

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΚΑΙ**  
**ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO<sub>2</sub>**

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΑΠΡΗΣ**

**Α.Μ. : 44063**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
**ΔΡ. ΚΩΝ/ΝΟΣ ΜΟΥΣΤΡΗΣ**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2022**

**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
MECHANICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT**



**Diploma Thesis:**

**COMPARISON OF CO<sub>2</sub> CAPTURE AND  
STORAGE METHODS**

**VASILIOS KAPRIS**

**A.M. : 44063**

**SUPERVISOR**

**Dr. K. MOUSTRIS**

**ATHENS**

**JULY 2022**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

<b>ΜΟΥΣΤΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ</b>	<b>ΝΑΖΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ</b>	<b>ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ</b>

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΚΑΠΡΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ του ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ, με αριθμό μητρώου 44063 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτούσιες είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών

  
ΚΑΠΡΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

# 1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαρκής ανάγκη για τη παραγωγή και χρήση ενέργειας οδηγεί στη συνεχή αύξηση των εκπομπών άνθρακα και στη συνεχή αύξηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα. Έτσι, καθίσταται σαφές ότι πρέπει να γίνουν σημαντικές αλλαγές στον τρόπο παραγωγής και χρήσης της ενέργειας, ιδίως στον τρόπο διαχείρισης των ορυκτών καυσίμων. Πολλοί επιστήμονες κάνουν λόγο για ραγδαία αύξηση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> μέχρι τα μέσα του αιώνα και μεγάλους ρυθμούς αύξησης στη συνέχεια. Δεν είναι σίγουρες οι επιπτώσεις των αυξημένων επιπέδων CO<sub>2</sub> στο παγκόσμιο ιστό, όμως, είναι κοινά αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα ότι οι έντονες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα θα μπορούσε να έχει υψηλές περιβαλλοντικές συνέπειες.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης της αύξησης του CO<sub>2</sub> είναι να μεταχειριστούμε την καύση των ορυκτών καυσίμων πιο αποτελεσματικά ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τις εκπομπές του. Επειδή, όμως, κάτι τέτοιο χρήζει αδύνατο, καθώς η ζήτηση είναι αρκετά μεγάλη, είναι πιο εύκολο να εντείνουμε τη χρήση καυσίμων και να βελτιστοποιήσουμε τεχνολογίες με χαμηλές εκπομπές άνθρακα ή ακόμα και χωρίς άνθρακα, όπως παραδείγματος χάριν η χρήση πυρηνικής ενέργειας και των ανανεώσιμων πηγών μερικές εξ αυτών είναι η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια και τα καύσιμα από βιομάζα. Ο τρίτος και νεότερος τρόπος διαχείρισης του διοξειδίου του άνθρακα είναι η δέσμευση και η ασφαλής αποθήκευσή του που εκπέμπεται από το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Η ανάπτυξη του σημερινού συστήματος που βασίζεται στην ενέργεια των ορυκτών έχει τις ρίζες της στη Βιομηχανική Επανάσταση.

Ο στόχος αυτής της έκθεσης είναι να αναπτύξει τις βασικές μεθόδους με τους οποίους επιτυγχάνεται η δέσμευση και η αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η σύγκριση αυτών, προκειμένου να προσδιορίσουμε τις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδράσεις που θα των μεθόδων που θα έχουν σε βάρος του ανθρώπου και του περιβάλλοντος.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Διοξείδιο του άνθρακα, εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα

## **2 ABSTRACT**

The constant need for energy production and use leads to a continuous increase in carbon emissions and a continuous increase in the concentrations of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the atmosphere. Thus, it becomes clear that significant changes need to be made in the way energy is produced and used, in particular, the way fossil fuels are managed. Many scientists talk about a rapid increase in atmospheric CO<sub>2</sub> concentration by the middle of the century and rapid growth rates thereafter. The effects of rising CO<sub>2</sub> levels on the World Wide Web are uncertain, but it is generally accepted by the scientific community that high concentrations of CO<sub>2</sub> in the atmosphere could have high environmental consequences.

One way to deal with rising CO<sub>2</sub> is the use of fossil fuels in a more efficient way to minimize emissions. However, because this is impossible, as demand is high enough, it is easier to intensify fuel use and optimize low-carbon or even carbon-free technologies, such as the use of nuclear energy and some renewable sources. These include solar energy, wind energy and biomass fuels. The third and newest way to manage carbon dioxide is through the commitment and safe storage emitted by the global energy system. The development of the current system based on mineral energy has its roots in the Industrial Revolution.

The aim of this report is to develop the basic methods by which carbon dioxide capture and storage is achieved and to compare them, in order to determine the environmental and economic impacts of the methods that will be detrimental to humans and of the environment.

**KEY WORDS:** Carbon dioxide, carbon dioxide emissions, capture of carbon dioxide, storage of carbon dioxide

### 3 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Βασίλη Καπρή με σκοπό την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η σύγκριση των μεθόδων δέσμευσης και αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>.

Παρακάτω δίδεται μια συνοπτική παρουσίαση των θεμάτων που αναλύονται σε κάθε κεφάλαιο.

**Από το Κεφάλαιο 6 έως 11** παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες για το CO<sub>2</sub>, όπως η δημιουργία του άνθρακα, η παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από ορυκτά καύσιμα, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, η παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση, οι εναλλακτικές λύσεις, οι διεθνείς συνθήκες και η υπάρχουσα κατάσταση και προβλέψεις για το μέλλον.

**Στο Κεφάλαιο 12** αναλύουμε τη μέθοδο του διαχωρισμού και δέσμευσης του CO<sub>2</sub>.

**Στο Κεφάλαιο 13** αναφερόμαστε στην ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.

**Στο Κεφάλαιο 14** αναλύουμε τη μέθοδο της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> στα χερσαία οικοσυστήματα.

**Στο Κεφάλαιο 15** γίνεται αναφορά στην εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς οργανισμούς.

**Στο Κεφάλαιο 16** γίνεται μια σύγκριση των μεθόδων που αναλύσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια.

**Στο Κεφάλαιο 17** που είναι και το τελευταίο παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από τη παρούσα διπλωματική εργασία.

## 4 Πίνακας περιεχομένων

1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
2	ABSTRACT.....	6
3	ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
4	Πίνακας περιεχομένων.....	8
5	Εικόνες.....	10
6	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	12
7	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ CO <sub>2</sub> ΑΠΟ ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ.....	14
7.1	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	15
7.2	ΠΑΡΑΓΩΓΗ CO <sub>2</sub> ΑΠΟ ΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ.....	19
8	ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	21
9	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ.....	27
10	ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	30
11	ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ.....	33
12	ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΤΟΥ CO <sub>2</sub> .....	35
12.1	Ισχύουσες και δύσκολες απαιτήσεις επιστήμης και τεχνολογίας.....	37
12.2	Τρέχουσες και Δυναμικές Ικανότητες Επιστήμης και Τεχνολογίας.....	37
12.3	Φυσική και Χημική Απορρόφηση.....	38
12.4	Φυσική και Χημική Προσρόφηση.....	40
12.5	Απόσταξη σε χαμηλή θερμοκρασία.....	41
12.6	Μεμβράνες Διαχωρισμού Αερίων.....	43
12.7	Η χρήση μεταλλικών οργανικών πλαισίων ως νέα πορώδη υλικά για διαχωρισμό και δέσμευση CO <sub>2</sub> .....	45
12.8	Τρόποι βελτίωσης των MOF για το διαχωρισμό και τη δέσμευση CO <sub>2</sub> .....	46
12.9	Εκτίμηση των MOF για διαχωρισμό και δέσμευση CO <sub>2</sub> .....	48
12.10	Σχέσεις μεταξύ των ιδιοτήτων προσροφητικού και των ικανοτήτων διαχωρισμού CO <sub>2</sub> .....	50
12.11	Επιστημονικά και Τεχνολογικά Κενά.....	51
12.12	Επεξεργασία και Μετατροπή Προϊόντος.....	54



13	ΩΚΕΑΝΙΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ.....	57
13.1	Αιτίες δέσμευσης άνθρακα ωκεανού.....	57
13.2	Φυσική περιγραφή της άμεσης έγχυσης.....	58
13.3	Το CO <sub>2</sub> σε ένυδρη μορφή.....	60
13.4	Μελέτες σταγονιδίων και υδρατμών CO <sub>2</sub> .....	61
13.5	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προκλήσεις.....	62
13.6	Μηχανική σκοπιμότητα.....	66
13.7	Προβλήματα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε σε θέματα πολιτικής.....	68
14	ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΕ ΧΕΡΣΑΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	72
14.1	Μοριακοί Φυσιολογικοί Έλεγχοι στην Δέσμευση Άνθρακα.....	73
14.2	Οικολογικοί Έλεγχοι στη δέσμευση άνθρακα.....	76
14.3	Ο ρόλος της ανθρακικής ανυδράσης στη δέσμευση CO <sub>2</sub> σε χερσαία οικοσυστήματα.....	80
14.4	Τρόποι αποθήκευσης του άνθρακα σε χερσαία οικοσυστήματα.....	84
14.5	Η επιλογή της αναδάσωσης ως μέσω δέσμευσης άνθρακα.....	87
15	ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ.....	95
15.1	Μηχανισμοί εναπόθεσης.....	95
15.2	Αξιολόγηση των ικανοτήτων για εναπόθεση στους γεωλογικούς σχηματισμούς	98
15.3	Ερευνητικές ανάγκες για γεωλογικούς σχηματισμούς.....	103
15.4	Ερευνητικές προτεραιότητες.....	110
16	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ CO <sub>2</sub> .....	112
17	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	115
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117

## 5 Εικόνες

Εικόνα 1 Ο άνθρακας στο περιοδικό πίνακα .....	12
Εικόνα 2 ανθρακίτης, λιθάνθρακας, λιγνίτης, τύρφη.....	13
Εικόνα 3 κύκλος του άνθρακα Πηγή: Carbon (chemical element) - Wikipedia.....	14
Εικόνα 4 Διυλιστήριο, Εξόρυξη άνθρακα Πηγή: Ορυκτά καύσιμα (προερχόμενα) - Wikipedia .....	15
Εικόνα 5 Απλοποιημένη σχηματική διαδικασία Πηγή: Industrial production of carbon dioxide from fossil fuels and limestone (Charles D. Keeling) .....	17
Εικόνα 6 Κατανάλωση και απώλειες ενέργειας στους κύριους τύπους κλιβάνων Πηγή: Industrial production of carbon dioxide from fossil fuels and limestone (Charles D. Keeling) .....	18
Εικόνα 7 Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή Πηγή: The world's energy problem by Max Roser .....	21
Εικόνα 8 Ετήσια μεταβολή στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας.....	22
Εικόνα 9 Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας Πηγή: The world's energy problem by Max Roser .....	22
Εικόνα 10 Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε τεραβάτρες στις ΗΠΑ Πηγή: The world's energy problem by Max Roser .....	23
Εικόνα 11 Κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο Πηγή: The world's energy problem by Max Roser.....	23
Εικόνα 12 Ετήσια μεταβολή στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια Πηγή: The world's energy problem by Max Roser.....	24
Εικόνα 13 Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή υποκατάστασης Πηγή: The world's energy problem by Max Roser.....	25
Εικόνα 14 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής διεργασίας διαδικασίας χημικής απορρόφησης για CO <sub>2</sub> μετά την καύση Πηγή: Carbon Sequestration research and development (U.S. Department of Energy Report, Office of Science, Office of Fossil Energy) .....	39
Εικόνα 15 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής διεργασίας διαδικασίας χημικής απορρόφησης για CO <sub>2</sub> μετά την καύση Πηγή: Carbon Sequestration research and development (U.S. Department of Energy Report, Office of Science, Office of Fossil Energy) .....	40
Εικόνα 16 Τεχνολογία διαχωρισμού μεμβράνης στη δέσμευση άνθρακα.....	44
Εικόνα 17 α) Συναρμολόγηση ενός MOF (IRMOF-1) με τη σπονδυλωτή σύνθεση γωνιών μεταλλικού οξειδίου (Zn <sub>4</sub> O) και οργανικών συνδετήρων (βενζολοδικαρβοξυλικό οξύ), β) Mg-MOF-74 και γ) HKUST-1.....	46
Εικόνα 18 Ανταλλαγή CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> s) ως συνάρτηση της λανθάνουσας ροής θερμότητας (W/ms). Πηγή: Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants (Eric LichtfouseJan SchwarzbauerDidier Robert).....	92

Εικόνα 19 Άνθρακας που συσσωρεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με την Καθαρή Παραγωγή Οικοσυστήματος (KgC/ha/ημέρα) Πηγή: Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants (Eric LichtfouseJan SchwarzbauerDidier Robert) .....93

## 6 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Ο άνθρακας (C) είναι αμέταλλο χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 6 και σχετική μάζα  $A_r=12.0107$ . Είναι μέλος της δεύτερης περιόδου και της ομάδας 14 του περιοδικού πίνακα (Εικόνα 1). Το άτομο του έχει τέσσερα διαθέσιμα ηλεκτρόνια για τη δημιουργία ομοιοπολικών, συνήθως, δεσμών και βρίσκεται σε τρία φυσικά ισότοπα. Τα  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  τα οποία είναι σταθερά και το  $^{14}\text{C}$  το οποίο είναι ραδιενεργό, με ημιζωή 5730 έτη [1].

The image shows a standard periodic table of elements. The element Carbon (C) is highlighted in red. It is located in the second period, group 14. The table includes elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og), with the Lanthanide and Actinide series shown below the main body.

Εικόνα 1 Ο άνθρακας στο περιοδικό πίνακα

Πηγή: [Carbon \(chemical element\) - Wikipedia](#)

Ο άνθρακας είναι το 15<sup>ο</sup> χημικό στοιχείο κατά μάζα, το οποίο βρίσκεται σε αφθονία στο φλοιό της Γης και το 4<sup>ο</sup> κατά μάζα σε αφθονία χημικό στοιχείο στο σύμπαν. Συναντάται και στο ανθρώπινο σώμα και μάλιστα είναι το δεύτερο, κατά μάζα, χημικό στοιχείο μετά το οξυγόνο.

Ο άνθρακας συναντάται και σε αλλοτροπικές μορφές, με τις πιο γνωστές να είναι ο γραφίτης, ο οποίος συνέβαλε στην εξέλιξη της γραφής και το διαμάντι, ένας από τους πιο περιζήτητους πολύτιμους λίθους.

Στη Γη οι μορφές του άνθρακα είναι σταθερές. Γι' αυτό το λόγο όταν ο άνθρακας χρησιμοποιείται σε διάφορες διεργασίες λαμβάνεται από κάπου και αποτίθενται κάπου αλλού. Τα φυτά τον απορροφούν από το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας για να παράξουν βιομάζα, ενώ οι ετερότροφοι οργανισμοί τον παραλαμβάνουν μέσω της τροφής [1].

Στη φύση έχουμε ανακαλύψει διάφορες μορφές ορυκτού άνθρακα άμορφης δομής (γαιάνθρακες), τις οποίες τις συλλέγουμε από τα ανθρακωρυχεία και έχουν σχηματιστεί από φυτικούς οργανισμούς που καταπλακώθηκαν από πετρώματα, μετά από μεγάλες περιόδους κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, με τη βοήθεια αναερόβιων οργανισμών.

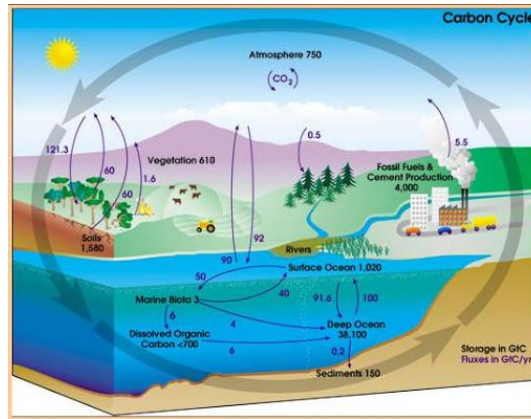
Οι κυριότερες μορφές γαιανθράκων είναι ο ανθρακίτης (92-96% C), ο λιθάνθρακας ( 80-92% C) που τον χρησιμοποιούμε για να παράξουμε φωταέριο ή κωκ, ο λιγνίτης (50-65% C) που αποτελεί τη κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρισμού στη χώρα μας και η τύρφη (<50% C) που χρησιμοποιείται ως λίπασμα για τις καλλιέργειες (Εικόνα 2) [1].



*Εικόνα 2 ανθρακίτης, λιθάνθρακας, λιγνίτης, τύρφη*

*Πηγή: [Ορυκτά καύσιμα \(προεργόμενα\) - Wikipedia](#)*

Η ισορροπία του άνθρακα στη Γη δεν είναι σταθερή, αλλά δυναμική, αφού δεν παραμένει ακίνητος, αλλά συμβάλει σε μια κυκλική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στους έμβιους οργανισμούς. Συγκεκριμένα ο άνθρακας είναι δεσμευμένος από το οξυγόνο που βρίσκεται στον αέρα υπό τη μορφή του διοξειδίου του άνθρακα. Τα φυτά απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης προκειμένου να διατηρηθούν στη ζωή, έτσι το διοξείδιο του άνθρακα αποθηκεύεται σαν βιομάζα στα φυτά. Όταν τα φυτά πεθάνουν, θάβονται, οπότε μετατρέπονται σε ορυκτά καύσιμα. Για να συμβεί αυτό χρειάζεται να περάσουν αρκετά χρόνια και να διαμορφωθούν κατάλληλες συνθήκες. Στη συνέχεια, η καύση των ορυκτών καυσίμων, των ξύλων καθώς και των δασών σε περιπτώσεις πυρκαγιάς επαναφέρει το διοξείδιο του άνθρακα πίσω στην ατμόσφαιρα. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται γραφικά στην Εικόνα 3 παρακάτω [1].



Εικόνα 3 κύκλος του άνθρακα  
 Πηγή: [Carbon \(chemical element\) - Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_(chemical_element))

## 7 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ CO<sub>2</sub> ΑΠΟ ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, ορυκτός άνθρακας, φυσικό αέριο) δημιουργούνται από την αναερόβια αποσύνθεση των οργανισμών που είναι ενταφιασμένα στο υπέδαφος της γης, συμπεριλαμβανομένου και του ζωοπλαγκτόν ή φυτοπλαγκτόν που απομένουν στον βυθό της θάλασσας ή των λιμνών. Κάποιες γεωλογικές περιόδους σχηματίστηκε ένα παχύ στρώμα ιζήματος όταν η οργανική ύλη αναμίχθηκε με λάσπη. Στην συνέχεια, κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας υπέστη χημικές μεταβολές και μετατράπηκε σε υδρογονάνθρακα ικανός να περιέχει ενέργεια. Σε υψηλότερη θερμοκρασία, η οργανική ύλη μετατρέπεται σε μείγμα υγρών ή αέριων υδρογονανθράκων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται καταγένεση.

Με την καύση των ορυκτών καυσίμων παράγουμε μεγάλα ποσά ενέργειας. Η χρήση τους ως καύσιμο εμφανίστηκε από τα παλαιά χρόνια της ιστορίας, όταν ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε των άνθρακα σε καμίλους για το λιώσιμο των μετάλλων υπό τη μορφή των υδρογονανθράκων [2].

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τα ορυκτά καύσιμα αντικατέστησαν άλλες μορφές ενέργειας όπως τους ανεμόμυλους και του υδρόμυλους, καθώς με την εμφάνιση των ατμομηχανών, οι υδρογονάνθρακες έγιναν το κύριο καύσιμο για την ανάπτυξη θερμοηλεκτρικών εργοστασίων που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της υψηλής θερμογόνου δύναμης που διαθέτουν. Στην εικόνα 4 φαίνονται δύο από τους τρόπους εξόρυξης των παραγώγων του άνθρακα, το πετρέλαιο και το κάρβουνο.



*Εικόνα 4 Διυλιστήριο, Εξόρυξη άνθρακα  
Πηγή: [Ορυκτά καύσιμα \(προεργόμενα\) - Wikipedia](#)*

Η καύση των ορυκτών καυσίμων έχει επιβλαβείς επιδράσεις για το περιβάλλον, με σημαντικότερη την παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα και την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας. Οι τιμές των αερίων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας εξαρτώνται τόσο από το καύσιμο που χρησιμοποιείται (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κλπ) όσο και από την απόδοση της καύσης της μονάδας. Σημαντικό ρόλο παίζει και η ποιότητα της καύσης (εξαρτάται από τη ποιότητα του καυσίμου και του αέρα καύσης) καθώς μεγαλύτερη ή μικρότερη ποσότητα καυσίμου από αυτήν της παρεχόμενης ποσότητας αέρα θα επιφέρει ατελή καύση και κατά συνέπεια παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα [2].

Ένας ακόμα παράγοντας που ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα είναι οι εκπομπές των αυτοκινήτων και γενικότερα των μεταφορικών μέσων, αεροπλάνα, πλοία, κ.λπ.. Τα αυτοκίνητα είναι υπεύθυνα για την παραγωγή του 30% των ολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Λόγω της κίνησης που δημιουργείται στους δρόμους, ιδιαίτερα σε ώρες αιχμής, έχει ως αποτέλεσμα τα αυτοκίνητα να είναι ακινητοποιημένα για αρκετές ώρες κι έτσι να συντελούν στην αύξηση των ρύπων. Επίσης, λόγω της οικονομικής κρίσης πολλοί κάτοχοι αυτοκινήτων προτιμούν να μην προβούν στην συντήρηση του αυτοκινήτου όταν αυτό παράγει αυξημένους ρύπους [2].

## **7.1 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ**

Η παραγωγή τσιμέντου συμβάλλει στην εκπομπή CO<sub>2</sub> μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων, καθώς και μέσω της απανθρακοποίησης του ασβεστόλιθου. Τα επί του παρόντος

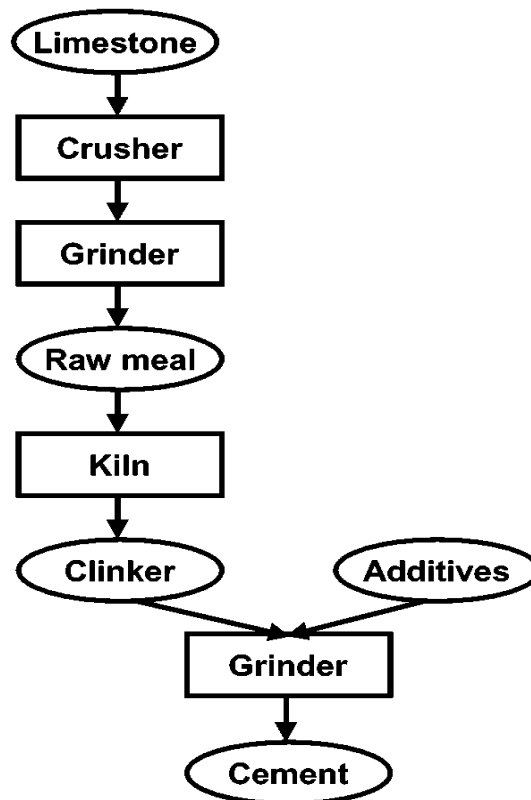
διαθέσιμα δεδομένα αξιολογούν μόνο τις εκπομπές από την απανθρακοποίηση του ασβεστόλιθου και δεν υπάρχει καμία περιεκτική επανεξέταση των εκπομπών που οφείλονται στη χρήση ενέργειας στη βιομηχανία τσιμέντου. Αυτή είναι η πρώτη ανασκόπηση των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> της παγκόσμιας βιομηχανίας τσιμέντου [3].

Το τσιμέντο είναι ένα από τα πιο σημαντικά δομικά υλικά παγκοσμίως. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα είναι ένα μείγμα αδρανών ορυκτών συνόλων, π.χ. άμμου, χαλίκι, θρυμματισμένες πέτρες και τσιμέντο. Η κατανάλωση και η παραγωγή τσιμέντου συνδέεται στενά με την κατασκευαστική δραστηριότητα και, ως εκ τούτου, με τη γενικότερη οικονομική δραστηριότητα. Λόγω της σημασίας του τσιμέντου ως δομικού υλικού και λόγω της γεωγραφικής αφθονίας των κύριων πρώτων υλών, το τσιμέντο παράγεται σχεδόν σε όλες τις χώρες. Η ευρεία παραγωγή οφείλεται επίσης στη σχετικά χαμηλή τιμή και την υψηλή πυκνότητα του τσιμέντου που με τη σειρά του περιορίζει τις επίγειες μεταφορές λόγω του υψηλού κόστους μεταφοράς.

Το 2021, η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου υπολογίστηκε σε 90 εκατομμύρια κυβικούς τόνους. Λόγω της σημασίας του τσιμέντου ως δομικού υλικού και λόγω της γεωγραφικής αφθονίας των κύριων πρώτων υλών, το τσιμέντο παράγεται σχεδόν σε όλες τις χώρες [3].

Η παραγωγή τσιμέντου είναι μια διαδικασία υψηλής έντασης ενέργειας. Αποτελείται από τρία κύρια στάδια της διαδικασίας (Εικόνα 5): προετοιμασία πρώτων υλών, παραγωγή κλίνκερ στον κλίβανο και παραγωγή τσιμέντου. Η παρασκευή πρώτων υλών και η παραγωγή τσιμέντου είναι οι κύριες διαδικασίες που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, ενώ ο κλίβανος κλίνκερ χρησιμοποιεί σχεδόν όλο το καύσιμο σε ένα τυπικό εργοστάσιο τσιμέντου. Η παραγωγή κλίνκερ είναι το πιο ενεργοβόρο στάδιο παραγωγής, υπεύθυνο για περίπου το 70%-80% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται. Η προετοιμασία των πρώτων υλών και η λείανση του φινιρίσματος είναι βήματα παραγωγής που απαιτούν ένταση ηλεκτρισμού. Η κατανάλωση ενέργειας από τη βιομηχανία τσιμέντου υπολογίζεται στο 2% της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, ή στο 5% της συνολικής παγκόσμιας βιομηχανικής κατανάλωσης ενέργειας. Στη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω, εστιάζουμε στη χρήση ενέργειας λόγω της σημασίας της ως μίας από τις πιθανές πηγές εκπομπών CO<sub>2</sub> [3].



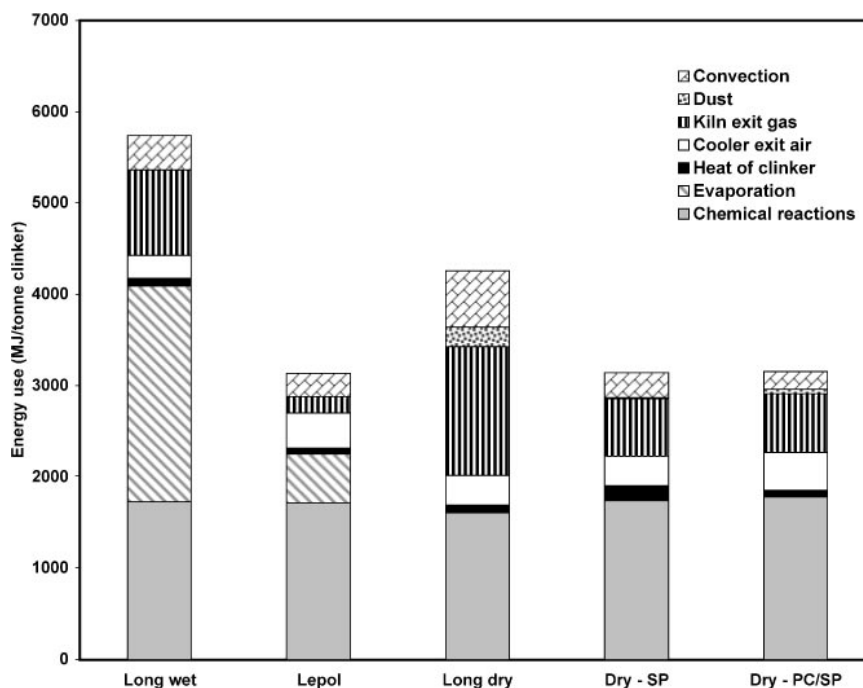


Εικόνα 5 Απλοποιημένη σχηματική διαδικασία

Πηγή: [Industrial production of carbon dioxide from fossil fuels and limestone \(Charles D. Keeling\)](#)

Η θεωρητική κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή τσιμέντου μπορεί να υπολογιστεί με βάση την ενθαλπία σχηματισμού 1 kg κλίνκερ τσιμέντου, που είναι περίπου 1,76 MJ. Αυτός ο υπολογισμός αναφέρεται σε αντιδρώντα και προϊόντα στους 25±C και 0,101 MPa. Εκτός από τις θεωρητικές ελάχιστες απαιτήσεις θερμότητας, απαιτείται ενέργεια για την εξάτμιση του νερού και για την αντιστάθμιση των απωλειών θερμότητας. Η θερμότητα χάνεται από το εργοστάσιο με ακτινοβολία ή μεταφορά και, με το κλίνκερ, εκπέμπεται σκόνη του κλιβάνου και αέρια εξόδου που φεύγουν από τη διαδικασία. Ως εκ τούτου, στην πράξη, η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη. Ο κλίβανος είναι ο κύριος χρήστης ενέργειας στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου. Η χρήση ενέργειας στον κλίβανο εξαρτάται βασικά από την περιεκτικότητα σε υγρασία της πρώτης ύλης. Η περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται στην άλεση των πρώτων υλών και του τελικού τσιμέντου. Η κατανάλωση ισχύος για έναν περιστροφικό κλίβανο είναι σχετικά μικρή και γενικά περίπου 17 και 23 kWh/t κλίνκερ (συμπεριλαμβανομένων των ανεμιστήρων του ψυγείου και του προθερμαντήρα). Επιπλέον ισχύς καταναλώνεται για μεταφορικούς ιμάντες και συσκευασία τσιμέντου. Η συνολική κατανάλωση ισχύος για βοηθητικά υπολογίζεται σε περίπου 10 kWh/t

κλίνκερ. Η Εικόνα 6 συνοψίζει την τυπική κατανάλωση ενέργειας για τα διάφορα στάδια επεξεργασίας και διαδικασίες που χρησιμοποιούνται [3].



Εικόνα 6 Κατανάλωση και απώλειες ενέργειας στους κύριους τύπους κλιβάνων  
 Πηγή: [Industrial production of carbon dioxide from fossil fuels and limestone \(Charles D. Keeling\)](#)

Η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου αυξήθηκε από 1,4 Bt το 1995 σε 4,1 Bt το 2020. Η κατανάλωση και η παραγωγή τσιμέντου είναι κυκλικές, ταυτόχρονα με τους επιχειρηματικούς κύκλους. Οι περιοχές με τα μεγαλύτερα επίπεδα παραγωγής το 2020 ήταν η Κίνα (συμπεριλαμβανομένου του Χονγκ Κονγκ), η Ευρώπη, ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ)-Ειρηνικός, η υπόλοιπη Ασία και η Μέση Ανατολή.

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην παραγωγή τσιμέντου προέρχονται απευθείας από την καύση ορυκτών καυσίμων και από την ασβέστωση του ασβεστόλιθου στο ακατέργαστο μείγμα. Μια έμμεση και σημαντικά μικρότερη πηγή CO<sub>2</sub> προέρχεται από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, με την προϋπόθεση ότι η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ορυκτά καύσιμα. Περίπου το ήμισυ του εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub> προέρχεται από την καύση του καυσίμου και το μισό από τη μετατροπή της πρώτης ύλης. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που αποδίδονται σε κινητό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την εξόρυξη πρώτων υλών, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πρώτων υλών και τσιμέντου και χρησιμοποιείται στο εργοτάξιο. Οι τρέχουσες εκτιμήσεις εκπομπών για τη βιομηχανία τσιμέντου βασίζονται αποκλειστικά στην υποτιθέμενη παραγωγή κλίνκερ (που προέρχεται

από την παραγωγή τσιμέντου) και αποκλείουν τις εκπομπές που οφείλονται στη χρήση ενέργειας. Οι εκπομπές από τη χρήση ενέργειας περιλαμβάνονται στις εκτιμήσεις για τις εκπομπές από τη χρήση ενέργειας και δεν κατανέμονται στην τσιμεντοβιομηχανία [3].

## **7.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ CO<sub>2</sub> ΑΠΟ ΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ.**

Η απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές των κτιρίων και των κατασκευών είναι κρίσιμη για την επίτευξη της δέσμευσης της Συμφωνίας του Παρισιού και των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) των Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ): υπεύθυνος για σχεδόν το 40% των εκπομπών που σχετίζονται με την ενέργεια και τις διεργασίες, η ανάληψη δράσης για το κλίμα στα κτίρια και τις κατασκευές είναι μεταξύ των πιο οικονομικά αποδοτικών. Ωστόσο, η Έκθεση Παγκόσμιας Κατάστασης του 2019 για τα κτίρια και τις κατασκευές μας λέει ότι ο τομέας δεν βρίσκεται σε καλό δρόμο με το επίπεδο της δράσης για το κλίμα που απαιτείται. Αντίθετα, η τελική ενεργειακή ζήτηση στα κτίρια το 2018 αυξήθηκε κατά 1% από το 2017 και κατά 7% από το 2010.

Αυτά τα ευρήματα έρχονται σε πλήρη αντίθεση με την Έκθεση Κενών Εκπομπών του 2019, η οποία αναφέρει ότι θα πρέπει να μειώνουμε σχεδόν το 8% των εκπομπών κάθε χρόνο από το 2020 και επιβεβαιώνονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA) World Energy Outlook 2019, ο οποίος διαπίστωσε ότι το 2018 ο ρυθμός βελτίωσης της ενεργειακής έντασης είχε επιβραδυνθεί στο 1,2%, λιγότερο από το ήμισυ του μέσου ρυθμού από το 2010. Και οι δύο εκθέσεις υπογραμμίζουν την ανάγκη για επείγουσα δράση από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και τους επενδυτές. Για να ανταποκριθούμε στους SDGs και το Σενάριο Αειφόρου Ανάπτυξης του ΙΕΑ, πρέπει να αντιστρέψουμε την τάση και να καταβάλουμε συντονισμένη προσπάθεια για την απαλλαγή από τις εκπομπές του άνθρακα και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα κτίρια σε ποσοστό 3% ετησίως.

Το 2020, οι Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές (NDC) στο πλαίσιο της Συμφωνίας του Παρισιού πρόκειται να αναθεωρηθούν, και έτσι πρόκειται για μια ευκαιρία που δεν πρέπει να χαθεί για να αυξηθούν οι φιλοδοξίες στον τομέα των κτιρίων και των κατασκευών. Η Έκθεση Παγκόσμιας Κατάστασης 2018 για τα κτίρια και τις κατασκευές διαπίστωσε ότι συνολικά 136 χώρες έχουν αναφέρει κτίρια στα NDC τους, ωστόσο λίγες έχουν προσδιορίσει τις ενέργειες που θα χρησιμοποιήσουν για τη μείωση των εκπομπών. Ως εκ τούτου, στα νέα τους NDC, τα έθνη πρέπει να δώσουν προτεραιότητα σε ενέργειες για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές αυτού του ουσιαστικού τομέα. Αυτό σημαίνει μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σημαίνει βελτίωση του σχεδιασμού του κτιρίου. Σημαίνει να είσαι πιο

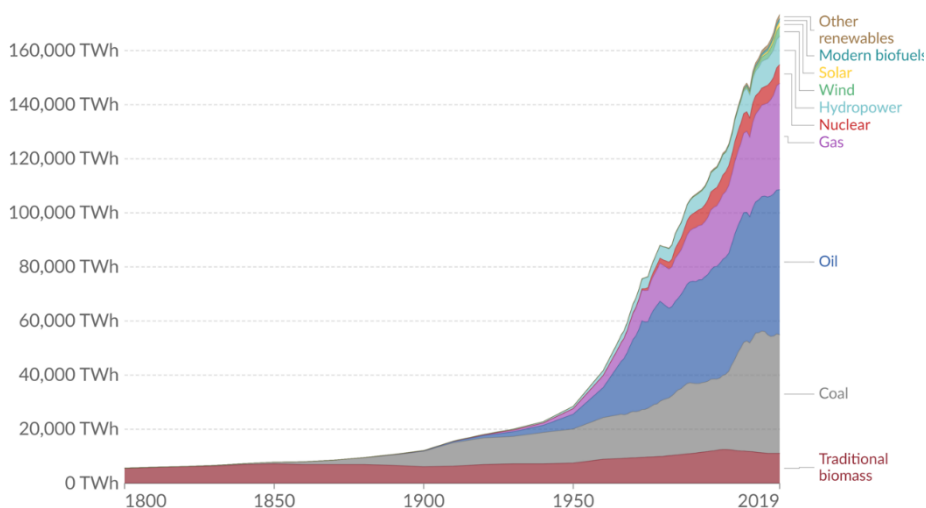
αποτελεσματικός στη θέρμανση, την ψύξη, τον αερισμό, τις συσκευές και τον εξοπλισμό. Σημαίνει τη χρήση λύσεων και προσεγγίσεων βασισμένων στη φύση που εξετάζουν τα κτίρια μέσα στο οικοσύστημά τους, την πόλη.

Η έκθεση μας λέει επίσης ότι το κτιριακό απόθεμα πρόκειται να διπλασιαστεί έως το 2050, γεγονός που αποτελεί μια άλλη σημαντική ευκαιρία που δεν πρέπει να χαθεί. Για να πετύχουμε το SDG 11 με την πρόβλεψή του για οικονομικά προσιτή και επαρκή στέγαση για όλους, πρέπει να διασφαλίσουμε ότι προωθούμε καθαρές λύσεις και καινοτομίες για να κάνουμε τα κτίρια ανθεκτικά στο μέλλον. Σύμφωνα με τον SDG 7, πρέπει να διπλασιάσουμε τις προσπάθειές μας για την ενεργειακή απόδοση για να επιτύχουμε κέρδη τουλάχιστον 3% ετησίως.

Τέτοιες προσπάθειες πρέπει να υποστηριχθούν μέσω επενδύσεων στην ενεργειακή απόδοση, αλλά και εδώ, οι αριθμοί δείχνουν ότι οδηγούμαστε σε λάθος κατεύθυνση. Οι επενδύσεις στον κτιριακό τομέα η ενεργειακή απόδοση ισοπεδώθηκε το 2018 αντί να δείξει την απαιτούμενη ανάπτυξη. Τον Σεπτέμβριο, στη Σύνοδο Κορυφής του Γενικού Γραμματέα του ΟΗΕ για το κλίμα, οι χώρες καθώς και ο ιδιωτικός τομέας ανέλαβαν δεσμεύσεις για έναν τομέα κτιρίων με μηδενικές εκπομπές άνθρακα και τέθηκε ο στόχος της κινητοποίησης 1 τρισεκατομμυρίου δολαρίων σε κτιριακές επενδύσεις στις αναπτυσσόμενες χώρες έως το 2030. . Ταυτόχρονα, ιδρύθηκε η Net-Zero Asset Owner Alliance με τα μεγαλύτερα συνταξιοδοτικά ταμεία και ασφαλιστές στον κόσμο υπεύθυνα για την κατεύθυνση επενδύσεων άνω των 2,4 τρισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ δεσμευμένα σε επενδυτικά χαρτοφυλάκια ουδέτερων εκπομπών άνθρακα έως το 2050.

## 8 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η διαθεσιμότητα της ενέργειας έχει αλλάξει την πορεία της ανθρωπότητας τους τελευταίους αιώνες. Όχι μόνο έχουν εφευρεθεί νέες πηγές ενέργειας, από τα ορυκτά καύσιμα, στην πυρηνική ενέργεια και τελικά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά και στην αφθονία με την οποία παράγουμε και καταναλώνουμε την ενέργεια αυτή.

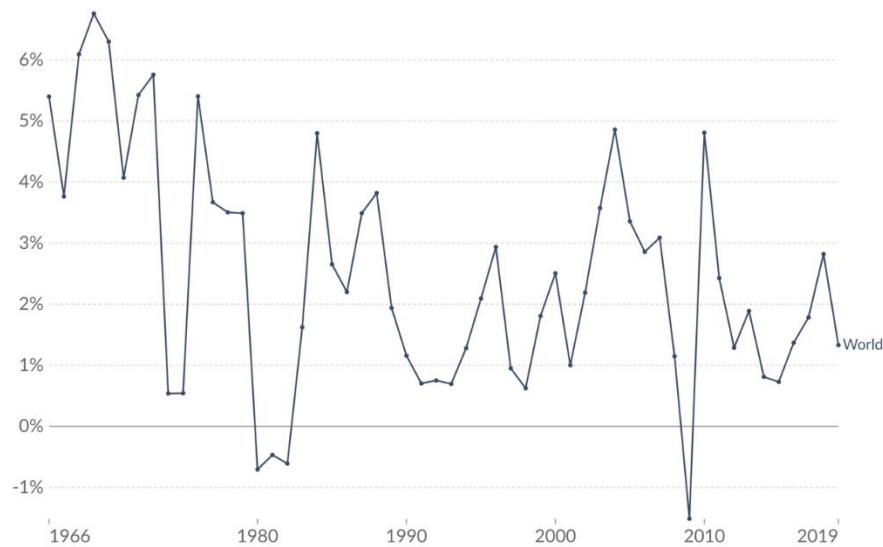


Εικόνα 7 Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή  
Πηγή: [The world's energy problem by Max Roser](#)

Από το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 7) γίνεται εύλογο ότι η ζήτηση της ενέργειας αυξάνεται σε πολλές χώρες του κόσμου, καθώς οι άνθρωποι γίνονται πιο πλούσιοι και ο πληθυσμός αυξάνεται. Εάν αυτή η αυξημένη ζήτηση δεν αντισταθμιστεί με βελτιωμένες ενεργειακές αποδόσεις σε διαφορετικούς τομείς, τότε η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας θα συνεχίσει να αυξάνεται χρόνο με το χρόνο [10].

Με την αυξανόμενη κατανάλωση καθίσταται μια πρόκληση αλλαγής των ενεργειακών συστημάτων από τα ορυκτά καύσιμα σε πηγές ενέργειας οι οποίες θα απελευθερώνουν χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα.

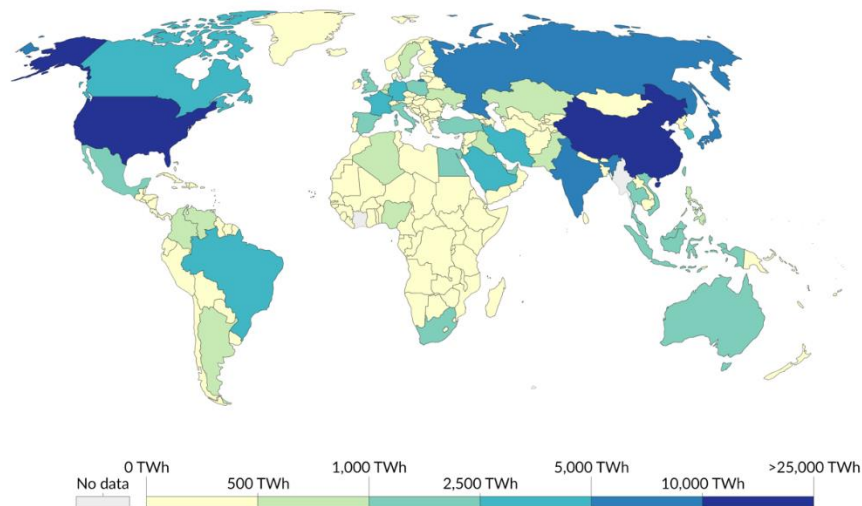
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται πώς η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση αλλάζει χρόνο με το χρόνο.



Εικόνα 8 Ετήσια μεταβολή στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 8, η ετήσια κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται σχεδόν κάθε χρόνο, όμως με αργούς ρυθμούς, της τάξης του 1% με 2%, με εξαίρεση τις χρονιές 1980 και 2009 που παρατηρείται μια πτώση που οφείλεται στην οικονομική κρίση [10].

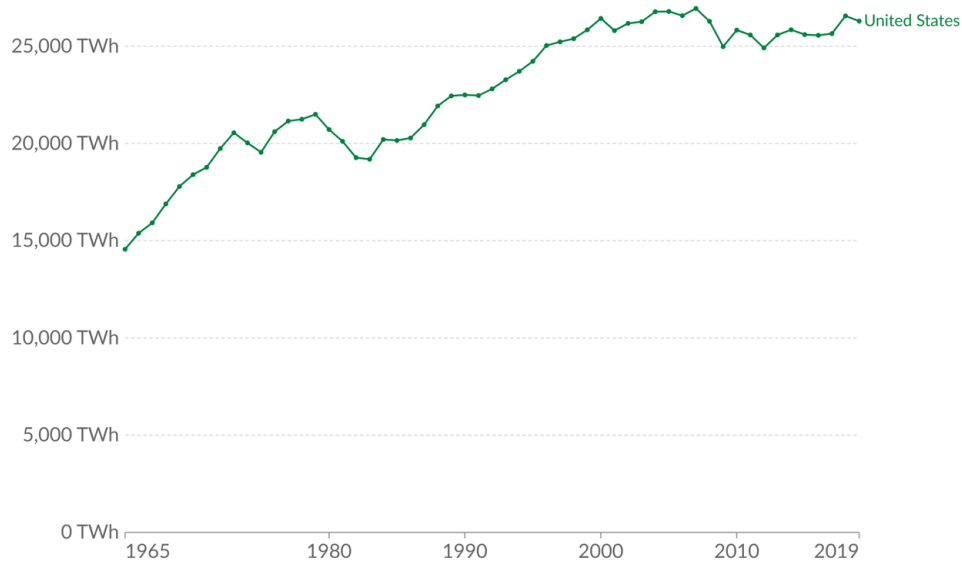
Αξίζει να παρατηρήσουμε την κατανάλωση της πρωτογενούς ενέργειας σε τεραβάτ ανά ώρα (TWh)



Εικόνα 9 Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας  
 Πηγή: [The world's energy problem by Max Roser](#)

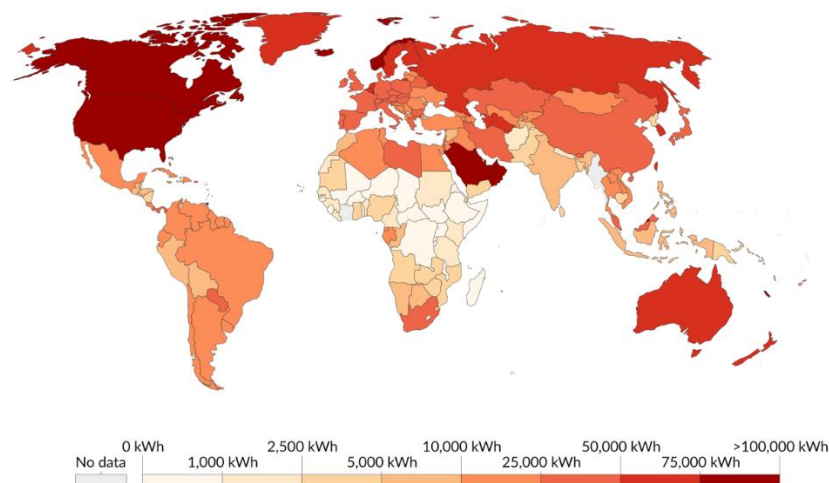
Όπως φαίνεται από την Εικόνα 9, η χώρα με την μεγαλύτερη κατανάλωση είναι η Κίνα με ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για το έτος 2019 να είναι 39361 TWh. Αξίζει

να σημειωθεί ότι οι Ηνωμένες Πολιτείες είναι η μοναδική χώρα όπου η κατανάλωσή της παραμένει στην υψηλότερη βαθμίδα με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, από το 1965 μέχρι σήμερα [10].



Εικόνα 10 Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε τεραβατώρες στις ΗΠΑ  
Πηγή: [The world's energy problem by Max Roser](#)

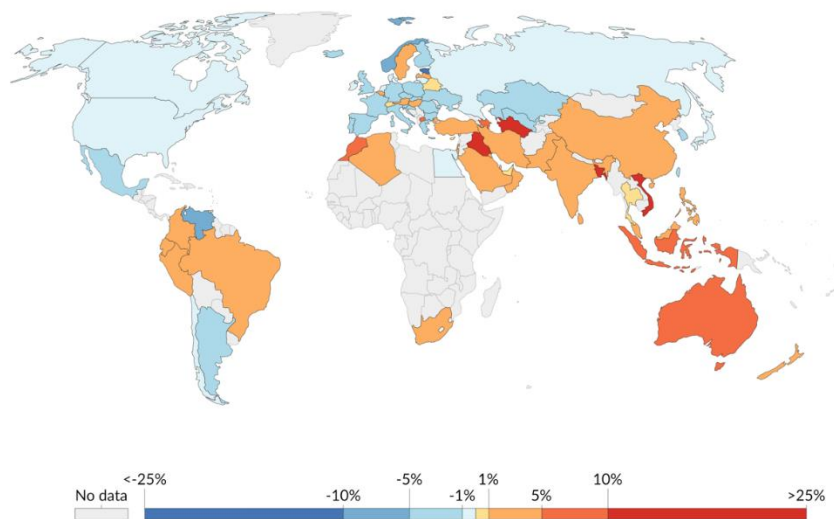
Κοιτάζοντας το χάρτη της Εικόνας 10 συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, θα πρέπει να αναφέρουμε την κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας καθώς είναι εύλογο ότι χώρες που αριθμούν μεγάλο πληθυσμό, θα έχουν και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με χώρες όπου έχουν μικρότερο αριθμό κατοίκων.



Εικόνα 11 Κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο  
Πηγή: [The world's energy problem by Max Roser](#)

Βλέπουμε στην Εικόνα 11 ότι, εκτός από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, υπάρχουν χώρες όπου καταναλώνουν ενέργεια μεγαλύτερη των 100000 kWh. Η Ισλανδία, η Σαουδική Αραβία, το Σουλτανάτο του Ομάν, το Κατάρ, η Νορβηγία και το Μπρουνέι έχουν κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας πολύ μεγαλύτερη από χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία, οι οποίες είναι οι χώρες με τους περισσότερους κατοίκους στον πλανήτη [10].

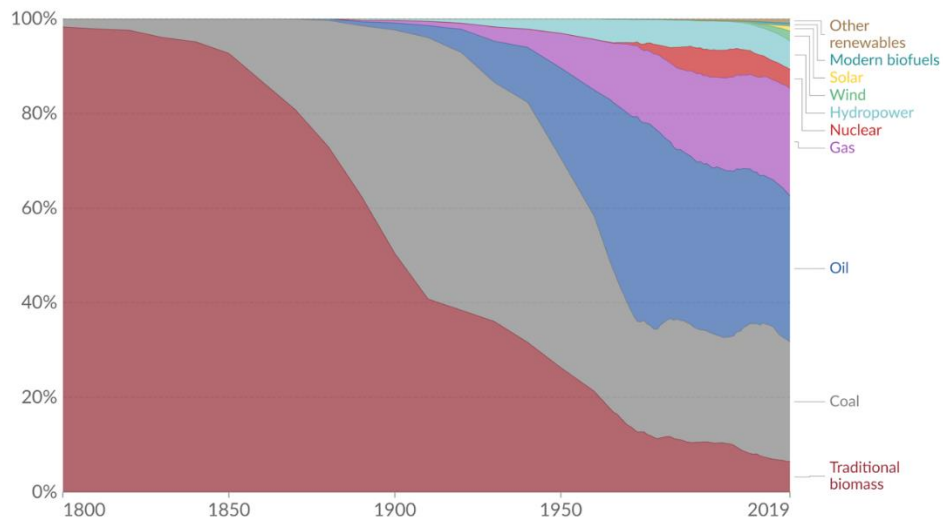
Η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (Εικόνα 12) αυξάνεται χρόνο με το χρόνο τον τελευταίο μισό αιώνα. Παρατηρούμε αύξηση σε χώρες όπου τα εισοδήματα αυξάνονται, ενώ παράλληλα αυξάνεται και ο πληθυσμός τους. Ανεπτυγμένες χώρες, όμως, παρουσιάζουν μια μείωση στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κι αυτό γιατί προσπαθούν να εξελίξουν την ενεργειακή τους αποδοτικότητα.



Εικόνα 12 Ετήσια μεταβολή στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια  
Πηγή: [The world's energy problem by Max Roser](#)

Στην αρχή, αναφερθήκαμε στις διάφορες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται και είδαμε ότι από το 1800 το ποσοστό του κάρβουνο ως μέσο παραγωγής ενέργειας ξεκίνησε να μεγαλώνει, ενώ από το 1890 το ποσοστό των ορυκτών καυσίμων άρχισε να μεγαλώνει με αποτέλεσμα να φτάσουμε στο 2019, όπου τα ορυκτά καύσιμα κατέχουν το 84% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης. Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στην Εικόνα 13 [10].





Εικόνα 13 Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή υποκατάστασης  
 Πηγή: [The world's energy problem by Max Roser](#)

Το 2020, η συνολική κατανάλωση πετρελαίου, σύμφωνα με τα στατιστικά από τη BP ήταν 173,73 exajoules με το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης να ανήκει στην Ασία με 38,4%. Το φυσικό αέριο που καταναλώθηκε ήταν 137.62 exajoules με το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης να ανήκει στη Βόρεια Αμερική με 27%. Το κάρβουνο που καταναλώθηκε ήταν 157.64 exajoules με το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης να ανήκει στις χώρες της Ασίας με 79,9%. Όσον αφορά τη πυρηνική ενέργεια, συνολικά καταναλώθηκαν 24,93 exajoules με το μεγαλύτερο ποσοστό να έχει καταναλωθεί από τη Βόρεια Αμερική με ποσοστό 34,8%. Στην υδροηλεκτρική ενέργεια καταναλώθηκαν 37,69 exajoules, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης ανήκε στην Ασία με 43%. Τέλος, η κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ήταν 28,82 exajoules και το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης το είχε η Ασία με 39% [9].

Αξίζει να σημειωθεί, ότι για το έτος 2020 η ενεργειακή ζήτηση έπεσε κατά 4.5%, η μεγαλύτερη πτώση που έχει σημειωθεί μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, που οφείλεται, κυρίως, στην επιβολή των lockdown που τέθηκαν σε ισχύ σε ολόκληρο το κόσμο λόγω της πανδημίας από το Covid-19.

Παρά τις αναταραχές που αντιμετωπίζουμε, η ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με πρώτες την αιολική και την ηλιακή, συνεχίζουν να εξελίσσονται. Σε σύγκριση με το 2019, οι δύο αυτές πηγές ενέργειας αυξήθηκαν κατά 238 GW, 50% μεγαλύτερη από κάθε προηγούμενη επέκταση. Ο κύριος αρωγός είναι η Κίνα, η οποία αντιπροσωπεύει το ήμισυ της παγκόσμιας

αύξησης της αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Η κινέζικη αιολική επέκταση αυξήθηκε κατά 72 GW, το οποίο είναι αξιοσημείωτο.

Τα συνολικά αποθέματα πετρελαίου ανά τον κόσμο ανέρχονται στα 1732 βαρέλια, με το μεγαλύτερο ποσοστό να είναι στη Μέση Ανατολή. Τα αποθέματα σε φυσικό αέριο ανέρχονται σε 188,1 Tcm (trillion cubic meters), ενώ τα αποθέματα σε κάρβουνο 1074108 τόνους [9].

## 9 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Οι συμβατικές πηγές ενέργειας όπως το πετρέλαιο, το κάρβουνο και το φυσικό αέριο έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικές για τη κινητήρια δύναμη της οικονομικής προόδου και της αύξησης του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου. Τα ορυκτά καύσιμα, όμως, έχουν δυνητικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον, ενώ παράλληλα δεν αποτελούν μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας οπότε και τείνουν να εξαντληθούν στο άμεσο μέλλον. Επιπλέον, τα μέτρα προστασίας που έχουν τεθεί για την προστασία του περιβάλλοντος από το Πρωτόκολλο του Κιότο, έχουν οδηγήσει στη εύρεση και την χρήση άλλων μορφών ενέργειας, οι οποίες δε θα εκπέμπουν υψηλούς ρύπους στο περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα θα μπορούν να αξιοποιηθούν μακροπρόθεσμα [4].

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η βιομάζα, η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική ενέργεια και η γεωθερμία μπορούν να παρέχουν βιώσιμη ενέργεια με βάση τη χρήση των τακτικά διαθέσιμων εγχώριων πόρων. Η μετάβαση σε ενεργειακά συστήματα που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φαίνεται ολοένα και πιο πιθανή καθώς το κόστος των συστημάτων ηλιακής και αιολικής ενέργειας έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία 30 χρόνια και συνεχίζει να μειώνεται, ενώ η τιμή του πετρελαίου και του φυσικού αερίου συνεχίζει να παρουσιάζει διακυμάνσεις. Στην πραγματικότητα, οι τιμές των ορυκτών καυσίμων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το κοινωνικό και περιβαλλοντικό κόστος κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Επιπλέον, οι οικονομικοί μηχανισμοί και οι μηχανισμοί πολιτικής που απαιτούνται για την υποστήριξη της ευρείας διάδοσης και των βιώσιμων αγορών για τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν επίσης εξελιχθεί γρήγορα. Γίνεται σαφές ότι η μελλοντική ανάπτυξη στον ενεργειακό τομέα είναι πρωτίστως στο νέο καθεστώς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και σε κάποιο βαθμό των συστημάτων που βασίζονται στο φυσικό αέριο και όχι στις συμβατικές πηγές πετρελαίου και άνθρακα. Οι χρηματοπιστωτικές αγορές αφυπνίζονται για το μελλοντικό δυναμικό ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και άλλων νέων τεχνολογιών ενέργειας, και αυτό είναι ένας πιθανός προάγγελος της οικονομικής πραγματικότητας των πραγματικά ανταγωνιστικών συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάπτυξη του συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα καταστήσει δυνατή την επίλυση των πλέον κρίσιμων εργασιών, όπως η βελτίωση της αξιοπιστίας του ενεργειακού εφοδιασμού και η οικονομία οργανικών καυσίμων· επίλυση προβλημάτων τοπικής παροχής ενέργειας και νερού· αύξηση του βιοτικού επιπέδου και του επιπέδου απασχόλησης του τοπικού πληθυσμού· εξασφάλιση βιώσιμης ανάπτυξης των απομακρυσμένων περιοχών στις ερημικές και ορεινές ζώνες· εφαρμογή των υποχρεώσεων

των χωρών όσον αφορά την εκπλήρωση των διεθνών συμφωνιών που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βασίζονται, συνήθως, σε ένα αποκεντρωμένο πρότυπο μικρής κλίμακας που είναι εγγενώς ευνοϊκό, αντί να έρχεται σε αντίθεση με πολλά ζητήματα όπως είναι η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, η συμπαραγωγή, τα περιβαλλοντικά και τα οικονομικά ζητήματα. Τα ανανεώσιμα συστήματα, των ηλιακών και των αιολικών πάρκων, ακόμα και των μικρών υδροηλεκτρικών εργοστασίων και βιομάζας, είναι πιο οικονομικά για την κατασκευή τους και στη συντήρησή τους, σε αντίθεση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προμηθεύουν περίπου το 15-20% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής παρέχεται από τη βιομάζα με τη καύση του ξύλου που χρησιμοποιείται για το μαγείρεμα και τη θέρμανση, κυρίως σε χώρες της Αφρικής, της Ασίας και της Λατινικής Αμερικής. Επίσης, σημαντικό ρόλο έχουν και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια που προμηθεύουν το 20% της διεθνούς ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η σύγχρονη βιοενέργεια, η γεωθερμία και τα μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια, κατέχουν το 5% του ποσοστού. Ένας μεγάλος αριθμός μελετών που έχει πραγματοποιηθεί αναφέρουν ότι η συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα αυξηθεί κατά 20% έως και 50% στο δεύτερο μισό του 21<sup>ου</sup> αιώνα [5].

Εκτός από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πολλές χώρες καλύπτουν τις ενεργειακές τους απαιτήσεις μέσω της πυρηνικής ενέργειας. Πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων. Εφόσον η ενέργεια αυτή είναι ελεγχόμενη τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Το βασικό καύσιμο που χρησιμοποιείται για την σχάση των πυρήνων στους αντιδραστήρες των πυρηνικών εργοστασίων είναι το ουράνιο. Από αυτό, μόνο το U-235 (ουράνιο-235) είναι σχάσιμο η δε περιεκτικότητα του οποίου δεν υπερβαίνει το 0.7% κατά βάρος, σε σχέση με το σχάσιμο ισότοπο του φυσικού ουρανίου. Επίσης το U-235 είναι πιο ελαφρύ και μας δίνει αλυσιδωτές αντιδράσεις, γι' αυτό και χρησιμοποιείται στους αντιδραστήρες. Το 99% κατά βάρος αντιστοιχεί στο U-238 το οποίο δεν είναι σχάσιμο και έτσι η αντιδράσεις μέσα στον αντιδραστήρα είναι πιο ελεγχόμενη. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται μια διαδικασία εμπλουτισμού του ουρανίου η οποία έχει ως στόχο την απομάκρυνση όσο γίνεται περισσότερο του U-238 προκειμένου να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε U-235. Αυτή όμως είναι μία δύσκολη διαδικασία και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται το άθροισμα του U-235 και του Pu-239 (πλουτόνιο-239). Η διαθεσιμότητα του φυσικού ουρανίου U-235 είναι πολύ

μικρή με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται κι άλλα ισότοπα για την επίτευξη της σχάσης. Τα σημαντικότερα είναι το ουράνιο U-233 και το πλουτώνιο Pu-239 [6].

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη γενιά στην οποία ανήκουν. Οι γενιές έχουν να κάνουν με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του αντιδραστήρα. Συνολικά υπάρχουν 5 γενιές (γενιά I, γενιά II, γενιά III, γενιά III<sup>+</sup> και η γενιά IV). Σήμερα χρησιμοποιούνται οι αντιδραστήρες γενιάς III<sup>+</sup>. Η υλοποίηση των πυρηνικών αντιδραστήρων καθορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτραπεί η πιθανότητα ατυχήματος (defense in depth), όπου σύμφωνα με την οποία θα πρέπει, η πιθανότητα εκκίνησης ατυχήματος να είναι μικρότερη από κάποια προδιαγεγραμμένη τιμή. Σε περίπτωση ατυχήματος, θα πρέπει να αποτραπεί η ανάπτυξή του και το σύστημα να επανέλθει σε ασφαλή κατάσταση και τέλος, θα πρέπει η πιθανότητα ατυχήματος να είναι μικρότερη από μια συγκεκριμένη τιμή.

Πρώτο μέλημα των ερευνητών των πυρηνικών εγκαταστάσεων είναι η ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών. Λόγω των συνεπειών που θα προκύψουν από πιθανό ατύχημα, η ασφάλειά τους δεν έχει ανατεθεί μόνο στον κατασκευαστή, αλλά και σε ειδικούς οργανισμούς που αναπτύσσουν τα πρότυπα ασφαλείας. Σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος, οι επιπτώσεις ξεπερνούν τα εθνικά σύνορα και γι' αυτό το λόγο έχουν θεσμοθετηθεί διάφορες διεθνείς συμβάσεις, οργανισμοί και επιτροπές για τη διεθνή αντιμετώπιση τους.

Ένα μείζον ζήτημα, εκτός από την ασφάλεια του πυρηνικού σταθμού, είναι και η διαθεσιμότητα των πυρηνικών αποβλήτων. Τα υλικά που περιέχουν αξιόλογη ποσότητα ραδιενεργών ισωτόπων, μετά τη χρήση ραδιενεργών υλικών, ονομάζονται ραδιενεργά κατάλοιπα. Για τη σωστή αντιμετώπιση των πυρηνικών αποβλήτων έχουν επικρατήσει δύο πολιτικές. Η πρώτη πολιτική αφορά τον διαχωρισμό των σχάσιμων από τα λοιπά ραδιενεργά υλικά (ανακύκλωση). Στόχος της ανακύκλωσης είναι ο περιορισμός των καταλοίπων και η επαναχρησιμοποίηση των ραδιενεργών υλικών. Η τακτική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως από ευρωπαϊκές χώρες, εκτός από τη Σουηδία. Η δεύτερη πολιτική αφορά την αντιμετώπιση της συστάδας του εξαντλημένου καυσίμου ως κατάλοιπο. Σε αυτή τη περίπτωση, οι συστάδες φυλάσσονται στον πυρηνικό σταθμό για 5 έτη και στη συνέχεια εναποτίθενται βαθιά στο έδαφος (βάθος περίπου 500 έως 1000 μέτρα) καλυμμένα με υλικά τα οποία δεν επιτρέπουν την διαφυγή της ραδιενέργειας [6].

## 10 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Τη δεκαετία του 1960 ξεκίνησε η δημιουργία μιας παγκόσμιας οικολογικής συνείδησης. Συγκεκριμένα, τα δύο βασικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα ήταν η μείωση της στιβάδας του όζοντος και το φαινόμενο του θερμοκηπίου [8].

Αν και το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μία αναγκαία φυσική διαδικασία που χωρίς αυτή η θερμοκρασία του πλανήτη θα βρισκόταν στους  $-20^{\circ}\text{C}$ , πράγμα που καθιστούσε αδύνατη τη διατήρηση κάθε μορφή ζωής, η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα έχει αυξήσει τις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα την αύξηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας και τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Μαθηματικά μοντέλα, γνωστά ως GDM (General Circulation Models), προβλέπουν ότι η θερμοκρασία της Γης θα αυξάνεται κατά μέσο όρο περίπου  $0,3^{\circ}\text{C}$  ανά δεκαετία για τα επόμενα 100 χρόνια. Ακόμη, προβλέπουν ότι μέχρι το τέλος του αιώνα η θερμοκρασία θα αυξηθεί κατά  $5,8^{\circ}\text{C}$ . Αν αυτές οι μεταβολές της θερμοκρασίας επαληθευτούν, θα οδηγήσουν στο λιώσιμο των πάγων με αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, ενώ παράλληλα ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως οι πλημύρες και οι καταιγίδες, θα είναι συχνότερες και εντονότερες.

Για τους παραπάνω λόγους το 1967 ιδρύθηκε το ταμείο για την περιβαλλοντική άμυνα (environmental defense fund), ενώ το 1992 πραγματοποιήθηκε στο Ρίο η πρώτη σύνοδος του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή (UNFCCC) που οδήγησε στη Συμφωνία του Κιότο το 1997.

Στις 3 Ιουνίου του 1992 πραγματοποιήθηκε στο Ρίο ντε Τζανέϊρο της Βραζιλίας η διάσκεψη που αποτελείτο από αντιπρόσωπους από 172 χώρες. Απόρροια της διάσκεψης ήταν ο έλεγχος της μόλυνσης του περιβάλλοντος με την συμπόρευση τα οικονομικής δραστηριότητας [8].

Η συνεχής και αδιάλειπτη κατάχρηση των φυσικών πόρων από τον άνθρωπο και μεν οδήγησε στην αύξηση της οικονομίας, ωστόσο επήλθε μία υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Στη συνάντηση του Ρίο, έρχεται μία νέα προσέγγιση η οποία διαφοροποιεί τη μόλυνση του περιβάλλοντος σε φυσικούς και οικονομικούς όρους, με στόχο να επιτευχθεί μια χρυσή τομή μεταξύ των δύο πλευρών.

Πέντε χρόνια αργότερα, στις 11 Δεκεμβρίου του 1997, θεσπίζεται στο Κιότο ένα πιο αυστηρό νομικό πλαίσιο για την καταπολέμηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Το Πρωτόκολλο του Κιότο υλοποίησε τον στόχο της UNFCCC να μειώσει την έναρξη της

υπερθέρμανσης του πλανήτη μειώνοντας τις συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε «επίπεδο που θα αποτρέψει την επικίνδυνη ανθρωπογενή παρέμβαση στο κλιματικό σύστημα» (άρθρο 2). Το πρωτόκολλο βασίστηκε στην αρχή των κοινών αλλά διαφοροποιημένων ευθυνών: αναγνώριζε ότι οι επιμέρους χώρες έχουν διαφορετικές δυνατότητες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, λόγω της οικονομικής ανάπτυξης, και, ως εκ τούτου, έθεσε την υποχρέωση να μειώσουν τις τρέχουσες εκπομπές στις ανεπτυγμένες χώρες με βάση ότι είναι ιστορικά υπεύθυνα για τα τρέχοντα επίπεδα αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Το Πρωτόκολλο του Κιότο τέθηκε σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου του 2005 με την επικύρωση της Ρωσίας, καλύπτει περισσότερες από 160 χώρες με πάνω από το 55% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [8].

Η πρώτη περίοδος δέσμευσης του Πρωτοκόλλου ξεκίνησε το 2008 και έληξε το 2012. Και οι 36 χώρες που συμμετείχαν πλήρως στην πρώτη περίοδο δέσμευσης συμμορφώθηκαν με το πρωτόκολλο. Ωστόσο, εννέα χώρες έπρεπε να καταφύγουν στους μηχανισμούς ευελιξίας χρηματοδοτώντας μειώσεις εκπομπών σε άλλες χώρες, επειδή οι εθνικές τους εκπομπές ήταν ελαφρώς μεγαλύτερες από τους στόχους τους. Η οικονομική κρίση του 2007–08 βοήθησε στη μείωση των εκπομπών. Οι μεγαλύτερες μειώσεις εκπομπών παρατηρήθηκαν στις χώρες του πρώην Ανατολικού Μπλοκ, επειδή η διάλυση της Σοβιετικής Ένωσης μείωσε τις εκπομπές τους στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Παρόλο που οι 36 ανεπτυγμένες χώρες μείωσαν τις εκπομπές τους, οι παγκόσμιες εκπομπές αυξήθηκαν κατά 32% από το 1990 έως το 2010 [7].

Μια δεύτερη περίοδος δέσμευσης συμφωνήθηκε το 2012 για την επέκταση της συμφωνίας έως το 2020, γνωστή ως Τροποποίηση της Ντόχα στο Πρωτόκολλο του Κιότο, στην οποία 37 χώρες είχαν δεσμευτικούς στόχους: Αυστραλία, Ευρωπαϊκή Ένωση (και τα τότε 28 κράτη μέλη της, τώρα 27) , Λευκορωσία, Ισλανδία, Καζακστάν, Λιχτενστάιν, Νορβηγία, Ελβετία και Ουκρανία. Η Λευκορωσία, το Καζακστάν και η Ουκρανία δήλωσαν ότι ενδέχεται να αποχωρήσουν από το Πρωτόκολλο του Κιότο ή να μην θέσουν σε νομική ισχύ την τροποποίηση των στόχων του δεύτερου γύρου. Η Ιαπωνία, η Νέα Ζηλανδία και η Ρωσία συμμετείχαν στον πρώτο γύρο του Κιότο, αλλά δεν ανέλαβαν νέους στόχους στη δεύτερη περίοδο δέσμευσης. Άλλες ανεπτυγμένες χώρες χωρίς στόχους δεύτερου γύρου ήταν ο Καναδάς (ο οποίος αποχώρησε από το Πρωτόκολλο του Κιότο το 2012) και οι Ηνωμένες Πολιτείες (που δεν επικύρωσαν). Οι Ηνωμένες Πολιτείες, που κατέχουν ιστορικά τη μεγαλύτερη πηγή εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου δεν έχει επικυρώσει τη συνθήκη, καθώς τη θεωρούν επιβλαβή για την αμερικανική οικονομία. Από τον Οκτώβριο του 2020, 147

κράτη είχαν αποδεχθεί την τροποποίηση της Ντόχα. Τέθηκε σε ισχύ στις 31 Δεκεμβρίου 2020, μετά την αποδοχή του από το εντεταλμένο ελάχιστο των τουλάχιστον 144 κρατών, αν και η δεύτερη περίοδος δέσμευσης έληξε την ίδια ημέρα. Από τα 37 μέρη με δεσμευτικές δεσμεύσεις, τα 34 είχαν επικυρώσει [7].

Διεξήχθησαν διαπραγματεύσεις στο πλαίσιο των ετήσιων διασκέψεων της UNFCCC για την αλλαγή του κλίματος σχετικά με μέτρα που πρέπει να ληφθούν μετά τη λήξη της δεύτερης περιόδου δέσμευσης το 2020. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την έγκριση του 2015 της Συμφωνίας του Παρισιού, η οποία αποτελεί ξεχωριστό μέσο βάσει της UNFCCC και όχι τροποποίηση του Πρωτοκόλλου του Κιότο [11].

Εκτός από τη συμμόρφωση των κρατών-μελών που πραγματοποιείται με τη μείωση των εκπομπών, το Πρωτόκολλο του Κιότο θέσπισε ένα εμπόριο εκπομπών, ένα ιδιότυπο «χρηματιστήριο ρύπων». Συγκεκριμένα, μια χώρα η οποία έχει μειώσει τις εκπομπές της πέραν των αρχικών στόχων που προβλέπει το Πρωτόκολλο, της δίνεται η δυνατότητα να πουλήσει αυτή την επιπλέον μείωση σε άλλη χώρα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα πολλά ανεπτυγμένα κράτη, τα όποια έπρεπε, υπό κανονικές συνθήκες βάσει της συνθήκης, να μειώσουν την εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα κατά 5%, να δημιουργήσουν συναλλαγές δισεκατομμυρίων δολαρίων, χωρίς ωστόσο να επέλθει μία λύση στο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Παρ' όλα αυτά μετά παρέλευση περίπου δύο δεκαετιών από την υπογραφή του Πρωτοκόλλου του Κιότο τα αναμενόμενα αποτελέσματα ήταν πενιχρά, παρά τη σύμφωνη γνώμη των περισσότερων επιστημών στον κόσμο ότι το μεγαλύτερο μέρος της υπερθέρμανσης του πλανήτη τα τελευταία 50 χρόνια πρέπει να αποδοθεί κατά 90% σε ανθρώπινες δραστηριότητες. Μετά από σκληρές διαπραγματεύσεις συμφώνησαν την παράταση για μια πενταετία της ισχύος του πρωτοκόλλου το Κιότο και την ανάπτυξη ενός «οδικού χάρτη» με σκοπό την επίτευξη μιας νομικής συμφωνίας η οποία φιλοδοξεί να συμπεριλάβει, για πρώτη φορά, και τους τρεις μεγάλους ρυπαντές της ατμόσφαιρας, δηλαδή τις ΗΠΑ, την Κίνα και την Ινδία, για τη μείωση των εκπομπών μέχρι το 2015 με προοπτική την εφαρμογή της από το 2020 [11].



## 11 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν το βασικότερο ενεργειακό πόρο και ως εκ τούτου μία από τις βασικές πηγές ενέργειας. Η προσπάθεια του ανθρώπου για την αύξηση του βιοτικού του επιπέδου, σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού του πλανήτη έχουν οδηγήσει στην κατασπατάληση και στην αλόγιστη χρήση των ενεργειακών πόρων [9].

Μετά την πρώτη βιομηχανική επανάσταση το ξύλο αντικαταστάθηκε από τον άνθρακα ως η νέα μορφή ενέργειας. Στις αρχές του 20<sup>ού</sup> αιώνα ο άνθρακας αντικαταστάθηκε μερικώς από το πετρέλαιο. Τα εκατομμύρια κοιτάσματα πετρελαίου και άνθρακα που ήταν αποθηκευμένα στο πλανήτη, έδωσαν στον άνθρωπο τη δυνατότητα να αυξήσει το βιοτικό του επίπεδο. Η μεγάλη διαφορά του άνθρακα και του πετρελαίου, είναι ότι τα πρώτα δεν αποτελούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης, η χρήση τους έγινε από ορισμένα κράτη με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα τεράστιο ενεργειακό χάσμα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι, ενώ ο σύγχρονος άνθρωπος χρειάζεται να καταναλώσει κατά μέσο όρο περίπου 2500 kcal ημερησίως, η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας του μέσου κατοίκου των ΗΠΑ είναι μεγαλύτερη από 230000 kcal την ημέρα.

Έτσι γίνεται σαφές ότι η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και του βιοτικού επιπέδου έχει αναστατώσει το ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη. Ήδη, πολλοί επιστήμονες προειδοποιούν ότι η αδιάλειπτη χρήση των μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων θα επιφέρει έναν «ενεργειακό χειμώνα» [9].

Μετά από αρκετές ενεργειακές κρίσεις, πολλές ανεπτυγμένες χώρες κάνουν προσπάθειες για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας. Το ίδιο, όμως, δε συμβαίνει και με τις αναπτυσσόμενες χώρες καθώς βρίσκονται σε ένα στάδιο εκβιομηχάνισης και ανάπτυξης των ανέσεων ζωής των κατοίκων τους και έτσι είναι αδύνατο να συνδυάσουν τους ρυθμούς ανάπτυξης με τη μείωση της ενεργειακής έντασης.

Ο καταναλωτισμός έχει οδηγήσει και αυτός με τη σειρά του στην αυξημένη κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων. Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει επιφέρει και βελτίωση στις μηχανές των αυτοκινήτων, όμως, σε συνδυασμό με τη χαμηλή τιμή του πετρελαίου, έχουν οδηγήσει στη δημιουργία μηχανών εσωτερικής καύσης μεγάλου κυβισμού με υψηλότερες καταναλώσεις και επιδόσεις. Επίσης, πολλές οικογένειες έχουν στη κατοχή τους περισσότερα από ένα αυτοκίνητα για τη διευκόλυνση της μετακίνησης των μελών τους.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, εκτός από τη κατανάλωση ενέργειας, να αυξάνονται οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Το ενεργειακό πρόβλημα δεν είναι η μόνη δυσμενής κατάσταση που κρινόμαστε να αντιμετωπίσουμε στη σημερινή πραγματικότητα. Οι περιβαλλοντικές συνέπειες, πλέον, έχουν αρχίσει και αυτές να είναι πιο εμφανείς σε σχέση με παλαιότερα χρόνια. Η αυξημένη εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα λόγω της καύσης των υδρογονανθράκων έχει οδηγήσει σε μια επάλληλη αύξηση της θερμοκρασίας και αλλαγή του κλίματος του πλανήτη. Υπολογίζεται ότι στα επόμενα χρόνια πολλές περιοχές θα κληθούν να αντιμετωπίσουν μεγάλες περιόδους ξηρασίας, ενώ το λιώσιμο των πάγων θα επιφέρει αύξηση της στάθμης της θάλασσας [12].

## 12 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΤΟΥ CO<sub>2</sub>

Ο διαχωρισμός και η δέσμευση του CO<sub>2</sub> έχουν αναγνωριστεί ως θέμα υψηλής προτεραιότητας. Το συνολικό κόστος του διαχωρισμού και της σύλληψης εκτιμάται γενικά ότι αντιπροσωπεύει περίπου τα τρία τέταρτα του συνολικού κόστους της δέσμευσης ωκεανών ή γεωλογικών στοιχείων.

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων του διαχωρισμού και της κατακράτησης του CO<sub>2</sub>. Οι τεχνολογικά εξελιγμένες μέθοδοι θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε παραγωγικές επιχειρήσεις που παράγουν ακριβά προϊόντα. Σε εργοστάσια με υψηλό δείκτη εκπομπών CO<sub>2</sub>, όπως οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πιο φθηνές λύσεις για τον διαχωρισμό και δέσμευση του CO<sub>2</sub>, καθώς αυτές είναι πιο κατάλληλες στη γραμμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [13].

Το πεδίο εφαρμογής αυτών των μεθόδων, αφορά όλες τις ανθρωπογενείς εκπομπές CO<sub>2</sub>, εστιάζοντας σε εκείνες τις πηγές που είναι πιο επιδεκτικές σε διάφορες μεθόδους διαχωρισμού και δέσμευσης. Οι πηγές που φαίνεται να προσφέρονται καλύτερα για τις τεχνολογίες διαχωρισμού και δέσμευσης περιλαμβάνουν πηγές μεγάλης ποσότητας CO<sub>2</sub>, όπως οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ατμού με κονιοποιημένο άνθρακα, εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο και προηγμένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων μονάδων καύσης άνθρακα ή φυσικού αερίου που χρησιμοποιούν εμπλουτισμένο αέρα ή οξυγόνο για την υποστήριξη της καύσης με ανακύκλωση CO<sub>2</sub>. Επίσης, μπορεί να εκμεταλλευτούμε τις μεθόδους διαχωρισμού και δέσμευσης στους ολοκληρωμένους συνδυασμένους κύκλους που ειδικεύονται στην αεριοποίηση του άνθρακα (ιδιαίτερα με βάση το οξυγόνο), ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στους στροβίλους υδρογόνου και στις κυψέλες καυσίμου. Πολλά από τα τεχνολογικά εξελιγμένα συστήματα θα μεταχειρίζονται εμπλουτισμένο αέρα ή οξυγόνο που υποστηρίζουν τη διαδικασία της καύσης. Επίσης, το αραιωτικό άζωτο δεν βοηθά στο διαχωρισμό και τη δέσμευση του CO<sub>2</sub>, οπότε θα πρέπει να το μειώσουμε ή να το εξαφανίσουμε από τα αέρια διεργασίας και καύσης του συστήματος. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η υπάρχουσα τεχνολογία ώστε να χρησιμοποιηθεί ο κατάλληλος εξοπλισμός (π.χ. υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα).

Οι τεχνολογίες για τον διαχωρισμό και τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> δεν έχουν εφαρμογή μόνο στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, αλλά μπορούν να εγκατασταθούν και σε πολλές άλλες

βιομηχανίες που εκπέμπουν επίσης υψηλές ποσότητες CO<sub>2</sub>. Για παράδειγμα, στα εργοστάσια παραγωγής φυσικού αερίου, το CO<sub>2</sub> παράγεται συχνά ως υποπροϊόν. Προκειμένου το φυσικό αέριο να φτάσει στη κατάλληλη ποιότητα ώστε να διοχετευθεί μέσω αγωγού θα πρέπει το μεγαλύτερο μέρος του CO<sub>2</sub> (το οποίο είναι 20% ή περισσότερο κατ' όγκο), να αφαιρεθεί. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι η δέσμευση του CO<sub>2</sub> ως παραπροϊόν του φυσικού αερίου θα ήταν μια χρήσιμη εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Εκτός, όμως, από το φυσικό αέριο η διαδικασία της δέσμευσης CO<sub>2</sub> θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στα διυλιστήρια πετρελαίου, στη χαλυβουργία και στη σιδηρουργία καθώς και στις βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου και ασβέστη. Η χρήση της δέσμευσης και του διαχωρισμού των εκπομπών CO<sub>2</sub> στους παραπάνω τομείς δε θα έλυνε εξ' ολοκλήρου τα προβλήματα που δημιουργείται, θα είχαν, όμως, μεγάλη συμβολή στην επίτευξη των συνολικών στόχων μείωσης αυτών των εκπομπών [13].

Οι τεχνολογίες της δέσμευσης και του διαχωρισμού που είναι οικονομικά προσιτές είναι δύσκολο να εφαρμοστούν στις διασκορπισμένες και ταυτόχρονα μεγάλες πηγές εκπομπών CO<sub>2</sub>, όπως είναι τα νοικοκυριά και οι μηχανές εσωτερικής καύσης. Προς το παρόν δεν αποτελούν πρωταρχικό μας μέλημα αλλά η εφαρμογή κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο (H<sub>2</sub>) για την παραγωγή ενέργειας αλλά και για την κίνηση οχημάτων θα ήταν μια αρκετά καλή προσέγγιση καθώς θα είχε μεγάλη συμβολή στη δέσμευση και το διαχωρισμό του CO<sub>2</sub>. Για παράδειγμα, εάν τα λεωφορεία και τα αυτοκίνητα κινηθούν προς την ενσωματωμένη αποθήκευση H<sub>2</sub>, ενδέχεται να κατασκευαστούν κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής H<sub>2</sub> που θα επιτρέπουν τον διαχωρισμό και τη δέσμευση CO<sub>2</sub>. Τέτοιες εγκαταστάσεις παραγωγής H<sub>2</sub> είναι αντικείμενο προσέγγισης που εξετάζουμε στο πλάνο μας. Άλλα προηγμένα συστήματα ισχύος, όπως οι στρόβιλοι υδρογόνου που θα χρησιμοποιούσαν το H<sub>2</sub> ως καύσιμο, έχουν επίσης σημαντικές επιπλοκές, καθώς χρήζουν την ανάγκη για κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής H<sub>2</sub> και την ευκαιρία για διαχωρισμό και δέσμευση CO<sub>2</sub>. Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι επίσης άλλη μια προσέγγιση που μπορούμε να λάβουμε υπόψη στην εφαρμογή του σχεδίου δράσης. Εάν συμβεί αυτό, ο διαχωρισμός και η δέσμευση CO<sub>2</sub> στους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια για την επαναφόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων θα μειώσει έμμεσα τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από τον τομέα των μεταφορών. Ένα από τα αρνητικά στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι η ικανότητα διαχωρισμού και δέσμευσης δύναται δύσκολη κατά την εισαγωγή μιας μεγάλης παροχής ενέργειας, η οποία θα προκύψει λόγω του μεγέθους και της φύσης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

## 12.1 Ισχύουσες και δύσκολες απαιτήσεις επιστήμης και τεχνολογίας

Μέσω του διαχωρισμού και της δέσμευσης του CO<sub>2</sub> επιτυγχάνεται η απομόνωση του άνθρακα σε μορφή κατάλληλη για τη μεταφορά και τη κατάσχεση του. Η λειτουργία αυτή για να επιτευχθεί χρειάζεται τη γνώση κατάλληλης τεχνολογίας η οποία εξαρτάται από τη φύση και τη μορφή στην οποία βρίσκεται ο άνθρακας [13].

Οι ακαθαρσίες του προϊόντος θα πρέπει να είναι αρκετά χαμηλές για να μην υπάρχει κίνδυνος κατά της εργασίες μεταφοράς και δέσμευσης. Για τη διαδικασία της δέσμευσης και της κατακράτησης που λαμβάνει χώρα στις ροές εκροής θα πρέπει, επίσης, να μην υπάρχει υψηλό ποσοστό ακαθαρσιών προκειμένου να η επεξεργασία να είναι όσο πιο δυνατόν βέλτιστη.

Για τις μεθόδους δέσμευσης και διαχωρισμού του CO<sub>2</sub> που προσδιορίζονται, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης και της καθαρότητας του CO<sub>2</sub> και των συνθηκών λειτουργίας, διαφέρουν λόγω λειτουργικών και τεχνικών παραγόντων. Προκειμένου να εφαρμοστούν στις ανθρωπογενείς πηγές CO<sub>2</sub> θα πρέπει δοθεί βαρύτητα στα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών διαχωρισμού και δέσμευσης.

## 12.2 Τρέχουσες και Δυναμικές Ικανότητες Επιστήμης και Τεχνολογίας

Σε αυτή την ενότητα κατηγοριοποιούνται αυτές που πιστεύεται ότι είναι οι συμβατικές επιλογές διαχωρισμού και δέσμευσης που ισχύουν για ανθρωπογενείς εκπομπές CO<sub>2</sub>. Οι παρακάτω μέθοδοι δεν αποτελούν τις μοναδικές επιλογές για το διαχωρισμό και τη δέσμευση του CO<sub>2</sub>. Πολλές άλλες επιλογές που είναι λιγότερο διαδεδομένες θα μπορούσαν να αναπτυχθούν οι οποίες δε συγκαταλέγονται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Για τις μεθόδους διαχωρισμού και δέσμευσης CO<sub>2</sub> που προσδιορίζονται, τα χαρακτηριστικά απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της καθαρότητας του προϊόντος CO<sub>2</sub> και των συνθηκών λειτουργίας, διαφέρουν λόγω λειτουργικών ή τεχνικών παραμέτρων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτελούν βασικό πυλώνα για τον διαχωρισμό και τη δέσμευση των ανθρωπογενών πηγών CO<sub>2</sub> [13].

Οι παρακάτω μέθοδοι αποτελούν τις πιο διαδεδομένες επιλογές για το διαχωρισμό και δέσμευση του CO<sub>2</sub>:

- χημική και φυσική απορρόφηση

- φυσική και χημική προσρόφηση
- χαμηλής θερμοκρασίας απόσταξη
- μεμβράνες διαχωρισμού αερίων
- ανοργανοποίηση και βιομεταλλοποίηση
- βλάστηση

Αυτές οι επιλογές επιλέχθηκαν λόγω της απλής διαδικασίας, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της οικονομίας. Επί του παρόντος πολλά εργοστάσια χρησιμοποιούν πολλές από τις παραπάνω διεργασίες δέσμευσης και διαχωρισμού του CO<sub>2</sub>.

Για τις μεθόδους δέσμευσης και διαχωρισμού του CO<sub>2</sub> που προσδιορίζονται, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης και της καθαρότητας του CO<sub>2</sub> και των συνθηκών λειτουργίας, διαφέρουν λόγω λειτουργικών και τεχνικών παραγόντων [13].

### 12.3 Φυσική και Χημική Απορρόφηση

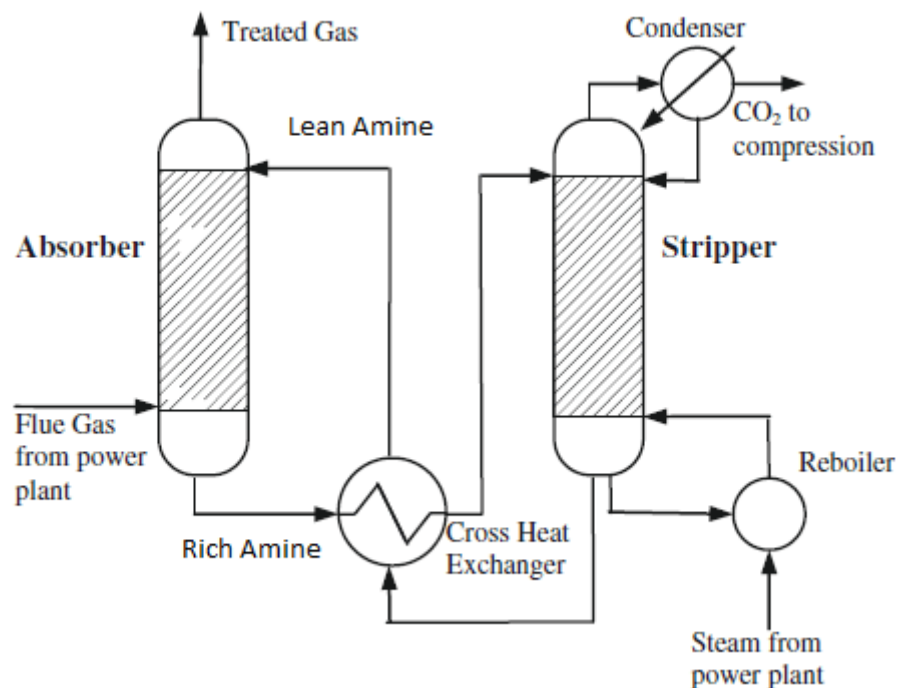
Η φυσική και χημική απορρόφηση είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία για την δέσμευση και το διαχωρισμό του CO<sub>2</sub>. Η διαδικασία αυτή διέπεται από το νόμο του Henry, είναι δηλαδή εξαρτώμενη από την θερμοκρασία και την πίεση, με την απορρόφηση να συμβαίνει σε χαμηλή θερμοκρασία και σε υψηλή πίεση. Η φυσική και χημική απορρόφηση χρησιμοποιείται όταν η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> είναι σε υψηλή πίεση (>525 kPa). Σε απομακρυσμένες περιοχές μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα με τη χρήση αμινών μέσα σε φρεάτια φυσικού αερίου με την απομάκρυνση να κυμαίνεται από 0,1 έως 6% CO<sub>2</sub>. Οι συμβατικού τύπου διαλύτες για φυσική απορρόφηση απαρτίζονται από ενώσεις που έχουν ως βάση τη γλυκόλη (π.χ. τον διμεθυλαιθέρα της πολυαιθυλενογλυκόλης) και τη ψυχρή μεθανόλη και είναι κατάλληλες σε εμπορικές εφαρμογές [13].

Η κατάλληλη χρήση της χημική απορρόφησης βρίσκεται ενδιάμεσα των χαμηλών και μέτριων μερικών πιέσεων CO<sub>2</sub>. Η απορρόφηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας βασικούς διαλύτες, με τις συνηθισμένες να είναι οι αλκανολαμίνες. Οι χημικού διαλύτες με βάση τις αλκανολαμίνες θεωρούνται οι καλύτεροι χημικού διαλύτες για μερική πίεση CO<sub>2</sub> από 3,5 έως 21kPa. Εκτός από τις αλκανολαμίνες χρησιμοποιούνται τόσο οι αμμωνία όσο και το ζεστό ανθρακικό. Σε κάθε περίπτωση η χρήση αυτών των διαλυτών θα πρέπει να εξισορροπείται

έναντι της ενέργειας που θα πρέπει να καταναλώσουμε προκειμένου να ανανεώσουμε αυτούς τους διαλύτες μέσω της χρήσης ατμού.

Η ικανότητα απορρόφησης των αμινών μειώνεται λόγω της παρουσίας ακαθαρσιών που βρίσκονται στα καυσαέρια, όπως SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, υδρογονάνθρακες και σωματίδια. Σε ορισμένες εμπορικές διεργασίες αυτοί οι ρύποι αντιμετωπίζονται μέσω της προεπεξεργασίας ή/και της χρήσης χημικών αναστολέων στη διαδικασία απορρόφησης προκειμένου οι ρύποι να έρθουν σε αποδεκτά επίπεδα και να αποφευχθούν διάφορα προβλήματα, όπως η διάβρωση.

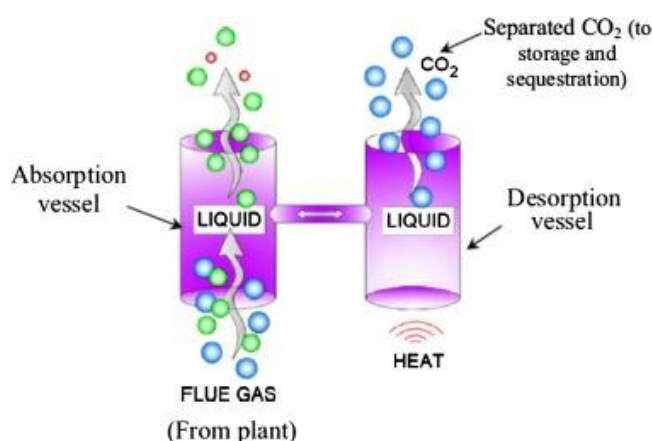
Μερικά από τα τυπικά λειτουργικά προβλήματα έχουν σχετικά μικρή επίδραση στο συνολικό κόστος κατά τη χρήση των αλκανολαμινών είναι το άφρισμα, η παγίδευση ατμών και η ανάγκη για να συμπλήρωση του διαλύτη όταν οι ποσότητες είναι χαμηλές. Κι αυτό γιατί οι επαφές μεμβρανών που χρησιμοποιούνται είναι πολυμερείς και προσφέρουν περισσότερα πλεονεκτήματα από τους συμβατικούς διαλύτες τα οποία αναμένεται να είναι μεγαλύτερα όπου το βάρος και το μέγεθος του συστήματος πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. (π.χ. σε πλατφόρμες ωκεανών). Στο παρακάτω απλοποιημένο διάγραμμα (Εικόνα 15) περιγράφεται η διαδικασία της χημικής απορρόφησης του CO<sub>2</sub> μετά τη καύση [13].



Ει κ ό ν α 14 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής διεργασίας διαδικασίας χημικής απορρόφησης για CO<sub>2</sub> μετά την καύση  
Πηγή: [Carbon Sequestration research and development \(U.S. Department of Energy Report, Office of Science, Office of Fossil Energy\)](#)

## 12.4 Φυσική και Χημική Προσρόφηση

Στον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> με φυσική προσρόφηση, η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε στερεά υψηλής επιφάνειας στα οποία η μεγάλη επιφάνεια προκύπτει από τη δημιουργία πολύ λεπτού πορώδους επιφάνειας μέσω μεθόδων ενεργοποίησής της χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα, ατμό, οξυγόνο ή CO<sub>2</sub>. Ορισμένα φυσικά υλικά (π.χ. ζεόλιθοι) έχουν μεγάλες επιφάνειες και απορροφούν αποτελεσματικά ορισμένα αέρια. Οι ικανότητες και η κινητική προσρόφησης διέπονται από πολλούς παράγοντες όπως το μέγεθος των πόρων του προσροφητικού, ο όγκος των πόρων, η επιφάνεια και η συγγένεια του προσροφημένου αερίου για το προσροφητικό. Στην εικόνα 15 φαίνεται με σχηματική απεικόνιση η φυσική απορρόφηση του CO<sub>2</sub> με χρήση ανθρακούχων και μη ανθρακούχων προσροφητικών [13].



Ει κ ό ν α 15 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής διεργασίας διαδικασίας χημικής απορρόφησης για CO<sub>2</sub> μετά την καύση  
Πηγή: [Carbon Sequestration research and development \(U.S. Department of Energy Report, Office of Science, Office of Fossil Energy\)](#)

Σε μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το Παγκόσμιο Οργανισμό Ενέργειας πάνω σε συστήματα φυσικής προσρόφησης που βασίζονται σε ζεόλιθους, που λειτουργούν με τρόπους προσρόφησης υπό πίεση (PSA) και θερμοκρασιακής προσρόφησης (TSA). Στη λειτουργία PSA τα αέρια προσροφούνται σε υψηλές πιέσεις, απομονώνονται και στη συνέχεια εκροφούνται μειώνοντας την πίεση. Στη TSA λειτουργία τα αέρια απορροφώνται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, απομονώνονται και στη συνέχεια εκροφούνται με θέρμανση. Αν και τα παραπάνω πειράματα αποδείχθηκαν ότι καταναλώνουν υψηλά ποσά ενέργειας κατά τη λειτουργία τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ο PSA και το TSA είναι μέθοδοι διαχωρισμού και δέσμευσης αερίων που εφαρμόζονται στο εμπόριο και χρησιμοποιούνται σε κάποιο βαθμό στην παραγωγή υδρογόνου και στην απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από φυσικό αέριο κατώτερης ποιότητας. Σε πηγές με υψηλό δείκτη εκπομπών CO<sub>2</sub> οι παραπάνω μέθοδοι διαχωρισμού και δέσμευσης βρίσκουν μεγάλο ποσοστό εφαρμογής.



## 12.5 Απόσταξη σε χαμηλή θερμοκρασία

Ήδη η συγκεκριμένη μέθοδος της απόσταξης σε χαμηλή θερμοκρασία χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό και την υγροποίηση του CO<sub>2</sub> σε εκπομπές που φέρουν ποσοστό >90%. Κατά τη διαδικασία της απόσταξης σε χαμηλή θερμοκρασία ένα υγρό με χαμηλό σημείο ζέσεως καθαρίζεται μέσω της διαδικασίας της εξάτμισης και στη συνέχεια συμπυκνώνεται. Ωστόσο, τέτοιου είδους διεργασία δεν χρησιμοποιείται σε ρεύματα με μικρότερο ποσοστό CO<sub>2</sub>. Για φτωχά ποσοστά CO<sub>2</sub> απαιτείται ψύξη σε χαμηλή θερμοκρασία (<0°C) και επεξεργασία στερεών κάτω από το τριπλό σημείο του CO<sub>2</sub> (-57°C) [13].

Η διαδικασία της απόσταξης είναι πιο οικονομική όταν χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας. Επίσης, όταν στο αέριο εμπεριέχονται και άλλα συστατικά με διαφορετικά σημεία βρασμού τότε αυτά καθιστούν την απόσταξη πιο αποδοτική σε υψηλή πίεση. Το υγρό CO<sub>2</sub> μπορεί να αποθηκευτεί ή να απομονωθεί σε υψηλή πίεση μέσω άντλησης. Γεγονός που καθιστά την απόσταξη σε χαμηλή θερμοκρασία ακόμα πιο πλεονεκτική. Εκτός, όμως, από πλεονεκτήματα η διαδικασία της αυτή έχει και μειονεκτήματα. Ένα από τα μειονεκτήματα είναι η ύπαρξη εξαρτημάτων που έχουν σημεία πήξης διαφορετικό από τις κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας. Σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να απομακρυνθούν πριν τη ψύξη του ρεύματος αερίου προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε φραγή στο σύστημα εξοπλισμού διεργασίας. Επίσης, κατά τη διαδικασία της ψύξης απαιτούνται υψηλά ποσά ενέργειας, πράγμα που δυσχεραίνει τη μέθοδο της απόσταξης σε χαμηλή θερμοκρασία.

Άλλος ένας παράγοντας στον οποίο η διαδικασία απόσταξης σε χαμηλή θερμοκρασία υστερεί είναι ότι δεν είναι κατάλληλος για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> μέσω της διαδικασίας της καύσης. Αυτό συμβαίνει λόγω των παραπροϊόντων που παράγονται, συνήθως κοντά στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής πίεσης, όπως τα υποπροϊόντα καύσης, το NO<sub>x</sub> και το SO<sub>x</sub>, τα οποία παράγονται συνήθως κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Επίσης, για να πραγματοποιηθεί η ψύξη σε χαμηλή θερμοκρασία χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας και, σε συνδυασμό με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, η απόσταξη γίνεται λιγότερο οικονομική από άλλους τρόπους δέσμευσης και διαχωρισμού CO<sub>2</sub>. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι η χρήση της μεθόδου της απόσταξης σε χαμηλή θερμοκρασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν οι πηγές τροφοδοσίας βρίσκονται υπό υψηλή πίεση και οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> είναι μεγάλες (π.χ. φρεάτια αερίου) [13].



## 12.6 Μεμβράνες Διαχωρισμού Αερίων

Οι μεμβράνες διαχωρισμού αερίων είναι πολλών διαφορετικών τύπων, και παρόλο που έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα μόνο μερικών από αυτούς τους τύπους στον διαχωρισμό και τη δέσμευση CO<sub>2</sub>, οι δυνατότητές τους γενικά θεωρούνται πολύ καλές. Υπάρχουν ποικίλοι μηχανισμοί διάχυσης μεμβρανών και διάφορων τύπων για κάθε χρήση και η λειτουργία του μηχανισμού πραγματοποιείται όταν το αέριο αλληλοεπιδρά με τη μεμβράνη (εικόνα 16). Γενικά οι πολυμερείς μεμβράνες έχουν μεγάλοι αποτελεσματικότητα αλλά ένα από τα μειονεκτήματά τους είναι ότι διαβρώνονται εύκολα και δεν επιτυγχάνουν υψηλή ροή κατά τη μεταφορά του αερίου. Ωστόσο, οι πολυμερείς μεμβράνες είναι φθηνές και μπορούν να επιτύχουν μεγάλες αναλογίες επιφάνειας μεμβράνης προς όγκο μονάδας [13].

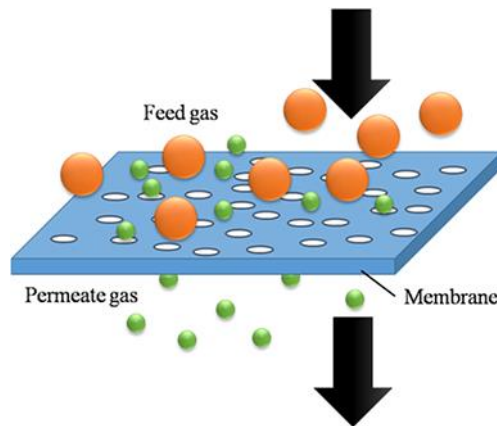
Εκτός από τις πολυμερείς μεμβράνες υπάρχουν και οι μεμβράνες παλλαδίου, οι οποίες μπορούν να διαχωρίσουν αποτελεσματικά H<sub>2</sub> από το CO<sub>2</sub>, αλλά τα αρνητικά τους είναι ότι οι ροές αερίων είναι συνήθως πολύ χαμηλές και το παλλάδιο είναι ευπαθές σε περιβάλλον που περιέχει θείο. Οι πορώδεις ανόργανες μεμβράνες, μεταλλικές ή κεραμικές, είναι ιδιαίτερα ελκυστικές λόγω των πολλών εναλλαγών ροής που χρησιμοποιούν για τη μεγιστοποίηση του συντελεστή διαχωρισμού για διάφορους διαχωρισμούς αερίων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η διαπερατότητά τους είναι μεγαλύτερη ακόμα και έως 10.000 φορές από τις πολυμερείς μεμβράνες. Ωστόσο, το κόστος για τις ανόργανες μεμβράνες είναι υψηλό και ο λόγος της επιφάνειας της μεμβράνης προς τον όγκο της μονάδας είναι 100 έως 1000 φορές μικρότερο από αυτό των πολυμερών μεμβρανών. Έτσι, οι διαφορές των δύο μεμβρανών τείνουν να εξομοιωθούν. Ο κύκλος ζωής της ανόργανης μεμβράνης γενικά είναι πολύ μεγαλύτερος. Μερικά από τα χαρακτηριστικά τους είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα και ότι είναι λιγότερο επιρρεπείς σε ρύπανση, ενώ οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες δεν αποτελούν εμπόδιο στη λειτουργία τους. Τέτοια χαρακτηριστικά δεν μπορούν να δεν εμφανίζονται στις πολυμερείς μεμβράνες.

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε το μοριακό κοσκίνισμα που πραγματοποιείται με τη χρήση υλικών όπως ο ζεόλιθος. Τέτοιου είδους μεμβράνες, όμως, κοστίζουν ακριβά, καθώς η κατασκευή τους είναι δύσκολη, ενώ ταυτόχρονα η διαπερατότητα δεν είναι η επιθυμητή

Οι ανόργανες μεμβράνες μπορούν να έχουν διάμετρο  $\geq 0.5$  nm. Οι μεμβράνες μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά, ενώ παράλληλα βελτιώνεται η διαπερατότητα και η

διαχωριστική ικανότητα. Η λειτουργία που μας ενδιαφέρει περισσότερο μέσω της χρήσης ανόργανων μεμβρανών είναι το μοριακό κοσκίνισμα. Μέσω του μοριακού κοσκίνισματος επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός μικρών μορίων από μεγαλύτερα αλλά και το αντίθετο. Αυτό το στοιχείο μας ενδιαφέρει καθώς θα επιτρέψει στο αέριο να διατηρήσει τη πίεση του, σε όλες τις πλευρές της μεμβράνης. Σε συνθήκες λειτουργίας η πίεση του επιθυμητού αερίου θα πρέπει να έχει μία κλίση κατά τη ροή μέσω της μεμβράνης και αυτό θα πρέπει να συμβεί για να έχουμε την επιθυμητή ποσότητα ανάκτησης κατά το διαχωρισμό [13].

Για κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας μπορούμε να κατασκευάσουμε μια ανόργανη μεμβράνη η οποία θα επιτυγχάνει το διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> από οποιοδήποτε αέριο. Για διάφορα μείγματα αερίων θα πρέπει να κατασκευαστούν πολλές μεμβράνες με διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να επιτευχθεί ο διαχωρισμός και η δέσμευση του CO<sub>2</sub> υψηλής καθαρότητας.

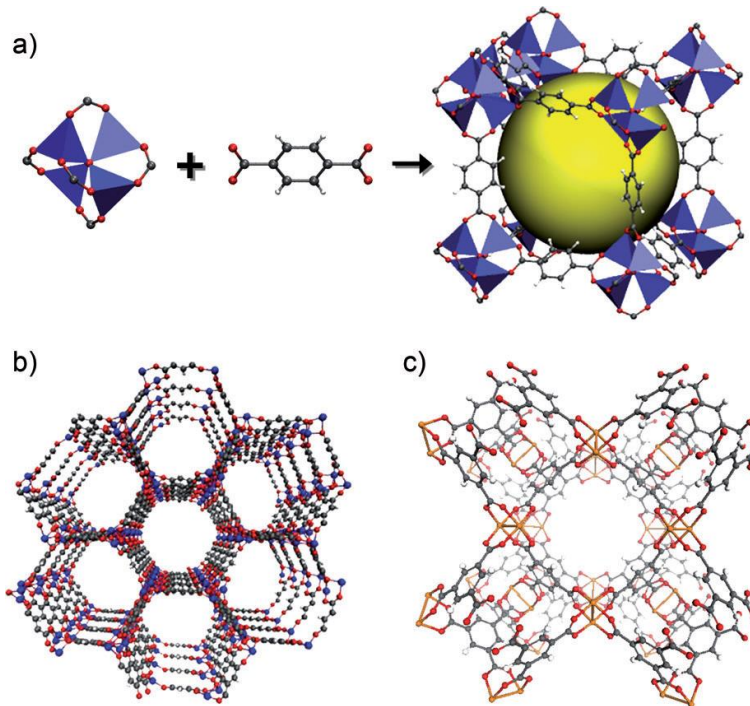


Ει κ ό ν α 16 Τεχνολογία διαχωρισμού μεμβράνης στη δέσμευση άνθρακα

Πηγή: [Carbon Sequestration research and development \(U.S. Department of Energy Report, Office of Science, Office of Fossil Energy\)](#)

## 12.7 Η χρήση μεταλλικών οργανικών πλαισίων ως νέα πορώδη υλικά για διαχωρισμό και δέσμευση CO<sub>2</sub>

Εκτός από τα παραπάνω είδη μεμβρανών, αξίζει να δώσουμε σημασία σε μια νέα κατηγορία υλικών, τα μεταλλικά οργανικά πλαίσια (MOFs) που είναι γνωστά και ως πορώδη πολυμερή συντονισμού, που προσφέρουν μοναδικές ιδιότητες σε σχέση με αυτά που ήδη αναφέραμε καθώς έχουν επιφάνεια έως  $6200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  και πορώδες έως 90%, ενώ επίσης έχουν χαμηλή κρυσταλλική πυκνότητα με υψηλές αντοχές σε θερμικές και χημικές μεταβολές. Τα MOF αποτελούνται από μέταλλα ή οξειδίου μετάλλου που συνδέονται με οργανικούς συνδετήρες και συντίθενται σε μια διαδικασία αυτοσυναρμολόγησης από αυτά τα καλά καθορισμένα δομικά στοιχεία. Το κύριο πλεονέκτημα των MOF έναντι των πιο παραδοσιακών πορώδων υλικών, όπως οι ζεόλιθοι ή οι προσροφητές με βάση τον άνθρακα, είναι το μεγαλύτερο περιθώριο προσαρμογής αυτών των υλικών για συγκεκριμένες εφαρμογές λόγω της αρθρωτής σύνθεσης. Επιλέγοντας κατάλληλα δομικά στοιχεία, στερεά με κοιλότητες προκαθορισμένων σχημάτων και λειτουργιών μπορούν να δημιουργηθούν για να παρέχουν βέλτιστες αλληλεπιδράσεις ξενιστή/επισκέπτη. Η πορώδης ιδιότητα των MOF που είναι καταγεγραμμένα στη βάση δεδομένων του Cambridge Structural Database (CSD) παραμένει ακόμα και μετά την αφαίρεση του διαλύτη. Ωστόσο, αυτό είναι μόνο ένα μικρό κλάσμα υλικών που μπορεί να φανταστεί κανείς λόγω της μεγάλης ποικιλίας πιθανών συνδετήρων και γωνιακών μονάδων και της δυνατότητας τροποποίησης των MOF μετά τη σύνθεσή τους. Η οικογένεια των MOFs περιλαμβάνει υποσύνολα όπως ισοθετικά MOFs (IRMOFs) (εικόνα 17), ζεολιθικά μιδαζολικά πλαίσια (ZIF) και ζεόλιθους MOFs (ZMOFs). Στα παραπάνω εντάσσονται και τα ομοιοπολικά οργανικά πλαίσια (COF) καθώς και τα πορώδη οργανικά πολυμερή (POPs) αφού κατασκευάζονται από προσεγγίσεις δομικών στοιχείων [14].



Ει κ ό ν α 17 α) Συναρμολόγηση ενός MOF (IRMOF-1) με τη σπονδυλωτή σύνθεση γωνιών μεταλλικού οξειδίου (Zn<sub>4</sub>O) και οργανικών συνδετήρων (βενζολοδικαρβοξυλικό οξύ), β) Mg-MOF-74 και γ) HKUST-1.

Πηγή: [Adsorption of Carbon Dioxide on Chemically Modified High Surface Area Carbon-Based Adsorbents at High Temperature \(Zou Yong, Vera G. Mata, Alirio E. Rodrigues\)](#)

## 12.8 Τρόποι βελτίωσης των MOF για το διαχωρισμό και τη δέσμευση CO<sub>2</sub>

Αξίζει να αναφερθεί ότι πραγματοποιούνται αρκετές προσπάθειες ώστε να βελτιωθούν οι ικανότητες προσρόφησης του CO<sub>2</sub> μέσω των MOF. Σε αυτή τη παράγραφο θα αναπτύξουμε ορισμένες κατηγορίες που βάση των στρατηγικών που ακολουθούνται στη χρήση των MOF [14].

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τις διαδικασίες διαχωρισμού με προσρόφηση αερίου από μικροπορώδη υλικά είναι το μέγεθος των πόρων. Το μέγεθος αυτών των πόρων θα πρέπει να έχει συγκεκριμένες κινητικές διαμέτρους (π.χ. CO<sub>2</sub>: 3,3, CH<sub>4</sub>: 3,8), ώστε να μπορεί κανείς να διαχωρίσει το αέριο με ένα φαινόμενο μοριακού κοσκινίσματος (ή ένα στερεοχημικό αποτέλεσμα). Εάν οι πόροι έχουν το σωστό μέγεθος, μόνο το μικρότερο μόριο (CO<sub>2</sub>) μπορεί να διαχέεται στους πόρους, ενώ το μεγαλύτερο μόριο (όπως πχ το CH<sub>4</sub>) αποκλείεται εντελώς. Μέσω της διαφοράς στους ρυθμούς διάχυσης μπορούμε να επιτύχουμε κινητικό διαχωρισμό ο οποίος είναι κατάλληλος στη περίπτωση που η κινητική διάμετρος του μορίου είναι μεγαλύτερη από τους πόρους της μεμβράνης. Σε αυτή την περίπτωση, το

μεγαλύτερο μόριο ( $\text{CH}_4$ ) διαχέεται πιο αργά από το μικρότερο μόριο ( $\text{CO}_2$ ). Όταν το μέγεθος των πόρων είναι αρκετά μεγάλο ώστε και τα δύο μόρια να μπορούν να διαχέονται εύκολα στους πόρους, τα δύο μόρια μπορεί να διαχωριστούν από διαφορές στην ισορροπία προσρόφησής τους, η οποία χρησιμοποιείται στη μεγάλη πλειονότητα των διαδικασιών προσροφητικού διαχωρισμού. Ακόμη και για διαδικασίες διαχωρισμού που βασίζονται σε διαφορές στην προσρόφηση ισορροπίας, το μέγεθος των πόρων μπορεί να παίζει ρόλο στην υπαγόρευση της ποσότητας που προσροφάτε. Όταν το μέγεθος των πόρων είναι πολύ μεγάλο, τότε δεν έχουμε την αναμενόμενη απόδοση κατά τον διαχωρισμό των αερίων.

Αρκετά MOF έχουν επιδείξει επιλεκτική προσρόφηση  $\text{CO}_2$  έναντι του  $\text{N}_2$  ή του  $\text{CH}_4$  μέσω του μοριακού κοσκινίσματος και μερικά MOF έχουν επιδείξει επιλεκτική προσρόφηση  $\text{CO}_2$  από το φαινόμενο κινητικού διαχωρισμού. Εκτός από αυτές τις περιπτώσεις, οι περισσότερες αναφορές επιλεκτικής προσρόφησης  $\text{CO}_2$  σε MOF οφείλονται σε διαφορές στην προσρόφηση ισορροπίας, στις οποίες οι σχετικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του προσροφημένου υλικού ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  ή  $\text{N}_2$ ) και των ατόμων MOF είναι πιο σημαντικές [14].

Τα άτομα μετάλλων στα περισσότερα MOF είναι συντονισμένα κορεσμένα από συστατικά πλαισίου, αλλά σε ορισμένα MOF τα άτομα μετάλλου συντονίζονται εν μέρει από μόρια φιλοξενούμενου διαλύτη. Για την αφαίρεση αυτών των κορεσμένων μορίων το υλικό θερμαίνεται, πραγματοποιώντας, όμως, αυτή τη διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ακόρεστα μεταλλικά μόρια μέσα στους πόρους των MOF. Αυτές οι ανοιχτές μεταλλικές θέσεις έχουν μελετηθεί ευρέως για τη βελτίωση της αποθήκευσης  $\text{H}_2$  σε MOF και την αύξηση της θερμότητας προσρόφησης ( $Q_{st}$ ) του  $\text{H}_2$ . Έχει επίσης αποδειχθεί ότι είναι πολλά υποσχόμενα για βελτιωμένη δέσμευση και διαχωρισμό  $\text{CO}_2$ . Για παράδειγμα, η σύγκριση των επιλεκτικότητων  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  μεταξύ MOF με βάση το καρβοράνιο με και χωρίς ανοιχτές μεταλλικές θέσεις, και τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι ανοιχτές μεταλλικές θέσεις σε ένα MOF μπορούν να βοηθήσουν στο διαχωρισμό (τετρα)πολικών/μη πολικών ζευγών όπως  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ . Τα MOF έχουν δείξει επιλεκτική προσρόφηση  $\text{CO}_2$  έναντι του  $\text{N}_2$  ή του  $\text{CH}_4$  μέσω του μοριακού κοσκινίσματος και μερικά MOF έχουν επιδείξει επιλεκτική προσρόφηση  $\text{CO}_2$  από το φαινόμενο κινητικού διαχωρισμού. Εκτός από αυτές τις περιπτώσεις, οι περισσότερες αναφορές επιλεκτικής προσρόφησης  $\text{CO}_2$  σε MOF οφείλονται σε διαφορές στην προσρόφηση ισορροπίας, στις οποίες οι σχετικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του προσροφημένου υλικού ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  ή  $\text{N}_2$ ) και των ατόμων MOF είναι πιο σημαντικές.

Εμφανίστηκε μια σειρά από ισοδομικά πλαίσια  $[\text{M}_2(\text{dhtp})(\text{H}_2\text{O})_2]$  ( $\text{H}_4\text{dhtp}$ : 2,5-δωδροξυτερεφθαλικό οξύ.  $\text{M}=\text{Zn}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Mn}$ ) με 1D-εξαγωνικά κανάλια περίπου 11

έως 12 Å (Ωγκοστρεμ) να έχει υψηλές συγκεντρώσεις ανοιχτών μεταλλικών θέσεων μετά την αφαίρεση συντονισμένων μορίων H<sub>2</sub>O. Αυτά τα MOF ονομάζονται επίσης M-MOF-74, CPO-27-M, και M/dobdc (dobdc<sup>4-</sup> = 2,5-διοξειδο-1,4-βενζολοδικαρβοξυλικό). Το προτέρημα της συγκεκριμένης σειράς MOF είναι ότι επιτυγχάνουν υψηλή προσρόφηση CO<sub>2</sub> σε πιέσεις της τάξεως (0,1-0,2 bar), περιοχή όπου κυμαίνονται τα καυσάερια. Επίσης, αυτά τα MOF έχουν υψηλές τιμές Q<sub>st</sub> για το CO<sub>2</sub> (37–47 kJmol<sup>-1</sup>), γεγονός που υποδηλώνει προτιμησιακή προσρόφηση CO<sub>2</sub> σε ανοιχτές μεταλλικές τοποθεσίες. Για να επιβεβαιωθεί αυτό, ελήφθη μια μονοκρυσταλλική δομή ακτίνων X CO<sub>2</sub> συνδεδεμένη στις ανοιχτές μεταλλικές θέσεις στο Ni-MOF-74, η οποία δείχνει ξεκάθαρα τον ρόλο των ανοιχτών μεταλλικών θέσεων στη δέσμευση CO<sub>2</sub>. Ως εκ τούτου, αυτά τα MOF θεωρούνται μερικά από τα πιο πολλά υποσχόμενα MOF για δέσμευση και διαχωρισμό CO<sub>2</sub>. Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτών των MOF είναι ότι μπορούν να κατασκευαστούν με διαφορετικά μέταλλα. Μεταξύ αυτής της σειράς, το MOF με Mg έδειξε την υψηλότερη πρόσληψη CO<sub>2</sub> καθώς και την υψηλότερη τιμή Q<sub>st</sub> για το CO<sub>2</sub>. Σημειώθηκε ότι ένας λόγος για τον οποίο τα MOF M-MOF-74 εμφανίζουν καλύτερη προσρόφηση CO<sub>2</sub> από άλλα MOF που περιέχουν ανοιχτές μεταλλικές θέσεις είναι η υψηλότερη πυκνότητα ανοιχτές μεταλλικές τοποθεσίες στο M-MOF-74. Πολλά άλλα MOF με ανοιχτές μεταλλικές θέσεις έχουν επίσης δείξει σημαντικές επιλεκτικότητες CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> ή CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, αν και δεν εμφανίζουν τόσο υψηλές προσλήψεις CO<sub>2</sub> όπως παρατηρούνται στο M-MOF-74 [14].

## 12.9 Εκτίμηση των MOF για διαχωρισμό και δέσμευση CO<sub>2</sub>

Ο καλύτερος τρόπος για προκειμένου να αξιολογήσουμε τα MOF στη λειτουργία του διαχωρισμού και δέσμευσης του CO<sub>2</sub> είναι η δοκιμή των υλικών υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Για να πάρουμε αξιόλογα αποτελέσματα θα πρέπει να κατασκευάσουμε ένα ειδικό πειραματικό σύστημα όπου θα μετράμε το εκάστοτε MOF πάνω στη δυναμική της στήλης του. Οι μετρήσεις των ισοθερμικών μιγμάτων ισορροπίας ακούγονται απλές αλλά είναι κουραστικές στην πράξη και απαιτούν πρόσθετες μετρήσεις για τον προσδιορισμό της σύνθεσης τόσο των αερίων όσο και των προσροφημένων φάσεων. Έτσι, μέχρι τώρα, οι περισσότερες μελέτες για το διαχωρισμό και τη δέσμευση CO<sub>2</sub> με χρήση MOFs παράγουν ισόθερμα μονοσυστατικό CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>. Μέχρι σήμερα, έχει αναφερθεί μεγάλος αριθμός ισόθερμου CO<sub>2</sub> μονού συστατικού σε MOF υπό συνθήκες περιβάλλοντος [14].



Κατά την αξιολόγηση των MOF πάνω σε διεργασίες PSA θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η χρήση των MOF για τη δέσμευση και το διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> δεν αποτελεί αξιόπιστη διαδικασία για την εκτίμηση των δεδομένων. Αν και η αξιοποίησή τους για τη λειτουργία της προσρόφησης του CO<sub>2</sub> είναι αρκετά υποσχόμενη, δεν είναι αρκετή όταν τα MOF καλούνται να λειτουργήσουν υπό συνθήκες πραγματικής πίεσης ή όταν βρίσκονται σε συνθήκες κενού.

Η επιλεκτικότητα προσρόφησης του συστατικού 1 (το οποίο είναι και το πιο ισχυρά απορροφούμενο συστατικό) έναντι του συστατικού 2 ( $\alpha_{12}$ ), που ορίζεται ως η αναλογία των προσλήψεων ισορροπίας στον πόρο προς την αναλογία των μοριακών κλασμάτων της χύδην φάσης, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως κριτήριο αξιολόγησης προσροφητή για διάφορες διεργασίες διαχωρισμού. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προκειμένου να καθορίσουμε την επιλεκτικότητα προσρόφησης των MOF, μια από αυτές είναι και ο λόγος σταθερών του νόμου του Henry. Για να χρησιμοποιηθεί, όμως, ο νόμος του Henry θα πρέπει το μείγμα να βρίσκεται σε πολύ χαμηλή πίεση, ενώ το προσροφητικό θα πρέπει επίσης να είναι σε χαμηλή φόρτιση. Μια καλύτερη προσέγγιση της επιλεκτικότητας μπορεί να ληφθεί από τη θεωρία ιδανικών προσροφημένων λύσεων (IAST). Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται από περιορισμένο αριθμό ερευνητικών ομάδων [14].

Η επιλεκτικότητα της προσρόφησης δεν είναι, όμως, το τέλειο εργαλείο προκειμένου να εκτιμήσουμε την αποδοτικότητα του προσροφητικού, καθώς δεν εμπεριέχουν τις κυκλικές διαδικασίες PSA και VSA. Σε αυτές τις παραμέτρους θα πρέπει να προστεθεί και η ικανότητα εργασίας,  $\Delta N$ , η οποία ερμηνεύεται ως η διαφορά μεταξύ των προσροφημένων ποσοτήτων στην πίεση προσρόφησης και εκρόφησης, ενώ υπολογίζεται από τα δεδομένα προσρόφησης μείγματος. Αφού, όμως, μιλάμε για πειραματικές μετρήσεις, τότε η μέτρηση της ικανότητας εργασίας λαμβάνεται βάση ισόθερων διαδικασιών μονού συστατικού.

Προτάθηκε η μέθοδος της Προσρόφησης Αξίας (AFM), η οποία προέκυψε εμπειρικά για το διαχωρισμό του αζώτου από τον αέρα. Αυτό το AFM ορίζεται ως  $(\alpha_{12}^{ads})^2/(\alpha_{12}^{des})$  πολλαπλασιαζόμενο επί την ικανότητα αζώτου εργασίας ( $\Delta N_1$ ). Η χρήση του όρου  $(\alpha_{12}^{ads})^2/(\alpha_{12}^{des})$  μπορεί να οφείλεται στο ότι η επιλεκτικότητα κατά τη διάρκεια του σταδίου προσρόφησης ( $\alpha_{12}^{ads}$ ) είναι πιο σημαντική από ό,τι κατά το στάδιο εκρόφησης ( $\alpha_{12}^{des}$ ).

Επίσης, αναφέρεται και μια παράμετρος επιλογής ροφητή,  $S$ , που αποτελεί τον συνδυασμό της επιλεκτικότητας προσρόφησης και της ικανότητας εργασίας:  $S=(\Delta N_1/\Delta N_2)\alpha_{12}$ . Στον προηγούμενο τύπο χρησιμοποιήσαμε την ικανότητα εργασίας του ισχυρού προσροφημένου υλικού, καθώς αυτό αποτελεί αντικείμενο αξιολόγησης μιας

κυκλικής διαδικασίας PSA και VSA. Η προσρόφηση  $\alpha_{12}$ , δεν είναι τίποτα άλλο από την αναλογία των σταθερών του νόμου του Henry ή αλλιώς η αναλογία των αρχικών κλίσεων των ισόθερων συνιστωσών. Ωστόσο, το  $\alpha_{12}$  θα πρέπει να αντικατασταθεί από το  $(\alpha_{12}^{ads})^2/(\alpha_{12}^{des})$ , όπως δίνεται από το AFM από την προηγούμενη παράγραφο [14].

## **12.10 Σχέσεις μεταξύ των ιδιοτήτων προσροφητικού και των ικανοτήτων διαχωρισμού CO<sub>2</sub>**

Για όλες τις περιπτώσεις, δεν μπορέσαμε να βρούμε καμία ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των καθαρά δομικών ιδιοτήτων (μέγεθος πόρων, επιφάνεια και όγκος πόρων) όλων των προσροφητικών κριτηρίων. Αυτές οι παρατηρήσεις συμφωνούν με μια πρόσφατη πειραματική μελέτη. Στη μελέτη αναφέρεται η επίδραση του μεγέθους των πόρων και των λειτουργικών ομάδων στις διαδικασίες διαχωρισμού CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> σε μια σειρά πλαισίων ζεολιθικού ιμιδαζολικού (ZIFs). Αναφέρθηκε ότι η εκλεκτικότητα του CO<sub>2</sub> δεν έχει κάποια αξιοσημείωτη σχέση με τη διάμετρο των πόρων αλλά μάλλον με τις λειτουργικές ομάδες. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε πάνω σε 14 διαφορετικά MOF, παρατηρήθηκε ότι κατά την δέσμευση CO<sub>2</sub> σε πίεση μικρότερης του 1 bar δε υπήρξε διαφορετική μεταβολή ανάμεσα στην επιφάνεια και τον ελεύθερο όγκο [14].

Βάση των μελετών που πραγματοποιήθηκαν βρέθηκε αρκετές συσχετίσεις μεταξύ της θερμότητας της προσρόφησης της συνάρτησης φόρτισης στη τιμή της χαμηλότερης φόρτισης (Q<sub>st</sub>) του CO<sub>2</sub> και των κριτηρίων αξιολόγησης του προσροφητή. Μέσω της θερμότητας που παράχθηκε λόγω της χαμηλής φόρτισης μπορούμε να παρατηρήσουμε της αλληλεπιδράσεις μεταξύ του CO<sub>2</sub> και του ροφητή. Αντίθετα η δυνατότητα επαναφοράς (R) παίρνει αρνητικές τιμές σε σχέση με τη τιμή Q<sub>st</sub>. Αυτό είναι λογικό γιατί, καθώς αυξάνεται η τιμή Q<sub>st</sub>, επιτυγχάνονται πιο απότομες ισόθερμες αντιδράσεις CO<sub>2</sub> σε χαμηλές πιέσεις. Στην περίπτωση των ισόθερων αντιδράσεων παρατηρείται μία αύξηση στη προσρόφηση του CO<sub>2</sub> στις συνθήκες προσρόφησης, ωστόσο στις συνθήκες εκρόφησης παραμένει περισσότερο CO<sub>2</sub> στους πόρους. Ως εκ τούτου, η δυνατότητα επαναφοράς μειώνεται με την αύξηση της τιμής Q<sub>st</sub>. Καθώς η τιμή N<sub>1</sub> δείχνει μια ασθενή θετική συσχέτιση με την τιμή Q<sub>st</sub>, μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι βέλτιστες τιμές Q<sub>st</sub> μπορεί να υπάρχουν για τη λήψη μιας υψηλής τιμής N<sub>1</sub> με μια λογική τιμή αναγέννησης (R) [14].

## 12.11 Επιστημονικά και Τεχνολογικά Κενά

Οι παραπάνω διαδικασίες διαχωρισμού και κατακράτησης CO<sub>2</sub> διέπονται από τεχνολογικά κενά, τα οποία εμποδίζουν την εφαρμογή τους, καθώς είναι επιζήμιες είτε οικονομικά είτε ενεργειακά. Παρακάτω, γίνεται μία αναφορά σε διάφορες μελέτες έρευνας και ανάπτυξης για κάθε διαδικασία προκειμένου να καλύψουμε κάποια από τα κενά και να καταστήσουμε δυνατή την εφαρμογή τους [15].

Εκτός από τη δέσμευση και το διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και την επεξεργασία λοιπών ιχνοστοιχείων που συναντάμε στα ορυκτά καύσιμα όπως ο υδράργυρος. Έτσι, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι στρατηγικές και οι μέθοδοι για ανάκτηση του CO<sub>2</sub> δε θα έχουν τις ίδιες αποδόσεις παρουσία αυτών των ιχνοστοιχείων. Άλλο ένα πρόβλημα παρουσιάζεται και κατά τη χρήση των τρεχουσών τεχνολογιών μιας και χρειάζεται η προσφορά ενέργειας προκειμένου να λειτουργήσει η διαδικασία της δέσμευσης και του διαχωρισμού. Πρέπει να αναπτυχθούν καλύτερες επιλογές για τη μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος για την δέσμευση CO<sub>2</sub>.

Πιο συγκεκριμένα, χρειάζεται η ανάπτυξη μεμβρανών που θα βελτίωση τις χημικές συμβατότητες με τις αλκανολαμίνες και καλύτερη αντοχή στην υψηλή θερμοκρασία καθώς και μικρότερο κόστος. Οι συμβατικές αλκανολαμίνες όπως οι MEA, DEA και MDEA διαφοροποιούνται ανάλογα με το κόστος, τους ρυθμούς επεξεργασίας CO<sub>2</sub>, τις απορροφητικές και διαβρωτικές ικανότητες. Ακόμη, η συνεχής βελτίωση των ήδη υπάρχων τεχνολογιών ή ακόμα και η ανάπτυξη νέων θα είχε αντίκτυπο στο κόστος και στη λειτουργία. Ακόμη, είναι πιθανό ότι θα χρειαστεί η ανάπτυξη νέων διαλυτών καθώς και εξαρτημάτων του συστήματος τα οποία θα μειώσουν το κόστος κεφαλαίου και ενέργειας για την επεξεργασία των καυσαερίων για τη δέσμευση και το διαχωρισμό του CO<sub>2</sub>. Θα πρέπει να επενδυθούν χρήματα στην έρευνα και ανάπτυξη νέων διαλυτών, ιδιαίτερα αυτούς που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προηγμένα συστήματα, καθώς και επενδύσεις σε μελέτες συστημάτων για τον εντοπισμό των καλύτερων δυνατών διαμορφωτικών διαδικασιών και εξοπλισμού, ιδίως όσον αφορά το κόστος και την απλότητα της διαδικασίας. Μια ενδιαφέρουσα στρατηγική που θα μπορούσαμε να ακολουθήσουμε είναι και η κατασκευή λεβήτων όπου θα ανακυκλώνουν το CO<sub>2</sub>. Επίσης, θα μπορούσαμε να διευρύνουμε τεχνολογικά την επιλογή των απορροφητικών, μέσω της εξέλιξης της μοριακής μοντελοποίησης. Η διαδικασία

απορρόφησης θα μπορούσε να γίνει πιο αποδοτική αν η διαδικασία καθαρισμού γινόταν πιο εύκολη. Η εξέλιξη των μοριακών και κινητικών μοντέλων θα βοηθούσε στην βελτιστοποίηση των απορροφητικών ουσιών, αφού βασίζονται πάνω στα συγκεκριμένα μοντέλα. Μεγάλο ενδιαφέρον θα μπορούσε να δοθεί στα συστήματα όπου η λειτουργία της καύσης πραγματοποιείται με τη βοήθεια αέρα καθώς οι εκπομπές τους εμπεριέχουν μεγάλες ποσότητες αραιωτικού αζώτου (~80%) πράγμα που δυσκολεύει το διαχωρισμό και τη δέσμευση του CO<sub>2</sub>. Το αέριο που προέρχεται από άνθρακα για αεριοστρόβιλους είναι αρκετά συμπυκνωμένο και πεπιεσμένο και επιτρέπει τη χρήση διάφορων διαλυτών που μπορούν να συλλάβουν CO<sub>2</sub> από το ρεύμα αερίου πριν από την καύση, το οποίο μπορεί επίσης να βρίσκεται στο οξυγόνο αντί στον αέρα [15].

Στην φυσική και χαμηλή προσρόφηση υπάρχει χαμηλή χωρητικότητα, καθώς και περιορισμένη λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες, στις μονάδες παραγωγής που λειτουργούν με προσρόφηση υπό πίεση. Αυτό οφείλεται στην δημιουργία ακάθαρτου CO<sub>2</sub> που εμπεριέχει υδρογόνο, μεθάνιο, CO και άζωτο. Έτσι, πρέπει να αναπτυχθούν προσροφητικά υλικά που θα μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες παρουσία ατμού. Να δημιουργηθούν ενδεικνύμενα προγράμματα που περιλαμβάνουν την έρευνα και ανάπτυξη που στοχεύει στη σύνθεση προσροφητικών ουσιών με αυξημένη προσροφητική ικανότητα και ικανή να παράγει καθαρό προϊόν CO<sub>2</sub>, καθώς και διαδικασίες έρευνας και ανάπτυξης με στόχο τη βελτίωση μεθόδων για την πραγματοποίηση της διαδικασίας προσρόφησης-εκρόφησης. Ένας άλλος τρόπος βελτίωσης των φυσικών και χημικών προσροφητικών είναι η μοριακή μοντελοποίηση προσροφητικών ουσιών για να βοηθήσει στην ταυτοποίηση προσροφητικών επιλεκτικών στο CO<sub>2</sub>. Επίσης η ανάπτυξη νέων ροφητικών υλικών ανθεκτικά στον ατμό, υψηλής θερμοκρασίας. Αυτά τα υλικά θα πρέπει να είναι ικανά να προσροφούν CO<sub>2</sub> υπό τη παρουσία ατμού, εν αντιθέσει με τους ζεόλιθους και άλλους ανόργανους ροφητές που χρησιμοποιούνται τώρα, ενώ, ταυτόχρονα η ενέργεια που θα καταναλώνουν θα είναι μηδαμινή. Τέλος, ο διαχωρισμός και η δέσμευση του CO<sub>2</sub> σε υψηλή θερμοκρασία, καθώς και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για τη διαδικασία της εκρόφησης θα βελτίωναν σημαντικά το περιορισμό εκπομπών CO<sub>2</sub> από τα ορυκτά καύσιμα [15].

Για να καταστεί περισσότερο ικανή η απόσταξη σε χαμηλή θερμοκρασία θα μπορούσαμε να αναπτύξουμε τις παρακάτω δραστηριότητες. Η ενσωμάτωση με τις διαδικασίες δέσμευσης και η ανάπτυξη αποδοτικών και καινοτόμων κύκλων ψύξης μπορεί να επιτρέψει περισσότερο αποτελεσματικές διαδικασίες απόσταξης σε χαμηλή θερμοκρασία. Αυτή η καινοτόμος διαδικασία θα επέτρεπε στη λειτουργία της απόσταξης σε χαμηλή θερμοκρασία να δώσει

κίνητρο ώστε να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου άλλες τεχνολογίες δε θα ήταν το ίδιο αποδοτικές.

Αναφέραμε προηγουμένως ότι οι μεμβράνες διαχωρισμού αποδίδουν καλύτερα σε χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Οπότε η εξέλιξη τους, ώστε να είναι το ίδιο αποδοτικές σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις θα μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Ακόμη, παρατηρούμε ότι η βελτίωση των πολυμερών μεμβρανών περιορίζεται στην αλλαγή της σύνθεσης του πολυμερούς ώστε να αυξηθούν οι ρυθμοί διάλυσης και διάχυσης του εκάστοτε συστατικού που βρίσκεται στο αέριο. Έτσι υπάρχει ένα συγκεκριμένο όριο της αποτελεσματικότητας των πολυμερών μεμβρανών. Η σύνθεση του πολυμερούς μπορεί να αλλάξει για να αυξηθεί η διαπερατότητα της μεμβράνης, η οποία μειώνει σταθερά τον παράγοντα διαχωρισμού. Ισχύει όμως και το αντίστροφο. Δηλαδή, η διαπερατότητα της μεμβράνης μειώνεται, όταν αλλάζουμε τη σύνθεση του διαχωρισμού. Το ίδιο δεν ισχύει, όμως, για τις ανόργανες μεμβράνες βάση των πειραματικών δεδομένων που υπάρχουν μέχρι σήμερα. Η περαιτέρω ανάπτυξη του διαχωρισμού και δέσμευσης του CO<sub>2</sub> πάνω στη μοριακή μοντελοποίηση θα ήταν ακόμα ένας παράγοντας μείωσης του CO<sub>2</sub>. Οι μεμβράνες θα μπορούσαν να εξελιχθούν ακόμα περισσότερο μέσω της κινητικής μοντελοποίησης για τον προσδιορισμό της πιθανής ροής των αερίων. Οι ανάπτυξη μεμβρανών με νέα συστατικά, όπως το παλλάδιο, που μετατρέπει τους υδρογονάνθρακες σε μείγματα υδρογόνου και CO<sub>2</sub>, ενώ παράλληλα διαχωρίζουν το υδρογόνο υψηλής ποιότητας, θα βοηθούσε τον διαχωρισμό και τη δέσμευση του CO<sub>2</sub>. Σε αυτή τη περίπτωση του CO<sub>2</sub> θα δεσμευόταν σε συμπιεστή μορφή, ενώ το υδρογόνο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα κυψελών καυσίμων που αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα, για την κίνηση των μηχανών εσωτερικής καύσης [15].

## 12.12 Επεξεργασία και Μετατροπή Προϊόντος

Πηγαίνοντας στο κομμάτι της διαχείρισης του προϊόντος όπως σημειώθηκε προηγουμένως, το αποτέλεσμα του διαχωρισμού και σύλληψης θα είναι το CO<sub>2</sub>. Ανάλογα με τη μέθοδο διαχωρισμού και δέσμησης που θα έχει χρησιμοποιηθεί, το CO<sub>2</sub> θα είχε διαφορετικές συγκεντρώσεις, ακαθαρσίες, καθώς και διαφορετική πίεση και θερμοκρασία. Οι διεργασίες απορρόφησης, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν ρεύματα CO<sub>2</sub> πολύ υψηλής καθαρότητας και αυτά τα ρεύματα CO<sub>2</sub> θα βρίσκονται γενικά στις πιέσεις της πηγής. Θα πρέπει να μεριμνήσουμε ώστε το CO<sub>2</sub> που θα συγκεντρωθεί θα βρίσκεται στη κατάλληλη επεξεργασία που θα μας επιτρέψει τη δέσμηση και τη μεταφορά του. Το CO<sub>2</sub> μπορεί να διατηρήσει καθαρότητα από 90 έως 99+% από πολύ χαμηλές έως πολύ υψηλές θερμοκρασίες Κελσίου, ενώ η πίεση μπορεί να κυμαίνεται από ατμοσφαιρική έως ~4 MPa. Η έρευνα και η ανάπτυξη πρέπει να αντιμετωπίσουν ανάλυση πλήρους κύκλου της επεξεργασίας και της μετατροπής του προϊόντος για την κάλυψη των απαιτήσεων μεταφοράς και δέσμησης, μετατροπή του CO<sub>2</sub> στην απαιτούμενη μορφή για τη συγκεκριμένη επιλογή δέσμησης και τη διάθεση της ποικιλίας των υποπροϊόντων που μπορεί να παραχθούν κατά τη μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε άλλα προϊόντα [15].

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι ο διαχωρισμός και η δέσμηση μπορεί να συμβαίνουν σε διαφορετικές περιοχές. Οποιοδήποτε πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης πρέπει να περιλαμβάνει τη μεταφορά του άνθρακα στον τόπο δέσμησης και θα πρέπει να αφορά κυρίως πτυχές συστημάτων όπως η βελτιστοποίηση και η ενοποίηση των πηγών άνθρακα, ο διαχωρισμός και η δέσμηση, η μεταφορά και η δέσμηση. Η κατασκευή ενός αγωγού CO<sub>2</sub> μπορεί να κυμαίνεται από 1-10\$ ανά τόνο CO<sub>2</sub> ανά 100 μίλια. Σε αυτό το κόστος, συμπεριλαμβάνονται και τα έξοδα δικαιωμάτων διέλευσης, καθώς και η αποκατάσταση καταστροφών.

Επιπροσθέτως, γίνεται αναφορά σε άλλες, καινοτόμες μεθόδους που επιτυγχάνουν το διαχωρισμό και τη δέσμηση CO<sub>2</sub>. Μία από αυτές είναι ότι τα αέρια που περιέχουν CO<sub>2</sub> μπορούν να διαλυθούν στο νερό και να σχηματίσουν υγρά παράγωγα CO<sub>2</sub> όπου θα παγιδεύεται σε ένα κρυσταλλικό στερεό. Προκειμένου να πετύχει αυτή η μέθοδος θα πρέπει τα αέρια να έχουν την απαραίτητη πίεση και θερμοκρασία. Πιο αναλυτικά η πίεση θα κυμαίνεται από 1 έως 7 MPa, ενώ η θερμοκρασία θα βρίσκεται στους 0°C. Για να είναι αυτή

η μέθοδος αποδοτική θα πρέπει οι απώλειες ενέργειας να μην είναι μεγάλες, ενώ η διαδικασία του διαχωρισμού και της δέσμευσης θα πρέπει να επιτυγχάνεται υπό πίεση.

Δύο διαδικασίες προσρόφησης, οι οποίες είναι αρκετά προηγμένες, είναι η προσρόφηση υπό πίεση (PSA) και η προσρόφηση υπό θερμοκρασία (TSA). Αυτές οι διαδικασίες συγκαταλέγονται στην ηλεκτρική αιωρούμενη προσρόφηση (ESA) και χρησιμοποιούν μια νέα ίνα άνθρακα με μέσο προσρόφησης ένα δεσμό άνθρακα. Οι συνθήκες ενεργοποίησης για αυτά τα προσροφητικά υλικά μπορεί να ποικίλλουν για να αυξηθεί ή να μειωθεί το μέγεθος πόρων, ο όγκος των πόρων και η επιφάνεια για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του ανθρακονήματος ως προσροφητικού του CO<sub>2</sub>. Αυτό το υλικό είναι επίσης εξαιρετικά αγωγίμο ηλεκτρικά, επομένως τα προσροφημένα αέρια μπορούν να εκροφηθούν γρήγορα, αποτελεσματικά και περνώντας από ένα ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης μέσω του υλικού. Αυτή η διαδικασία προσρόφησης-εκρόφησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς μεταβολή της πίεσης του συστήματος και με ελάχιστη διακύμανση στη θερμοκρασία του συστήματος. Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την εκρόφηση είναι περίπου ίση με τη θερμότητα της προσρόφησης του προσροφημένου αερίου. Ως εκ τούτου, η διαδικασία ESA είναι πολλά υποσχόμενη ως ενεργειακά αποδοτική, οικονομική μέθοδος διαχωρισμού και δέσμευσης αερίου [13].

Αξίζει να αναφέρουμε μια καινοτόμος μέθοδος, την «καύση χημικού βρόχου» (αλλιώς «μεταφορά ενέργειας ροφητή»). Σε αυτή τη μέθοδο, ο παραγόμενος ατμός και το CO<sub>2</sub> υψηλής πίεσης, που παράγεται από τη μεταφορά της ενέργειας του ορυκτού καυσίμου για τη μείωση ενός οξειδωτικού μετάλλου, θα απομονώνονται με μια πρόσθετη ενέργεια συμπίεσης. Ο ατμός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας μέσω μιας τουρμπίνας ατμού, ενώ το μέταλλο θα μπορούσε να επαναοξειδωθεί στο αέρα και να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της πίεσης προκειμένου να παραχθεί περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Παρ'ότι η μέθοδος μπορεί να φαντάζει αρκετά απλή τα εμπόδια που παρουσιάζονται σε ένα τέτοιο σύστημα είναι πολλά. Αυτό ισχύει ακόμη και για τη συμβατική καύση άνθρακα με χρήση οξυγόνου αντί αέρα με ανακύκλωση CO<sub>2</sub>.

Με βάση τις διαδικασίες που έχουμε αναφέρει έως τώρα, παρατηρούμε ότι υπάρχουν αρκετές καινοτομίες και πολλές βελτιώσεις που μπορούν να εφαρμοστούν στη μέθοδο του διαχωρισμού και δέσμευσης CO<sub>2</sub>. Έτσι, ο διαχωρισμός και η δέσμευση του CO<sub>2</sub> από τις ανθρωπογενείς πηγές θα μπορούσε να καταστεί εφικτός με την εφαρμογή οποιασδήποτε από τις παραπάνω διαδικασίες. Παρά αυτή τη δυνατότητα, ένα πειθαρχημένο πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης που στοχεύει στη βελτίωση της τρέχουσας διαθέσιμης τεχνολογίας, στην

επέκταση των τρεχουσών εξελίξεων και στην επιδίωξη καινοτόμων προσεγγίσεων είναι κρίσιμης σημασίας για τη διασφάλιση της ικανότητας αποτελεσματικής και αποδοτικής δέσμευσης CO<sub>2</sub> με κόστος που δεν είναι απαγορευτικό [15].



## 13 ΩΚΕΑΝΙΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ

Ο ωκεανός είναι η μεγαλύτερη δεξαμενή ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> (περίπου 7 πεταγραμμάρια (Pg) ετησίως) (1 Pg = 1 γιγατόνιο = 10<sup>15</sup> g). Το διαλυμένο CO<sub>2</sub> (που εισέρχεται παθητικά στον ωκεανό μέσω διάχυσης από την ατμόσφαιρα) έχει ήδη οξύνει την επιφάνεια του ωκεανού, την πιο παραγωγική περιοχή του. Η δέσμευση άνθρακα των ωκεανών (OCS) είναι μια μέθοδος για την πιο ομοιόμορφη κατανομή του CO<sub>2</sub> σε όλο το βάθος του ωκεανού και την ελαχιστοποίηση των επιφανειακών επιπτώσεων των ωκεανών. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι OCS – η άμεση έγχυση και η αύξηση γονιμότητας των ωκεανών (προαγωγή της φωτοσυνθετικής στερέωσης του CO<sub>2</sub> από οργανισμούς του ωκεανού). Παρακάτω περιγράφεται ο φυσικός μηχανισμός με τον οποίο μπορεί να αποθηκευτεί το CO<sub>2</sub> στη στήλη του νερού του ωκεανού σε βάθος.

### 13.1 Αιτίες δέσμευσης άνθρακα ωκεανού

Οι ωκεανοί καλύπτουν πάνω από το 70% της επιφάνειας της Γης, ενώ το βάθος τους φτάνει μέχρι και τα 3.800 m. Η αυξημένες ποσότητες του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα προκαλούν οξίνιση της επιφάνειας των ωκεανών καθώς αυτή έρχεται σε επαφή με το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας. Μέχρι το 1994, η συνολική ατμοσφαιρική απελευθέρωση ανθρωπογενούς άνθρακα ήταν περίπου 244 Pg άνθρακα (PgC) από την καύση ορυκτών καυσίμων και περίπου 140 PgC από την αλλαγή χρήσης γης (π.χ. αποψίλωση των δασών). Οι ωκεανοί έχουν απορροφήσει περίπου το ένα τρίτο του ανθρωπογενούς CO<sub>2</sub> (η ατμόσφαιρα διατήρησε περίπου το 43%, ενώ οι ωκεανοί απορρόφησαν περίπου το 30%), οδηγώντας σε μείωση του συνολικού pH της επιφάνειας των ωκεανών κατά περίπου 0,1 μονάδες από περίπου 8,2 σε 8,1. Οι αυξημένες εκπομπές CO<sub>2</sub> μπορούν να προκαλέσουν μείωση του pH έως και 0,7 μονάδες μέχρι το 2300. Για να καταλάβουμε το πόσο καταστροφικό θα ήταν αυτό, θα μπορούσε κανείς να εστιάσει στο γεγονός ότι το pH των ωκεανών δεν έπεσε ποτέ κάτω από το 8,1 τα τελευταία 2,1 εκατομμύρια χρόνια. Βάση υπολογισμών αναμένουμε την εκπομπή 5000 PgC στην ατμόσφαιρα στα επόμενα 500 χρόνια. Αυτές οι εκπομπές άνθρακα θα είναι οι υψηλότερες που έχουν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα σε μια σύντομη γεωλογική χρονική κλίμακα [17].

Η μείωση του pH που παρατηρείται στην επιφάνεια του ωκεανού δεν συμβαίνει, με τον ίδιο ρυθμό, στα βάθη του. Το CO<sub>2</sub> είναι ο βασικότερος παράγοντας για τις αυξημένες συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, ενώ αυτές οι συγκεντρώσεις οδηγούν σε

δυσχερείς κλιματικές αλλαγές. Η δέσμευση άνθρακα των ωκεανών επινοήθηκε ως μια μέθοδος για την πιο ομοιόμορφη κατανομή του CO<sub>2</sub> σε όλα τα μήκη των ωκεανών, ειδικά στα βαθιά ωκεάνια νερά, και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των επιφανειακών, ενώ τα επίπεδα CO<sub>2</sub> των ωκεανών εξισορροπούνται με την ατμόσφαιρα.

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι εναπόθεσης του διοξειδίου του άνθρακα στους ωκεανούς – η άμεση έγχυση και η λίπανση των ωκεανών (προαγωγή της φωτοσυνθετικής στερέωσης του CO<sub>2</sub> από οργανισμούς του ωκεανού) [17].

### 13.2 Φυσική περιγραφή της άμεσης έγχυσης

Το CO<sub>2</sub> μπορεί να υπάρχει στις παρακάτω συνθήκες: αέριο, υγρό, στερεό ή ένυδρο και σε υδατικό. Το CO<sub>2</sub> συναντάται σε διαφορετικές καταστάσεις μέσα στους ωκεανούς. Είναι σε αέρια μορφή μέχρι το βάθος των 500 m και σε υγρή μορφή κάτω από 500 m. Από τα 500 έως τα 2700 m το CO<sub>2</sub> είναι πιο αραιό από το θαλασσινό νερό κι έτσι επιπλέει, ενώ κάτω από 2700 m η πυκνότητα του CO<sub>2</sub> είναι πιο μεγάλη και γι' αυτό το λόγο βυθίζεται. Σε χαμηλές θερμοκρασίες το CO<sub>2</sub> βρίσκεται σε μια στεριά ένυδρη φάση που είναι θερμοδυναμικά σταθερή,

Το CO<sub>2</sub> διαλύεται στο θαλασσινό νερό του περιβάλλοντος που δεν έχει κορεστεί με CO<sub>2</sub>. Μόλις διαλυθεί, το υδατικό CO<sub>2</sub> υπάρχει σε διάφορες φορτισμένες μορφές στο νερό οι οποίες είναι το H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> και το CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Αν αθροίσουμε αυτές τις φορτισμένες μορφές τότε θα έχουμε υπολογίσει το συνολικό διαλυμένο ανόργανο άνθρακα (Ct).

Από τις συνεχείς αλληλεπιδράσεις του CO<sub>2</sub> με τους ωκεανούς το pH του θαλασσινού νερού μειώνεται. Έτσι υπάρχει αύξηση του HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ενώ, ταυτόχρονα, το CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> μειώνεται [16].

Με τη σειρά του, το διαλυμένο CO<sub>2</sub> προκαλεί αύξηση της πυκνότητας του θαλασσινού νερού μέσω του φαινομένου της πυκνότητας διαλυμένης ουσίας που έχει επιπτώσεις στον φυσικό σχεδιασμό μιας άμεσης έγχυσης CO<sub>2</sub> στον ωκεανό.

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε στην έννοια της μερικής πίεσης του CO<sub>2</sub> σε ένα δείγμα νερού που μεταφράζεται ως η πίεση του αέριου CO<sub>2</sub> όπου, εάν αλληλοεπιδράσει με το νερό τότε θα έχει την ίδια ποσότητα διαλυμένου CO<sub>2</sub> που θα είχε το δείγμα. Συμβολίζεται ως pCO<sub>2</sub>. Η μερική πίεση του CO<sub>2</sub> είναι το πηλίκο του H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> προς Cs (καίσιο), όπου το Cs εξαρτάται από τη τοπική θερμοκρασία και την αλατότητα.

Από τις συνεχείς εκπομπές CO<sub>2</sub> έχουμε την αύξηση τόσο της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub>, όσο και της pCO<sub>2</sub> στην επιφάνεια του ωκεανού, αφού όπως αναφέραμε και προηγουμένως αλληλοεπιδρούν. Ο Roger Revelle ανακάλυψε ότι ο λόγος της στιγμιαίας μεταβολής της pCO<sub>2</sub> προς το Ct (διαλυμένος ανόργανος άνθρακας) είναι ένα μέτρο αντίστασης του ωκεανού να απορροφά το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub>, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογο του [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]. Ο παράγοντας Revelle είναι ένας ρυθμιστικός παράγοντας που περιγράφει την ικανότητα του ωκεανού να προσλαμβάνει ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> και αναφέρεται συνήθως στην ανάλυση του παγκόσμιου προϋπολογισμού άνθρακα και στις ανθρωπογενείς μελέτες κλιματικής αλλαγής. Επίσης έχει ανακαλυφθεί και η ρυθμιστική ικανότητα του ωκεανού που αποτελεί το αντίστροφο του παράγοντα Revelle. Η ρυθμιστική ικανότητα του ωκεανού μας δείχνει ότι μια αύξηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> δε θα αυξήσει το συνολικό διαλυμένο CO<sub>2</sub>. Π.χ. αν διπλασιαστεί το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> τότε το διαλυμένο CO<sub>2</sub> θα αυξηθεί μόνο κατά 10%.

Το CO<sub>2</sub> στην επιφάνεια του ωκεανού εξισορροπείται με το ατμοσφαιρικό σε μια περίοδο περίπου 8 μηνών, κάτι που δε συμβαίνει για τα περισσότερα αέρια που αντιδρούν με το θαλασσινό νερό. Αυτό συμβαίνει γιατί το διαλυμένο CO<sub>2</sub> δε παραμένει διαλυμένο αέριο στο ανθρακικό σύστημα, αλλά προκαλεί αύξηση του HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Η κατάσταση κορεσμού CaCO<sub>3</sub> του θαλασσινού νερού ορίζεται ως Ω:

$$\Omega = \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{K_{sp}}$$

όπου [Ca<sup>2+</sup>] και [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] είναι οι συγκεντρώσεις Ca<sup>2+</sup> και CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> στο θαλασσινό νερό, και το K<sub>sp</sub> είναι το προϊόν διαλυτότητας οποιουδήποτε αραγωνίτη / ασβεστίτη (οι δύο κύριες μορφές CaCO<sub>3</sub>). Εάν το Ω για τον αραγωνίτη (Ω<sub>a</sub>) για παράδειγμα είναι μεγαλύτερο από 1, τότε ο αραγωνίτης είναι υπερκορεσμένος και ο στερεός αραγωνίτης θα αρχίσει να καθιζάνει. Σε αντίθετη περίπτωση ο αραγωνίτης θεωρείται υποκορεσμένος σε σύγκριση με τον αραγωνίτη του ωκεανού και θα αρχίσει να διαλύεται. Από το λόγο των συγκεντρώσεων προς το προϊόν διαλυτότητας γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η μείωση του Ω οφείλεται στην αύξηση του K<sub>sp</sub>. Η αύξηση της πίεσης οδηγεί σε αύξηση του K<sub>sp</sub> το οποίο κατ' ουσίαν μειώνει το Ω. Επομένως, όσο προχωράμε πιο βαθιά στον ωκεανό, τόσο μειώνεται το Ω. Οπότε θα υπάρξει ένα σημείο στο οποίο το Ω = 1 και αυτό το σημείο είναι γνωστό ως ορίζοντας κορεσμού [16].

Η δέσμευση CO<sub>2</sub> περιλαμβάνει πρώτα τη δέσμευση από τις πηγές τους. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι σχετικά καθαρές από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν ως καύσιμο τον άνθρακα ή τα παράγωγα του και θα μπορούσαν να απομονωθούν και να εγχυθούν στον ωκεανό. Με πρόχειρους υπολογισμούς, για μια μονάδα που παράγει 500 MW ενέργειας εκπέμπονται περίπου 130 kg/s CO<sub>2</sub>. Το παραγόμενο CO<sub>2</sub> θα μπορούσε να εγχυθεί άμεσα στον ωκεανό από τη μεταφορά ενός πλοίου ή να μεταφερθεί απευθείας μέσω ενός σωλήνα, αφού πρώτα δεσμευθεί,. Οι τεχνολογίες για την άμεση έγχυση CO<sub>2</sub> περιλαμβάνουν: σταγονίδια υγρού CO<sub>2</sub>, θαλασσινό νερό φορτωμένο με CO<sub>2</sub>, στερεό CO<sub>2</sub> (ξηρός πάγος) και σχηματισμός λίμνης CO<sub>2</sub>.

### 13.3 Το CO<sub>2</sub> σε ένυδρη μορφή

Οι στερεές ένυδρες ενώσεις CO<sub>2</sub> έχουν τη δυνατότητα να είναι θερμοδυναμικά σταθερές όταν βρίσκονται σε χαμηλές (συνήθως κάτω από του 5 με 10°C) και σε υψηλή πίεση (συνήθως σε βάθος μεγαλύτερο των 400 m). Οι ενώσεις αυτές βρίσκονται σε μια μορφή τύπου κλουβιού καθώς περιβάλλονται από μόρια νερού τα οποία είναι συνδεδεμένα με υδρογόνο. Έχουν ενδιαφέρον, καθώς οι δεσμεύσεις άνθρακα μπορούν να εναποτεθούν βαθύτερα στον ωκεανό, επειδή είναι πιο πυκνές από το θαλασσινό νερό και θα βυθιστούν χωρίς βοήθεια ενώ διαλύονται για να προωθήσουν τη διασπορά στον ωκεανό. Το Εθνικό Εργαστήριο Oak Ridge (ORNL) προχώρησε σε μια καινοτόμο ανακάλυψη, καθώς κατάφερε να παράξει καθαρά σωματίδια ένυδρου CO<sub>2</sub> μέσω ενός εγχυτήρα συνεχούς ροής CO<sub>2</sub> ίδιας κατάστασης με αυτό που συναντάται στο θαλασσινό νερό, τα οποία στη συνέχεια δημιουργούν κυλινδρικά σύνθετα σωματίδια που αποτελούνται από ένυδρο CO<sub>2</sub>, υγρό CO<sub>2</sub> (το οποίο συναντάται σε βάθος μεταξύ 1000 και 1500 m) και θαλασσινό νερό [16].

Αν και οι ένυδρες ενώσεις CO<sub>2</sub> είναι θερμοδυναμικά σταθερές, θα διαλυθούν στο θαλασσινό νερό του περιβάλλοντος κατά την απελευθέρωση, επειδή το CO<sub>2</sub> είναι υποκορεσμένο στο νερό του περιβάλλοντος. Βάση πειραματικών μετρήσεων καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι στο θαλασσινό νερό περιβάλλοντος διαλύονται και οι καθαροί υδρίτες αλλά και τα μερικώς αντιδρώντα κυλινδρικά σωματίδια.

### 13.4 Μελέτες σταγονιδίων και υδρατμών CO<sub>2</sub>

Οι αριθμητικές προσπάθειες για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του νέφους σταγονιδίων CO<sub>2</sub> περιλάμβαναν την επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων Navier-Stokes με τη θάλασσα να βρίσκεται υπό ήρεμες συνθήκες περιβάλλοντος. Η ίδια προσέγγιση των βαθμονομημένων μοντέλων νέφους φυσαλίδων έχει εφαρμοστεί και σε εκλύσεις σταγονιδίων CO<sub>2</sub>.

Σε μια πρόσφατη έρευνα που διεξήχθη χρησιμοποιώντας σύνθετους εγχυτήρες ένυδρου CO<sub>2</sub> βάση πραγματικών δοκιμών, παρατηρήθηκε ότι ένας αντιδραστήρας ένυδρου άλατος σε βάθος ωκεανού περίπου 1500 m, θα παράξει κυλινδρικά σωματίδια διαμέτρων έως 2,2 cm και μήκος που δε ξεπερνούσε το 1 m. Στη συνέχεια, μια πρόσφατη έρευνα κατάφερε να οδηγήσει στη βύθιση των ένυδρων σωματιδίων CO<sub>2</sub> σε απόσταση κάτω των 100 m, εφαρμόζοντας ένα μοντέλο συντελεστή οπισθέλκουσας το οποίο πετυχαίνει ποσοστό μετατροπής υγρού CO<sub>2</sub> σε ένυδρο έως 20% και ειδικό βάρος μεγαλύτερο από το θαλασσινό νερό κατά 1-2%. Επίσης, θα μπορούσε να επιτευχθεί μεγαλύτερη βύθιση αν το αντικείμενο εφαρμογής της συγκεκριμένης έρευνας ήταν μεγαλύτερα σωματίδια. Αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω της εκκένωσης σωματιδίων για ένα εύρος διαφορετικών μεγεθών και πυκνοτήτων θα είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορετική καθίζηση όπου θα κατευθυνόταν καθοδικά και κατακόρυφα. Επιπλέον, η ρυμούλκηση της πηγής από ένα κινούμενο πλοίο θα συνέβαλε σε πρόσθετη διασπορά [16].

Θα μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε τη μεγαλύτερη πυκνότητα των σωματιδίων και να απελευθερώσουμε ένα ρεύμα με συνεχής ροή το οποίο με τη σειρά του θα δημιουργήσει ένα πυκνό νέφος πετυχαίνοντας κατακόρυφη καθίζηση. Επίσης, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι το διαλυμένο CO<sub>2</sub> που εμπεριέχεται στο θαλασσινό νερό θα αυξήσει τη πυκνότητα του νερού με αποτέλεσμα το οποίο θα βοηθήσει στη κατακόρυφη καθίζηση. Μέσω μιας πειραματικής διαδικασίας απελευθερώθηκαν σε ήρεμο ωκεανό με συνεχή ροή από 0,01 έως 1000 kg/s ρεύματα σύνθετων σωματιδίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, για απελευθέρωση CO<sub>2</sub> 100 kg/s (περίπου η εκπομπή από μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα 500 MW), ένα νέφος που αποτελείται από σύνθετα σωματίδια διαμέτρου 2,2 cm με απόδοση αντίδρασης 16% θα βυθιζόταν περίπου 1000 m, περίπου 10 φορές το μεμονωμένο βάθος των σωματιδίων. Ένα νέφος που αποτελείται από παρόμοια σωματίδια, αλλά με διάμετρο 5 cm, θα βυθιζόταν περίπου 2000 m (~5 φορές το βάθος του μεμονωμένου σωματιδίου), ενώ τα νέφη που αποτελούνται από μεγαλύτερα σωματίδια ή σωματίδια που

παρουσιάζουν υψηλότερη αποτελεσματικότητα αντίδρασης, θα έφταναν στον πυθμένα της θάλασσας.

Τα περιβαλλοντικά φαινόμενα της διαστρωμάτωσης και των ωκεάνιων ρευμάτων θα μειώσουν την αποδοτικότητα του νέφους. Η βύθιση του νέφους παρεμποδίζεται από την ισχυρή διαστρωμάτωση του περιβάλλοντος που προκαλεί παγίδευση του παρασυρόμενου θαλασσινού νερού σε ενδιάμεσα βάθη κάτω από την απελευθέρωση. Σε βάθος μεγαλύτερο των 1500 m η διαστρωμάτωση της πυκνότητας εξασθενεί οπότε μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τη παγίδευση των νεφών και να εναποθέσουμε το CO<sub>2</sub> στο συγκεκριμένο βάθος [16].

### 13.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προκλήσεις

Μερικές από τις έννοιες που σχετίζονται με τις επιπτώσεις της δέσμευσης άνθρακα των ωκεανών με άμεση έγχυση (π.χ. οξίνιση των ωκεανών) παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα.

Αν και η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στα βάθη του ωκεανού θα ήταν μία λύση προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, ωστόσο με την πάροδο του χρόνου το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας και του ωκεανού θα εξισορροπούνταν [16].

Σε σχέση με την άμεση απελευθέρωση του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, η άμεση έγχυση CO<sub>2</sub> στον ωκεανό θα μπορούσε να μειώσει την άνοδο και την κορύφωση των επιπέδων CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας τους επόμενους, μελλοντικούς, αιώνες. Με την πάροδο του χρόνου το εγχεόμενο CO<sub>2</sub> θα επιστρέψει στην επιφάνεια του ωκεανού και θα αλληλοεπιδράσει με την ατμόσφαιρα, ωστόσο με την ειδοποιό διαφορά ότι μεγαλύτερο μέρος του CO<sub>2</sub> (από 66 μέχρι και 85%) θα παρέμενε στον ωκεανό λόγω της νέας ισορροπίας που θα είχε προέλθει.

Μέσω διάφορων πειραματικών ερευνητικών εργαλείων (ένα από τα οποία είναι και ο ραδιενεργός άνθρακας), καθώς και άλλων ανιχνευτών, μπορέσαμε να εκτιμήσουμε την ηλικία του πυθμένα των ωκεανών και να προσδιορίσουμε ότι το εγχεόμενο CO<sub>2</sub> θα εξισορροπηθεί με το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> σε μια χρονική περίοδο μεταξύ των 300 έως 1000 ετών. Πιο συγκεκριμένα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για το τμήμα του Βορείου Ειρηνικού ανακαλύφθηκε ότι τα βαθιά νερά του είναι μεταξύ 700 έως 1000 ετών, ενώ τα βαθιά νερά του Βόρειου Ατλαντικού είναι 300 ετών. Ο Ειρηνικός ωκεανός έχει τη δυνατότητα να κατακρατήσει μεγαλύτερες ποσότητες CO<sub>2</sub> από τον Ατλαντικό λόγω του μεγαλύτερου βάθους έγχυσης που μας επιτρέπει να εναποθέσουμε. Αυτό βασίζεται πάνω σε ένα μεγάλο αριθμό τρισδιάστατων μοντέλων που χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τους

ραδιενεργούς ανιχνευτές. Ωστόσο, τα μοντέλα διαφέρουν πολύ στις προβλέψεις τους σχετικά με τον πραγματικό χρόνο που απαιτείται για την έγχυση CO<sub>2</sub> σε ένα συγκεκριμένο σημείο για να έρθει ξανά σε επαφή με την ατμόσφαιρα.

Όλες αυτές οι πειραματικές προβλέψεις πραγματοποιήθηκαν βάση των τωρινών παραγόντων που ισχύουν σήμερα. Σε περίπτωση που αυτοί οι παράγοντες αλλάξουν, όπως μια αύξηση στη θερμοκρασία του ωκεανού ή μια μετατροπή στη συγκέντρωση του διαλυμένου ανόργανου άνθρακα θα μείωνε την ικανότητα του ωκεανού να απορροφά επιπλέον CO<sub>2</sub>.

Σε προηγούμενη παράγραφο αναφερθήκαμε στην οξίνιση των ωκεανών που εντοπίζεται από τη Βιομηχανική Επανάσταση. Αυτή η ενότητα περιγράφει τις συνέπειες που θα επέλθουν τόσο στα θαλάσσια οικοσυστήματα, όσο και στο κύκλο του άνθρακα των ωκεανών, λόγω της συνεχούς οξίνισης των ωκεανών. Μεταξύ 1991 και 2015, το pH του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού παρουσίασε μείωση 0,06 μονάδων στα ανώτερα 500 μέτρα του ωκεανού. Το pH στη Θάλασσα της Ισλανδίας είχε τάση μείωσης κατά 0,0024 μονάδες/έτος, ενώ το Ω<sub>a</sub> είχε τάση μείωσης 0,0117 μονάδες/έτος από το 1985 έως το 2008 [16].

Μια άλλη συνέπεια του αυξημένου διαλυμένου CO<sub>2</sub> στον ωκεανό, είναι η αύξηση του HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> και η μείωση του CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> στον ωκεανό. Αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα ότι για Ω>1 ο αραγωνίτης και ο ασβεστίτης θεωρούνται υπερκορεσμένοι, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θεωρούνται υπόκορεσμένοι. Αυτό οφείλεται στη μείωση του συστατικού CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Η μετάβαση από Ω=1 έως τον υποκορεσμό δε πραγματοποιείται άμεσα, αλλά χρειάζεται μια χρονική μετάβαση για να συμβεί αυτό. Η μείωση του Ω<sub>a</sub> προκάλεσε στον κορεσμένο αραγονίτη να ανέβει με ρυθμό 4 m ετησίως. Η μείωση του Ω, και επομένως ο ρυθμός υποβάθμισης για το κορεσμό του αραγονίτη, προβλέπεται να είναι πιο έντονη κοντά στους πόλους και πιο σοβαρή στον Αρκτικό Ωκεανό από τον Νότιο Ωκεανό, εν μέρει επειδή οι πολικοί ωκεανοί έχουν χαμηλότερες αρχικές συγκεντρώσεις CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

Σε οξέα επίπεδα το CO<sub>2</sub> λειτουργεί ως ναρκωτική δράση στα ζώα και προκαλεί αναπνευστική δυσχέρεια και θάνατο. Σε μία έρευνα που διεξήχθη, το μειωμένο pH σε παθητικούς θαλάσσιους οργανισμούς όπως το ζωοπλαγκτόν που ο χρόνος παραμονής μέσα και έξω από ένα νέφος CO<sub>2</sub>, διαπιστώθηκε ότι η ελαχιστοποίηση των τοπικών πτώσεων του διαλυμένου CO<sub>2</sub> και του pH θα μειώσει το ποσοστό θνησιμότητας [16].

Δεν έχει επιβεβαιωθεί ότι οι επιδράσεις των οργανισμών στην αυξημένη έκθεση του CO<sub>2</sub> να είναι θανατηφόρες. Σε έρευνα που διεξήχθη παρατηρήθηκαν οι ναρκωτικές επιδράσεις των

αυξημένων επιπέδων CO<sub>2</sub> σε διάφορα ζώα και φάνηκε ότι πολλά έτειναν να αποφεύγουν το νέφος, άλλα, όμως, δε δίσταζαν να ρισκάρουν τις ναρκωτικές επιπτώσεις για να αποκτήσουν τροφή. Οι επιπτώσεις που θα επέλθουν από την αύξηση της pCO<sub>2</sub> (μερική πίεση του CO<sub>2</sub>) στη γλωρίδα και τη πανίδα του ωκεανού θα είναι αρκετά επιζήμιες, όπως διάφορα αναπνευστικά προβλήματα και ναρκωτικές επιδράσεις. Η έκθεση των θαλάσσιων ζώων σε χαμηλότερα, χρόνια επίπεδα CO<sub>2</sub> θα έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξουν το μεταβολισμό τους καθώς και να μειώσουν την ικανότητα ανταλλαγής ιόντων. Έρευνες αποκαλύπτουν ότι η έκθεση των οστρακοειδών και άλλων θαλάσσιων οργανισμών και αυγών σε διαλυμένο CO<sub>2</sub> θα μειώσει την ανάπτυξη τους.

Η πρωταρχική επίδραση της έκθεσης σε οξινισμένο θαλασσινό νερό από οργανισμούς είναι η οξέωση και η μείωση του pH στα σωματικά υγρά. Οι ενδοκυτταρικές και εξωκυτταρικές διεργασίες έχουν αποδειχθεί ότι διαταράσσονται όταν το pH του θαλασσινού νερού πέφτει σε ένα εύρος περίπου 6,0 – 7,8. Οι οργανισμοί που ζουν στους ωκεανούς μπορούν να καταπολεμήσουν την αυξημένη οξίνιση των ωκεανών μέσω διάφορων εσωτερικών λειτουργιών, όπως π.χ. με την αυξημένη παραγωγή διττανθρακικών ιόντων ενώ άλλοι οργανισμοί που καταπολεμούν την οξίνιση μέσω της παθητικής μοριακής διάχυσης, αλλά υπάρχουν και οργανισμοί (όπως τα σφουγγάρια) που οι εσωτερικές τους λειτουργίες δεν είναι τόσο αναπτυγμένες οπότε τους καθιστούν πιο επιρρεπείς στην οξίνιση [16].

Οι επιπτώσεις της έκθεσης στην αυξημένη ποσότητα του CO<sub>2</sub> επηρεάζει διαφορετικά τους θαλάσσιους οργανισμούς. Τα τροπικά ψάρια είναι πιο ευαίσθητα σε σχέση με τα εύκρατα ψάρια τόσο στην αύξηση της θερμοκρασίας όσο και της οξίνισης των υδάτων. Μελέτες σε τροπικά καρδινάλια με οξεία έκθεση σε 1 εβδομάδα pCO<sub>2</sub> 1000 μatm οδήγησαν σε μειώσεις της αερόβιας εμβέλειας και των κρίσιμων ταχυτήτων κολύμβησης κατά περίπου 40 – 50%, άλλη παρόμοια μελέτη διεξήχθη για τον μπακαλιάρο του Ατλαντικού μετά από 12 μήνες έκθεσης και στα δύο είδη ζώων. Περαιτέρω αύξηση της pCO<sub>2</sub> (μέχρι τα 6000 μatm) δεν παρουσίασε αλλαγή στη κίνηση των θαλάσσιων ζώων.

Στα βάθη των ωκεανών οι υψηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> που φτάνουν μέχρι 16000 ppm pCO<sub>2</sub> δεν αναμειγνύονται με το θαλασσινό νερό με υψηλούς ρυθμούς ενώ συναντάμε και ποσοστά οξειδωμένης οργανικής ύλης μαζί με χαμηλές ποσότητες οξυγόνου. Υψηλά επίπεδα pCO<sub>2</sub> βρίσκονται στα χαμηλά στρώματα οξυγόνου. Έχει παρατηρηθεί ότι ορισμένα είδη οργανισμών, κυρίως αυτά που ζουν στα παράκτια και στα μεσόνερα, έρχονται σε επαφή με μεγάλες ποσότητες pCO<sub>2</sub> (από 500 έως 9400 μatm). Φαίνεται, λοιπόν, ότι αυτοί οι οργανισμοί έχουν εξελιχθεί να ζουν υπό τη επίρεια αυξημένων τιμών pH.



Τα οικοσυστήματα που βρίσκονται στα βάθη των υδάτων εξαρτώνται από τα βυθιζόμενα σωματίδια οργανικού άνθρακα, από τη φωτοσύνθεση που παράγεται σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στον ωκεανό και καθιζάνουν μέσα στο νερό. Σε βάθη όπου το οξυγόνο είναι μειωμένο οι οργανισμοί φαίνεται να έχουν χαμηλούς μεταβολικούς ρυθμούς. Οι οργανισμοί που ζουν στα βαθιά θαλάσσια νερά έχουν προσαρμοστεί στο περιβάλλον που επικρατεί περιορισμένη ενέργεια διατηρώντας τις αποθήκες ενέργειας και ελαχιστοποιώντας τον κύκλο εργασιών ενέργειας [16].

Όπως και στη ξηρά, έτσι και στους ωκεανούς υπάρχουν φυσικές πηγές, οι περισσότερες από αυτές είναι ηφαιστειακές δομές, που απελευθερώνουν CO<sub>2</sub>. Αυτά έχουν παρατηρηθεί ως πιθανά φυσικά ανάλογα των σημείων άμεσης έγχυσης που πραγματοποιείται η δέσμευση άνθρακα στους ωκεανούς. Σε έρευνες που έχουν διεξαχθεί οι υδροθερμικές πηγές εκπέμπουν έως 80.000 ppm pCO<sub>2</sub>, οι οποίες ξεπερνούν τις εκπομπές σε πιο ρηχά θαλασσινά νερά. Ακόμα και σε αυτές τις τεράστιες εκπομπές συναντάμε εξελιγμένους οργανισμούς οι οποίοι ζουν κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Σε έρευνες που πραγματοποιήθηκαν κοντά σε υδροθερμικές διεξόδους, έχουν δείξει ότι η οξίνιση των ωκεανών μείωσε τη βιοποικιλότητα κάτω από ένα μέσο pH 7,8. Πολλοί ζωικοί οργανισμοί φάνηκε να επηρεάζονται και να εκλείπουν λόγω των υψηλών επιπέδων CO<sub>2</sub> που οφείλονται σε φυσικά αίτια ενώ παράλληλα κοντά στις ακτές της Ιταλίας οι συνθήκες αυτές δε φάνηκε να επηρεάζουν τα σφουγγάρια που φαίνεται να ανέχονται αυτές τις συνθήκες [16].

### 13.6 Μηχανική σκοπιμότητα

Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν δημοσιεύσεις αφιερωμένες στην επιλογή τοποθεσίας για άμεση έγχυση στον ωκεανό. Αν και αυτές οι δημοσιεύσεις έχουν φτάσει στο σημείο να υπολογίζουν το χρόνο κατακράτησης CO<sub>2</sub> δεν μπορούν να υπολογίσουν τη θέση στην οποία πρέπει να εναποτεθεί η έγχυση. Βάση των αριθμητικών μοντέλων, οι ερευνητές έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος έγχυσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η απομόνωση από το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας. Αντίθετα, ο παρουσιάστηκε μια μελέτη επιλογής τοποθεσίας για γεωλογική αποθήκευση βαθέων υδάτων από τον Goldberg, υπογραμμίζοντας τη δυνατότητα αποθήκευσης σε υπόγειους υδροφορείς κατά μήκος συγκεκριμένων σεισμικών και μη σεισμικών ωκεάνιων κορυφογραμμών. Επομένως, αυτή η ενότητα εξετάζει παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για κριτήρια επιλογής τοποθεσίας βάσει των οποίων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή μιας τοποθεσίας για τη δέσμευση του άνθρακα στον ωκεανό. Τα κριτήρια επιλογής τοποθεσίας είναι μειωμένες πιθανότητες εξάτμισης του CO<sub>2</sub> καθώς και οι όσο το δυνατόν μειωμένες επιπτώσεις που επέλθουν στους οργανισμούς. Εκτός των κριτηρίων τοποθεσίας έχει υπολογιστεί το κόστος τα ωκεάνιας εναπόθεσης καθώς και οι διεθνείς πολιτικές που ισχύουν για διασυνοριακές μεταφορές [16].

Το κόστος υπολογίστηκε βάση της αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> σε δεξαμενές στη ξηρά αναμένοντας την αποστολή, της αποστολής του CO<sub>2</sub> και της απευθείας έγχυσης του CO<sub>2</sub> στον ωκεανό. Ο τρόπος εναπόθεσης θα είναι μέσω πλωτής μεταφοράς υγρού CO<sub>2</sub> σε πλατφόρμα έγχυσης, σε έγχυση από κατακόρυφο σωλήνα ή μέσω πλοίου που έχουμε τοποθετήσει σωλήνα για την έγχυση και σε άμεση έγχυση μέσω ενός σωλήνα από τη πηγή εκπομπών σε βάθος 3000 μέτρων. Από τους υπολογισμούς που προέκυψαν το κόστος των τριών επιλογών ανέρχεται σε 11,9 έως 13,2 \$/τόνο καθαρού CO<sub>2</sub>. Σε αυτούς τους υπολογισμούς δεν έχει συμπεριληφθεί η μεταφορά CO<sub>2</sub> που θα πραγματοποιηθεί στη ξηρά.

Το κόστος που υπολογίστηκε για την ωκεάνια εναπόθεση CO<sub>2</sub> μιας ηλεκτροπαραγωγικής επιχείρησης 600 MWe για έγχυση σε βάθος 3000 μέτρων μέσω αγωγού ανέρχεται από 6,2 έως 31,1 \$/τόνο καθαρού CO<sub>2</sub>. Το μήκος μεταφοράς θα κυμαίνεται από 100 έως 500 km. Άλλες τεχνικές που ενδέχεται να μην ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν: υπολειμματικά χημικά, μέταλλα, ορυκτά και έλαια που μπορεί να απελευθερωθούν κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων γεώτρησης και συμπεριλαμβανομένου ότι το υγροποιημένο CO<sub>2</sub> είναι εξαιρετικά διαβρωτικό, απαιτώντας οι σωληνώσεις για την παροχή CO<sub>2</sub> είναι

κατασκευασμένες από αντιαβρωτικές επιστρώσεις, οι οποίες από μόνες τους μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα μόλυνσης [16].

Όσον αφορά το κόστος ωκεάνιας εναπόθεση σε μια λίμνη CO<sub>2</sub> που θα βρίσκεται στο πυθμένα του ωκεανού εκτιμάται ότι θα είναι το ίδιο με το κόστος κατασκευής αγωγού άμεσης έγχυσης.

### **13.7 Προβλήματα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε σε θέματα πολιτικής**

Οι διεθνείς περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν ως στόχο να μειώσουν του κινδύνους του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Επομένως, η ωκεάνια εναπόθεση θα πρέπει να γίνει σε συμμόρφωση αυτών των συνθηκών. Οι κύριες διεθνείς συνθήκες είναι το Δίκαιο της Θάλασσας, η Σύμβαση του Λονδίνου, το Πρωτόκολλο του Λονδίνου και η Σύμβαση OSPAR:

*«Η διεθνής προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος καθιερώθηκε το 1972 με τη Σύμβαση του Λονδίνου για τη ρύθμιση της απόρριψης αποβλήτων και άλλων υλικών στη θάλασσα. Το 1982 θεσπίστηκε από τη Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών το Δίκαιο των Θαλασσών (UNCLOS) στο οποίο δεν εμπεριέχονται περισσότερες ενέργειες για περισσότερα θαλάσσια ζητήματα για τις λειτουργικές διατάξεις. Αντίθετα, παρέχει ένα πλαίσιο για όλους τους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της θαλάσσιας προστασίας, και επιτρέπει σε άλλες, πιο στοχευμένες συνθήκες να καλύψουν τα κενά... Όσον αφορά τη θαλάσσια ρύπανση, τα παγκόσμια πρότυπα ορίζονται από τη Σύμβαση για την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης από την απόρριψη αποβλήτων και άλλων ειδών, που υπογράφηκε στο Λονδίνο το 1972 (Σύμβαση του Λονδίνου). Κάτω από τη Σύμβαση του Λονδίνου υπάρχουν αρκετές περιφερειακές συμφωνίες που καλύπτουν συγκεκριμένες περιοχές του ωκεανού. Αυστηρότερα μέτρα κατά της ρύπανσης των θαλασσών θεσπίστηκαν από την OSPAR (Σύμβαση για τη Προστασία του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος του Βορειοανατολικού Ατλαντικού), ενώ ταυτόχρονα οι αποφάσεις που παίρνονται δεν εναπόκεινται σε πολιτικές σκοπιμότητες και είναι υποχρεωτικές για όλα τα μέρη της.»*

Η Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή ενθάρρυνε τη χρήση των ωκεανών ως δεξαμενή CO<sub>2</sub>, αλλά η Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για το Δίκαιο της Θάλασσας (UNCLOS) (σε ισχύ από το 1994) δεν έδωσε σαφείς οδηγίες για το OCS. Η αρχικές πολιτικές που θεσπίστηκαν από την πρώτη Σύμβαση του Λονδίνου (με 80 συμβαλλόμενα μέρη και ισχύει από το 1975) αφορούσε την εναπόθεση CO<sub>2</sub> με πλωτά ή αέρια μέσα καθώς και πλατφόρμες στη στήλη νερού. Δεν υπήρχε κάποια συγκεκριμένη οδηγία όσον αφορά την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στο βυθό των ωκεανών και των θαλασσών ή στην ίδια τη στήλη του νερού.

Στο παράρτημα I του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου, που θεσπίστηκε το Νοέμβριο του 1996 και τέθηκε σε ισχύ το Μάρτιο του 2006, κατηγοριοποιούνται όλα τα «βιομηχανικά

απόβλητα» καθώς και η απαγόρευση εναπόθεσης στα διεθνή ύδατα χωρίς, όμως, να διευκρινίζεται αν το CO<sub>2</sub> συγκαταλέγεται σε αυτά τα «απόβλητα» [16].

Το 1992, ιδρύθηκε η Επιτροπή Πρόληψης, Διαχείρισης και Αντιμετώπισης της Πετρελαιοκηλίδας (OSPAR) για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος του Βορειοανατολικού Ατλαντικού, η οποία ενοποίησε τις Συμβάσεις του Όσλο του 1972 και του Παρισιού του 1974. Οι χώρες που έλαβαν μέρος στην OSPAR ήταν το Βέλγιο, η Δανία, η Φινλανδία, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιρλανδία, η Ισλανδία, το Λουξεμβούργο, η Νορβηγία, η Πορτογαλία, η Ισπανία καθώς και η Ολλανδία, η Σουηδία, η Ελβετία, το Ηνωμένο Βασίλειο και ολόκληρη η Ευρωπαϊκή Κοινότητα. Τα νομικά πλαίσια που θεσπίστηκαν στην OSPAR είναι τα πιο αυστηρά για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα όλα τα μέλη που βρίσκονται στην OSPAR θα πρέπει να εναρμονιστούν με τις αποφάσεις και τους νόμους της.

Η Σύμβαση προχώρησε σε δύο μετατροπές τον Ιούνιο του 2007 με τη πρώτη να αναφέρει την απαγόρευση ρευμάτων CO<sub>2</sub> στη στήλη των υδάτων ή στα βάθη του Βορειοανατολικού Ατλαντικού και τη δεύτερη να αναφέρει ότι επιτρέπεται η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> σε υποθαλάσσια ιζήματα [16].

Η πρώτη τροπολογία προέκυψε προκειμένου να προστατευθούν έμβιοι οργανισμοί και τα θαλάσσια οικοσυστήματα από τις αρνητικές επιδράσεις που θα προκύψουν από την αύξηση των συγκεντρώσεων CO<sub>2</sub> στη στήλη του νερού ή στο πυθμένα του Βορειοανατολικού Ατλαντικού. Επίσης η OSPAR πιστεύει ότι η εναπόθεση CO<sub>2</sub> στα συγκεκριμένα σημεία δε θα βοηθήσουν στη μείωση της κλιματικής αλλαγής, ενώ δεν πορεύονται με τους στόχους της Συμβάσης. Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι η συγκεκριμένη τροπολογία εξακολουθεί να τίθεται υπό αμφισβήτηση στη διεθνή κοινότητα.

Η OSPAR παρείχε στα μέλη της συγκεκριμένες οδηγίες βάση των οποίων αναπτύσσονταν αναπτυξιακά προγράμματα για να δοθεί αδειοδότηση για την εναπόθεση CO<sub>2</sub> στις θάλασσες. Τα ελάχιστα που θα πρέπει να συμπεριληφθούν προκειμένου να δοθεί άδεια υπεράκτιας εναπόθεσης CO<sub>2</sub> είναι η περιγραφή του έργου, καθώς και τα ποσοστά έγχυσης που θα εναποτεθούν. Εκτός από τα παραπάνω θα πρέπει να συγκαταλέγονται ο τρόπος μεταφοράς του CO<sub>2</sub>, μέτρα για την αποφυγή κινδύνων καθώς και μέτρα αντιμετώπισης αυτών των κινδύνων, ενώ θα πρέπει να περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα μετριασμού.

Οι παραπάνω τροποποιήσεις επικυρώθηκαν από τα μέλη της OSPAR τον Ιούλιο του 2011 και αυτό τους επέτρεψε να εναποθέσουν το CO<sub>2</sub> σε υποθαλάσσιους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Το 2007, μια τροποποίηση στο Πρωτόκολλο του Λονδίνου (Παράρτημα 1) επέτρεψε την αποθήκευση CO<sub>2</sub>, εάν η διάθεση γίνεται σε γεωλογικό σχηματισμό υποθαλάσσιου βυθού, εάν τα ρεύματα CO<sub>2</sub> είναι «συντριπτικά» διοξείδιο του άνθρακα και εφόσον δεν προστίθενται απόβλητα. Η τροποποίηση για τα ρεύματα CO<sub>2</sub> ισχύει μόνο για εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε υποθαλάσσιους γεωλογικούς σχηματισμούς, ενώ τα συστατικά εναπόθεσης θα είναι μόνο CO<sub>2</sub> και όχι απόβλητα οποιασδήποτε μορφής. Ωστόσο, δε γίνεται ειδική αναφορά για την απαγόρευση ουσιών ίδιας τάξης με το CO<sub>2</sub>.

Μετά την επικύρωση των μελών το τροποποιημένο παράρτημα 1 τέθηκε σε ισχύ το Φεβρουάριο του 2007. Σε αντίθεση με την τροποποίηση της σύμβασης OSPAR που κάλυπτε μόνο τον Βορειοανατολικό Ατλαντικό, η τροποποίηση του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου του 2007 απαγόρευε ρητά την άμεση έγχυση CO<sub>2</sub> για OCS για όλα τα συμβαλλόμενα μέρη του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου [16].

Αξίζει να αναφερθεί και το άρθρο 6 του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου, όπου μετά τη τροποποίηση που υπέστη το 2009 επέτρεπε τη διασυνοριακή μεταφορά CO<sub>2</sub>, ενώ πριν τη τροποποίηση δεν επέτρεπε τη μεταφορά αποβλήτων ή άλλων υλικών από ένα μέρος να εναποτεθούν σε γεωλογικούς σχηματισμούς.

Παρ' ότι τα μέλη του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου ανήλθαν στα 40 το 2011, πολλά από αυτά αρνήθηκαν να υπογράψουν τη τροποποίηση του άρθρου 6 του 2009. Επομένως δεν έχει τεθεί ακόμα σε ισχύ και αυτό γιατί τα συγκεκριμένα μέλη δεν ενδιαφέρονται για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε συνοριακά ύδατα. Θα απαιτηθεί πιθανώς διακυβερνητική συνεργασία για να επιτευχθεί η επικύρωση. Σε πολλά μέλη του Πρωτοκόλλου η συμμόρφωση στα μέτρα που έχουν τεθεί έρχονται σε σύγκρουση με τις πολιτικές και τους νόμους που ισχύουν για την εκάστοτε χώρα, οπότε θα πρέπει η χώρα να αλλάξει τους νόμους της και να συμμορφωθεί με τα μέτρα του Πρωτοκόλλου.

Αν και η Σύμβαση OSPAR μαζί με το Πρωτόκολλο του Λονδίνου αποδέχονται την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους ωκεανούς, εάν δεν υπογραφεί η τροποποίηση του άρθρου 6 τότε η ανάπτυξη του OCS δε θα μπορεί να επιτευχθεί.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι στιγμής δεν έχουν διεξαχθεί μελέτες πεδίου που να αποδεικνύουν την OCS σε σημαντική κλίμακα πριν από την απαγόρευσή της μέσω του

Πρωτοκόλλου του Λονδίνου του 2007 και των τροποποιήσεων της Σύμβασης OSPAR. Η μεγαλύτερη προσπάθεια επίδειξης της OCS ήταν το πείραμα απευθείας έγχυσης CO<sub>2</sub> στη Χαβάη. Στη συγκριμένη παράγραφο περιγράφεται το πείραμα της Χαβάης, το οποίο απέτυχε κυρίως γιατί οι αρμόδιες αρχές απέτυχαν να ενημερώσουν το κοινό σχετικά με το περιεχόμενο του πειράματος. Παρ' όλα αυτά καταλήξαμε σε μερικά ενδιαφέροντα συμπεράσματα [16].

Το πείραμα της Χαβάης ανακοινώθηκε στο Κιότο 1997 και σε αυτό συμμετείχαν το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, το Νορβηγικό Ερευνητικό Συμβούλιο (NRC) καθώς και ο Οργανισμός Ανάπτυξης Νέας Ενέργειας και Βιομηχανικής Τεχνολογίας τη Ιαπωνίας. Αρχικός στόχος αποτελούσε η εύρεση πόρων ο οποίος απέτυχε παταγωδώς με τους επενδεδυμένους πόρους που συγκεντρώθηκαν να μην είναι ικανοποιητική.

Η ερευνητική ομάδα αποφάσισε να επιλέξει την περιοχή διεξαγωγής του πειράματος στο Μεγάλο Νησί της Χαβάης χωρίς να ενημερώσει και να εξηγήσει στους πολίτες το αντικείμενο του πειράματος και χωρίς να λάβει υπόψη του ότι ο ωκεανός αποτελεί πηγή φυσικών πόρων για τους κατοίκους. Παρ' ότι η περιοχή αποτελούσε ιδανική τοποθεσία για τη πραγματοποίηση της διαδικασίας λόγω της ερευνητικής υποδομής και της τεχνικής σκοπιμότητας το πείραμα δεν ολοκληρώθηκε επειδή ο πληθυσμός αντιλήφθηκε ότι η ερευνητές θα μολύνουν τον ωκεανό με CO<sub>2</sub>.

Έτσι το πιλοτικό πρόγραμμα εναπόθεσης CO<sub>2</sub> μέσω της άμεσης έγχυσης δε διεκπεραιώθηκε στη Χαβάη. Προκειμένου να σώσουν το έργο, οι επιστήμονες προσπάθησαν να πραγματοποιήσουν μια μελέτη στη Νορβηγία. Ωστόσο, οι ενέργειες της Greenpeace σταμάτησαν κάθε περαιτέρω δοκιμή, αποκλείοντας έτσι εντελώς κάθε πιθανότητα δοκιμών σε κλίμακα πεδίου του OCS άμεσης έγχυσης.

Αν και η εισαγωγή του OCS για τον μετριασμό του CO<sub>2</sub> είχε αρχικά υψηλές προσδοκίες, λίγοι πόροι στη συνέχεια επενδύθηκαν στη δημόσια προσέγγιση. Η απόφαση της ομάδας να μη γνωστοποιήσει το πείραμα εναπόθεσης CO<sub>2</sub> άμεσης έγχυσης στον ωκεανό της Χαβάης στους πολίτες της, ενώ παράλληλα παρέλειψε το γεγονός ότι ο ωκεανός αποτελεί πηγή ζωής για εκείνους επέφερε την αποτυχία του πειράματος [16].

## 14 ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΕ ΧΕΡΣΑΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Παράγοντες παγκόσμιων αλλαγών, ιδιαίτερα οι αυξήσεις στη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, οι αλλαγές στη μέση και διακύμανση των περιφερειακών βροχοπτώσεων και οι αλλαγές στο τρόπο χρήση της γης, προβλέπεται ότι θα έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία των οικοσυστημάτων στο μέλλον. Υπάρχουν ενδείξεις ότι ορισμένοι παράγοντες παγκόσμιας αλλαγής επηρεάζουν ήδη τα τρέχοντα οικοσυστήματα. Για παράδειγμα, υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι τα φυτά έχουν ήδη ανταποκριθεί στην αύξηση κατά 25% της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα που σημειώθηκε από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης. Ερευνητικά μοντέλα προβλέπουν ότι οι αντιδράσεις των οικοσυστημάτων θα ενδυναμωθούν με την αύξηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> να εκτοξευθούν από τα 700 ppm να φτάσουν έως και 1400 ppm. Οι αυξήσεις αυτές αναμένεται να πραγματοποιηθούν σε όλα τα οικοσυστήματα, καθώς οι συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> είναι σχεδόν ίδιες σε αντίθεση με τη διαθεσιμότητα νερού [19].

Επειδή η προβλεπόμενη αύξηση της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα μπορεί να επηρεάσει τις βιολογικές διεργασίες σε πολλά επίπεδα οργάνωσης, είναι σημαντικό να συνεχιστεί η μελέτη της άμεσης επίδρασης της αύξησης των επιπέδων του CO<sub>2</sub> που κυμαίνονται από τα μοριακά έως τα παγκόσμια. Ο Strain προχώρησε στην ανανέωση των ελέγχων τόσο σε φυσιολογικό, όσο και σε οικολογικό επίπεδο. Η ανανέωση αυτών των ελέγχων καθιστά πιο κατανοητή τη δέσμευση του άνθρακα από πρωτογενή φυσιολογικά και οικολογικά αίτια.



## 14.1 Μοριακοί Φυσιολογικοί Έλεγχοι στην Δέσμευση Άνθρακα

Οι επιδράσεις του αυξημένου CO<sub>2</sub> στους ρυθμούς φωτοσύνθεσης του C<sub>3</sub> (είδος φωτοσύνθεσης που παράγει 3 μόρια άνθρακα) έχουν αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών εμπλουτισμού CO<sub>2</sub> και έχουν αναφερθεί σε εκατοντάδες εργασίες. Η αυξημένη έκθεση στο CO<sub>2</sub> φαίνεται ότι επηρεάζει θετικά το ρυθμό φωτοσύνθεσης από μερικές ώρες έως ημέρες. Οι αυξημένοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης, όμως, δημιουργούν μείωση στη κάτω ρύθμιση φωτοσύνθεσης η οποία επίσης διατηρείται για αρκετό καιρό από την αρχική έκθεση στις αυξημένες συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub>. Ως εκ τούτου, η βραχυπρόθεσμη μέτρηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης μπορεί να υπερεκτιμήσει το δυναμικό αφομοίωσης άνθρακα ενός φυτού που υποβάλλεται σε μακροχρόνια έκθεση σε αυξημένο CO<sub>2</sub>.

Σε φυσιολογικό επίπεδο, η προς τα κάτω ρύθμιση της φωτοσύνθεσης σχετίζεται συχνότερα με μειωμένη δύναμη βύθισης (διαδικασία που καταναλώνει φωτοσυνθετικό) και χαμηλή διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών. Έτσι καταναλώνεται περισσότερο φωτοσυνθετικό που έχει ως απόρροια να μειώνεται ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των φύλλων και η αποθήκευση ευεργετικών ουσιών. Τα οικοσυστήματα που διέπονται από φυτά με φωτοσυνθετική ρύθμιση προς τα κάτω έχουν αυξημένα αζωτούχα συστατικά με φτωχά εδάφη ενώ ταυτόχρονα η παραγωγή φωτοσυνθετικών ενζύμων μειώνεται. Οι παραπάνω παραδοχές έχουν επιβεβαιωθεί σε ένα οικοσύστημα με βελανιδιές στη Πολιτεία της Φλόριντα στην Αμερική όπου οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> και ο περιορισμός των θρεπτικών συστατικών οδήγησαν, αρχικά στην αύξηση της φωτοσυνθετικής ικανότητας, ενώ αργότερα αυξήθηκε και η φωτοσυνθετική ρύθμιση προς τα κάτω η οποία ωστόσο ήταν διαφορετική για κάθε είδος. Σημειώνουμε ότι η φωτοσυνθετική ρύθμιση προς τα κάτω δεν μειώνει πάντα τη φωτοσύνθεση στους τρέχοντες ρυθμούς. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκαν ισχυρές αποκρίσεις της φωτοσυνθετικής ρύθμισης προς τα κάτω, αλλά τα ποσοστά φωτοσύνθεσης εξακολουθούσαν να είναι 53 % υψηλότερα σε φυτά που καλλιεργούνται σε υψηλά επίπεδα CO<sub>2</sub> για έξι χρόνια σε σχέση με τα φυτά που αναπτύσσονται σε CO<sub>2</sub> περιβάλλοντος. Η ρύθμιση της φωτοσυνθετικής πτώσης μπορεί επίσης να διατηρηθεί σε μεγάλες χρονικές κλίμακες με επιλογή, όπως φαίνεται από τη μειωμένη φωτοσυνθετική ικανότητα που αναπτύσσεται κοντά σε πηγή CO<sub>2</sub> (που έχει εκπέμψει CO<sub>2</sub> για εκατοντάδες έως χιλιάδες χρόνια) σε σχέση με φυτά του ίδιου είδους που αναπτύσσονται σε απόσταση από τη πηγή [19].

Είναι ευρέως γνωστό ότι το αυξημένο CO<sub>2</sub> διεγείρει την παραγωγή βιομάζας των φυτών C<sub>3</sub> και τα φυτά με απροσδιόριστη ανάπτυξη παρουσιάζουν υψηλότερη αύξηση ως απόκριση

σε αυξημένο CO<sub>2</sub> από τα φυτά με καθορισμένη ανάπτυξη, πιθανώς λόγω των διαφορών στην αντοχή του βυθίσματος, και τα φυτά συχνά εμφανίζουν υψηλότερες αποκρίσεις ανάπτυξης σε αυξημένη ποσότητα CO<sub>2</sub> όταν άλλοι πόροι όπως τα θρεπτικά συστατικά και το νερό δεν είναι περιοριστικοί. Όσον αφορά το φως, ωστόσο, υψηλότερες σχετικές βελτιώσεις ανάπτυξης από ό,τι σε συνθήκες υψηλού φωτισμού, επειδή το αυξημένο CO<sub>2</sub> αυξάνει την κβαντική απόδοση (κέρδος φωτοσυνθετικού άνθρακα ανά φωτόνια που απορροφώνται) των ειδών C<sub>3</sub>. Δε είναι, όμως, σίγουρο ποιες θα είναι οι επιδράσεις της αυξημένης ακτινοβολίας στα φυτά τα οποία υπόκεινται σε αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub>. Σε κάποια φυτά μπορεί να έχουν οδηγήσει μεγαλύτερη ανάπτυξη, σε άλλα φυτά μπορεί να μειώσει την ανάπτυξη τους, ενώ σε άλλα ενδέχεται η ανάπτυξη τους να μην επηρεαστεί από την αυξημένη ακτινοβολία.

Οι αρχικές διεγέρσεις στην ανάπτυξη ως απόκριση σε αυξημένο CO<sub>2</sub> μπορεί να μειωθούν με την πάροδο του χρόνου, πιθανώς λόγω μειωμένης ρύθμισης της φωτοσύνθεσης ή τροποποίησης της κατανομής βιομάζας και της φαινολογίας. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε ότι δενδρύλλιο δασικού πεύκου ηλικίας 3 ετών εμφάνισε ενισχυμένους σχετικούς ρυθμούς ανάπτυξης κατά την πρώτη περίοδο έκθεσης σε αυξημένο CO<sub>2</sub>, ενώ συνάμα έδειξε παρόμοιους ρυθμούς ανάπτυξης με τα φυτά ελέγχου κατά τη δεύτερη περίοδο έκθεσης σε αυξημένο CO<sub>2</sub>. Οι συγκεντρώσεις βιομάζας του πεύκου που είχαν τοποθετηθεί σε ειδικούς θαλάμους ανοιχτής κορυφής με αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> παρουσίασαν αύξηση κατά 90% σε σχέση με άλλα φυτά που αναπτύχθηκαν με τις τωρινές συγκεντρώσεις περιβάλλοντος. Αυτή η αύξηση της βιομάζας είναι απόρροια της ανάπτυξης και της αυξημένης επιφάνειας των φύλλων που πραγματοποιήθηκε τη πρώτη χρονιά του πειράματος η οποία βελτίωσε τις αποκρίσεις με την πάροδο του χρόνου. Από το συγκεκριμένο πείραμα γίνεται εμφανές ότι σε ένα χερσαίο δασικό οικοσύστημα που αναπτύσσεται σε αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> θα πρέπει να πραγματοποιείται συνεχής καταγραφή της βλάστησης [19].

Το ύψος και η πυκνότητα των κλαδιών φαίνεται να αυξάνεται όταν τα δέντρα εκτίθενται στις αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub>. Η απότομη αύξηση του ύψους από ορισμένους γονότυπους και είδη, μπορεί να δώσει συγκεκριμένο ατομικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι άλλων, εάν το φως περιορίζει τους πόρους. Επιπλέον, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των φύλλων, ο δείκτης της φυλλικής επιφάνειας αυξάνεται επίσης, με αποτέλεσμα υψηλότερη αφομοίωση άνθρακα σε επίπεδο οικοσυστήματος. Έχουν βρεθεί στοιχεία για αυτές τις αποκρίσεις σε σπορόφυτα δασικής πεύκης που καλλιεργούνται σε αυξημένο CO<sub>2</sub> και προβλέπουν ότι η αύξηση του δείκτη της φυλλικής επιφάνειας θα είχε ως αποτέλεσμα πιο γρήγορο κλείσιμο του θόλου. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η αλλαγή στη μορφή

ανάπτυξης ως απόκριση σε αυξημένο CO<sub>2</sub> μπορεί να έχει ουσιαστική επίδραση στην αναχαίτιση φωτός.

Στη διανομή της βιομάζας, τα φυτά θα δώσουν έμφαση στις δομές που αδυνατούν να απορροφήσουν συγκεκριμένους πόρους. Ως εκ τούτου, οι σχετικοί περιορισμοί στο άζωτο και σε άλλα θρεπτικά συστατικά του εδάφους σε αυξημένη ποσότητα CO<sub>2</sub> προβλεπόταν αρχικά ότι θα αυξήσουν την κατανομή της βιομάζας στις ρίζες. Στις πρώτες μελέτες που λάβαμε για το CO<sub>2</sub>, τα συμπεράσματα σχετικά με την κατανομή της βιομάζας βασίζονταν συχνά στη μέτρηση της αναλογίας ρίζας προς βλαστό (βιομάζα ρίζας/βιομάζα βλαστών). Η στιγμή, όμως, που έχουμε πάρει αυτή τη μέτρηση αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες πληροφορίες που αντιστοιχούν τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή ανάλογα με τους ρυθμούς ανάπτυξης, δεν αποτελούν τη κατανομή της βιομάζας όλης της ζωής του φυτού. Αν και οι αναλογίες ρίζας προς βλαστό δεν εξαρτώνται από τρόπο που επεξεργάζονται το CO<sub>2</sub> τα φυτά, αλλά οφείλονται στην αλλομετρία της ανάπτυξης, έχει παρατηρηθεί ότι φυτά που αναπτύσσονται με διαφορετικές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> έχουν διαφορετικό μέγεθος από φυτά που έχουν ίδιες ιδιότητες επεξεργασίας του CO<sub>2</sub>. Για την πραγματοποίηση της έρευνας των επιδράσεων του CO<sub>2</sub> κατά τη διανομή της βιομάζας θα πρέπει να αποτρέψουμε τις παραμορφώσεις που μπορεί να υποστεί το φυτό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τεχνικών που βασίζονται πάνω σε αλλοτροπικά στατιστικά (κυρίως ανάλυση συνδιακύμανσης). Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές, οι ερευνητές απέδειξαν ότι με την αφαίρεση επιπτώσεων του μεγέθους οι υψηλές συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> σπάνια μεταβάλλεται τη διανομή της βιομάζας μεταξύ ριζών και βλαστών [19].

Τα είδη των φυτών που διεξάγονται τα πειράματα αυξημένων συγκεντρώσεων CO<sub>2</sub> ανήκουν στα ποώδη και αυτό γιατί οι διαδικασίες που συναντάμε στα συγκεκριμένα είδη μοιάζουν με το μεγαλύτερο εύρος των φυτών με την μόνη διαφορά ότι μπορεί να μην ακριβώς ίδιες για όλο το κύκλο ζωής. Η διαδικασία της αναπαραγωγής επηρεάζεται λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων CO<sub>2</sub> περισσότερο από κάθε άλλη διαδικασία. Αυτή ίσως είναι μία από τις μεγαλύτερες επιπτώσεις που παρουσιάζονται λόγω του αυξημένου CO<sub>2</sub>. Αυτές οι επιπτώσεις επηρεάζουν τις αλλαγές που συναντάμε στην καταλληλότητα των γονότυπων σε ένα οικοσύστημα και δυσκολεύει τις προβλέψεις που μπορεί να επέλθουν από την αλλαγή στο κύκλο αναπαραγωγής και στις αποδόσεις των καλλιεργειών. Η αυξημένη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> οδηγεί σε υψηλή αναπαραγωγική δράση (αριθμός λουλουδιών, αριθμός καρπών, παραγωγή σπόρων).

## 14.2 Οικολογικοί Έλεγχοι στη δέσμευση άνθρακα

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις επιδράσεις του αυξημένου CO<sub>2</sub> στις αλληλεπιδράσεις φυτού με φυτό, επειδή τα φυτά που αναπτύσσονται μεμονωμένα είναι πιθανό να παρουσιάσουν διαφορετικές αποκρίσεις στο αυξημένο CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με φυτά που καλλιεργούνται στον ανταγωνισμό. Τα φυτά απορροφούν μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> όταν αυτά έχουν το σχήμα πυκνού θόλου. Η αέρια κατάσταση που βρίσκεται του CO<sub>2</sub> σε συνδυασμό με την ικανότητα του να διαχέεται στο χώρο δείχνει ότι δεν συμβάλει στο περιορισμό της ανάπτυξης των φυτών. Σε κάποια είδη C<sub>3</sub> τα οποία χρονολογούνται πριν τη βιομηχανική επανάσταση το CO<sub>2</sub> λειτουργούσε ως κατασταλτικός παράγοντας, όπου τα επίπεδα CO<sub>2</sub> ήταν 23% χαμηλότερα. Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στις ανταγωνιστικές σχέσεις των δέντρων ως τώρα δεν είναι αρκετές προκειμένου να αντλήσουμε τις απαραίτητες πληροφορίες και να καταλήξουμε σε σχετικά συμπεράσματα. Θα πρέπει να διεκπεραιωθούν περισσότερα πειράματα στα ποώδη φυτά αφού συναντάμε τις λειτουργίες τους στα περισσότερα είδη φυτών. Ωστόσο, μία από τις μελέτες έδειξε ότι τα σπορόφυτα του θαμνοχόρτου (C<sub>3</sub>) μπορεί να γίνουν πιο ανταγωνιστικά έναντι των φυτών ελάτης κάτω από αυξημένη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> ως αποτέλεσμα των υψηλότερων απόλυτων ρυθμών ανάπτυξης του χόρτου σε σχέση με το δέντρο. Οι περισσότερες μελέτες ανταγωνισμού έχουν δείξει ότι τα είδη C<sub>3</sub> έχουν πλεονέκτημα έναντι των ειδών C<sub>4</sub> (είδος φωτοσύνθεσης που παράγει 4 μόρια άνθρακα) με αύξηση του CO<sub>2</sub>, αν και έχουν αναφερθεί εξαιρέσεις. Επιπλέον, οι επιδράσεις του αυξημένου CO<sub>2</sub> στον ανταγωνισμό ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με το υπό εξέταση οικοσύστημα στα συστήματα των εκβολών ελών, τα είδη C<sub>3</sub> και C<sub>4</sub> εμφανίζονται σε κοντινή απόσταση και το αυξημένο CO<sub>2</sub> αποδείχθηκε ότι μεταβάλλει τη σύνθεση των ειδών και την παραγωγή βιομάζας προς όφελος των ειδών C<sub>3</sub>. Ωστόσο, σε ένα ξηρό, ψηλό σύστημα λιβαδιών με γρασίδι, ένα κυρίαρχο είδος C<sub>4</sub> ευνοήθηκε έναντι ενός κυρίαρχου είδους C<sub>3</sub> ως απόκριση στο αυξημένο CO<sub>2</sub> λόγω της υψηλότερης ανοχής στην ξηρασία στο είδος C<sub>4</sub> σε σχέση με το είδος C<sub>3</sub>. Οι σχέσεις ανταγωνισμού που μπορεί να προκύψουν στα είδη C<sub>3</sub> και C<sub>4</sub> θα πρέπει να μελετηθούν στο πλαίσιο οικοσυστήματος [19].

Συντάθηκαν αποτελέσματα από δημοσιευμένες μελέτες για την αυξημένη ποιότητα CO<sub>2</sub> του ζωντανού φυτικού ιστού και των απορριμμάτων και διαπιστώθηκε ότι τα υλικά των φύλλων από πολλά είδη παρουσίασαν μειωμένη συγκέντρωση αζώτου μετά από βραχυπρόθεσμη έκθεση σε αυξημένο CO<sub>2</sub>, ενώ οι επιδράσεις του αυξημένου CO<sub>2</sub> στη συγκέντρωση λιγνίνη ήταν πιο μεταβλητές μεταξύ των ειδών. Ωστόσο, τα δέντρα που εκτέθηκαν σε αυξημένο CO<sub>2</sub> για μεγάλο χρονικό διάστημα (σε μια άνοιξη CO<sub>2</sub>) δεν διέφεραν

στη συγκέντρωση του αζώτου τους από τα δέντρα που αναπτύσσονταν ήδη στο περιβάλλον με το αυξημένο CO<sub>2</sub>. Μέσω των μελετών που έλαβαν χώρα πάνω στην ανοργανοποίηση του άνθρακα, αποδείξαμε ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> παίζουν σημαντικό ρόλο στη διακύμανση της ποιότητας των απορριμμάτων. Συνοψίστηκαν πρόσφατες μελέτες σχετικά με τις επιπτώσεις του αυξημένου CO<sub>2</sub> στην αποσύνθεση σε διάφορα οικοσυστήματα (δάση, λιβάδια, αλμυρά έλη και γεωργικά συστήματα) και συμπέραναν ότι η χημεία των απορριμμάτων σπάνια μεταβάλλεται από το αυξημένο CO<sub>2</sub> και οι ρυθμοί αποσύνθεσης συχνά δεν επηρεάζονται. Μια εξήγηση γι' αυτό το φαινόμενο είναι η διαφορά στο υλικό των ζωντανών φύλλων και τα απορρίμματα ποικίλλουν στη χημική τους σύνθεση ως αποτέλεσμα της μετατόπισης των θρεπτικών ουσιών μακριά από τα γερασμένα φύλλα κοντά στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Οι αντιδράσεις στις αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> αυξάνονται λόγω των θρεπτικών ουσιών που διατηρούνται στα γερασμένα φύλλα, τα οποία δεν έχουν καταλήξει στο έδαφος και να αποικοδομηθούν από τα μικρόβια αλλά θα παραμείνουν στη βλάστηση [19].

Η αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> αυξάνει τις αλληλοεπιδράσεις μεταξύ των φυτών και των μυκορριζικών μυκήτων και των βακτηρίων που παραλαμβάνουν το άζωτο. Η απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών του εδάφους και κυρίως του φωσφόρου, δεν δεσμεύονται μόνο από τις ρίζες αλλά και από τη συνδυασμένοι απορρόφηση μαζί με τους μυκόρριζους μύκητες που εμφανίζονται σε πάνω από το 80% των φυτών. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> βοηθούν στη παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων υδατανθράκων από τα φύλλα και έτσι το κόστος του φωτοσυνθετικού για τη διατήρηση των μυκόρριζων μυκήτων μειώνεται κατά 10-20. Για παράδειγμα, στο κοντόφυλλο πεύκο, που καλλιεργείται σε μη γόνιμο δασικό έδαφος, η αυξημένη ποσότητα CO<sub>2</sub> ενίσχυσε τόσο την ανάπτυξη των ριζών όσο και τον αποικισμό μυκόρριζων, γεγονός που πιθανώς συνέβαλε στην υψηλότερη πρόσληψη θρεπτικών συστατικών. Η αύξηση της παραγωγής ριζών και ο αποικισμός μυκόρριζων μπορεί να αυξήσει την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών, μειώνοντας τις σχετικές διαφορές στη συγκέντρωση άνθρακα και αζώτου που μπορεί να αυξηθούν από την αυξημένη ποσότητα CO<sub>2</sub>. Διαπιστώθηκε ότι ο σπόρος ενός δέντρου που δεσμεύει το άζωτο, τα οποία τροφοδοτήθηκαν με άζωτο στο έδαφος, παρουσίασαν μεγαλύτερη δραστηριότητα αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων (*Rhizobium*) και υψηλότερη παραγωγή οξιδίων σε αυξημένο CO<sub>2</sub> από ό,τι στο τρέχον CO<sub>2</sub> περιβάλλοντος. Αυτή η λειτουργία οδήγησε στην αύξηση της συγκέντρωσης του αζώτου στα φύλλα. Η πρόσληψη αζώτου από τα φυτά αυξάνεται μέσω της

διαδικασίας της νιτρογενάσης η οποία επιτυγχάνεται πιο γρήγορα μέσω της αυξημένης συγκέντρωσης CO<sub>2</sub>.

Η γη χρησιμοποιείται για την εκτροφή καλλιεργειών, τη βοσκή των ζώων, τη συγκομιδή ξυλείας και καυσίμων, τη συλλογή και αποθήκευση νερού, τη δημιουργία οδικής διαδρομής και τα θεμέλια του εμπορίου, την εξόρυξη ορυκτών και υλικών, τη διάθεση των απορριμμάτων μας και την παροχή βιότοπων για τους ανθρώπους και τους ενοίκους της γης. Οι υψηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> περιορίζονται από το γεγονός ότι το ποσοστό του άνθρακα που συγκρατείται από τη γη και το νερό αυξάνεται [19].

Οι προηγούμενες αξιολογήσεις έτειναν να επικεντρώνονται σε οικολογικές διεργασίες και δυνατότητες και αντιμετώπιζαν τους οικονομικούς κοινωνικούς παράγοντες ως περιορισμούς (Α). Μια ελαφρώς διαφορετική άποψη θεωρεί τις τρεις διαστάσεις ως αλληλοενισχυόμενες και επιδιώκει να μεγιστοποιήσει τις επικαλύψεις (Β). Η ατμόσφαιρα περιέχει τώρα περίπου 760 δισεκατομμύρια τόνους (giga-tonnes = Gt) άνθρακα ως CO<sub>2</sub>, ποσότητα που αυξάνεται κατά μέσο όρο κατά  $3,3 \pm 0,2$  GtC κάθε χρόνο από τη δεκαετία του 1990, κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων. Το ποσοστό που κατέχει ο ατμοσφαιρικός άνθρακας στο χερσαίο οικοσύστημα είναι τη τάξεως του 30%, ίσως και μικρότερο. Η βλάστηση περιέχει σχεδόν 500 GtC ενώ το έδαφος περιέχει άλλους 2.000 GtC σε υπολείμματα οργανικής ύλης όπως αναφέρεται στη Διακυβερνητική επιτροπή για την αλλαγή του κλίματος (IPCC) Ειδική Έκθεση για την Αλλαγή Χρήσης Γης και τη Δασοκομία (LULUCF).

Ενδιαφέρον προκύπτει από τη δημοσίευση της Δεύτερης Έκθεσης Αξιολόγησης (SAR) της IPCC καθώς παρουσίασε ότι υπάρχουν 700 Mha δασικής έκτασης παγκοσμίως που μπορούμε να εναποθέσουμε ποσότητες άνθρακα. Ακόμη, η αποψίλωση των τροπικών δασών μπορεί να επιβραδυνθεί κατά 138 Mha. Επίσης, γίνεται λόγος για 217 Mha αναγέννησης τροπικών δασών, ενώ, τέλος, υπάρχουν 345 Mha για φυτείες και αγροτοδασοπονία. Από τις παραπάνω μελέτες που παρουσίασε, η IPCC ισχυρίστηκε ότι μέχρι το 2050 θα έχουμε μείωση κατά 60-87 GtC στη συγκεκριμένη τοποθεσία, εκ των οποίων τα 45-72 GtC θα ληφθούν από τις τροπικές περιοχές. Προς το τέλος αυτού του χρονικού διαστήματος, ο αντίκτυπος μετριασμού θα μπορούσε να προσεγγίσει τον μέγιστο ρυθμό των 2,2 GtC/έτος. Το κόστος που υπολογίζεται για να κατευνάσουμε τις ποσότητες άνθρακα ότι θα στοιχίσει από 2-8 \$/GtC (χωρίς να λάβουμε υπόψη το κόστος της γης και το κόστος συναλλαγής). Με σωστή διαχείριση η SAR πιστεύει ότι θα ήταν δυνατό να απορροφηθεί επιπλέον ποσότητα άνθρακα από 0,4 έως 0,8 GtC σε γεωργικά εδάφη στο χρονικό διάστημα των 50 ετών. Αξίζει να

σημειωθεί ότι θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή σε τυχόν «διαρροές» (δηλαδή οι κατακρατήσεις CO<sub>2</sub> να διαφύγουν σε άλλες περιοχές), μια ενέργεια η οποία δεν συμπεριλαμβάνεται στις αρμοδιότητες της SAR. Αυτή η έκθεση εξέτασε δάση, λιβάδια, καλλιεργήσιμες εκτάσεις και υγροτόπους και, όπου είναι δυνατόν, εξετάζει και όλες τις δεξαμενές άνθρακα. Οι δυνατότητες που προσφέρει ένα οικοσύστημα δεν περιορίζεται μόνο στο κατευνασμό των εκροών άνθρακα. Υπάρχουν και άλλες λειτουργίες που μπορούν να εκμεταλλευτούμε. Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε και θα αξιολογήσουμε αναλυτικά τη πρόοδο που έχει σημειώσει η IPCC-SAR στις επιπλέον μεθόδους με τους οποίους μπορούμε να αποθηκεύσουμε περισσότερες ποσότητες άνθρακα ώστε να διασφαλίζεται η αδιάλειπτη δέσμευση άλλων αγαθών και λειτουργιών μέσω της παροχής πολλών και διαφορετικών πόρων [19].

### 14.3 Ο ρόλος της ανθρακικής ανυδράσης στη δέσμευση CO<sub>2</sub> σε χερσαία οικοσυστήματα

Τα φυτά χρησιμοποιούν οξυγόνο για την παραγωγή ενέργειας και επίσης απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα. Τα πράσινα φυτά μπορούν να μετατρέψουν το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα σε σάκχαρα παρουσία του ηλιακού φωτός. Αυτή η διαδικασία, η οποία ονομάζεται φωτοσύνθεση, χρησιμοποιεί διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Το αέριο διοξείδιο του άνθρακα αποθηκεύεται στα φυτά ως διττανθρακικό ιόν. Στα φυτά τόσο των χερσαίων, όσο και των υδάτινων οικοσυστημάτων χρησιμοποιούν την ανθρακική ανυδράση προκειμένου να μετατρέψουν τα διττανθρακικά ιόντα σε διοξείδιο του άνθρακα που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης. Επίσης το συγκεκριμένο ένζυμο είναι σημαντικό για την ασβεστοποίηση των κοραλλιών. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η συγκεκριμένη διαδικασία είναι η αντίδραση του διττανθρακικού με το θαλασσινό νερό προκειμένου να παραχθεί η ανθρακική ανυδράση από τους πολύποδες των κοραλλιών, δημιουργώντας το ανθρακικό ασβέστιο. Η συγκεκριμένη ένωση βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος των κοραλλιών δημιουργώντας τη σκληρή επιφάνεια που τα διέπει [19].

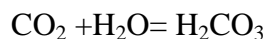
Η ανθρακική ανυδράση είναι ένα ένζυμο που βοηθά την ταχεία αλληλομετατροπή διοξειδίου του άνθρακα και νερού σε ανθρακικό οξύ, πρωτόνια και διττανθρακικά ιόντα. Το συγκεκριμένο ένζυμο δε συναντάται μόνο στους φυτικούς οργανισμούς, αλλά από το 1933 που ανακαλύφθηκε, έχει εντοπιστεί σε μεγάλες ποσότητες στους ιστούς τόσο και των θηλαστικών, των φυκών και των βακτηρίων. Η ανθρακική ανυδράση έχει κατηγοριοποιηθεί στις κατηγορίες της άλφα, βήτα και γάμα και, αν και εντοπίζονται στο ίδιο ένζυμο τα μέλη τους, έχουν ελάχιστη δομική ομοιότητα και αλληλουχία. Εν τούτης, οι διαδικασίες που εκτελούν είναι ίδιες και χρειάζονται ένα ιόν ψευδαργύρου στην ενεργό θέση. Ειδικότερα, στην άλφα κατηγορία ανήκουν όλα τα θηλαστικά, ενώ τα βακτήρια που παράγουν την ανθρακική ανυδράση για να παράξουν το μεθάνιο και ευδοκιμούν στις θερμές πηγές ανήκουν στη κατηγορία γάμα. Παρατηρούμε από τα προηγούμενα παραδείγματα ότι ανεξάρτητα σε ποια κατηγορία ενζύμων ανήκουν θα παράξουν μια παρόμοια ενεργή θέση ενζύμου. Εδώ δείχθηκε ότι, από πάνω προς τα κάτω, είναι παραδείγματα των ενζύμων άλφα, βήτα και γάμα ανθρακικής ανυδράσης αντίστοιχα. Το ένζυμο άλφα είναι μονομερές (ένα μόριο που μπορεί να συνδεθεί χημικά με άλλα μόρια ώστε να σχηματίσει ένα πολυμερές), ενώ το ένζυμο γάμα είναι τριμερές (αποτελείται από τρία μόρια). Αν δεν είναι προφανές ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση αναφερόμαστε σε βήτα ένζυμο, έχουν εντοπιστεί τέσσερα ιόντα ψευδαργύρου και έτσι φαίνεται ότι υπάρχουν τέσσερις πιθανές ενεργές θέσεις του ενζύμου. Άλλα μέλη αυτής



της κατηγορίας σχηματίζουν τετραμερή, εξαμερή ή οκταμερή, υποδηλώνοντας ότι είναι πιθανώς ένα δομικό στοιχείο για αυτήν την κατηγορία.

Η ανθρακική ανυδράση των θηλαστικών εμφανίζεται σε περίπου δέκα ελαφρώς διαφορετικές μορφές ανάλογα με τον ιστό ή το κυτταρικό διαμέρισμα στο οποίο βρίσκονται. Αυτά τα ισοένζυμα έχουν κάποιες παραλλαγές αλληλουχίας που οδηγούν σε συγκεκριμένες διαφορές στη δραστηριότητά τους. Η δραστηριότητα του κάθε ισοενζύμου δεν είναι ίδια. Για παράδειγμα σε κάποιες μυϊκές ίνες η δράση τους δεν είναι τόσο απαιτητική όσο στους σιελογόνους αδένες. Εκτός από τη λειτουργία τους κάποια ισοένζυμα είναι διαλυτά και εκκρίνονται, όπως στη περίπτωση της ανθρακικής ανυδράσης, ενώ κάποια άλλα ενώνονται με τις μεμβράνες συγκεκριμένων επιθηλιακών κυττάρων. Έτσι, αναπτύσσεται μια βιομιμητική προσέγγιση όπου η ανθρώπινη ανθρακική ανυδράση μετατρέπεται σε εσερίχια κόλι για την εφαρμογή της στον έλεγχο των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και για τη διατήρηση του pH σε εγκαταστάσεις λυμάτων [19].

Η ανθρακική ανυδράση αλλάζει τη ταχύτητα της παρακάτω χημικής αντίδρασης, χωρίς ωστόσο να τη μεταβάλλει:



Η λειτουργία του H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> είναι να διευκολύνει τη μεταφορά του CO<sub>2</sub>, ενώ συμβάλει στη μεταφορά και την αποθήκευση του H<sup>+</sup> και του HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Έχει προταθεί ότι συμβάλει στη φωτοσυνθετική στερέωση που λαμβάνει χώρα στους χλωροπλάστες των φυτικών κυττάρων. Γενικά στη φύση, το H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> το συναντάμε σε πάρα πολλά ζώα, φυτά και βακτήρια. Η ανθρακική ανυδράση των θηλαστικών έχει διάφορες μορφές που διαφέρει ως προς τις ενζυμικές ιδιότητες, τις αλληλουχίες αμινοξέων και τη δέσμευση αναστολέα. Σε κάποιες ομάδες, όπως στα ερυθροκύτταρα, η ανθρακική ανυδράση έχει πολύ μεγάλη λειτουργία, ενώ παράλληλα η λειτουργία της μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Αναλύοντας το προφίλ ρυθμού pH, καθώς και τη καμπύλη δέσμευσης pH φαίνεται ότι η ομάδα των ερυθροκυττάρων με σταθερά διάστασης οξέος (pka) κοντά στο 7 εμπλέκεται και στις δύο μορφές. Εξετάζοντας τα ισοένζυμα διαπιστώσαμε ότι έχουν μοριακό βάρος περίπου 30.000 και το κάθε μόριο περιέχει ένα άτομο ψευδαργύρου. Στα ερυθροκύτταρα που υπάρχουν στα βοοειδή κατηγοριοποιούνται σε δύο μορφές που είναι γνωστές ως Α και Β και διακρίνονται με σειρά κινητικότητας ενώ διαχωρίζονται μεταξύ του ηλεκτροφορητικά. Οι δύο μορφές είναι γενικά πολύ δραστήριες και μοιάζουν αρκετά με την παραλλαγή «C» που συναντάμε στον άνθρωπο.

Το εξαιρετικό χαρακτηριστικό της ανθρακικής ανυδράσης είναι ο πολύ υψηλός αριθμός των κύκλων εργασιών της [19].

Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παρατηρήθηκε ότι το  $\text{HCO}_3^-$  εμφανίζεται πολύ πιο έντονα και αυτό συμβαίνει λόγω των μηχανισμών δέσμευσης  $\text{CO}_2$  και  $\text{HCO}_3^-$ . Από τη μία πλευρά η δέσμευση του  $\text{CO}_2$  είναι μια λειτουργία διάχυσης, ενώ αντίθετα το  $\text{HCO}_3^-$  αποτελεί μια ενεργή διαδικασία που βοηθάει στη πρόσληψη και μεταφορά της κυτταρικής μεμβράνης μέσω διάφορων συστημάτων. Το φυτό εγκλιματίστηκε στο καθεστώς DIC (διάχυτη ενδοαγγειακή πήξη) για ανάπτυξη με μείωση της αποτελεσματικότητας καρβοξυλίωσης και της συγγένειας διττανθρακικών, αλλά ενίσχυσε τη φωτοσυνθετική ικανότητα σε αυξημένο DIC.

Ένας πλήρους μήκους κλώνος cDNA που κωδικοποιεί την ανθρακική ανυδράση (CA) απομονώθηκε από μια βιβλιοθήκη cDNA οξιδίων σόγιας. Για να εκτιμήσουμε τη θέση της ανθρακικής ανυδράσης καθώς και της πρωτεΐνης στα οξίδια σόγιας, τα υποβάλαμε σε επιτόπιο υβριδισμό και σε ανοσοεντοπισμό. Τα συμπεράσματα που προήλθαν από τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία ήταν ότι τόσο η ανθρακική ανυδράση όσο και η πρωτεΐνη υπήρχαν σε υψηλές ποσότητες σε όλους τους κυτταρικούς τύπους νεαρών οξιδίων, ενώ σε πιο ώριμα οξίδια δεν έγιναν αντιληπτά στο κεντρικό ιστό αλλά εντοπίστηκαν στα κύτταρα του φλοιού. Επίσης, στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης των οξιδίων η λειτουργία της ανθρακικής ανυδράσης είναι να διευκολύνεται η ανακύκλωση του  $\text{CO}_2$  ενώ σε επόμενα στάδια βοηθά στη διάχυση του  $\text{CO}_2$  έξω από το σύστημα οξιδίων. Παράλληλα, ο μεταβολισμός της σακχαρόζης διερευνήθηκε με εξέταση της χρονικής και χωρικής συσσώρευσης μεταγραφής των γονιδίων συνθάσης σακχαρόζης (SS) και καρβοξυλάσης φωσφοενολοπυρουβικής καρβοξυλάσης (PEPC), εντός επιτόπιας υβροβίωσης. Σε νεαρά οξίδια, υψηλά επίπεδα μεταγραφών γονιδίου SS βρέθηκαν στον κεντρικό ιστό καθώς και στα παρεγχυματώδη κύτταρα και τις αγγειακές δέσμες. Στα ώριμα οξίδια εντοπίζονται γονίδια μεταγραφών έκφρασης PEPC σε υψηλές ποσότητες, σε όλους τους κυτταρικούς τύπους, ενώ αντίθετα στη νεαρά οξίδια τα γονίδια μεταγραφών είναι σε χαμηλότερη ποσότητα, με τα περισσότερα να εντοπίζονται σε παρεγχυματικά κύτταρα και στη περίμετρο αγγειακών δεσμίδων. Επομένως αποδεικνύεται ότι κατά την ανάπτυξη των οξιδίων, η διάσπαση της σακχαρόζης συμβαίνει σε διαφορετικές θέσεις.

Η επίδραση της εξωτερικής συγκέντρωσης  $\text{CO}_2$  στην έκφραση της καρβονικής ανυδράσης (CA) και της ριβουλόζης 1,5-δισ-φωσφορικής καρβοξυλάσης/οξυγενάσης εξετάστηκε σε φύλλα μπιζελιού. Σε σύγκριση που έγινε ανάμεσα σε φυτά που αναπτύχθηκαν

στο CO<sub>2</sub> του περιβάλλοντος και σε φυτά που αναπτύχθηκαν υπό 1000  $\mu\text{m L/L CO}_2$  διαπιστώθηκε ότι στη δεύτερη κατηγορία οι ενζυμικές λειτουργίες καθώς και τα επίπεδα μεταγραφής εμφάνισαν μια ιδιαίτερη μείωση. Όσον αφορά τα επίπεδα δραστηριότητας της ανθρακικής ανυδράσης φαίνεται ότι στη δεύτερη κατηγορία ήταν αυξημένη σε σχέση με τα φυτά που καλλιεργήθηκαν στον αέρα. Η μεταστροφή των φυτών από 1000  $\mu\text{m L/L CO}_2$  στα επίπεδα του αέρα φαίνεται να υπάρχει μια πληθώρα μεταγραφής *ca* και *rbcS* σε πλήρως διογκωμένα φύλλα ενώ παράλληλα είχαμε αύξηση των ενζυμικών λειτουργιών [19].

## 14.4 Τρόποι αποθήκευσης του άνθρακα σε χερσαία οικοσυστήματα

Τα χερσαία οικοσυστήματα αποτελούν μια φυσική απάντηση για αποθήκευση τεράστιων συγκεντρώσεων άνθρακα.

Η έννοια της δέσμευσης άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα είναι η απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα σε δεξαμενές άνθρακα με μεγάλο προσδόκιμο ζωής. Η δεξαμενή μπορεί να είναι ζωντανή, υπέργεια βιομάζα (π.χ. δέντρα), προϊόντα με μεγάλη, ωφέλιμη ζωή που δημιουργούνται από βιομάζα (π.χ. ξυλεία), ζωντανή βιομάζα στο έδαφος (π.χ. ρίζες και μικροοργανισμοί) ή ανεκμετάλλευτος οργανικός και ανόργανος άνθρακας στα εδάφη και βαθύτερα υπόγεια περιβάλλοντα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η αύξηση της φωτοσυνθετικής στερέωσης άνθρακα από μόνη της δεν αρκεί. Αυτός ο άνθρακας πρέπει να στερεωθεί σε δεξαμενές μεγάλης διάρκειας ζωής. Διαφορετικά, μπορεί κανείς απλώς να μεταβάλλει το μέγεθος των ροών στον κύκλο του άνθρακα, αλλά όχι να αυξήσει τη δέσμευση άνθρακα [19].

Όταν το CO<sub>2</sub> που δεσμεύεται από το έδαφος και τη βλάστηση του χερσαίου οικοσυστήματος, τότε το χερσαίο οικοσύστημα θεωρείται ως κύριος βιολογικός «καθαριστής» του CO<sub>2</sub>. Επίσης, αξίζει να αναφέρουμε τον ορισμό της επίγειας δέσμευσης η οποία είναι τόσο η καθαρή απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα, όσο και η πρόληψη των εκπομπών CO<sub>2</sub> από το χερσαίο οικοσύστημα. Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί αναφέρεται ότι μπορεί να σημειωθεί πρόοδος στη διαδικασία της δέσμευσης μέσω της αντιστροφής των προτύπων στη χρήση της γης, μέσω της αύξησης της φωτοσυνθετικής δέσμευσης άνθρακα από τους φυτικούς οργανισμούς και, τέλος, μέσω της δημιουργίας ενεργειακών αντισταθμίσεων χρησιμοποιώντας βιομάζα για καύσιμα και άλλα προϊόντα. Έχει παρατηρηθεί ότι περίπου 2 GtC απορροφάτε από τη γήινη βιόσφαιρα ετησίως. Το έδαφος και η χλωρίδα δεσμεύουν περίπου 2.000 Gt ± 500 ετήσιες ποσότητες άνθρακα.

Η δέσμευση της γης προσφέρει επίσης σημαντικά πρόσθετα οφέλη, όπως: δημιουργία βιοτόπου άγριας ζωής και πρασίνου. Ακόμη, βοηθούν τις τοπικές κοινότητες στο τομέα της οικονομίας, ενώ παράλληλα μειώνεται το ποσοστό διάβρωσης του εδάφους και της καθίζησης των ρευμάτων. Ανάκτηση εδαφών με κακή διαχείριση. Αύξηση ψυχαγωγικής αξίας γης.

Μέσω της φωτοσύνθεσης απομακρύνεται βιολογικά το CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα και απορροφάται από τα χερσαία οικοσυστήματα. Το CO<sub>2</sub> αποθηκεύεται στα χερσαία

οικοσυστήματα είτε μέσα στο φυτικό ιστό, είτε σε οργανικό υλικό, είτε στα εδάφη. Εκτός από τη κανονική μορφή άνθρακα, απορροφώνται και έμμεσα μέσω των πλαστικών.

Τα χερσαία οικοσυστήματα έχουν υποστεί μεγάλες αλλαγές από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι μεγαλύτερες αλλαγές σημειώθηκαν με τη μετατροπή των φυσικών οικοσυστημάτων σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Μια τέτοια διαταραχή συνήθως οδηγεί σε μεγάλη μείωση της βιομάζας της βλάστησης και απώλεια περίπου 30% του άνθρακα στην επιφάνεια ενός μέτρου εδάφους [19].

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η μετατροπή σε αρόσιμη γεωργία είχε ως αποτέλεσμα απώλειες άνθρακα στο έδαφος περίπου 50 GtC και οι συνολικές εκπομπές άνθρακα από την αλλαγή χρήσης γης, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας βιομάζας, ανήλθαν σε περίπου  $122 \pm 40$  GtC. Οι απώλειες άνθρακα που οφείλονται σε φυσικά αίτια του εδάφους διαρκούν από λίγα χρόνια έως μερικές δεκαετίες, με αποτέλεσμα οι περιοχές που δεν έχουν μεγάλες εκτάσεις καλλιεργειών, κυρίως στην εύκρατη ζώνη, σημειώνουν μικρές απώλειες άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα τους. Οι τροπικές περιοχές, ωστόσο, παραμένουν μια σημαντική πηγή CO<sub>2</sub> λόγω της εκτεταμένης εκκαθάρισης νέων εδαφών και της μειωμένης διάρκειας των περιόδων «ανάπαυσης» στα μεταβαλλόμενα γεωργικά συστήματα.

Ο ανταγωνισμός για τη γη ποικίλλει μεταξύ των χωρών και εντός μιας χώρας. Οι πολιτικές χρήσης γης και δασοκομίας για τη διαχείριση του άνθρακα μπορεί να είναι πιο επιτυχημένες όταν εξετάζεται ο μετριασμός του κλίματος παράλληλα με άλλες ανάγκες για γη, όπως η γεωργία, η δασοκομία, η αγροδασοκομία, η βιοποικιλότητα, η διατήρηση του εδάφους και του νερού και η αναψυχή. Οι δασικές πυρκαγιές, για παράδειγμα, ελέγχονται, σε πολλά μέρη του κόσμου, όχι ως μέτρο για τον μετριασμό του άνθρακα, αλλά απλώς επειδή η πυρκαγιά απειλεί περιοχές ανθρώπινης εγκατάστασης και οικοσυστήματα ζωντανών οργανισμών.

Ομοίως, οι εκτιμήσεις για τη βιοποικιλότητα και το τοπίο έχουν παρακινήσει την προστασία των παλαιών συστάδων σε εύκρατα, βόρεια και τροπικά δάση από την εμπορική υλοτομία. Σε πολλές περιπτώσεις, μια τέτοια απόφαση απέτρεψε την απελευθέρωση άνθρακα στην ατμόσφαιρα, παρόλο που ο μετριασμός του άνθρακα δεν ήταν η αρχική πρόθεση. Αρνητικές επιπτώσεις εμφανίζονται και στην αδυναμία συλλογής των προϊόντων από τα δάση παλαιάς ανάπτυξης με αποτέλεσμα να επηρεάζονται από τη «διαρροή». Έτσι όταν υπάρχει, από ένα κράτος ζήτηση ξυλείας δε θα πρέπει να καταστρέψει ένα χερσαίο οικοσύστημα, αλλά θα πρέπει να προμηθευτεί από μια άλλη χώρα η οποία μπορεί να προμηθεύσει [19].



## 14.5 Η επιλογή της αναδάσωσης ως μέσω δέσμευσης άνθρακα

Πολλές εταιρείες οι οποίες παράγουν μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> χρησιμοποιούν τη μέθοδο της αναδάσωσης προκειμένου να τις μετριάσουν και έτσι να ελαχιστοποιήσουν τις συσσωρευμένες εκπομπές που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και να μετριάσουν τη παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Τα υγιή, αναπτυσσόμενα, νέα δάση είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά στη φυσική απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα και την απομόνωσή του ως άνθρακα στη δασική βιομάζα.

Οι εκ νέου βλάστηση των αποκατασταθέντων χερσαίων εκτάσεων αποτελούν μια εξαιρετική ευκαιρία για τη βελτιστοποίηση της δέσμευσης άνθρακα σε υποβαθμισμένες τοποθεσίες. Στις περιοχές όπου το περιβάλλον έχει σχεδόν καταστραφεί θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν φυτά τα οποία βρίσκονταν στη συγκεκριμένη τοποθεσία πριν οι βιομηχανίες την εκμεταλλευτούν ή να φυτευτούν φυτά που είναι ήδη προσαρμοσμένα σε παρόμοια περιβάλλοντα. Τα αυτόχθονα φυτικά είδη χαρακτηρίζονται από τη λειτουργία τους να αποκαθιστούν εδάφη με περιορισμένη ποιότητα ή τοποθεσίες που χρησιμοποιήθηκαν ως ορυχεία. Αυτό παρατηρήθηκε και από ανθρώπους που δούλευαν στα ορυχεία του Κολοράντο και της Αριζόνα. Επίσης, σπουδαίο ρόλο για την αποκατάσταση του περιβάλλοντος έπαιξε και η συμπερίληψη πολλών και διαφορετικών φυτικών ειδών, τα οποία αναμείχθηκαν με τα ιθαγενή είδη, ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκαν οι ποσότητες του νερού λόγω της ανάπτυξης επαρκούς εδαφικής κάλυψης. Οι παραπάνω διαδικασίες μας βοήθησαν να κατανοήσουμε περισσότερο την έννοια της αναβλάστησης από τα αυτόχθονα είδη. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε περιορισμένος αριθμός τύπων φυτών και συνεχώς χρειαζόταν η βελτίωση της τοποθεσίας εφαρμογής, αλλά τελικά το ποσοστό των φυτών που επιβίωσαν ήταν ικανοποιητικό. Έχει πραγματοποιηθεί η εκτεταμένη ανάκτηση εξορυκτικών περιοχών με τη χρήση αυτοφυών χερσαίων φυτών για την αποκατάσταση διαταραγμένου οικοσυστήματος και την δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα. Το υποβαθμισμένο περιβάλλον μετατρέπεται σε ένα πυκνό δασικό οικοσύστημα, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως καταβόθρες CO<sub>2</sub> και πηγές βιομάζας. Το οικοσύστημα έγινε αυτοβιώσιμο με τη δημιουργία μικροβιακής ποικιλότητας [19].

Προς αυτή την κατεύθυνση, μια έκταση περίπου 237 εκταρίων υποβαθμισμένων από ναρκοπέδια εδαφών και χωματερών ιπτάμενης τέφρας αποκαταστάθηκε μέσω των γηγενών χερσαίων φυτών που αποτελεί μια πράσινη προσέγγιση για το βιώσιμο μέλλον. Η συγκεκριμένη ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα για την αποκατάσταση της γης και της ανάπτυξης χερσαίων οικοσυστημάτων στα υπερκείμενα

ορυχεία. Αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει τη χρήση αυτοφυών φυτικών ειδών ανθεκτικών στα μέταλλα και της μικροχλωρίδας που προάγουν την ανάπτυξη αυτόχθονων φυτών μαζί με άλλες οργανικές τροποποιήσεις για την αναβλάστηση των χωματερών ορυχείων και τη φυτοσταθεροποίηση μεταλλικών ρύπων. Ανάλογα με την καταλληλότητα, την οικονομική σκοπιμότητα και τη διαθεσιμότητα κοντά στο χώρο του ορυχείου, επιλέχθηκαν οργανικές τροποποιήσεις όπως η λάσπη πίεσης ως βελτιωτικό υλικό. Για την απομόνωση στελεχών βιολιπασμάτων ειδικών για τη θέση, απομονώθηκαν συμβιωτικά και μη συμβιωτικά αζωτούχα δεσμευτικά και ταυτοποιήθηκαν ως ένα είδος οζώδους ρίζας οσπρίων, μικροσυμβιωτικών βακτηρίων που καθορίζουν το άζωτο και ένα βακτήριο που έχει την ικανότητα να απορροφά το ατμοσφαιρικό άζωτο, αντίστοιχα, με βάση τα μορφολογικά, βιοχημικά και πολιτισμικά χαρακτηριστικά τους. Ανεκτικοί στο στρες φυσαλιδώδες αρβυλώδεις μυκόρριζοι μύκητες απομονώθηκαν επίσης από δείγματα ριζοσφαιρικού εδάφους που συλλέχθηκαν από φυτά που αναπτύσσονταν σε κοντινή τοποθεσία ορυχείου. Τα είδη των φυτών που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη τοποθεσία επιλέχθηκαν με βάση την οικολογική και οικονομική σημασία και τη συμβατότητα τους στη περιοχή της εξόρυξης. Επιλέχθηκαν διάφορα είδη φυτών για φύτευση. Οι φυτικοί οργανισμοί είχαν μεγαλύτερα ποσοστά επιβίωσης (από 85-100%) λόγω της αποκατάστασης του περιβάλλοντος με τη χρήση πράσινων φυτών. Από τις έρευνες διαπιστώθηκε τα συγκεκριμένα είδη βελτίωσαν τη ριζόσφαιρα της χωματερής, ενώ ταυτόχρονα με τη χρήση ενδομυκόρριζων, επέτρεψαν στο φυτό να απαλλάσσονται από συνθήκες στρες. Στις παραπάνω διαδικασίες προστίθεται και η βελτίωση των χωματερών του ορυχείου μέσω μικροβιολογικών και φυσικοχημικών καταστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, η δυνατότητα δέσμευσης CO<sub>2</sub> της χωματερής αποβλήτων ανέρχεται σε έως έξι φορές περισσότερη εν αντιθέσει με άλλες πρακτικές διαχείρισης γης, με τη δέσμευση του άνθρακα από τα ξεχωριστά είδη φυτών της περιοχής να κυμαίνεται από 35 έως 45 kgCO<sub>2</sub>/ha/έτος [19].

Η καλλιέργεια φυτών σε υποβαθμισμένα περιβάλλοντα προωθεί την απορρόφηση CO<sub>2</sub>, ενώ η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου μπορεί να βελτιωθεί με τη διεύρυνση της βλάστησης με την εκμετάλλευση κατάλληλης μικροχλωρίδας. Το χερσαίο οικοσύστημα δε θα είναι αυτοβιώσιμο αν δε αναπτυχθεί στο έδαφος η μικροβιακή ποικιλότητα. Οι παράγοντες που υπαγορεύουν το βαθμό στον οποίο τα αυτόχθονα ή προσαρμοσμένα είδη πετυχαίνουν σε μια τοποθεσία για τη βελτιστοποίηση της δέσμευσης άνθρακα είναι: βασικές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών, επιρροές της οργανικής ύλης του εδάφους στην ποιότητα του εδάφους και αξιολόγηση μικροβιακών δραστηριοτήτων που κινητοποιούν τα θρεπτικά



συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Για την επίλυση αυτών ζητημάτων θα πρέπει να χρηματοδοτηθούν επιστημονικές μελέτες σε ποικίλες περιοχές, σε διαφορετικό κλίμα και έδαφος προκειμένου να καταγραφεί η διαδικασία της δέσμευσης CO<sub>2</sub> μέσω των χερσαίων οικοσυστημάτων.

Μέσω της μικρομετεωρολογικής τεχνικής μπορούμε να προβλέψουμε το προϋπολογισμό του άνθρακα (C) στα χερσαία οικοσυστήματα. Η μέθοδος της συνδιακύμανσης των δινών χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της Καθαρής Ανταλλαγής Οικοσυστήματος (NEE) του διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ της ατμόσφαιρας και της χωματερής αποβλήτων του ορυχείου μαγγανίου στο Gumgaon της Ινδίας. Το πείραμα διεξήχθη ως εξής: πάνω σε ένα μεταλλικό πύργο ύψους 10 μέτρων τοποθετήθηκαν διάφορα μετρητικά όργανα από τα οποία λάβαμε αυτές τις μετρήσεις. Χρησιμοποιήθηκαν συστήματα διανομής/συνδιακύμανσης διανομής από τα οποία μετρήθηκαν οι ταυτόχρονες συγκεντρώσεις αερίων καθώς και η τρισδιάστατη κατεύθυνση του ανέμου. Επίσης, για τους σκοπούς του πειράματος οι μετεωρολογικές μετρήσεις λήφθηκαν από έναν αυτοματοποιημένο μετεωρολογικό σταθμό αποτελούμενο από καταγραφικό δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα συνδιακύμανσης δινών Campbell Scientific Inc. για τη μέτρηση της ροής διαφορετικών βαθμών μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της γης.

Το σύστημα αποτελούνταν από τρισδιάστατο ηχητικό ανεμόμετρο CSAT3 και LI7500 αναλυτής υπέρυθρων αερίων (IRGA) και αισθητήρες HMP45C για θερμοκρασία και υγρασία. Καθένα από αυτά τα όργανα συνδέθηκε με τους αντίστοιχους καταγραφείς δεδομένων τους. Η οριζόντια ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου υπολογίζονται από το καταγραφικό από τρισδιάστατη μέτρηση του ανέμου που έγινε με ηχητικό ανεμόμετρο. Με αυτή τη διαμόρφωση, το σύστημα θα μπορούσε να μετρήσει τη ροή διοξειδίου του άνθρακα, τη ροή λανθάνουσας θερμότητας, την αισθητή ροή θερμότητας από τον ήχο, τη θερμοκρασία, την υγρασία και την οριζόντια ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου. Τα CSAT3, LI7500 και HMP45C τοποθετήθηκαν σε τρίποδο χρησιμοποιώντας οριζόντιο βραχίονα στήριξης. Το IRGA απομακρύνθηκε από το ανεμόμετρο για να ελαχιστοποιηθούν οι παραμορφώσεις ροής. Η κεφαλή του αισθητήρα IRGA είχε κλίση περίπου 60 °C από την οριζόντια για να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα της βροχόπτωσης που συσσωρεύεται στα παράθυρα. Μαζί με τους αισθητήρες ταχείας απόκρισης τοποθετήσαμε και μια ασπίδα ακτινοβολίας του HMP45C [19].

Τα προγραμματισμένα συστήματα ελέγχου επέτρεψαν εκτεταμένες περιόδους λειτουργίας του πειράματος χωρίς να χρειάζεται επίβλεψη. Οι σύγχρονοι καταγραφείς

δεδομένων χρησιμοποιούσαν εξελιγμένα προγράμματα προκειμένου να διαχειρίζονται τον τοπικό έλεγχο και την ανάκτηση των δεδομένων. Η δυνατότητα των καταγραφικών εργαλείων επιτρέπει την λειτουργία δύο τύπων δεδομένων. Ο πρώτος είναι η καταγραφή αρχείων ανά 30 λεπτά και ο δεύτερος πραγματοποιείται με την καταγραφή ακατέργαστων παρατηρήσεων στη συχνότητα των 10 Hz. Το συνολικό σύστημα ελεγχόταν από το καταγραφικό CR5000. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο καταγραφικό είναι η αδιάκοπη λειτουργία του, καθώς και η δυνατότητα παρακολούθησης της τάσης της γεννήτριας και του εξοπλισμού απόκτησης δεδομένων που είναι τοποθετημένος στον πύργο μαζί με την παρακολούθηση της κυκλοφορίας του δικτύου. Η ανάκτησης δεδομένων γινόταν κάθε εβδομάδα, όπου ένα όργανο που ήταν εγκατεστημένο στον ιστότοπο τα κατέβαζε.

Στην εγκατάσταση είχε τοποθετηθεί και ένα ηχητικό ανεμόμετρο για να μετρά τη ταχύτητα του ήχου στον αέρα που χρησιμοποιούσε την αναμετάδοση ενός σύντομου ξεσπάσματος υπερήχων από ένα μορφοτροπέα. Χρησιμοποιήθηκε αυτός ο τρόπος καθώς η ταχύτητα του ανέμου εμποδίζει τη λήψη της πραγματικής ταχύτητας του ήχου κατά τη μέτρηση. Η ηχητική θερμοκρασία μπορεί επίσης να υπολογιστεί από την ταχύτητα του ήχου που μετράτε από το ανεμόμετρο. Το καθαρό κέρδος ή απώλεια άνθρακα από ένα οικοσύστημα ορίζεται ως η καθαρή παραγωγή οικοσυστήματος (NEP, ή PNE) και προκύπτει από το κέρδος άνθρακα από αυτοτροφικούς οργανισμούς (ακαθάριστη πρωτογενή παραγωγικότητα, GPP ή PGP) μείον την απώλειά του από αυτότροφο (Ra) και ετερότροφη (Rh) αναπνοή:

$$NEP = GPP - Ra - Rh$$

Η διαφορά μεταξύ GPP και Ra, ή καθαρής πρωτογενούς παραγωγής (NPP, ή PNP), ενδιαφέρει τους οικολόγους εδώ και αρκετές δεκαετίες. Οι μετρήσεις συνδιακύμανσης των δινών και τα μετεωρολογικά δεδομένα ήταν διαθέσιμα για όλη την ημέρα. Η μέση πυκνότητα κατακόρυφης ροής του CO<sub>2</sub> λαμβάνεται ως η συνδιακύμανση 30 λεπτών μεταξύ των κατακόρυφων διακυμάνσεων (ω) και του λόγου ανάμειξης CO<sub>2</sub> (ε):

$$F_z = \overline{\rho_\alpha} \cdot \overline{\omega \epsilon}$$

Στην παραπάνω εξίσωση το ρ<sub>α</sub> αναφέρεται στην πυκνότητα του αέρα, οι παύλες πάνω από τα κάθε σύμβολα δηλώνουν τον μέσο όρο του χρόνου και οι πρώτοι αντιπροσωπεύουν διακυμάνσεις σχετικά με τη μέση τιμή. Μια θετική συνδιακύμανση μεταξύ ω και ε υποδηλώνει καθαρή μεταφορά CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και μια αρνητική τιμή δείχνει καθαρή απορρόφηση CO<sub>2</sub> από τη βλάστηση. Ο μέσος όρος του χρόνου που χρησιμοποιήθηκε ήταν τα

30 λεπτά. Η Καθαρή Ανταλλαγή Οικοσυστήματος (NEE) υπολογίστηκε προσθέτοντας την τυρβώδη ροή στα 10m που μετρήθηκε με δινική συνδιακύμανση και τη μεταβολή στην αποθήκευση κάτω από 10m. Η ροή των δινών και η παρατήρηση αποθήκευσης προστέθηκαν για να υπολογιστεί η μισή ώρα καθαρής ανταλλαγής οικοσυστήματος [19].

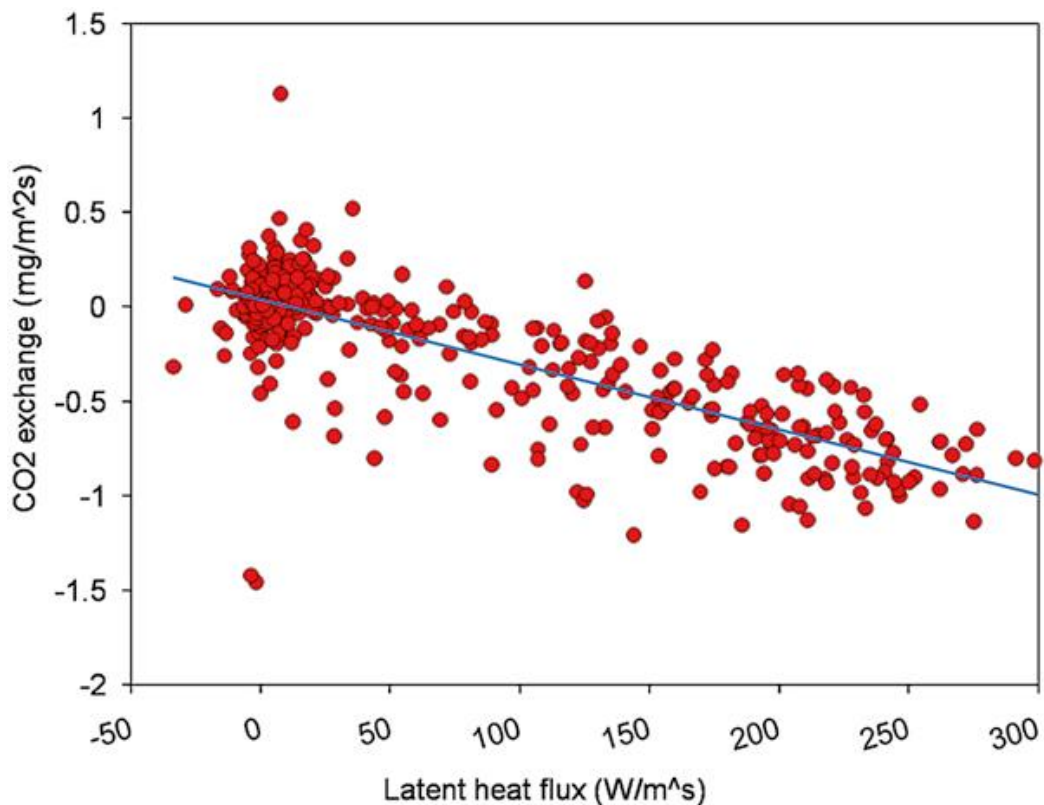
Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το CO<sub>2</sub> πραγματοποιούσε συνδιακύμανση δινών για 31 συνεχόμενες ημέρες. Στο πείραμα λήφθηκαν υπόψη οι συνεχείς μετρήσεις συνδιακύμανσης δινών και τα εικοσιτετράωρα μετεωρολογικά δεδομένα. Επίσης, συμπεριλαμβάνεται το γεγονός ανατολής και δύσης του ηλίου στις 06:00 και 18:00 αντίστοιχα κατά τη τοπική ώρα. Αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε μετά την ανατολή του ηλίου και αυξήθηκε αργά προς το απόγευμα. Διαπιστώθηκε ότι τις ώρες όπου τα φυτά χρησιμοποιούν τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης, απορροφώνται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub>, ενώ παράλληλα αντισταθμίζεται η αναπνοή του οικοσυστήματος μέχρι της 09:00 τοπική ώρα. Στη συνέχεια, ένα λιγότερο θετικό NEE έδειξε ότι η απορρόφηση του CO<sub>2</sub> αυξήθηκε ραγδαία μέχρι τη 13:00 τοπική ώρα, όπου σημειώθηκε η μεγαλύτερη μέτρηση με μέσο όρο 0,7595 mg/m<sup>2</sup>s.

Μετά από 1.300 ώρες, η πρόσληψη CO<sub>2</sub> μειώθηκε γρήγορα το απόγευμα περνώντας το σημείο αντιστάθμισης στις 1.800 ώρες. Η νυχτερινή αναπνοή έδειξε κατά μέσο όρο 0,054 mg/m<sup>2</sup> s. Η αύξηση του ρυθμού πρόσληψης CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια της ημέρας οφειλόταν στην αυξημένη φωτοσύνθεση, η οποία εξαρτάται από το ηλιακό φως. Παρόμοια ποσοστά απορρόφησης CO<sub>2</sub> επιβεβαιώθηκαν και σε άλλα τροπικά δάση που πραγματοποιούνταν το ίδιο πείραμα. Η μείωση της απορρόφησης οφείλεται στις χαμηλές ανταλλαγές αερίων που λάμβαναν χώρα τις απογευματινές ώρες στη περιοχή των φύλλων. Διάφοροι επιστήμονες έχουν αναφέρει ότι η απογευματινή κατάθλιψη μπορεί να οφείλεται στην απόκριση του στομάχου στην πυκνότητα των ατμών ή στο χαμηλό δυναμικό νερού των φύλλων, στις φωτοσυνθετικές επιδράσεις της αυξημένης θερμοκρασίας και στην αύξηση της αναπνοής των φύλλων, των φυτών ή του εδάφους λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας.

Η μέση θερμοκρασία φαίνεται να είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την ανταλλαγή CO<sub>2</sub>. Οι μεγαλύτερες τιμές απορρόφησης CO<sub>2</sub> λήφθηκαν μεταξύ των θερμοκρασιών από 15 έως 30°C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τους 30°C η πρόσληψη στις συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> ήταν μειωμένες κάτι που οφείλεται στη μείωση του φωτοσυνθετικού ρυθμού. Έτσι, διαπιστώθηκε ότι η φωτοσύνθεση είναι αρκετά ευαίσθητη στην άμεση αναστολή λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Αυτή η αναστολή συνδέεται στενά με την απενεργοποίηση της ριμπουλόζης, διφωσφορικής καρβοξυλάσης/οξυγενάσης, που εμπλέκεται στον κύκλο Calvin, για να καταλύσει το πρώτο σημαντικό βήμα στερέωσης

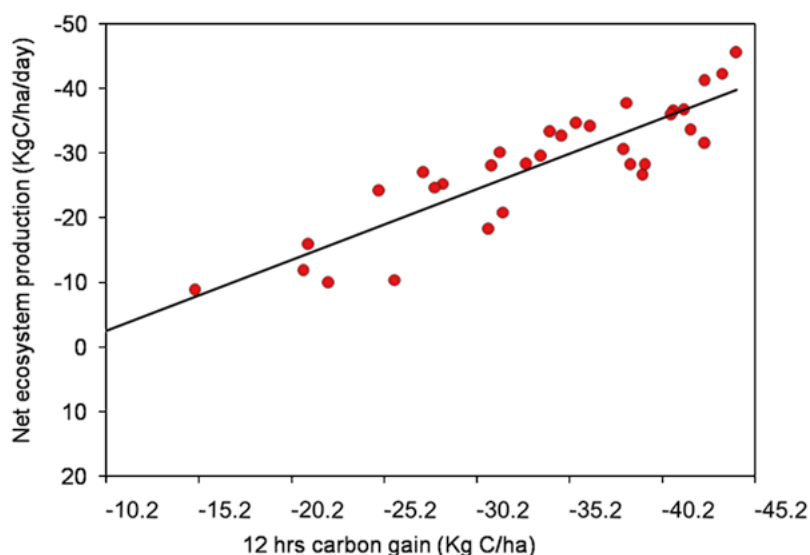
άνθρακα που είναι ευαίσθητο στη θερμοκρασία. Οι θερμές θερμοκρασίες διεγείρουν τη φωτοαναπνοή και τη συνηθισμένη αναπνοή στα φυτά. Έτσι, τα περισσότερα φυτά ρίχνουν τη φωτοσυνθετική τους δραστηριότητα σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η μείωση της πρόσληψης CO<sub>2</sub> μπορεί επίσης να οφείλεται στο κλείσιμο του στομάχου του φυτού ως απόκριση στην απαίτηση εξάτμισης ή σε μια αλλαγή στη βιοχημεία της φωτοσυνθετικής ικανότητας λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας ή σε κερκάρδιο ρυθμό ή σε συνδυασμό όλων αυτών των μηχανισμών [19].

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην εικόνα 18 δείχνουν την επίδραση της λανθάνουσας ροής θερμότητας στην καθαρή ανταλλαγή CO<sub>2</sub>. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η ταχεία αύξηση της λανθάνουσας θερμότητας είναι ανάλογη της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας. Ώρα με την ώρα η ένταση του φωτός του ήλιου μαζί με τη θερμοκρασία αυξάνονται και έτσι η εισερχόμενη ακτινοβολία μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα, η οποία συντελεί στην λειτουργία της εξάτμισης και της διαπνοής στους φυτικούς οργανισμούς. Τα στόματα των φύλλων αυξάνουν το ρυθμό διαπνοής των φυτών με τη παρουσία του ήλιου και της υψηλής θερμοκρασίας ενώ παράλληλα η αύξηση του ηλιακού φωτός βοηθά τα φυτά να αυξήσουν το ρυθμό φωτοσύνθεσης τους.



Ει κ ό ν α 18 Ανταλλαγή CO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup> s) ως συνάρτηση της λανθάνουσας ροής θερμότητας (W/m<sup>2</sup>s).  
Πηγή: [Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants \(Eric LichtfouseJan SchwarzbauerDidier Robert\)](#)

Η εικόνα 19 δείχνει την καθαρή παραγωγή CO<sub>2</sub> οικοσυστήματος σε σχέση με το κέρδος άνθρακα από το οικοσύστημα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Προκειμένου οι μετρήσεις να είναι έγκυρες, ρυθμίστηκε η νυχτερινή ανταλλαγή του CO<sub>2</sub> στο μηδέν και στη συνέχεια αθροίστηκε ο συσσωρευμένος άνθρακας από το NEE για τη διάρκεια των 12 ωρών. Το κέρδος άνθρακα δώδεκα ωρών είναι ο άνθρακας που απορροφάτε κατά τη διάρκεια της ημέρας από τα φυτά, δηλαδή η ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγή. Η διαφορά της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγής από την αναπνοή μας δίνει τη καθαρή παραγωγή του άνθρακα στο οικοσύστημα. Το γράφημα δείχνει ότι η καθαρή παραγωγή οικοσυστήματος αυξάνεται με αύξηση άνθρακα 12 ωρών, υποδηλώνοντας ότι η καθαρή παραγωγή οικοσυστήματος εξαρτάται από την πρόσληψη άνθρακα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Καθίσταται εμφανές ότι η αναπνοή διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στη καθαρή παραγωγή οικοσυστήματος. Άλλη μια παρατήρηση είναι ότι αν από τη καθαρή παραγωγή συστήματος αφαιρέσουμε την ακαθάριστη πρωτογενή παραγωγή (δηλαδή το κέρδος άνθρακα 12 ωρών) θα μπορούμε να βρούμε τον άνθρακα που απελευθερώνεται από το οικοσύστημα κατά την αναπνοή. Βάση των ερευνών η καθαρή παραγωγή οικοσυστήματος (NEP) μπορεί να κυμανθεί από 52 έως 85% με τη προϋπόθεση ότι η αναπνοή είναι μεγαλύτερη από 15% και μικρότερη από 48% της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγής (GPP). Μέσω της διαδικασίας της αναδάσωσης η καθαρή παραγωγή οικοσυστήματος της γης εντοπίζεται στα 28.196 kgC/ha/ημέρα, ενώ παράλληλα η νυχτερινή εκροή κυμαίνεται περίπου στις 5,433 kgC/ha/ημέρα.



Εί κ ό ν α 19 Άνθρακας που συσσωρεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με την Καθαρή Παραγωγή Οικοσυστήματος (KgC/ha/ημέρα)

Πηγή: [Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants \(Eric LichtfouseJan SchwarzbauerDidier Robert\)](#)

Η αποκατάσταση της γης των ορυχείων με χρήση χερσαίων φυτών είναι μια πιθανή επιλογή για την ενίσχυση της διαδικασίας αποκατάστασης της βλάστησης και του οργανικού άνθρακα του εδάφους. Η χρήση βελτιωτικών υλικών όπως η πεπιομένη λάσπη μαζί με βιολίπασμα βοήθησε στη βελτίωση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, της ανάπτυξης των φυτών και της ριζοσφαιρικής μικροχλωρίδας της χωματερής μαγγανίου στο Gumgaon.

Η περίοδος αποκατάστασης αύξησε τις ποσότητες του οργανικού άνθρακα που μπορεί να δεχθεί το έδαφος. Στα εδάφη που ανακτήθηκαν από την αναδάσωση παρατηρήθηκε ότι οι ποσότητες του οργανικού άνθρακα (SOC) ήταν μικρότερες από το ποσοστό που κατείχε πριν από το δασικό έδαφος αλλά μεγαλύτερο από το γεωργικό έδαφος. Συγκεκριμένα η ποσότητα που ήταν αποθηκευμένη στη δασική γη χρειάστηκε μια περίοδο άνω των 100 ετών, ενώ αντίθετα οι ποσότητες οργανικού άνθρακα του ανακτημένου εδάφους παρουσίασαν σχεδόν το 60% της περιεκτικότητας των δασικών εκτάσεων άνθρακα στη χρονική διάρκεια των 20 ετών. Η ανακτημένη γη μπορεί να δεσμεύσει περισσότερο άνθρακα σε σύγκριση με τη γεωργική γη. Στο Πρωτόκολλο του Κιότο έχει υπογραφεί στη Σύμβαση Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) ο Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης (CDM) ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναβάθμιση του περιβάλλοντος των ορυχείων μέσω της διαδικασίας της αναδάσωσης. Η συγκεκριμένη δραστηριότητα θα αποφέρει στις τοπικές κοινότητες τεράστια κοινωνικοοικονομικά οφέλη ενώ επίσης θα επιτευχθούν πολλοί περιβαλλοντικοί στόχοι. Η εφαρμογή του CDM στην αναβάθμιση του περιβάλλοντος των ορυχείων θα προωθήσει το έργο του και έτσι θα ενθαρρύνει τις κυβερνήσεις και ιδιωτικές εταιρείες να επενδύσουν σε έργα αναπτυσσόμενων χωρών με στόχο τη μείωση και αποφυγή των εκπομπών. Εν κατακλείδι στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζεται ότι τα χερσαία οικοσυστήματα έχουν τη δυνατότητα να μετριάσουν σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Έτσι η αποκατάσταση των εδαφών και των οικοσυστημάτων θα βοηθήσουν τα χερσαία οικοσυστήματα στον μετριασμό δύο σημαντικών περιβαλλοντικών ζητημάτων. Της αύξησης του φαινομένου του θερμοκηπίου και της ανάπτυξης χερσαίων εκτάσεων λόγω διαφόρων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων [19].

## 15 ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως κοιτάσματα πετρελαίου, άνθρακα και υπόγειοι υδροφορείς, είναι πιθανό να παρέχουν την πρώτη μεγάλης κλίμακας ευκαιρία για συγκεντρωμένη εναπόθεση του CO<sub>2</sub>. Στην πραγματικότητα, η εναπόθεση CO<sub>2</sub> λαμβάνει χώρα ήδη στο Sleipner West στα ανοικτά των ακτών της Νορβηγίας, όπου περίπου ένα εκατομμύριο τόνοι CO<sub>2</sub> δεσμεύονται ετησίως ως μέρος ενός υπεράκτιου έργου παραγωγής φυσικού αερίου. Οι προγραμματιστές τεχνολογιών για τη εναπόθεση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς μπορούν να αντλήσουν δεδομένα από τη σχετική εμπειρία που αποκτήθηκε εδώ και σχεδόν έναν αιώνα παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου, από τους υπόγειους υδάτινους πόρους και, πιο σύγχρονες μεθόδους, όπως, αποθήκευσης φυσικού αερίου και αποκατάστασης των υπόγειων υδάτων. Μέσω της εναπόθεσης σε γεωλογικούς σχηματισμούς ενισχύεται το κέρδος καθώς δίνεται η δυνατότητα ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου (Enhanced oil recovery) (EOR), ενώ παράλληλα οι κοίτες άνθρακα μπορούν να μας προμηθεύσουν με ενισχυμένη παραγωγή μεθανίου. Ταυτόχρονα, το CO<sub>2</sub> δρα και ως «αέριο απόσβεσης» και αντικαθιστά το μεθάνιο στη δεξαμενή με αποτέλεσμα να δίνεται τη δυνατότητα να βελτιώσουμε την αποθήκευση του φυσικού αερίου [20].

### 15.1 Μηχανισμοί εναπόθεσης

Το CO<sub>2</sub> μπορεί να δεσμευτεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς μέσω τριών μηχανισμών. Πρώτον, το CO<sub>2</sub> μπορεί να παγιδευτεί ως αέριο ή ρευστό σε υπερκρίσιμη κατάσταση κάτω από ένα κάλυμμα χαμηλής διαπερατότητας, παρόμοια με τον τρόπο που το φυσικό αέριο παγιδεύεται σε δεξαμενές αερίου ή αποθηκεύεται σε υδροφόρους ορίζοντες. Αυτός ο μηχανισμός, που συνήθως ονομάζεται υδροδυναμική παγίδευση, θα είναι πιθανότατα, βραχυπρόθεσμα, ο πιο σημαντικός για την απομόνωση. Η εύρεση καλύτερων μεθόδων για την αύξηση του χώρου που καταλαμβάνεται από το παγιδευμένο αέριο θα επιτρέψει τη μέγιστη χρήση της ικανότητας εναπόθεσης ενός γεωλογικού σχηματισμού. Δεύτερον, το CO<sub>2</sub> μπορεί να διαλυθεί στη ρευστή φάση. Αυτός ο μηχανισμός διάλυσης του αερίου σε ένα υγρό όπως το πετρέλαιο ονομάζεται παγίδευση διαλυτότητας. Στις δεξαμενές λαδιού, το διαλυμένο CO<sub>2</sub> μειώνει το ιξώδες του υπολειπόμενου λαδιού, με αυτόν τον τρόπο διογκώνεται και ρέει πιο εύκολα, παρέχοντας τη βάση για μια από τις πιο κοινές τεχνικές EOR. Η σχετική σημασία της παγίδευσης διαλυτότητας εξαρτάται από μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως η αποτελεσματικότητα σάρωσης (αποτελεσματικότητα μετατόπισης λαδιού ή νερού) της

έγχυσης CO<sub>2</sub>, ο σχηματισμός δακτύλων (προτιμώμενες διαδρομές ροής) και τα αποτελέσματα της ετερογένειας σχηματισμού. Αν η παγίδευση διαλυτότητας είναι επιτυχείς τότε η πιθανότητα το αέριο CO<sub>2</sub> να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα θα είναι αρκετά χαμηλή [13].

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί απαρτίζονται από οργανική ύλη ορυκτών, οπότε το CO<sub>2</sub> μπορεί γίνει μέρος αυτής της οργανικής μορφής με την προϋπόθεση ότι θα αντιδράσει είτε άμεσα είτε έμμεσα. Ο σχηματισμός ανθρακικών αλάτων ασβεστίου, μαγνησίου και σιδήρου λειτουργεί ως παγίδα ορυκτών που συναντώνται στους περισσότερους γεωλογικούς μηχανισμούς. Η συμπύκνωση, όμως, αυτών των ορυκτών φάσεων απαιτεί πολύ χρόνο. Για τη παγίδευση των σχηματισμών άνθρακα δεσμεύεται CO<sub>2</sub> στη στερεά μήτρα. Με βάση τα παραπάνω η μείωση της απροσδόκητης εκπομπής CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα μπορεί να μειωθεί με καινοτόμες μεθόδους που θα αυξήσουν τις ικανότητες εναπόθεσης στις ορυκτές φάσεις χωρίς το φόβο κάποιας διαρροής.

Κατά την παραγωγή είτε με καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε με απεξάρτηση από άνθρακα από ορυκτά καύσιμα για παραγωγή υδρογόνου, το CO<sub>2</sub> θα διαχωριστεί από το ρεύμα αποβλήτων με καθαρότητα τουλάχιστον 90%. Η κατάσταση του CO<sub>2</sub> θα πρέπει να είναι σε υπερκρίσιμο ρευστό για τη μεταφορά και την εναπόθεση στο πλησιέστερο γεωλογικό σχηματισμό. Το κόστος για κάτι τέτοιο θα είναι αρκετά υψηλό καθώς θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η υπάρχουσα τεχνολογική κατάσταση, η μεταφορά και ασφάλεια.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί για εναπόθεση CO<sub>2</sub> κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες. Σχηματισμοί με ενεργά και εξαντλημένα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, σχηματισμοί βαθιάς άλμης και αλατούχων σχηματισμών και τέλος βαθιές φλέβες άνθρακα καθώς και οι γεωλογικοί σχηματισμοί μεθανίου που έχουν ως βάση τους τον άνθρακα.

Με βάση τις προηγούμενες διατάξεις, υπάρχει πιθανότητα και άλλοι γεωλογικοί σχηματισμοί να παρέχουν τη δυνατότητα εναπόθεσης CO<sub>2</sub>. Τέτοιοι είναι οι θαλάσσιοι και αρκτικοί υδρίτες, καθώς και ταμειυτήρες CO<sub>2</sub>, εξορυσσόμενες κοιλότητες σε θόλους αλατιού και σχιστόλιθοι πετρελαίου, όμως κάτι τέτοιο δεν έχει επιβεβαιωθεί [13].

Δεν έχουν χρηματοδοτηθεί πολλές έρευνες, επομένως οι περισσότερες εκτιμήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί είναι δύσκολο να αποδείξουν σημαντικές ευκαιρίες στην εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Πιο συγκεκριμένα, βραχυπρόθεσμα, οι Ηνωμένες Πολιτείες διαθέτουν επαρκή ικανότητα, ποικιλομορφία και ευρεία γεωγραφική κατανομή



γεωλογικών σχηματισμών για να επιδιώξουν με σιγουριά τη γεωλογική εναπόθεση ως κύριο συστατικό μιας εθνικής στρατηγικής διαχείρισης άνθρακα. Δεν είναι σίγουρη η τελική ικανότητα των γεωλογικών σχηματισμών για αποθήκευση του CO<sub>2</sub> ώστε να συμβάλουν στο μετριασμό του φαινομένου του θερμοκηπίου. Θα πρέπει να προβούμε στην εφαρμογή συστηματικών κριτηρίων διαλογής και να αποκτήσουμε καλύτερη εμπειρία προκειμένου να αξιολογήσουμε τη τελική ικανότητα εναπόθεσης των γεωλογικών σχηματισμών.

Θεωρητικά η εναπόθεση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς είναι αρκετά υποσχόμενη, αλλά θα πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες για την αξιοπιστία της, ενώ παράλληλα χρειάζεται η εξέλιξη της υπάρχουσας τεχνολογίας και εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού. Βασικός στόχος για την ανάπτυξη της μεθόδου είναι ο σχεδιασμός αποδοτικών και ταυτόχρονα οικονομικών συστημάτων για την παρακολούθηση της μετακίνησης, της εναπόθεσης καθώς επίσης και της διασφάλισης μακροπρόθεσμης σταθερότητας του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Μείωση του κόστους και των ενεργειακών απαιτήσεων της εναπόθεσης CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Κερδίζοντας δημόσια αποδοχή για γεωλογική εναπόθεση.

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουμε για την ανάπτυξη της διαδικασίας εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς καθώς και η εξέλιξη που θα πρέπει να πραγματοποιηθεί προκειμένου να αναπτυχθεί ένα σχέδιο δράσης των κρίσιμων στοιχείων [13].

## 15.2 Αξιολόγηση των ικανοτήτων για εναπόθεση στους γεωλογικούς σχηματισμούς

Οι σχηματισμοί που έχουν δημιουργηθεί λόγω της ύπαρξης του πετρελαίου και φυσικού αερίου αποτελούν πολλά υποσχόμενους στόχους για την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> για ποικίλους λόγους. Πρώτον, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο βρίσκονται μέσα σε φυσικές λίμνες που δεν τους επιτρέπουν να διαφύγουν. Επομένως, αυτές οι δεξαμενές θα πρέπει επίσης να περιέχουν CO<sub>2</sub>, εφόσον δεν δημιουργούνται δίοδοι προς την επιφάνεια ή τους παρακείμενους σχηματισμούς λόγω υπερπίεσης της δεξαμενής, με ρήγμα έξω από τη δεξαμενή σε φρεάτια ή από διαρροές γύρω από φρεάτια. Δεύτερον, η γεωλογική δομή και οι φυσικές ιδιότητες των περισσότερων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν χαρακτηριστεί εκτενώς. Ενώ μπορεί να χρειαστεί πρόσθετος χαρακτηρισμός, ιδιαίτερα της ακεραιότητας και της έκτασης του καλύμματος, η διαθεσιμότητα των υφιστάμενων δεδομένων θα μειώσει το κόστος υλοποίησης έργων εναπόθεσης CO<sub>2</sub>. Τέλος, το κέρδος που εντοπίζεται λόγω της βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου (EOR) έχει οδηγήσει στην εξέλιξη της τεχνολογίας προκειμένου να δημιουργηθούν μοντέλα υπολογιστών που θα παρακολουθούν και θα προβλέπουν τη μετακίνηση του CO<sub>2</sub> και να επιτυγχάνεται η παγίδευση του. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν αυτά τα μοντέλα είναι ο εξής: παρακολουθούν τη ροή του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και της άλμης σε τρεις διαστάσεις. Έπειτα παρατηρείται η συμπεριφορά της φάσης που βρίσκεται το CO<sub>2</sub> στο πετρέλαιο και την άλμη καθώς και η διαλυτότητα του και τέλος εκτιμάται η χωρική διακύμανση των ιδιοτήτων της δεξαμενής στο που είναι επιτρεπτό. Οι ίδιες ενέργειες θα πρέπει να πραγματοποιηθούν για την υδροδυναμική παγίδευση και τη διαλυτότητα του CO<sub>2</sub>.

Από τις πληροφορίες που έχει αντλήσει η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου από το EOR θα μπορούσαν να ξεκινήσουν οι πρώτες εκτιμήσεις για εναπόθεση του CO<sub>2</sub>. Ένα μεγάλο ποσοστό του CO<sub>2</sub> που υπάρχει στο εμπόριο (80%) χρησιμοποιείται για σκοπούς EOR. Η τεχνολογία για την έγχυση CO<sub>2</sub> και τη παραγωγή EOR έχει ήδη αποδειχθεί και χρησιμοποιείται χωρίς μεγάλη δυσκολία. Μέσω της δυνατότητας του EOR εκμεταλλευόμαστε την εναπόθεση CO<sub>2</sub> προκειμένου να αυξήσουμε τα ενεργά κοιτάσματα πετρελαίου. Ακόμα και μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα, οι ποσότητες CO<sub>2</sub> που θα έχουν εναποτεθεί στους σχηματισμούς πετρελαίου για τους σκοπούς του EOR δε θα είναι αρκετές για να συμβάλουν στο μετριασμό του φαινομένου του θερμοκηπίου, ωστόσο, μπορεί να αποκτηθεί πολύτιμη επιχειρησιακή εμπειρία που θα ωφελήσει τη γεωλογική εναπόθεση CO<sub>2</sub> σε διαφορετικούς σχηματισμούς [13].

Με την ίδια σκέψη της χρήσης του CO<sub>2</sub> για την δυνατότητα EOR, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε εξαντλημένα αλλά ακόμα ενεργά κοιτάσματα φυσικού αερίου όπου η ανάκτηση του αερίου θα μπορούσε να ενισχυθεί με την έγχυση CO<sub>2</sub>. Επίσης, τα εγκαταλελειμμένα κοιτάσματα φυσικού αερίου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εναπόθεση CO<sub>2</sub>. Στη δεύτερη περίπτωση, προκειμένου να επιλέξουμε ποια εγκαταλελειμμένα κοιτάσματα φυσικού αερίου θα ήταν καλύτερα να χρησιμοποιηθούν για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί μία έρευνα για το προσδιορισμό των τρεχουσών συνθηκών που διέπουν τα εγκαταλελειμμένα κοιτάσματα, καθώς και του κόστους για την αποκατάστασή τους. Η διαθέσιμη τεχνολογία για την ανάπτυξη ενός τέτοιου προγράμματος είναι ήδη γνωστή στις εταιρείες φυσικού αερίου.

Η έγχυση CO<sub>2</sub> σε σχεδόν εξαντλημένα πεδία αερίου θα βοηθούσε στην εξόρυξη, καθώς θα διατηρούσε τις πιέσεις της δεξαμενής περισσότερο από ό,τι θα ήταν διαφορετικά. Δυστυχώς, όμως, αυτή η πρόταση δεν έχει εκδιωχθεί. Επομένως, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν πιλοτικές δοκιμές και εργαστηριακές μελέτες προκειμένου να εξετασθεί αυτή η τεχνολογία. Κάποια εμπειρία μπορεί να αποκτηθεί από την Gaz de France, η οποία τα τελευταία χρόνια μετατρέπει έργα αποθήκευσης φυσικού αερίου ώστε να λειτουργούν με δύο είδη αερίου: φυσικό αέριο που εγχέεται κυκλικά και αποσύρεται ανάλογα με τις ανάγκες και χαμηλού κόστους αέριο απόσβεσης. Πάνω σε αυτή την ενέργεια, θα μπορούσαμε να αναπτύξουμε το συνδυασμό της εναπόθεσης CO<sub>2</sub> με την ενισχυμένη παραγωγή φυσικού αερίου από εξαντλημένα κοιτάσματα.

Αν και υπάρχει μικρή πρακτική εμπειρία με τη εναπόθεση CO<sub>2</sub> σε σχηματισμούς άλμης, η αποθήκευση φυσικού αερίου στον υδροφόρο ορίζοντα παρέχει ένα θεμέλιο εμπειρίας για τον εντοπισμό σημαντικών τεχνικών ζητημάτων. Η επιχειρησιακή εμπειρία από την αποθήκευση αερίου του υδροφόρου ορίζοντα και αυτές οι μελέτες δείχνουν ότι από μηχανολογική άποψη, τα κύρια ζητήματα για τη διάθεση CO<sub>2</sub> στους υδροφόρους ορίζοντες σχετίζονται με: τον ρυθμό διάθεσης του CO<sub>2</sub>, τη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης για να υπολογιστεί το τελικό απόθεμα CO<sub>2</sub>, τη τοποθέτηση ενός καλύμματος χαμηλής διαπερατότητας για την αποφυγή διαρροής CO<sub>2</sub> μέσω ατελούς περιορισμού, τον έλεγχο του περιβάλλοντος χώρου για τον προσδιορισμό διάφορων δομών πετρωμάτων και το χαρακτηρισμό υδροφόρων σχηματισμών, τις απαραίτητες γνώσεις για τις συνθήκες που κυριαρχούν στους υπόγειους σχηματισμούς και την εξέλιξη της τεχνολογίας για το σχεδιασμό υλικών ιδανικών να αντιστέκονται στη διάβρωση [13].

Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, έχει αποδειχθεί ότι η απορρόφηση του CO<sub>2</sub> από το νερό μπορεί να αυξηθεί λόγω της φυσικής διαλυτότητας από αλληλεπιδράσεις με ανθρακικά μέταλλα. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα αποτελέσματα, ορυκτά όπως ο ασβεστίτης θα μπορούν να διαλυθούν κατά την έγχυση CO<sub>2</sub>. Επίσης, η παγίδευση ορυκτών θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέσω από ετερογενείς αντιδράσεις με αργιλοπυριτικά άλατα που θα οδηγούσαν στην αύξηση της χωρητικότητας αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>. Πειραματικές ενδείξεις υποδεικνύουν ότι οι αντιδράσεις με ανθρακικά είναι γρήγορες, ενώ αντίθετα αλληλεπιδράσεις πυριτικών φαίνεται να είναι πολύ αργές, καθώς απαιτούν δεκάδες ή και εκατοντάδες χρόνια για να πραγματοποιηθούν.

Η έγχυση του CO<sub>2</sub> στους υδροφόρους ορίζοντες θα έχει ως αποτέλεσμα υδροδυναμικές αστάθειες, καθώς το CO<sub>2</sub> είναι αέριο, άρα θα είναι πιο αραιό από το νερό αλλά ταυτόχρονα και πιο όξινο. Απόρροια αυτών θα είναι να δημιουργηθεί ένας παχύρρευστος δακτύλιος λόγω της διαφοράς ιξώδους, ενώ η διαφορετική πυκνότητα θα επιφέρει διαχωρισμό της βαρύτητας. Οι ρυθμοί έγχυσης και το σημείο κατανομής της διαπερατότητας θα προσδιορίσουν τις ιδιαιτερότητες κάθε στοιχείου. Όλα τα παραπάνω θα έχουν μεγάλη επιρροή στον έλεγχο της σχετικής σημασίας τριών πρωταρχικών μηχανισμών παγίδευσης, το ποσοστό επιρροής ωστόσο, δεν είναι γνωστό, αν και φαινομενικά δε φαίνεται να επηρεάζει την επίτευξη των στόχων της μηχανικής [13].

Η εναπόθεση CO<sub>2</sub> στους σχηματισμούς πετρελαίου και φυσικού αερίου διαφοροποιείται από την εναπόθεση στις υδροφόρους. Πρώτον, οι δεξαμενές πετρελαίου και αερίου εμφανίζονται λόγω της παρουσίας μιας δομικής ή στρωματογραφικής παγίδας. Η χρήση της ίδιας παγίδας είναι αποτελεσματική και για τη κατακράτηση του CO<sub>2</sub>. Στους σχηματισμούς άλμης, ωστόσο, δε μπορεί να λειτουργήσει, οπότε απαιτούνται νέες προσεγγίσεις για την εύρεση ενός καλύμματος με την ίδια αποτελεσματικότητα. Δεύτερον, η έγχυση CO<sub>2</sub> σε ένα σχηματισμό άλμης μπορεί να αποφέρει και την απομάκρυνση του νερού από το σχηματισμό και κατ' επέκταση θα οδηγήσει στην αύξηση της πίεσης σε μεγάλη περιοχή του σχηματισμού. Στη περίπτωση της ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου, η έγχυση του CO<sub>2</sub> και η άντληση του πετρελαίου συμβαίνει ταυτόχρονα. Το εάν ή σε ποιο βαθμό η μεγάλης κλίμακας συμπίεση θα επηρεάσει την ακεραιότητα του καλύμματος, θα προκαλέσει παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους και θα προκαλέσει σεισμικότητα πρέπει να γίνει καλύτερα κατανοητό για να σχεδιαστεί η ασφαλής και αποτελεσματική εναπόθεση.

Η διαρροή του CO<sub>2</sub> από το σχηματισμό στα υψηλότερα επίπεδα είναι ένα ζήτημα που μας απασχολεί, καθώς μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση της διαλυτότητας ή στην βελτίωση

της άντλησης ορυκτών, ενώ παράλληλα δεν αποτελεί κίνδυνο για την ασφαλή μεταφορά του CO<sub>2</sub>. Θα πρέπει, λοιπόν, να πραγματοποιηθεί μια μακροπρόθεσμη έρευνα για την εύρεση των αποδεκτών ποσοστών διαρροής για την εκάστοτε τοποθεσία σχηματισμού άλμης για τα τελικά αποθέματα εναπόθεσης CO<sub>2</sub>.

Μέσω της εναπόθεσης CO<sub>2</sub> σε σχηματισμούς άνθρακα, δίνεται η δυνατότητα για μεγαλύτερη παραγωγή φυσικού αερίου. Επίσης, η έγχυση CO<sub>2</sub> συντελεί και στην εξόρυξη μεθανίου από βαθιά μη εξορυκτικά στρώματα άνθρακα καθώς η προσρόφηση CO<sub>2</sub> μπορεί να προκαλέσει την εκρόφηση μεθανίου. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η εναπόθεση μεγάλης ποσότητας CO<sub>2</sub> που θα βοηθήσει στο μετριασμό των ποσοτήτων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, ενώ παράλληλα θα επιφέρει κέρδη στις εταιρείες φυσικού αερίου.

Η ενισχυμένη παραγωγή μεθανίου από τους σχηματισμούς άνθρακα γίνεται αντικείμενο δοκιμής σε δύο τοποθεσίες της Βόρειας Αμερικής. Η πρώτη περιοχή βρίσκεται στη λεκάνη του Σαν Χουάν, ανάμεσα στις Πολιτείες του Κολοράντο και του Νέο Μεξικό, όπου εκχύνονται 3 εκατομμύρια ft<sup>3</sup>/ημέρα CO<sub>2</sub> μέσω τεσσάρων φρεατίων στη χρονική περίοδο των τριών ετών. Στις πρώτες παρατηρήσεις που λήφθηκαν φάνηκε ότι η παραγωγή του μεθανίου θα μπορούσε να ενισχυθεί κατά 75%. Η ενισχυμένη παραγωγή μεθανίου μπορεί να βελτιωθεί όταν περιλαμβάνεται (1) ευνοϊκή γεωλογία, όπως για παράδειγμα ραφές άνθρακα πλούσιες σε αέριο που μπορούμε να τις προσεγγίσουμε εύκολα και είναι τοποθετημένες σε κατάλληλα βάθη και με απλές δομικές ρυθμίσεις. (2) Επαρκείς διαθεσιμότητα CO<sub>2</sub>, είτε από φυσικές δεξαμενές είτε από πηγές ανθρωπογενών καυσαερίων (π.χ. καυσαέρια από σταθμούς παραγωγής ενέργειας). Και (3) η ζήτηση φυσικού αερίου, η οποία αποτελεί μια σίγουρη αγορά για τη χρήση μεθανίου [13].

Η δεύτερη περιοχή συναντάται στην Αλμπέρτα του Καναδά. Στη συγκεκριμένη περιοχή εδράζεται μια από τις πιο βαθιές κοίτες άνθρακα η οποία είναι δύσκολο να εξοριστεί. Μέσω της διαδικασίας της έγχυσης CO<sub>2</sub> γίνεται προσπάθεια άντλησης του μεθανίου της κοίτης. Πολλά από τα κοιτάσματα άνθρακα της Αλμπέρτα είναι πλούσια σε μεθάνιο. Η προκαταρκτική μοντελοποίηση υπολογιστή υποδηλώνει ότι επιλεγμένες τεχνικές για τη θραύση των κάρβουνων γύρω από τα φρεάτια θα μπορούσαν να βελτιωθούν με μια σημαντική αύξηση του πρωτογενούς μεθανίου. Οι αρχικές δραστηριότητες πεδίου αποτελούνται από μια δοκιμή ενιαίου φρεατίου, σχεδιασμένη για τη μέτρηση των ιδιοτήτων της δεξαμενής, την αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής με μια αποτελεσματική τεχνική ρήξης και την αξιολόγηση της ανάκτησης μεθανίου ενισχυμένης με CO<sub>2</sub>.

Οι σχηματισμοί άνθρακα περιλαμβάνουν και άλλα στοιχεία εκτός από χονδρές και λεπτές ραφές άνθρακα. Ψαμμίτες, σιλόλιθοι και σχιστόλιθοι που είναι κορεσμένα σε νερό εμφανίζονται στα ανθρακοφόρα στρώματα. Αυτός ο πολύπλοκος διαστρωματικός σχηματισμός καθορίζει το διάστημα αποθήκευσης του στρώματος του άνθρακα. Η εξέταση του στρώματος λιθάνθρακα καθώς και δομή, πορώτητα και διαπερατότητα των ενδιάμεσων στρωμάτων είναι ξεχωριστές για κάθε τοποθεσία και θα πρέπει να μελετηθούν ξεχωριστά. Σε αντίθεση με τις δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου, ωστόσο, το μεθάνιο που βρίσκεται στο στρώμα του άνθρακα συγκρατείται με προσρόφηση και όχι με παγίδευση κάτω από μια αδιαπέραστη υπερκείμενη/πλευρική σφράγιση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εξετασθεί η συμπεριφορά των υπερκείμενων και παρακείμενων στρωμάτων προκειμένου να πραγματοποιείται αποτελεσματικά η έγχυση του CO<sub>2</sub> μέσα στη δεξαμενή της κλίνης άνθρακα μέχρι να απορροφηθεί όλο το διαθέσιμο μεθάνιο. Η χωρητικότητα, η σταθερότητα και η μονιμότητα της αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> στο σχηματισμό του άνθρακα θα πρέπει να είναι επιβεβαιωμένη [13].

### 15.3 Ερευνητικές ανάγκες για γεωλογικούς σχηματισμούς

Οι επιχειρησιακές απαιτήσεις και οι ανάγκες έρευνας και ανάπτυξης για εναπόθεση σε καθένα από τους τρεις τύπους γεωλογικών σχηματισμών αξιολογήθηκαν ανεξάρτητα. Σε αυτή την ενότητα όμως συνοψίζονται οι κοινές ανάγκες που διέπουν όλου τους σχηματισμούς. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ωριμότητα της τεχνολογίας και στην επιστημονική κατανόηση των διαδικασιών που στηρίζουν τη εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε διαφορετικούς τύπους γεωλογικών σχηματισμών [13].

Μια έρευνα η οποία θα ήταν αναγκαίο να αναπτυχθεί είναι η ικανότητα παρακολούθησης και μοντελοποίησης που όχι μόνο θα εστιάζει σε τεχνικά ζητήματα, αλλά θα έχει επίσης ως κύριο στόχο την απόκτηση της εμπιστοσύνης του κοινού στη γεωλογική εναπόθεση. Όπως έγινε αναφορά και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η άγνοια του κοινού θα περιορίσει τις διαδικασίες πρόσληψης του CO<sub>2</sub>. Επιπλέον, οι ρυθμιστικοί φορείς εποπτείας, οι παραγωγοί CO<sub>2</sub> και οι φορείς εκμετάλλευσης τοποθεσιών εναπόθεσης θα πρέπει να συμφωνήσουν σχετικά με τα πρωτόκολλα αξιολόγησης και παρακολούθησης. Η επιλογή της τοποθεσίας για γεωλογική εναπόθεση πρέπει να διέπεται από ένα ισχυρό επιστημονικό πλαίσιο.

Έχουν ήδη αναπτυχθεί τα κατάλληλα τεχνολογικά συστήματα καθώς και η αναγκαία γνώση και εμπειρία για τις υδροδυναμικές διεργασίες και τις διεργασίες διαλυτότητας μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η παγίδευση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς, ειδικά στο χρονικό πλαίσιο που αφορά την ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (<20 χρόνια). Η παγίδευση ορυκτών (δηλαδή αντιδράσεις που βασίζονται στις χημικές αντιδράσεις μεταξύ της αέριας, υγρής και στερεάς φάσης) είναι λιγότερο κατανοητή, ιδιαίτερα όσον αφορά το πόσο γρήγορα συμβαίνουν αυτές οι αντιδράσεις. Θα πρέπει να μελετηθεί ακόμα περισσότερο οι σχέσεις αντίδρασης μεταξύ του CO<sub>2</sub> και των μικροβίων που αναπτύσσονται στα βάθη των γεωλογικών σχηματισμών. Επίσης θα πρέπει να ληφθούν περαιτέρω γνώσεις για την υδροδυναμική της διάχυσης του CO<sub>2</sub> σε ετερογενείς σχηματισμούς (π.χ. απόδοση σάρωσης, προτιμησιακή ροή και ρυθμοί διαρροής), καθώς επίσης και η ταχύτητα διάλυσης του CO<sub>2</sub>, η ταχύτητα παγίδευσης των ορυκτών, οι μικροβιακές συσχετίσεις με το CO<sub>2</sub> και τέλος η επιρροή των οριακών συνθηκών στο κάλυμμα και η ακεραιότητα του σχηματισμού Μη γραμμικές διαδικασίες ανάδρασης που επηρεάζουν τον περιορισμό (π.χ. διάλυση ορυκτών και καθίζηση που αλλάζουν τη διαπερατότητα των πετρωμάτων). Συμπεριφορά προσρόφησης/ανταλλαγής CO<sub>2</sub>-μεθανίου σε οργανικά υποστρώματα [13].

Ένα ρεύμα ξηρών αποβλήτων υψηλής καθαρότητας (>90% CO<sub>2</sub>) είναι το πιο επιθυμητό για εναπόθεση σε γεωλογικούς σχηματισμούς, βασισμένο, κατά υψηλό ποσοστό, σε εκτιμήσεις σχετικά με τη μείωση του όγκου, το κόστος συμπίεσης αερίου και ζητήματα χειρισμού CO<sub>2</sub> (π.χ. διάβρωση). Θα πρέπει να πραγματοποιηθούν πειραματικές μελέτες για την αξιολόγηση τόσο των ευεργετικών όσο και των επιζήμιων επιπτώσεων που θα προκληθούν στο γεωλογικό σχηματισμό από το ρεύμα των αποβλήτων πάνω στην αποτελεσματικότητα της παγίδευσης, τα οικονομικά οφέλη και στην ασφάλεια εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>. Επίσης, θα πρέπει να αναλυθούν οι επιδράσεις του ρεύματος αποβλήτων και στο κομμάτι της υδροδυναμικής, καθώς και της διαλυτότητας και της αποτελεσματικότητας προσρόφησης ορυκτών. Ο προσδιορισμός των οικονομικών επιπτώσεων ή του κέρδους για την βέλτιστη ποιότητα καθαρότητας του CO<sub>2</sub> και η επίδραση που θα επιφέρουν στοιχεία τα οποία επηρεάζουν το περιβάλλον εναπόθεσης (πχ υδράργυρος).

Για την αποτελεσματικότητα της σάρωσης των αλμυρών υδροφορέων μπορούν να χρησιμοποιηθούν υδραυλικές γεωφυσικές απεικονίσεις και γεωστατιστικές τεχνικές οι οποίες ανακαλύφθηκαν για τη παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, την αποκατάσταση των υπόγειων υδάτων καθώς και για το χαρακτηρισμό της ετερογένειας ιζηματογενών και σπασμένων γεωλογικών μηχανισμών. Οι πρόσθετες ανάγκες που σχετίζονται με τη εναπόθεση περιλαμβάνουν τον χαρακτηρισμό καλύμματος. Προσδιορισμός διαδρομών και ποσοστών διαρροής. Αξιολόγηση της υδρολογικής απομόνωσης με τη χρήση ισοτοπικών και άλλων χημικών αναλύσεων. Ο προσδιορισμός των στοιχείων που επηρεάζουν τη παγίδευση των ορυκτών καθώς και την ακεραιότητα του κελύφους. Καταπάτηση νερού σε αφυδατωμένους σχηματισμούς. Διαμερισματοποίηση δεξαμενής. Οι επιπτώσεις των εντατικών καταπονήσεων και των χημικών επαγόμενων παραμορφώσεων στην εξέλιξη των αρθρώσεων και των δικτύων θραύσης σε σχέση με την αρχική τους κατάσταση [13].

Η τεχνολογία έγχυσης, γεώτρησης και ολοκλήρωσης για τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου έχει εξελιχθεί σε μια εξαιρετική κατάσταση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η γεώτρηση και η ολοκλήρωση κάθετων, κεκλιμένων και οριζόντιων φρεατίων σε βαθύς σχηματισμούς και πηγάδια με πολλαπλές ολοκληρώσεις, καθώς και ο χειρισμός διαβρωτικών υγρών. Η βελτιστοποίηση αυτών για τη εναπόθεση CO<sub>2</sub> μπορεί να απαιτεί μεθόδους βελτιστοποίησης της αποτελεσματικότητας της εναπόθεσης. Επίσης θα πρέπει να πραγματοποιηθεί έρευνα για τις μηχανολογικές και τις μηχανικές επιπτώσεις καθώς και το κόστος μεταφοράς και συμπίεσης του CO<sub>2</sub>, πριν πραγματοποιηθούν δοκιμές μεγάλης κλίμακας. Οι πιθανές ανάγκες περιλαμβάνουν μεθόδους έγχυσης πρόσθετων ουσιών για τον



έλεγχο της κινητικότητας του CO<sub>2</sub>. Προηγμένη τεχνολογία ολοκλήρωσης φρεατίων για βελτίωση της απόδοσης σάρωσης. Η ενίσχυση παγίδευσης ορυκτών με τη βοήθεια πρόσθετων βιολογικών και χημικών ουσιών. Η παρακολούθηση για την αποφυγή διαφυγής CO<sub>2</sub> με τη τοποθέτηση αισθητήρων. Ανάπτυξη τεχνολογιών για την αποφυγή διαρροής CO<sub>2</sub> στο κέλυφος των σχηματισμών.

Οι τεχνολογικές δεξιότητες έχουν καταφέρει να αναπτύξουν πολυφασικούς προσομοιωτές πολλαπλών συστατικών για τη παρακολούθηση της ροής υπόγειων ρευστών που εφαρμόζονται σε δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς και για την αποθήκευση φυσικού αερίου, διαχείρισης υδάτινων πόρων και αποκατάστασης υπόγειων υδάτων. Η ακρίβεια αυτών των προσομοιωτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βαθμονόμηση της τοποθεσίας και του έργου και βελτιώνεται με τη συνεχή προσαρμογή των παραμέτρων κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Η ανάπτυξη αξιόπιστων εργαλείων για την πρόβλεψη, την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση της εναπόθεσης CO<sub>2</sub> θα απαιτήσει παρόμοιο επίπεδο εμπειρίας υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Για την εναπόθεση CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κώδικες μεταφοράς για αντιδραστικές χημικές ουσίες με γρήγορες ταχύτητες καθίζησης, διάλυσης, προσρόφησης ή εκρόφησης, καθώς και η χρήση συζευγμένων μοντέλων H-C-M (υδραυλικά, χημικά, μηχανικά) για τον προσδιορισμό της μακροχρόνιας συμπεριφοράς και την αξιολόγηση επαγόμενης μικροσεισμικότητας [13].

Απαιτείται παρακολούθηση της διαφυγής του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος για μεγάλης κλίμακας εναπόθεση του CO<sub>2</sub>. Επίσης, θα πρέπει να παρακολουθείται η απόδοση του παγιδευμένου CO<sub>2</sub> στις αέριες, διαλυμένες και στερεές φάσεις καθώς και η ανίχνευση διαρροών. Οι υπάρχουσες τεχνικές για τη παρακολούθηση του παγιδευμένου CO<sub>2</sub> περιλαμβάνουν τη παρακολούθηση της πίεσης και της δοκιμής φρεατίων, ιχνηθέτες, η χημική δειγματοληψία και, τέλος, σεισμικές, ηλεκτρομαγνητικές και γεωμηχανικές μεθόδους για την επίβλεψη της επιφάνειας και των γεωτρήσεων, όπως τα κλισίμετρα. Καθίσταται, όμως, αδύνατο να πραγματοποιούνται οι παραπάνω αναλύσεις σε επαρκή χρόνο ώστε να προλαμβάνεται η διαρροή CO<sub>2</sub>. Έτσι θα πρέπει να περιλαμβάνονται οι τεχνικές χαρτογράφησης υψηλής ανάλυσης για την παρακολούθηση της διαφυγής του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> και των υποπροϊόντων του. Παρακολούθηση παραμόρφωσης και μικροσεισμικότητας. Τηλεπισκόπηση για διαρροές CO<sub>2</sub> και παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους.

Κατά την ανάπτυξη των σχεδίων δράσης προέκυψε η ανάγκη για ένα μεγάλο αριθμό ερευνητικών αναγκών προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> στους

γεωλογικούς σχηματισμούς. Η πραγματοποίηση των πειραμάτων θα επιφέρει μια ασφαλέστερη και πιο κερδοφόρα εναπόθεση CO<sub>2</sub>

Μια από αυτές τις θεμελιώδεις ανάγκες είναι η μεταφορά πολλαπλών φάσεων σε ετερογενή και παραμορφώσιμα μέσα. Η βελτίωση της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς μπορεί να επέλθει μέσω του διαχωρισμού της βαρύτητας, της ιξώδους δακτυλοποίησης και της χρήσης οδών υψηλής διαπερατότητας για την επιλογή της ροής. Επίσης θα πρέπει να επιλυθούν τα προβλήματα της παραμόρφωσης που δημιουργούνται από τις διεργασίες προσρόφησης και εκρόφησης και τα προβλήματα της διάλυσης από κατακρημνίσεις. Απαιτείται έρευνα στο τομέα της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> καθώς και στην ανάπτυξη μεθόδων για καλύτερη σάρωση των γεωλογικών σχηματισμών.

Συμπεριφορά φάσης συστημάτων CO<sub>2</sub> στο πετρέλαιο, το νερό και στα στερεά αποτελεί μία ακόμα θεμελιώδη ανάγκη. Ο καταμερισμός του CO<sub>2</sub> μεταξύ της άλμης, του πετρελαίου, του αερίου και των στερεών φάσεων είναι κρίσιμος για την κατανόηση των μηχανισμών παγίδευσης, καθώς και για την πρόβλεψη βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου CO<sub>2</sub> από σχηματισμούς πετρελαίου και ενισχυμένη ανάκτηση αερίου από σχηματισμούς άνθρακα. Απαιτείται καλύτερη κατανόηση του διαχωρισμού στερεών/ρευστών, ιδιαίτερα, για τη βελτιστοποίηση της βελτιωμένης ανάκτησης αερίου από έργα μεθανίου στην κλίνη άνθρακα [13].

Επίσης, η κινητική διάλυσης και αντίδρασης CO<sub>2</sub>. Αν και τα κύρια μονοπάτια αντίδρασης μεταξύ του CO<sub>2</sub> και των ιζηματογενών σχηματισμών είναι σχετικά καλά κατανοητά (π.χ. αντιδράσεις άστριων με οξύ για σχηματισμό ασβεστίτη, δολομίτη, σιδερίτη και αργίλου, διάλυση ανθρακικών ορυκτών), η κινητική της διάλυσης του CO<sub>2</sub> στην υγρή φάση και τα επακόλουθα πετρώματα στις αντιδράσεις του νερού είναι αργές και ελάχιστα κατανοητές. Εάν η μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε αυτές τις σταθερές ορυκτές φάσεις πρόκειται να είναι ένα σημαντικό συστατικό της εναπόθεσης σε σχηματισμούς άλμης, η κατανόηση της κινητικής αυτών των αντιδράσεων και των διεργασιών που τις ελέγχουν είναι απαραίτητη.

Οι υδραυλικές, μηχανικές, χημικές και θερμικές (H-M-C-T) διαδικασίες και η μοντελοποίηση, ανήκουν στις θεμελιώδεις ανάγκες. Η ακριβής πρόβλεψη, αξιολόγηση, βελτιστοποίηση και επιβεβαίωση της απόδοσης ενός έργου απομόνωσης απαιτεί ένα ακριβές συνδυασμένο μοντέλο όλων των διαδικασιών που επηρεάζουν την απόδοση και την ασφάλεια του αποθετηρίου. Ενώ έχει αποκτηθεί μεγάλη εμπειρία στην προσομοίωση υπεδάφους από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου και από τις βιομηχανίες διαχείρισης και

αποκατάστασης υπόγειων υδάτων, σε άλλα βιώματα παρατηρούνται ότι η ποιότητα των προβλέψεών μας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη ενός προσομοιωτή προσανατολισμένου προς τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Πρέπει να αναπτυχθούν πειραματικές μελέτες που αφορούν τις φυσικές και χημικές διεργασίες που είναι σημαντικές για την εναπόθεση CO<sub>2</sub>, ώστε να βελτιωθούν μέσω της επιχειρηματικής εμπειρίας [13].

Άλλο ένα ζήτημα είναι η μικρομηχανική και μοντελοποίηση παραμόρφωσης. Η παραγωγή πετρελαίου και αερίου από γεωλογικούς σχηματισμούς και η επακόλουθη εναπόθεση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς θα συνοδεύεται από παραμόρφωση του σχηματισμού ταμιευτήρα. Θα πρέπει να γίνει κατανοητή η επίδραση της παραμόρφωσης στις υδραυλικές ιδιότητες του γεωλογικού σχηματισμού καθώς και επιπτώσεις στο κέλυφος. Εν αντιθέσει με τους σχηματισμούς πετρελαίου και φυσικού αερίου, η έγχυση του CO<sub>2</sub> στο σχηματισμό άλμης θα επιφέρει και αύξηση της πίεσης στο μηχανισμό λόγω της απόσυρσης υγρών και της διαφοράς της πυκνότητας, οπότε η παραμόρφωση είναι πιθανό να είναι ευρέως διαδεδομένη στο σχηματισμό. Προκειμένου να επιτευχθεί μακροπρόθεσμη σταθερότητα και ασφάλεια για την εναπόθεση CO<sub>2</sub> στο γεωλογικό σχηματισμό θα πρέπει να διευρυνθούν οι γνώσεις μας στις επικείμενες επιπτώσεις της παραμόρφωσης στο κέλυφος του σχηματισμού και της πιθανότητας να προκαλεί σεισμικά γεγονότα.

Μέσω της γεωφυσικής απεικόνισης υψηλής ανάλυσης καθίσταται εφικτή η παρακολούθηση η διασπορά και ο σχηματισμός από τα υποπροϊόντα του CO<sub>2</sub> σε υπόγεια περιβάλλοντα. Η τεχνολογία της γεωφυσικής απεικόνισης επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων και τετρασδιάστατων εικόνων από τις γεωλογικές δομές και τα ρευστά των πόρων με τη χρήση τεχνικών επιφανειών, επιφανειακών γεωτρήσεων και διασταυρούμενων γεωτρήσεων. Η ανάλυση πρέπει να βελτιωθεί εάν πρόκειται να βασιστούμε σε αυτές τις μεθόδους για την ανίχνευση διαρροής καλύμματος, σχηματισμού παχύρρευστων δακτύλων και προτιμησιακών οδών.

Οι τεχνικές εναπόθεσης που περιγράφονται βασίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις τρέχουσες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία για την παραγωγή πετρελαίου, φυσικού αερίου και μεθανίου από άνθρακα και για την αποθήκευση φυσικού αερίου. Αν και αυτές οι τεχνικές παρέχουν εύλογες βραχυπρόθεσμες επιλογές για τη εναπόθεση CO<sub>2</sub>, η βελτιωμένη τεχνολογία για την εναπόθεση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος, να αυξήσει τη χωρητικότητα, να ενισχύσει την ασφάλεια ή να αυξήσει τις ευεργετικές χρήσεις της έγχυσης CO<sub>2</sub>. Τέτοιες βελτιωμένες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα: η χρήση χημικών ουσιών και

καταλυτών για την ενίσχυση της παγίδευσης ορυκτών, η χρήση της τεχνολογίας μετατροπής του CO<sub>2</sub> σε σταθερά ανθρακικά ορυκτά, καθώς πρόκειται για μια πολύ αργή διαδικασία, η χρήση χημικών ή βιολογικών ουσιών για αυξηθούν οι ρυθμοί αντίδρασης και να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα της παγίδευσης ορυκτών [13].

Απομόνωση σε σύνθετους σχηματισμούς. Οι πολυστρωματικοί σχηματισμοί, όλοι με ατελές κέλυφος, μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα στήλες CO<sub>2</sub> με μεγάλη διασπορά. Ο μεγάλος βαθμός διασποράς θα προσφέρει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της διαλυτότητας και μεγαλύτερο ποσοστό παγίδευσης ορυκτών. Η μελέτη για τη διαρροή του CO<sub>2</sub> στα υπόλοιπα επίπεδα πολυστρωματικών γεωλογικών σχηματισμών θα μπορούσε να επιφέρει αύξηση της γεωγραφικής κατανομής και της ικανότητας των γεωλογικών σχηματισμών για εναπόθεση CO<sub>2</sub>.

Μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε μεθάνιο με τη χρήση μικροοργανισμών. Προκειμένου οι μικροοργανισμοί που υπάρχουν σε αφθονία στα φυσικά περιβάλλοντα να μετατρέψουν το CO<sub>2</sub> σε μεθάνιο (μεθαγόνα) χρειάζεται η απουσία οξυγόνου. Επομένως, η επιλογή τοποθεσίας εναπόθεσης για την εκμετάλλευση της παραπάνω λειτουργίας θα δημιουργούσε ένα υπόγειο «εργαστήριο μεθανίου». Σε διαφορετική περίπτωση θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετες ουσίες που διεγείρουν τη μεθανογένεση μέσα στο CO<sub>2</sub> για τη δημιουργία σχηματισμού μεθανίου.

Αναζωογόνηση εξαντλημένων σχηματισμών πετρελαίου. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, η έγχυση του CO<sub>2</sub> στους σχηματισμούς πετρελαίου αποτελεί μια τεχνική EOR. Σε μια περίοδο όπου η τεχνική EOR δεν είναι εφικτή λόγω οικονομικών παραγόντων, ένα μεγάλο ποσοστό του αρχικού πετρελαίου (50%) παραμένει υπόγειο. Η έγχυση CO<sub>2</sub>, που ακολουθείται από μια περίοδο ηρεμίας κατά την οποία η αποστράγγιση της βαρύτητας και ο σχηματισμός ενός καλύμματος αερίου ανακατανέμουν τις αέριες και υγρές φάσεις, μπορεί να αναζωογονήσει έναν σχηματισμό πετρελαίου που δεν μπορεί πλέον να παράγει οικονομικά. Επιτυγχάνεται η απομόνωση του εγχεόμενου CO<sub>2</sub> στο γεωλογικό σχηματισμό.

Η παραγωγή ένυδρων αλάτων μεθανίου από την ενίσχυση CO<sub>2</sub>. Οι ένυδρες ύλες μεθανίου στα ιζήματα των ωκεανών και στον μόνιμο παγετό διατηρούν τεράστια αποθέματα φυσικού αερίου. Οι ιδιότητες των υδριτών (πολυπλοκότητα της δομής, μηχανικές ιδιότητες και θερμοδυναμικές συμπεριφορές) καθιστούν δύσκολη τη παραγωγή αερίου στους

γεωλογικούς σχηματισμούς. Η έγχυση CO<sub>2</sub> σε σχηματισμούς ένυδρου μεθανίου μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή [13].

## 15.4 Ερευνητικές προτεραιότητες

Η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς αποτελεί μια ξεχωριστή επιλογή από αυτές που αναφέραμε στις προηγούμενες ενότητες, καθώς στις περισσότερες χρειάζεται ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας για να είναι οικονομικά και ενεργειακά αποδεκτές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τεχνολογική και εμπειρική κατάρτιση έχει ήδη πραγματοποιηθεί από τις βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου, διαχείρισης των υπόγειων υδάτινων πόρων και αποκατάστασης των υπόγειων υδάτων. Παρ' όλα αυτά δημιουργούνται ορισμένα κρίσιμα ζητήματα τα οποία πρέπει να επιλυθούν για να καταστεί η εναπόθεση στους γεωλογικούς σχηματισμούς πιο ανταγωνιστικός, από πλευράς κόστους και ασφάλειας. Πραγματοποιήθηκε μια εκτεταμένη ανάλυση στα προηγούμενα υποκεφάλαια. Πλέον χρειάζεται να τεθεί ένα χρονοδιάγραμμα προκειμένου να ξεκινήσει ένα βασικό σύνολο ενεργειών που απαιτούνται για την εξέλιξη της μεθόδου εναπόθεσης CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι ενέργειες αυτές θα προσφέρουν μια ρεαλιστική εκτίμηση στα δεδομένα κόστους και απόδοσης για εναποθέσεις CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλης κλίμακας [13].

Απαιτείται επαρκής έρευνα για να επιλυθούν κρίσιμα ζητήματα που θα συμβάλουν στην ασφαλή και αποτελεσματική εναπόθεση CO<sub>2</sub>. Οι διαθέσιμοι γεωλογικοί μηχανισμοί εναπόθεσης CO<sub>2</sub> θα πρέπει να αξιολογηθούν από τις κύριες περιοχές παραγωγής ενέργειας. Για την αποτελεσματική αξιολόγηση και την επιλογή θα αναπτυχθούν επιτροπές που θα απαρτίζονται από βιομηχανίες που εκμεταλλεύονται τα ορυκτά καύσιμα, την επιστημονική κοινότητα, τη πολιτεία και τους ρυθμιστικούς φορείς εποπτείας. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Σαν Χουάν και στην Αλμπέρτα θα μπορέσουν να βοηθήσουν στην ανάπτυξη δεδομένων κόστους και απόδοσης και θα βοηθούσαν στις μελλοντικές ανάγκες έρευνας. Οι μελλοντικές έρευνες που θα σχεδιαστούν θα πρέπει να βρίσκονται υπό επαρκή παρακολούθηση, μοντελοποίηση και αξιολόγηση της απόδοσης ώστε να είναι εφικτή η ποσοτική αξιολόγηση της εναπόθεσης CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Προκειμένου να προσδιορίσουμε την ακεραιότητα του κελύφους, θα πρέπει να μελετηθούν οι παράγοντες τα γεωλογικά ανάλογα.

Απαιτείται η εξέλιξη της τεχνολογίας για την εναπόθεση μεγαλύτερου όγκου CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Δημιουργία σταθερών μακροπρόθεσμων καταβροθρών. Αύξηση της διαλυτότητας και ίσως αραίωση του CO<sub>2</sub> σε αποδεκτά επίπεδα και παρακολούθηση της διαφυγής του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος.

Απαιτούνται έργα πλήρους κλίμακας, που εκτελούνται σε συνεργασία με τη βιομηχανία, που ενσωματώνουν τον διαχωρισμό και τη μεταφορά CO<sub>2</sub> με γεωλογική εναπόθεση για την παροχή δεδομένων κόστους, ασφάλειας και απόδοσης σχετικά με τη γεωλογική εναπόθεση CO<sub>2</sub>. Η προσπάθεια για το σχέδιο δράσης που συζητήθηκε εδώ έκανε λόγο για τη δημιουργία μιας επιτροπής που σκοπό θα έχει την αναθεώρηση του σχεδίου. Μια από τις αποφάσεις της επιτροπής θα ήταν η ταυτόχρονη διερεύνηση πολλών γεωλογικών σχηματισμών για εναπόθεση CO<sub>2</sub>. Επίσης, η χρήση των γεωλογικών σχηματισμών που χρησιμοποιούνται τη χρήση της τεχνικής EOR μέσω της έγχυσης CO<sub>2</sub> θα μπορούσαν να είναι η πρώτες καταβόθρες για εναπόθεση CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, θα πρέπει να δοθεί υψίστη προτεραιότητα δημιουργίας ερευνητικών προγραμμάτων για τη διερεύνηση των σχηματισμών άλμης και λιθάνθρακα. Επιπλέον, η χρηματοδότηση ερευνητικών μεθόδων για τη πρόβλεψη και τη παρακολούθηση της απόδοσης και της ασφάλειας από την έγχυση CO<sub>2</sub> θα πρέπει να αποτελέσουν βασικά στοιχεία της επιτροπής.

Προτάθηκε επίσης να οργανωθεί ένα πρόγραμμα έρευνας για να αξιοποιηθούν οι κοινές πτυχές της απομόνωσης μεταξύ όλων των τύπων σχηματισμών. Αυτή η προσέγγιση θα κατηγοριοποιήσει τους γεωλογικούς σχηματισμούς και θα μελετώνται σε σύστημα και όχι ως συγκεκριμένοι τύποι μηχανισμών. Έτσι μεγιστοποιείται η συνέργεια και ελαχιστοποιείται η επικάλυψη. Το ίδιο θα ισχύει και για τις μεθόδους παρακολούθησης της έγχυσης σε όλα τα στάδια της. Τέλος, οι μηχανικές μελέτες της αξιολόγησης της τεχνολογίας και της ανάλυσης κόστους και οφέλους θα μπορούσαν να κοινοποιηθούν [13].

## 16 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ CO<sub>2</sub>

Όλες οι μέθοδοι αποθήκευσης και δέσμευσης του CO<sub>2</sub> τις οποίες αναφέραμε έχουν διαφορετικό τρόπο λειτουργίας και διαφορετικές εφαρμογές. Η μέθοδος του διαχωρισμού και της δέσμευσης του CO<sub>2</sub> λαμβάνει χώρα κυρίως στις πηγές από τις οποίες παράγεται το CO<sub>2</sub>. Στην ωκεάνια εναπόθεση γίνεται περισυλλογή, μεταφορά και μετά εναπόθεση, ενώ η εναπόθεση στα χερσαία οικοσυστήματα επιτυγχάνεται μέσω των υψηλών ρυθμών φωτοσύνθεσης που λαμβάνει χώρα στη χλωρίδα του συστήματος.

Κατά το διαχωρισμό και τη δέσμευση του CO<sub>2</sub>, η φυσική και χημική απορρόφηση πραγματοποιείται από χαμηλές έως μέτριες πιέσεις, ενώ χρειάζεται να καταναλωθεί ενέργεια για την ανανέωση των διαλυτών. Παρ' όλα αυτά, έχουν μικρή επίδραση στο συνολικό κόστος. Στην απόσταξη σε χαμηλή θερμοκρασία, έχουμε καθαρισμό του CO<sub>2</sub> σε υψηλά ποσοστά καθαρότητας, ενώ για τα φτωχά απαιτείται η ψύξη σε χαμηλή θερμοκρασία και κάτω του τριπλού σημείου (<57°C). Επίσης και σε αυτόν τον τρόπο διαχωρισμού καταναλώνονται υψηλά ποσά ενέργειας και δεν ενδείκνυται για εκπομπές CO<sub>2</sub> μέσω της καύσης λόγω των παραπροϊόντων που εκκρίνονται μαζί με το CO<sub>2</sub>. Όσον αφορά τις μεμβράνες διαχωρισμού των αερίων, είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος διαχωρισμού και κατακράτησης του CO<sub>2</sub> καθώς είναι οικονομικές, το βασικότερο, και έχουν υψηλό προσδόκιμο ζωής, ενώ η πορώδης ανόργανη μεμβράνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υψηλές πιέσεις και σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Δυστυχώς, όμως, η παραπάνω μέθοδος, προκειμένου να εφαρμοστεί, έρχεται σε αντίθεση με το κέρδος των επιχειρήσεων, είτε αυτό είναι οικονομικό, είτε ενεργειακό.

Στο κεφάλαιο της ωκεάνιας εναπόθεσης παρουσιάστηκαν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μπορούσε να καταστεί σαφές η άμεση έγχυση CO<sub>2</sub> στον ωκεανό. Αναφέρθηκαν τεχνολογίες έγχυσης που θεωρητικά θα επέφεραν μικρό αντίκτυπο στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Έγινε λόγος για το πείραμα της Χαβάης, όπου θα μπορούσε να μας παρουσιάσει μερικά πραγματικά αποτελέσματα αλλά δε κατάφερε να έρθει σε πέρας λόγω της δημόσιας αντίθεσης και της ελλιπούς δημόσιας προσέγγισης από την επιστημονική ομάδα. Τα διεθνή πρότυπα που ψηφίστηκαν για την προστασία των ωκεανών απαγόρευσαν την άμεση έγχυση CO<sub>2</sub> στον ωκεανό, ενώ ήταν επέτρεπαν τη γεωλογική δέσμευση βαθέων υδάτων. Ωστόσο, οι διαρροές CO<sub>2</sub> (π.χ. με τη μορφή σταγονιδίων) από τις γεωλογικές δομές στη στήλη του νερού του ωκεανού είναι ακόμα πιθανές, επομένως η συνεχής έρευνα και μελέτες σχετικά με τους



μηχανισμούς διαρροής CO<sub>2</sub> και τις επιπτώσεις του αυξημένου διαλυμένου άνθρακα στον ωκεανό συνεχίζουν να αποτελούν σημαντικό θέμα μελέτης δέσμευσης άνθρακα.

Είτε το CO<sub>2</sub> εισάγεται σκόπιμα, είτε διαχέεται παθητικά από την ατμόσφαιρα στον ωκεανό, ο ωκεανός είναι και θα παραμείνει η μεγαλύτερη καταβόθρα ανθρωπογενούς CO<sub>2</sub>. Ακόμα και χωρίς την άμεση εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους ωκεανούς, η αλληλεπίδραση της επιφάνειας των ωκεανών και της ατμόσφαιρας έχει οδηγήσει στη πτώση του pH των ωκεανών. **Οι επιπτώσεις της αυξημένης οξύτητας και του pCO<sub>2</sub> αποφέρει σε ορισμένους οργανισμούς αναπνευστική δυσχέρεια (ορισμένοι, όμως, οργανισμοί βαθέων υδάτων εκμεταλλεύονται την ισορροπία CO<sub>2</sub> -O<sub>2</sub>). Με τη μείωση των ζωνών σταθερότητας του ανθρακικού ασβεστίου υπάρχει ένας επικείμενος κίνδυνος για μείωση του φυσικού περιβάλλοντος των ωκεανών. Τέλος, αναφέρθηκε ότι χρειάζονται να πραγματοποιηθούν περαιτέρω επιστημονικές μελέτες για το προσδιορισμό της μεταβλητότητας των αποκρίσεων των θαλάσσιων ειδών.**

Η εναπόθεση στα χερσαία οικοσυστήματα έχει αποτελέσει αντικείμενο ερευνών για πολλούς ερευνητές. Η υποβολή του φυτού στο αυξημένο ποσοστό CO<sub>2</sub> επιφέρει μείωση στη φωτοσυνθετική ρύθμιση και έτσι μειώνονται τα θρεπτικά συστατικά που απορροφά το φυτό. Όμως, το αυξημένο CO<sub>2</sub> διεγείρει την παραγωγή βιομάζας των φυτών, καθώς και την ανάπτυξη αυτών. Με βάση τις έρευνες που αναφέραμε φαίνεται ότι η αναδάσωση των υποβαθμισμένων περιοχών βοηθά στην απορρόφηση του CO<sub>2</sub> από το περιβάλλον, ιδιαίτερα με τη χρήση χερσαίων φυτών. Αυτό θα μπορούσε να είναι και το η κινητήριοι δραστηριότητα προκειμένου να τεθεί σε εφαρμογή ο Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης του Πρωτοκόλλου του Κιότο. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι πολλά κράτη έχουν επιλέξει να αποχωρήσουν από το Πρωτόκολλο και κυρίως πολλές ανεπτυγμένες χώρες όπου κατέχουν τις περισσότερες εκροές CO<sub>2</sub> παγκόσμια, οπότε και ο μηχανισμός αυτός δε θα μπορεί να εφαρμοστεί πάνω τους.

Η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στο Sleipner West που βρίσκεται ανοικτά των ακτών της Νορβηγίας, όπου δεσμεύονται πάνω από 1 εκατομμύριο τόνοι φυσικού αερίου. Το CO<sub>2</sub> μπορεί να δεσμευτεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς μέσω τριών μηχανισμών. Ο πρώτος είναι το να παγιδευτεί ως αέριο ή ρευστό σε υπερκρίσιμη κατάσταση κάτω από ένα κάλυμμα χαμηλής διαπερατότητας. Ο δεύτερος είναι να διαλυθεί σε ένα υγρό όπως το πετρέλαιο. Τρίτον, το CO<sub>2</sub> θα μπορούσε να γίνει μέρος των ορυκτών σχηματισμών λόγω της άμεσης και έμμεσης αντίδρασης. Αν και η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς είναι πολλά υποσχόμενη, δεν έχει αναπτυχθεί αρκετά,

καθώς θα δαπανηθούν πολλά χρήματα για τη μετακίνηση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι έχει δοθεί αρκετή σημασία στην διαδικασία δέσμευσης και αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> από τον άνθρωπο. Όλοι οι τρόποι έχουν διερευνηθεί, άλλοι περισσότερο και άλλοι λιγότερο, με απώτερο σκοπό να επανέλθει σε ισορροπία το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας. Η διαδικασία που φαίνεται να έχει ανθήσει αρκετά και έχουν ληφθεί αρκετά μέτρα ανάπτυξης είναι οι μεμβράνες διαχωρισμού των αερίων. Αυτό συμβαίνει καθώς οι μεμβράνες διαχωρισμού των αερίων έχουν δύο πολύ μεγάλα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων και αυτά είναι, πρώτον, ότι είναι φθηνά για την παραγωγή τους και, δεύτερον, ότι δεν χρειάζεται να καταναλώσουμε ενέργεια για να ενεργοποιηθούν. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε σημεία όπου έχουμε μεγάλες ποσότητες εκροής CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.

## 17 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ερευνητικές πηγές αναφέρουν την αδράνεια της προσέγγισης της επιστημονικής κοινότητας με το κοινό λόγω των ελλείπων γνώσεων, που διέπει το κοινό, πάνω στα θέματα δέσμευσης και της αποθήκευσης μεθόδων άνθρακα. Ο Reiner πραγματοποίησε μια έρευνα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σε κοινό από 25 χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τα ευρήματα που έδειξαν ότι, το 2007 (ταυτόχρονα με τις τροποποιήσεις της σύμβασης OSPAR και του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου), μόνο το 21% των ερωτηθέντων έχει ακούσει για δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα, ενώ ταυτόχρονα το 53% του κοινού γνώριζε για την ενέργεια υδρογόνου στα αυτοκίνητα, το 41% για τις κυψέλες καυσίμου και το 44% για τη γεωθερμική ενέργεια. Στις ΗΠΑ τα αποτελέσματα ήταν χειρότερα καθώς σε έρευνα που είχε διεξαχθεί το 2004, μόνο το 2,5% των 1200 ερωτηθέντων σε μια διαδικτυακή έρευνα είχε ακούσει προηγουμένως για δέσμευση άνθρακα. Το 2007, οι ερωτήθηκαν 126 άνθρωποι της κοινότητας, οι οποίοι κατέταξαν το OCS λιγότερο ευνοϊκό από τη γεωλογική δέσμευση άνθρακα. Το κοινό έκρινε ότι και οι μέθοδοι δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα ήταν λιγότερο ευνοϊκές για τους ερωτηθέντες από την πυρηνική ενέργεια.

Σε ότι αφορά τη δέσμευση αναφέραμε τις μεθόδους της φυσικής και χημικής απορρόφησης, της φυσικής και χημικής προσρόφησης, της απόσταξης σε χαμηλή θερμοκρασία και της χρήσης μεμβρανών διαχωρισμού αερίων. Σε ότι αφορά την αποθήκευση αναφέρθηκαν η μέθοδος της άμεσης έγχυσης του CO<sub>2</sub> στους ωκεανούς, η μέθοδος της λίπανσης των ωκεανών (προαγωγή της φωτοσυνθετικής στερέωσης του CO<sub>2</sub> από οργανισμούς του ωκεανού), ενώ στα χερσαία οικοσυστήματα οι αποθήκευση είναι εφικτή μέσω της εναπόθεσης σε ζωντανή υπέργεια βιομάζα, σε ζωντανή υπόγεια βιομάζα και στη μέθοδο της αναδάσωσης των υποβαθμισμένων περιοχών. Στους γεωλογικούς σχηματισμούς η αποθήκευση του άνθρακα επιτυγχάνεται μέσω τριών μηχανισμών. Πρώτον, με την παγίδευση του CO<sub>2</sub> σε υπερκρίσιμη κατάσταση μέσα σε ένα κέλυφος χαμηλής διαπερατότητας. Δεύτερον, μέσω της παγίδευσης διαλυτότητας, δηλαδή της διάλυσης του CO<sub>2</sub> σε ένα υγρό, όπως το πετρέλαιο. Και τρίτον, με την άμεση ή έμμεση αντίδραση του CO<sub>2</sub> με την οργανική μορφή που απαρτίζεται ο γεωλογικός σχηματισμός.

Κατά τη σύγκριση των μεθόδων έγινε αναφορά σε μερικούς τρόπους δέσμευσης οι οποίοι χρησιμοποιούνται από τις βιομηχανίες για το μετριασμό του φαινομένου του θερμοκηπίου. Υπήρχαν πολλές μέθοδοι, κυρίως αποθήκευσης, οι οποίες δε χρησιμοποιούνται λόγω της αντίθεσής τους στην ισχύουσα νομοθεσία, καθώς οι μέθοδοι αυτοί επηρεάζουν το

μέσο αποθήκευσης, οπότε δεν υπάρχει μετριασμός του προβλήματος. Τέλος, προτάθηκαν μέθοδοι οι οποίοι θα μειώσουν τις ποσότητες του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, αλλά δεν έχουν αναπτυχθεί λόγω των υψηλών τεχνολογικών απαιτήσεων που τις διέπουν.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Carbon. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Carbon \(chemical element\) - Wikipedia](#)
- [2] Ορυκτά Καύσιμα. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Ορυκτά καύσιμα \(προερχόμενα\) - Wikipedia](#)
- [3] Keeling C.D. Industrial production of carbon dioxide from fossil fuels and limestone. Tellus, Volume 25, 1973 – Issue 2. Pages 174-198, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v25i2.9652>
- [4] Καλδέλλης Ι.Κ. Η Παγκόσμια Ενεργειακή Κατάσταση και η Στροφίγ στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Η παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση και η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας \(Καλδέλλης Ιωάννης\)](#)
- [5] Antonia V. Herzog, Timothy E. Lipman, Daniel M. Kammen. Renewable Energy Sources. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Renewable energy sources \(Antonia V. Herzog, Timothy E. Lipman, Daniel M. Kammen\)](#)
- [6] Πυρηνική Ενέργεια. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Πυρηνική Ενέργεια - Wikipedia](#)
- [7] ΣΟΥΦΛΕΡΗΣ Δ.Δ. Περιβαλλοντικό Δίκαιο και Νομοθεσία. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Περιβαλλοντικό Δίκαιο και Νομοθεσία-\(1 401\)](#)
- [8] Λυσσούδη Μαρία, Διεθνείς Περιβαλλοντικές Συνθήκες και Επιλογή Υποστηρικτικών εργαλείων Πολιτικής. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Διεθνείς Περιβαλλοντικές Συνθήκες και Επιλογή Υποστηρικτικών εργαλείων Πολιτικής \(Λυσσούδη Μαρία\)](#)
- [9] Statistical Review of World Energy 2021, 70<sup>th</sup> Edition. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Statistical Review of World Energy by BP](#)
- [10] Max Roser, The world's energy problem. Our World in Data. December 10, 2020. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [The world's energy problem by Max Roser](#)
- [11] Kyoto Protocol. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Kyoto Protocol](#)
- [12] IRENA, Renewable Capacity Highlights, March 31, 2021. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Renewable Capacity Highlights](#)
- [13] Reichle, Dave, Houghton, John, Kane, Bob, Ekmann, Jim, & others, and. Carbon sequestration research and development. United States. <https://doi.org/10.2172/810722>

- [14] Yong, Z., Mata, V.G. & Rodrigues, A.E. Adsorption of Carbon Dioxide on Chemically Modified High Surface Area Carbon-Based Adsorbents at High Temperature. *Adsorption* 7, 41–50 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1011220900415>
- [15] Howard J. Herzog, The Economics of CO<sub>2</sub> Separation and Capture. Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [The economics of CO<sub>2</sub> separation and capture by Howard J. Herzog](#)
- [16] A. Chow, "Ocean Carbon Sequestration by Direct Injection", in *CO<sub>2</sub> Sequestration and Valorization*. London, United Kingdom: IntechOpen, 2014 [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/46327> doi: 10.5772/57386
- [17] Brown, M.S., Munro, D.R., Feehan, C.J. et al. Enhanced oceanic CO<sub>2</sub> uptake along the rapidly changing West Antarctic Peninsula. *Nat. Clim. Chang.* 9, 678–683 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0552-3>
- [18] A. Basile, A. Gugliuzza, A. Iulianelli, P. Morrone Membrane technology for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture in power plants. *ScienceDirect*, 2011, Pages 113-159, <https://doi.org/10.1533/9780857093790.2.113>
- [19] Eric Lichtfouse, Jan Schwarzbauer, Didier Robert. *Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants*. (ECSW, 2015, Volume 6). Διαθέσιμο στο (Μάιος, 2022) [Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants \(Eric Lichtfouse, Jan Schwarzbauer, Didier Robert\)](#)
- [20] Philip H. Stauffer, Hari S. Viswanathan, Rajesh J. Pawar, and George D. Guthrie, A System Model for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide. *ACS Publications*, Volume 43, 2009 – Issue 3 Pages 565-570, <https://doi.org/10.1021/es800403w>