού μελετήθηκε τόσο σε στατικό όσο και στην περίπτωση έγχυσης έως και 210 πηγαδιών έγχυσης κατανεμημένα σε όλο το μήκος της περιοχής.

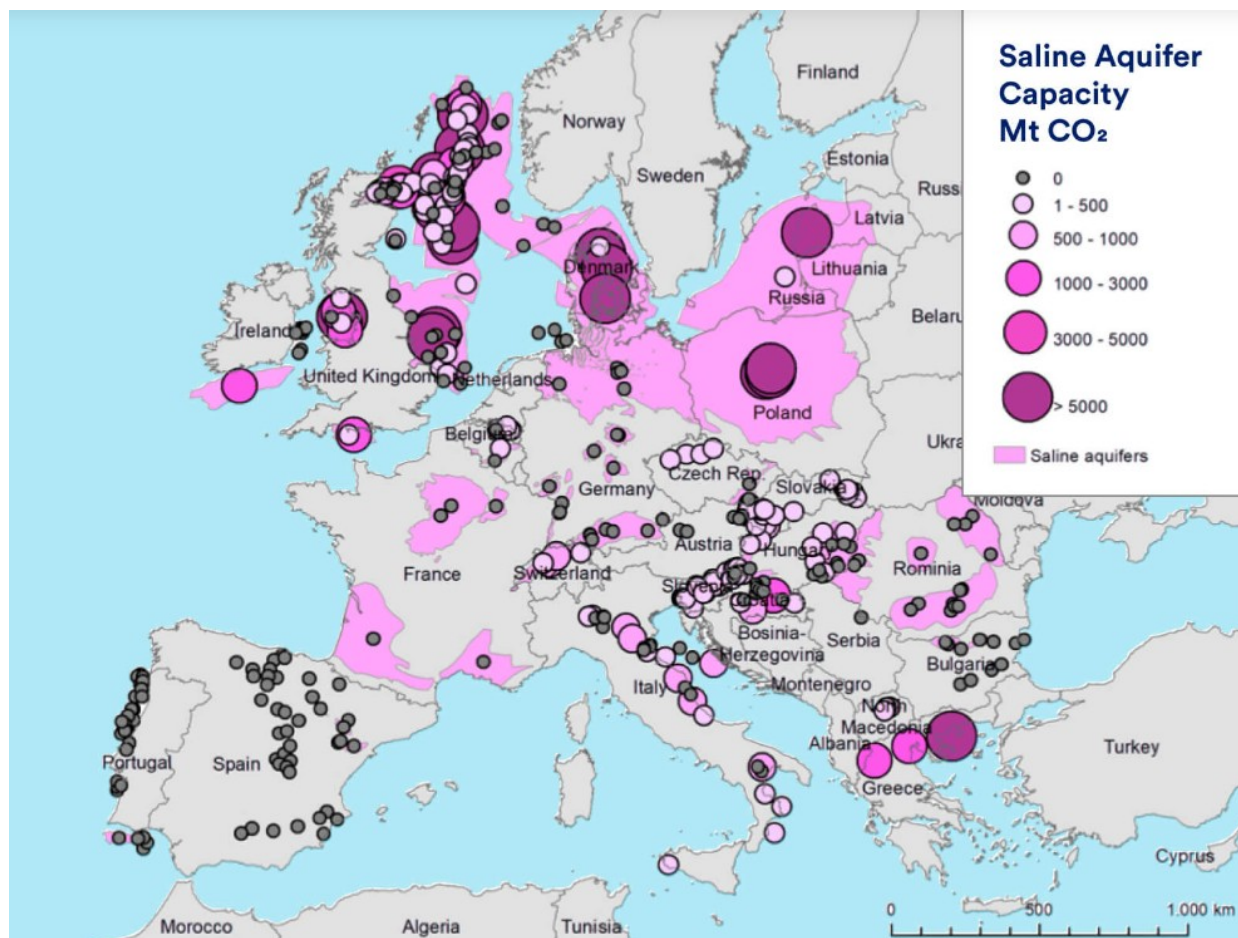
Από έργα παρακολούθησης της έγχυσης CO<sub>2</sub> στο Sleipner, διαπιστώθηκε, ότι το 7% του όγκου των πόρων αντιστοιχεί σε 40Gt, ενώ η βέλτιστη πλήρωση εξαρτάται από τον αριθμό των γεωτρήσεων. Η ανάλυση της τοπογραφίας του σχηματισμού δείχνει μεγάλη διακύμανση βάθους (Εικόνα 3.4) και στο κεντρικό δυτικό τμήμα να είναι τόσο ρηχό, που το αποθηκευμένο CO<sub>2</sub> μπορεί να μην είναι παρόν μόνο στην πυκνή του φάση. Συνήθως θεωρείται ότι το CO<sub>2</sub> δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε βάθη άνω των 700m.



**Εικόνα 3.4** Ο σχηματισμός Utsira. Το βάθος της κορυφής ποικίλλει από τις κορυφές στα κεντρικά δυτικά τμήματα των 500m έως τη βαθιά βόρεια πλαγιά που καταλήγει σε βάθος 1500m.

(Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610209006924>)

Η μικροσκοπική ανάλυση στον πυρήνα του σχηματισμού δείχνει ότι αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από μεσαίους και περιστασιακά χονδρόκοκκους κόκκους, γεγονός που εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματική στεγανοποίηση, με απίθανη τη τριχοειδή διαρροή. Γενικά πειράματα και μελέτες έδειξαν, ότι η άμμος εντός του σχηματισμού Utsira παρουσίασε μόνο περιορισμένη αντίδραση με το CO<sub>2</sub>. Οι περισσότερες αντιδράσεις συνέβησαν με ανθρακικές φάσεις, οι οποίες αποτελούσαν μόλις το 3% του συνολικού στέρεου υλικού. Τα πυριτικά υλικά παρουσίασαν μικρή αντίδραση. Συνολικά, η ορυκτολογική παγίδευση του CO<sub>2</sub> στον σχηματισμό δεν πραγματοποιείται έντονα. Αυτό δεν σημαίνει βέβαια, ότι η παγίδευση ορυκτών σε άλλους ταμιευτήρες δεν θα συμβεί σε σημαντικό βαθμό.<sup>[30]</sup>



**Εικόνα 3.5** Αλατούχοι Υδροφορείς στον χώρο της Ευρώπης και δυνατότητες αποθήκευσής τους.  
(Πηγή: <https://www.catf.us/2021/12/carbon-dioxide-storage-europe>)

### 3.2.2.2 Κοιτάσματα Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου

#### 3.2.2.2.1 Ενεργά και εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου

Μετά από τουλάχιστον έναν αιώνα εντατικής εκμετάλλευσης χιλιάδων κοιτασμάτων φυσικού αερίου και πετρελαίου, φτάνουν στο τέλος της παραγωγής τους και ορισμένα από αυτά αποτελούν τους πρώτους και βασικούς στόχους όσον αφορά την αποθήκευση του CO<sub>2</sub>. Οι παγκόσμιες δυνατότητες αυτών των ταμιευτήρων σε 1000 δις tηCO<sub>2</sub>. Αν και 10 φορές μικρότερη από τη χωρητικότητα των αλατούχων υδροφορέων, τα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου συγκρατούν το ένα τρίτο των παγκόσμιων εκπομπών για έναν αιώνα. Το γεγονός ότι, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο βρίσκονται ήδη μέσα σε στρωματογραφικές ή δομικές παγίδες, και το φυσικό αέριο ή πετρέλαιο που συσσωρεύτηκε στις παγίδες αυτές, δεν διέφυγε για πολλά χρόνια (σε μερικές περιπτώσεις εκατομμύρια χρόνια), αποτελεί έναν από τους λόγους για τους οποίους οι εξαντλημένοι ταμιευτήρες είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος για τη διαδικασία της αποθήκευσης. Επίσης η γεωλογική δομή και οι φυσικές ιδιότητες των περισσότερων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν ήδη μελετηθεί ως προς τα χαρακτηριστικά τους, γεγονός που κάνει τη μελέτη προγραμμάτων για διαθέσιμα στοιχεία λιγότερο χρονοβόρα και κοστοβόρα. Τα μοντέλα που έχουν σχεδιαστεί στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, προβλέπουν τη συμπεριφορά μετακίνησης και αποθήκευσης των υδρογονανθράκων. Πέραν της συμπεριφοράς του εδάφους, που έχει ήδη μελετηθεί αλλά και τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα στην αγορά, οι υποδομές και τα πηγάδια έγχυσης μπορούν και αυτά να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες της CCS διαδικασίας. Τα κοιτάσματα φυσικού αερίου και πετρελαίου δεν επηρεάζονται αρνητικά από την ύπαρξη υδρογονανθράκων αφού περιέχουν μεγάλες ποσότητες από αυτούς, και αν βρίσκονται ακόμα σε στάδιο παραγωγής, το πρόγραμμα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> μπορεί να βελτιστοποιηθεί ώστε να βελτιωθεί η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου. Το σφράγισμα των εγκαταλελειμμένων γεωτρήσεων έγινε πριν πολλές δεκαετίες, όταν το γέμισμα γινόταν με ένα υγρό πλούσιο σε λάσπη. Κανείς δεν προέβλεψε ότι χρειαζόταν να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά, ώστε να μπορούν να περιορίσουν ένα αντιδραστικό υγρό όπως είναι το CO<sub>2</sub>, που υπόκειται δυναμικά σε δυνάμεις άνωσης. Επομένως χρειάζεται επανεξέταση των γεωτρήσεων στο πέτρωμα καλύμματος (Winter and Bergman, 1993). Σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολος ακόμα και ο εντοπισμός των γεωτρήσεων και ίσως είναι απαραίτητο να επαναληφθεί η ακεραιότητα του πετρώματος καλύμματος με παρακολούθηση της πίεσης και χρήσης ιχνηθετών. Η χωρητικότητα ενός ταμιευτήρα μπορεί να περιοριστεί από την ανάγκη να αποφευχθεί η αύξηση της πίεσης που θα έβλαπτε το πέτρωμα καλύμματος. Οι ταμιευτήρες χρειάζεται να έχουν περιορισμένη ευαισθησία στη μείωση της διαπερατότητας, που προκαλείται από το σφράγισμα της περιοχής κοντά στην περιοχή έγχυσης και τις διακυμάνσεις των τάσεων (Kovscek, 2002- BossieCodreanu et al., 2003).

Η αποθήκευση σε μικρά βάθη (<800m) είναι τεχνικά και οικονομικά ασύμφορη, ταυτόχρονα η χαμηλή αποθηκευτική ικανότητα των ρηχών ταμιευτήρων μπορεί να είναι προβληματική. <sup>[13] [23] [33]</sup>

### **Πρώτες Δοκιμές Αποθήκευσης**

Το κοίτασμα φυσικού αερίου K12B, που λειτουργεί στην Ολλανδική Βόρεια Θάλασσα από την ProNed από το 1987, έχει πλέον εξαντληθεί. Κατά τη διαδικασία εκμετάλλευσης του φυσικού αερίου το CO<sub>2</sub> του άνθρακα που παραγόταν εκλυόταν στην ατμόσφαιρα. Η GDF-Suez, μητρική εταιρία της ProNed, στα πλαίσια του έργου ORC -Offshore Re-injection of CO<sub>2</sub>, εγκατέστησε πιλοτικό σύστημα για την επαναφορά των τελευταίων τόνων CO<sub>2</sub> που είχαν εκλυθεί από το πεδίο του φυσικού αερίου.

Το K12B θεωρείται μια τοπική περιβαλλοντική δράση αλλά και μια ευκαιρία να δοκιμαστούν οι δυνατότητες αποθήκευσης αυτού του ταμιευτήρα σε CO<sub>2</sub>. Οι δυνατότητες αποθήκευσης του εξαντλημένου αυτού ταμιευτήρα είναι 480.000tn CO<sub>2</sub> ετησίως.

#### **3.2.2.2 Ενισχυμένη Ανάκτηση Πετρελαίου (EOR- Enhanced Oil Recovery)**

Η τεχνολογία EOR, αποτελεί μια μέθοδο ανάκτησης/εξόρυξης πετρελαίου στο πεδίο, σε συνέχεια της πρωτογενούς και της δευτερογενούς ανάκτησης. Το πετρέλαιο (μείγμα υδρογονανθράκων και υδρογόνου) χρησιμοποιείται για την παραγωγή καυσίμων (βενζίνη, ντίζελ, μηχανές εσωτερικής καύσης) και υπάρχει σε πολλά χημικά προϊόντα, όπως τα λιπάσματα, τα φυτοφάρμακα, λιπαντικά αυτοκινήτων. Κατά την συμβατική πρωτογενή ανάκτηση πετρελαίου, το πετρέλαιο φτάνει στην επιφάνεια λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ της δεξαμενής και της ατμόσφαιρας (1atm) και τελικά ανακτάται μόνο το 5-15% του συνολικού πετρελαίου. Ένα επιπλέον 10-40% ανακτάται με δευτερογενή παραγωγή, με έγχυση αερίου (φυσικού αερίου) ή νερού, έτσι ώστε περισσότερο πετρέλαιο να μετατοπιστεί και να αναγκαστεί να ρέει μέσα από τις διατρήσεις. Στην βελτιωμένη (τριτογενή) ανάκτηση πετρελαίου (EOR), διάφορα αναμίξιμα στοιχεία, συμπεριλαμβανομένου του CO<sub>2</sub>, λειτουργούν ως προωθητικά, αυξάνοντας τη ρευστότητα του πετρελαίου, επιτρέποντας την καλύτερη και γρηγορότερη ροή του προς την επιφάνεια. Το CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιείται για την τεχνική αυτή, συνήθως προέρχεται από φυσικές δεξαμενές CO<sub>2</sub>. Η τεχνική CO<sub>2</sub>-EOR αποτελεί ένα παράδειγμα ωφέλιμων χρήσεων του CO<sub>2</sub> (Stevens, S. and J. Gale, 2000).

Στις εφαρμογές αυτές το 50-67% του εισπιασμένου CO<sub>2</sub>, επιστρέφει με το παραγόμενο πετρέλαιο και συνήθως διαχωρίζεται και επαναχρησιμοποιείται στον ταμειυτήρα για να μειωθεί το λειτουργικό κόστος. Το υπόλοιπο παγιδεύεται στον ταμειυτήρα. Αξίζει να σημειωθεί πως η τεχνική αυτή βρίσκει εφαρμογή σε κοιτάσματα πετρελαίου βαθύτερα των 600m, όπου ένα ελάχιστο ποσοστό 20 έως 30% του αρχικού πετρελαίου εξακολουθεί να βρίσκεται εντός του ταμειυτήρα αλλά και εκεί όπου η πρωτογενής και δευτερογενής μέθοδοι ανάκτησης έχουν εφαρμοστεί. Η CO<sub>2</sub>-EOR τεχνολογία δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα πεδία, τα επιτυχημένα έργα EOR απαιτούν καλά αποτελέσματα άντλησης νερού και καλή συνοχή του ταμειυτήρα. Η έγχυση εναλλασσόμενων σταδίων CO<sub>2</sub> και νερού (WAG) τείνει να βελτιώνει την ανάκτηση.

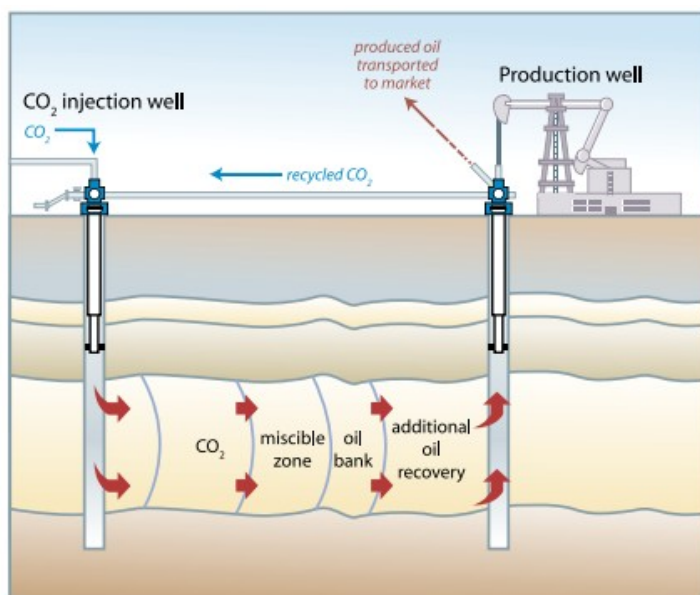
Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι προϋποθέσεις και τα κριτήρια για την επιλογή ενός ταμειυτήρα πετρελαίου στην εφαρμογή της μεθόδου CO<sub>2</sub>-EOR.

<i>No.</i>	<i>Reservoir characteristics</i>	<i>Range</i>
1	Depth (m)	≥500 and ≤4100
2	Temperature (°C)	≥28 and ≤127
3	Pressure	≥MMP
4	Porosity (%)	≥3 and ≤37
5	Permeability (mD)	≥1 and ≤4500
6	Oil gravity (°API)	≥27 and ≤45
7	Oil viscosity (cP)	≥0.4 and ≤6
8	Initial oil saturation (%)	≥26.5 and ≤89
9	Oil saturation at start of CO <sub>2</sub> -EOR (%)	≥5 and ≤50
10	Already undergoing tertiary recovery	No suitable for CO <sub>2</sub> -EOR
11	Original oil in the place(MMSTB)	≥12.5
12	Remaining oil fraction in the reservoir(%,MMSTB)	≥20, ≥5

**Πίνακας 3.1** Κριτήρια επιλογής ταμειυτήρα για την εφαρμογή της μεθόδου CO<sub>2</sub>-EOR .

(Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615301286>)

Η τριτογενής ανάκτηση πετρελαίου χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές, όπως είναι η χημική κατάλυση, η έγχυση αερίου και η θερμική ανάκτηση. Η χημική κατάλυση περιλαμβάνει την χρήση πολυμερών, αλκαλίων, μικροβίων, νανουλικών ή αφρού, ενώ όσον αφορά την έγχυση αερίων στο πεδίο, αυτή περιλαμβάνει το CO<sub>2</sub>, το αέριο άζωτο (N<sub>2</sub>) ή υδρογονανθράκων. Η θερμική ανάκτηση περιλαμβάνει την καύση (in-situ combustion) και τη χρήση ατμού (foam flooding). Η επιλογή της κατάλληλης EOR τεχνολογίας εξαρτάται από διάφορες τεχνικές και οικονομικές μεταβλητές, πυκνότητα πετρελαίου, ιξώδες και ελάχιστη πίεση ανάμιξης. Σε σύγκριση με άλλα αέρια, το CO<sub>2</sub> είναι το πιο ευνοϊκό για έγχυση λόγω της χαμηλότερης ελάχιστης αναμίξιμης πίεσης και του χαμηλότερου κόστους συμπίεσης. [23] [35]



**Εικόνα 3.6 Έγχυση CO<sub>2</sub> για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου**  
(Πηγή: <https://archive.ipcc.ch/report/srccs>)



## ***The Weyburn Project***

Το Weyburn Project αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> εντός του ταμιευτήρα πετρελαίου μετά το πέρας της διαδικασίας EOR. Ο ταμιευτήρας που φιλοξενεί το έργο βρίσκεται στην λεκάνη Williston, μια δομή η οποία εκτείνεται από το Νότιο-Κεντρικό Καναδά έως το Βόρειο-Κεντρικό τμήμα των ΗΠΑ και έκτασης 181,3Km. Η πηγή του CO<sub>2</sub> του Weyburn είναι η εγκατάσταση Dakota Gasification Company 325Km Νότια του Weyburn, στο Beulah, N.Dakota, USA.



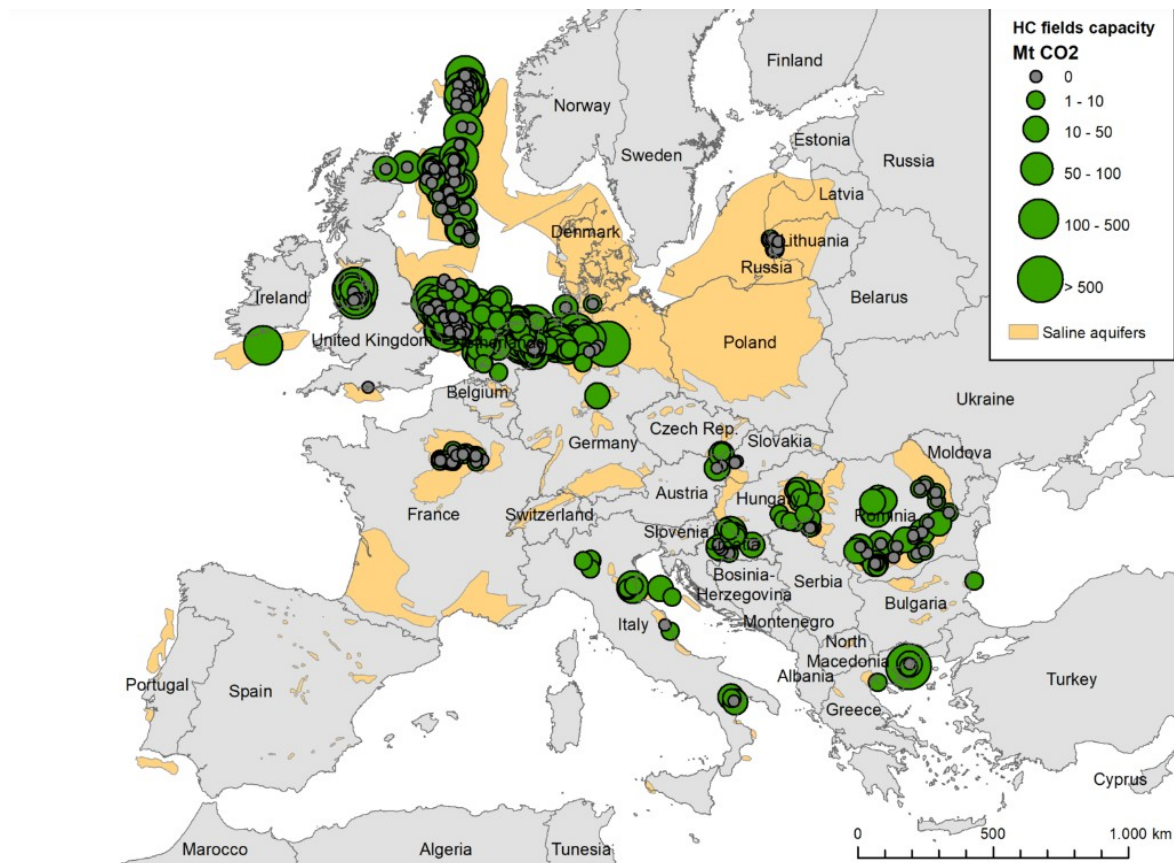
**Εικόνα 3.7** Η εγκατάσταση Weyburn, όπου ο βασικός αγωγός CO<sub>2</sub> συνδέεται με το Beulah, North Dakota.  
(Πηγή: [https://www.ieaghg.org/docs/general\\_publications/weyburn.pdf](https://www.ieaghg.org/docs/general_publications/weyburn.pdf))

Η πετρελαιοπηγή ξεκίνησε να λειτουργεί το 1954. Παρατηρώντας, όμως, με τα χρόνια πτώση στην παραγωγή, η τότε PanaCanadian Petroleum, τώρα EnCana, με σκοπό να κρατήσουν το κοίτασμα βιώσιμο ανέλαβε το 2000 το έργο εμπορικής ανάκτησης πετρελαίου. Με βάση το πρώτο φάση ερευνών το φυσικό γεωλογικό περιβάλλον του σχηματισμού φαίνεται να είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για μακροπρόθεσμη αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Πιο συγκεκριμένα, το πρωτογενές ανθρακικό κάλυμμα και τα δευτερογενή σχιστολιθικά στρώματα χρησιμεύουν ως αποτελεσματικές σφραγίδες, που αποτρέπουν την ανοδική μετακίνηση του CO<sub>2</sub>.

Επίσης υπάρχει υδραυλικός διαχωρισμός μεταξύ των υδροφορέων που βρίσκονται πάνω και κάτω από το πετρέλαιο, γεγονός που υποδηλώνει ότι το CO<sub>2</sub> δεν θα μεταναστεύσει σε γειτονικούς υδροφορείς. Το CO<sub>2</sub> δρα σαν διαλύτης προκαλώντας την ευκολότερη ροή του πετρελαίου προς τα πηγάδια συλλογής.

Η περίπτωση του Weyburn Project πέρα από ένα μεγάλης κλίμακας EOR πρόγραμμα σε έναν μερικώς εξαντλημένο ταμειυτήρα, αποτελεί το σημαντικότερο παράδειγμα χρήσης ανθρωπογενούς CO<sub>2</sub> για την τριτογενή ανάκτηση πετρελαίου. Η Dakota Gasification Company κατέχει και λειτουργεί τη μοναδική εμπορική εγκατάσταση παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου στη Βόρεια Αμερική, το Great Plains Synfuels Plant. Η εγκατάσταση αυτή χρησιμοποιεί μια διαδικασία (κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας) για την μετατροπή του λιγνιτικού άνθρακα σε συνθετικό φυσικό αέριο και σε μια σειρά άλλων παραπροϊόντων. Ένα από αυτά είναι και το CO<sub>2</sub>, το οποίο έχει καθαρότητα 96%, 0,9% H<sub>2</sub>S, 0,7% CH<sub>4</sub>, 2,3% υδρογονάνθρακες, 0,1% CO και ελάχιστες ποσότητες N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O. Το αέριο στη συνέχεια υγροποιείται, συμπιέζεται και διοχετεύεται στους 325Km που ενώνουν την μονάδα με την πετρελαιοπηγή. Το CO<sub>2</sub> δρα σαν διαλύτης, προκαλώντας την ευκολότερη ροή του πετρελαίου προς τα πηγάδια συλλογής. Καθώς το πετρέλαιο αντλείται στην επιφάνεια, το CO<sub>2</sub> που εγχέεται, συλλέγεται και αντί να αφεθεί στην ατμόσφαιρα, συμπιέζεται και επανεισάγεται υπόγεια, υπό υψηλή πίεση, σε βάθος 1,5 Km. Το CO<sub>2</sub> στους αγωγούς μεταφέρεται με πίεση 2200psi (151,6 bar/15.158 kPa), χωρίς ενδιάμεσους σταθμούς συμπίεσης. Το 2000 η έγχυση είχε αρχικό ρυθμό 2,69mil m<sup>3</sup>/d (5000tn/d), ενώ ο ρυθμός έγχυσης έως το 2002 αυξήθηκε στα 3,39mil m<sup>3</sup>/d (6300tn/d) συμπεριλαμβανομένου και των 0,71mil m<sup>3</sup>/d (1320tn/d) ανακυκλωμένου CO<sub>2</sub> από την παραγωγή πετρελαίου. Κάθε χρόνο στα πλαίσια της ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου αποθηκεύονται 2 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub> και μέχρι σήμερα η συνολική αποθήκευση CO<sub>2</sub> υπολογίζονται στους 36mil tonnes. Το έργο αναγνωρίζεται και υποστηρίζεται από την IEA (International Energy Agency) για τα αέρια του θερμοκηπίου (εξασφαλίζοντας τεχνική αριστεία) και από το Carbon Sequestration Leadership Forum. [23] [38]





**Εικόνα 3.8**

*Χάρτης κοιτασμάτων υδρογονανθράκων και οι δυνατότητες αποθήκευσης τους.*

(Πηγή: <https://www.catf.us/2021/12/carbon-dioxide-storage-europe>)

### 3.2.2.3 Ανεκμετάλλευτες Φλέβες Άνθρακα

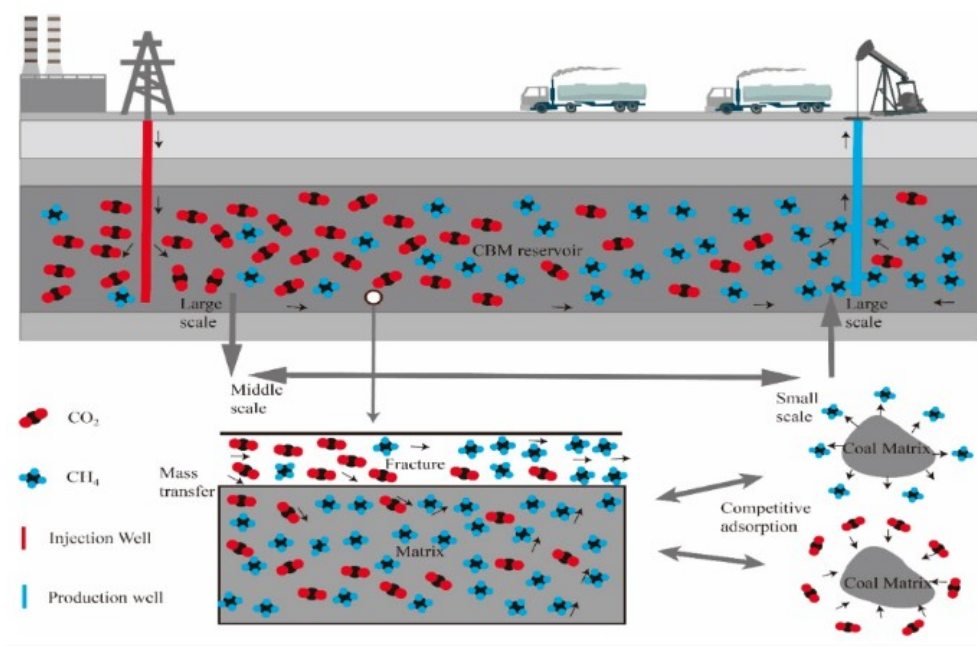
Ακόμη ένας τρόπος αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> είναι σε μη εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα άνθρακα. Δεδομένου ότι, η παραγωγή μεθανίου (CBM), μέσω εξάντλησης της πίεσης του ταμιευτήρα (πρωτογενής ανάκτηση) έχει θεωρηθεί αναποτελεσματική, προτάθηκε η ενισχυμένη ανάκτηση μεθανίου (ECBM) ως πιο αξιόπιστη μέθοδος εκρόφησης μεθανίου. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει είτε την έγχυση N<sub>2</sub>, είτε CO<sub>2</sub>. Το N<sub>2</sub> παρόλο που πραγματοποιεί την εκρόφηση του μεθανίου, μειώνοντας την μερική πίεση του, είναι λιγότερο προσροφητικό από το μεθάνιο και το CO<sub>2</sub>.

Το 1998 το πρόγραμμα της IEA Greenhouse Gas R&D (IEAGHG), αξιολόγησε το παγκόσμιο δυναμικό για μεθανιοποίηση των ανθρακικών κοιτασμάτων με CO<sub>2</sub>-ECBM και την συνεχή αποθήκευση CO<sub>2</sub> με βάση τα δεδομένα από ένα επιτυχημένο πιλοτικό έργο εκείνης της εποχής, στο San Juan, USA. Κοιτάσματα άνθρακα, τα οποία δεν είναι πολύ βαθιά ή δεν έχουν πολύ πάχος ή η δομική τους ακεραιότητα δεν είναι επαρκής για εξόρυξη, μπορούν να παγιδεύσουν αέρια μόνιμα και με ασφαλή τρόπο.

Ο άνθρακας περιέχει ρωγμές (σχισμές), που προσδίδουν διαπερατότητα στο σύστημα. Έχει πολύ μεγάλο αριθμό πόρων, με το μέγεθος τους να ποικίλει και τη δομή τους να είναι εξαιρετικά ετερογενής. Σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Καθαρής και Εφαρμοσμένης Χημείας (IUPAC, 1994), οι πόροι μπορούν να διαχωριστούν σε μικροπόρους (<2nm), μεσοπόρους (2-50nm) και μακροπόρους (>50nm). Ο προσδιορισμός του όγκου των πόρων και της κατανομής του άνθρακα παίζουν σημαντικό ρόλο για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το μεθάνιο αποδεσμεύεται και το CO<sub>2</sub> δεσμεύεται και τελικά αποθηκεύεται στα ανθρακικά στρώματα.

Μεταξύ των σχισμών εισέρχονται μόρια αερίων, τα οποία μπορούν να διαχυθούν και να προσροφηθούν σφιχτά. Η αποθήκευση σε ανθρακικές φλέβες βασίζεται στην προσροφητική ικανότητα της εσωτερικής επιφάνειας του άνθρακα. Υπό συνθήκες in-situ ο άνθρακας περιέχει συχνά αέριο (25m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tn C) προσροφημένο στην εσωτερική επιφάνεια. Το CO<sub>2</sub> λειτουργεί σαν "πλαστικοποιητής" για τον άνθρακα, μειώνοντας τη θερμοκρασία που απαιτείται για να προκαλέσει μεταβολή από μία υαλώδη, εύθραυστη δομή σε μια ελαστική, πλαστική δομή. Η θερμοκρασία μετάβασης ερμηνεύτηκε ότι πέφτει από περίπου 400°C και 3MPa στους <30°C και 5,5MPa CO<sub>2</sub> (Lansen, 2003). Η διαδικασία παγίδευσης του CO<sub>2</sub> στον άνθρακα για θερμοκρασίες και πιέσεις πάνω από το κρίσιμο σημείο, δεν είναι καλά κατανοητή. Το μεθάνιο αυτό του άνθρακα (CBM) αντικαθίσταται από το CO<sub>2</sub> που εγχέεται (10 φορές μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα από το CH<sub>4</sub>) και ανακτάται στην επιφάνεια από γεωτρήσεις. Η προσρόφηση του CO<sub>2</sub> και του μεθανίου στον άνθρακα περιγράφονται συνήθως από μια ισόθερμη τύπου Langmuir, όπου το σχήμα αυτής παρέχει πληροφορίες για τη διαδικασία προσρόφησης, το πορώδες και την επιφάνεια του άνθρακα (20-200m<sup>3</sup>/g).

Το αέριο προσροφάται στην επιφάνεια του άνθρακα σε συνδυασμό με τη φυσική παγίδευση στις σχισμές εντός του άνθρακα. Υπό την προϋπόθεση, λοιπόν, ότι ο άνθρακας δεν θα εξορυχθεί ποτέ, το CO<sub>2</sub> θα πρέπει θεωρητικά να παραμείνει μόνιμα στα ανθρακικά κοιτάσματα.



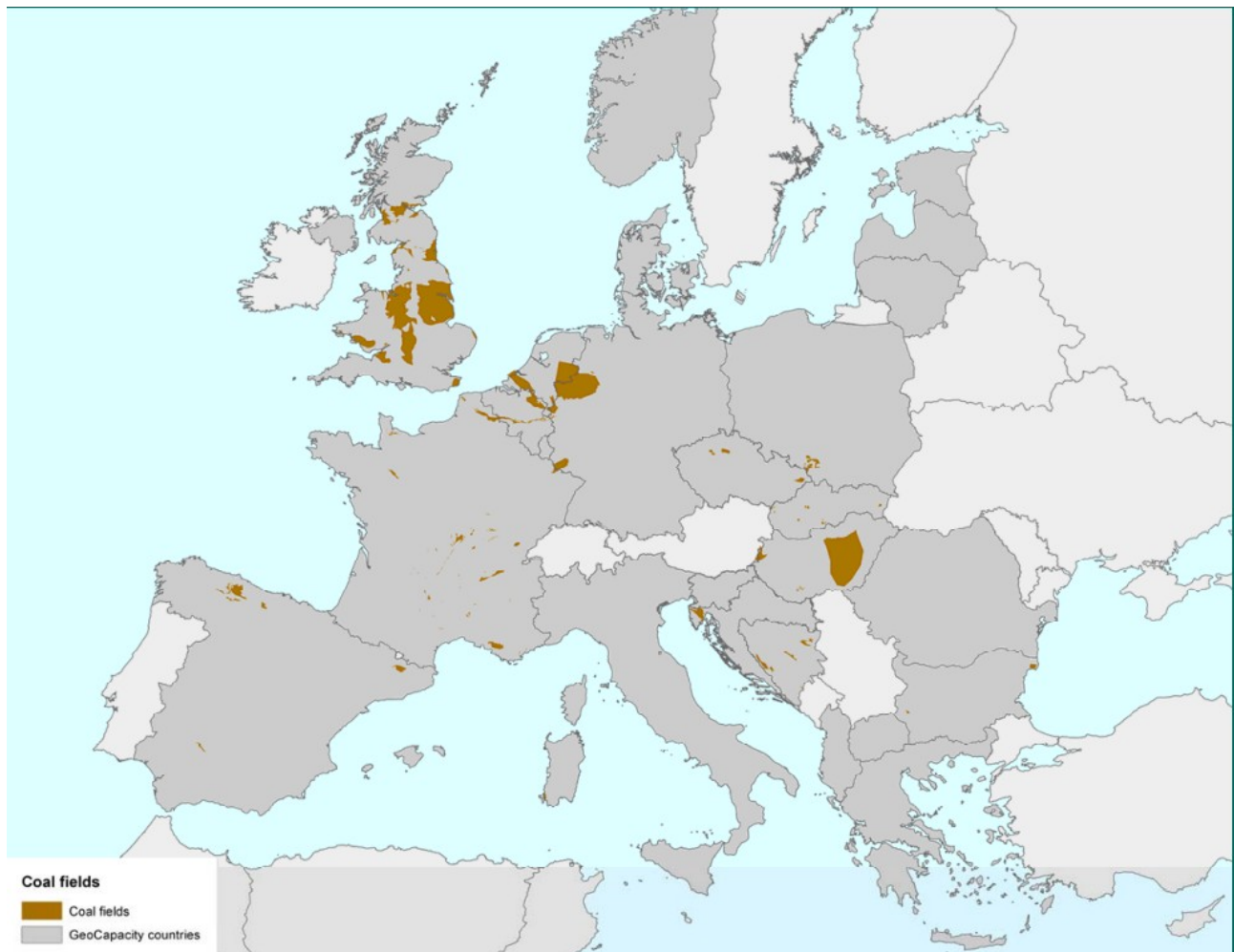
**Εικόνα 3.9** Σχηματική απεικόνιση της ενισχυμένης ανάκτησης μεθανίου (CO<sub>2</sub> - ECBM)

(Πηγή: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2996>)

Για την εφαρμογή της πρακτικής CO<sub>2</sub>-ECBM χρειάζεται να πληρούνται ορισμένα κριτήρια. Αυτά είναι τα εξής:

- Επαρκής διαπερατότητα του ανθρακικού κοιτάσματος (η διαπερατότητα του άνθρακα μειώνεται με το βάθος)
- Γεωμετρία του στρώματος άνθρακα (λίγα αλλά παχιά στρώματα, όχι πολλές και λεπτές φλέβες)
- Απλή δομή (ελάχιστα ρήγματα και πτυχώσεις)
- Ομοιογενή(είς) και συνεχή(είς) ανθρακοφόρα(ες) ραφή(ές)
- Επαρκές βάθος (μεγαλύτερο από 750m έως 1500m, μεγαλύτερα βάθη δεν έχουν ακόμη μελετηθεί)
- Κατάλληλες συνθήκες κορεσμού αερίου (υψηλός κορεσμός αερίου για ECBM)
- Δυνατότητα αφυδάτωσης του σχηματισμού (η παρουσία νερού μειώνει την προσρόφηση CO<sub>2</sub> και την ποσότητα εκρόφησης CH<sub>4</sub>)

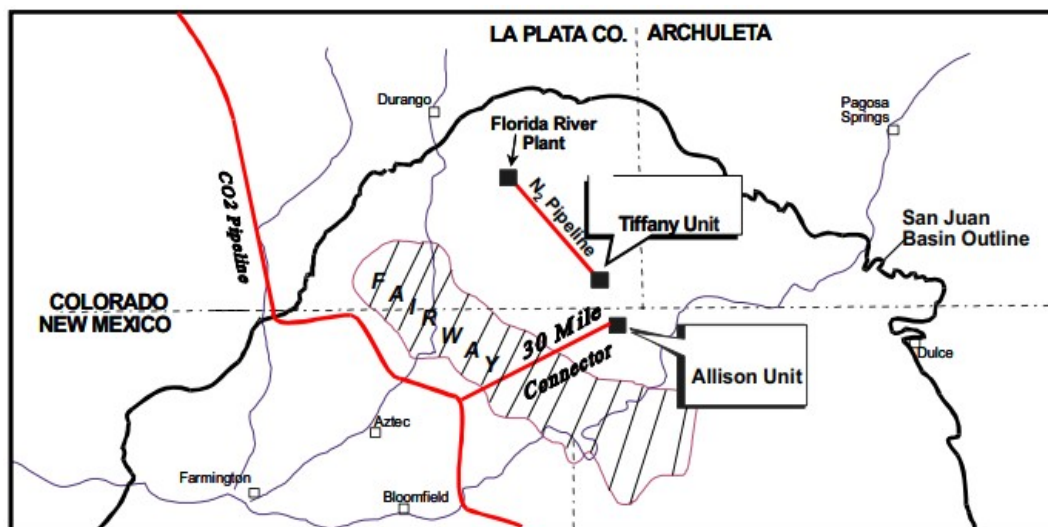
Το CO<sub>2</sub> έχει εγχυθεί με επιτυχία στο έργο Allison και στο Alberta Basin, Καναδάς (Gunter et al., 2005), σε βάθη μεγαλύτερα από εκείνα που αντιστοιχούν στο κρίσιμο σημείο του CO<sub>2</sub>. Η CO<sub>2</sub>-ECBM τεχνολογία αυξάνει την ποσότητα παραγωγής μεθανίου σε σχεδόν 90% πάνω, σε σύγκριση με την συμβατική του, πρωτογενή ανάκτηση, 20-60%, με πίεση στον ταμιευτήρα (Stevens et al., 1996). Στην Alberta η αποθηκευτική ικανότητα των βαθέων ανθρακικών κοιτασμάτων έχει εκτιμηθεί ότι είναι 20Gt (Gunter et al., 1997), ενώ ταυτόχρονα μια προηγμένη μελέτη της Advanced Resources International (ARI, 1998-Stevens, 2002), δείχνει ότι οι βαθείς άνθρακες έχουν 220Gt σε παγκόσμιο επίπεδο, με τους 90Gt να βρίσκονται στις Η.Π.Α (Reeves, 2003).<sup>[23] [37] [42] [43] [44] [45] [46]</sup>



**Εικόνα 3.10 Κοιτάσματα Άνθρακα στον χώρο της Ευρώπης**  
(Πηγή: [https://ieaghg.org/docs/Copenhagen/EU\\_Storage\\_capacity\\_KLA.pdf](https://ieaghg.org/docs/Copenhagen/EU_Storage_capacity_KLA.pdf))

### **Allison Unit CO<sub>2</sub>-ECBM Pilot Project**

Το Allison Unit αποτελεί τη μοναδική πιλοτική μονάδα πολλαπλών γεωτρήσεων πολυετούς διάρκειας ECBM στον κόσμο, μέχρι στιγμής. Τον Οκτώβρη του 2000 το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α ξεκίνησε μια πολυετή κυβερνητική-βιομηχανική συνεργασία με την ονομασία Coal-Seq. Το Coal-Seq διερεύνει τη σκοπιμότητα της δέσμευσης CO<sub>2</sub> σε βαθιά, μη εξορύξιμα κοιτάσματα, μελετώντας δύο ενεργά πεδία ενισχυμένης ανάκτησης μεθανίου από στρώματα άνθρακα στο San Juan. Οι δύο τοποθεσίες ήταν η μονάδα Allison, στην οποία έγινε η έγχυση CO<sub>2</sub> και η μονάδα Tiffany, στην οποία έγινε η έγχυση N<sub>2</sub>. Η μονάδα Allison βρίσκεται στην κομητεία San Juan, στο Νότιο Μεξικό και λειτουργεί από την Burlington Resources (σήμερα ConocoPhillips). Παρόλο που η περιοχή διαθέτει 234 συνολικά πηγάδια, η πιλοτική περιοχή για την έγχυση CO<sub>2</sub> αποτελείται από 16 πηγάδια παραγωγής μεθανίου από τρία ανθρακοφόρα κοιτάσματα (CBM), 4 πηγάδια έγχυσης CO<sub>2</sub> και ένα πηγάδι παρατήρησης της πίεσης. Σε αυτή την πιλοτική δοκιμή περίπου 336.000tn CO<sub>2</sub> εγχύθηκαν από το 1995 έως το 2001 στον ανθρακοφόρο σχηματισμό Fruitland. Οι δοκιμές διακόπηκαν προσωρινά, το 2001, με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του προγράμματος. Στο σημείο αυτό αποδείχθηκε η ικανότητα του άνθρακα να προσροφά και να συγκρατεί CO<sub>2</sub> αλλά προβλέφθηκε και η βελτίωση της ανάκτησης μεθανίου (ECBM). Παρόμοιες δοκιμές με ένα ή δύο πηγάδια έγχυσης έχουν πραγματοποιηθεί στην Πολωνία, την Ιαπωνία, τον Καναδά και την Κίνα. Πρόκειται κυρίως για κυβερνητικά χρηματοδοτούμενα προγράμματα με κύριο στόχο την δοκιμή της τεχνολογίας δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα.



**Εικόνα 3.11** Οι τοποθεσίες των Allison και Tiffany Units

(Πηγή: <https://www.osti.gov/servlets/purl/825083>)

Οι γεωτρήσεις, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν στον σχηματισμό Fruitland. Το CO<sub>2</sub> προέρχεται από φυσικό ταμιευτήρα CO<sub>2</sub> στην περιοχή Cortez, New Mexico και παραδόθηκε στην περιοχή μέσω του αγωγού Shell (τώρα KinderMorgan), υπό πίεση 15,17MPa, η οποία μειώνεται στα 10,34MPa λίγο πριν την έγχυση. Ο σχηματισμός αυτός καλύπτεται από σχιστόλιθο και φαίνεται να περιέχει εντός του, 43-49 τρισεκατομμύρια ft<sup>3</sup> μεθανίου. Ο ταμιευτήρας έχει πάχος 13m, βρίσκεται σε βάθος 950m και έχει αρχική πίεση ταμιευτήρα 11,5MPa. Στη μελέτη που διεξήχθη στο πλαίσιο του έργου “Coal-Seq” πραγματοποιήθηκε λεπτομερής περιγραφή του ταμιευτήρα και της μοντελοποίησης του και προβλήθηκε η μελλοντική απόδοση του πεδίου υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η έγχυση CO<sub>2</sub> στην μονάδα Allison έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ανάκτησης μεθανίου από περίπου 77% του αρχικού μεθανίου, στην ανάκτηση τώρα του 95%. Η ανάκτηση του μεθανίου ήταν σε αναλογία περίπου ενός όγκου του μεθανίου για κάθε 3 τόνους CO<sub>2</sub> που εγχύθηκαν (Reeves et al.,2004). Σημαντικό θέμα της μελέτης του έργου αποτέλεσε και η παρατήρηση πως η διαπερατότητα του άνθρακα μειώνεται σημαντικά με την έγχυση του CO<sub>2</sub>. Αυτό συμβαίνει γιατί το CO<sub>2</sub> τείνει να διογκώνει τον άνθρακα, μειώνοντας έτσι τη διαπερατότητα και την ικανότητα έγχυσης του. Η διατήρηση υψηλών ρυθμών έγχυσης αποτελεί πρόκληση και κρίσιμο ορόσημο για την επιτυχία της μεθόδου αυτής. <sup>[23] [47]</sup>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **Παραδείγματα Έργων Γεωλογικής Αποθήκευσης**

#### **4.1 Έργα Γεωλογικής Αποθήκευσης CO<sub>2</sub> Παγκοσμίως**

Μέχρι σήμερα τα μεγαλύτερα και πιο εμπορικά έργα CCS συνδέονται με μεγάλες μονάδες παραγωγής φυσικού αερίου. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα τρέχοντα αλλά και τα προγραμματισμένα έργα γεωλογικής αποθήκευσης. Ορισμένα από αυτά έχουν αναλυθεί εκτενώς στις προηγούμενες ενότητες ως παραδείγματα του εκάστοτε είδους γεωλογικού σχηματισμού που μπορεί να φιλοξενηθεί το CO<sub>2</sub>.<sup>[23]</sup>

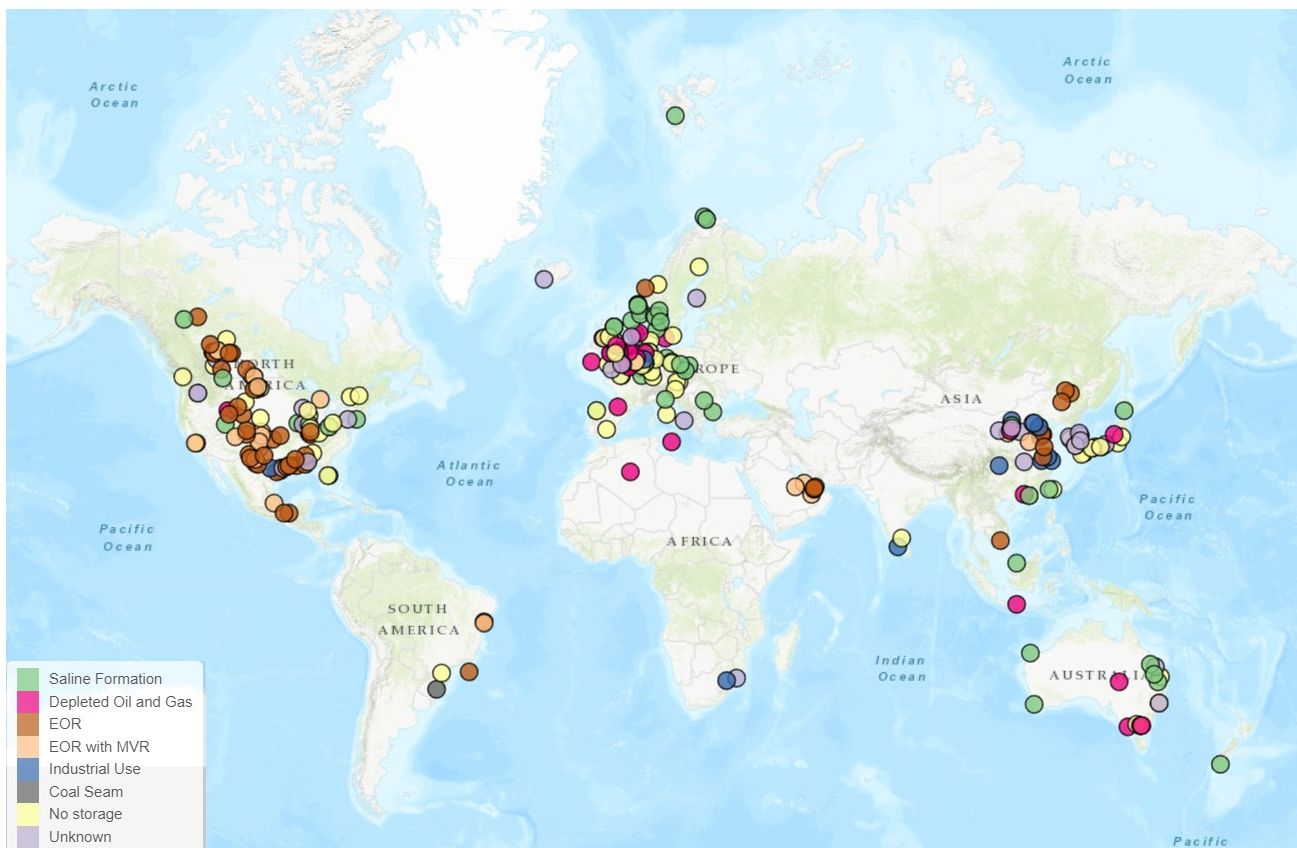
**Πίνακας 4.1 Έργα Γεωλογικής Αποθήκευσης CO<sub>2</sub> παγκοσμίως.**

(Πηγή: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_chapter5-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_chapter5-1.pdf))

<b>Project</b>	<b>Country</b>	<b>Lead Organization</b>	<b>Scale of Project</b>	<b>Injection start date</b>	<b>Approximate average daily injection rate</b>	<b>Total Storage</b>	<b>Storage Type</b>	<b>Geological storage formation</b>	<b>Lithology</b>
Sleipner	Norway	Statoil, IEA	Commercial	1996	3000tn/day	20Mt planned	Aquifer	Utsira Formation	Sandstone
Weyburn	Canada	EnCana, IEA	Commercial	2000	3-5000tn/d	20Mt planned	CO <sub>2</sub> -EOR	Midale Formation	Carbonate
Minami-Nagoaka	Japan	Institute Research	Demo	2002	Max 40tn/d	10000tn planned	Aquifer	Haizume Formation	Sandstone
Yubari	Japan	Ministry of Economy	Demo	2004	10tn/d	200tn planned	CO <sub>2</sub> -ECBM	Yubari Formation	Coal
In Salah	Algeria	Sonatrach, BP, Statoil	Commercial	2004	3-4000tn/d	17tn planned	Depleted Hydrocarbon Reservoir	Krechba Formation	Sandstone
Frio	USA	University Research	Pilot	2004	177tn/d for 9days	1600tn planned	Saline Formation	Frio Formation	Sandstone
K12B	Netherland	Gaz de France	Demo	2004	100-1000tn/d	8Mt	EGR	Rotleigendes	Sandstone
Fen Big Valley	Canada	Alberta Research Council	Pilot	1998	50tn/d	200tn	CO <sub>2</sub> -ECBM	Mannville Group	Coal



Recopol	Poland	TNO-NITG	Pilot	2003	1tn/d	10tn	CO <sub>2</sub> -ECBM	Silesian Basin	Coal
Quishui Basin	China	Alberta Research Council	Pilot	2003	30tn/d	150tn	CO <sub>2</sub> -ECBM	Shanxi Formation	Coal
Salt Creek	USA	Anadarko	Commercial	2004	5-6000tn/d	27Mt	CO <sub>2</sub> -EOR	Cretaceous	Sandstone
Snøhvit	Norway	Statoil	Decided Commercial	2006	2000tn/d	-	Saline Formation	Lower Jurassic	Sandstone
Gorgon	Australia	Chevron	Planned Commercial	2009	10000tn/d	-	Saline Formation	Dupuy Formation	Sandstone
Ketzin	Germany	GFZ Potsdam	Demo	2006	100tn/d	60Ktn	Saline Formation	Stuttgart Formation	Sandstone
Otway	Australia	CO <sub>2</sub> CRC	Pilot	2005	160tn/d for 2 months	0.1Ktn	Saline Formation and Depleted gas field	Waarre Formation	Sandstone
Teapot	USA	RMOTC	Proposed Demo	2006	170tn/d for 3 months	10Ktn	Saline Formation and CO <sub>2</sub> -EOR	Tensleep and Red-Peak Formation	Sandstone
CSEMP	Canada	Suncor Energy	Pilot	2005	50tn/d	10Ktn	CO <sub>2</sub> -ECBM	Ardley Formation	Coal
Pembina	Canada	Penn West	Pilot	2005	50th/d	50Ktn	CO <sub>2</sub> -EOR	Cardium Formation	Sandstone



**Εικόνα 4.1** Παγκόσμιος Χάρτης CCS. (Πηγή: <https://www.sccs.org.uk/resources/global-ccs-map>)

## Overview of existing and planned CCUS facilities

### AUSTRIA

1. Vienna Green CO<sub>2</sub>\*

### BELGIUM

1. Leilac 1
2. Antwerp@C\*
3. Carbon Connect Delta
4. Steelanol
5. C4U
6. North-CCU-Hub
7. Power-to-Methanol Antwerp BV
8. Kairos@C\*
9. H2BE\*

### BULGARIA

1. ANRAV\*

### CROATIA

1. Petrokemija Kutina
2. Bio-Refinery Project
3. CCGeo\*
4. CO<sub>2</sub>EOR Project Croatia

### DENMARK

1. Greensand\*
2. C4: Carbon Capture Cluster Copenhagen
3. Bifrost\*

### FINLAND

1. SHARC\*

### FRANCE

1. DMX Demonstration in Dunkirk\*
2. Pycasso\*
3. K6\*
4. CalCC\*
5. Cryocap
6. D'Artagnan

### GERMANY

1. H2morrow\*
2. Leilac 2
3. BlueHyNow\*
4. OXYFUEL100 (subproject of Westkuste100)
5. H2GE Rostock\*

### GREECE

1. Prinos CCS
2. RECODE

### ICELAND

1. Orca
2. Silverstone\*
3. Coda Terminal\*

### ITALY

1. CCS Ravenna Hub\*
2. Cleankerk

### THE NETHERLANDS

1. Porthos\*
2. Aramis\*
3. H2M\*
4. H-Vision\*
5. Twence\*
6. AVR-Duiven
7. AZUR\*
8. L10 CCS

### NORWAY

1. Sleipner CO<sub>2</sub> Storage\*
2. Longship (including Northern Lights)\*
3. Barents Blue\*
4. Norsk e-fuel
5. Borg CO<sub>2</sub>\*
6. Smeaheia CO<sub>2</sub> Storage\*
7. Smeaheia\*

### POLAND

1. Poland - EU CCS Interconnector
2. Go4ECOPlanet\*

### REPUBLIC OF IRELAND

1. Ervia Cork CCS

### SPAIN

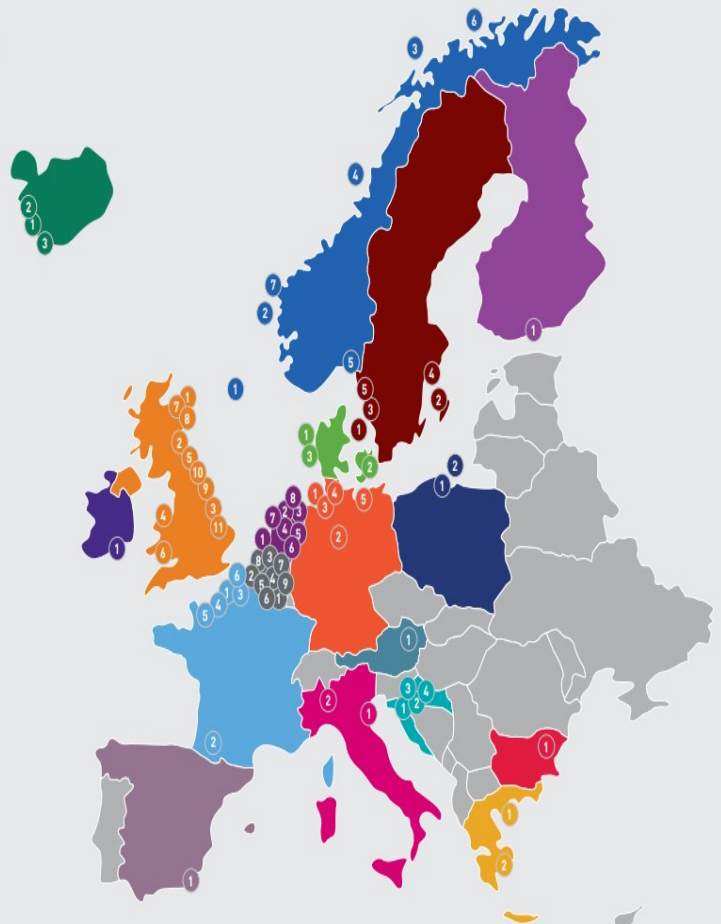
1. ECCO2

### SWEDEN

1. Preem CCS\*
2. Slite CCS
3. CinfraCap
4. BECCS@STHLM\*
5. Project AIR\*

### UK

1. Acorn\*
2. Caledonia Clean Energy
3. Zero Carbon Humber\*
4. HyNet\*
5. Net Zero Teesside\*
6. South Wales Industrial Cluster
7. Peterhead CCS Power Station\*
8. Acorn CO<sub>2</sub> SAPLING\*
9. Northern Endurance Partnership\*
10. H2Teesside\*
11. H2H Saltend\*



\* Project where IOGP Members are involved  
 \* EU Innovation Fund (11 selected, **4 awarded**)  
 Projects listed in **bold** are in operation

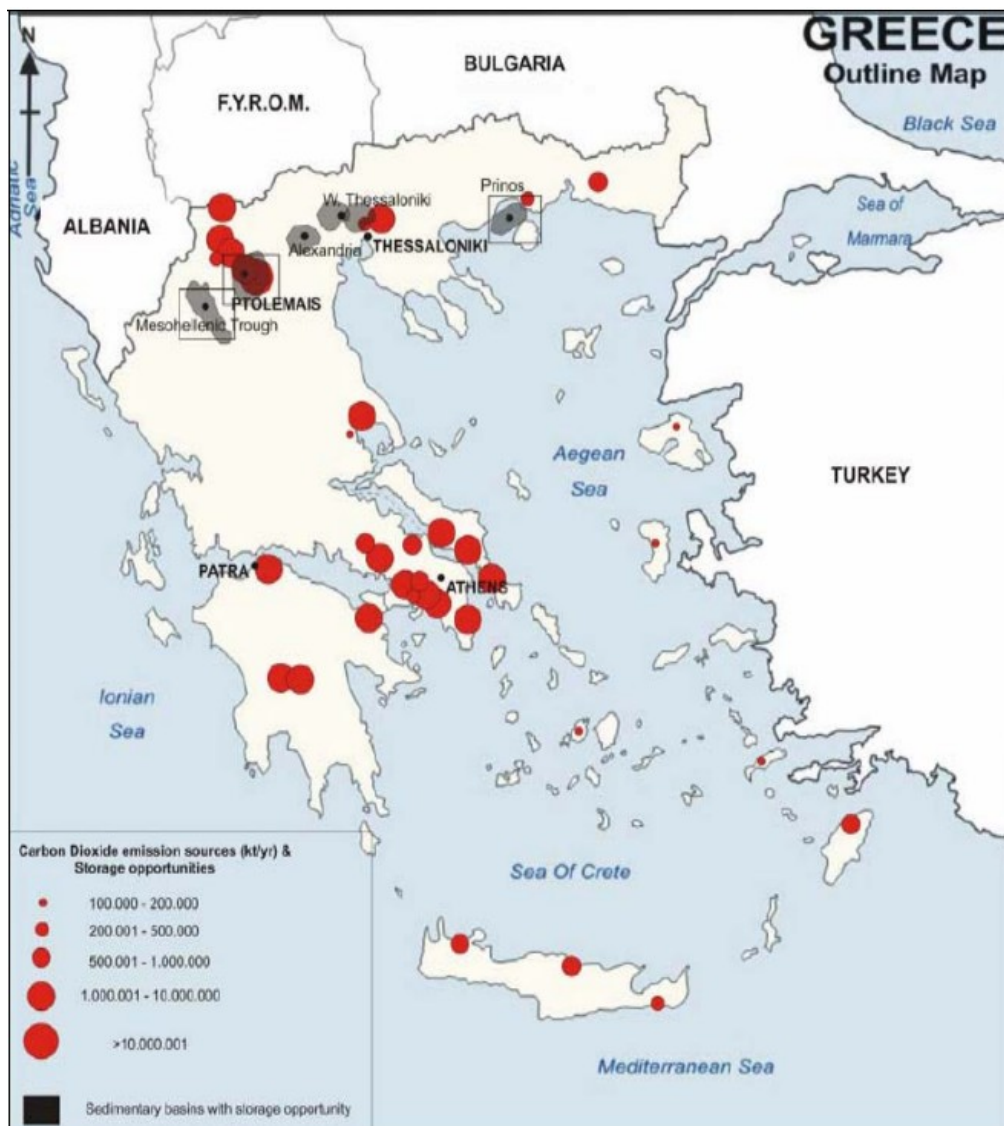
Total number of projects: **72**  
 Around 80 MtCO<sub>2</sub>/yr stored by 2030

**Εικόνα 4.2 Τα σχεδιαζόμενα και τα ήδη υπάρχοντα έργα CCS στην Ευρώπη.**

(Πηγή: <https://iogpeurope.org/resource/map-of-eu-ccus-projects>)

## 4.2 Έργα Γεωλογικής Αποθήκευσης στον Ελλαδικό Χώρο.

Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες χώρες, η Ελλάδα βρίσκεται αρκετά πίσω στην κατεύθυνση των τεχνολογιών CCS, αν αναλογιστεί κανείς ότι Ευρωπαϊκά βρίσκεται στη 2<sup>η</sup> θέση και παγκοσμίως στην 6<sup>η</sup> στην παραγωγή λιγνίτη (τεράστιες εκπομπές CO<sub>2</sub>). Το 56% της ενέργειας που έχει ανάγκη η χώρα μας, παράγεται από 8 σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από την περιοχή της Πτολεμαΐδας αντιστοιχούν σε 22,5Mtn και στην Πελοπόννησο 5Mtn CO<sub>2</sub>.<sup>[41]</sup>

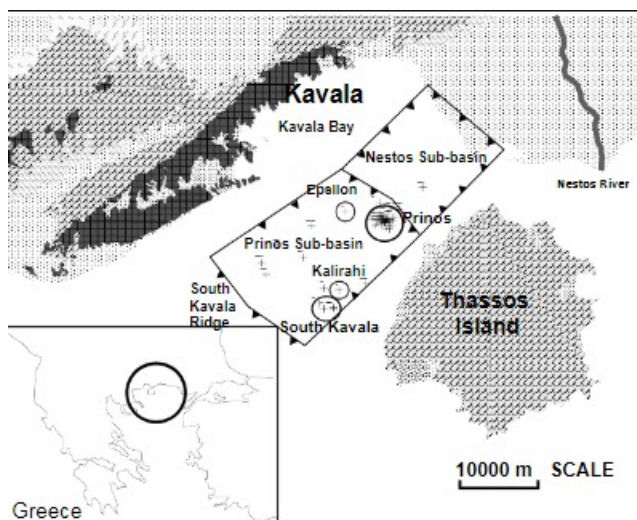


**Εικόνα 4.3** Εκπομπές CO<sub>2</sub> σε σχέση με τις πιθανές λεκάνες αποθήκευσης στην Ελλάδα.

(Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583608001011>)

#### 4.2.1 Λεκάνη του Πρίνου – Καβάλας

Η ιστορία της εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων στην περιοχή Πρίνου-Καβάλας ξεκίνησε με την παραχώρηση περιοχών έρευνας από το Ελληνικό δημόσιο στην Αμερικανική ιδιωτική εταιρία OCEANIC το 1970 και την έναρξη των πρώτων ερευνητικών δραστηριοτήτων για την ανακάλυψη υδρογονανθράκων στη θαλάσσια περιοχή του κόλπου της Καβάλας. Μετά την πρώτη φάση των ερευνών, ανακαλύφθηκε το κοιτάσμα φυσικού αερίου της Ν. Καβάλας, σε βάθος 1720m και το 1974 το κοιτάσμα πετρελαίου και φυσικού αερίου του Πρίνου, σε βάθος νερού περίπου 30m και 2500m από την επιφάνεια της θάλασσας. Τα κοιτάσματα κρίθηκαν εκμεταλλεύσιμα και σύντομα σχηματίστηκε κοινοπραξία με την εταιρία Πετρελαίου Βορείου Αιγαίου (NAPC) για την παραγωγική και ερευνητική αξιοποίηση του.



**Εικόνα 4.4 Κοιτάσματα στην λεκάνη Πρίνου- Ν. Καβάλας**

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/260924218>)

Η ιζηματογενής λεκάνη Πρίνου-Καβάλας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αποτελεί το μοναδικό σχηματισμό με αποδεδειγμένα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου στην Ελλάδα (Lalechos and Savoyat, 1997, Proedrou, 1979). Οι σχέσεις έντονων τεκτονικών κινήσεων, ταχύτητα ιζηματογένεσης, οδήγησαν στην δημιουργία υδρογονανθράκων σε σημαντικές ποσότητες. Η μικρής κλίμακας επιμήκης λεκάνη Πρίνου-Καβάλας εκτείνεται μεταξύ του κόλπου της Καβάλας και του νησιού της Θάσου με διεύθυνση κύριου άξονα ΒΑ-ΝΔ, μήκος 38Km και πλάτος 20Km.



Τοποθετείται στο βόρειο άκρο της Ροδόπης μεταξύ Θάσου και Θασοπούλας και της Βορειοανατολικής Ελλάδας. Η λεκάνη διαιρείται σε δύο μικρότερες λεκάνες, τη βόρεια και τη νότια. Η νότια ονομάστηκε υπολεκάνη του Πρίνου, είναι η μεγάλη βάθους αποθεματική λεκάνη, ενώ η βόρεια εμφανίζει μικρότερα βάθη. Αλατούχοι δόμοι (τεχνητοί χώροι/σχηματισμοί οι οποίοι προκύπτουν από διεργασίες γεωτρήσεων) που υπέρκεινται των ψαμμιτών και ιζημάτα συνολικού πάχους 2,3 Km (Harker and Burrow, 2007) χρησιμεύουν ως καλύμματα (cap rock) για τον ταμιευτήρα. Το κάλυμμα του Πρίνου είναι ένα στρώμα αργίλου πάχους 10-14m.

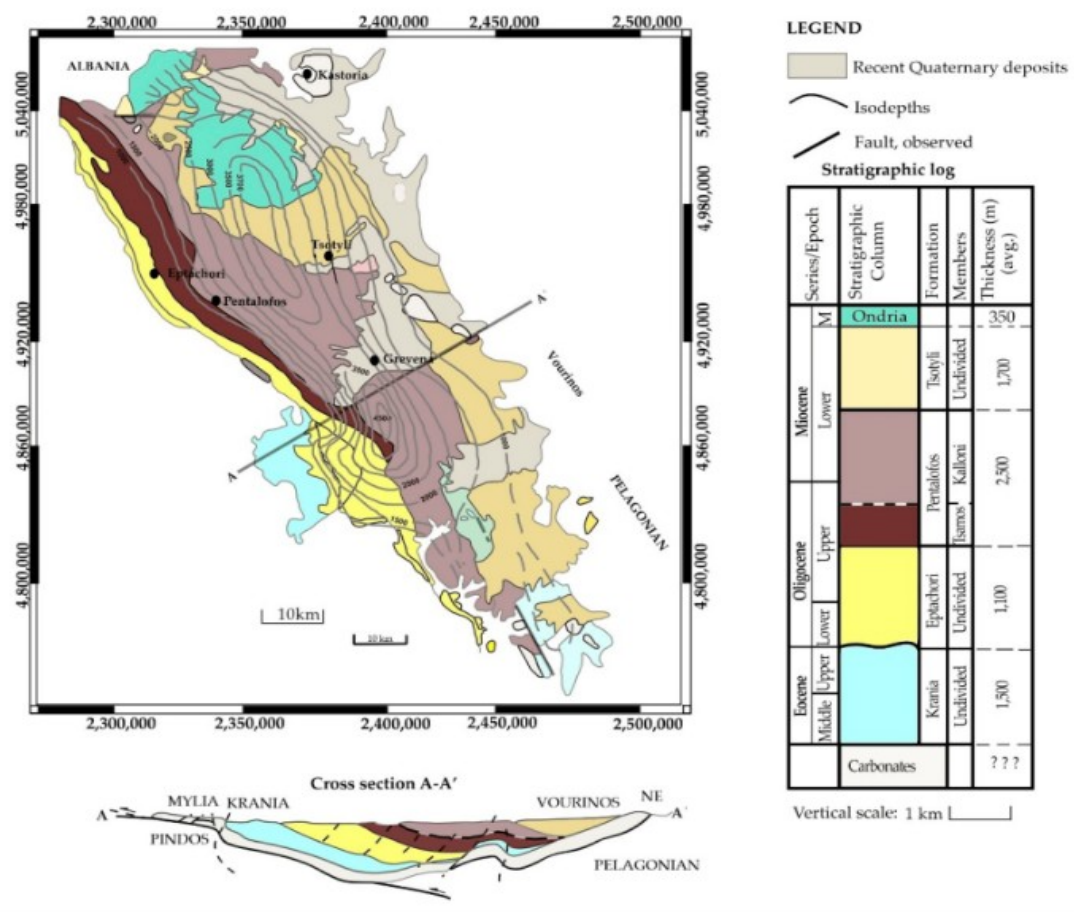
Την περίοδο του 1984-1986 καταγράφηκε η μέγιστη παραγωγή πετρελαίου (30000 barrel/d), ενώ η μέγιστη παραγωγή φυσικού αερίου παρατηρήθηκε το 1987, ακολουθώντας φθίνουσα πορεία. Σήμερα παράγονται περίπου 5 εκατομμύρια barrel/d. Δεδομένου ότι, το κοιτάσμα του Πρίνου είναι υπό εξάντληση ενδείκνυται για προτεινόμενη χρήση ως γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> καθώς η αποθηκευτική ικανότητα του ταμιευτήρα είναι 1221Mtn (GESTCO, 2003). Οι εβαπορίτες σφραγίζουν τη στεγανότητα του ταμιευτήρα. Η χρονική περίοδος αποθήκευσης εξαρτάται από την εκάστοτε ποσότητα εκπομπών αερίου. Ο μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων (68) που υπάρχουν στην περιοχή του κοιτάσματος, εξυπηρετούν για έγχυση στις ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις.

Σήμερα, κατά τα μέσα του 2023, η Motor Oil και ο όμιλος TITAN, πήραν το “πράσινο φως” για την ανάπτυξη του έργου που έχει αναλάβει η Energean Oil and Gas με σκοπό να αξιοποιηθεί ως αποθήκη CO<sub>2</sub> το υπό εξάντληση κοιτάσμα πετρελαίου του Πρίνου. Το Project αφορά τη δέσμευση CO<sub>2</sub> από τη μονάδα παραγωγής υδρογόνου του διυλιστηρίου της Motor Oil. Αντίστοιχα το έργο “IFESTOS” του ομίλου TITAN προβλέπει την κατασκευή μονάδας δέσμευσης CO<sub>2</sub> στο εργοστάσιο που λειτουργεί στο Καμάρι Βοιωτίας, ώστε να περιορίσει τις επικίνδυνες εκπομπές που προκύπτουν κατά την παραγωγή τσιμέντου. Η αποθήκη CO<sub>2</sub> του Πρίνου, η οποία αναμένεται να είναι έτοιμη το 2025, έχει δυναμικό αποθήκευσης έως 1εκ tn/year. <sup>[52] [53] [54]</sup>

#### 4.2.2. Μεσοελληνική Αύλακα

Η Μεσοελληνική Αύλακα αποτελεί δυνητικό χώρο αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Τοποθετείται στο πίσω μέτωπο της Οροσειράς της Πίνδου, με έκταση 5000-25.000Km<sup>2</sup>, μήκος μεγαλύτερο των 200Km και πλάτος από 30 έως 40km. Η λεκάνη χαρακτηρίζεται από μεγάλη πλευρική έκταση (300x30Km) πολύπλοκες δομές, μεγάλο πάχος ιζηματογενών στρωμάτων. Τα πάχη, αυτά, των στρωμάτων που συναντώνται στην περιοχή, κυμαίνονται από 1,5-3,5Km, καθώς και η τεκτονική σταθερότητα αντιστοιχούν σε παράγοντες που ευνοούν την αποθήκευση CO<sub>2</sub>.

Επίσης ο σχηματισμός του Πεντάλοφου υπόκειται σημαντικού καλύμματος (Σχηματισμός Τσοτύλι), ενώ πιθανή είναι και η ύπαρξη υδρογονανθράκων. [52] [54]



**Εικόνα 4.5** Χάρτης της περιοχής της Μεσελληνικής Αύλακας και στρωματογραφική στήλη της περιοχής με ενδείξεις του πιθανού χώρου αποθήκευσης CO<sub>2</sub> (Pentalofos) και του καλύμματος (Tsotili και Epachori) (Πηγή: <https://www.mdpi.com/1996>)

### 4.2.3.Λεκάνη Φλώρινας

Η λεκάνη της Φλώρινας ανήκει στην περιοχή του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας και αποτελείται από τον ενεργειακό άξονα Φλώρινας- Αμύνταιο- Πτολεμαΐδας- Κοζάνης, όπου παράγεται το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας). Ένας από τους κύριους λόγους για την επιλογή της λεκάνης αυτής, ως υποψήφιος χώρος αποθήκευσης CO<sub>2</sub>, αποτελεί το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλη ποσότητα του αερίου αυτού που διαλύεται στους υδροφορείς της λεκάνης. Αυτή η διαδοχή σε συνδυασμό με την καύση λιγνιτικών αποθέσεων από τους σταθμούς, αποτελούν περίπου το 50% των εκπομπών CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα (Koukoulas et al., 2009). Το CO<sub>2</sub> στην περιοχή της Φλώρινας είναι ηφαιστειακής προέλευσης. Η συσσώρευση του CO<sub>2</sub> συναντάται κυρίως στους Μειοκαινικούς ψαμμίτες (βασικός ταμιευτήρας) ποτάμιου περιβάλλοντος καθώς και στους Μειοκαινικούς ασβεστόλιθους (Karakatsanis et al., 2007). Τα περιβάλλοντα ιζηματογένεσης, τα οποία υπάρχουν στη Λεκάνη της Φλώρινας ευνοούν τη γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> οι τυχόν στρωματογραφικές αλλαγές συγκρατούν το CO<sub>2</sub> σε αυτό το περιβάλλον ώστε να μην επιτρέπουν τη διαφυγή του (Karakatsanis et al., 2007). Ωστόσο, πετρώματα- καλύμματα (cap rock) αποτελούνται κυρίως από αργιλικά ιζήματα (clay) αλλά γενικά απουσιάζουν “στεγανά” υπερκείμενα στρώματα κατάλληλα να συγκρατήσουν το CO<sub>2</sub>. [52] [54]

Era	Period	Epoch	Stratigraphic column	Lithologies
CENOZOIC	QUATERNARY	Holo cene		Recent Formation (sand, clay, peat)
		Middle Pleistoc		Terrestrial-fluvial Formation (conglomerate, loam, sand, clay)
		Late Pleistoc		Sand, clay, marl, peat
		Early-Middle Pleistocene		Conglomerate, sand, clay, hard horizons
	NEOGENE	Early-Late Pliocene		Late Neogene series Formation (marl, clay, sand, marlaceous limestone, geode lignite)
		Late Mio cene- Early Pliocene		Sand - Clay Formation (sand, clay, sandstone, siltstone)
				Silt Formation (silt, siltstone, sand, clay layers, wooden pieces, leaves)
				Calc-alkaline silt
				Lignite Formation (sand, clay, remain-debris, xyloide pieces, lignite)
				Clastic Formation (sand, clay, hard sandstones, conglomerate, green. grey-green colour)
MESOZOIC		Triassic		Base Formation (cobble, sand, clay, loam)
PALEOZOIC		Jurassic		Subbase Formation (semi-crystalline, crystalline limestones, marbles, schists, granite)

**Εικόνα 4.6** Λιθοστρωματική στήλη του άξονα Φλώρινας – Αμύνταιο –Πτολεμαΐδας-Κοζάνης.

(Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/283341230\\_Geological\\_modelling\\_for\\_investigating\\_CO2\\_emissions\\_in\\_Florina\\_Basin\\_Greece](https://www.researchgate.net/publication/283341230_Geological_modelling_for_investigating_CO2_emissions_in_Florina_Basin_Greece))



#### 4.2.4. Λεκάνη Δυτικής Θεσσαλονίκης

Ο υδροφόρος της Δ. Θεσσαλονίκης βρίσκεται στην λεκάνη της Δ. Θεσσαλονίκης και αποτελεί σχηματισμό που ενδείκνυται για αποθήκευση CO<sub>2</sub>, με παλιότερες μελέτες να εξετάζουν την καταλληλότητα του. Η λεκάνη βρίσκεται δυτικά της πόλης της Θεσσαλονίκης και καλύπτει χερσαία έκταση 4.200Km<sup>2</sup> και υδατική έκταση 4000Km<sup>2</sup>. Θεωρείται πολύπλοκη τεκτονική τάφρος, σταθερή και με λιγοστά ρήγματα. Αποτελείται από κλαστικές μονάδες (κροκαλοπαγή, άμμο, άργυλο) και σε τοπικό επίπεδο από ασβεστολιθικά ιζήματα (ασβεστόλιθοι, μάργες). Το πάχος των υφάλμυρων σχηματισμών ψαμμίτη υπερβαίνει τα 500m δίνοντας την προοπτική για αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Η αναλογία άμμου/πηλού στον σχηματισμό του υδροφόρου, κυμαίνεται από 40-90% και επηρεάζεται έντονα από τον σχηματισμό των υφάλμυρων δομών. Το βάθος των υφάλμυρων δομών, από την κορυφή τους, τοποθετείται μεταξύ των 900-2400m, όπου είναι και το βέλτιστο βάθος που μεγιστοποιεί την αποθηκευτική ικανότητα CO<sub>2</sub> και το πορώδες κυμαίνεται από 5-20%.

Αξιολογώντας το δυναμικό της λεκάνης για πιθανή αποθήκευση CO<sub>2</sub>, συμπεραίνουμε ότι στη λεκάνη υπάρχουν καλοί υφάλμυροι υδροφορείς και τεκτονικές παγίδες. Ένα παχύ στρώμα πηλού λειτουργεί ως κάλυμμα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά διασφαλίζουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα ικανό να στηρίξει την αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Η δυναμικότητα αποθήκευσης του υδροφορέα είναι 645Mtn. <sup>[52] [53]</sup>

#### 4.2.5 Λεκάνη Βόλου (Βασάλτες)

Οι βασάλτες από την περιοχή του Βόλου, έχουν τα απαραίτητα και κατάλληλα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά για να θεωρηθούν πιθανές τοποθεσίες αποθήκευσης CO<sub>2</sub>, όπως

- i. χαμηλός βαθμός αλλοίωσης
- ii. αλκαλική σύνθεση ακόρεστου πυριτίου
- iii. παρουσία ορυκτών που φέρουν ασβέστιο (Ca)
- iv. υψηλό πορώδες
- v. ενδείξεις αυξημένης θερμοκρασίας

Μια πρόσφατα ανενεργή πηγή μαγνητικής θέρμανσης που υπάρχει στη περιοχή που βρίσκονται οι βασάλτες στις Μικροθήβες, επηρέασε το καθεστώς θερμοκρασίας των υπόγειων υδάτων τόσο στην ίδια την περιοχή όσο και στις παρακείμενες περιοχές. Η δραστηριότητα αυτή σχετίζεται με την εκτεταμένη δραστηριότητα του οπίσθιου τόξου (extensional back-arc tectonic setting).

Η εγγύτητα των πετρωμάτων προς τη θάλασσα, δίνει την ευκαιρία για εκμετάλλευση των πηγών νερού κατά την έγχυση CO<sub>2</sub> (Koukoulas et al., 2019). Το γεγονός επίσης ότι η βιομηχανική περιοχή του Βόλου βρίσκεται εξαιρετικά κοντά (10Km), κάνει το σενάριο μιας CCS τεχνολογίας ακόμα πιο ιδανική. Υπολογισμοί στα πιθανά πιλοτικά έργα υποδηλώνουν στους βαλσατικούς σχηματισμούς στις Μικροθήβες και στο Πορφύριο να μπορούν να αποθηκευτούν 82.800tn και 27.600tn CO<sub>2</sub>, αντιστοίχως. <sup>[52]</sup> <sup>[54]</sup>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **Νομοθεσία και Κανονισμοί**

#### **5.1 Διεθνής Νομοθεσία και Κανονισμοί**

Σύμφωνα με τις γενικές αρχές του διεθνούς δικαίου, τα κράτη μπορούν να ασκούν δραστηριότητες όπως η αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), στις περιοχές που υπάγονται στα όρια δικαιοδοσίας τους. Ωστόσο εάν η αποθήκευση προκαλεί διασυννοριακές επιπτώσεις, τα κράτη έχουν την ευθύνη να διασφαλίσουν ότι οι δραστηριότητές εντός της δικαιοδοσίας τους ή του ελέγχου τους, δεν προκαλεί ζημιά στο περιβάλλον των κρατών ή των ορίων της δικαιοδοσίας τους.

Η νομοθεσία περί αποθήκευσης CO<sub>2</sub> αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση, καθώς λαμβάνει υπόψη πολλές παραμέτρους, όπως η κλίμακα της δραστηριότητας, η ανάγκη παρακολούθησης του έργου, η συνεχής επαλήθευση συγκράτησης και τυχόν διαρροών άλλα και ο χρόνος αποθήκευσης. Τα έργα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) ρυθμίζονται από την Οδηγία 2009/31/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου της 23<sup>ης</sup> Απριλίου 2009 για τη γεωλογική αποθήκευση, καθώς και τη τροποποίηση της Οδηγίας 85/337/ΕΟΚ του Συμβουλίου, των Οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2000/60/EK, 2001/80/EK, 2004/35/EK, 2006/12/EK, 2008/1/EK και του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1013/2006.

Τα παραπάνω ενσωματώθηκαν στην Ελληνική Νομοθεσία μέσα από την Κοινή Υπουργική Απόφαση 48416/2037/2011. Στην απόφαση αυτή καθορίζεται η διαδικασία έγκρισης και απόκτησης αδειών.

Τα 25 κράτη της ΕΕ έχουν να διασφαλίσουν ότι η γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> είναι σύμφωνη με τις σχετικές οδηγίες της ΕΕ. Οι οδηγίες αυτές αφορούν τα απόβλητα, τις χωματερές, το νερό και την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. <sup>[48]</sup>

#### **5.2 Εθνική Νομοθεσία και Κανονισμοί**

Τον Απρίλιο του 2022, η ΕΔΕΥΕΠ\* ορίστηκε ως η αρμόδια αδειοδοτούσα αρχή για την γεωλογική αποθήκευση άνθρακα, καθώς και για την έκδοση αδειών εξερεύνησης και αποθήκευσης. Συγκεκριμένα με τον Νόμο 4920/2022 (ΦΕΚ Τεύχος Α' 74/15.04.2022) οι αρμοδιότητες της ΕΔΕΥΕΠ περιλαμβάνουν τη συνολική διαχείριση των δικαιωμάτων του Ελληνικού Δημοσίου για την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> αλλά και άλλων αερίων, όπως το φυσικό αέριο και το υδρογόνο. <sup>[48]</sup>

*\*Ελληνική Διαχειριστική Εταιρία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων (HEREMA)*

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **Συμπεράσματα**

Οι αυξημένες εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένες με την αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας. Η μείωση του εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα είναι ζωτικής σημασίας, με τα βλέμματα της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας να έχουν στραφεί προς αυτή την κατεύθυνση. Οι στόχοι που έχουν τεθεί έως το 2050 περί κλιματικής ουδετερότητας έχουν δημιουργήσει την ανάγκη εύρεσης και αξιοποιήσεις όλων των πιθανών τεχνικών που θα μπορούσαν να συμβάλουν στην επίτευξή του.

Η τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> (CCS) αποτελεί μια πρακτική με σημαντικές προοπτικές, που εφαρμόζεται ήδη κάποιες δεκαετίες. Επιτρέπει την χρήση ορυκτών καυσίμων, δεν περιορίζει δηλαδή την παραγωγή ενέργειας, αλλά με σημαντικά μειωμένες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Από ανάλυση πληροφοριών της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι η δέσμευση του CO γίνεται από μεγάλες και σταθερές πηγές, όπως είναι οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, οι βιομηχανίες λιπασμάτων, χάρτου, τσιμέντου, τα διυλιστήρια και οι εγκαταστάσεις φυσικού αερίου. Ανάλογα με την παραγωγική διαδικασία η δέσμευση γίνεται πριν (Pre- Combustion) ή μετά την καύση του καυσαερίου (Post – Combustion) με τη χρήση διαλυτών ή μεμβρανών. Όταν η συγκέντρωση του καυσαερίου σε CO<sub>2</sub> είναι μεγαλύτερη από 60-70% μέχρι και 90% το καυσαέριο μπορεί να καεί σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (Oxy Fuel – Combustion) είτε με ατμό (cryogenic). Συγκρίνοντας τις διαδικασίες οι δέσμευση μετά την καύση είναι η προσέγγιση δέσμευσης που θεωρείται περισσότερο βιώσιμη, καθώς πρώτον, δεν απαιτεί αλλαγές στον εξοπλισμό της ήδη υπάρχουσας βιομηχανικής μονάδας και δεύτερον δεν καταναλώνει μεγάλο ποσοστό ενέργειας σε διεργασίες ψύξης και συμπίεσης (cryogenic) και στις διεργασίες παραγωγής ενέργειας (Oxy Fuel - Combustion). Παρόλο που οι τεχνολογίες δέσμευσης απαιτούν πρόσθετη ενέργεια (έως 30% της αρχικής ενέργειας της παραγωγικής μονάδας) η τελική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> θα μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 30% έως το 2050.

Αφού πραγματοποιηθεί η δέσμευση του CO<sub>2</sub> μεταφέρεται μέσω αγωγών (πιο οικονομική λύση) ή μέσω πλοίων στον προσεκτικά μελετημένο χώρο αποθήκευσης. Ο γεωλογικός σχηματισμός μελετάται ως προς το πορώδες, το βάθος αποθήκευσης, την παρουσία ή όχι πόσιμου νερού. Υπόγειοι σχηματισμοί, κοντά ή μέσα στις άκρες σταθερών τεκτονικών πλακών ή κάτω από βουνά με χαμηλή θερμοκρασία και με διαπερατά στρώματα στο πάνω μέρος ενδείκνυται για αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Η πυκνότητα του αερίου επίσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όσο πιο βαρύ θεωρείται ένα ρευστό, τόσο η άνωση δεν το επηρεάζει.

Λεπτές ιζηματογενείς λεκάνες, με πολλά ρήγματα, έντονες ασυμφωνίες, έντονη τεκτονική δραστηριότητα, λεκάνες που έχουν υποστεί διεγένεση ή λεκάνες με υπερβολικά αυξημένη πίεση δεν αποτελούν ιδανικά σημεία αποθήκευσης. Υπάρχουν τρία είδη γεωλογικών σχηματισμών που μπορούν να φιλοξενήσουν με επιτυχία το CO<sub>2</sub>, μεταξύ των οποίων είναι οι βαθείς αλατούχοι σχηματισμοί, τα εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και τα κοιτάσματα άνθρακα. Έχει διαπιστωθεί ότι οι αλατούχοι υδροφορείς έχουν τη μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα παγκοσμίως (έως 100.000 δις tn) και εμφανίζονται συχνότερα στο υπέδαφος. Το πρώτο έργο CCS που αναπτύχθηκε φιλοξενήθηκε σε αλατούχο σχηματισμό, σχηματισμός Utsira, με μεγάλη επιτυχία τα τελευταία 27 χρόνια. Το άλας που υπάρχει στους σχηματισμούς διασφαλίζει την ασφαλέστερη συγκράτηση και απομόνωση των ρευστών εξαιτίας της χαμηλής διαπερατότητας του. Τις τελευταίες δεκαετίες εφαρμόζεται, επίσης, η τεχνική Ενισχυμένης Ανάκτησης Πετρελαίου (EOR), με το CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιείται, στο τέλος της διεργασίας να αποθηκεύεται εντός του πετρελαϊκού σχηματισμού. Το CO<sub>2</sub> αυξάνει την ρευστότητα του πετρελαίου, επιτρέποντας τη ροή προς την επιφάνεια. Η αποθηκευτική ικανότητα των σχηματισμών αυτών είναι μικρότερη σε σύγκριση με τους αλατούχους υδροφορείς. Όσον αφορά τα κοιτάσματα άνθρακα, συναντώνται σπανιότερα στο υπέδαφος, ενώ η αποθηκευτική τους ικανότητα είναι σαφώς η μικρότερη (220 Gtn). Αποτελούν, βέβαια, έναν τρόπο χρήσης των ανεκμετάλλευτων ανθρακικών κοιτασμάτων με ταυτόχρονη δέσμευση μεθανίου (CO<sub>2</sub>-ECBM). Αυτή τη στιγμή τα έργα CO<sub>2</sub>-ECBM βρίσκονται σε πιλοτικό στάδιο με τα περισσότερα έργα αποθήκευσης να πραγματοποιούνται σε αλατούχους σχηματισμούς και σε πετρελαϊκά κοιτάσματα. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Wikipedia / “Διοξείδιο του Άνθρακα”
- [2] Μιχάλης Λαζαρίδης, (2010), “Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας”, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα
- [3] Κίμων Χατζημπίρος, (2014), “Οικολογία- Οικοσυστήματα και Προστασία του Περιβάλλοντος”. Έκδοση Γ', Εκδόσεις Συμμετρία
- [4] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, “Κλιματική Αλλαγή: Τα αέρια του θερμοκηπίου που προκαλούν την υπερθέρμανση του πλανήτη”
- [5] Global Carbon Project/ Global Carbon Emissions
- [6] Eurostat, (2023), “Electricity from renewable sources on the rise”
- [7] MEMO/03/154, (2003), “Το πρωτόκολλο του Κυότο”
- [8] Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, (2023) “Συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή”
- [9] United Nations Climate Change (UNFCCC), “The Paris Agreement”
- [10] European Council, Council of the European Union, (2020), “5 facts about the EU’s goal of climate neutrality”
- [11] Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, “Εκθέσεις και Υφιστάμενη κατάσταση”
- [12] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2006), Guidelines for National Green house Gas Inventories, vol.2 Energy, chapter 5 “Carbon Dioxide Transport, Injection and Geological Storage.
- [13] Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής / Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ, (2018), “11<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο για Ήπιες μορφές Ενέργειας”, Πρακτικά Συνεδρίου Τόμος Α’
- [14] Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias, “Τι σημαίνει στην πραγματικότητα γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub>;”, CO<sub>2</sub>GeoNet Ευρωπαϊκό Δίκτυο Αριστείας

- [15] Department of Energy's Office of Fossil Energy and Carbon Management (FECM), "Pre-Combustion Carbon Capture Research"
- [16] Akeeb O., L. Wang, W. Xie, R. Davis, M. Alkasrawi, S. Toan, (2022), "Post-Combustion CO<sub>2</sub> capture via a variety of temperature ranges and material adsorption process: A review" Journal of Environmental Management, vol.313, article 115026
- [17] Yadav S., S.S Mondal, (2022), "A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration (CCS) technology", Fuel, vol.308, article 122057
- [18] Merkel T. C., H. Lin, X. Wei, R. Baker, (2010), "Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes" Journal of Membrane Science, vol.359, p.p 126-139
- [19] Carbon Dioxide Chemistry, Capture and Oil Recovery, (2018), Book chapter "Solvent for Carbon Dioxide Capture"
- [20] Global CCS Institute, 2022 Status Report
- [21] United States Environmental Protection Agency [EPA], (2022), "Supply Underground Injection and Geologic Sequestration of Carbon Dioxide"
- [22] European commission, (2018), "Storing CO<sub>2</sub> underground can curb carbon emissions, but is it safe?"
- [23] IPCC, 2005, Metz B., O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos and L. Meyer (Eds.), Carbon Dioxide Capture and Storage, Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, special report
- [24] Stasa P., K. Chovancova, V. Kebo, J. Chovanec, O. Kodym, (2013), "Research of CO<sub>2</sub> Storage Possibilities to the Underground" Procedia Earth and Planetary Science, vol.6, p.p 14-23
- [25] Wei N., X. Li, Z. Jiao, P.H. Stauffer, S. Liu, K. Ellett, R.S. Middleton (2022), "A Hierarchical Framework for CO<sub>2</sub> Storage Capacity in Deep Saline Aquifer", Frontiers in Earth Science, review
- [26] Cole I.S, P. Corrigan, S.Sim, N. Birbilis, (2011), "Corrosion of pipelines used for CO<sub>2</sub> transport in CCS: Is it real problem?" International Journal of Greenhouse Gas Control, p.p 749-756
- [27] Woods A.T., T. Espie (2012), "Control on the dissolution of CO<sub>2</sub> plumes in structural traps in deep aquifers", Geophysical Research Letters, vol.39
- [28] Heinemann N., M. Wilkinson, G.E. Pickup, R.S. Haszldine, N.A. Culter, (2012), "CO<sub>2</sub> storage in the offshore UK Bunter sandstone formation", International Journal of Greenhouse Gas Control, vol.6, p.p 210-219

- [29] Furre A.K., O. Eiken, H.Alnes, J.N. Vevante, A.F. Kiaer, (2017), "20 Years of Monitoring CO<sub>2</sub> - Injection at Sleipner", vol. 114, p.p 3916-392
- [30] Lindeberg E., J.F. Vuillaume, A. Ghaderi, (2009), "Determination of CO<sub>2</sub> storage capacity of the Utsira formation", Energy Procedia, vol.1, Issue 1, p.p 2777-2784
- [31] Tarp T.A, J. Gale, (2004), "Demonstrating storage of CO<sub>2</sub> geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects", Energy, vol.29, Issues 9-10, p.p 1361-1369
- [32] Fidje A., K. Espegren, M. Wangen, P. Seljom, A.Ramirez, E.T.A. Hoefnagels, Z. Wu, M. van den Broek, N.Strachan, M. Blesl, T.Kober, P.E. Grohnheit and M. Luthje, (2010), "Analysis of potentials and costs of CO<sub>2</sub> storage in the Sea: final report for the FENCO ERA-NET project" Final Report, p.p 1-51
- [33] International Energy Agency, (2009), "CO<sub>2</sub> Storage in Depleted Gas Fields", Technical Report, p.p 1-121, MK
- [34] Ronald E. Terry, (2003), "Enhanced Oil Recovery", Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), p.p 503-508
- [35] Fernando J. (2022), "Enhanced Oil Recovery (EOR): What it Means, Examples", Investopedia
- [36] International Energy Agency, (2008), "CO<sub>2</sub> Capture and Storage: A Key Carbon Abatement Option", Technical Report, p.p 1-266
- [37] Frank van Bergen, T. Tambach, H. Pagnier, (2011), "The role of CO<sub>2</sub> – Enhanced coalbed methane production in the global CCS strategy", Energy Procedia, vol.4, p.p 3112-3116
- [38] C.Prestou, S.Whittaker, B. Rostron, R.Chalaturnyk, D. White, C. Hawkes, J.W. Johnson, A.Wilkinson, N. Sacuta, (2009), "IEA GHG Weyburn – Midale CO<sub>2</sub> monitoring and storage project – moving forward with the Final Phase", Energy Procedia 1, p.p 1743-1750
- [39] Whitecap Resources INC
- [40] Folger P., (2013), "Carbon Capture and Sequestration (CCS): A Primer", Congressional Research Service
- [41] Angela C. Jones, Ashley J. Lawson, (2022) "Carbon Capture and Sequestration (CCS) in the United States", Congressional Research Service
- [42] Mukherjee M., Santanu M., (2018), "A review of experimental research on Enhanced Coal Bed Methane (ECBM) recovery via CO<sub>2</sub> sequestration" Earth – Science Reviews, vol. 179, p.p 392-410



- [43] J.Q. Shi and S. Durucan (2005), "CO<sub>2</sub> Storage in Deep Unminable Coal Seams" Oil and Gas Science and Technology – Rev. IFP, vol.60, No3, p.p 547-558
- [44] Wu M., Y. Qin, Y. Zhang, S. Zhu, G. Zhang, F. Lan, X. Song, L. Feng and Y. Qin, (2023), "Influence Factors and Feasibility Evaluation on Geological Sequestration of CO<sub>2</sub> in Coal Seams: A review" ACS Omega, p.p 16561-16569
- [45] Godec M., G. Koperna, J. Gale, (2014), "CO<sub>2</sub>-ECBM: A Review of its Status and Global Potential", Energy Procedia, vol.63, p.p 5858-5869
- [46] Mazzotti M., R. Pini, G. Storti, (2009), "Enhanced coalbed methane recovery" The Journal of Supercritical Fluids", vol.47 Issue 3, p.p 619-627
- [47] Reeves S. and A. Oudinot (2005), "The Allison Unit CO<sub>2</sub>-ECBM Pilot - A Reservoir and Economic Analysis" Advanced Resources International, paper 0522
- [48] ΕΔΕΥΕΠ (Ελληνική Διαχειριστική Εταιρία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων), CCS & UGS / Δέσμευση και Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα
- [49] Karl F. Gerdes, (2022), "Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO<sub>2</sub> Capture Project", CCS Technology Development and Demonstration Results (2015-2022), vol.5, p.p 1-850
- [50] <https://www.ccsbrowser.com/>
- [51] Ioakimidis C., N. Koukoulas, A. Chatzimichali, S. Casimiro, A. Macarulla, (2012), "Energy Policy Scenarios of CCS Implementations in the Greek Electricity Sector", Energy Procedia, vol.23, p.p 354-359
- [52] Εφημερίδα Κοζάνης (17 Ιουλίου 2023) " Κατάλληλοι σχηματισμοί για την αποθήκευση CO<sub>2</sub> και φυσικού αερίου (UGS) εντοπίζονται στη Μεσοελληνική Αύλακα της Δυτικής Μακεδονίας και στη Λεκάνη Φλώρινας. Αποθήκευση CO<sub>2</sub>: Στα σκαριά τα πρώτα επενδυτικά σχέδια"
- [53] NewMoney/Ενέργεια και Περιβάλλον, (17 Αυγούστου 2021), "Στα σκαριά projects γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>"
- [54] Koukoulas N., F. Ziogou, V. G emeni, (2009), "Preliminary assessment of CO<sub>2</sub> geological storage opportunities in Greece", International Journal of Greenhouse Gas Control", vol.3 Issue 4, p.p 502- 513