

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ
ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ»**

ΚΑΡΑΒΙΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

: Ν. Πασδάκης

: Β. Περδικάτσης

: Θ. Μαρκόπουλος

2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	8
1.1. Εισαγωγή.....	8
1.2. Κλιματολογικές Αλλαγές.....	13
1.3. Μελέτη του Κλίματος.....	14
1.4. Προοπτική Θέρμανσης της Γής.....	15
1.5. Γενικά μοντέλα κυκλοφορίας.....	16
2. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	18
2.1. Εισαγωγή.....	18
2.2. Ο Γεωλογικός Κύκλος του Άνθρακα.....	18
2.3. Ο Βιολογικός Κύκλος του Άνθρακα.....	19
2.4. Συνολικό Μοντέλο του Κύκλου του Άνθρακα.....	22
2.5. Σχηματικά Διαγράμματα των Ροών του Κύκλου του Άνθρακα.....	24
3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ..	28
3.1. Εισαγωγή.....	28
3.2. Φυσικές Ιδιότητες.....	28
3.3. Χημικές Ιδιότητες.....	32
3.4. Επίδραση του CO ₂ στο pH του Νερού.....	33
3.5. Επικινδυνότητα του CO ₂	33
3.6 Το Ανθρωπογενές Διοξείδιο του Άνθρακα.....	33
3.7. Συνδυασμός Πηγών CO ₂ και Τοποθεσιών Γεωλογικής Αποθήκευσης.....	35
4. ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΗΨΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	37
4.1. Εισαγωγή.....	37
4.2. Εγκαταστάσεις Διαχωρισμού και Σύλληψης CO ₂	38
4.3. Διαχωρισμός και Σύλληψη πριν από την Καύση Ορυκτών Καυσίμων.....	41
4.4. Διαχωρισμός και Σύλληψη μετά την Καύση Ορυκτών Καυσίμων.....	41
4.5. Διαχωρισμός και Σύλληψη CO ₂ Καύσης Ορυκτών Καυσίμων Παρουσία Οξυγόνου.....	43
4.6. Τεχνολογικές Απαιτήσεις.....	43
4.7. Τεχνολογικά Μέσα Διαχωρισμού και Σύλληψης.....	44
4.7.1 Φυσική και Χημική Απορρόφηση.....	44
4.7.2 Απόσταξη Χαμηλής Θερμοκρασίας.....	47
4.7.3 Μεμβράνες Διαχωρισμού.....	48
4.8. Εξελιγμένες Τεχνικές.....	49
4.9. Κενά Επιστήμης και Τεχνολογίας.....	51
4.9.1. Φυσική και Χημική Απορρόφηση.....	51
4.9.2. Φυσική και Χημική Προσρόφηση.....	52
4.9.3 Απόσταξη Χαμηλής Θερμοκρασίας.....	52
4.9.4. Μεμβράνες Διαχωρισμού.....	53
4.9.5. Επεξεργασία και Μετατροπή του Προϊόντος.....	53
5. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	54
5.1. Μεταφορά από Αγωγούς.....	54
5.2. Κόστος Μεταφοράς από Αγωγούς.....	56
5.3. Θαλάσσια Μεταφορά CO ₂	56
6. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ.....	58
6.1. Εισαγωγή.....	58

6.2. Μηχανισμοί Αποθήκευσης	59
6.2.1. Φυσική Παγίδευση: Υδροδυναμική.....	59
6.2.2. Γεωχημική Παγίδευση	60
6.2.3. Φυσική Παγίδευση: Στρωματογραφική και Δομική.....	62
6.3. Γεωλογικοί Σχηματισμοί Κατάλληλοι για Αποθήκευση	63
6.4. Γενικά Κριτήρια Επιλογής Τοποθεσίας Αποθήκευσης	63
6.5. Αποθήκευση του CO ₂ σε Σχηματισμούς Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου.....	66
6.5.1. Βελτιωμένη Ανάκτηση Πετρελαίου.....	71
6.5.2. Βελτιωμένη Ανάκτηση Φυσικού Αερίου.....	73
6.5.3. Περίπτωση Αποθήκευσης CO ₂ σε Ταμιευτήρα Φυσικού Αερίου	74
6.6. Αποθήκευση του CO ₂ σε Αλατούχους Υδροφόρους Ορίζοντες.....	75
6.6.1. Αποθήκευση σε Αλατούχους Σχηματισμούς Μεγάλου Βάθους.....	77
6.6.2. Μία Περίπτωση Αποθήκευσης CO ₂ σε Βαθύ Αλατούχο Υδροφόρο Ορίζοντα	79
6.7. Αποθήκευση του CO ₂ σε Κοιτάσματα μη Εξορυγμένου Γαιάνθρακα	82
6.7.1. Κοιτάσματα μη Εξορυγμένου Γαιάνθρακα	82
6.7.2. Αποθήκευση σε Ορυκτό Άνθρακα.....	84
6.7.3. Βελτιωμένη Ανάκτηση Μεθανίου	85
6.8. Τεχνολογία Εισπίεσης - Γεωτρήσεων και Ολοκλήρωσης Φρεατίων	86
6.9. Ροή CO ₂ και Διαδικασίες Μεταφοράς.....	89
6.10. Εξελιγμένες Τεχνικές Αποθήκευσης σε Γεωλογικούς Σχηματισμούς.....	91
6.11. Αξιολόγηση των Υπάρχουσων Τεχνολογικών Δυνατοτήτων και Ανάγκες Έρευνας.....	92
6.12. Πίνακες Αναγκών Έρευνας για τους Γεωλογικούς Σχηματισμούς Κατάλληλους για Αποθήκευση	94
7. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ CO ₂	98
7.1. Εισαγωγή.....	98
7.2. Άμεση Εισπίεση CO ₂	100
7.3 Βελτίωση της Δυνατότητας Φυσικής Αποθήκευσης του Άνθρακα στη Θάλασσα	103
7.3.1. IRONEX: Πειράματα Εμπλουτισμού με Σίδηρο.....	106
7.4. Μακροπρόθεσμες Καινοτόμες Διαδικασίες Θαλάσσιας Αποθήκευσης του CO ₂	107
7.5. Ανάγκες Έρευνας.....	107
7.6. Έρευνα σε Εξέλιξη.....	110
8. ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΟΥ CO ₂	112
8.1. Αδρανείς Καλοήθειες Μακροπρόθεσμες Μορφές Αποθήκευσης.....	114
8.2. Προϊόντα από την Χημική Χρήση CO ₂	116
8.3. Απαραίτητες Χημικές Τεχνολογίες.....	117
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	124
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	133
Ερευνητικές Δραστηριότητες στον Τομέα Αποθήκευσης CO ₂	133
Το πρόγραμμα WEYBURN (EOR).....	133
Το Πρόγραμμα SACS (αποθήκευση σε υδροφόρο ορίζοντα).....	133
Το πρόγραμμα SNOHVIT	133
Συμμετοχή της Ελλάδας σε ερευνητικά προγράμματα αποθήκευσης.....	134
Πιθανοί Χώροι Αποθήκευσης στην Ελλάδα.....	135
Παράρτημα 2.....	137
Παράρτημα 3.....	138

Παράρτημα 4.....	140
Παράρτημα 5.....	141
Παράρτημα 6.....	142

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην ανακοίνωση του Ευρωπαϊκού Συμβούλιο "Επιτυχής καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος του πλανήτη" υπογραμμίζονται οι προκλήσεις για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας αλλαγής του κλίματος. Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο και το Κοινοβούλιο επιβεβαίωσαν τον στόχο της συγκράτησης της μέσης παγκόσμιας αύξησης θερμοκρασιών σε 2°C, κατά μέγιστο όριο, σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο εξέφρασε την ανάγκη περαιτέρω αναζήτησης στρατηγικών για την επίτευξη των αναγκαίων μειώσεων εκπομπών και ζήτησε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή να εμβαθύνει την ανάλυσή της.

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες αποθήκευσης του CO₂ σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Δίδονται αναφορικά οι τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και οι τρόποι μεταφοράς του στους χώρους αποθήκευσης. Στη συνέχεια εξετάζονται οι τεχνολογίες αποθήκευσης σε πιθανούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Αναφέρονται τα σημαντικότερα ερευνητικά προγράμματα που βρίσκονται σε εξέλιξη παγκοσμίως καθώς και τα ερευνητικά προγράμματα στα οποία συμμετέχει η Ελλάδα. Τέλος διατυπώνεται η σημασία της διεργασίας αυτής και ο σημαντικός ρόλος που μπορεί να αποκτήσει για την μείωση των εκπομπών του CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Οι κύριες ανάγκες της έρευνας είναι: η ανάπτυξη συστημάτων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της διαφυγής του CO₂ στο υπέδαφος, η αξιολόγηση και η διασφάλιση της μακροχρόνιας σταθερότητας του δεσμευμένου CO₂ και η μείωση του κόστους και των ενεργειακών απαιτήσεων της αποθήκευσης του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλου βάθους.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εκπομπές CO₂ θεωρείται ότι αποτελούν το βασικότερο ανθρωπογενές αέριο θερμοκηπίου με σημαντική συμβολή στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη και κατ' επέκταση των κλιματικών αλλαγών που αυτή επιφέρει^[1]. Από την άλλη μεριά ο ενεργειακός τομέας και συγκεκριμένα ο τομέας ηλεκτροπαραγωγής είναι η κύρια πηγή εκπομπών CO₂. Υπολογίζεται ότι το 30% των συνολικών εκπομπών CO₂ οφείλεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα^[2].

Ο ενεργειακός τομέας εξακολουθεί να είναι ισχυρά εξαρτώμενος από τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, φυσικό αέριο) παρά τις προσπάθειες που καταβάλλονται για την υποκατάστασή τους από άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας με μηδενικές εκπομπές CO₂ π.χ ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εκτιμάται ότι το 85% των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως καλύπτεται από τα ορυκτά καύσιμα.

Στην Ελλάδα ο τομέας παραγωγής ενέργειας παράγει σχεδόν το 50% των συνολικών εκπομπών CO₂^[3]. Η παγκόσμια κοινότητα έχει δεσμευτεί μέσω της σύμβασης-πλαίσιο για τις κλιματικές μεταβολές (UNFCCC) να σταθεροποιήσει τις εκπομπές CO₂ στα επίπεδα του 1990 και μέσω του Πρωτοκόλλου του Κιότο να μειώσει τις εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 5,2% έως την περίοδο 2008-2012 σε σχέση με τις εκπομπές του 1990.

Η ιδέα της δέσμευσης του CO₂ και αποθήκευσής του σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς όπως ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου με βελτιωμένη ανάκτηση του κοιτάσματος (Enhanced Oil Recovery) ή υποθαλάσσια θα μπορούσε να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση για μηδενικές εκπομπές CO₂ σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

^[1] IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), “Third Assessment Report –Climate Change 2001”, www.ipcc.ch

^[2]Κ. Thambimuthu, Paul Freund, “CO₂ Capture and Sequestration from Power Generation” , Studies by the IEA Greenhouse Gas R&D programme.

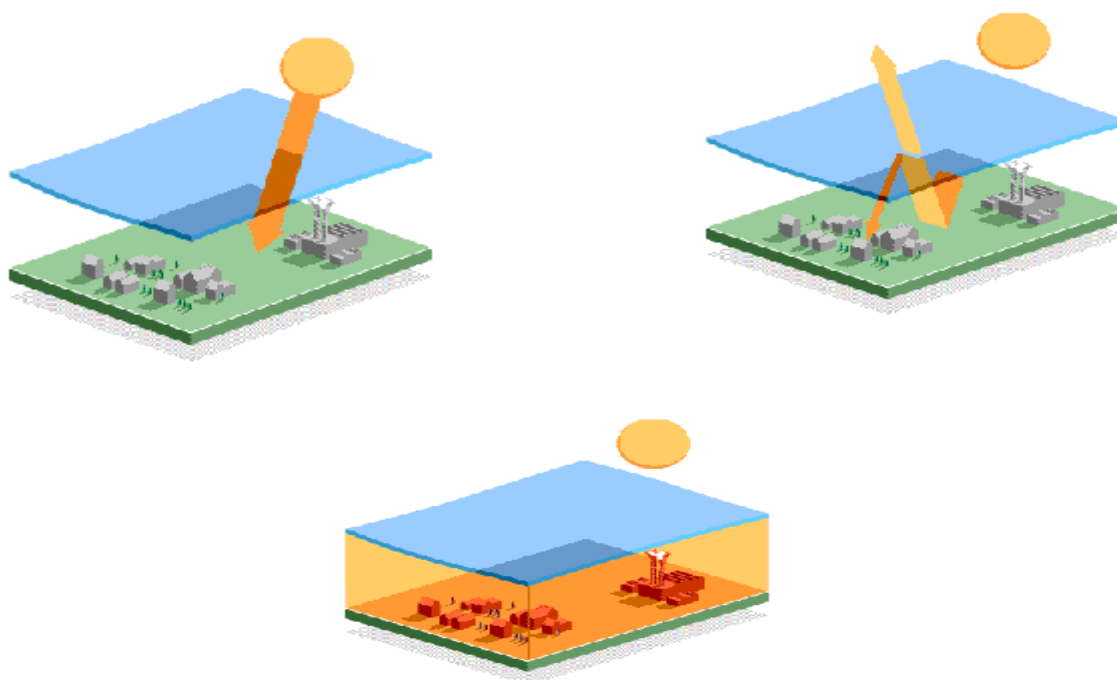
^[3]Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Απογραφές Εκπομπών 1990-2002.

1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

1.1. Εισαγωγή

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια φυσική διαδικασία. Μέσω αυτού διατηρείται η Γη θερμή, ώστε να υπάρχει ζωή και ανάπτυξη. Χωρίς αυτό, η Γη θα ήταν ψυχρή περίπου $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, και δεν θα μπορούσε να υπάρχει ζωή. Αντιθέτως, η μέση θερμοκρασία της Γης κυμαίνεται στο μέσο επίπεδο των $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα αέρια του θερμοκηπίου σχηματίζουν ένα 'αέριο στρώμα' πάνω από το έδαφος της Γης σε ένα ορισμένο ύψος, ώστε αφού επιτρέψουν να εισέλθει η υπέρυθρη ακτινοβολία του ήλιου, αυτή απορροφάται κατά ένα μέρος από τη Γη και την ατμόσφαιρα. Εν συνεχεία η υπόλοιπη ακτινοβολία επανεκπέμπεται από τη Γη, που ένα τμήμα της φεύγει προς το διάστημα και το υπόλοιπο εγκλωβίζεται από το στρώμα των αερίων του θερμοκηπίου.

Ένα μέρος λοιπόν της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την είσοδο της, περνά αναλλοίωτη στην ατμόσφαιρα, φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους και ακτινοβολείται προς τα πάνω με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Ένα μέρος αυτής απορροφάται από την ατμόσφαιρα, τη θερμαίνει και επανεκπέμπεται στην επιφάνεια του εδάφους. Το στρώμα των αερίων λοιπόν, επιτρέπει τη διέλευση της ακτινοβολίας αλλά ταυτόχρονα την εγκλωβίζει, μοιάζει με τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου και ο Γάλλος μαθηματικός Fourier το ονόμασε το 1822 «Φαινόμενο Θερμοκηπίου». Όμως τα τελευταία χρόνια λέγοντας Φαινόμενο Θερμοκηπίου δεν αναφερόμαστε στη φυσική διεργασία, αλλά στην έξαρση αυτής, λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες (David Hawkins, 2001).

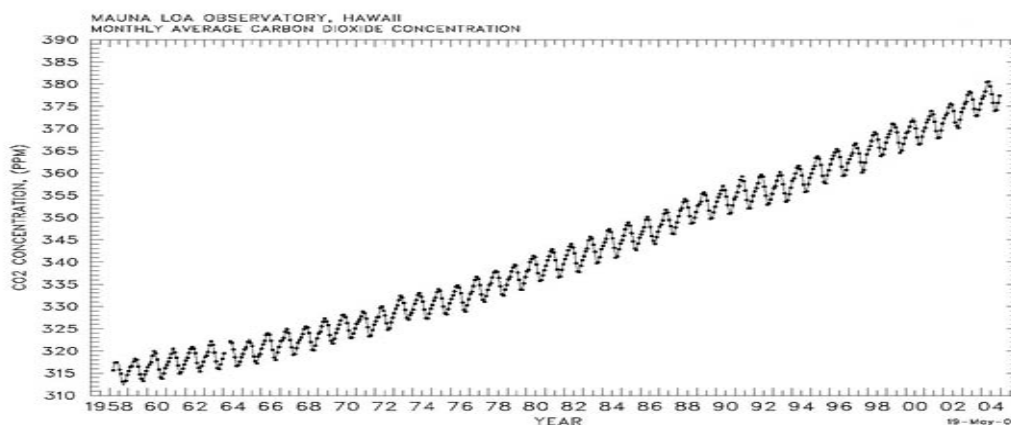


Εικόνα 1.1: Η κατακράτηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το στρώμα των αερίων του θερμοκηπίου

Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό διαχωριστικό γύρω από τη Γη, η καύση ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει στην αύξηση του ποσού του CO₂ αλλά και άλλων αερίων όπως το μεθάνιο και οξείδια του αζώτου, που εκλύονται στην ατμόσφαιρα. Η επιφάνεια της Γης θερμαίνεται από τον ήλιο, καθώς θερμαίνεται ανακλά πίσω προς την ατμόσφαιρα θερμότητα. Περίπου το 70% της ενέργειας του ήλιου, ακτινοβολείται προς τα πίσω στο διάστημα. Αλλά κάποιο ποσό της υπέρυθρης ακτινοβολίας παγιδεύεται από τα αέρια του θερμοκηπίου, που θερμαίνουν ακόμη περισσότερο την ατμόσφαιρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η Γη να διατηρείται θερμή και να εμφανίζεται το φαινόμενο της ζωής. Αλλά οι αυξημένες ποσότητες των εκπομπών των αερίων, αλλάζουν την ισορροπία του σύνθετου αυτού συστήματος, προξενώντας την παγκόσμια άνοδο της θερμοκρασίας (R. Richels, et al).

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες όχι μόνο εκπέμπουν υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα, αλλά βλάπτουν και την ικανότητα της γης να απορροφά το CO₂ και να το ενσωματώνει στους φυσικούς κύκλους ροής ενέργειας και ύλης, με την καταστροφή των δασών και του φυτοπλαγκτού των ωκεανών. Το πλαγκτόν αποτελεί τον κύριο «απορροφητή» CO₂ του πλανήτη, καθώς πρόκειται για φυτικούς οργανισμούς που χρησιμοποιούν το CO₂ κατά τη φωτοσύνθεση. Η ατμόσφαιρα έχει ένα σχετικά μικρό τμήμα στο οποίο κινούνται οι περιβαλλοντικοί ρύποι. Κατάλαμβάνει μάζα των 5×10^{18} kg αέρα που μειώνεται από τους ωκεανούς (1.4×10^{21} kg για 3800 m βάθος ωκεανού). Όμως ο χρόνος παραμονής των ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι πολύ σύντομος συγκρινόμενος με αυτόν στους ωκεανούς.

Οι εκπομπές αερίων ρύπων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου παρουσιάζουν τις τελευταίες δεκαετίες αύξηση στην ατμόσφαιρα. Το διοξείδιο του άνθρακα από τις εκπομπές των πετρελαίων καυσίμων αυξάνεται κατά 0.4-0.5% το χρόνο (Εικ.1.2). Κατά ένα μικρό ποσοστό μεγαλύτερο από των επιδράσεων των αερίων επιδράσεων οφείλεται στο διοξείδιο του άνθρακα (Πίνακας 1.2) Οι συγκεντρώσεις μεθανίου στην ατμόσφαιρα, ένα άλλο δραστικό αέριο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, αυξάνονται κατά ~ 7% ανά έτος, κυρίως λόγω της υδροπονίας στις καλλιέργειες (παραγωγή ρυζιού) και της αγροτικής οικονομίας που απαιτείται για να παραχθεί η απαραίτητη τροφή για ένα όλο και αυξανόμενο πληθυσμό (Εικ.1.3). Αλλά ο ρυθμός αύξησης στη συγκέντρωση μεθανίου έχει αρχίσει να μειώνεται, ίσως επειδή οι διαρροές τους αγωγούς του φυσικού αερίου έχουν αρχίσει να ελέγχονται (David Hawkins, 2001).



Εικόνα 1.2: Τάση του διοξειδίου του άνθρακα σε δύο σταθμούς μετρήσεων: στο βόρειο ημισφαίριο, Μαούνα Λόα, Χαβάη, και στο νότιο ημισφαίριο στο Κεϊπ Γριμ, που δείχνει ότι υπάρχει εκθετική αύξηση στο CO₂ με ρυθμό 0.5% ανά έτος.

Πίνακας 1 Ατμοσφαιρικά μεγέθη και μοριακά βάρη

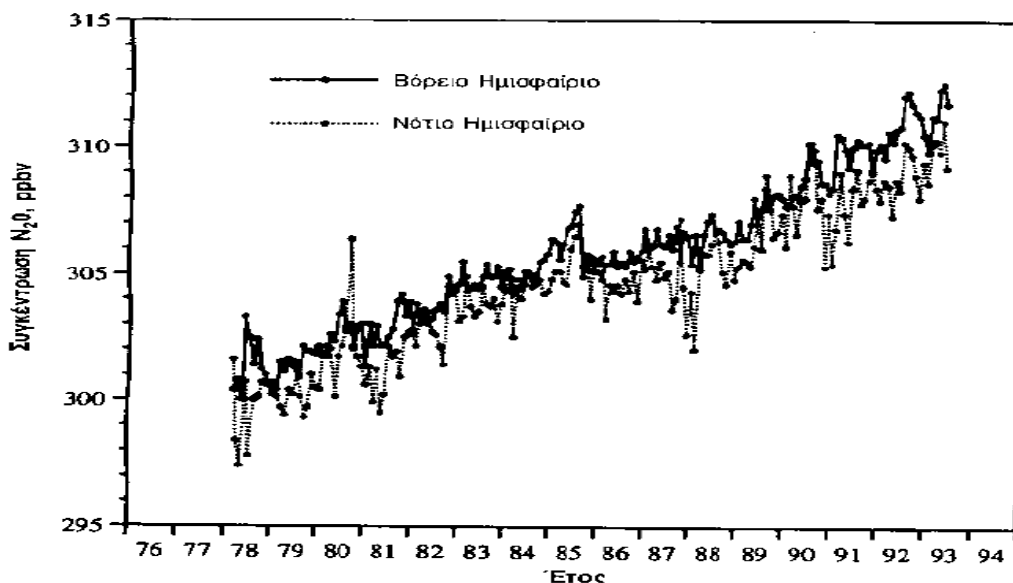
Ατμοσφαιρικά μεγέθη		Μοριακά βάρη	
Μάζα ατμόσφαιρας (kg)	$5.14 \cdot 10^{18}$	Ξηρού αέρα	28.96
Ποσοστό όγκου CO ₂ (%)	0.0353	Άνθρακα	12
Εποχική διακύμανση CO ₂ στη Mauna Loa, Hawaii (%)	2.5	Διοξειδίου του άνθρακα	44

© N. Μαμάσης & Δ. Κουτσογιάννης, 2001

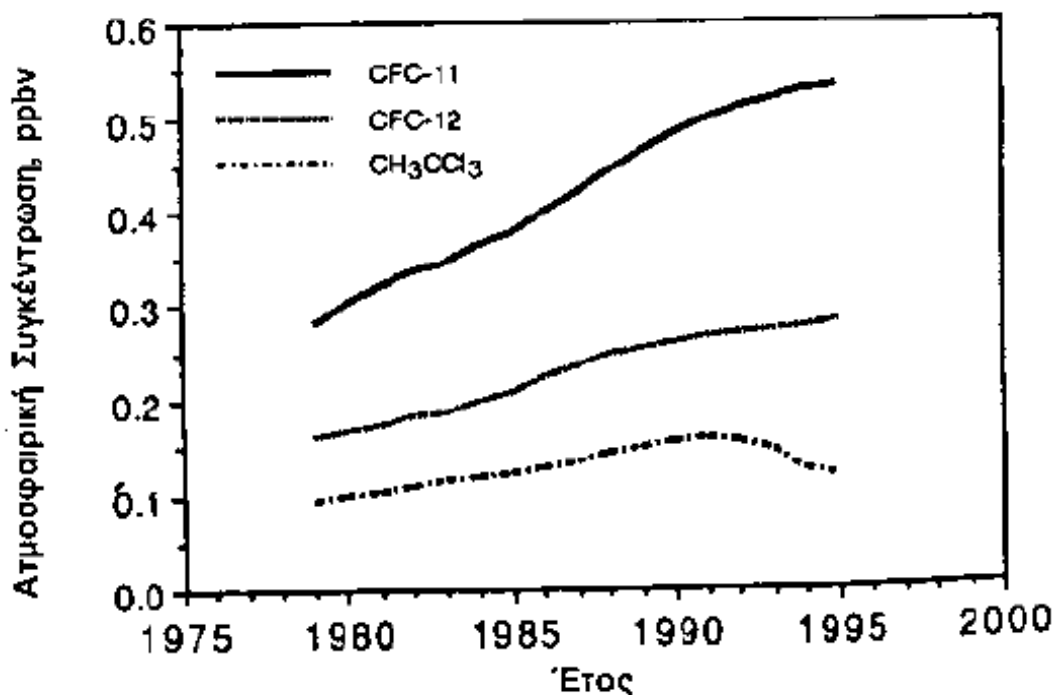
Πίνακας 1.1: Ατμοσφαιρικά μεγέθη και μοριακά βάρη (N.Μαμάσης & Δ.Κουτσογιάννης, 2001)

Τα αυξημένα οξείδια του αζώτου είναι αποτέλεσμα της αύξησης των εκπομπών των ορυκτών καυσίμων, της καύσης της βιομάζας και της καθολικής χρήσης των λιπασμάτων αζώτου παγκοσμίως. Καθώς το άζωτο με τη μορφή της αμμωνίας οξειδώνεται στο έδαφος και τα νιτρικά απονιτριοποιούνται, τα οξείδια του αζώτου συνιστούν ένα ενδιάμεσο στάδιο οξείδωσης, καθώς αυτά γίνονται πτητικά και μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα. Το N₂O αυξάνεται γρήγορα στην ατμόσφαιρα, παρόλο που αποτελεί μόνο το 5% των ανθρωπογενών επιδράσεων στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου, αποτελεί όμως ένα δύσκολα ελεγχόμενο αέριο. Οι εφαρμογές των λιπασμάτων με τη μορφή αμμωνίας θεικού αμμωνίου και νιτρικού αμμωνίου αυξάνονται σε παγκόσμια κλίμακα.

Οι συγκεντρώσεις του χλωροφθοροάνθρακα (CFC) αυξάνονται επίσης, και έχουν ένα μακρύ χρόνο ημίσειας ζωής στην ατμόσφαιρα (Πίνακας 1.1). Αυτοί χρησιμοποιούνται ως ψηκτικές ουσίες, ως χημικά καθαρισμού στη βιομηχανία μικροηλεκτρονικών. Δύο από τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι το CFC-11 (CFCI τριχλωροφθοροάνθρακας) και CFC-12 (CFCI διχλωροδιφθοροάνθρακας). Λόγω του μικρού του ρυθμού αντίδρασης με τα ιόντα υδροξυλίου OH στο κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας, μεταφέρονται στην στρατόσφαιρα (άνωτερο τμήμα της ατμόσφαιρας), όπου μειώνουν το στρώμα του όζοντος που προστατεύει τη γη από τις βλαβερές υπεριώδεις ακτινοβολίες. Το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ του 1987 και μεταγενέστερες τροποποιήσεις (Λονδίνο 1990, Κοπενγιάγη 1992, Κιοτο 1997) έχουν προσδιορίσει την παραγωγή των CFCs μέχρι το έτος 2000. Χλωροφόρμιουχο μεθυλίο είναι μια χημική ουσία που καταστρέφει δυναμικά το όζον, μειώνεται τώρα στην ατμόσφαιρα λόγω του πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ.



Σχήμα 1.3 Τάση της συγκέντρωσης του μεθανίου σε δύο σταθμούς: στο βόρειο ημισφαίριο, Μασούνα Λόα, Χαβάη, και στο νότιο ημισφαίριο στο Κεϊπ Γκριμ, που δείχνει ότι υπάρχει εκθετική αύξηση στο CO με ρυθμό 0.9% ανά έτος, αλλά οι συγκεντρώσεις φαίνεται να εξισώνονται.



Σχήμα 1.4 Συγκεντρώσεις χλωροφθοροάνθρακας (CFC) και μεθυλίου του χλωροφορμίου ($CH CCl$) στην ατμόσφαιρα.

Παγκόσμια, η εκχέρσωση της γης για αγροτικούς και εμπορικούς σκοπούς φτάνει τα 50,000 mi ανά χρόνο ή σχεδόν φθάνει την επιφάνεια της πολιτείας της Αϊόβας των ΗΠΑ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος φυτών, ζώων και μικροβιακών πληθυσμών. Περίπου 100,000 είδη θεωρείται ότι εκλείπουν ανά έτος από ένα συνολικό αριθμό των 4-40 εκατομμυρίων.

Το ήμισυ αυτής της βιοποικιλότητας βρίσκεται στα τροπικά και στα αναπτυσσόμενα κράτη, οπότε η εκχέρσωση των δασών συναντά ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Έθνη εκχερσώνουν περίπου 0,5% των δασών κάθε χρόνο και αν αυτό προκαλέσει την απώλεια των μισών φυσικών ειδών που βρίσκονται στα δάση αυτά, τότε ο λόγος της έκλειψης κυμαίνεται 0,25% το έτος, ένα πολύ σοβαρό μακροπρόθεσμο πρόβλημα.

Η παγκόσμια φτώχεια είναι ίσως το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα από όλα: 1.3 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε πόσιμο νερό, 2.3 δισεκατομμύρια δεν έχουν στοιχειώδεις εγκαταστάσεις υγιεινής, 1.5 δισεκατομμύρια δεν έχουν αρκετά καύσιμα για μαγείρεμα και θέρμανση και 13 εκατομμύρια παιδιά πεθαίνουν από διάρροια, δυσεντερία, και αστιτία κάθε χρόνο. Μέχρι ο αναπτυσσόμενος κόσμος να βρει τον τρόπο να επενδύσει στις αναπτυσσόμενες χώρες, θα είναι δύσκολο να επιτευχθεί συνεργατική πρόοδος στην διατήρηση των δασών, στη βιοποικιλότητα και στη μείωση των εκλύσεων του διοξειδίου του άνθρακα. Οι αναπτυσσόμενες χώρες πρέπει να μειώσουν το βαθμό κατανάλωσης ανά άτομο (το μεγαλύτερο μέρος του προβλήματος) και να βοηθήσουν τις αναπτυσσόμενες χώρες με την ανάπτυξή τους. Το μεγαλύτερο ποσοστό ευθύνης στη δημιουργία του προβλήματος ρύπανσης της ατμόσφαιρας προκλήθηκε από εκπομπές από τις αναπτυσσόμενες χώρες και είναι οι πλέον υπεύθυνοι για τον έλεγχό της. Είναι ευθύνη η ανάλυση του παγκοσμίου προβλήματος με τη χρήση περιβαλλοντικών μοντέλων και η συμμετοχή των μηχανικών στις διεθνείς συζητήσεις και αποφάσεις.

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

1824 - Ο Ζοζέφ Φουριέ θέτει το θέμα του ρόλου που παίζει η ατμόσφαιρα της Γης στη θερμοκρασία του πλανήτη, καθώς και της επιπτώσεις της βιομηχανίας στη κλίμα.

1896 - Ο Σουηδός Σβάντε Αρρένιους υποστηρίζει ότι η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζεται από τα αέρια που συγκρατούν τη θερμότητα.

1941 - Ο Σέρβος Μιλουτίν Μιλάνκοβιτς υποστηρίζει ότι η μεταβολή της τροχιάς της Γης, μας φέρνει κάθε 40.000 χρόνια την εποχή των παγετώνων.

1957 - Ο Τσαρλς Ντέιβιντ Κίλινγκ μετράει την συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, από ένα παρατηρητήριο στη Χαβάη. Σε περίοδο έξι ετών, φαίνεται καθαρά η αύξηση της συγκέντρωσης του ποσοστού του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

1980 - Ο Σουηδός Μπερτ Μπολίν διαπιστώνει πως η θερμοκρασία της Γης αυξάνεται εδώ και ένα αιώνα.

1988 - Ο ΟΗΕ και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Μετεωρολογίας συστήνουν την Διακυβερνητική Ομάδα Ειδικών για την εξέλιξη του κλίματος (IPCC).

1992 - Στη σύνοδο του Ρίο 167 κράτη υπογράφουν τη μη δεσμευτική συνθήκη-πλαίσιο για τις κλιματικές αλλαγές.

1997 - Στο Κιότο της Ιαπωνίας 38 βιομηχανικές χώρες δεσμεύονται να μειώσουν ως το 2010 τις εκπομπές αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 5.2% (μέσος όρος) σε σχέση με το 1990. Το πρωτόκολλο αυτό δεν έχει επικυρωθεί από κάποιες χώρες.

2001 - Στη Βόννη της Γερμανίας, γίνεται το πρώτο βήμα για την επικύρωση του πρωτοκόλλου του Κιότο, χωρίς τη συμμετοχή των ΗΠΑ, αλλά με την συμμετοχή της Ιαπωνίας, Ρωσίας, των χωρών της ΕΕ, συνολικά 178 χώρες.

1.2. Κλιματολογικές αλλαγές

Η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα έχει οδηγήσει σε αύξηση του ενδιαφέροντος όσων αφορά την αύξηση της θερμοκρασίας της γης και τις κλιματικές μεταβολές. Ενώ είναι σίγουρο ότι τα αέρια του θερμοκηπίου απορροφούν ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, δεν είναι βέβαιο αν το κλίμα έχει επηρεαστεί. Λόγω του ότι η θερμοκρασία ποικίλει στην ατμόσφαιρα αυτή διαχωρίζεται σε διάφορα στρώματα: στην τροπόσφαιρα, στην στρατόσφαιρα, στην μεσόσφαιρα και στη θερμόσφαιρα.

Από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος μόνο περίπου 51% εισέρχεται φτάνει στο έδαφος και απορροφάται. Το 26% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας αντανακλάται από τα σύννεφα, τη σκόνη και την ομίχλη. Όταν η ενέργεια που προέρχεται από την ακτινοβολία φθάσει στη γη και απορροφηθεί, συμβαίνει αύξηση της θερμοκρασίας και η ενέργεια επιστρέφει στην ατμόσφαιρα σύμφωνα με τον νόμο των Stefan – Boltzmann για την ακτινοβολία μαύρων σωμάτων. Τελικά 70% της ενέργειας που απορροφάται από τη γη επιστρέφει στην ατμόσφαιρα με τη μορφή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Όμως, οι υδρατμοί, τα σύννεφα, το CO και άλλα αέρια του θερμοκηπίου απορροφούν την ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης και προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Οπότε, το μεγαλύτερο ποσοστό του φαινομένου του θερμοκηπίου προκαλείται από φυσικά αίτια, δηλαδή από τους υδρατμούς, τα σύννεφα και το CO που δεν προέρχεται από βιομηχανικές εφαρμογές. Χωρίς την παρουσία αυτών των αερίων η γη θα ήταν τόσο κρύα που θα ήταν μη κατοικήσιμη, περίπου 33°C πιο κρύα από ό,τι είναι τώρα. Ο ετήσιος μέσος όρος της θερμοκρασίας της γης είναι 15°C, οπότε η θερμοκρασία της γης χωρίς την παρουσία των αερίων θα ήταν -18°C. Η επίδραση του θερμοκηπίου είναι μία φυσική διαδικασία και προφυλάσσει την διατήρηση της ζωής στον πλανήτη.

Τα αέρια αυτά αυξάνονται με γρήγορο ρυθμό και έχουν την ικανότητα αν δεν ελεγχθεί η αύξησή τους να οδηγήσουν σε αλλαγή του κλίματος. Μόρια με πάνω από δύο άτομα απορροφούν την ακτινοβολία μεγάλου κύματος και με τον τρόπο αυτό αυξάνουν την ενέργεια περιστροφής τους. Υπάρχει ένα μήκος κύματος για το σύνολο της ακτινοβολίας του πλανήτη 8-20 μm μήκος κύματος, όπου είναι ικανοποιητικοί απορροφητές. Η σχετική αποτελεσματικότητα κάθε αερίου δεν είναι ίση. Ο Πίνακας 1.1 δείχνει ότι είναι 12,000 με 15,000 φορές πιο αποτελεσματικό, όσον αφορά την ακτινοβολία απορρόφησης μεγάλου κύματος, συγκρινόμενα σε μοριακή βάση (R. Richels, et al).

1.3. Μελέτη του κλίματος

Όλες οι πληροφορίες για τα αέρια θερμοκηπίου μπορούν να περιληφθούν σε ένα μοντέλο για τη μεταφορά θερμότητας, μάζας και ορμής στον πλανήτη. Τα σφαιρικά πρότυπα που συνδέουν τις ατμοσφαιρικές, τις εδαφικές και τις ωκεάνιες διεργασίες έχουν συγκεντρωθεί από τη διακυβερνητική επιτροπή στην αλλαγή κλίματος (International Panel on Climate Change, IPCC). Οι υπολογισμένες αλλαγές στη γήινη ακτινοβολία ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων αερίων θερμοκηπίου παρουσιάζονται στο σχήμα . Το CO₂ έχει αυξηθεί κατά 27% από 280 ppm το 1765 σε 355 ppm το 1990. Μία συνολική αλλαγή 2,5 Watt/m² αποδίδεται στα ανθρωπογενή αέρια θερμοκηπίου.

Εάν υποθέσουμε ότι μια συνηθισμένη λάμπα χριστουγεννιάτικου δέντρου δίνει ενέργεια 4 Watt και έχουμε ένα ηλεκτρικό λαμπτήρα αυτού του είδους που λάμπει συνεχώς σε κάθε τετραγωνικό μέτρο της γήινης επιφάνειας, αυτό πρακτικά θα οδηγούσε σε μια επιβάρυνση του κλίματος κατά 4 Wm. Ωστόσο, η επιβάρυνση του κλίματος είναι μικρή σχετικά με τη συνολική εισαγωγή της ενέργειας από τον ήλιο (ηλιακή ακτινοβολία ή ηλιακή σταθερά) που είναι 1372 Wm. Η ηλιακή σταθερά δεν είναι σταθερή και διαφοροποιείται με την ενεργότητα της ηλιακής κηλίδας και άλλους παράγοντες (0,1%) και μπορεί να έχει αυξηθεί λίγο τα τελευταία χρόνια.

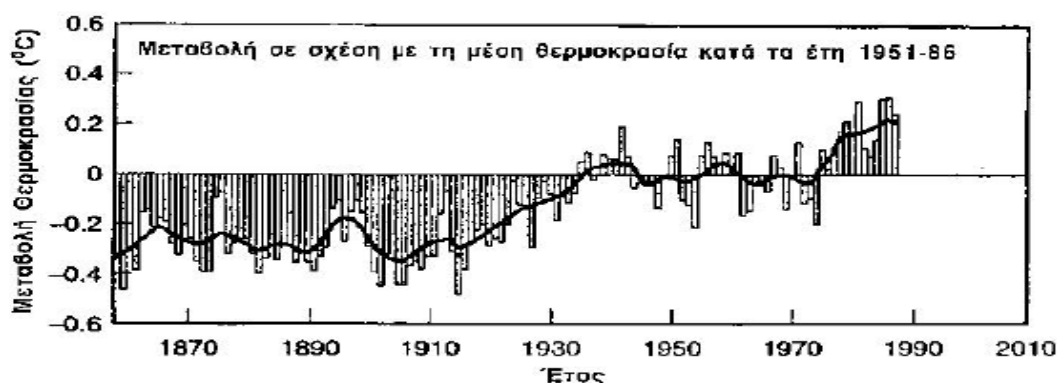
Επίσης οι άνθρωποι έχουν αυξήσει τις εκπομπές διαξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα (από την καύση άνθρακα), γεγονός που οδηγεί στο σχηματισμό των αερολυμάτων θειικού άλατος και των φωτεινότερων σύννεφων, γεγονότα που προκαλούν «συνολική ψύξη». Αυτή η επίδραση ψύξης είναι στο ίδιο μέγεθος αλλά κάπως λιγότερη από την κατ' εκτίμηση επίδραση της θέρμανσης λόγω των αερίων θερμοκηπίου. Υπάρχει όμως μια αβεβαιότητα σε όλα αυτά τα αποτελέσματα. Υπολογίζονται μέσω των σφαιρικών δυναμικών μοντέλων, των γενικών μοντέλων κυκλοφορίας ή GCMs (General Circulation Models).

Ένα από τα αποτελέσματα ανατροφοδότησης των αερίων θερμοκηπίου σε GCMs είναι η δυνατότητα για μια μικρή θέρμανση επιφάνειας που ενισχύεται από τα σύννεφα και τον υδρατμό. Δεδομένου ότι η γήινη επιφάνεια γίνεται θερμότερη, η εξάτμιση αυξάνεται. Δεδομένου ότι η εξάτμιση αυξάνεται, ενισχύεται ταυτόχρονα το φαινόμενο της δημιουργίας υδρατμών και σχηματίζονται σύννεφα που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου (David Hawkins, 2001).

Αυτή η κλιματική ανάδραση μπορεί να πολλαπλασιάσει την επίδραση του CO₂ μέχρι τέσσερις φορές σε GCMs. Δεν ξέρουμε πόσα νέα σύννεφα θα σχηματίζονταν ή θα βρίσκονταν στην ατμόσφαιρα. Κατά συνέπεια, είναι δύσκολο να σχεδιαστούν τα μοντέλα και να καθοριστεί η ακριβής επίδραση της ανάδρασης. Έτσι, μπορεί να σχεδιαστούν μόνο μοντέλα με λογικούς τρόπους και να συγκριθούν τα αποτελέσματα των μελλοντικών σεναρίων και των προσομοιώσεων από τα διάφορα πρότυπα. Το ζήτημα είναι η έκταση της θέρμανσης και όχι η παρουσία θέρμανσης. Ο σχετικός βαθμός θέρμανσης θα επηρεαστεί έντονα από τα σύννεφα και τους μηχανισμούς ανατροφοδότησης της εξάτμισης των υδρατμών.

Έχουμε αυτή την περίοδο ένα σχετικά θερμό κλίμα (Σχήμα 1.5). Η συνολική μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της γης είναι 0.5% θερμότερη από αυτής της περιόδου του 1860. Αλλά αυτή η αλλαγή θερμοκρασίας είναι μέσα στη διαχρονική μεταβλητότητα τα θερμοκρασίας (0.7°C) που οφείλεται στα σχέδια κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας (π.χ. Ελ Νίνιο) που δεν μπορούμε να ερμηνεύσουμε ακόμα πλήρως. Επτά από οκτώ από τα θερμότερα έτη που βρίσκουμε στο αρχείο έχουν εμφανιστεί μετά το 1980 (1980-1995) σε μια περίοδο 130 ετών. Το έτος 1995 ήταν το θερμότερο των καταγραφών και το 1990 ήταν το δεύτερο θερμότερο έτος. Τα έτη 1992 και 1993

ήταν σχετικά δροσερά επειδή μόρια SO_x και τέφρας βρίσκονταν ψηλά στην ατμόσφαιρα (>35.000 ft) από την έκρηξη στο ηφαίστειο του όρους Pinatubo. Όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν μοντελοποιηθεί με GCMs με μερική επιτυχία και αστοχία.



Σχήμα 1.5 Μεταβολή της θερμοκρασίας χρονολογικά

1.4. Προοπτική θέρμανσης της γής

Τα γενικά μοντέλα κυκλοφορίας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η συγκέντρωση του CO₂ αυξάνει κατά 1% ανά έτος. Αυτή η υπόθεση στηρίζεται στο γεγονός ότι παρατηρείται μια αύξηση κατά 0.5% ανά έτος στη συγκέντρωση του CO₂, η οποία συνοδεύεται και από μια αύξηση και όλων των αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η καλύτερη εκτίμηση της αύξησης της θερμοκρασίας είναι 1.0-3.5°C με πιθανότερη κατ' εκτίμηση τιμή 2°C από τα μέσα του 21^{ου} αιώνα. Εάν το διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια θερμοκηπίου συνεχίζουν να αυξάνουν, όλα τα μοντέλα προβλέπουν μια τάση για αύξηση της θερμοκρασίας της γης τον 21^ο αιώνα.

Η συνολική μέση θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια της γης είναι σήμερα περίπου κατά 0.5°C υψηλότερη από τη μέση θερμοκρασία του 19^{ου} αιώνα. Εντούτοις, αυτή η αλλαγή δεν μπορεί να αποδοθεί σαφώς στις αυξανόμενες συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου. Τα μοντέλα GCMs έχουν προσδιορίσει μια μεγαλύτερη μεταβολή κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 130 ετών, από αυτή που έχει παρατηρηθεί και αυτό οφείλεται ίσως στα αποτελέσματα ψύξης των ανθρωπογενών αεροζόλ (David Hawkins, 2001).

Οι πάγοι του Βόρειου ημισφαιρίου (θαλάσσιοι παγετώνες) θα μειωθούν με τη θερμική αύξηση του 21^{ου} αιώνα σύμφωνα με τ GCMs. Τα μοντέλα προβλέπουν την επιρροή των πολικών περιοχών λόγω της συνολικής θέρμανσης και ότι οι αρκτικές περιοχές θα ζήσουν θερμότερους χειμώνες.

Το μέσο επίπεδο θαλάσσης προβλέπεται να αυξηθεί με ταχύτερους ρυθμούς τον 21^ο αιώνα, πρώτα λόγω της θερμικής διαστολής των ωκεανών καθώς η επιφάνειά τους θερμαίνεται και έπειτα λόγω της τήξης των πολικών πάγων. Η μέση στάθμη των ωκεανών είχε αυξηθεί κατά 3,9 mm (0.8 mm yr) το 1993 και το 1994. Τα περισσότερα μοντέλα υπολογίζουν ότι το ποσοστό αύξησης του επιπέδου της θάλασσας στα 15-95 cm μέχρι το έτος 2100. Με προβλέψεις τέτοιας σπουδαιότητας για όλους τους ανθρώπους, ίσως μπορεί να αναρωτηθούμε πως αυτά τα μοντέλα επαληθεύονται και πόσο μεγάλη είναι η αβεβαιότητά τους.

1.5. Γενικά μοντέλα κυκλοφορίας

Υπάρχουν 30 ή περισσότερα μοντέλα κυκλοφορίας (GCMs) σε χρήση σήμερα για την ανάλυση των κλιματικών μεταβολών και πέντε από τα αρχικά μοντέλα αξιολογήθηκαν από τη διακυβερνητική επιτροπή στην αλλαγή κλίματος (IPCC). Αυτά περιλαμβάνουν το Γεωφυσικό Εργαστηριακό Μοντέλο (GFDL) Δυναμικής Ρευστών της Εθνικής Ωκεανίας και Ατμοσφαιρικής Διοίκησης, του ιδρύματος Goddard για το διαστημικό πρότυπο μελετών (GISS) της Εθνικής Ατμοσφαιρικής και Διαστημικής Διοίκησης, του εθνικού κέντρου για την Ατμόσφαιρα Ερευνητικό Μοντέλο (NCAR), του κρατικού πανεπιστημίου του Όρεγκον (OSU), και του Μοντέλου του Μετεωρολογικού Γραφείου του Ηνωμένου Βασιλείου (UKMO).

Τα μοντέλα χρησιμοποιούν μια μέθοδο σταθερής κατάστασης (steady state) με διπλασιασμό του CO₂ και επίσης μια παροδική μέθοδο στην οποία η συγκέντρωση του CO₂ αυξάνεται με μια μονάδα χρονικής μεταβλητής (1% το χρόνο). Μερικά GCMs συνδέονται άμεσα με τους ωκεανούς σε μια πλήρη δυναμική αναλογία, ενώ προηγούμενες προσομοιώσεις των ωκεανών ήταν απλώς μια αρνητική θερμική πηγή σταθερής θερμοκρασίας για την ατμοσφαιρική θέρμανση.

Κάθε μοντέλο διαιρεί την ατμόσφαιρα σε στρώματα και τη γη σε ένα πλέγμα σύμφωνα με το γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Τα κελιά του πλέγματος είναι είτε μεγάλα στο μέγεθος, δηλαδή 4,5 βαθμούς γεωγραφικό πλάτος και 7,5 βαθμούς γεωγραφικό μήκος (450X750 km) είτε τόσο μικρά όσο δηλαδή 1X3. Τα περιφερειακά (τοπικής κλίμακας) μοντέλα είναι ενσωματωμένα μερικές φορές στο GCMs για μικρότερης κλίμακας δοκιμές με ανάλυση από 10X10 km έως και 50X50 km.

Τα ατμοσφαιρικά στρώματα κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10 και 30 km και εκτείνονται τουλάχιστον 30 km μέσα στη στρατόσφαιρα. Το χρονικό βήμα στα περισσότερα GCMs είναι 30 λεπτά και ο αριθμός των εξισώσεων είναι της τάξεως των 150.000, οπότε απαιτείται η δύναμη υπολογισμού ενός υπερυπολογιστή για την πραγματοποίηση των πράξεων. Μια προσομοίωση 100 ετών του ωκεάνιου NCAR μοντέλου απαιτεί 1000 ώρες επεξεργασίας σε ένα Y-MP Gray υπερυπολογιστή. Μια λεπτομερής περιγραφή GCMs είναι πέρα από το πεδίο αυτού του κειμένου. Στοιχεία για τα GCMs μπορούν να αντληθούν από το βιβλίο για τη διαμόρφωση συστημάτων κλίματος του K.E. Trenberth.

Τα GCMs στηρίζονται σε θεμελιώδη αξιώματα για να προσομοιώσουν την ατμοσφαιρική και ωκεάνια κυκλοφορία μεγάλης κλίμακας και το περιεχόμενό τους σε θερμότητα. Αυτά είναι η αρχή διατήρησης της θερμότητας ορμής και μεταφοράς μάζας. Οι βασικές εξισώσεις αντλούνται από τους νόμους Newton: τη διατήρηση της μάζας, τη διατήρηση της ενέργειας (ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής), μια καταστατική εξίσωση που συνδέει τη πίεση, την πυκνότητα και τη θερμοκρασία και μια άλλη καταστατική εξίσωση που συνδέει τη θερμοκρασία, την πυκνότητα και την αλατότητα των ωκεανών.

Η μεταβολή στο θερμικό περιεχόμενο ενός στρώματος της ατμόσφαιρας είναι ίση με τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας και του έργου πίεσης – όγκου που παράγεται στο περιβάλλον, δηλαδή ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος για τα ιδανικά αέρια για ένα κλειστό σύστημα μας δίνει:

$$Dp = du + dw = du + PDV \quad (1)$$

όπου dp είναι η μεταβολή στη θερμότητα, du είναι η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια, dw είναι η μεταβολή του έργου, P η πίεση και dV η μεταβολή του όγκου του αέριου τμήματος.

Από τον ορισμό της ενθαλπίας έχουμε:

$$Dp = du + PdV + VdP > du = dh - PdV - VdP \quad (1)$$

Δηλαδή η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας εξαρτάται από την ενθαλπία μείον το έργο που απαιτείται για την παραπάνω μεταβολή.

$$Dq = (dh - PdV - VdP) - PdV \quad (2)$$

$$dq = dh - VdP \quad (3)$$

$$dq = C dT - dP \quad (4)$$

Όπου C είναι η θερμοχωρητικότητα του όγκου του αέρα σε σταθερή πίεση, dT είναι η μεταβολή στην απόλυτη θερμοκρασία, ρ είναι η πυκνότητα αέρα και dP είναι η μεταβολή στην πίεση. Η εξίσωση 4 δείχνει το συσχετισμό ανάμεσα στην πίεση, στην πυκνότητα και την θερμοκρασία για ένα αέριο όγκο. Καθώς αυξάνει η θερμοκρασία του αέριου όγκου ή μειώνεται η πίεση υπό σταθερή πυκνότητα, το θερμικό περιεχόμενο dq αυξάνει. Αλλαγές στην πίεση προκαλούν μετακινήσεις στις αέριες μάζες.

2. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

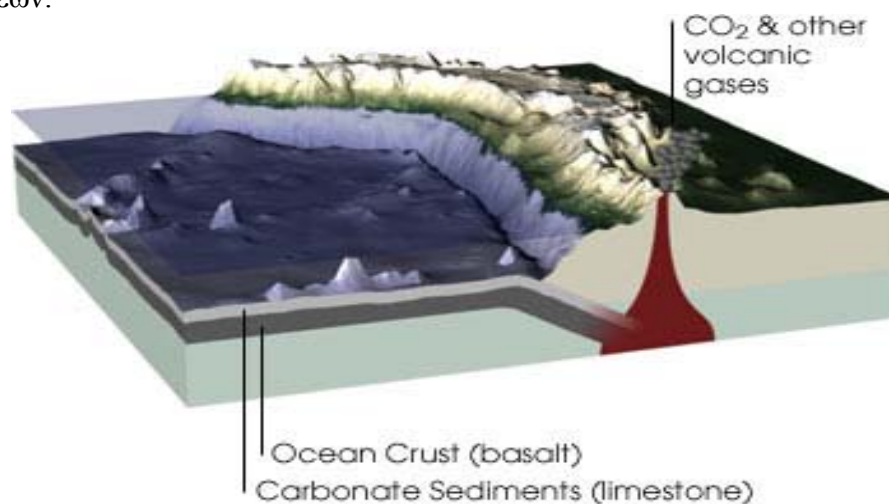
2.1. Εισαγωγή

Ο άνθρακας (C), το τέταρτο σε αφθονία στοιχείο στον κόσμο, μετά από το υδρογόνο (H), το ήλιο (He), και το οξυγόνο (O), είναι η δομική μονάδα της ζωής. Είναι το στοιχείο που συνδέει όλες τις οργανικές ουσίες, από τα ορυκτά καύσιμα ως το DNA. Στη γη, οι κύκλοι άνθρακα μέσω του εδάφους, του ωκεανού, της ατμόσφαιρας, και του γήινου εσωτερικού συνιστούν έναν σημαντικό βιογεωχημικό κύκλο (η κυκλοφορία των χημικών συστατικών επιτυγχάνεται μέσω της βιόσφαιρας, της λιθόσφαιρας, της ατμόσφαιρας, και της υδρόσφαιρας). Ο παγκόσμιος κύκλος άνθρακα μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες: τον γεωλογικό, που λειτουργεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα (εκατομμύρια έτη), και τον βιολογικό/φυσικό, ο οποίος λειτουργεί σε πιο σύντομα χρονικά διαστήματα (ημέρες ή χιλιάδες έτη).

2.2. Ο Γεωλογικός κύκλος του άνθρακα

Δισεκατομμύρια ετών παλαιότερα, τα planetesimals (μικρά σωματίδια που διαμορφώθηκαν από το ηλιακό νεφέλωμα) και ανθρακούχοι μετεωρίτες βομβάρδισαν την επιφάνεια του πλανήτη μας, με αποτέλεσμα η περιεκτικότητα σε άνθρακα της γης να αυξάνεται σταθερά.

Από εκείνους τους χρόνους, το ανθρακικό οξύ (ένα ασθενές οξύ που προέρχεται από την αντίδραση μεταξύ του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα CO_2 και του ύδατος) έχει αργά αλλά συνεχώς μαζί με το ασβέστιο και το μαγνήσιο της γήινης επιφάνειας διαμορφώσει τα αδιάλυτα ανθρακικά άλατα μέσω μιας διαδικασίας που καλείται *διάβρωση*. Κατόπιν, μέσω της διαδικασίας της διάβρωσης, τα ανθρακικά άλατα πλένονται στον ωκεανό και καθιζάνουν τελικά στον πυθμένα. Ο κύκλος συνεχίζεται καθώς αυτά τα υλικά σύρονται στο γήινο μανδύα από μια διαδικασία στην οποία μία λιθοσφαιρική πλάκα κατεβαίνει κάτω από άλλη, συχνά ως αποτέλεσμα σύγκλισης ή απόκλισης στις άκρες των ηπειρωτικών πλακών. Ο άνθρακας επιστρέφει έπειτα στην ατμόσφαιρα ως διοξείδιο του άνθρακα κατά τη διάρκεια ηφαιστειακών εκρήξεων.



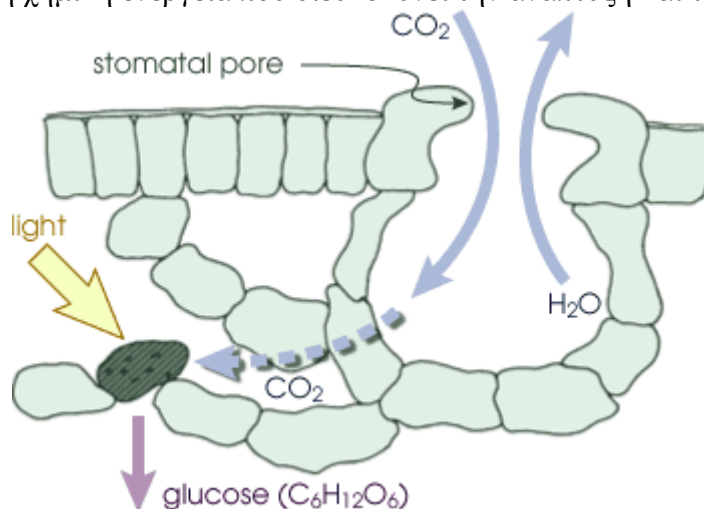
Εικόνα 2.1 Απεικόνιση της οδού διαφυγής του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Robert Simmon, NASA GSFC)

Στο γεωλογικό κύκλο άνθρακα, ο άνθρακας κινείται μεταξύ των πετρωμάτων και των μεταλλευμάτων, το νερό της θάλασσας και την ατμόσφαιρα. Το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα αντιδρά με μερικά μεταλλεύματα για να διαμορφώσει το ορυκτό ανθρακικό άλας ασβεστίου (ασβεστόλιθος). Αυτό το μέταλλευμα διαλύεται έπειτα από ύδατα και μεταφέρεται στους ωκεανούς. Εκεί μπορεί να κατακρημνιστεί από το ωκεάνιο ύδωρ, διαμορφώνοντας τα στρώματα των ιζημάτων στον πυθμένα της θάλασσας. Καθώς οι λιθοσφαιρικές πλάκες κινούνται, μέσω των διαδικασιών της τεκτονικής, αυτά τα ιζήματα αφαιρούνται κάτω από τις ηπείρους. Κάτω από τη μεγάλη θερμότητα και πίεση κάτω από τη γήινη επιφάνεια, ο ασβεστόλιθος λειώνει και αντιδρά με άλλα μεταλλεύματα, απελευθερώνοντας το διοξείδιο του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα επανεκπέμπεται έπειτα στην ατμόσφαιρα μέσω των ηφαιστειακών εκρήξεων.

Η ισορροπία μεταξύ της διάβρωσης, της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών και της ηφαιστειακής δράσης επηρεάζουν την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων ετών. Τα παλαιότερα γεωλογικά ιζήματα δείχνουν, ότι πριν από την εμφάνιση ζωής η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να ήταν εκατό φορές μεγαλύτερη από αυτή του παρόντος και δημιουργούσε ένα ισχυρό φαινόμενο του θερμοκηπίου και χαμηλή κατακράτηση ηλιακής ενέργειας. Απ' την άλλη, τα δείγματα πυρήνων πάγου που λαμβάνονται στην Ανταρκτική και τη Γροιλανδία κάνουν τους επιστήμονες να υποθέσουν ότι οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια του τελευταίου παγετώνα (20.000 έτη πριν) ήταν μόνο η μισή από αυτή που είναι σήμερα.

2.3. Ο Βιολογικός κύκλος του άνθρακα

Η βιολογία διαδραματίζει επίσης έναν σημαντικό ρόλο στη μετακίνηση του άνθρακα μέσα και έξω από το έδαφος και τους ωκεανούς μέσω των διαδικασιών της **φωτοσύνθεσης και της αναπνοής**. Σχεδόν όλες οι μορφές ζωής στη γη εξαρτώνται από την παραγωγή των σακχάρων από την ηλιακή ενέργεια και το διοξείδιο του άνθρακα (φωτοσύνθεση) και το μεταβολισμό (αναπνοή) εκείνων των σακχάρων για να παραγάγουν τη χημική ενέργεια που διευκολύνει την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή



Εικόνα 2.2 Η διαδικασία της φωτοσύνθεσης (P.J. Sellers)

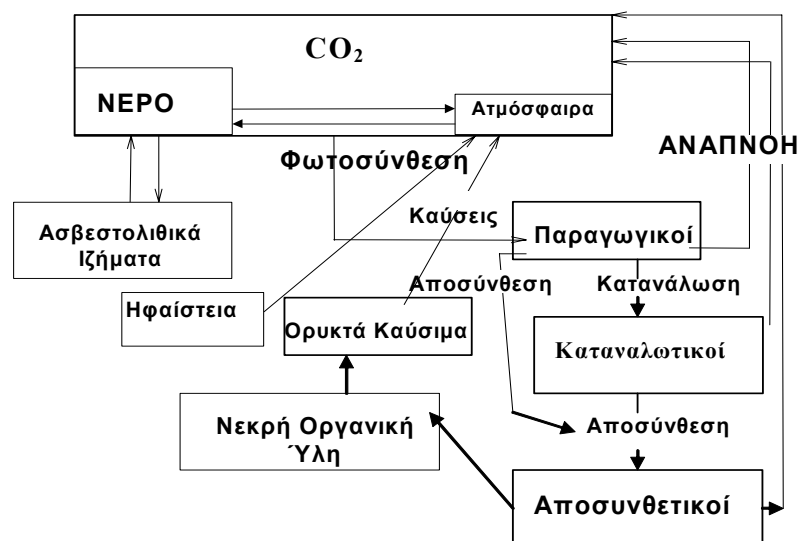
Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, τα φυτά απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα και το φως του ήλιου για να δημιουργήσουν γλυκόζη και άλλα σάκχαρα για

την οικοδόμηση των βιολογικών δομών των φυτών. Αυτή η διαδικασία διαμορφώνει το ίδρυμα του βιολογικού κύκλου άνθρακα.

Μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, τα φυτά απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και αφαιρούν το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα για να παράγουν τους υδατάνθρακες (σάκχαρα). Τα φυτά και τα ζώα "καίνε" τους υδατάνθρακες (και άλλα προϊόντα που παράγονται από αυτούς) μέσω της διαδικασίας της αναπνοής, την αντιστροφή της φωτοσύνθεσης. Η αναπνοή απελευθερώνει την ενέργεια που περιλαμβάνεται στα σάκχαρα να χρησιμοποιηθούν στο μεταβολισμό και επιστρέφει τον υδατάνθρακα 'καύσιμο' πίσω στο διοξείδιο του άνθρακα. Η αναπνοή και η αποσύνθεση (αναπνοή που καταναλώνει οργανική ουσία συνήθως από τα βακτηρίδια και τους μύκητες) επιστρέφουν το βιολογικά σταθερό άνθρακα πίσω στην ατμόσφαιρα. Το ποσό άνθρακα που απορροφάται από τη φωτοσύνθεση και που αποδεσμεύεται πίσω στην ατμόσφαιρα από την αναπνοή κάθε έτος είναι 1.000 φορές μεγαλύτερο από το ποσό άνθρακα που κινείται μέσω του γεωλογικού κύκλου σε ετήσια βάση.

Η φωτοσύνθεση και η αναπνοή διαδραματίζουν επίσης έναν σημαντικό ρόλο στη μακροπρόθεσμη γεωλογική ανακύκλωση του άνθρακα. Η παρουσία της βλάστησης του εδάφους ενισχύει τη διάβρωση του, που οδηγεί μακροπρόθεσμα στην μείωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Στους ωκεανούς, ένα ποσό άνθρακα λαμβάνεται από το φυτοπλαγκτόν (μικροσκοπικά θαλάσσια φυτά που αποτελούν τη βάση της θαλάσσιας τροφικής αλυσίδας) για να κάνουν κοχύλια από ανθρακικό άλας ασβεστίου (CaCO_3) και καθιζάνουν (αφότου πεθάνουν) για να διαμορφώσουν ιζήματα.

Κατά τη διάρκεια των χρόνων όπου υπερέβη η φωτοσύνθεση την αναπνοή, η οργανική ουσία ενίσχυσε αργά κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων ετών τις ποσότητες άνθρακα και πετρελαίου. Όλες αυτές οι βιολογικές διαδικασίες συντείνουν σε αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα και την αποθήκευση του άνθρακα στα γεωλογικά ιζήματα



Στο έδαφος η σημαντικότερη ανταλλαγή του άνθρακα με την ατμόσφαιρα προκύπτει από τη φωτοσύνθεση και την αναπνοή. Κατά τη διάρκεια της ημέρας στην εποχή της βλάστησης, τα φύλλα απορροφούν το φως του ήλιου και λαμβάνουν το

διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Παράλληλα τα φυτά, τα ζώα και τα εδαφικά μικρόβια καταναλώνουν τον άνθρακα σαν οργανική ουσία και το επιστρέφουν σαν διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Όταν οι κλιματολογικές συνθήκες είναι ακραίες η φωτοσύνθεση και η αναπνοή παύουν, μαζί με τη μετακίνηση του άνθρακα μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας εδάφους. Η ποσότητα άνθρακα που κινούνται από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης, αναπνοής, και πίσω στην ατμόσφαιρα είναι μεγάλα και δημιουργούν ταλαντώσεις στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα. Κατά τη διάρκεια ενός έτους, οι βιολογικές ροές του άνθρακα είναι πάνω από δέκα φορές μεγαλύτερες από το ποσό άνθρακα που εισάγεται στην ατμόσφαιρα με το κάψιμο ορυκτών καυσίμων.

Η φωτιά διαδραματίζει επίσης έναν σημαντικό ρόλο στη μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα από το έδαφος στην ατμόσφαιρα. Οι φωτιές αποσυνθέτουν τη βιομάζα και την οργανική ουσία για να παράγουν το διοξείδιο του άνθρακα (μαζί με μεθάνιο, μονοξείδιο άνθρακα, καπνό) και τη βλάστηση που σκοτώνεται αλλά δεν καταναλώνεται από την πυρκαγιά αποσυντίθεται με τη πάροδο του χρόνου προσθέτοντας περαιτέρω διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Κατά τη διάρκεια των ετών, σημαντικά ποσά άνθρακα μπορούν να αποθηκευτούν ή να απελευθερωθούν από το έδαφος. Παραδείγματος χάριν, όταν καθαρίζονται τα δάση για τη γεωργία ο άνθρακας που περιέχονταν στο έμβιο υλικό και το έδαφος απελευθερώνεται, αναγκάζοντας την ατμοσφαιρική συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα να αυξηθεί. Όταν το γεωργικό έδαφος εγκαταλείπεται και επιτρέπεται στα δάση να επαναυξηθούν, ο άνθρακας αποθηκεύεται στη βιομάζα και τα εδάφη διαβίωσης συσσώρευσης αναγκάζοντας τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα μειωθούν. (Sellers)

Στους ωκεανούς, η ανταλλαγή διοξειδίου του άνθρακα ελέγχεται κατά ένα μεγάλο μέρος από την θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας, τα ρεύματα, και τις βιολογικές διαδικασίες της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής. Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να διαλύθει εύκολα στον ωκεανό και το ποσό διοξειδίου του άνθρακα που ο ωκεανός μπορεί να κρατήσει εξαρτάται από την ωκεάνια θερμοκρασία και το ποσό διοξειδίου του άνθρακα που είναι ήδη παρόν. Οι χαμηλές ωκεάνιες θερμοκρασίες ευνοούν τη λήψη του διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα ενώ οι θερμές θερμοκρασίες μπορούν να αναγκάσουν την ωκεάνια επιφάνεια να απελευθερώσει το διοξείδιο του άνθρακα. Τα κρύα προς τα κάτω κινούμενα ρεύματα όπως εκείνα που εμφανίζονται πέρα από το Βόρειο Ατλαντικό απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα και το μεταφέρουν στο βαθύ ωκεανό. Τα ανοδικά κινούμενα ρεύματα στους τροπικούς κύκλους φέρνουν το διοξείδιο του άνθρακα επάνω από το βάθος και το απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα.

Η έμβια ύλη στον ωκεανό καταναλώνει και απελευθερώνει τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Αλλά σε αντίθεση με το έδαφος, οι κύκλοι άνθρακα μεταξύ της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής ποικίλλουν, δεν υπάρχει ουσιαστικά καμία αποθήκευση του άνθρακα όπως υπάρχει στο έδαφος (δηλ., κορμοί δέντρων και χόμα). Το φωτοσυνθετικό μικροσκοπικό φυτοπλαγκτόν καταναλώνεται από ζωοπλαγκτόν που αναπνέει (μικροσκοπικά θαλάσσια ζώα) μέσα σε ημέρες ή σε εβδομάδες. Μόνο μικρά ποσά άνθρακα από το πλαγκτόν καθιζάνουν στο βυθό και μόνο κατά τη διάρκεια των μακρών χρονικών περιόδων πραγματοποιείται μια σημαντική αφαίρεση άνθρακα από την ατμόσφαιρα.

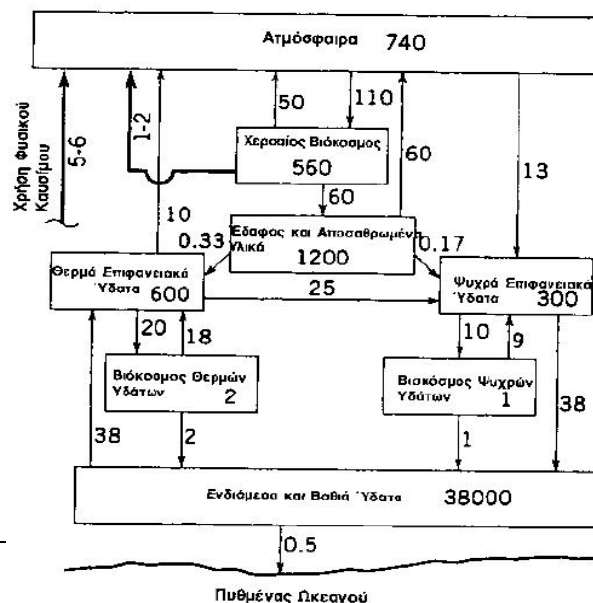
2.4. Συνολικό μοντέλο του κύκλου του άνθρακα

Ένα παράδειγμα ενός βιογεωχημικού μοντέλου είναι το απλό παγκόσμιο μοντέλο του άνθρακα (Simple Global Carbon Model – SGCM) το οποίο μελετά τη ροή του άνθρακα διαμέσου του ωκεανού, της ατμόσφαιρας και της χερσαίας βιόσφαιρας και παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο. Το μοντέλο χρησιμοποιεί προσεγγίσεις για την επίλυση των εξισώσεων του ισοζυγίου μεταφοράς μάζας. Ο συνολικός διασκορπισμός και η ροή μεταξύ των όγκων ελέγχου επιτρέπει απλοποίηση του προβλήματος και το αποτέλεσμα είναι μια αριθμητική λύση του συστήματος των συνηθισμένων διαφορικών εξισώσεων.

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται σχηματικά το μοντέλο του κύκλου του άνθρακα μεταξύ του αποθέματος του άνθρακα (αριθμοί μέσα στα κουτιά) και στις ροές του (αριθμοί στα βέλη). Οι μονάδες είναι τα Gt C (1×10^{12} gC) για τα αποθέματα άνθρακα και Gt C ανά έτος για τις ροές του άνθρακα. Αυτό το σχηματικό μοντέλο αποτελείται από τις μεγάλες δεξαμενές του άνθρακα: την ατμόσφαιρα, την χερσαία βιόσφαιρα και τον ωκεανό.

Η χερσαία βιόσφαιρα απαρτίζεται από τη χερσαία χλωρίδα και πανίδα (Land biota) και το έδαφος. Ο ωκεανός απαρτίζεται από το θερμό επιφανειακό νερό του ωκεανού, το κρύο επιφανειακό νερό του ωκεανού, το νερό μεσαίου και μεγάλου βάθους και δύο διαμερίσματα χλωρίδας και πανίδας του ωκεανού για θερμά και κρύα επιφανειακά νερά. Επομένως, το μοντέλο αποτελείται από οκτώ διαμερίσματα και 19 ροές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Ο πίνακας 2.1 είναι μια φυσική περιγραφή των οκτώ διαμερισμάτων. Ο όγκος της ατμόσφαιρας υπολογίζεται από τη συνολική μάζα του άνθρακα διαιρεμένη με την συγκέντρωση του άνθρακα της ατμόσφαιρας και οι επιφανειακές περιοχές της γης και ωκεανού παίρνονται από τον Medallion World Atlas. Το βάθος των ωκεάνιων επιφανειακών νερών είναι συνήθως 75-100 m και το συνολικό μέσο βάθος του ωκεανού είναι 3800m. Οι περισσότερες διεργασίες λαμβάνονται με πρώτης τάξεως κινητική εκτός από την προσρόφηση του CO από γήινη χλωρίδα και πανίδα που ακολουθεί κινητική Michelis – Menten.

Το 95% του χερσαίου βιοκόσμου είναι φυτά (π.χ. πατάτα, ρύζι, ζαχαρότευτλο, τριφύλλι, σιτάρι, κτλ. τα οποία δεσμεύουν το CO₂ μέσω του κύκλου του Calvin) και το υπόλοιπο αποτελείται από φυτά (π.χ. αραβόσιτος, σόργο, ζαχαροκάλαμο, κεχρί και τροπικό γρασίδι, τα οποία δεσμεύουν το CO₂ μέσω δικαυβοξυλικών οξέων)



Εικόνα 2.3 Παγκόσμιο απλό μοντέλο διαμερισματοποίησης για (SGCM). Οι μονάδες είναι γιγατόνοι (GT) άνθρακα σε δεξαμενές (αριθμοί μέσα σε κουτιά) και γιγατόνοι άνθρακα ανά έτος ως ροές (αριθμοί σε βέλη).

Σε αυτό το μοντέλο υποθέτουμε ότι όλα τα φυτά είναι C₃. Τα φυτά δεσμεύουν το CO₂ από την ατμόσφαιρα και το αποθηκεύουν ως οργανικό άνθρακα (φυτοσύνθεση). Αυτά επίσης απελευθερώνουν οργανικό άνθρακα με τη μορφή CO₂ (αναπνοή). Επιπλέον, ο οργανικός άνθρακας που υπάρχει στους μίσχους, στα φύλλα και στις ρίζες είναι ενσωματωμένος στο έδαφος εποχιακά και όταν τα φυτά πεθαίνουν προκύπτει νεκρή οργανική ύλη. Το αποτέλεσμα της απορρόφησης του θεωρείται ότι ακολουθεί μια κινητική έκφραση Michaelis-Menten, και η ανάδραση της θερμοκρασίας ακολουθεί μια τύπου εκθετική συνάρτηση. Έτσι, το αποτέλεσμα της προσρόφησης και εκρόφησης του από τη χερσαία χλωρίδα και πανίδα περιέχεται στην ακόλουθη έκφραση ρυθμού:

$$k = k_0 * C_{atm} / K_M + C_{atm}$$

Όπου : k: ο ρυθμός ποσότητας που απορροφάται η εκροφάται.

Μέγιστος ρυθμός της ποσότητας του CO₂ που απορροφάται ή εκροφάται.

Συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα.

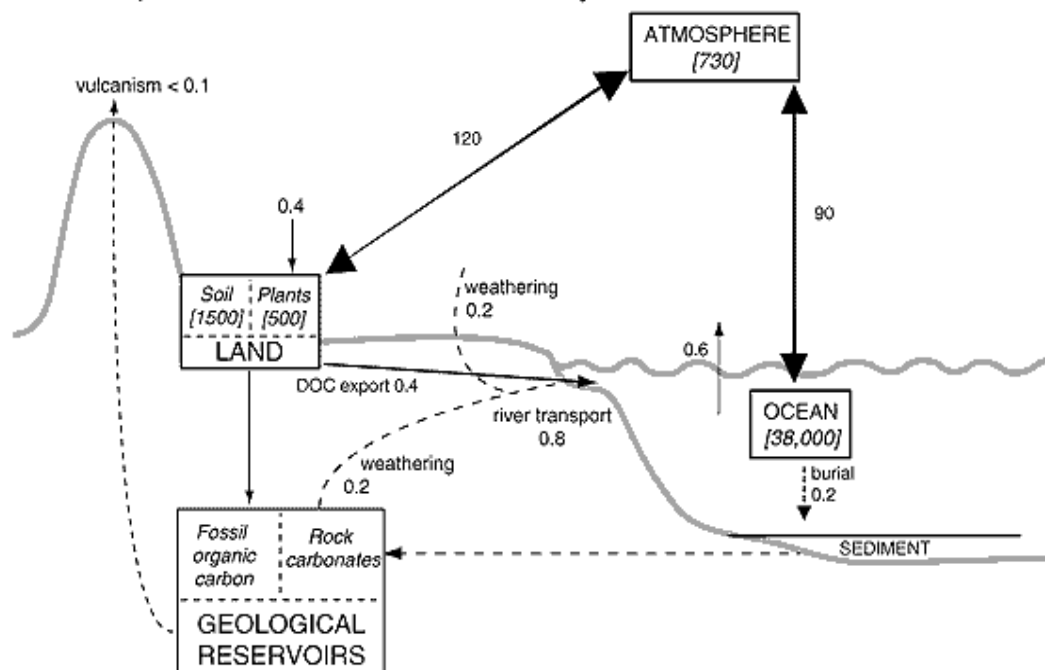
Ταχύτητα στο μισό του κορεσμού.

Περιγραφή	Μέγεθος
Όγκος της ατμόσφαιρας (V)	3.99X10
Επιφάνεια της χερσαίας πανίδας	1.33X10
Όγκος του εδάφους	6.65X10
Βάθος του επιφανειακού ωκεάνιου νερού	100 m
Μέσο βάθος του ωκεανού	3800 m
Εμβαδόν του θερμού επιφανειακού ωκεάνιου νερού	2.42X10
Όγκος του θερμού επιφανειακού ωκεάνιου νερού	2.42X10
Εμβαδόν της κρύας ωκεάνιας επιφάνειας	1.21X10
Όγκος κρύου επιφανειακού ωκεάνιου νερού	1.21X10
Εμβαδόν νερού μεσαίου και μεγάλου βάθους	3.63X10
Όγκος νερού μεσαίου και μεγάλου βάθους	1.318 10

Πίνακας 2.1 Φυσική περιγραφή: Εμβαδά και όγκοι των τμημάτων του μοντέλου.

2.5. Σχηματικά διαγράμματα των ροών του κύκλου του άνθρακα

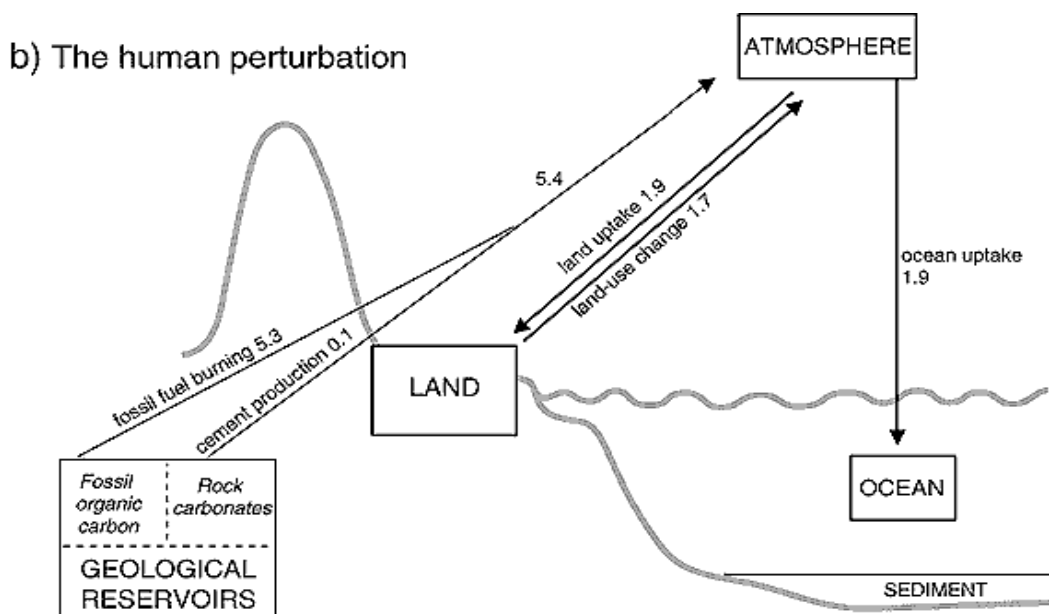
a) Main components of the natural carbon cycle



Εικόνα 2.4 α: Βασικά συστατικά του φυσικού κύκλου του άνθρακα.

Από αριστερά προς τα δεξιά: ηφαιστειότητα/ ατμόσφαιρα/ έδαφος/ φυτά/ καιρικές συνθήκες/ εξαγωγή DOC/ μεταφορά από ποτάμια/ θάλασσα/ ταφή/ καιρικές συνθήκες/ ορυκτός οργανικός άνθρακας/ ανθρακικά πετρώματα/ ίζημα

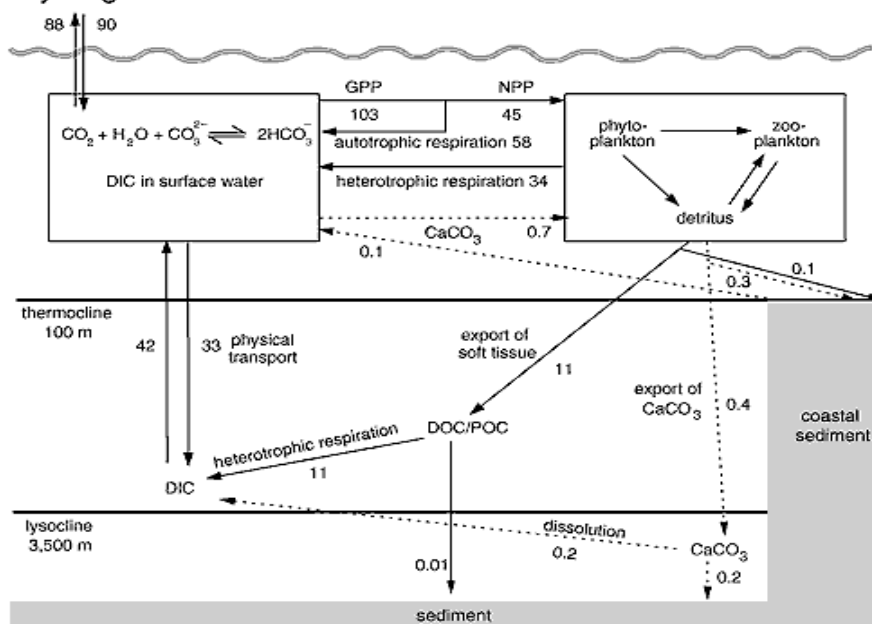
Ο παγκόσμιος κύκλος του άνθρακα: αποθήκευση (PgC) και ροή (PgC/yr), υπολογισμοί για τη δεκαετία του 1980. (α) Κύρια συστατικά του φυσικού κύκλου. Τα παχιά βέλη υποδεικνύουν τις πιο σημαντικές ροές από την άποψη της σύγχρονης ισορροπίας του CO₂ στην ατμόσφαιρα: τη μικτή πρωτογενή παραγωγή και αναπνοή από τη βιόσφαιρα της στεριάς, και τις φυσικές ανταλλαγές μεταξύ θάλασσας και ατμόσφαιρας. Οι ροές αυτές έρχονται σε σχετική ισορροπία κάθε χρόνο, όμως οι ανισορροπίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του CO₂ με την πάροδο ετών ή αιώνων. Τα λεπτά βέλη υποδεικνύουν επιπρόσθετες φυσικές ροές (διακεκομμένες γραμμές για ροή άνθρακα με τη μορφή CaCO₃), που έχουν πιο μακροπρόθεσμη σημασία. Η ροή των 0.4 PgC/yr από το ατμοσφαιρικό CO₂ στον αδρανή ορυκτό άνθρακα του εδάφους μέσω των φυτών, εξισορροπούν σε διάστημα αρκετών χιλιετιών με την εξαγωγή διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC) σε ποτάμια.



Εικόνα 2.4 β: Η ανθρωπογενής παρέμβαση

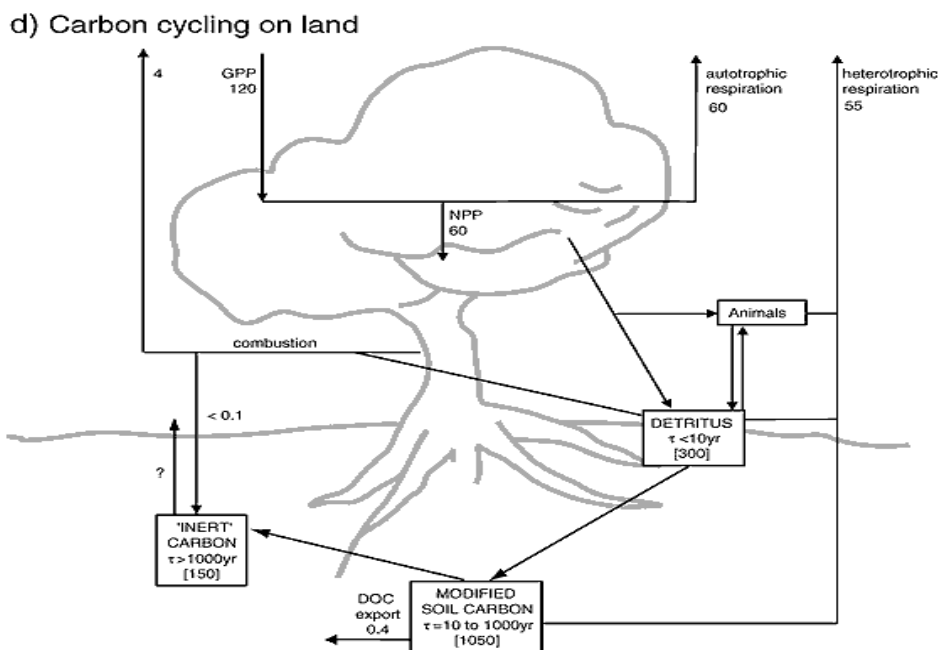
Η καύση ορυκτών καυσίμων και η αλλαγή της χρήσης της γης αποτελούν τις βασικές ανθρωπογενείς δραστηριότητες που απελευθερώνουν CO₂ στην ατμόσφαιρα. Μόνο ένα τμήμα του CO₂ αυτού παραμένει στην ατμόσφαιρα· το υπόλοιπο καταλήγει στη γη (φυτά και έδαφος) ή στη θάλασσα. Αυτά τα συστατικά εισροής CO₂ αντιπροσωπεύουν ανισορροπίες στη μεγάλη φυσική διπλή ροή ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και τη θάλασσα και ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και τη γη.

c) Carbon cycling in the ocean



Εικόνα 2.4 γ: Ο κύκλος του άνθρακα στη θάλασσα.

Το CO₂ που διαλύεται στη θάλασσα υπάρχει σε τρεις βασικές μορφές (CO₂, CO₃²⁻, HCO₃⁻, το άθροισμα των οποίων είναι το DIC). Το DIC μεταφέρεται στη θάλασσα με φυσικές και βιολογικές διαδικασίες. Η μικτή πρωτογενής παραγωγή (GPP) είναι η συνολική ποσότητα του οργανικού άνθρακα που παράγεται από τη φωτοσύνθεση. Η καθαρή πρωτογενής παραγωγή (NPP) είναι η ποσότητα που παραμένει μετά από την αυτότροφη αναπνοή, δηλαδή την αναπνοή των φωτοσυνθετικών οργανισμών. Η βύθιση του DOC και της επιμερισμένης οργανικής ύλης (POC) βιολογικής προέλευσης έχει ως αποτέλεσμα μια καθοδική ροή, που είναι γνωστή ως παραγωγή εξαγωγής. Αυτή η οργανική ύλη μεταφέρεται και αναπνέεται από μη φωτοσυνθετικούς οργανισμούς (ετερότροφοι οργανισμοί), και τελικά επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Μόνο ένα μικρό τμήμα θάβεται σε ιζήματα στα βάθη της θάλασσας. Η εξαγωγή CaCO₃ στη θάλασσα αποτελεί μικρότερη ροή από τη συνολική παραγωγή εξαγωγής (0.4 PgC/yr), όμως περίπου ο μισός άνθρακας από την ποσότητα αυτή θάβεται ως CaCO₃ σε ιζήματα, ενώ ο υπόλοιπος διαλύεται σε μεγάλο βάθος και επανεντάσσεται στο DIC. Απεικονίζονται επίσης οι εκτιμώμενες ροές για τη βραχυπρόθεσμη ταφή του οργανικού άνθρακα και το CaCO₃ σε παράκτια ιζήματα, και η επαναδιάλυση τμήματος του ταφέντος CaCO₃ από τα ιζήματα αυτά.



Εικόνα 2.4 δ: Ο χερσαίος κύκλος του άνθρακα.

Αντίθετα με τη θάλασσα, το μεγαλύτερο τμήμα του κύκλου του άνθρακα στην ξηρά λαμβάνει χώρα τοπικά, στα πλαίσια οικοσυστημάτων. Τα φυτά αναπνέουν το μισό GPP περίπου. Το υπόλοιπο (NPP) έρχεται σε σχετική ισορροπία μέσω της ετερότροφης αναπνοής, με μικρότερο στοιχείο άμεσης οξειδωσης από φωτιές (καύση). Μέσω του γεροντισμού των φυτικών ιστών, το μεγαλύτερο τμήμα του NPP μετατρέπεται σε οργανικά απόβλητα. Ένα τμήμα των αποβλήτων αποσυντίθεται (δηλ. αναπνέεται και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως CO₂ γρήγορα), ενώ ένα άλλο τμήμα μετατρέπεται σε τροποποιημένο άνθρακα εδάφους, που αποσυντίθεται πιο αργά. Το μικρό τμήμα του τροποποιημένου άνθρακα εδάφους που μετατρέπεται περαιτέρω σε ενώσεις ανθεκτικές στην αποσύνθεση, και η μικρή ποσότητα μαύρου άνθρακα που παράγεται από καύση, αποτελούν τον «αδρανή» άνθρακα. Είναι πιθανό ότι και το μεγαλύτερο μέρος αυτού του «αδρανούς» άνθρακα να καταναλώνεται από βιολογικές

διαδικασίες, όμως λίγα είναι γνωστά για τις διαδικασίες αυτές. Οι εκτιμήσεις για τις ποσότητες του άνθρακα εδάφους είναι του Batjes (1996) και ο καταμερισμός των Schimel et al. (1994) και Falloon et al. (1998). Η εκτίμηση για τη ροή καύσης είναι των Scholes & Andreae (2000). Το 't' υποδεικνύει το χρόνο μετατροπής για διαφορετικά συστατικά οργανικής ύλης του εδάφους.

3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

3.1. Εισαγωγή

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι μία χημική ένωση που αποτελείται από δύο στοιχεία, άνθρακά και οξυγόνο, σε αναλογία δύο προς ένα, η χημική του διατύπωση είναι CO_2 . Είναι απαραίτητο για το κύκλο ζωής των φυτών και των ζώων. Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης τα φυτά δεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα και απελευθερώνουν οξυγόνο.

Οι φυσικές πηγές CO_2 , όπως η ηφαιστειακή δραστηριότητα, κυριαρχούν στο γήινο κύκλο ζωής του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα έχει μια ελαφρά ενοχλητικά οσμή είναι άχρωμο και έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από τον αέρα. Παρόλο που είναι φυσικό συστατικό του αέρα σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι επικίνδυνο για την υγεία των ανθρώπων.

3.2. Φυσικές ιδιότητες

Σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος το διοξείδιο του άνθρακα είναι αέριο. Η φυσική κατάσταση του CO_2 αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες βρίσκεται. Σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι στερεό και εάν θερμανθεί κάτω από πίεση 5.1 bar θα μεταπέσει απευθείας σε αέρια κατάσταση. Σε θερμοκρασίες ανάμεσα αυτής του τριπλού σημείου (-56.5°C) και της κρίσιμης θερμοκρασίας (31.1°C), μπορεί να μετατραπεί από αέριο σε υγρό εάν συμπιεστεί στη κατάλληλη πίεση (αφαιρώντας την παραγόμενη θερμική ενέργεια). Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 31.1°C , και εάν η πίεση ξεπερνάει τα 73.9 bar, το CO_2 βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση όπου συμπεριφέρεται σαν αέριο. Κάτω από υψηλές πιέσεις η πυκνότητα του αερίου είναι πολύ μεγάλη και ξεπερνάει αυτή του νερού σε υγρή μορφή. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τις τεχνικές γεωλογικής αποθήκευσης.

Σε κάθε αλλαγή φάσης όπου το διοξείδιο του άνθρακα διαπερνά τα όρια στερεού-αερίου, στερεού-υγρού και υγρού-αερίου στο διάγραμμα φάσεων εκλύεται ή απορροφάται θερμότητα. Όμως η μετάβαση από την υπερκρίσιμη στην υγρή, και αντίστροφα φάση δεν απαιτεί ή εκλύει θερμική ενέργεια. Αυτή η ιδιότητα είναι χρήσιμη στο σχεδιασμό εγκαταστάσεων συμπίεσης, επειδή δε χρειάζεται να ληφθεί υπόψη τυχών θερμοκρασιακή αλλαγή στην υγρού-αερίου αλλαγή φάσης.

Ακολουθούν τα διαγράμματα της πυκνότητα, της τάσης ατμών, του ιξώδους, της ενθαλπίας, της διαλυτότητας και ο πίνακας των φυσικών ιδιοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ

Μοριακό βάρος	44.01
Κρίσιμη θερμοκρασία	31.1 °C
Κρίσιμη πίεσης	73.9 bar
Κρίσιμη πυκνότητα	467 kg m ⁻³
Θερμοκρασία τριπλού σημείου	-56.5 °C
Πίεση τριπλού σημείου	5.18 bar
Σημείο βρασμού(1.013 bar)	-78.5 °C

ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ

Πυκνότητα (1.013 bar)	2.814 kg m ⁻³
Πυκνότητα (Κ.Σ.) [#]	1.976 kg m ⁻³
Ειδικός όγκος (Κ.Σ.)	0.506 m ³ kg ⁻¹
C _p (Κ.Σ.)	0.0364 kJ (mol ⁻¹ K ⁻¹)
C _v (Κ.Σ.)	0.0278 kJ (mol ⁻¹ K ⁻¹)
C _p /C _v (Κ.Σ.)	1.308
Ιξώδες (Κ.Σ.)	13.72 μN.s m ⁻²
Θερμική αγωγιμότητα (Κ.Σ.)	14.65 mW (m K ⁻¹)
Διαλυτότητα στο νερό (Κ.Σ.)	1.716 vol vol ⁻¹
Ενθαλπία (Κ.Σ.)	21.34 kJ mol ⁻¹
Εντροπία (Κ.Σ.)	117.2 J mol K ⁻¹
Εντροπία σχηματισμού	213.8 J mol K ⁻¹

ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ

Τάση ατμών (σε 20 °C)	58.5 bar
Πυκνότητα (σε -20 °C και 19.7 bar)	1032 kg m ⁻³
Ιξώδες (Κ.Σ.)	99 μN.s m ⁻²

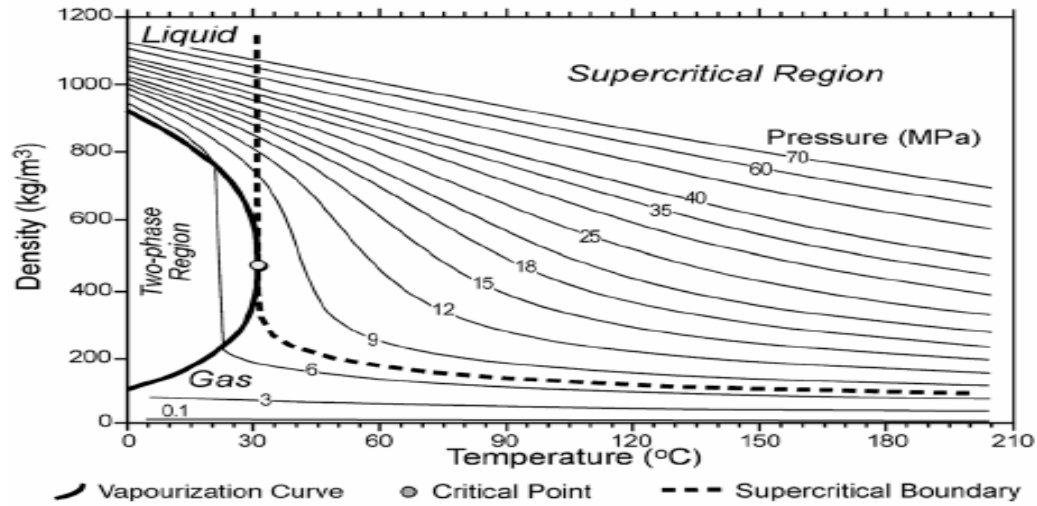
ΣΤΕΡΕΑ ΦΑΣΗ

Πυκνότητα στο σημείο πήξης	1562 kg m ⁻³
----------------------------	-------------------------

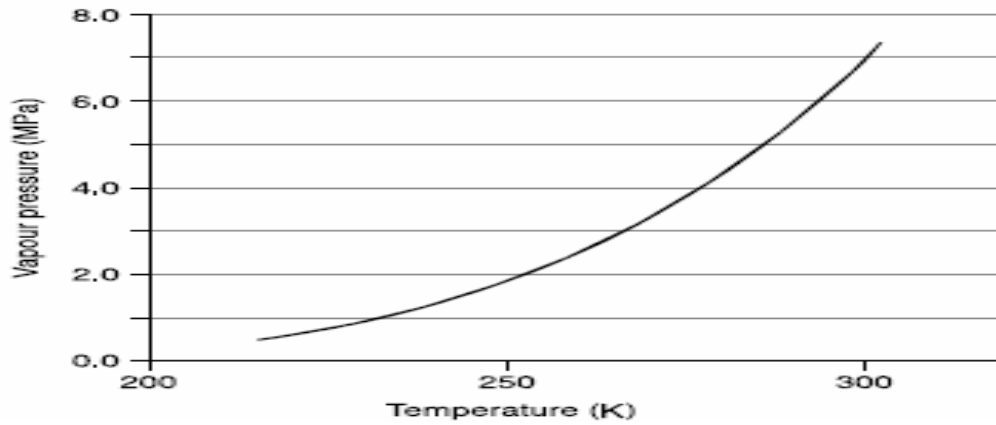
: ΚΣ (ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ) (0°C 1.013 bar.)

Πηγή Air Liquide gas data table; Kirk-Othmer (1985); NIST (2003).

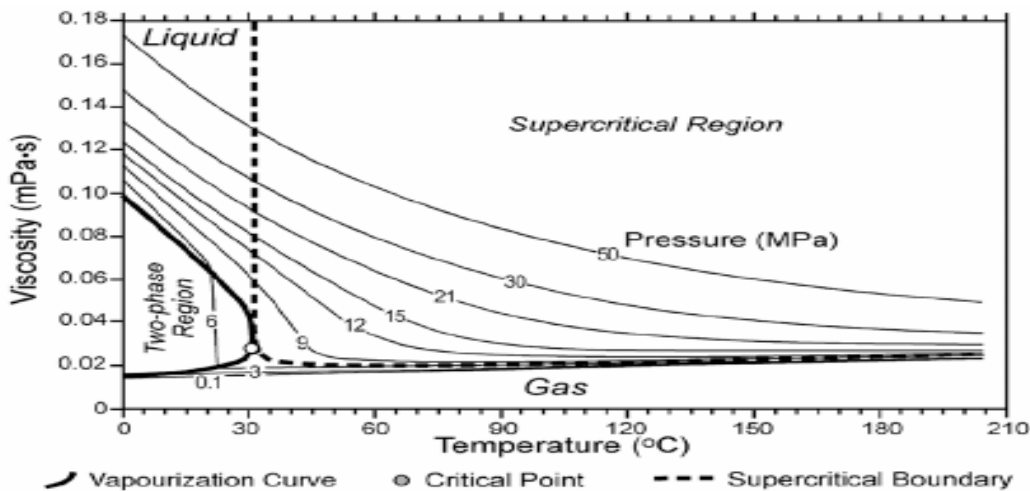
Πίνακας 3.1 Φυσικές ιδιότητες του CO₂.



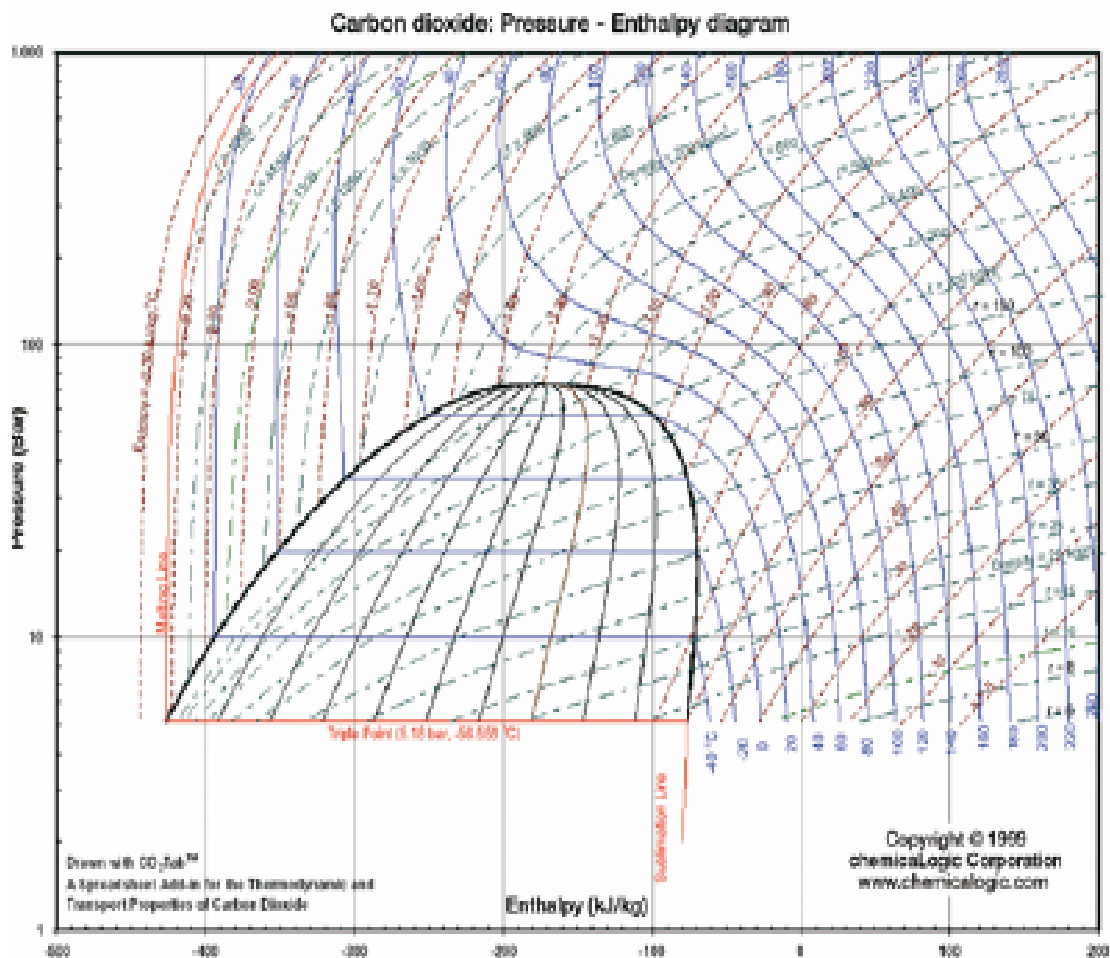
Σχήμα 3.1 Η πυκνότητα του CO₂ σε συνάρτηση με τη πίεση και τη θερμοκρασία (Bachu, 2003).



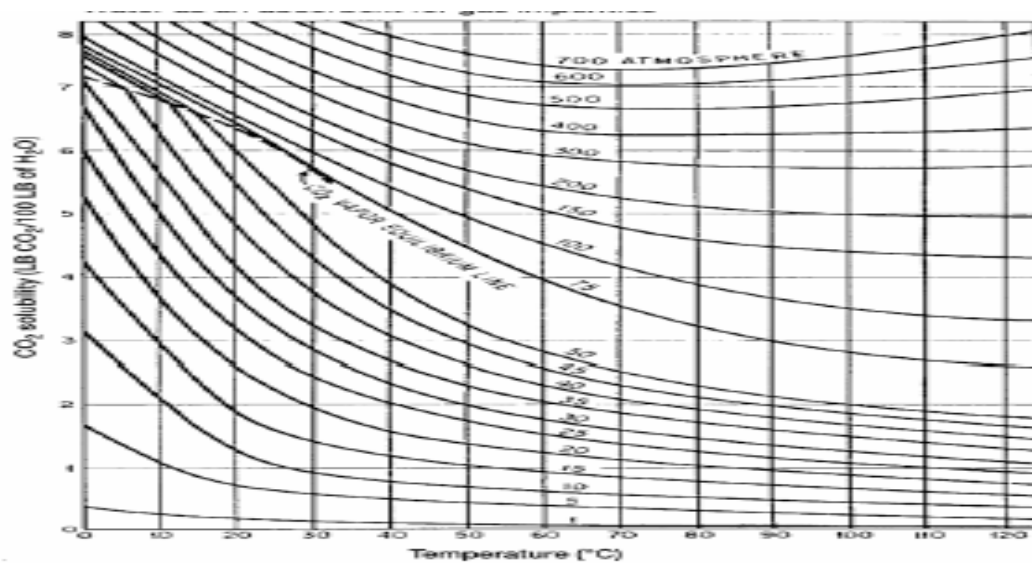
Σχήμα 3.2 Τάση ατμών σε σχέση με τη θερμοκρασία (Span and Wagner, 1996).



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση της εξάρτησης του ιξώδους σε συνάρτηση με τη πίεση και τη θερμοκρασία (Bachu, 2003).



Σχήμα 3.4 Πίνακας Πίεσης - Ενθαλπίας του CO₂. (1995-2003 ChemicalLogic Corporation, 99 South Bedford Street, Suite 207, Burlington, MA 01803 USA).



Σχήμα 3.5 Διαλυτότητα του CO₂ στο νερό (Kohl and Nielsen, 1997).

3.3. Χημικές ιδιότητες

Στο πίνακα 3.2 δίνονται ορισμένα θερμοδυναμικά δεδομένα για το διοξείδιο του άνθρακα. Σε υδατικά διαλύματα το CO₂ σχηματίζει ανθρακικό οξύ το οποίο είναι ασταθές και δεν μπορεί να απομονωθεί εύκολα. Η διαλυτότητα του CO₂ στο νερό (σχήμα α16) ελαττώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας και αυξάνεται με αύξηση της πίεσης.

Η διαλυτότητα του CO₂ ελαττώνεται επίσης με την αύξηση της αλατότητας..Η παρακάτω εμπειρική εξίσωση που ακολουθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της διαλυτότητας του CO₂ σε υφάλμυρο νερό.

$$w_{CO_2, b} = w_{CO_2, w} \cdot (1.0 - 4.893414 \cdot 10^{-2} \cdot S + 0.1302838 \cdot 10^{-2} \cdot S^2 - 0.1871199 \cdot 10^{-4} \cdot S^3)$$

όπου w_{CO_2} η διαλυτότητα του CO₂, και S η αλατότητα του νερού(% κ.β.)
τα w, b είναι το καθαρό νερό και το καθαρό άλας αντίστοιχα

Όταν υδατικά διαλύματα ψύχονται κάτω από περίπου 11⁰C σε υψηλές πιέσεις συμβαίνει ο διαχωρισμός ενός στερεού υδρίτη. Οι υδρίτες είναι κρυσταλλικές ενώσεις που αποτελούνται από τη μήτρα (νερό) και από μόρια που 'φιλοξενούνται' σε αυτήν.

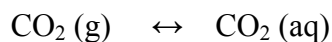
Η μήτρα σχηματίζεται από ένα τετραεδρικό πλέγμα μορίων νερού που συνδέονται μεταξύ τους με δεσμούς υδρογόνου. Το πλέγμα αυτό δημιουργεί πόρους που είναι αρκετά μεγάλοι για να περιέχουν άλλα μόρια. Τα μόρια που φιλοξενούνται μπορεί να είναι CH₄ και CO₂. Οι υδρίτες CO₂ έχουν παρόμοιες αλλά όχι ίσες ιδιότητες με του υδρίτες μεθανίου, οι οποίοι έχουν μελετηθεί εξαιτίας των επιπτώσεων που έχουν στην παραγωγή μεθανίου και την πιθανότητα χρησιμοποίησής τους σαν εναλλακτική πηγή υδρογονανθράκων.

	Ενέργεια σχηματισμού Hf° (kJ mol-1)	Ελεύθερη ενέργεια Gibbs Gf° (kJ mol-1)	Μοριακή εντροπία Sf° (J mol-1 K-1)
CO (g) .	110.53 .	137.2	197.66
CO ₂ (g) .	393.51 .	394.4	213.78
CO ₂ (l) .		38	
CO ₂ (aq) .	413.26		119.36
CO ₃ ⁻² .(aq) .	675.23		50.0
CaO (s) .	634.92		38.1
HCO ₃ (aq) .	689.93	603.3	98.4
H ₂ O (l) .	285.83		69.95
H ₂ O (g) .	241.83		188.84
CaCO ₃ (s) .	1207.6 (calcite)	1129.	191.7
	1207.8 (aragonite)	1128.2	88
MgCO ₃ (s) .	1113.28 (magnesite) .	1029.48	65.09
CH ₄ (g) .	74.4	50.3	186.3
CH ₃ OH (l) .	239.1 .	166.6	126.8
CH ₃ OH (g)	201.5 .	162.6	239.8

Πίνακας 3.2 Θερμοδυναμικά δεδομένα συστατικών που περιέχουν άνθρακα (Cox et al., 1989).

3.4. Επίδραση του CO₂ στο pH του νερού

Η διάλυση του CO₂ στο νερό (στη θάλασσα ή σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες) συνεπάγεται κάποιες ορισμένες χημικές αντιδράσεις μεταξύ του αερίου και του διαλυμένου CO₂, ανθρακικού οξέος (H₂CO³⁻) και καρβοξυλικών ιόντων (HCO₃), ανθρακικών ιόντων, (CO₃²⁻) οι οποίες είναι οι εξής.



Η προσθήκη CO₂ στο νερό αρχικά οδηγεί σε αύξηση της ποσότητας του διαλυμένου σε αυτό CO₂. Το διαλυμένο CO₂ αντιδρά με το νερό για να σχηματίσει ανθρακικό οξύ, το οποίο διασπάται σε καρβοξυλικά ιόντα τα οποία μπορεί να μετατραπούν τελικά σε ανθρακικές ρίζες. Το αποτέλεσμα της έγχυσης ανθρωπογενώς παραγόμενου CO₂ είναι η απομάκρυνση ανθρακικών ιόντων και η δημιουργία καρβοξυλικών ιόντων και η συνεπαγόμενη μείωση του pH. Η τιμή του pH στη θάλασσα στους 25°C είναι 7.8-8.1 και 8.1-8.4 στους 0°C. Η τιμή αυτή εξαρτάται κατά πολύ από την αναλογία καρβοξυλικών/ανθρακικών ιόντων. Η θερμοκρασία παίζει μικρό ρόλο στην διαμόρφωση της τιμής του pH, η πίεση έχει ανεπαίσθητη επίδραση στην τιμή του pH.

3.5. Επικινδυνότητα του CO₂

Ως φυσικό στοιχείο της ατμόσφαιρας, όπου βρίσκεται σε χαμηλή συγκέντρωση το CO₂ θεωρείται επικίνδυνο. Το CO₂ δεν είναι εύφλεκτο καθώς είναι 1.5 φορές πιο πυκνό από τον αέρα έχει την τάση σε περίπτωση διαρροής να συγκεντρώνεται σε περιορισμένους κλειστούς χώρους όπως έγκοιλα και να δημιουργεί επικίνδυνες καταστάσεις. Η επικινδυνότητα του αυξάνει λόγω του ότι είναι άχρωμο άγευστο και άοσμο (Jimenez, J. Et al, 2003).

3.6 Το ανθρωπογενές διοξείδιο του άνθρακα

Εκπομπές του CO₂ από ανθρώπινη δραστηριότητα προκύπτουν από διαφορετικές πηγές, κυρίως από την καύση των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική παραγωγή, συγκοινωνίες, βιομηχανικές διαδικασίες, κατοικημένες περιοχές και εμπορικά κτήρια. Το CO₂ εκπέμπεται επίσης κατά τη διάρκεια ορισμένων βιομηχανικών διαδικασιών όπως τη παραγωγή τσιμέντου, παραγωγή υδρογόνου και κατά τη διάρκεια της καύσης της βιομάζας.

Συνολικά, οι εκπομπές CO₂ από τη χρήση ορυκτών καυσίμων το έτος 2000 ανέρχονταν περίπου 23.5 GtCO₂ yr⁻¹ (6 GtC yr⁻¹). Από αυτό σχεδόν 60% αποδόθηκε (>0.1 MtCO₂ yr⁻¹) σε μεγάλες στάσιμες πηγές εκπομπής. Εντούτοις, δεν είναι όλες αυτές οι πηγές κατάλληλες για σύλληψη CO₂, αν και οι πηγές κατανέμονται σε όλο τον

κόσμο, η βάση δεδομένων αποκαλύπτει τέσσερις συστοιχίες εκπομπών: Βόρεια Αμερική (ανατολικές ΗΠΑ), Ευρώπη (βορειοδυτική), Ανατολική Ασία (ανατολική ακτή της Κίνας) και Νότια Ασία. Οι μεγάλης κλίμακας πηγές βιομάζας είναι πολύ μικρότερες σε αριθμό και λιγότερο διανεμημένες.

Πλέον, στη μεγάλη πλειοψηφία των μεγάλων πηγών εκπομπής οι συγκεντρώσεις του CO₂ είναι μικρότερες από 15% (σε μερικές περιπτώσεις, αρκετά μικρότερες). Εντούτοις, μια μικρή μερίδα (λιγότερο από 2%) των βιομηχανικών πηγών έχουν συγκεντρώσεις CO₂ παραπάνω από 95%. Οι πηγές είναι πρωταρχικοί υποψήφιοι για την εφαρμογή της αποθήκευσης.

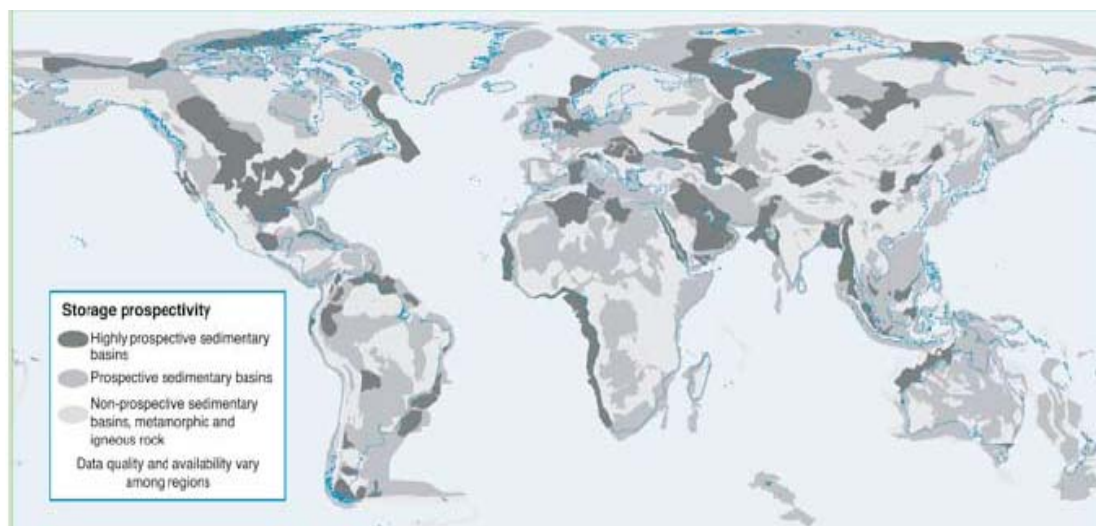
Διαδικασία	Αριθμός πηγών	Εκπομπές (Mt CO ₂ yr ⁻¹)
Ορυκτά καύσιμα		
Ενέργεια	4,942	10,539
Βιομηχανία τσιμέντου	1,175	932
Δωλιστήρια	638	798
Βιομηχανία ατσαλιού	269	646
Χημική βιομηχανία	470	379
Επεξεργασία υδρογονανθράκων		50
Άλλες πηγές	90	33
Βιομάζα		
Βιοαιθανόλη και βιοενέργεια	303	91
Σύνολο	7,887	13,466

Πίνακας 3.3 Κατανομή Παγκοσμίων πηγών εκπομπών CO₂

Η απόσταση μεταξύ μιας πηγής εκπομπής και μιας θέσης αποθήκευσης έχει σχέση με το αν μπορεί να εφαρμοστεί η αποθήκευση. Το σχήμα 3.6 απεικονίζει τις σημαντικότερες πηγές εκπομπής του CO₂ (που υποδεικνύονται από τα σημεία), και το σχήμα 3.7 παρουσιάζει ιζηματογενείς λεκάνες με δυνατότητα αποθήκευσης (που παρουσιάζονται με διαφορετικές σκιές του γκρι). Γενικά, φαίνεται ότι υπάρχει καλός συσχετισμός μεταξύ σημαντικών πηγών και ενδεχόμενες περιοχές αποθήκευσης, με πολλές πηγές είτε πάνω, είτε μέσα σε λογικές αποστάσεις (λιγότερο από 300 χλμ) από τις περιοχές με τη δυνατότητα για γεωλογική αποθήκευση. Οι λεκάνες που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.7 δεν είναι αξιολογημένες ως κατάλληλες δεξαμενές αποθήκευσης, λεπτομερής γεωλογική ανάλυση είναι απαραίτητη για το καθορισμό της καταλληλότητάς τους.



Σχήμα 3.6 Παγκόσμια διασπορά σημαντικών πηγών CO₂ (IEA GHG 2002)



Σχήμα 3.7 Προοπτική απεικόνιση ιζηματογενών λεκανών όπου κατάλληλοι για αποθήκευση σχηματισμοί, όπως αλατούχοι υδροφορείς μεγάλου βάθους, ενεργά και εξαντλημένα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου και στρώματα γαιάνθρακα, είναι πιθανόν να βρεθούν (Geoscience Australia).

3.7. Συνδυασμός πηγών CO₂ και δυνατοτήτων αποθήκευσης σε γεωλιγικούς σχηματισμούς

Για να συνδυαστούν οι πηγές CO₂ με χώρους γεωλογικής αποθήκευσης χρειάζεται λεπτομερής αξιολόγηση της ποιότητας και της ποσότητας των πηγών, της μεταφοράς, και των οικονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Αν η τοποθεσία αποθήκευσης είναι μακριά από τις πηγές του CO₂ ή χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα τεχνικής αβεβαιότητας, τότε μπορεί να μην υλοποιηθούν ποτέ οι δυνατότητες αποθήκευσης.

Ο συνδυασμός πηγών CO₂ με δυνητικούς χώρους αποθήκευσης, λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις μελλοντικής κοινωνικο-οικονομικής ανάπτυξης, θα είναι ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα για ορισμένες από τις ραγδαία αναπτυσσόμενες οικονομίες. Η αξιολόγηση των πηγών και των τοποθεσιών αποθήκευσης, μαζί με τις αριθμητικές προσομοιώσεις, την καταγραφή των εκπομπών και τον εντοπισμό οδών μεταφοράς, έχει ήδη ξεκινήσει σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης (Kaarstad, O., 2002).

Στην Ιαπωνία, έχουν γίνει μελέτες που προσομοιώνουν και βελτιστοποιούν τη σύνδεση 20 χερσαίων περιοχών με μεγάλα επίπεδα εκπομπών, με 20 τοποθεσίες αποθήκευσης, που περιλαμβάνουν τόσο θαλάσσια όσο και γεωλογική αποθήκευση. Έχουν επίσης ξεκινήσει προκαταρκτικές μελέτες στην Ινδία και την Αργεντινή. Για τις Ηνωμένες Πολιτείες, μια μελέτη που χρησιμοποίησε GIS (Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών), και ευρεία οικονομική ανάλυση, δείχνει ότι περίπου τα δύο τρίτα των σταθμών παραγωγής ενέργειας βρίσκονται κοντά σε τοποθεσίες δυνητικής γεωλογικής αποθήκευσης, τα υπόλοιπα όμως απαιτούν μεταφορά εκατοντάδων χιλιομέτρων.

Έχουν διεξαχθεί και μελέτες των ιζηματογενών λεκανών του Καναδά, που συμπεριλαμβάνουν περιγραφές των τύπων δεδομένων και διαγραμμάτων ροής της διαδικασίας αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα για την ιζηματογενή περιοχή του δυτικού Καναδά υποδεικνύουν ότι ενώ η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών πετρελαίου και φυσικού αερίου στην περιοχή ανέρχεται σε αρκετούς Gtonnes CO₂, η χωρητικότητα των βαθύτερων αλατούχων υδροφορέων είναι μεγαλύτερη κατά δύο με τρεις τάξεις μεγέθους. Οι περισσότερες περιοχές με εκπομπές CO₂ βρίσκονται σχετικά κοντά σε τοποθεσίες δυνητικής αποθήκευσης, με την εξαίρεση των εγκαταστάσεων πετρελαίου στη βορειοανατολική Αλμπέρτα (οι τρέχουσες εκπομπές CO₂ είναι περίπου 20 MtCO₂ yr⁻¹).

Στην Αυστραλία, έγινε διεξοδική μελέτη της ηπείρου για να εντοπιστεί πληθώρα τοποθεσιών γεωλογικής αποθήκευσης. Η αρχική αξιολόγηση εξέτασε 300 ιζηματογενείς λεκάνες, και κατέληξε σε 48 λεκάνες σε 65 περιοχές. Αναπτύχθηκε η κατάλληλη μεθοδολογία για την κατηγοριοποίηση των τοποθεσιών αποθήκευσης (τεχνικοί και οικονομικοί κίνδυνοι) και της εγγύτητας σε περιοχές με μεγάλες εκπομπές CO₂. Αναζητήθηκαν λύσεις που να καλύπτουν ολόκληρες περιοχές, και ενσωματώθηκε ένα οικονομικό μοντέλο ώστε να αξιολογηθούν όλες οι οικονομικές πλευρές του προγράμματος για τα επόμενα 20 με 30 χρόνια, συμπεριλαμβάνοντας το κόστος μεταφοράς, αποθήκευσης, παρακολούθησης, και ανάλυσης Monte Carlo. Η μελέτη παρήγαγε τρεις εκτιμήσεις αποθήκευσης:

- Συνολική χωρητικότητα 740 Gt CO₂, που αντιστοιχεί σε 1600 χρόνια με τα τρέχοντα επίπεδα εκπομπών, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οικονομικοί παράγοντες.
- «Ρεαλιστική» χωρητικότητα 100–115 Mt CO₂ yr⁻¹ ή 50% των ετήσιων στατικών εκπομπών, που καθορίζεται από το συνδυασμό των πηγών με τις κοντινότερες βιώσιμες τοποθεσίες αποθήκευσης, με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν οικονομικά κίνητρα για την αποθήκευση.
- Χωρητικότητα «καμπύλης κόστους» 20–180 Mt CO₂ yr⁻¹, με τάση αύξησης, ανάλογα με τις μελλοντικές τιμές του CO₂.

4. ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

4.1. Εισαγωγή

Ο διαχωρισμός και η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν σημαντικές διαδικασίες σε πολλές βιομηχανικές και όχι μόνο διαδικασίες για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους. Γενικά το κόστος του διαχωρισμού και της σύλληψης, συμπεριλαμβανομένης της κατάλληλης συμπίεσης για την αντίστοιχη τεχνική αποθήκευση, υπολογίζεται ότι θα ανέρχεται στα τρία τέταρτα του συνολικού κόστους της θαλάσσιας και γεωλογικής αποθήκευσης.

Σε ένα εργοστάσιο κονιορτοποιημένου ορυκτού άνθρακα με αποθείωση των αερίων καπνοδόχου, το κόστος εξάλειψης των εκπομπών CO₂ από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας αυξάνεται από τα \$35 στα \$264 ανά τόνο CO₂, και το ενεργειακό κόστος κυμαίνεται από τα 25 στα 215 mills/ kWh (Πρόγραμμα Αερίων Θερμοκηπίου, IEA, Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας).

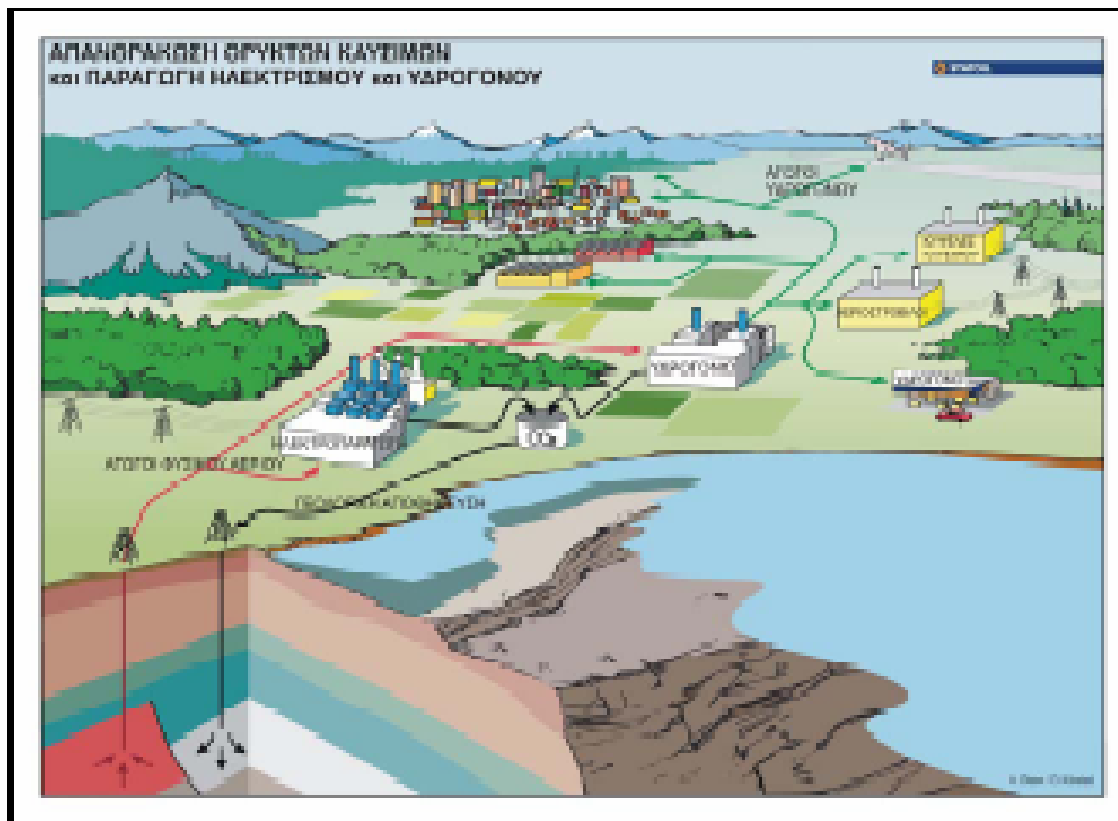
Οι διακυμάνσεις του κόστους υποδεικνύουν τις ιδιαιτερότητες των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας αλλά και το ευρύ φάσμα των τεχνολογιών του διαχωρισμού και της σύλληψης. Αν και ορισμένες δαπανηρές μέθοδοι ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν προϊόντα υψηλής τεχνολογίας, οι λιγότερο δαπανηρές προσεγγίσεις είναι λογικό να χρησιμοποιηθούν πιθανότατα από τις συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.

Οι πηγές εκπομπών που προσφέρονται περισσότερο για χρήση των τεχνολογιών διαχωρισμού και σύλληψης περιλαμβάνουν: τις μεγάλης κλίμακας παραγωγής πηγές CO₂ (όπως τις συμβατικές εγκαταστάσεις ατμού κονιορτοποιημένου άνθρακα, και τις εγκαταστάσεις μικτού κύκλου που τροφοδοτούνται με φυσικό αέριο), και τα εξελιγμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας, που συμπεριλαμβάνουν εγκαταστάσεις καύσης ορυκτού άνθρακα ή φυσικού αερίου που χρησιμοποιούν εμπλουτισμένο αέρα ή οξυγόνο για να υποστηρίξουν την καύση με ανακύκλωση του CO₂, την ενιαία εξαερίωση του ορυκτού άνθρακα (ιδίως με βάση το οξυγόνο), τους μικτούς κύκλους, τους στροβίλους υδρογόνου, και τις κυψέλες καυσίμων.

Πολλά από αυτά τα εξελιγμένα συστήματα χρησιμοποιούν εμπλουτισμένο αέρα ή οξυγόνο για να υποστηρίξουν τη διαδικασία καύσης. Η μείωση ή εξάλειψη του μεγάλου όγκου αζώτου στα αέρια της καπνοδόχου αυξάνει δραστικά τις δυνατότητες διαχωρισμού και σύλληψης CO₂ στα συστήματα αυτά. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την καύση και την επεξεργασία κυμαίνεται από την υπάρχουσα τεχνολογία (π.χ. εγκαταστάσεις ατμού με τροφοδοσία ορυκτού άνθρακα, και στροβίλοι φυσικού αερίου) μέχρι την εξελιγμένη τεχνολογία (π.χ. παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα). Οι βασικοί παράμετροι που καθορίζουν την λειτουργία ενός συστήματος διαχωρισμού CO₂ είναι :

- Ροή αερίων της καπνοδόχου. Η ροή αερίων της καπνοδόχου καθορίζει το μέγεθος του απορροφητή, ο οποίος έχει σημαντική συμβολή στο συνολικό κόστος.
- Περιεκτικότητα CO₂ στα αέρια της καπνοδόχου. Τα αέρια της καπνοδόχου είναι σε ατμοσφαιρική πίεση και η μερική πίεση του CO₂ θα κυμαίνεται από 3-15 kPa, όπου στις συνθήκες αυτές θα είναι ιδανική η χρήση αμινών ως μέσο απορρόφησης.

- Τελική απαιτούμενη περιεκτικότητα συλληφθέντος CO₂.
- Ρυθμός ροής στο μέσο απορρόφησης /προσρόφησης.
- Ενεργειακή κατανάλωση. Η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την αναγέννηση του μέσου απορρόφησης και την λειτουργία του συστήματος διαχωρισμού CO₂.



Εικόνα 4.1: Πιθανή κατάσταση στο μέλλον: τα ορυκτά καύσιμα παράγουν ηλεκτρισμό και υδρογόνο, και το CO₂ δεσμεύεται.

4.2. Εγκαταστάσεις διαχωρισμού και δέσμευσης CO₂

Εκτός από τις εγκαταστάσεις ενέργειας, πολλές άλλες βιομηχανικές πηγές με υψηλές εκπομπές CO₂ εξετάζονται ως υποψήφιες για την εφαρμογή τεχνολογιών σύλληψης και αποθήκευσης του CO₂. Στην παραγωγή φυσικού αερίου, συχνά παράγεται CO₂ ως υποπροϊόν. Το φυσικό αέριο μπορεί να περιέχει σημαντικές ποσότητες CO₂ (20% του όγκου ή και περισσότερο), το οποίο πρέπει να απομακρυνθεί ώστε να παραχθεί φυσικό αέριο υψηλής ποιότητας (Hendriks, 1994).

Επομένως, η αποθήκευση του CO₂ από επιχειρήσεις φυσικού αερίου αποτελεί ένα λογικό πρώτο βήμα εφαρμογής της τεχνολογίας δέσμευσης CO₂, όπως γίνεται στο πρόγραμμα Sleipner West στη Νορβηγία, το προτεινόμενο πρόγραμμα Natuna στην Ινδονησία, και το προτεινόμενο πρόγραμμα Gorgon στην Αυστραλία.

Άλλες σημαντικές πηγές CO₂ συμπεριλαμβάνουν: διυλιστήρια πετρελαίου, εργοστάσια σιδήρου και χάλυβα, και εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου και ασβέστη. Αν και οι πηγές αυτές αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό τμήμα των συνολικών εκπομπών CO₂, ο διαχωρισμός και η σύλληψη του CO₂ των εκπομπών

αυτών είναι εφικτοί και η συνεισφορά τους στο στόχο συνολικής μείωσης των εκπομπών CO₂ είναι σημαντική.



Εικόνα 4.2: Εγκατάσταση διαχωρισμού CO₂ που χρησιμοποιεί τη μέθοδο της χημικής απορρόφησης στη Μαλαισία.



Εικόνα 4.3: Οι εξελιγμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με τροφοδότηση ορυκτού άνθρακα, όπως το εργοστάσιο της φωτογραφίας, ένα εργοστάσιο πιλοτικής επίδειξης εξαέρωσης ορυκτού άνθρακα που καίει 800 τόνους την ημέρα, θα έχουν κατά 20 με 35% υψηλότερη αποδοτικότητα μετατροπής της ενέργειας από ότι τα συμβατικά εργοστάσια ατμού κονιορτοποιημένου άνθρακα. Τα εξελιγμένα εργοστάσια ενδείκνυνται πολύ περισσότερο για τη διαχείριση του άνθρακα από ότι τα συμβατικά εργοστάσια.

Οι διεσπαρμένες πηγές εκπομπών CO₂, όπως τα κτίρια κατοικιών και οι μηχανές πετρελαίου και ανάφλεξης με σπινθήρα των αυτοκινήτων, αποτελούν

πρόκληση ως προς την εφαρμογή οικονομικών μεθόδων διαχωρισμού και σύλληψης. Αν και το σύνολο των πηγών αυτών είναι υπολογίσιμο, δεν αποτελούν το επίκεντρο του προβλήματος. Ωστόσο, η εισαγωγή των κυψελών καυσίμων για την κίνηση των οχημάτων και την παραγωγή ενέργειας μπορεί να γίνει εφικτή στα επόμενα χρόνια και ανάλογα με το βαθμό εφαρμογής τους, η ανάγκη της χρήσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή υδρογόνου (H_2) για κυψέλες καυσίμων θα μπορούσε να έχει σημαντικό αντίκτυπο στο διαχωρισμό και τη σύλληψη του CO_2 .

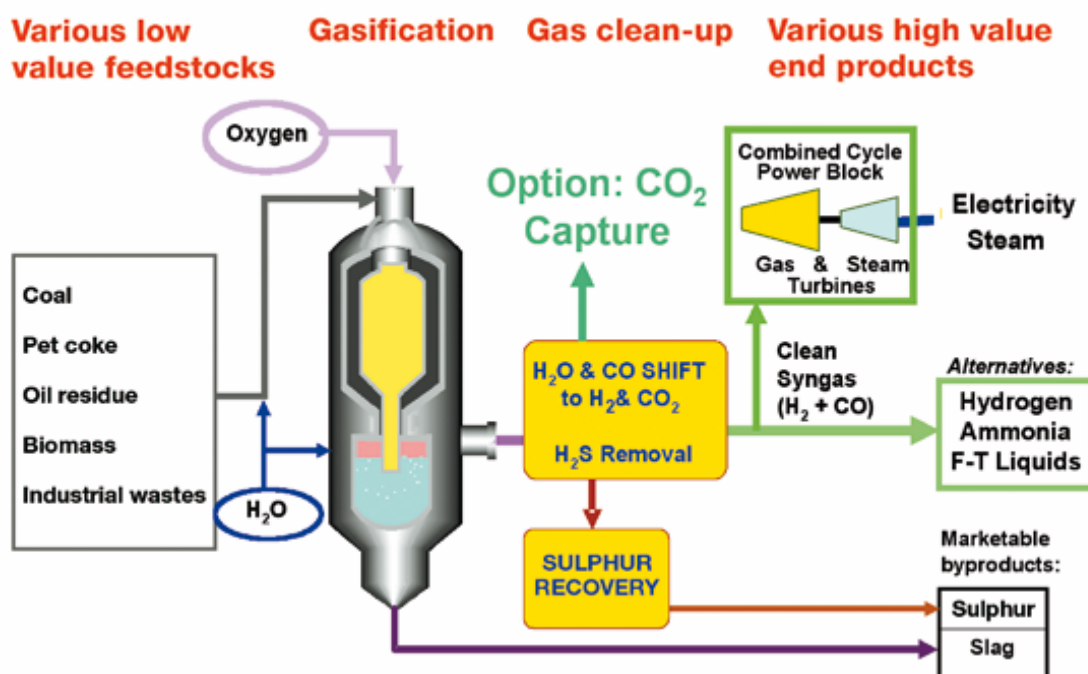
Άλλα εξελιγμένα συστήματα ενέργειας, όπως οι στρόβιλοι υδρογόνου που χρησιμοποιούν H_2 ως καύσιμο, επίσης έχουν τη δυνατότητα διαχωρισμού και σύλληψης CO_2 . Επίσης, ενδέχεται να διαδοθεί η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Εάν συμβεί αυτό, ο διαχωρισμός και η σύλληψη του CO_2 στους κεντρικούς σταθμούς ενέργειας που θα παράγουν ηλεκτρισμό για τη φόρτιση της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων θα μειώσει έμμεσα τις εκπομπές CO_2 του τομέα των μεταφορών (Hendriks, 1994).

Οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα στα ρεύματα αποβλήτων κυμαίνονται από ~5%, για τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, μέχρι το 100% σχεδόν για ορισμένες εξελιγμένες τεχνολογίες. Όλα τα ρεύματα τροφοδότησης του διαχωρισμού και της σύλληψης περιέχουν προσμίξεις, όπως οξυγόνο, οξείδια του θείου, και οξείδια του αζώτου, πτητικές και ημιπτητικές χημικές ουσίες από την καύση ορυκτών καυσίμων. Οι πιέσεις των ρευμάτων τροφοδότησης θα κυμαίνονται από την πίεση περιβάλλοντος, για τις τρέχουσες τεχνολογίες μέχρι τις πολλές δεκάδες ατμόσφαιρες, για κάποιες εξελιγμένες διαδικασίες. Οι θερμοκρασίες των ρευμάτων τροφοδότησης θα κυμαίνονται από το θερμό (~50 °C) μέχρι το υπέρθερμο(εκατοντάδες βαθμοί Κελσίου).

4.3. Διαχωρισμός και δέσμευση πριν από την καύση ορυκτών καυσίμων

Ο διαχωρισμός και δέσμευση πριν από την καύση περιλαμβάνει την αντίδραση ενός καυσίμου με οξυγόνο ή αέρα και ατμό για να δώσει syngas ή fuelgas, αέριο που αποτελείται από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με τον ατμό σε ένα αντιδραστήρα που ονομάζεται εναλλάκτης για να δώσει διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.

Το CO₂ τότε διαχωρίζεται συνήθως με τη μέθοδο της φυσικής και χημικής απορρόφησης και έχει ως αποτέλεσμα καύσιμο πλούσιο σε υδρογόνο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Η μέθοδος έχει εφαρμογή κυρίως σε εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν ενιαίο μικτό κύκλο εξαέρωσης (IGCC)⁴.



Εικόνα 4.4: Απλοποιημένο διάγραμμα διαδικασίας εξαέρωσης με επακόλουθη σύλληψη CO₂ και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χημικών προϊόντων (αμμωνία κ.α.).

4.4. Διαχωρισμός και δέσμευση μετά την καύση ορυκτών καυσίμων

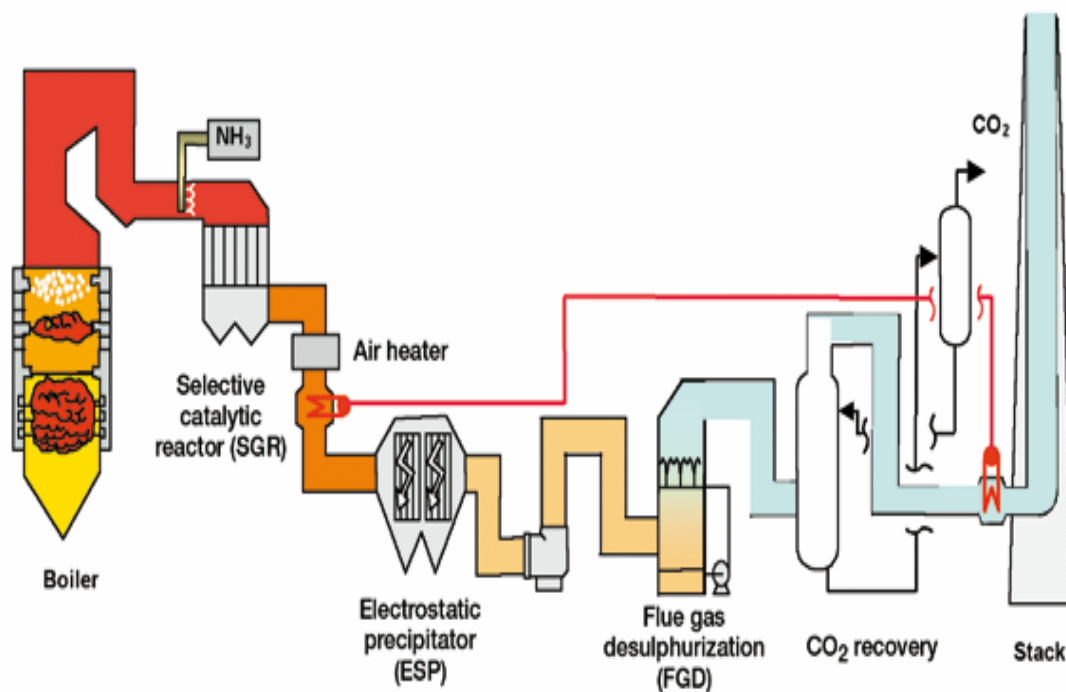
Ο διαχωρισμός και δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα από τα αέρια της καπνοδόχου της καύσης ορυκτών καυσίμων και βιομάζας, πετυχαίνει να μην διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα απευθείας, αλλά μέσω εξοπλισμού να διαχωρίζεται η κύρια ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα⁵. Το διοξείδιο του άνθρακα τροφοδοτείται σε ένα ταμιευτήρα αποθήκευσης και το υπόλοιπο ρεύμα αερίων αφήνεται στην ατμόσφαιρα. Στην συγκεκριμένη μέθοδο σύλληψης χρησιμοποιείται συνήθως

⁴“Updated Cost and Performance Estimates for Clean Coal Technologies Including CO₂ Capture–2006”, EPRI Report 1013355, March 2007.

⁵ Energy Policy Act of 2005, U.S. Department of Energy, August 2005.

διαδικασία απορρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα, όπως επίσης και άλλες τεχνικές όπου περιγράφονται παρακάτω.

Εκτός από ορισμένες βιομηχανίες, η μέθοδος χρησιμοποιείται σε εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας όπου χρησιμοποιούν εγκαταστάσεις κονιορτοποιημένου γαιάνθρακα ή εμπλουτισμένου με φυσικό αέριο γαιάνθρακα.

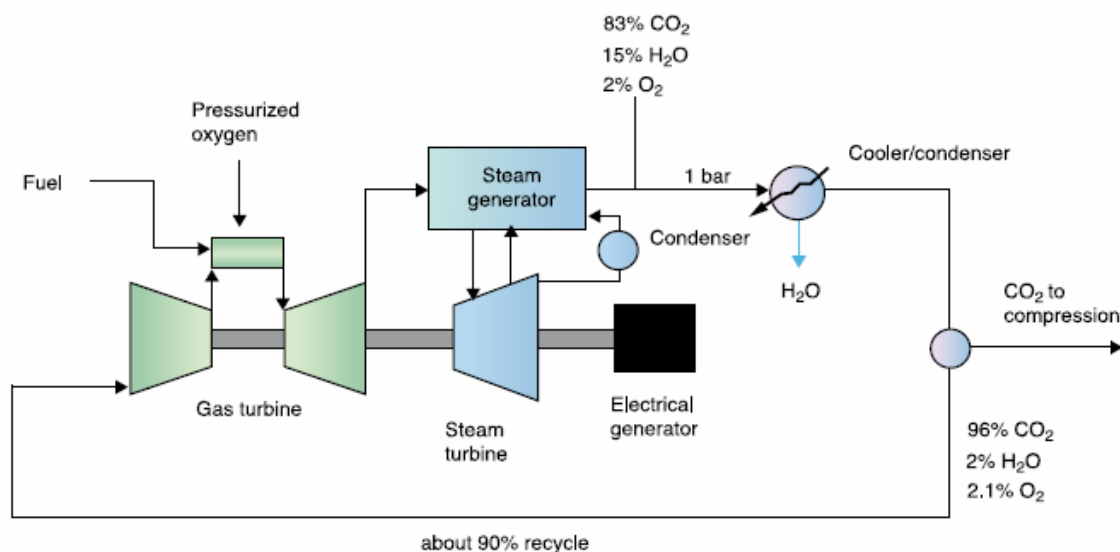


Εικόνα 4.5: Εγκατάσταση κονιορτοποιημένου άνθρακα με σύστημα σύλληψης CO₂ και ελέγχου άλλων εκπομπών αερίων.

4.5. Διαχωρισμός και δέσμευση CO₂ καύσης ορυκτών καυσίμων παρουσία οξυγόνου

Στην καύση παρουσία οξυγόνου χρησιμοποιείται σχεδόν καθαρό οξυγόνο αντί αέρα, με αποτέλεσμα τα αέρια της καπνοδόχου να περιέχουν σχεδόν εξολοκλήρου CO₂ και H₂O.

Όταν το καύσιμο καίγεται παρουσία οξυγόνου τότε η φλόγα έχει υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία αλλά τα αέρια μπορούν να ανακυκλώνονται σε συμπυκνωτή όπου τα αέρια θα ψύχονται. Οξυγόνο παράγεται από χαμηλής θερμοκρασίας διαχωρισμό αέρα, η μέθοδος χρησιμοποιείται στα εργοστάσια που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 4.5: Μικτός κύκλος καύσης παρουσία οξυγόνου. Τα καυσαέρια ανακυκλώνονται και συμπιέζονται και ύστερα ελέγχεται η θερμοκρασία τους πριν την είσοδο στο στρόβιλο.

4.6. Τεχνολογικές απαιτήσεις

Ο στόχος του διαχωρισμού και της σύλληψης του CO₂ είναι να απομονωθεί από τις πολλές πηγές του, σε μορφή κατάλληλη για μεταφορά και αποθήκευση. Η τεχνολογία που απαιτείται για να εκτελεστεί αυτή η λειτουργία εξαρτάται από τη φύση των πηγών του άνθρακα και τις μορφές του άνθρακα που είναι κατάλληλες για τη δέσμευσή του. Πολλές μορφές ενδείκνυνται για τη χρήση αυτή, συμπεριλαμβανομένου του αέριου και υπερκρίσιμου CO₂, και των ενώσεων έγκλεισης (clathrates). Είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλά ποσοστά καθαρότητας (99+%), αλλά με σημαντικό κόστος.

Οι προσμίξεις του προϊόντος πρέπει να είναι σε αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις, ώστε να μην παρεμποδίζονται οι διαδικασίες μεταφοράς και αποθήκευσης. Είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες αρχικές έρευνες για να καθοριστούν προδιαγραφές καθαρότητας. Οι προδιαγραφές τελικού προϊόντος θα αφορούν το τελικό προϊόν του διαχωρισμού και της σύλληψης, ή ένα ενδιάμεσο προϊόν που μετατρέπεται σε άλλη μορφή (π.χ. ανθρακικές ενώσεις) πριν από τη μεταφορά (Hendriks, 1994).

4.7. Τεχνολογικά μέσα διαχωρισμού και δέσμευσης

Παρακάτω γίνεται η κατηγοριοποίηση των μέσων διαχωρισμού και σύλληψης, που μπορούν να εφαρμοστούν σε ανθρωπογενείς πηγές CO₂. Όσον αφορά τις μεθόδους διαχωρισμού και σύλληψης του CO₂ που αναφέρονται, τα χαρακτηριστικά της απόδοσής τους (συμπεριλαμβανομένης της καθαρότητας του προϊόντος του CO₂ και τις συνθήκες λειτουργίας) διαφέρουν για πρακτικούς ή τεχνικούς λόγους. Τα χαρακτηριστικά αυτά οδηγούν στην αντιστοίχιση των τεχνολογιών διαχωρισμού και σύλληψης του CO₂ με τις τεχνολογίες των πηγών CO₂.

Οι επιλογές για το διαχωρισμό και τη σύλληψη του CO₂ συμπεριλαμβάνουν:

- τη χημική και φυσική απορρόφηση
- τη φυσική και χημική προσρόφηση
- την απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας
- τις μεμβράνες διαχωρισμού αερίων
- την ορυκτοποίηση και βιοορυκτοποίηση
- τη χλωρίδα

Οι επιλογές αυτές συμπεριλαμβάνονται στις πιθανές επιλογές εξαιτίας της απλότητας των διαδικασιών, του αντίκτυπου στο περιβάλλον, και για οικονομικούς λόγους. Σήμερα πολλά εργοστάσια διαχωρισμού και σύλληψης του CO₂ χρησιμοποιούν μία ή περισσότερες από τις μεθόδους αυτές για την παραγωγή CO₂ για εμπορική διάθεση στην αγορά. Ο διαχωρισμός μέσω της χλωρίδας και ορισμένες μεθόδους ορυκτοποίησης αποτελούν επίσης μεθόδους αποθήκευσης.

4.7.1 Φυσική και χημική απορρόφηση

Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να αφαιρεθεί από ρεύματα αερίων με φυσική ή χημική απορρόφηση. Οι διαδικασίες φυσικής απορρόφησης διέπονται από το νόμο του Henry (δηλαδή εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την πίεση, με την απορρόφηση να λαμβάνει χώρα σε **υψηλές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες**). Συνήθως οι διαδικασίες αυτές χρησιμοποιούνται όταν η μερική πίεση του CO₂ είναι υψηλή (>525kPa).

Η διαδικασία αφαίρεσης του CO₂ από γεωτρήσεις παραγωγής φυσικού αερίου, μέσω της χημικής απορρόφησης με τη χρήση αμινών, μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις για λόγους ασφάλειας. Σήμερα η μέθοδος αυτή αποτελεί την πιο διαδεδομένη εμπορική τεχνολογία για τη σύλληψη του CO₂. Ωστόσο σε άλλες εφαρμογές, οι τυπικοί διαλύτες για τη φυσική απορρόφηση του CO₂ συμπεριλαμβάνουν ενώσεις με βάση τη γλυκόλη (π.χ. τον διμεθυλαιθέρα της πολυαιθυλενογλυκόλης) και την κρύα μεθανόλη.

Η χημική απορρόφηση είναι η προτιμώμενη μέθοδος για χαμηλές έως μέτριες μερικές πιέσεις CO₂. Επειδή το CO₂ είναι όξινο αέριο, η χημική απορρόφηση του CO₂ από αέρια ρεύματα (όπως τα αέρια καπνοδόχου) εξαρτάται από τις αντιδράσεις εξουδετέρωσης οξέος-βάσεως με τη χρήση βασικών διαλυτών. Ο πιο διαδεδομένος διαλύτης που χρησιμοποιείται εμπορικά για την εξουδετέρωση του CO₂ είναι οι αλκανολαμίνες, όπως η μονοαιθανολαμίνη (MEA), η διαιθανολαμίνη (DEA), και η μεθυλδιαιθανολαμίνη (MDEA).

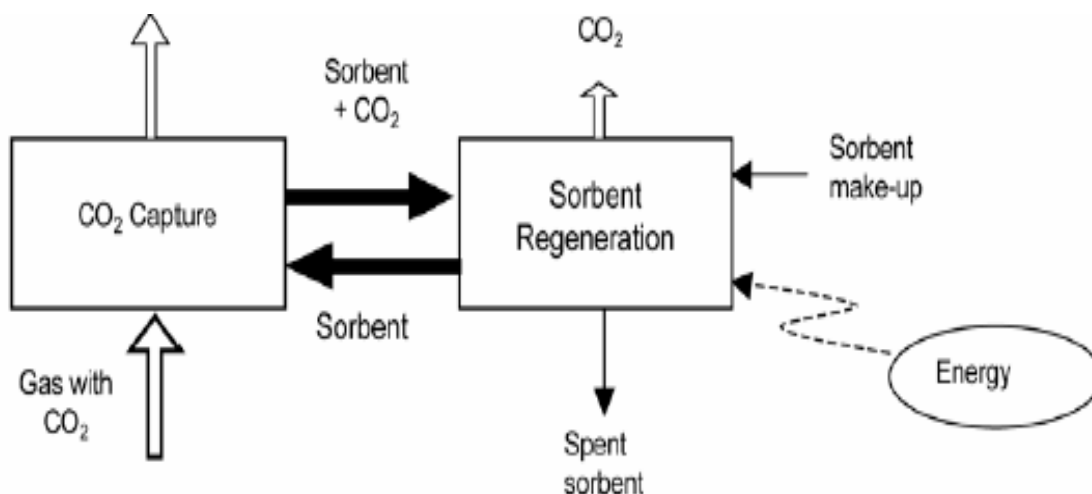
Άλλοι χημικοί διαλύτες που χρησιμοποιούνται είναι η αμμωνία και το θερμό ανθρακικό κάλιο. Τα αέρια καπνοδόχου συνήθως είναι υπό ατμοσφαιρική πίεση. Ανάλογα με την περιεκτικότητα του αερίου καπνοδόχου σε CO₂, η μερική πίεση του

CO₂ μπορεί να κυμαίνεται από τις 3,5 έως τις 21,0 kPa. Με τόσο χαμηλές μερικές πιέσεις, οι αλκανολαμίνες είναι οι καλύτεροι χημικοί διαλύτες για να διασφαλίσουμε καλά επίπεδα ανάκτησης CO₂. Ωστόσο η χρήση των χημικών αυτών πρέπει να εξισορροπεί το υψηλό ενεργειακό κόστος της αναγέννησής με ατμό.

Τα αέρια καπνοδόχου συνήθως περιέχουν προσμίξεις όπως SO_x, NO_x, O₂, υδρογονάνθρακες, και επιμερισμένα υλικά. Η παρουσία αυτών των προσμίξεων μπορεί να μειώσει τις δυνατότητες απορρόφησης των αμινών, και να δημιουργήσει λειτουργικές δυσκολίες, όπως είναι η διάβρωση. Για να αποφευχθούν αυτές οι επιπτώσεις, συχνά μειώνονται οι προσμίξεις αυτές σε αποδεκτά επίπεδα, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες τεχνικές προεπεξεργασίας. Ορισμένες τεχνικές αντιμετωπίζουν τις δυσκολίες αυτές με προεπεξεργασία ή/και χρήση χημικών παρεμποδιστών κατά τη διαδικασία της απορρόφησης.

Ορισμένα από τα συνηθισμένα λειτουργικά προβλήματα όταν χρησιμοποιούνται διάχυτες ή συμπαγείς στήλες για την επαφή υγρού-αερίου είναι ο αφρισμός, ο συμπαρασυρμός του διαλύτη από τον ατμό, και η ανάγκη συχνής ανανέωσης του διαλύτη σε μικρές ποσότητες. Ωστόσο τα προβλήματα αυτά έχουν σχετικά μικρή επίδραση στο συνολικό κόστος του συστήματος της απορρόφησης με αλκανολαμίνες.

Οι πολυμερικές μεμβράνες, έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές διατάξεις επαφής, ενδείκνυνται στις περιπτώσεις που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος και το βάρος του συστήματος (π.χ. σε θαλάσσιες πλατφόρμες). Τα οφέλη περιλαμβάνουν την εξάλειψη του αφρισμού και του συμπαρασυρμού του ατμού, αλλά και την δυνατότητα διατήρησης ανεξάρτητου ρυθμού ροής αερίων και υγρών.



Εικόνα 5.6: Η μέθοδος της χημικής απορρόφησης μέσω διαλυτών.

1. Αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα
2. Διαλύτης + CO₂ / Διαλύτης
3. Ανακύκλωση διαλύτη
4. Φυσικό αέριο + CO₂



Εικόνα 4.7: Η Πλατφόρμα Sleipner T (T από το *treatment* = επεξεργασία) στη Βόρεια Θάλασσα χρησιμοποιείται από την Statoil, τη νορβηγική εθνική εταιρεία πετρελαίου, για την απομάκρυνση του CO₂ από φυσικό αέριο κατώτερης ποιότητας

Ο επιλεκτικός διαχωρισμός του CO₂ με φυσική προσρόφηση του αερίου σε στερεά με μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας, με πολύ λεπτούς επιφανειακού πόρους, όπου χρησιμοποιούνται μέθοδοι ενεργοποίησης της επιφάνειας με ατμό, οξυγόνο ή CO₂. Ορισμένα φυσικά υλικά (π.χ. οι ζεόλιθοι)

έχουν μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας, και προσροφούν αποτελεσματικά ορισμένα αέρια.

Η χωρητικότητα και η κινητική της προσρόφησης διέπονται από πολυάριθμους παράγοντες που συμπεριλαμβάνουν

- το μέγεθος των πόρων προσρόφησης,
- τον όγκο των πόρων,
- το εμβαδόν της επιφάνειας και
- τη χημική συγγένεια του προσροφόμενου αερίου με το προσροφητικό υλικό IEA (International Energy agency 1998).

Τα συστήματα φυσικής προσρόφησης με βάση τους ζεόλιθους, λειτουργούν με προσρόφηση κυμαινόμενης πίεσης (PSA) ή με προσρόφηση κυμαινόμενης θερμοκρασίας (TSA).

Στη λειτουργία PSA, τα αέρια προσροφούνται σε υψηλές πιέσεις, απομονώνονται, και μετά εκροφούνται με μείωση της πίεσης. Μια παραλλαγή της PSA, που ονομάζεται προσρόφηση κυμαινόμενου κενού, χρησιμοποιεί έναν κύκλο εκρόφησης κενού.

Στη λειτουργία TSA, τα αέρια προσροφούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες, απομονώνονται, και μετά εκροφούνται με αύξηση της θερμοκρασίας. Οι μέθοδοι PSA και TSA αποτελούν εμπορικά διαδεδομένες τεχνολογίες διαχωρισμού και σύλληψης αερίων, και χρησιμοποιούνται σε κάποιο βαθμό στην παραγωγή υδρογόνου και στην απομάκρυνση του CO₂ από το φυσικό αέριο κατώτερης ποιότητας.

Εικόνα 4.8: Ο διαχωρισμός του CO₂ και άλλων αερίων ρύπων με τη χρήση συστημάτων προσρόφησης αποτελεί εμπορική πρακτική της παραγωγής και του καθαρισμού του υδρογόνου. Το εργοστάσιο αναμόρφωσης υδρογόνου, που απεικονίζεται στη φωτογραφία, παράγει 35 εκατομμύρια κανονικά κυβικά πόδια υδρογόνου και περίπου 9 εκατομμύρια κανονικά κυβικά πόδια CO₂ τη μέρα..



4.7.2 Απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας

Η απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας αποτελεί ευρέως διαδεδομένη εμπορικά μέθοδο για την υγροποίηση και τον καθαρισμό του CO₂ που προέρχεται από πηγές υψηλής καθαρότητας (συνήθως >90% CO₂). Στην απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας, γίνεται καθαρισμός ενός υγρού με χαμηλό σημείο ζέσεως, το οποίο εξατμίζεται και στη συνέχεια συμπυκνώνεται. Δεν χρησιμοποιούνται τέτοιες διαδικασίες για το διαχωρισμό του CO₂ από ρεύματα πτωχά σε CO₂. Η εφαρμογή της απόσταξης στον καθαρισμό πτωχών ρευμάτων CO₂ απαιτεί ψύξη χαμηλής θερμοκρασίας (<0 °C) και επεξεργασία στερεών κάτω από το τριπλό σημείο του CO₂ (-57 °C). Παράδειγμα τέτοιας διαδικασίας χαμηλής θερμοκρασίας αποτελεί η διαδικασία διαχωρισμού του CO₂ από το φυσικό αέριο που παράγει υγρό CO₂.

Η απόσταξη γενικά αποδίδει οικονομικά, καθώς έχει καλή σχέση κόστους-οφέλους σε μεγάλα εργοστάσια, και γενικά μπορεί να παράγει σχετικά καθαρό προϊόν. Η απόσταξη είναι πιο αποδοτική οικονομικά όταν τα αέρια τροφοδοσίας περιλαμβάνουν συστατικά στοιχεία με πολύ διαφορετικά σημεία ζέσεως, και όταν τα αέρια τροφοδοσίας είναι διαθέσιμα σε υψηλή πίεση και τα περισσότερα από τα προϊόντα πρέπει επίσης να έχουν υψηλή πίεση. Η απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας επιτρέπει την άμεση παραγωγή υγρού CO₂ που μπορεί να αποθηκευτεί ή να δεσμευτεί με υψηλή πίεση με υγρή άντληση.

Το βασικό μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι ότι αν υπάρχουν άλλα συστατικά με σημεία πήξης πάνω από τις κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας, πρέπει να απομακρυνθούν πριν ψυχθεί το ρεύμα του αερίου, ώστε να αποφευχθεί η πήξη και η επακόλουθη έμφραξη του λειτουργικού εξοπλισμού. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την ψύξη που είναι απαραίτητη για τη διαδικασία.

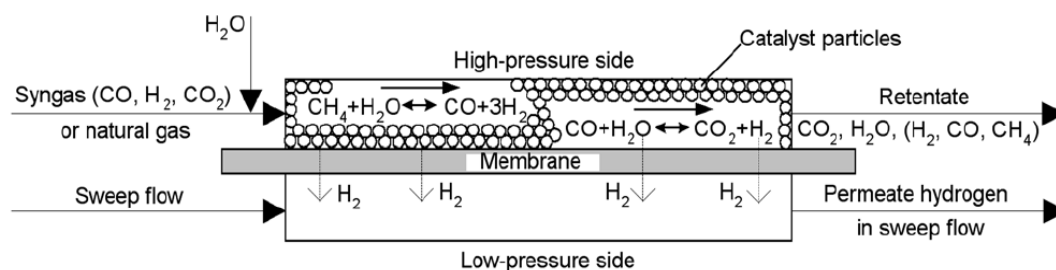
Η πλειοψηφία των εκπομπών που θεωρούνται υποψήφιες για διαδικασίες σύλληψης του CO₂ προέρχονται από καύση ορυκτών καυσίμων. Αυτά τα ρεύματα CO₂ περιέχουν νερό και άλλα ίχνη υποπροϊόντων καύσης, όπως NO_x και SO_x, πολλά από τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν πριν το ρεύμα εισαχθεί στη διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας. Τα υποπροϊόντα αυτά συνήθως παράγονται σε πίεση που πλησιάζει την ατμοσφαιρική. Οι ιδιότητες αυτές, σε συνδυασμό με τις ενεργειακές απαιτήσεις της ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας, κάνουν την απόσταξη λιγότερο οικονομική από άλλες διαδικασίες. Επομένως, αναμένεται ότι η εφαρμογή της απόσταξης χαμηλής

θερμοκρασίας θα περιοριστεί στην τροφοδότηση πηγών με υψηλή πίεση και με υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ (π.χ. γεωτρήσεις φυσικού αερίου).

4.7.3 Μεμβράνες διαχωρισμού

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη μεμβρανών διαχωρισμού αερίων, και γενικά θεωρείται ότι παρουσιάζουν πολύ καλές δυνατότητες, αν και μόνο για μερικά από τα είδη αυτά έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά τους ως προς το διαχωρισμό και τη σύλληψη του CO₂. Οι μηχανισμοί διάχυσης των μεμβρανών είναι πολυάριθμοι και παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, ανάλογα με το είδος της μεμβράνης που χρησιμοποιείται (M. Pan, Y.S. et al 2001)..

Γενικά, ο διαχωρισμός αερίου επιτυγχάνεται μέσω κάποιας αλληλεπίδρασης ανάμεσα στη μεμβράνη και το αέριο υπό διαχωρισμό. Για παράδειγμα, οι πολυμερικές μεμβράνες μεταφέρουν αέρια με έναν μηχανισμό διάλυσης-διάχυσης (δηλαδή το αέριο διαλύεται στη μεμβράνη και μεταφέρεται μέσα στη μεμβράνη με διαδικασία διάχυσης). Οι πολυμερικές μεμβράνες, αν και αποτελεσματικές, συνήθως επιτυγχάνουν χαμηλή ροή μεταφοράς αερίου, και υπόκεινται σε υποβάθμιση. Ωστόσο, οι πολυμερικές μεμβράνες δεν είναι δαπανηρές και μπορούν να επιτύχουν υψηλή αναλογία εμβαδού της μεμβράνης ανά όγκο του υλικού (E. Kikuchi, 2000).



Εικόνα 4.9: Η λειτουργία της μεμβράνης διαχωρισμού

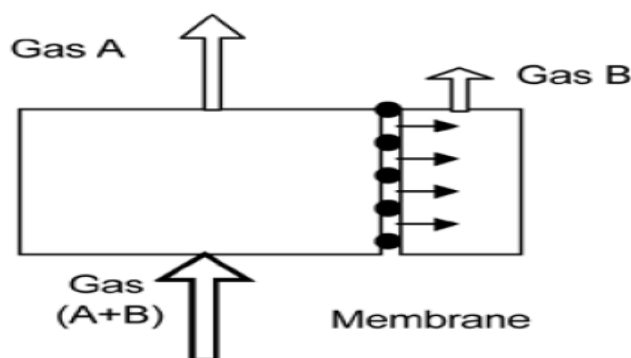
Οι μεμβράνες παλλάδιου είναι αποτελεσματικές στο διαχωρισμό του H₂ από το CO₂, όμως οι ροές των αερίων είναι συνήθως πολύ χαμηλές, και το παλλάδιο υπόκειται σε υποβάθμιση σε περιβάλλοντα που περιέχουν θείο. Οι πορώδεις ανόργανες μεμβράνες, μεταλλικές ή κεραμικές, αποτελούν ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή, εξαιτίας της πληθώρας των μηχανισμών μεταφοράς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μεγιστοποιηθεί ο παράγοντας διαχωρισμού για το διαχωρισμό διαφόρων αερίων.

Οι πορώδεις ανόργανες μεμβράνες μπορούν να είναι 100 με 10.000 φορές πιο διαπερατές από τις πολυμερικές μεμβράνες. (Η διαπερατότητα ορίζεται από τον όγκο του αερίου που μεταφέρεται μέσα από τη μεμβράνη ανά μονάδα εμβαδού ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα διαφορικής πίεσης) (E. Kikuchi, 2000).

Ωστόσο το κόστος των ανόργανων μεμβρανών είναι υψηλό, και η αναλογία εμβαδού της μεμβράνης ανά όγκο υλικού είναι 100 με 1.000 φορές μικρότερη από εκείνη των πολυμερικών μεμβρανών. Οι παράγοντες αυτοί τείνουν να εξισορροπούν το κόστος των υλικών μεμβράνης. Γενικά αναμένεται ότι ο κύκλος ζωής των ανόργανων μεμβρανών θα έχει πολύ μεγαλύτερη διάρκεια. Οι ανόργανες μεμβράνες μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και σε περιβάλλοντα υψηλής διάβρωσης, και πάλι έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Επίσης, έχουν μικρότερη τάση για επικαθίσεις, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές για τις οποίες δεν ενδείκνυνται οι πολυμερικές μεμβράνες.

Χρησιμοποιούνται επίσης υλικά τύπου ζεόλιθου, με στόχο την κατασκευή μιας μεμβράνης με χαρακτηριστικά μοριακού κόσκινου. Ωστόσο, η διαπερατότητα των μεμβρανών αυτών τείνει να είναι αισθητά χαμηλότερη από την επιθυμητή. Οι μεμβράνες αυτές έχουν υψηλό κόστος, γιατί οι μέθοδοι παραγωγής τους είναι δαπανηρές. Μπορούν να κατασκευαστούν μεμβράνες με λειτουργική διάμετρο πόρων από 0,5 nm μέχρι όσο μεγάλη επιθυμούμε. Οι μεμβράνες μπορούν να κατασκευαστούν από μεγάλο φάσμα υλικών, μεγέθους των πόρων για να βελτιωθούν οι παράγοντες διαπερατότητας και διαχωρισμού (M. Pan, Y.S. et al 2001).

Χρειάζονται μεγάλοι παράγοντες διαχωρισμού για τα επιθυμητά αποτελέσματα σε ένα μόνο στάδιο. Οι ανόργανες μεμβράνες μπορούν να κατασκευαστούν έτσι ώστε να διαχωρίζουν τα μικρά μόρια από τα μεγαλύτερα μόρια (μοριακό κόσκινο) ή ώστε να διαχωρίζουν ορισμένα μεγάλα μόρια από τα μικρότερα μόρια (βελτιωμένη ροή επιφάνειας). Αυτό είναι σημαντικό επειδή επιτρέπει το διαχωρισμό που διατηρεί το επιθυμητό αέριο στην πλευρά υψηλής πίεσης ή την πλευρά χαμηλής πίεσης της μεμβράνης. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι οι συνθήκες λειτουργίας παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της αλλαγής του τμήματος των μορίων που διαχέονται στη μεμβράνη και της ποσότητας του επιθυμητού αερίου που μπορεί να ανακτηθεί (συλληφθεί). Πρέπει να υπάρχουν βαθμίδες μερικής πίεσης του επιθυμητού αερίου στην έκταση της μεμβράνης, ώστε να επιτευχθεί η ροή του αερίου αυτού μέσα στη μεμβράνη (M. Pan, Y.S. et al 2001).



Εικόνα 4.10: Μέθοδος διαχωρισμού μέσω μεμβρανών:
Αέριο A -- Αέριο B -- Αέριο (A+B) – Μεμβράνη

4.8. Εξελιγμένες τεχνικές δέσμμευσης

Υπάρχουν εξελιγμένες τεχνικές που έχουν εντοπιστεί ή και υποστηριχθεί ως σημαντικές για το διαχωρισμό και τη σύλληψη του CO₂. Σε μια τέτοια εξελιγμένη τεχνική, αέρια που περιέχουν CO₂ διαλύονται σε νερό, και στη συνέχεια δημιουργούνται σχηματισμοί υδριτών CO₂, στους οποίους το CO₂ είναι παγιδευμένο σε ένα κρυσταλλικό στερεό που μοιάζει με πάγο. Η διαδικασία αυτή απαιτεί τα αέρια να είναι σε θερμοκρασία 0 °C και σε πίεση 1-7 Μρα, ανάλογα με τα άλλα αέρια που είναι παρόντα, και με τη μερική πίεση του CO₂ στο ρεύμα των αερίων (M.Bracht, 1997). Η δημιουργία σχηματισμών υδριτών CO₂ μπορεί να προσφέρεται ιδιαίτερα για την απομάκρυνση του CO₂ από ρεύματα αερίου υπό πίεση, με ελάχιστες απώλειες ενέργειας.

Μια άλλη εξελιγμένη προσέγγιση, που ονομάζεται προσρόφηση κυμαινόμενου ηλεκτρισμού (ESA), επιλύει πολλά από τα προβλήματα των συστημάτων PSA και TSA, χρησιμοποιώντας μια νέα ίνα άνθρακα, που ενεργοποιείται με δεσμούς άνθρακα,

ως υλικό προσρόφησης. Οι συνθήκες ενεργοποίησης αυτών των προσροφητικών υλικών μπορούν να μεταβάλλονται, για να αυξηθεί ή να μειωθεί το εμβαδόν επιφάνειας και το μέγεθος και ο όγκος των πόρων, ώστε να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της ίνας άνθρακα ως υλικού που προσροφά CO₂.

Το υλικό αυτό επιδεικνύει επίσης μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα, γεγονός που σημαίνει ότι τα προσροφημένα αέρια μπορούν να εκροφηθούν γρήγορα, αποδοτικά και αποτελεσματικά, εάν περάσει ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης μέσα από το υλικό. Αυτή η διαδικασία προσρόφησης-εκρόφησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς αλλαγή της πίεσης του συστήματος, και με ελάχιστη αλλαγή της θερμοκρασίας του συστήματος. Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την προσρόφηση είναι περίπου ίση με τη θερμότητα προσρόφησης του προσροφόμενου αερίου. Επομένως η διαδικασία ESA είναι πολλά υποσχόμενη ως οικονομική και ενεργειακά αποδοτική μέθοδος διαχωρισμού και σύλληψης αερίων⁶.

Μια άλλη νέα τεχνολογία ονομάζεται «χημική καύση με βρόγχους» ή «μεταφορά ενέργειας ροφητή». Στη διαδικασία αυτή, το ορυκτό καύσιμο (εξαεριωμένος ορυκτός άνθρακας ή φυσικό αέριο) μεταφέρει την ενέργειά του για να αναγάγει ένα οξείδιο μετάλλου, παράγοντας ατμό και CO₂ υπό πίεση, που μπορεί να δεσμευτεί με ελάχιστη επιπλέον ενέργεια συμπίεσης. Ο ατμός διοχετεύεται σε στρόβιλο ατμού για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Στη συνέχεια το μέταλλο επανοξειδώνεται στον αέρα, παράγοντας θερμότητα που ανεβάζει τη θερμοκρασία ενός υψηλής πίεσης ρεύματος αέρα ή αζώτου, τροφοδοτώντας ένα στρόβιλο ατμού για την παραγωγή επιπλέον ηλεκτρισμού. Το οξειδωμένο μέταλλο διοχετεύεται στο δοχείο αναγωγής για να επαναληφθεί ο κύκλος. Τα εμπόδια για την ανάπτυξη οποιουδήποτε νέου συστήματος καύσης είναι πολυάριθμα, γεγονός που ισχύει ακόμα και για τη συμβατική καύση ορυκτού άνθρακα με οξυγόνο αντί για αέρα, και με ανακύκλωση του CO₂⁷.

⁶Next Generation Nuclear Plant (NGNP), Nuclear Energy Research Initiative, U.S. Department of Energy, <http://nuclear.energy.gov/neri/neNERIresearch.html>

⁷Next Generation Nuclear Plant (NGNP), Nuclear Energy Research Initiative, U.S. Department of Energy, <http://nuclear.energy.gov/neri/neNERIresearch.html>

4.9. Κενά επιστήμης και τεχνολογίας

Παρακάτω παρατίθενται συγκεκριμένες ανάγκες έρευνας για τη βελτιστοποίηση μεθόδων δέσμευσης.

4.9.1. Φυσική και χημική απορρόφηση

- Πρέπει να αναπτυχθούν αρκετά οι μεμβράνες επαφής, ώστε να βελτιωθεί η χημική τους συμβατότητα με τις αλκανολαμίνες και η αντίστασή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και να μειωθεί το κόστος τους.
- Οι εμπορικά διαθέσιμες αλκανολαμίνες όπως οι MEA, DEA, και MDEA επιδεικνύουν διαφορετικό κόστος, ρυθμό αντίδρασης με το CO₂, δυνατότητες απορρόφησης και ρυθμό διάβρωσης. Υπάρχει η ευκαιρία να βελτιστοποιηθούν οι υπάρχοντες διαλύτες ή να αναπτυχθούν νέοι διαλύτες ώστε να μειώσουν το συνολικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας.
- Είναι πιθανό ότι οι νέοι διαλύτες και τα νέα στοιχεία του συστήματος να μειώσουν το κόστος κεφαλαίου και ενέργειας της επεξεργασίας των αερίων καπνοδόχου για το διαχωρισμό και τη σύλληψη του CO₂. Οπότε πρέπει να εντοπιστούν οι καλύτεροι δυνατοί συνδυασμοί διαδικασιών και εξοπλισμού, ιδίως όσον αφορά το κόστος και την απλότητα των διαδικασιών.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον επιδεικνύει η έννοια της αναδρομικής τροποποίησης των συμβατικών καυστήρων κονιορτοποιημένου άνθρακα, ώστε να γίνουν κατάλληλοι για την ανακύκλωση του CO₂ και να μπορούν να αυξάνουν τις συγκεντρώσεις του CO₂ τόσο ώστε η ανάκτησή του να γίνεται οικονομικά εφικτή.
- Είναι απαραίτητη η μοριακή εξομοίωση της διαδικασίας απορρόφησης, για να υποβοηθήσει την επιλογή του απορροφητικού υλικού.
- Είναι απαραίτητη η κινητική εξομοίωση για να καθοριστούν ή να επαληθευτούν τα βήματα που περιορίζουν το ρυθμό της διαδικασίας απορρόφησης.
- Η σύνθεση των απορροφητικών υλικών που βασίζεται εν μέρει στη μοριακή και κινητική εξομοίωση.
- Τα συστήματα που χρησιμοποιούν αέρα για να υποστηρίξουν την καύση επιδεικνύουν δυσκολίες στο διαχωρισμό και τη σύλληψη του CO₂, εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας (~80%) αζώτου στο ρεύμα επεξεργασίας. Τα εργοστάσια ενιαίου μικτού κύκλου εξαέρωσης ορυκτού άνθρακα (IGCC) θα μπορούσαν να προσφέρουν την ιδανική ευκαιρία για σύλληψη CO₂, όταν χρησιμοποιείται οξυγόνο και όχι αέρας για την υποστήριξη της διαδικασίας εξαέρωσης. Στους μικτούς κύκλους, που περιλαμβάνουν στροβίλους αερίου και στροβίλους ατμού, τα υπέρθερμα καυσαέρια των στροβίλων αερίου χρησιμοποιούνται για να παράγουν ατμό για τους στροβίλους ατμού. Το φυσικό αέριο των στροβίλων αερίου προέρχεται από τον ορυκτό άνθρακα και παράγεται σε μορφή υψηλής συγκέντρωσης και πίεσης. Η μορφή αυτή επιτρέπει τη χρήση πληθώρας διαλυτών, που μπορούν να συλλάβουν το CO₂ από το ρεύμα του αερίου πριν από την καύση, η οποία μπορεί να γίνεται και με οξυγόνο αντί για αέρα.
- Πρέπει να δημιουργηθούν νέες διατάξεις επαφής αερίου/υγρού, για να ελαχιστοποιηθούν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας στο διαχωρισμό αερίων. Οι επαφές αυτές θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν τη λεγόμενη «δομημένη αποθήκευση» ή ακόμα και τους «αντιδραστήρες

μικροκαναλιών». Χρησιμοποιώντας υλικό μικροκαναλιών, θα μπορεί να αναπτύχθουν συμπαγή και αποδοτικά συστήματα απορρόφησης, τα οποία θα είχαν έναν απορροφητή, για την ανταλλαγή της θερμότητας και έναν εκροφητή. Επειδή οι διαστάσεις των καναλιών μετρώνται σε μικρομέτρα, τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας είναι περιορισμένα. Η ισοθερμική λειτουργία θα είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες δυνατότητες απορρόφησης. Οι τεχνικές προκλήσεις των αντιδραστήρων μικροκαναλιών θα είναι ο περιορισμός του κόστους, η αποφυγή της έμφραξης, και η επεξεργασία μεγάλης ποσότητας υλικού. Άλλα δυνητικά προβλήματα περιλαμβάνουν την αλλαγή κλίμακας, τη διάβρωση, και τη μεταφορά των διαλυτών.

4.9.2. Φυσική και χημική προσρόφηση

- Υλικά προσρόφησης που να μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και με την παρουσία ατμού, κάτι που έχει ήδη δρομολογηθεί.
- Σύνθεση προσροφητικών υλικών, ώστε να έχουν αυξημένη ικανότητα προσρόφησης και βελτιωμένη κινητική, και να μπορούν να παράγουν καθαρό προϊόν CO₂, αλλά και βελτίωση των μεθόδων με τις οποίες μπορούμε να επιδράσουμε πάνω στη διαδικασία προσρόφησης-εκρόφησης.
- Είναι απαραίτητη η μοριακή εξομοίωση των προσροφητικών υλικών, για να εντοπιστούν τα προσροφητικά υλικά που ενδείκνυνται για το CO₂.
- Κινητική εξομοίωση για να καθοριστούν τα βήματα που περιορίζουν το ρυθμό της διαδικασίας, και για να γίνει πιο συγκεκριμένη η ανάπτυξη προσροφητικών υλικών.
- Νέα υλικά προσρόφησης, ανθεκτικά στον ατμό και τις υψηλές θερμοκρασίες, και να τα συνδυάσουμε με νέες τεχνικές επεξεργασίας. Αντίθετα με τους ζεόλιθους και με άλλους ανόργανους προσροφητές, αυτά τα ροφητικά υλικά θα μπορούσαν να προσροφήσουν CO₂ παρουσία ατμού. Ο προσροφητής θα μπορούσε να αναγεννηθεί με χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας. Η αναγέννηση αυτή θα εξάλειφε τα προβλήματα χειρισμού των υλικών που αντιμετωπίζουμε όταν χρησιμοποιούμε μη αναγεννήσιμα φυσικά ορυκτά. Πρέπει ακόμα να αποδειχθεί η σταθερότητα του ροφητή σε χιλιάδες κύκλους επεξεργασίας.
- Νέες τεχνικές προσρόφησης για το διαχωρισμό και τη σύλληψη του CO₂. Προσροφητικά υλικά που να μπορούν να προσροφούν σε υψηλές θερμοκρασίες και να εκροφούν με νέες τεχνικές, θα βελτιωνόταν σημαντικά η ικανότητά μας να ελέγχουμε τις εκπομπές CO₂ από συστήματα ενέργειας που τροφοδοτούνται με ορυκτά καύσιμα.

4.9.3 Απόσταση χαμηλής θερμοκρασίας

- Χρειάζεται ανάπτυξη του κύκλου επεξεργασίας και μελέτες ενοποίησης των διαδικασιών για συγκεκριμένες εφαρμογές.
- Η ένταξη της απόσταξης χαμηλής θερμοκρασίας σε διαδικασίες αποθήκευσης και η ανάπτυξη νέων και αποδοτικών κύκλων ψύξης μπορεί να οδηγήσει σε ανταγωνιστικές διαδικασίες απόσταξης χαμηλής θερμοκρασίας.

4.9.4. Μεμβράνες διαχωρισμού

- Αλλαγή των συστατικών του πολυμερούς, για να αυξηθεί ο ρυθμός διάλυσης και διάχυσης των συστατικών του επιθυμητού αερίου.
- Υπάρχει ένα προφανές όριο στην αποδοτικότητα των πολυμερικών μεμβρανών. Η σύνθεση του πολυμερούς μπορεί να μεταβληθεί για να αυξηθεί η διαπερατότητα της μεμβράνης, κάτι που πάντα μειώνει τον διαχωρισμό. Ισχύει και το αντίστροφο: η μεταβολή της σύνθεσης με στόχο την αύξηση του παράγοντα διαχωρισμού μειώνει τη διαπερατότητα της μεμβράνης.
- Μοριακή εξομοίωση, για να καθοριστούν οι δυνατότητες των μεμβρανών ως προς το διαχωρισμό του CO₂.
- Κινητική εξομοίωση για να καθοριστεί η δυναμική ροή αερίων σε συστήματα μεμβρανών.
- Νέες μέθοδοι σύνθεσης μεμβρανών.
- Νέες συσκευές μεμβρανών με βάση το παλλάδιο, οι οποίες να αναμορφώνουν τα καύσιμα υδρογονανθράκων σε μίγματα υδρογόνου και CO₂, και οι οποίες ταυτόχρονα να διαχωρίζουν το υψηλής αξίας υδρογόνο. Το υπόλοιπο αέριο, κυρίως CO₂, θα ανακτάται σε συμπιεσμένη μορφή. Το υδρογόνο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικά συστήματα καυσίμων κυψελών ή σε εξελιγμένα ενεργειακά συστήματα με στροβίλους. Όταν το καθαρό υδρογόνο καίγεται για την παραγωγή ενέργειας, οι υδρατμοί είναι το μόνο προϊόν της καύσης (M. Pan, Y.S. et al 2001).

4.9.5. Επεξεργασία και μετατροπή του προϊόντος

Οι ιδιότητες του CO₂, δηλαδή οι συγκεντρώσεις, οι προσμίξεις, η πίεση, και η θερμοκρασία του, θα διαφέρουν ανάλογα με το συνδυασμό των πηγών και των μεθόδων διαχωρισμού και σύλληψης που χρησιμοποιήθηκαν. Για παράδειγμα, οι διαδικασίες απορρόφησης μπορούν να μεταβληθούν ώστε να παράγουν ρεύματα CO₂ υψηλής καθαρότητας, και τα ρεύματα αυτά συνήθως έχουν την ίδια πίεση με την πηγή. Για τις επιλογές στις οποίες ο άνθρακας δεσμεύεται ως CO₂, το CO₂ θα υποστεί επεξεργασία καθαρισμού και θα τεθεί υπό πίεση, όπως απαιτείται για τη μεταφορά και τη δέσμευσή του.

Το προϊόν του CO₂ μπορεί να παράγεται σε καθαρότητα 90% με 99+%, σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από την κρυστατική έως τη θερμοκρασία αρκετών εκατοντάδων βαθμών Κελσίου, και σε πιέσεις που κυμαίνονται από την ατμοσφαιρική έως την πίεση που υπερβαίνει τις 3,5 Μρα. Επίσης, ενδέχεται να είναι απαραίτητες άλλες μορφές του άνθρακα (και όχι CO₂) για ορισμένες από τις επιλογές αποθήκευσης. Χρειάζεται ανάλυση ως:

- την ανάλυση του πλήρους κύκλου της επεξεργασίας και μετατροπής του προϊόντος, ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές της μεταφοράς και της αποθήκευσης,
- τη μετατροπή του CO₂ στην απαιτούμενη μορφή για την αντίστοιχη επιλογή αποθήκευσης, και
- την επεξεργασία της πληθώρας των υποπροϊόντων που ενδέχεται να παραχθούν κατά τη μετατροπή του CO₂ σε άλλα προϊόντα.

5. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

5.1. Μεταφορά από αγωγούς

Το CO₂ μεταφέρεται σε τρεις φάσεις: αέριο, υγρό και στερεό. Στην εμπορικής κλίμακας μεταφορά χρησιμοποιούνται αποθηκευτικές μονάδες, αγωγοί και πλοία για το αέριο και υγρό διοξείδιο του άνθρακα. Το αέριο καταλαμβάνει λιγότερο όγκο εάν συμπιεστεί. Ο όγκος μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με την υγροποίηση ή τη στερεοποίηση του CO₂, που επιτυγχάνονται με περαιτέρω συμπίεση. Η υγροποίηση είναι μια καθιερωμένη τεχνολογία μεταφοράς αερίου με πλοίο ή με σωληνώσεις, όπου οι πιέσεις λειτουργίας κυμαίνονται μεταξύ 10 και 80 MPa. Μια υποδομή μεταφορών που μεταφέρει διοξείδιο του άνθρακα σε αρκετά μεγάλες ποσότητες για να έχει μια σημαντική συμβολή στην αντιστροφή του φαινομένου της αλλαγής κλίματος θα απαιτήσει ευμέγεθες δίκτυο αγωγών.

Η διαδικασία διαχωρισμού και σύλληψης μπορεί να είναι απομακρυσμένη από τη τοποθεσία της αποθήκευσης. Κάθε πρόγραμμα αποθήκευσης πρέπει να περιλαμβάνει τη μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα στην τοποθεσία αποθήκευσης, και να πραγματεύεται ουσιαστικά συγκεκριμένες πλευρές του συστήματος, όπως τη βελτιστοποίηση και ένταξη των πηγών του άνθρακα, το διαχωρισμό και τη σύλληψη, τη μεταφορά, και την αποθήκευση. Το κόστος κατασκευής ενός αγωγού CO₂ υπολογίζεται ότι ανέρχεται στα \$1-10 ανά τόνο CO₂ ανά 100 μίλια (DOE). Το κόστος αυτό περιλαμβάνει κάθε κόστος που σχετίζεται με τον αγωγό, όπως το δικαίωμα περάσματος και την αποζημίωση για καλλιέργειες.

Το ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα στους αγωγούς πρέπει κατά προτίμηση να είναι ξηρό και χωρίς σουλφίδια, για αποφυγή της διάβρωσης. Εντούτοις, θα ήταν δυνατό να σχεδιαστεί μια αντιδιαβρωτική σωλήνωση που θα λειτουργούσε ακίνδυνα με αέριο που περιλαμβάνει νερό, σουλφίδια και άλλους επιβαρυντικούς παράγοντες. Η μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα μέσω των κατοικημένων περιοχών απαιτεί προσοχή στο σχεδιασμό, στην προστασία από την υπερπίεση, και στην ανίχνευση διαρροών. Τα προβλήματα για τις σωληνώσεις διοξειδίου του άνθρακα είναι όμοια με των σωληνώσεων για μεταφορά υδρογονανθράκων.



Εικόνα 5.1: Αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου.



Εικόνα 5.2:
Δημιουργία δικτύου σωληνώσεων

Η χαμηλή περιεκτικότητα σε άζωτο είναι σημαντική για EOR, αλλά παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στο διαχωρισμό και αποθήκευση CO₂, διότι δεν επενεργεί διαβρωτικά. Μια σωλήνωση CO₂ μέσω των κατοικημένων περιοχών πρέπει να έχει μια διευκρινισμένη περιεκτικότητα σε H₂S. Το ξηρό διοξείδιο του άνθρακα δεν διαβρώνει τους χάλυβες άνθρακα- μαγγανίου που χρησιμοποιούνται γενικά για αγωγούς, εφόσον η σχετική υγρασία είναι λιγότερο από 60% (Rogers και Mayhew, 1980) αυτό το συμπέρασμα συνεχίζει να ισχύει παρουσία N₂, NO_x και SO_x.

Το ποσοστό διάβρωσης χάλυβα άνθρακα στο ξηρό υπερκρίσιμο CO₂ είναι χαμηλό. Για αγωγό AISI 1080 που έχει μετρηθεί σε πίεση 90-120 bar και θερμοκρασία 160°C- 180°C για 200 ημέρες, όπου μετρήθηκαν τιμές για τη διάβρωση περίπου 0,01 χιλ ανά έτος.

Σε δοκιμή που έγινε σε θερμοκρασία 3⁰C και 22°C σε CO₂ πίεσης 140 bar, με περιεκτικότητα 800 έως 1000 ppm H₂S, το ποσοστό διάβρωσης για χάλυβα- άνθρακα X- 60 μετρήθηκε σε λιγότερο 0.0005 χιλ. ανά έτος. Η εμπειρία δείχνει επίσης πολύ λίγα προβλήματα με τη μεταφορά ξηρού CO₂ στις σωληνώσεις χάλυβα-άνθρακα. Κατά τη διάρκεια 12 ετών, το ποσοστό διάβρωσης σε εν λειτουργία αγωγό βρέθηκε 0.0025 χιλ. ανά έτος

Μετρήθηκε το ποσοστό διάβρωσης σε τιμή 0,7 χιλ. ανά έτος από έκθεση 150 έως 300 ωρών σε θερμοκρασία 40°C σε νερό που αναμίχθηκε σε ίσα μέρη με CO₂ σε 95 bar, και βρέθηκαν υψηλότερα ποσοστά διάβρωσης στις χαμηλότερες πιέσεις.

Το όριο διαλυτότητας του νερού στο υψηλής πίεσης CO₂ (500 bar) είναι 5000 PPM σε 75°C και 2000 PPM σε 30°C. Το μεθάνιο χαμηλώνει το όριο διαλυτότητας και το H₂S, το O₂ και το N₂ μπορούν να έχουν την ίδια επίδραση. Τα ποσοστά διάβρωσης είναι πολύ υψηλότερα εάν το ελεύθερο νερό είναι παρόν, και οι ένυδρες ουσίες επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο.

Βρέθηκε επίσης μικρή διαφορά μεταξύ του χάλυβα άνθρακα-μαγγανίου και αντιδιαβρωτικού κράματος χρωμίου (Seiersten 2001).

Εάν το CO₂ δεν είναι ξηρό, μπορεί να είναι απαραίτητο να χτιστεί σωλήνωση από αντιδιαβρωτικό κράμα χάλυβα (stainless steel). Αυτό είναι μια καθιερωμένη τεχνολογία, εντούτοις το κόστος του χάλυβα είναι υψηλό. Μόλις το CO₂ ξηραθεί και ικανοποιεί τα κριτήρια μεταφορών, το CO₂ μετριέται και μεταφέρεται στην περιοχή τελικής αποθήκευσης. Όλες οι σωληνώσεις πρέπει να έχουν συστήματα μέτρησης της

πτώσης πίεσης για τυχόν προκύπτουσες έκτακτες ανάγκες. Η μετακίνηση του CO₂ επιτυγχάνεται ευκολότερα υπό υψηλή πίεση.

Ο συνολικός σχεδιασμός κατασκευής σωληνώσεων περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη:

- Μηχανικό σχέδιο: ακολουθεί τις τυποποιημένες διαδικασίες, λεπτομερής περιγραφή στο εγχειρίδιο (Palmer et al, 2004).
- Σχέδιο σταθερότητας: οι τυποποιημένες μέθοδοι (Veritec, 1988) και το λογισμικό χρησιμοποιούνται για να εκτελέσουν τους υπολογισμούς σταθερότητας, παράκτια ή σε χερσαίες εγκαταστάσεις, αν και οι παράκτιες μέθοδοι έχουν αμφισβητηθεί.
- Προστασία ενάντια στη διάβρωση.
- Αυλακώσεις και επιχωμάτωση: οι χερσαίες γραμμές θάβονται συνήθως σε βάθος 1 μ. Οι παράκτιες γραμμές σχεδόν πάντα θάβονται σε ρηγά νερά. Σε πιο μεγάλα θαλάσσια βάθη οι σωληνώσεις είναι στενότερες από 400 χιλιοστά και θάβονται μερικές φορές για να προστατευτούν από τη ζημία και από αλιευτικά εργαλεία.
- Οι σωληνώσεις του CO₂ μπορούν να είναι περισσότερο εύθραυστες από τις σωληνώσεις υδρογονανθράκων αέριο. Οι καλύτερες σπασίματος εγκαθίστανται σε διαστήματα περίπου 500 μ.

5.2. Κόστος μεταφοράς από αγωγούς

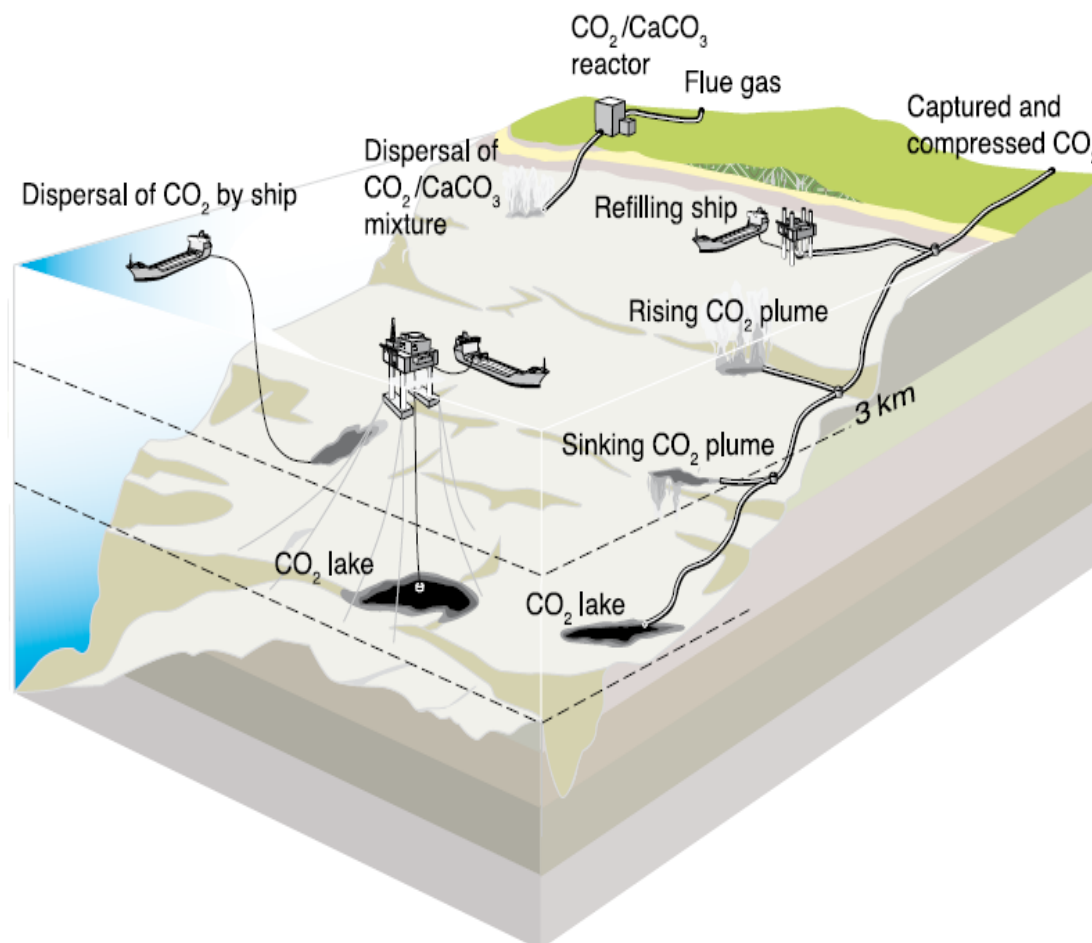
Το κόστος της μεταφοράς από αγωγούς χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες (Heddle et al, 2003):

- Κατασκευαστικό κόστος
-Υλικά /εξοπλισμός
-Κόστος εγκατάστασης (εργασία)
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης
-Συντήρηση
-Παρακολούθηση
-Ενεργειακό κόστος
- Άλλα έξοδα
(project management, design, διοικητικά-νομικά)

5.3. Θαλάσσια μεταφορά CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα συλλαμβάνεται στην ξηρά στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού και σύλληψης. Όμως η μεταφορά του από πλοία είναι μία ξεχωριστή διαδικασία, οπότε η θαλάσσια μεταφορά απαιτεί συστήματα φόρτωσης και προσωρινής αποθήκευσης του CO₂ στη ξηρά. Η χωρητικότητα, η ταχύτητα, ο αριθμός και το χρονοδιάγραμμα των πλοίων είναι παράγοντες που εξαρτώνται από το ρυθμό σύλληψης CO₂, την απόσταση μεταφοράς και κοινωνικοοικονομικούς περιορισμούς. Στη μεταφορά από πλοία εντοπίζονται ομοιότητες με τη μεταφορά από πλοία υγρού πετρελαίου (LPG, liquefied petroleum gas).

Η εκφόρτωση λαμβάνει χώρα ανάλογα με τον εξοπλισμό του συστήματος αποθήκευσης. Εάν βρίσκεται στη ξηρά τότε εκφορτώνεται προσωρινά σε δεξαμενές αποθήκευσης ή αν βρίσκεται στη θάλασσα (όπως στη περίπτωση της θαλάσσιας αποθήκευσης) εκφορτώνεται σε πλατφόρμες ή αποθηκευτικές δεξαμενές που επιπλέουν (Golomb, D. (1997)).



Εικόνα 5.3: Μεταφορά και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα στη θάλασσα.

6. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

6.1. Εισαγωγή

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί όπως τα κοιτάσματα πετρελαίου, τα στρώματα ορυκτού άνθρακα, και οι υπόγειοι αλατούχοι υδροφορείς, είναι πιθανόν να προσφέρονται για συγκεντρωμένη αποθήκευση του CO₂ σε μεγάλη κλίμακα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αποθήκευση μπορεί να συνοδεύεται από οφέλη, όπως είναι η βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR), η βελτιωμένη παραγωγή μεθανίου από στρώματα ορυκτού άνθρακα (ECBMR), η βελτιωμένη παραγωγή φυσικού αερίου από εξαντλημένα αποθέματα, και η βελτιωμένη αποδοτικότητα αποθήκευσης φυσικού αερίου με χρήση CO₂, που λειτουργεί ως «μαξιλάρι» για να εκτοπίζει το μεθάνιο από τον ταμιευτήρα.

Έχουν ήδη υλοποιηθεί ή προταθεί πολλά πιλοτικά και εμπορικά προγράμματα αποθήκευσης CO₂. Μέχρι σήμερα, τα περισσότερα από αυτά τα εμπορικά προγράμματα έχουν σχέση με μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις φυσικού αερίου, με ρεύματα αερίου που περιέχουν 10-15% κατ'όγκον CO₂, όπως είναι το Sleipner στη Βόρεια Θάλασσα, το Snohvit στη Θάλασσα Barents, το In Salah στην Αλγερία, και το Gorgon στην Αυστραλία, καθώς επίσης και τα προγράμματα εισπίσεως όξινου αερίου στον Καναδά και τις Ηνωμένες Πολιτείες⁸.

Στο Πρόγραμμα Sleipner της Statoil, από το 1996 έχει εισπιαστεί περισσότερο από 7 Mt CO₂ σε μεγάλο βάθους υποθαλάσσιο σχηματισμό αλμυρού νερού. Η Statoil έχει σχεδιάσει πολλά προγράμματα διαχωρισμού του CO₂ από το φυσικό αέριο, το οποίο CO₂ στη συνέχεια εισπιάζεται σε ταμιευτήρα έξω από τα όρια του αποθέματος φυσικού αερίου. Η Statoil σχεδιάζει άλλο ένα πρόγραμμα στη Θάλασσα Barents, όπου το CO₂ από το απόθεμα του Snohvit θα διαχωριστεί από το φυσικό αέριο και θα εισπιαστεί σε γεωλογικό σχηματισμό κάτω από τα αποθέματα φυσικού αερίου.

Η Chevron έχει προτείνει την παραγωγή φυσικού αερίου από τα αποθέματα του Gorgon, στα ανοιχτά των δυτικών ακτών της Αυστραλίας, με περίπου 14% περιεκτικότητα σε CO₂. Το CO₂ θα εισπιαστεί στο σχηματισμό Dupuy στη Νήσο Μπάροου. Στην Ολλανδία, το CO₂ εισπιάζεται πιλοτικά στα αποθέματα φυσικού αερίου K12-B, τα οποία έχουν σχεδόν εξαντληθεί. Στον δυτικό Καναδά σήμερα λειτουργούν 44 προγράμματα εισπίσεως όξινου αερίου, που έχουν ξεκινήσει από την αρχή της δεκαετίας του 1990. Αν και τα περισσότερα είναι μικρής κλίμακας, αποτελούν σημαντικά παραδείγματα αποτελεσματικής διαχείρισης για την εισπίαση CO₂ και επικίνδυνων αερίων, όπως είναι το H₂S⁹.

⁸ IEA GHG R&D Programme; Leading Options for the Capture of CO₂ Emissions at Power Stations, Report Number PH3/14, April 2000.

⁹ IEA GHG R&D Programme; CO₂ Abatement in Oil Refineries: Fired Heaters, Report Number PH3/31 October 2000.



Εικόνα 6.1: Περιοχές όπου αναμένονται δραστηριότητες σχετικές με την αποθήκευση και την αποθήκευση CO₂.

6.2. Μηχανισμοί αποθήκευσης

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αποτελούνται από κόκκους πετρώματος που έχουν μεταφερθεί και καθιζάνει και από τα ορυκτά που σχηματίστηκαν μετά την καθίζηση του πετρώματος σχηματίζουν σημαντικό πορώδες. Οι πόροι ανάμεσα στους κόκκους ή τα ορυκτά καταλαμβάνονται από υγρά (κυρίως νερό, με ελάχιστο πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Οι ανοιχτές ρωγμές και κοιλότητες είναι επίσης γεμάτες με νερό. Με την εισπίεση CO₂ στους πόρους και τις ρωγμές ενός διαπερατού σχηματισμού, το CO₂ μπορεί να μετατοπίσει το υγρό που βρίσκεται εκεί, ή να αναμιχθεί ή να διαλυθεί μέσα στο υγρό, ή να αντιδράσει με τους ορυκτούς κόκκους, ή και να υπάρξει συνδυασμός των ανωτέρω διαδικασιών.

Η αποτελεσματικότητα της γεωλογικής αποθήκευσης εξαρτάται από ένα συνδυασμό φυσικών και γεωχημικών μηχανισμών. Οι πιο αποτελεσματικές τοποθεσίες αποθήκευσης είναι εκείνες στις οποίες το CO₂ παραμένει ακίνητο επειδή είναι μόνιμα παγιδευμένο κάτω από μη διαπερατό πέτρωμα καλύμματος μεγάλου πάχους, ή μετατρέπεται σε στερεά ορυκτά, ή προσροφάται στην επιφάνεια μικροπόρων ορυκτού άνθρακα, ή υπόκειται σε ένα συνδυασμό φυσικών και χημικών μηχανισμών παγίδευσης (Kaarstad, O., 2002).

Το CO₂ μπορεί να δεσμευτεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς με τρεις βασικούς μηχανισμούς.

6.2.1. Φυσική παγίδευση: Υδροδυναμική

Πρώτον, το CO₂ μπορεί να παγιδευτεί ως αέριο ή υπερκρίσιμο ρευστό κάτω από ένα χαμηλής διαπερατότητας πέτρωμα καλύμματος, σαν το φυσικό αέριο που είναι παγιδευμένο σε ταμειντήρες αερίου ή σε υδροφορείς. Ο μηχανισμός αυτός, που συνήθως αποκαλείται **υδροδυναμική παγίδευση**, ενδέχεται βραχυπρόθεσμα να αποτελέσει το σημαντικότερο μηχανισμό αποθήκευσης. Αν βρεθούν καλύτερες μέθοδοι για να αυξηθεί ο χώρος των πόρων που καταλαμβάνει το παγιδευμένο αέριο θα επιτευχθεί η μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων αποθήκευσης ενός γεωλογικού σχηματισμού.

Η υδροδυναμική παγίδευση μπορεί να διεξαχθεί σε σχηματισμούς αλμυρού νερού που δεν είναι κλειστοί, στους οποίους όμως τα υγρά μετακινούνται πολύ αργά, και σε μεγάλες αποστάσεις. Όταν εισπνέζεται το CO₂ σε ένα σχηματισμό, μετατοπίζει τα αλμυρά ύδατα του σχηματισμού, και στη συνέχεια μετακινείται προς τα πάνω λόγω της άνωσης, επειδή είναι λιγότερο πυκνό από το νερό. Όταν φτάσει στην κορυφή του σχηματισμού, συνεχίζει να μετατοπίζεται ως διακριτή φάση, μέχρι να παγιδευτεί με κορεσμό του κατάλοιπου CO₂ ή σε τοπικές δομικές ή στρωματογραφικές παγίδες μέσα στο σχηματισμό. Μακροπρόθεσμα, μεγάλες ποσότητες CO₂ διαλύονται στα ύδατα του σχηματισμού, και στη συνέχεια μετακινούνται μαζί με τα υπόγεια ύδατα. Όταν η απόσταση ανάμεσα στο σημείο εισπίεσης μεγάλου βάθους και το τέλος του υπερκείμενου μη διαπερατού σχηματισμού είναι αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα, ο απαιτούμενος χρόνος για να μπορέσει το υγρό να φτάσει στην επιφάνεια από τα βάθη της λεκάνης μπορεί να είναι εκατομμύρια χρόνια.

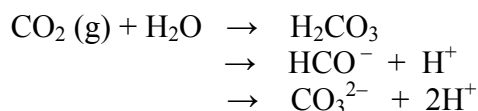
6.2.2. Γεωχημική παγίδευση

Δεύτερον, το CO₂ μπορεί να διαλυθεί σε κάποια υγρή φάση. Ο μηχανισμός διάλυσης του αερίου σε υγρό, ονομάζεται **παγίδευση διαλυτότητας**. Σε ταμειυτήρες πετρελαίου, το διαλυμένο CO₂ μειώνει το ιξώδες των καταλοίπων πετρελαίου, ώστε να μπορούν να διογκώνονται και να ρέουν ευκολότερα, θέτοντας τις βάσεις για μια από τις τεχνικές EOR. Η αποδοτικότητα της παγίδευσης διαλυτότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, π.χ. την αποδοτικότητα σάρωσης (αποδοτικότητα της μετατόπισης νερού ή πετρελαίου), της εισπίεσης του CO₂, το σχηματισμό δακτύλων (προτιμώμενων μονοπατιών ροής του αερίου), και τα αποτελέσματα ετερογένειας του σχηματισμού.

Η αποτελεσματική παγίδευση διαλυτότητας μειώνει τις πιθανότητες γρήγορης επιστροφής του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να εμπλακεί σε σειρά γεωχημικών αλληλεπιδράσεων με τα πετρώματα και τα ύδατα του σχηματισμού, που αυξάνουν περαιτέρω τη χωρητικότητα και την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης.

Πρώτον, όταν διαλύεται το CO₂ στα ύδατα του σχηματισμού, λαμβάνει χώρα ένα φαινόμενο που ονομάζεται παγίδευση διαλυτότητας. Βασικό πλεονέκτημα της παγίδευσης διαλυτότητας είναι ότι όταν διαλυθεί το CO₂, δεν υφίσταται πλέον ως διακριτή φάση, και επομένως ούτε και οι δυνάμεις άνωσης που το ωθούν προς τα πάνω. Επίσης, καθώς το πέτρωμα διαλύεται, δημιουργεί ιονικά είδη, συνοδευόμενα από αύξηση του pH.

Τέλος, ένα τμήμα του CO₂ μπορεί να μετατραπεί σε σταθερά ανθρακικά ορυκτά (ορυκτή παγίδευση), που αποτελεί και την πιο μόνιμη μορφή γεωλογικής αποθήκευσης. Η ορυκτή παγίδευση θεωρείται σχετικά αργή, αφού θεωρητικά διαρκεί χίλια χρόνια ή και περισσότερο. Παρόλα αυτά, η μονιμότητα της ορυκτής αποθήκευσης, σε συνδυασμό με τη δυναμικά μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης ορισμένων γεωλογικών σχηματισμών, καθιστά τη δυνατότητα αυτή επιθυμητή διαδικασία μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Η διάλυση του CO₂ στα ύδατα του σχηματισμού αναπαρίσταται με την εξής χημική αντίδραση:



Η διαλυτότητα του CO₂ στα ύδατα του σχηματισμού μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και η αλατότητα. Η διάλυση είναι ταχεία όταν τα ύδατα του σχηματισμού και το CO₂ καταλαμβάνουν την ίδια έκταση πόρων, όμως μόλις κορεστεί με CO₂ το υγρό του σχηματισμού ο ρυθμός μειώνεται και διέπεται από τους ρυθμούς διάχυσης και μεταφοράς.

Το CO₂ που διαλύεται στο νερό παράγει ένα ασθενές οξύ, που αντιδρά με το βασικό πυριτικό νάτριο και κάλιο ή με τα ορυκτά ανθρακικού ή πυριτικού ασβεστίου, μαγνησίου ή σιδήρου του ταμιευτήρα, σχηματίζοντας ανθρακικά ιόντα με χημικές αντιδράσεις του τύπου:



Η αντίδραση του διαλυμένου CO₂ με τα ορυκτά μπορεί να είναι ταχεία (μέρες) στην περίπτωση ορισμένων ανθρακικών ορυκτών, αλλά αργή (εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια) στην περίπτωση των πυριτικών ορυκτών. Τα ανθρακικά ορυκτά σχηματίζονται από τη συνεχή αντίδραση των ανθρακικών ιόντων με το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το σίδηρο πυριτικών ορυκτών, όπως είναι οι άργιλοι, οι μίκες, οι γλωρίτες, και οι άστριοι του πετρώματος.

Υπολογίζεται ότι μέσα σε 5.000 χρόνια, όλο το CO₂ που έχει εισπνεστεί στα αποθέματα πετρελαίου του Weyburn θα έχουν διαλυθεί ή θα έχουν μετατραπεί σε ανθρακικά ορυκτά στο σχηματισμό αποθήκευσης. Εξίσου σημαντικό είναι ότι το κάλυμμα πετρώματος και τα υπερκείμενα πετρώματα έχουν ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες ορυκτοποίησης. Αυτό είναι σημαντικό για τη διαχείριση των κινδύνων διαρροής, επειδή το CO₂ αφού διαλυθεί δεν μπορεί να διαρρεύσει σε διακριτή φάση.

Σύμφωνα με μοντέλα προσομοίωσης, πάνω από το 60% του CO₂ έχει παγιδευτεί με παγίδευση κατάλοιπου μέχρι το τέλος της εισπνεσης (100% μετά από 1000 χρόνια), αν και σύμφωνα με εργαστηριακά πειράματα τα ποσοστά αυτά είναι λίγο χαμηλότερα. Όταν το CO₂ παγιδεύεται με κορεσμό κατάλοιπου, ουσιαστικά είναι ακίνητο. Ωστόσο αν υπάρξει διαρροή από το κάλυμμα πετρώματος, τότε το κορεσμένο αλατόνερο μπορεί να απερωθεί καθώς αποσυμπιέζεται, αν και η τάση του κορεσμένου αλατόνερου είναι να βυθίζεται και όχι να ανεβαίνει.

Η αντίδραση του CO₂ με τα ύδατα και τα πετρώματα του σχηματισμού μπορεί να έχει αποτελέσματα που επηρεάζουν τους πόρους του πετρώματος και τη ροή του διαλύματος μέσα από τους πόρους αυτούς. Ωστόσο, αυτή η πιθανότητα δεν έχει επαληθευτεί με εμπειρικές παρατηρήσεις και δεν μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε τα δυνητικά της αποτελέσματα.

Άλλο είδος σταθεροποίησης είναι η προτιμώμενη προσρόφηση του CO₂ σε αργιλικούς σχιστόλιθους πλούσιους σε ορυκτό άνθρακα ή οργανικά υλικά. Αυτό έχει παρατηρηθεί σε εργαστηριακά πειράματα δέσμης και στήλης, αλλά και σε πειράματα πεδίου στην Κοιλιάδα Fenn Big στον Καναδά, και στη Λεκάνη του San Juan στις ΗΠΑ. Ακόμα ένα διαφορετικό είδος σταθεροποίησης είναι ο σχηματισμός υδριτών CO₂ στον πυθμένα της θάλασσας σε μεγάλο βάθος, και σε περιοχές της ξηράς που είναι μονίμως παγωμένες.

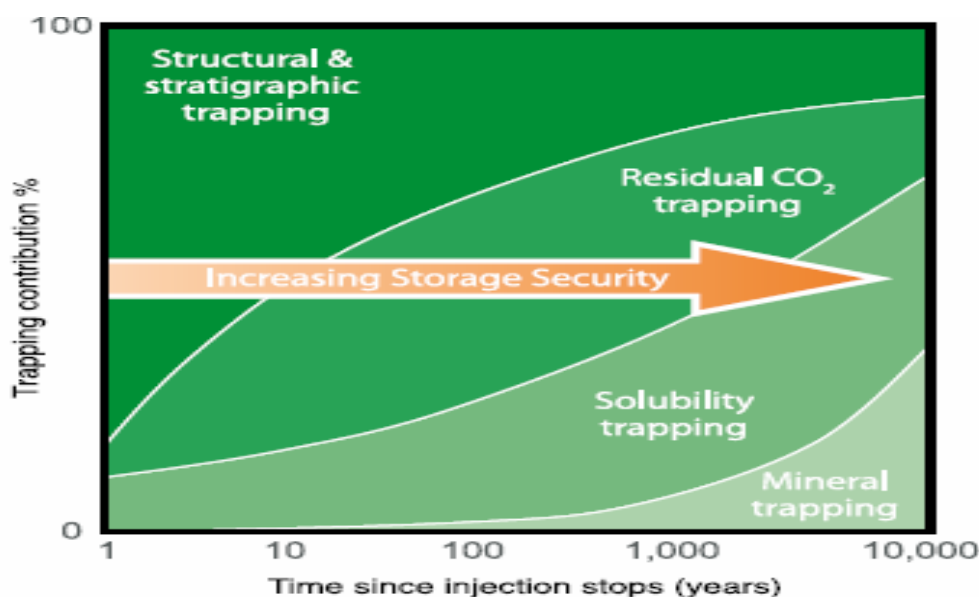
6.2.3. Φυσική παγίδευση: Στρωματογραφική και δομική

Τέλος, το CO₂ μπορεί να αντιδράσει άμεσα ή έμμεσα με την ορυκτή και οργανική ύλη των γεωλογικών σχηματισμών, και να αποτελέσει μέρος της μήτρας στερεών ορυκτών. Στους περισσότερους γεωλογικούς σχηματισμούς ο σχηματισμός ανθρακικού ασβεστίου, μαγνησίου, και σιδήρου αναμένεται να αποτελέσει την κυριότερη διαδικασία ορυκτής παγίδευσης. Ωστόσο, η καθίζηση αυτών των σταθερών ορυκτών φάσεων είναι μια σχετικά αργή διαδικασία, της οποίας η κινητική δεν είναι διαλευκασμένη πλήρως.

Στα κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα, η παγίδευση επιτυγχάνεται με απορρόφηση του CO₂ στη μήτρα των στερεών. Η ανάπτυξη μεθόδων για την αύξηση του ρυθμού και των δυνατοτήτων ορυκτής παγίδευσης θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σταθερών χώρων αποθήκευσης άνθρακα, που μειώνουν τις πιθανότητες να επιστρέψει ο άνθρακας στη βιόσφαιρα και μείωση της ανόδου CO₂ στην επιφάνεια.

Αρχικά, η φυσική παγίδευση του CO₂ κάτω από μη διαπερατά πετρώματα καλύμματος, όπως είναι τα πολύ χαμηλής διαπερατότητας στρώματα αργιλικού σχιστόλιθου ή άλατος, αποτελεί το βασικό τρόπο αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Σε ορισμένες περιοχές υψηλού γεωγραφικού πλάτους, ενδέχεται να λειτουργήσουν ως πέτρωμα καλύμματος οι υδρίτες αερίου. Οι ιζηματογενείς λεκάνες έχουν τέτοιες κλειστές οριοθετημένες παγίδες ή δομές, που καταλαμβάνονται κυρίως από αλμυρό νερό, πετρέλαιο και φυσικό αέριο.

Οι δομικές παγίδες περιλαμβάνουν και όσες έχουν σχηματιστεί από αναδιπλωμένα ή ραγισμένα πετρώματα. Οι ρωγμές μπορούν να λειτουργήσουν ως εμπόδια διαπερατότητας υπό ορισμένες συνθήκες, και ως προτιμώμενες οδοί ροής υγρών υπό άλλες συνθήκες. Οι στρωματογραφικές παγίδες σχηματίζονται από εναλλαγές στο είδος του πετρώματος, που προκαλούνται από την ποικιλία της τοποθεσίας όπου έχουν καθιζάνει τα πετρώματα. Και τα δύο αυτά είδη παγίδας είναι κατάλληλα για την αποθήκευση του CO₂, αν και χρειάζεται προσοχή, για να μην ξεπεραστούν τα ανώτερα επίπεδα επιτρεπόμενης πίεσης και δημιουργηθούν νέες ή επανενεργοποιηθούν παλαιότερες ρωγμές του πετρώματος.



Εικόνα 6.2: Η ασφάλεια αποθήκευσης εξαρτάται από συνδυασμό φυσικών και γεωφυσικών παραγόντων. Το γράφημα δείχνει την αλλαγή δυναμικότητάς του κάθε τύπου αποθήκευσης στο πέρασμα του χρόνου (TAR, IPCC.)

- 1 Στρωματογραφική παγίδευση
- 2 Παγίδευση από παρακείμενα πετρώματα
- 3 Παγίδευση διαλυτότητας
- 4 Ορυκτή παγίδευση

6.3. Γεωλογικοί σχηματισμοί κατάλληλοι για αποθήκευση

Τρία βασικά είδη γεωλογικών σχηματισμών είναι διαδεδομένα και έχουν τη δυνατότητα να δεσμεύσουν μεγάλες ποσότητες CO₂:

- ενεργοί και εξαντλημένοι ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου
- αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες μεγάλου βάθους,
- μεγάλου βάθους κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα

Άλλοι γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως **θαλάσσιοι και αρκτικοί υδρίτες, δεξαμενές CO₂, σπηλαιώσεις από εξορύξεις θόλων άλατος, και σχιστολιθικά πετρέλαια**, μπορούν να αυξήσουν τις δυνατότητες των χώρων αποθήκευσης ή να προσφέρουν δυνατότητες αποθήκευσης σε συγκεκριμένες γεωγραφικές τοποθεσίες(Kaarstad, O., 2002)..

6.4. Γενικά κριτήρια επιλογής τοποθεσίας αποθήκευσης

Υπάρχουν πολλές ιζηματογενείς περιοχές στον κόσμο, με διαφορετική καταλληλότητα για αποθήκευση CO₂. Γενικά οι τοποθεσίες γεωλογικής αποθήκευσης θα έπρεπε να έχουν:

- (1) επαρκή χωρητικότητα και εισπρεσιμότητα,
- (2) ικανοποιητικό πέτρωμα καλύμματος ή σταθερά όρια, και
- (3) επαρκώς σταθερό γεωλογικό περιβάλλον, ώστε να μην τίθεται σε κίνδυνο η ακεραιότητα της τοποθεσίας αποθήκευσης.

Τα κριτήρια αξιολόγησης της καταλληλότητας λεκανών περιλαμβάνουν: τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (τεκτονική δραστηριότητα, τύπος ιζήματος, γεωθερμική και υδροδυναμική κατάσταση)· τα αποθέματα της λεκάνης (υδρογονάνθρακες, ορυκτός άνθρακας, αλάτι) και τη βιομηχανική ετοιμότητα και υποδομή· και κοινωνικά θέματα, όπως τα επίπεδα ανάπτυξης, την οικονομία, τις περιβαλλοντικές ανησυχίες, το μορφωτικό επίπεδο και τη στάση του κοινού.

Η καταλληλότητα ιζηματογενών λεκανών για αποθήκευση CO₂ εξαρτάται εν μέρει από την τοποθεσία τους στην ηπειρωτική πλάκα. Οι λεκάνες που έχουν σχηματιστεί στα μέσα ή κοντά στις άκρες σταθερών ηπειρωτικών πλακών, αποτελούν εξαιρετική επιλογή για μακροπρόθεσμη αποθήκευση CO₂, εξαιτίας της δομής και της σταθερότητάς τους. Τέτοιες λεκάνες υπάρχουν στις περισσότερες ηπείρους, αλλά και γύρω από τον Ατλαντικό, τον Αρκτικό, και τον Ινδικό Ωκεανό. Οι λεκάνες που βρίσκονται πίσω από βουνά που έχουν σχηματιστεί από τη σύγκρουση τεκτονικών πλακών έχουν καλές δυνατότητες αποθήκευσης.

Στις αμερικανικές ηπείρους, τέτοιες λεκάνες υπάρχουν στα Rocky Mountains, στα Αππαλάχια και στις Άνδεις, ενώ στην Ευρώπη είναι οι λεκάνες βόρεια από τις Άλπεις και τα Καρπάθια, και δυτικά από τα Ουράλια Όρη, και στην Ασία οι λεκάνες

νότια από το Ζάγκρος και τα Ιμαλάια. Οι λεκάνες σε περιοχές με τεκτονική δραστηριότητα, όπως όσες βρίσκονται γύρω από τον Ειρηνικό Ωκεανό και τη βόρεια Μεσόγειο, ίσως είναι λιγότερο κατάλληλες για αποθήκευση CO₂, και οι τοποθεσίες στις περιοχές αυτές πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, εξαιτίας της πιθανότητας διαρροής του CO₂. Οι λεκάνες που βρίσκονται στα άκρα πλακών που βυθίζονται, ή ανάμεσα σε ενεργές οροσειρές, συνήθως έχουν έντονες αναδιπλώσεις και ρωγμές, και δεν προσφέρουν ασφάλεια αποθήκευσης. Ωστόσο κάθε λεκάνη πρέπει να αξιολογείται χωριστά.

Για παράδειγμα, η λεκάνη του Λος Άντζελες και η Κοιλιάδα του Σακραμέντο στην Καλιφόρνια, όπου έχουν βρεθεί σημαντικές συσσωρεύσεις υδρογονανθράκων, έχουν δείξει καταλληλότητα για τοπική αποθήκευση. Λεκάνες που δεν ενδείκνυνται για αποθήκευση CO₂ είναι όσες

- (1) είναι λεπτές,
- (2) δεν έχουν καλή σχέση ταμιευτήρα και πετρώματος καλύμματος,
- (3) έχουν πολλά ρηγματά,
- (4) βρίσκονται μέσα σε ζώνες πτύχωσης,
- (5) έχουν έντονες ασυμφωνίες,
- (6) έχουν υποστεί σημαντική διαγένεση, ή
- (7) έχουν υπερβολική πίεση στις δεξαμενές τους.

Η αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικά μέσα, που ορίζεται από την ποσότητα του αποθηκευμένου CO₂ ανά μονάδα όγκου, αυξάνεται όσο αυξάνει η πυκνότητα του CO₂. Η ασφάλεια αποθήκευσης είναι επίσης ανάλογη με την αυξανόμενη πυκνότητα, επειδή η άνωση που ωθεί την ανοδική μετακίνηση είναι πιο έντονη για ελαφρότερα υγρά. Η πυκνότητα αυξάνει σημαντικά με το βάθος όσο το CO₂ είναι σε αέρια φάση, αυξάνει ελαφρά ή και καθόλου όταν το CO₂ περνάει από την αέρια στην υγρή φάση, και μπορεί και να μειωθεί με περαιτέρω αύξηση του βάθους, ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Οι «κρύες» ιζηματογενείς λεκάνες, που χαρακτηρίζονται από μεταβολές χαμηλής θερμοκρασίας, είναι πιο κατάλληλες για αποθήκευση CO₂, επειδή το CO₂ είναι πιο πυκνό σε μικρότερα βάθη (700–1000 m) παρά σε «ζεστές» ιζηματογενείς λεκάνες, που χαρακτηρίζονται από μεταβολές υψηλής θερμοκρασίας, και όπου οι συνθήκες πυκνότητας του υγρού πληρούνται σε μεγαλύτερα βάθη (1000–1500m). Το βάθος του σχηματισμού αποθήκευσης (που αυξάνει το κόστος γεώτρησης και συμπίεσης) μπορεί επίσης να επηρεάσει την επιλογή της τοποθεσίας αποθήκευσης.

Κρίσιμης σημασίας είναι επίσης το πάχος του σχηματισμού και η ύπαρξη πόρων (για τη χωρητικότητα της αποθήκευσης) και η διαπερατότητα (για την εισπνευστικότητα). Οι πόροι συνήθως μειώνονται με το βάθος, εξαιτίας της συμπύκνωσης και της συγκόλλησης, γεγονός που μειώνει τη χωρητικότητα και την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης. Οι σχηματισμοί αποθήκευσης πρέπει να καλύπτονται από εκτεταμένες μονάδες περιορισμού (π.χ. στρώματα αργιλικού σχιστόλιθου, άλατος, ή ανυδριτών), ώστε να διασφαλίζεται ότι το CO₂ δεν θα διαφύγει σε υπερκείμενα πετρώματα και τελικά στην επιφάνεια.

Οι ιζηματογενείς λεκάνες ή τμήματα λεκανών με εκτεταμένες ρωγμές, ιδίως σε περιοχές με σεισμική δραστηριότητα, πρέπει να αξιολογηθούν πολύ προσεκτικά ως προς την καταλληλότητά τους για αποθήκευση CO₂, εκτός και αν οι ρωγμές είναι σφραγισμένες και το CO₂ δεν πρόκειται να τις ανοίξει. Οι συνθήκες πίεσης και ροής των υδάτων του σχηματισμού σε μια ιζηματογενή λεκάνη είναι σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή τοποθεσιών αποθήκευσης CO₂.

Η εισπίεση CO₂ σε σχηματισμούς που έχουν υπερβολική πίεση λόγω συμπύκνωσης ή/και παραγωγής υδρογονανθράκων μπορεί να θέσει σημαντικά ζητήματα ασφάλειας και τεχνολογίας, και επομένως να μην είναι εφικτή. Οι

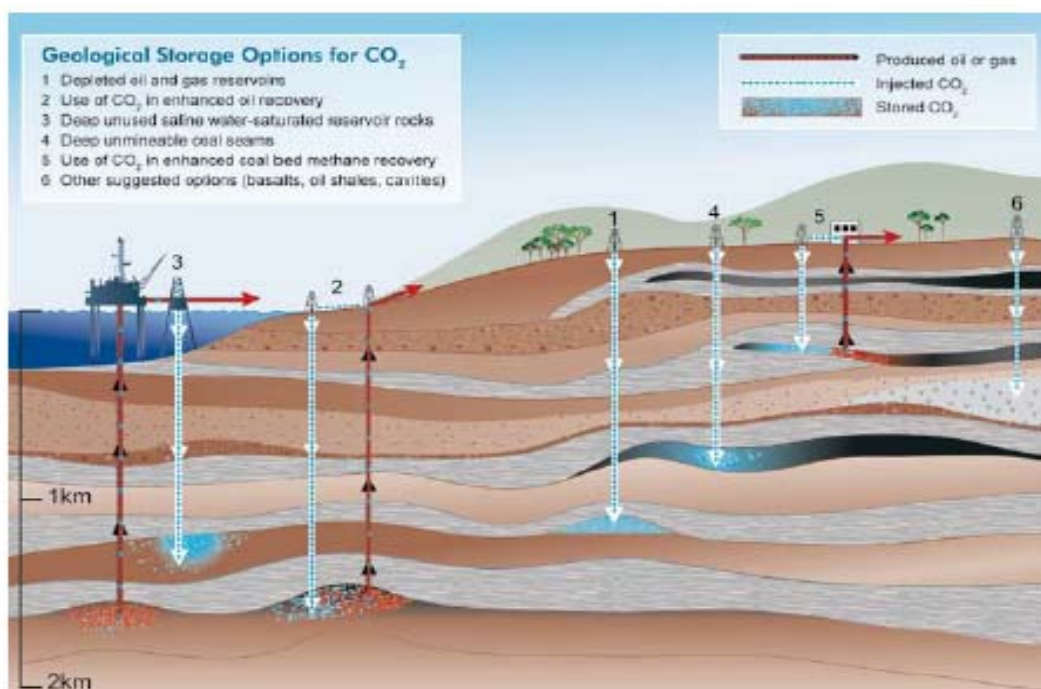
σχηματισμοί με χαμηλή πίεση σε λεκάνες στα μέσα της πλάκας ή κοντά στις άκρες σταθερών ηπειρωτικών πλακών ή πίσω από όρη που έχουν σχηματιστεί από σύγκρουση πλακών ενδείκνυνται για αποθήκευση CO₂. Η αποθήκευση CO₂ σε αλατούχους υδροφορείς, όπου τα υγρά παραμένουν για μεγάλο διάστημα (εκατομμύρια χρόνια), ενδείκνυνται για υδροδυναμική και ορυκτή παγίδευση.

Η πιθανή παρουσία ορυκτών καυσίμων και οι δυνατότητες εξερεύνησης και παραγωγής αποτελούν επιπλέον παράγοντες για την επιλογή μιας λεκάνης ως τοποθεσίας αποθήκευσης. Οι λεκάνες που δεν έχουν εξερευνηθεί ως προς την παρουσία υδρογονανθράκων αποτελούν αβέβαιους στόχους αποθήκευσης CO₂, εξαιτίας των περιορισμένων διαθέσιμων γεωλογικών πληροφοριών, και της πιθανότητας ανακάλυψης αποθεμάτων υδρογονανθράκων.

Οι γνωστές ιζηματογενείς λεκάνες ενδείκνυνται για αποθήκευση CO₂ επειδή:

- (1) είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά τους,
- (2) έχουν ήδη ανακαλυφθεί και παραχθεί τα αποθέματα υδρογονανθράκων ή/και τα στρώματα ορυκτού άνθρακα,
- (3) ορισμένα αποθέματα πετρελαίου μπορεί να έχουν εξαντληθεί, να κοντεύουν να εξαντληθούν ή να έχουν εγκαταληφθεί ως ασύμφορα, και
- (4) μπορεί ήδη να υπάρχει η απαραίτητη υποδομή για τη μεταφορά και την εισπίεση του CO₂.

Η παρουσία φρεατίων που διεισδύουν, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, σε γνωστές ιζηματογενείς λεκάνες, μπορεί δυνητικά να προκαλέσει διαρροή του CO₂, και να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια μιας τοποθεσίας αποθήκευσης. Παρόλα αυτά, στο Weyburn παρά τα εκατοντάδες υπάρχοντα φρεάτια, δεν υπάρχει μετρήσιμη διαρροή μετά από τέσσερα χρόνια εισπίεσης CO₂.



Εικόνα 6.3: Γεωλογικοί σχηματισμοί κατάλληλοι για δέσμευση CO₂

- 1) Ενεργά και εξαντλημένα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου
- 2) EOR (enhanced oil recovery)
- 3) Σχηματισμοί άλμης μεγάλου βάθους, συμπεριλαμβανομένων των σχηματισμών αλατούχων υδάτων

- 4) Μεγάλου βάθους φλέβες ορυκτού άνθρακα και σχηματισμοί μεθανίου σε γαιάνθρακα
- 5) Χρήση για αύξηση παραγωγής μεθανίου σε στρώματα ορυκτού άνθρακα
- 6) Άλλες εναλλακτικές (έγκοιλα κ.α.)

6.5. Αποθήκευση του CO₂ σε ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου

Οι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου αποτελούν στόχους για την αποθήκευση του CO₂ για πολλούς λόγους.

Πρώτον, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο βρίσκονται ήδη μέσα σε δομικές ή στρωματογραφικές παγίδες, και το πετρέλαιο ή φυσικό αέριο που συσσωρεύτηκε αρχικά στις παγίδες αυτές δεν διέφυγε σε διάστημα χρόνου σε γεωλογική τάξη μεγέθους. Επομένως, οι ταμιευτήρες αυτοί θα έπρεπε να περιέχουν και CO₂, εφόσον δεν δημιουργήθηκαν μονοπάτια διαφυγής προς την επιφάνεια ή προς άλλους σχηματισμούς, εξαιτίας της υπερβολικής πίεσης του ταμιευτήρα, της δημιουργίας ρωγμών στον ταμιευτήρα, λόγω των φρεάτων ή της διαρροής γύρω από τις γεωτρήσεις.

Δεύτερον, η γεωλογική δομή και οι φυσικές ιδιότητες της πλειοψηφίας των αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν μελετηθεί επαρκώς. Όμως μπορεί να είναι απαραίτητος ο περαιτέρω χαρακτηρισμός (ιδιαίτερα ως προς την ακεραιότητα και την έκταση του πετρώματος καλύμματος, η ύπαρξη των διαθέσιμων στοιχείων θα μειώσει το κόστος εφαρμογής προγραμμάτων αποθήκευσης του CO₂).

Επίσης, στην βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν αναπτυχθεί πολύ εξελιγμένα υπολογιστικά μοντέλα, που προβλέπουν τη συμπεριφορά μετατόπισης και την αποθήκευση του CO₂ για τις τεχνικές EOR. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τη ροή του πετρελαίου, του φυσικού αερίου, και του αλμυρού νερού σε τρεις διαστάσεις: συμπεριφορά φάσης και διαλυτότητα του CO₂ στο πετρέλαιο και το αλμυρό νερό, καθώς και των διαφόρων ιδιοτήτων του χώρου κάποιων ταμιευτήρων. Οι ίδιες διαδικασίες ευθύνονται για την υδροδυναμική παγίδευση και την παγίδευση διαλυτότητας του CO₂ (Kling, G. et al, 1987).

Η πρώτη και πιο βιώσιμη λύση για την αποθήκευση του CO₂, είναι η εκτεταμένη εμπειρία από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου με τεχνικές EOR, η οποία έχει βάση δεδομένων. Σήμερα το 80% περίπου του CO₂ που χρησιμοποιείται εμπορικά εντάσσεται στα πλαίσια των τεχνικών EOR. Η τεχνολογία εισπίεσης του CO₂ έχει εφαρμοστεί εμπορικά και μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς πολλές δυσκολίες. Μακροπρόθεσμα ο όγκος του CO₂ που δεσμεύεται στα πλαίσια των προγραμμάτων EOR μπορεί να μην είναι επαρκής, μπορεί όμως έτσι να αποκτήθει πολύτιμη γνώση που θα ωφελήσει τη γεωλογική αποθήκευση σε άλλα είδη σχηματισμών.

Η ετερογένεια του ταμιευτήρα επίσης επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης CO₂. Η διαφορά πυκνότητας ανάμεσα στο ελαφρύτερο CO₂ και στο πετρέλαιο και τα ύδατα του ταμιευτήρα οδηγεί στη μετατόπιση του CO₂ προς την κορυφή του ταμιευτήρα, ιδίως αν ο ταμιευτήρας είναι σχετικά ομοιογενής και έχει υψηλή διαπερατότητα, επηρεάζοντας αρνητικά την αποθήκευση του CO₂ και την ανάκτηση πετρελαίου. Επομένως, η ετερογένεια του ταμιευτήρα μπορεί να έχει θετικά αποτελέσματα, επιβραδύνοντας την άνοδο του CO₂ προς την κορυφή του ταμιευτήρα και υποχρεώνοντας το CO₂ να διασκορπιστεί εγκάρσια καταλαμβάνοντας μεγαλύτερο τμήμα του σχηματισμού, και επομένως αυξάνοντας τη χωρητικότητα αποθήκευσης.

Η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου έχει αναπτύξει υπολογιστικά μοντέλα που προβλέπουν την κίνηση, τη συμπεριφορά μετακίνησης και την παγίδευση των υδρογονανθράκων. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τμήμα της ήδη υπάρχουσας υποδομής και φρεατίων για τις επιχειρήσεις αποθήκευσης του CO₂. Τα εξαντλημένα κοιτάσματα δεν επηρεάζονται αρνητικά από το CO₂ (αφού ήδη περιείχαν υδρογονάνθρακες), και αν βρίσκονται ακόμη σε στάδιο παραγωγής, το πρόγραμμα αποθήκευσης CO₂ μπορεί να βελτιστοποιηθεί ώστε να βελτιωθεί η παραγωγή πετρελαίου ή φυσικού αερίου.

Ωστόσο, σε πολλά κοιτάσματα το σφράγισμα των εγκαταλελειμμένων φρεατίων έγινε πριν από πολλές δεκαετίες, όταν τα φρεάτια τα γεμίζανε απλώς με ένα υγρό πλούσιο σε λάσπη. Δηλαδή, τα σφραγίσματα σκυροδέματος έπρεπε να τοποθετηθούν στρατηγικά στο φρεάτιο, όμως δεν μπορούσε κανείς να προβλέψει ότι θα έπρεπε να είναι αρκετά ανθεκτικά ώστε να μπορούν να περιορίσουν ένα αντιδραστικό υγρό όπως είναι το CO₂, που υπόκειται δυναμικά σε δυνάμεις άνωσης. Επομένως, πρέπει να αξιολογηθεί η κατάσταση των φρεατίων που διεισδύουν στο πέτρωμα καλύμματος.

Σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολος ακόμα και ο εντοπισμός των φρεατίων, και ίσως είναι απαραίτητο να επαληθευτεί η ακεραιότητα του πετρώματος καλύμματος με παρακολούθηση της πίεσης και χρήση ιχνηθετών. Η χωρητικότητα ενός ταμιευτήρα μπορεί να περιοριστεί από την ανάγκη να αποφευχθεί η υπερβολική αύξηση της πίεσης που θα έβλαπτε το πέτρωμα καλύμματος. Οι ταμιευτήρες πρέπει να δείχνουν περιορισμένη ευαισθησία στη μείωση της διαπερατότητας, που προκαλείται από το σφράγισμα της περιοχής κοντά στην εισπίεση και τις διακυμάνσεις τάσης του ταμιευτήρα. Η αποθήκευση σε δεξαμενές που βρίσκονται σε βάθος μικρότερο από τα 800 m μπορεί να είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτή, όμως η χαμηλή χωρητικότητα αποθήκευσης των δεξαμενών αυτών, στις οποίες το CO₂ θα είναι σε αέρια φάση, μπορεί να αποδειχτεί προβληματική (Kling, G. et al, 1987)..

Αυτή η επιλογή αποθήκευσης CO₂ περιορίζεται στις λεκάνες που παράγουν υδρογονάνθρακες, οι οποίες αριθμητικά αντιστοιχούν σε λιγότερες από τις μισές ιζηματογενείς λεκάνες του κόσμου. Γενικά θεωρείται ότι οι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση CO₂ αφού εξαντληθούν τα κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου, αν και η αποθήκευση σε συνδυασμό με βελτιωμένη παραγωγή πετρελαίου ή φυσικού αερίου μπορεί να συμβεί και νωρίτερα. Εκτός από τη λεπτομερή ανάλυση κάθε ταμιευτήρα χωριστά, η χωρητικότητα αποθήκευσης CO₂ μπορεί και πρέπει να υπολογίζεται από βάσεις δεδομένων για τα αποθέματα και την παραγωγή.

Σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων με ελάχιστη παρέμβαση υδάτων, το εισπνεόμενο CO₂ γενικά θα καταλάβει τον όγκο των πόρων που προηγουμένως καταλαμβάνονταν από το πετρέλαιο ή/και το φυσικό αέριο. Ωστόσο, δεν θα είναι διαθέσιμος για CO₂ όλος ο χώρος των πόρων που καταλαμβάνονταν προηγουμένως από υδρογονάνθρακες, επειδή μπορεί να παγιδευτούν ύδατα στο χώρο αυτό, λόγω των τριχοειδών φαινομένων, των ιξώδων δακτύλων, και των φαινομένων βαρύτητας. Σε ανοιχτούς ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, όπου η πίεση διατηρείται από την εισροή υδάτων, εκτός από τη μείωση της χωρητικότητας που προκαλείται από τα τριχοειδή και άλλα τοπικά φαινόμενα, σημαντικό τμήμα του χώρου των πόρων θα καταληφθεί από ύδατα, μειώνοντας το διαθέσιμο χώρο για CO₂, αφού δεν αυξάνεται η πίεση του ταμιευτήρα (για να προστατευθεί η ακεραιότητά της).

Πολλοί υπολογισμοί χωρητικότητας κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου δεν διαχωρίζουν τη χωρητικότητα ως προς το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο που έχει ήδη παραχθεί, από τη χωρητικότητα που σχετίζεται με τα εναπομείναντα αποθέματα, τα οποία ίσως είναι διαθέσιμα για παραγωγή μελλοντικά. Σε ορισμένες παγκόσμιες αξιολογήσεις αποδίδεται χωρητικότητα και σε άγνωστα κοιτάσματα

πετρελαίου και φυσικού αερίου, που μπορεί να ανακαλυφθούν μελλοντικά. Δεν μπορεί να υπάρξει βεβαιότητα για το πότε θα εξαντληθεί κάθε κοιτάσμα, ώστε να γίνει διαθέσιμο για αποθήκευση CO₂. Η εγκατάλειψη ενός κοιτάσματος πετρελαίου ή φυσικού αερίου εξαρτάται περισσότερο από οικονομικούς παρά από τεχνικούς παράγοντες και ιδίως από τις τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου.

Είναι πιθανό ότι στο μέλλον θα συνεχίσει η παραγωγή από σχεδόν εξαντλημένα κοιτάσματα, αν οικονομικές μεταβολές υπαγορεύσουν την ανάκτηση περισσότερων υδρογονανθράκων, γεγονός που θα καθυστερούσε την πρόσβαση στις τοποθεσίες αυτές για αποθήκευση CO₂. Σήμερα, ελάχιστα από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν εξαντληθεί.

Έχουν ήδη γίνει πολλοί υπολογισμοί της χωρητικότητας αποθήκευσης κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι τοπικές και εθνικές αξιολογήσεις προσεγγίζουν το θέμα «από κάτω προς τα πάνω», και βασίζονται σε δεδομένα για τα αποθέματα των υπάρχοντων και γνωστών κοιτασμάτων πετρελαίων και φυσικού αερίου. Αν και διαφέρουν οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν, υπάρχει μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στις αξιολογήσεις αυτές παρά στους παγκόσμιους υπολογισμούς, για τους λόγους που σκιαγραφήθηκαν ανωτέρω.

Προς το παρόν, αυτό το είδος αξιολόγησης είναι διαθέσιμο μόνο για τη βορειοδυτική Ευρώπη, τις ΗΠΑ, τον Καναδά και την Αυστραλία. Στην Ευρώπη, έχουν γίνει τρεις τέτοιες προσπάθειες να υπολογιστεί η χωρητικότητα αποθήκευσης CO₂ για ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου που καλύπτουν μικρό τμήμα της Ευρώπης αλλά αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο τμήμα της χωρητικότητας αποθήκευσης της Ευρώπης, αφού περιλαμβάνουν τη Βόρεια Θάλασσα. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και στις μελέτες αυτές βασίστηκε στην υπόθεση ότι το CO₂ θα καταλάβει το συνολικό όγκο που καταλάμβαναν οι υδρογονάνθρακες. Για κάθε κοιτάσμα χρησιμοποιήθηκαν ή υπολογίστηκαν οι υπολογισμοί της εταιρείας για τα «τελικά ανακτήσιμα αποθέματα» (URR). Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο υπόγειος όγκος που καταλάμβαναν τα URR σε κάθε περίπτωση, και η ποσότητα CO₂ που θα μπορούσε να αποθηκευτεί στο χώρο αυτό υπό τις συνθήκες του ταμειυτήρα. Δεν συμπεριλήφθηκαν άγνωστα αποθέματα στον υπολογισμό (Kling, G. et al, 1987)..

Για τον Καναδά, η υπόθεση ήταν ότι τα αποθέματα που είχαν ήδη παραχθεί (και όχι τα αρχικά κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου) θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από το CO₂ (θεωρητική χωρητικότητα) σε όλους τους ταμειυτήρες του δυτικού Καναδά, ανάλογα με την πίεση, τη θερμοκρασία, και τον όγκο των πόρων της τοποθεσίας. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν συντελεστές μείωσης, ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση των υδροφορέων και άλλα φαινόμενα (αποτελεσματική χωρητικότητα). Στη συνέχεια οι τιμές μειώθηκαν περαιτέρω, ανάλογα με το βάθος (900–3500 m) και το μέγεθος (πρακτική χωρητικότητα). Η δυνητική χωρητικότητα αποθήκευσης της βορειοδυτικής Ευρώπης υπολογίζεται ότι ξεπερνά τους 40 Gt CO₂ για τους ταμειυτήρες φυσικού αερίου και τους 7 Gt CO₂ για τα κοιτάσματα πετρελαίου. Οι Ευρωπαϊκοί υπολογισμοί βασίζονται στο σύνολο των αποθεμάτων (δεν υπάρχουν σημαντικά κοιτάσματα πάνω από τα 800 m).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πυκνότητα του διοξειδίου του άνθρακα υπολογίστηκε με βάση το βάθος, την πίεση και τη θερμοκρασία των κοιτασμάτων. Όπου δεν ήταν διαθέσιμες οι πληροφορίες αυτές, χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 700 kg /m³. Δεν έγινε καμία υπόθεση για την ποσότητα πετρελαίου που είχε ήδη ανακτηθεί από τα κοιτάσματα πριν ξεκινήσει η αποθήκευση του CO₂ και δεν συμπεριλήφθηκε η τριτογενής ανάκτηση με μεθόδους EOR. Στο δυτικό Καναδά, η δυνητική πρακτική χωρητικότητα CO₂ στις λεκάνες της Alberta και του Williston, σε ταμειυτήρες με χωρητικότητα πάνω από 1 Mt CO₂ έκαστη, υπολογίστηκε ότι φτάνει τον 1 Gt CO₂ σε δεξαμενές πετρελαίου και περίπου 4 Gt CO₂ σε δεξαμενές φυσικού αερίου.

Η χωρητικότητα όλων των γνωστών αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι 10 Gt CO₂ περίπου. Για τον Καναδά, η πυκνότητα του CO₂ υπολογίστηκε χωριστά για τον κάθε ταμιευτήρα, με βάση την πίεση και τη θερμοκρασία. Οι τιμές για το ανακτημένο πετρέλαιο και φυσικό αέριο ήταν είτε οι καταγεγραμμένες στις βάσεις δεδομένων για τα αποθέματα, είτε βασισμένες στην πραγματική παραγωγή. Για ταμιευτήρες κατάλληλους για EOR, αναπτύχθηκε μια μέθοδος ανάλυσης για να υπολογιστεί η ποσότητα υδρογονανθράκων που θα μπορούσε να παραχθεί και η ποσότητα του CO₂ που θα μπορούσε να αποθηκευτεί.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης σε γνωστά κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου υπολογίζεται ότι αγγίζει τους 98 Gt CO₂. Δεδομένα για τη μέχρι σήμερα παραγωγή και τα γνωστά κοιτάσματα υποδεικνύουν ότι η Αυστραλία έχει χωρητικότητα αποθήκευσης που φτάνει τους 15 Gt CO₂ για ταμιευτήρες φυσικού αερίου και τους 0.7 Gt CO₂, για ταμιευτήρες πετρελαίου. Οι υπολογισμοί για την Αυστραλία βασίστηκαν σε δεδομένα πεδίου, για να γίνουν νέοι υπολογισμοί της ποσότητας του CO₂ που θα καταλάμβανε τον παραχθέντα όγκο κάτω από τις συνθήκες του ταμιευτήρα.

Η συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης σε γνωστά κοιτάσματα για τις ανωτέρω περιοχές, που έχει υπολογιστεί «από κάτω προς τα πάνω», είναι 170 Gt CO₂. Αν και δεν έχουν γίνει σχετικές αξιολογήσεις, είναι σχεδόν σίγουρο ότι υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες αποθήκευσης σε όλες τις περιοχές με κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου παγκοσμίως, όπως στη Μέση Ανατολή, τη Ρωσία, την Ασία, την Αφρική και τη Λατινική Αμερική.

Οι παγκόσμιες δυνατότητες για συνδυασμό CO₂-EOR υπολογίζεται ότι αντιστοιχούν σε χωρητικότητα γεωλογικής αποθήκευσης της τάξης των 61–123 Gt CO₂, αν και, με τον τρόπο που γίνεται σήμερα, ο συνδυασμός CO₂-EOR δεν μεγιστοποιεί την αποθήκευση του CO₂. Μάλιστα, η μέθοδος αυτή βελτιστοποιείται ώστε να μεγιστοποιούνται τα έσοδα από την παραγωγή πετρελαίου, γεγονός που σε πολλές περιπτώσεις υπαγορεύει την ελαχιστοποίηση του CO₂ που αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα (Kling, G. et al, 1987)..

Στο μέλλον αν η αποθήκευση του CO₂ αποκτήσει οικονομικό αντίκρουσμα, η κοινή βελτιστοποίηση της αποθήκευσης του CO₂ και των τεχνικών EOR ίσως αυξήσει τους υπολογισμούς χωρητικότητας. Σε Ευρωπαϊκές μελέτες χωρητικότητας, θεωρήθηκε πιθανό ότι θα υπάρχουν επιχειρήσεις EOR σε όλα τα κοιτάσματα πετρελαίου όπου αποθηκεύεται CO₂, επειδή έτσι θα υπήρχαν επιπλέον έσοδα. Ορισμένοι υπολογισμοί λαμβάνουν υπόψη διαφορετικούς παράγοντες ανάκτησης, βασισμένοι σε στοιχεία του API (Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου) για τη βαρύτητα του πετρελαίου. Για τον Καναδά και οι 10.000 ταμιευτήρες πετρελαίου του δυτικού Καναδά εξετάστηκαν ως προς την καταλληλότητά τους για τεχνικές EOR, με βάση κριτήρια που αναπτύχθηκαν από τη σχετική βιβλιογραφία. Όσοι ταμιευτήρες θεωρήθηκαν κατάλληλοι, εξετάστηκαν και περαιτέρω στους υπολογισμούς χωρητικότητας.

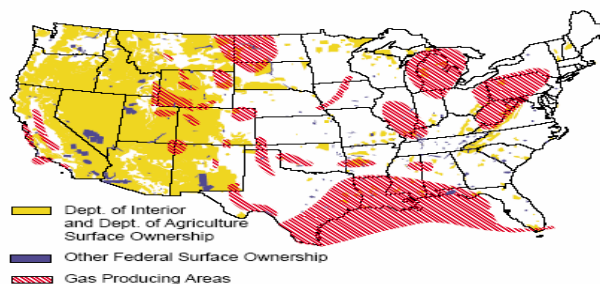
Οι υπολογισμοί της παγκόσμιας χωρητικότητας αποθήκευσης σε ταμιευτήρες πετρελαίου ποικίλλουν από τους 126 μέχρι τους 400 Gt CO₂. Οι αξιολογήσεις αυτές, που έχουν γίνει «από πάνω προς τα κάτω», συμπεριλαμβάνουν ταμιευτήρες που δεν έχουν ακόμα ανακαλυφθεί. Συγκριτικά, η παγκόσμια χωρητικότητα αποθήκευσης CO₂ σε ταμιευτήρες φυσικού αερίου υπολογίζεται ότι ανέρχεται στους 800 Gt CO₂. Επομένως συνολικά, η παγκόσμια χωρητικότητα αποθήκευσης σε ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου πιθανότατα ανέρχεται στους 675–900 Gt CO₂. Αν συμπεριληφθούν και τα άγνωστα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, η τιμή αυτή ανεβαίνει στους 900–1200 Gt CO₂, όμως μειώνονται αντίστοιχα οι πιθανότητες βεβαιότητας.

Για να γίνει η σύγκριση, πιο λεπτομερείς τοπικοί υπολογισμοί για τη βορειοδυτική Ευρώπη, τις Ηνωμένες Πολιτείες, την Αυστραλία και τον Καναδά υποδεικνύουν ότι η συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης στα υπάρχοντα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου ανέρχεται στους 170 Gt CO₂, που αντιστοιχεί στο 18,9% του παγκόσμιου συνόλου. Οι παγκόσμιες εκτιμήσεις που έχουν υπολογιστεί αναλογικά υποδεικνύουν ότι τα γνωστά αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου παγκοσμίως αντιστοιχούν σε χωρητικότητα 900 Gt CO₂ περίπου, τιμή που συγκρίνεται με τους ανωτέρω υπολογισμούς (800 Gt CO₂ για το φυσικό αέριο gas και 123 Gt CO₂ για το πετρέλαιο), και θεωρείται αξιόπιστη, αν και δεν έχει ληφθεί πάντα υπόψη η επίδραση των υδάτων.

Οι Εικόνες 6.4.α-γ απεικονίζουν την τοποθεσία ενεργών και εγκαταλελειμμένων αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, αλμυρών υδροφόρων στρωμάτων σε μεγάλο βάθος, και σχηματισμών ορυκτού άνθρακα στις ΗΠΑ. Η Εικόνα 6.4.γ απεικονίζει επίσης την τοποθεσία ενεργειακών εγκαταστάσεων που τροφοδοτούνται με φυσικά καύσιμα. Όπως φαίνεται από τους χάρτες των σχημάτων, υπάρχει ένας ή περισσότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί σε απόσταση κάτω των 500 χλμ. από κάθε εργοστάσιο ενέργειας που τροφοδοτείται με φυσικά καύσιμα στις ΗΠΑ.

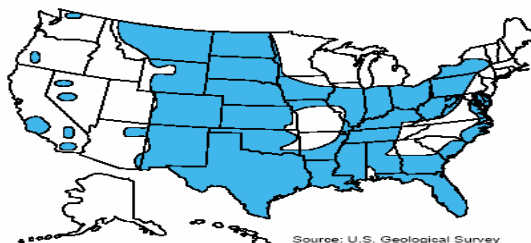
Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει εκτιμήσεις για τις δυνατότητες αποθήκευσης καθενός από αυτούς τους τύπους γεωλογικών σχηματισμών. Ενώ στις εκτιμήσεις αυτές το φάσμα είναι ευρύ και η αβεβαιότητα υψηλή, και σε ορισμένες περιπτώσεις δεν έχει ληφθεί υπόψη το κόστος, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις αυτές υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες για αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς.

Πιο συγκεκριμένα, οι ΗΠΑ βραχυπρόθεσμα έχουν αρκετή ποσότητα, ποικιλία, και ευρεία γεωγραφική κατανομή γεωλογικών σχηματισμών για να επιδιώξουν με βεβαιότητα τη γεωλογική αποθήκευση ως βασικό συστατικό της εθνικής στρατηγικής διαχείρισης του άνθρακα. Λιγότερο βέβαιες είναι οι συνολικές δυνατότητες αποθήκευσης CO₂ που μπορούν να προσφέρουν οι γεωλογικοί σχηματισμοί στους επόμενους αιώνες. Μόνο με την εμπειρία και με την εφαρμογή συστηματικών κριτηρίων επιλογής θα μπορέσουμε να αποκτήσουμε αρκετές γνώσεις για να αξιολογήσουμε τις τελικές δυνατότητες αποθήκευσης των γεωλογικών σχηματισμών.



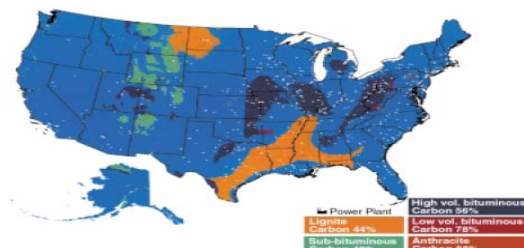
Εικόνα 6.4.α: Περιοχές που παράγουν φυσικό αέριο στις ΗΠΑ

Κίτρινο : Ιδιοκτησία επιφανειακού εδάφους: Υπ. Εσωτερικών και Υπ. Γεωργίας
 Μοβ : Ιδιοκτησία επιφανειακού εδάφους: Άλλοι ομοσπονδιακοί φορείς
 Ροζ : Περιοχές που παράγουν φυσικό αέριο



Εικόνα 6.4.β: Περιοχές αλμυρών υδροφόρων στρωμάτων σε μεγάλο βάθος στις ΗΠΑ

Εικόνα 6.4.γ: Περιοχές που παράγουν ορυκτό άνθρακα στις ΗΠΑ, και εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας *



(*) Εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας

- Λιγνίτης: Άνθρακας 44% (Ανοιχτό Πορτοκαλί)
- Υπο-ασφαλτούχος: Άνθρακας 40% (Πράσινο)
- Ασφαλτούχος υψηλής περιεκτικότητας: Άνθρακας 56% (Μοβ)
- Ασφαλτούχος χαμηλής περιεκτικότητας: Άνθρακας 78% (Κόκκινο)
- Ανθρακικός: Άνθρακας 68% (Πορτοκαλί)

Πηγή: Γεωλογική Μελέτη των ΗΠΑ

Γεωλογικός σχηματισμός	Εκτίμηση δυνατοτήτων (Gt C)	Πηγή
Αλμυρά υδροφόρα στρώματα σε μεγάλο βάθος	1-130	Bergman & Winter, 1995
Αποθέματα φυσικού αερίου στις ΗΠΑ	25 ^α 10 ^β	R.C. Burruss, 1977
Ενεργά αποθέματα φυσικού αερίου στις ΗΠΑ	0.3/έτος ^γ	Baes κ.ά., 1980
Βελτιωμένη παραγωγή μεθανίου ορυκτού άνθρακα στις ΗΠΑ	10	Stevens, Kruuskraa, & Spector, 1998

Πίνακας 6.1: Εκτιμήσεις για την αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς στις ΗΠΑ

6.5.1. Βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου

Το διοξείδιο του άνθρακα βελτιώνει την παραγωγή πετρελαίου χάρη σε δύο βασικούς μηχανισμούς. Πρώτον το αέριο CO₂ μετατοπίζει το πετρέλαιο και το αλμυρό νερό, τα οποία στη συνέχεια αντλούνται από τις γεωτρήσεις. Δεύτερον, το εισπνευσμένο CO₂ διαλύεται στο πετρέλαιο, μειώνοντας το ιξώδες και τη διόγκωση του πετρελαίου, διευκολύνοντας τη ροή του και βελτιώνοντας την παραγωγή. Το CO₂ που χρησιμοποιείται στις τεχνικές EOR συνήθως προέρχεται από φυσικές δεξαμενές CO₂, από τις οποίες μεταφέρεται με αγωγούς στην τοποθεσία των κοιτασμάτων του πετρελαίου, όπου και γίνεται η εισπίεσή του. Τελικά, τμήμα του εισπνευσμένου CO₂

παράγεται μαζί με το πετρέλαιο, διαχωρίζεται στην επιφάνεια, και επανεισπίζεται στον φυσικό ταμιευτήρα πετρελαίου. Οι τεχνικές EOR με εισπίεση CO₂ αποτελούν ένα παράδειγμα των ωφέλιμων χρήσεων του CO₂ και της λειτουργικής εμπειρίας για την αποθήκευση του CO₂ (Stevens, S. and J. Gale, 2000).

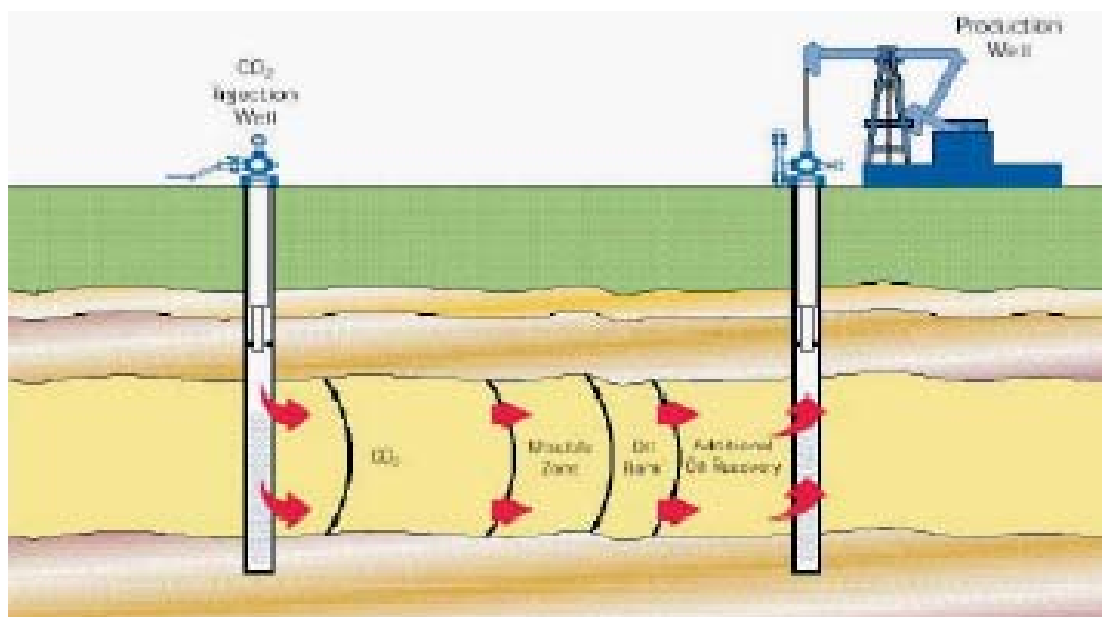
Η βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR) με πλημμυρισμό με CO₂ (μέσω εισπίεσης) παρουσιάζει δυνητικά οικονομικά οφέλη για την προσυζητημένη παραγωγή πετρελαίου. Από την αρχική ποσότητα πετρελαίου του κοιτάσματος, 5-40% ανακτάται με συμβατική πρωτογενή παραγωγή. Ένα επιπλέον 10-20% ανακτάται με δευτερογενή παραγωγή με πλημμυρισμό με νερό. Διάφορα αναμίξιμα στοιχεία, συμπεριλαμβανομένου και του CO₂, έχουν χρησιμοποιηθεί για βελτιωμένη (τριτογενή) ανάκτηση πετρελαίου (EOR), με προσυζητημένη ανάκτηση πετρελαίου κατά 7-23% (μέσος όρος 13,2%) της αρχικής ποσότητας πετρελαίου.

Έχουν προταθεί πολλά προγράμματα εισπίεσης CO₂, που συμπεριλαμβάνουν τη συνεχή εισπίεση CO₂ ή την εναλλαγή εισπίεσης CO₂ και νερού. Η μετατόπιση του πετρελαίου από την εισπίεση CO₂ βασίζεται στη συμπεριφορά φάσης του CO₂ και των μιγμάτων αργού πετρελαίου, που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση του ταμιευτήρα και τη σύσταση του αργού πετρελαίου. Οι μηχανισμοί αυτοί ποικίλλουν από τη διόγκωση και τη μείωση του ιξώδους του πετρελαίου για την εισπίεση αναμιξιμων υγρών (σε χαμηλές πιέσεις) μέχρι την απόλυτη αναμίξιμη μετατόπιση σε εφαρμογές υψηλής πίεσης (Stevens, S. and J. Gale, 2000).

Στις εφαρμογές αυτές, από 50 ως 67% του εισπνευσμένου CO₂ επιστρέφει με το παραγόμενο πετρέλαιο, και συνήθως διαχωρίζεται και επανεισπίζεται στον ταμιευτήρα, για να ελαχιστοποιηθεί το λειτουργικό κόστος. Το υπόλοιπο παγιδεύεται στον ταμιευτήρα με διάφορους τρόπους, όπως ο μη μειώσιμος κορεσμός και η διάλυση στο πετρέλαιο που μένει στον ταμιευτήρα και στους πόρους που δεν συνδέονται με τα μονοπάτια ροής των φρεατίων παραγωγής.

Για βελτιωμένη αποθήκευση CO₂ σε επιχειρήσεις EOR, τα κοιτάσματα πετρελαίου πρέπει να πληρούν επιπλέον κριτήρια. Γενικά, το βάθος του ταμιευτήρα πρέπει να υπερβαίνει τα 600m. Η εισπίεση αναμιξιμων υλικών συχνά πρέπει να επαρκεί για πετρέλαια μεγάλης – μεσαίας βαρύτητας (βαρύτητα πετρελαίου 12–25 API). Ο αναμίξιμος πλημμυρισμός, που είναι πιο επιθυμητός μπορεί να εφαρμοστεί σε ελαφριά πετρέλαια χαμηλού ιξώδους (βαρύτητα πετρελαίου 25–48 API). Για αναμίξιμο πλημμυρισμό, η πίεση του ταμιευτήρα πρέπει να υπερβαίνει την ελάχιστη πίεση αναμιξιμότητας (10–15 MPa), που απαιτείται για την επίτευξη αναμιξιμότητας μεταξύ του πετρελαίου και του CO₂, και η οποία εξαρτάται από τη σύσταση και τη βαρύτητα του πετρελαίου, τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα, και την καθαρότητα του CO₂.

Για να επιτευχθεί η αποτελεσματική απομάκρυνση του πετρελαίου, άλλα προτιμώμενα κριτήρια που ισχύουν και για τους δύο τρόπους πλημμυρισμού περιλαμβάνουν τις σχετικά λεπτές δεξαμενές (κάτω από 20 m), την υψηλή κλίση του ταμιευτήρα, την ομοιογένεια του σχηματισμού, και τη χαμηλή κάθετη διαπερατότητα. Για οριζόντιους ταμιευτήρες, προτιμάται η απουσία ροής φυσικών υδάτων μεγάλου καλύμματος αερίου και μεγάλων φυσικών ρωγμών. Το πάχος και η διαπερατότητα του ταμιευτήρα δεν αποτελούν παράγοντες κρίσιμης σημασίας (Stevens, S. and J. Gale, 2000).



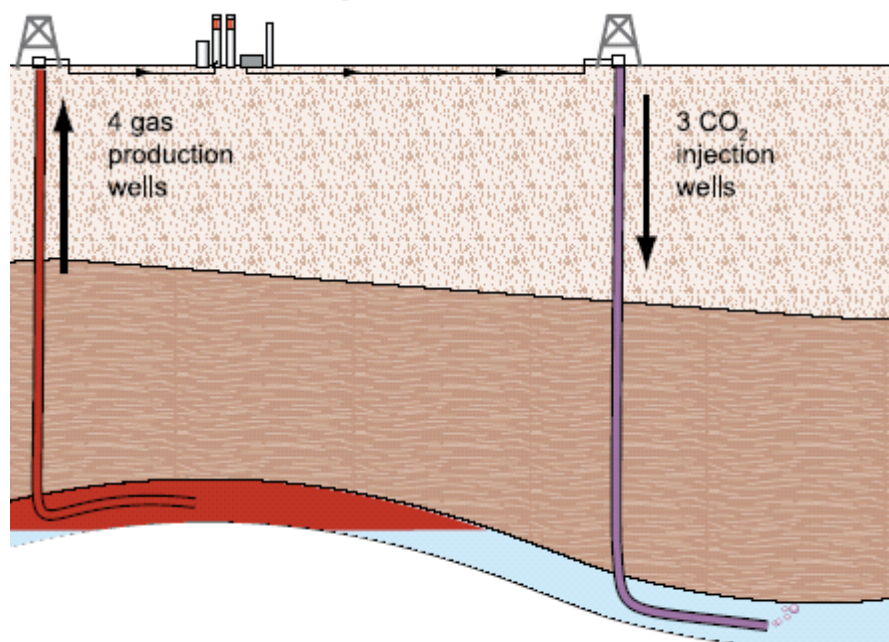
Εικόνα 6.5: Αναπαράσταση της τεχνικής EOR με χρήση εισπνεζόμενου CO₂

6.5.2. Βελτιωμένη ανάκτηση φυσικού αερίου

Αν και μπορεί να παραχθεί μέχρι και το 95% της αρχικής ποσότητας φυσικού αερίου, θα μπορούσε δυνητικά να εισπνεστεί CO₂ σε εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου για να βελτιωθεί η ανάκτηση του φυσικού αερίου μέσω της αύξησης της πίεσης. Μέχρι στιγμής, η βελτιωμένη ανάκτηση φυσικού αερίου έχει εφαρμοστεί μόνο πιλοτικά (πρόγραμμα K12B της Gaz de France, Ολλανδία, ατμόσφαιρα).

Το CO₂ μπορεί να δεσμευθεί σε δύο είδη αποθεμάτων φυσικού αερίου: (1) εγκαταλελειμμένα αποθέματα, και (2) εξαντλημένα αλλά ενεργά αποθέματα, στα οποία η ανάκτηση του φυσικού αερίου θα μπορούσε να βελτιωθεί με την εισπίεση CO₂. Το ποια εγκαταλελειμμένα αποθέματα φυσικού αερίου θα ήταν καλύτερο να χρησιμοποιηθούν σε ένα πρόγραμμα αποθήκευσης του CO₂ εξαρτάται από λεπτομερή μελέτη των συνθηκών που επικρατούν στα αποθέματα αυτά, και του οικονομικού κόστους της αποκατάστασής τους. Ο εντοπισμός εγκαταλελειμμένων γεωτρήσεων αποτελεί σκοπό για την αποθήκευση του CO₂ σε εγκαταλελειμμένα αποθέματα φυσικού αερίου (Beckman, K. L., et al 1995).

Σε σχεδόν εξαντλημένα αποθέματα φυσικού αερίου, είναι πιθανόν ότι η εισπίεση του CO₂ θα μπορούσε να επεκτείνει τη διάρκεια της οικονομικής ζωής τους, διατηρώντας τις πιέσεις του ταμιευτήρα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 6.6: Εισπίεση CO_2 σε ταμιευτήρα φυσικού αερίου (κόκκινο: φυσικό αέριο, μπλε: νερό, μοβ: CO_2)

6.5.3. Περίπτωση αποθήκευσης CO_2 σε ταμιευτήρα φυσικού αερίου

Εμπειρία αποθήκευσης CO_2 έχει η εταιρία Gaz de France, η οποία τα τελευταία 15 χρόνια κάνει μετατροπή προγραμμάτων αποθήκευσης φυσικού αερίου, ώστε να λειτουργούν με δύο είδη αερίου: φυσικό αέριο που εισπίζεται και αποσύρεται κυκλικά σύμφωνα με τις κυμαινόμενες ανάγκες, και αέριο χαμηλού κόστους, που λειτουργεί ως «μαξιλαράκι». Μπορεί να γίνει συνδυασμός της αποθήκευσης του CO_2 με τη βελτιωμένη παραγωγή φυσικού αερίου από εξαντλημένα κοιτάσματα.

Το CO_2 εισπίζεται σε μια από τις παράκτιες πλατφόρμες της εταιρείας GPN. Αυτή η πλατφόρμα, K12-B (λειτουργική από το 1987) είναι τοποθετημένη σε απόσταση περίπου 100 χλμ από την ακτή NW Van Helder. Ο ταμιευτήρας φυσικού αερίου K12-B σε περίπου 3800μ κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας περιέχει CO_2 περίπου 13%. Για να γίνει το αέριο εμπορεύσιμο, η περιεκτικότητα σε CO_2 πρέπει να μειωθεί σε 2%. Για αυτόν τον λόγο η πλατφόρμα είναι εξοπλισμένη με εγκαταστάσεις αποθήκευσης του CO_2 . Σε αυτές τις εγκαταστάσεις το CO_2 εξάγεται από το φυσικό αέριο με επεξεργασία σε διάλυμα αμινών (MDEA) (Beckman, K. L., et al 1995).

Από τον Μάιο του 2004 το δεσμευμένο CO_2 συμπιέζεται και εισπίζεται στον ίδιο ταμιευτήρα. Μέχρι τώρα το CO_2 εισπίζεται σε ένα μέρος του ταμιευτήρα που δεν παράγει άλλο, κατ' αυτό τον τρόπο η ανάμιξη με τα φρεάτια που παράγουν φυσικό αέριο αποφεύγεται. Από το ξεκίνημα το πρόγραμμα τρέχει πολύ καλά, κανένα σημαντικό πρόβλημα δεν προέκυψε (Jimenez, J. Et al, 2003).

Τον Μάρτιο του 2005 η GPN άρχισε το δεύτερο μέρος των πειραμάτων. Από τότε εισπίζεται CO_2 σε μέρος του ταμιευτήρα στο οποίο η παραγωγή συνεχίζεται. Αυτό θα παράσχει τη γνώση για το πώς το CO_2 θα αλληλεπιδράσει με τα παράγοντα φρεάτια. Θα δούμε την αύξηση της παραγωγής φυσικού αερίου ή θα δούμε μια άνοδο του επιπέδου του CO_2 στην παραγωγή; Επειδή αυτό είναι μια πειραματική δοκιμή το

ποσό εγχύσεων είναι περιορισμένο στους 20.000 τόνους CO₂/έτος. Σε ένα μεταγενέστερο στάδιο το ποσό μπορεί να φτάσει μέχρι 480.000 τόνους/έτος

Το πρόγραμμα χρηματοδοτείται 90% που από την κυβέρνηση και 10% από τη Gaz de France. Αυτό το πρόγραμμα είναι σημαντικό προκειμένου να αποδειχθεί ότι η μακροπρόθεσμη αποθήκευση στις δεξαμενές φυσικού αερίου είναι εφικτή.

6.6. Αποθήκευση του CO₂ σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες

Οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες αποτελούν το συνηθέστερο είδος ταμιευτήρα υγρών στο υπέδαφος, και τέτοιοι σχηματισμοί μεγάλου μεγέθους απαντώνται σχεδόν παντού. Οι πιο λογικοί στόχοι για την αποθήκευση είναι οι σχηματισμοί σε μεγάλο βάθος (>2000 πόδια), που δεν χρησιμοποιούνται. Οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες έχουν τη μεγαλύτερη δυνατή χωρητικότητα σε CO₂ και αποτελούν τη μεγαλύτερη πρόκληση από τις πιθανές εναλλακτικές της αποθήκευσης.

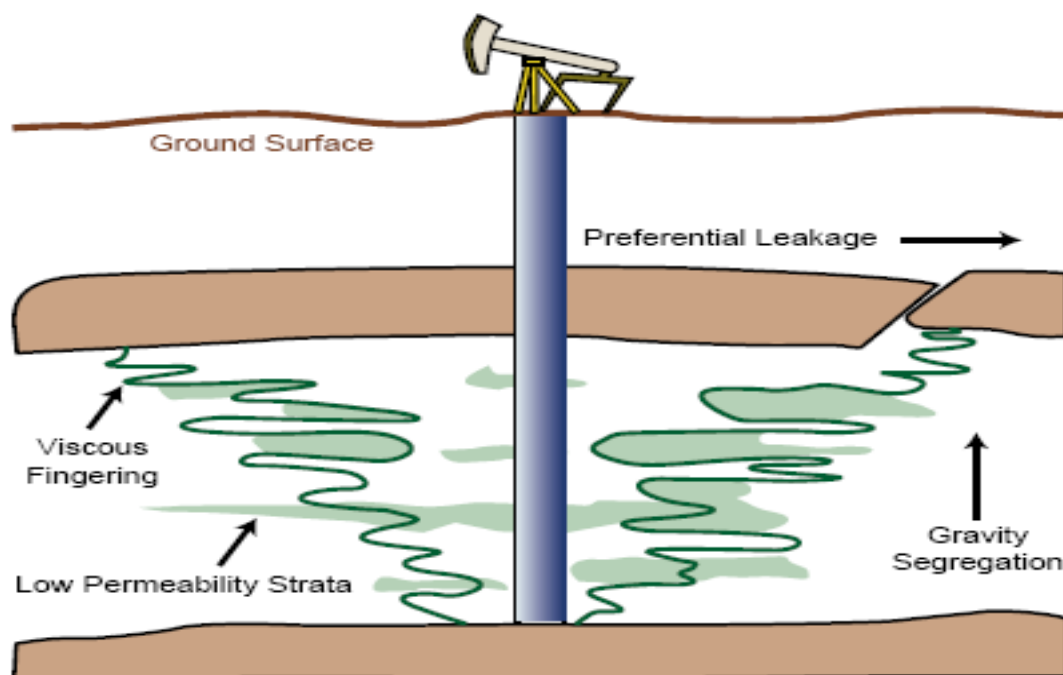
Η εισπίεση του CO₂ σε έναν σχηματισμό νερού έχει ως αποτέλεσμα την αδιάλυτη μετατόπιση μιας φάσης αλμυρού νερού, από μια φάση αερίου μικρότερης πυκνότητας και ιξώδους. Επειδή το CO₂ είναι υδατοδιαλυτό, τμήμα του εισπιασμένου CO₂ θα διαλυθεί στο νερό. Οι θερμικές και φυσικές ιδιότητες του νερού και του CO₂ που καθορίζουν τη συμπεριφορά της ροής – δηλαδή η πυκνότητα, το ιξώδες, και η διαλυτότητα – είναι γνωστές, όπως επίσης και ο βαθμός εξάρτησής τους από την πίεση, τη θερμοκρασία, και την αλατότητα. Η διαλυτότητα ισορροπίας του CO₂ στο νερό μειώνεται, με παράγοντα μείωσης 6-10 στους 150 °C, και μάλιστα μειώνεται ανάλογα με την αλατότητα του υδροφορέα (“salting out”). Ο ρυθμός διάλυσης του CO₂ στο νερό εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα της επιφάνειας επαφής του νερού και του φυσικού αερίου, και μπορεί να υπόκειται σε αυξημένη αβεβαιότητα.

Οι σχηματισμοί αλμυρών υδάτων είναι βαθιά ιζηματογενή πετρώματα κορεσμένα με ύδατα ή αλατόνερο, που περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένων αλάτων. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι αρκετά διαδεδομένοι και περιέχουν τεράστιες ποσότητες υδάτων, οι οποίες όμως δεν είναι κατάλληλες για γεωργία ή ανθρώπινη κατανάλωση. Τα αλμυρά ύδατα χρησιμοποιούνται τοπικά από τη χημική βιομηχανία, και τα ύδατα ποικίλλης αλατότητας του σχηματισμού χρησιμοποιούνται σε λουτρά σε κέντρα υγείας και στην παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας.

Επειδή η χρήση γεωθερμικής ενέργειας ενδέχεται να αυξηθεί, οι δυναμικές τοποθεσίες γεωθερμικής ενέργειας δεν ενδείκνυνται για αποθήκευση CO₂. Ίσως είναι εφικτός ο συνδυασμός της γεωλογικής αποθήκευσης και της παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας, γενικά όμως οι περιοχές που έχουν καλές δυνατότητες γεωθερμικής ενέργειας δεν είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για γεωλογική αποθήκευση CO₂, εξαιτίας του υψηλού βαθμού ρωγμών και της οξείας αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος. Σε πολύ ξηρές περιοχές, οι αλατούχοι υδροφορείς μεγάλου βάθους ίσως μελλοντικά εξεταστούν για την περίπτωση αφαλάτωσης.

Ο ρυθμός απορρόφησης του CO₂ από το νερό μπορεί να αυξηθεί πέρα από τις ιδιότητες της φυσικής διαλυτότητας, με την επίδραση ανθρακικών ορυκτών. Ορυκτά όπως ο ασβεστίτης διαλύονται αντιδρώντας στην εισπίεση του CO₂. Είναι δυνατόν να αυξηθεί κατά πολύ η χωρητικότητα αποθήκευσης χάρη σε ετερογενείς αντιδράσεις με πυριτικό αργίλιο («ορυκτή παγίδευση»). Σύμφωνα με ενδείξεις, η κινητική των αντιδράσεων με τα ανθρακικά πετρώματα ενδέχεται να είναι ταχύτερη, ενώ η κινητική των αντιδράσεων με το πυριτικό αργίλιο μοιάζει να είναι πιο αργή και η ουσιαστική πρόοδος της αντίδρασης χρειάζεται δεκαετίες ή ίσως και αιώνες.

Επειδή το CO₂ έχει αρκετά χαμηλότερη πυκνότητα και ιξώδες από το νερό, η εισπίεση του CO₂ σε υδροφορείς θα υπόκειται σε υδροδυναμική αστάθεια. Η διαφορά του ιξώδους θα οδηγήσει σε ιξώδεις δακτύλους, και η διαφορά της πυκνότητας θα οδηγήσει σε διαχωρισμό βαρύτητας. Οι ακριβείς λεπτομέρειες των φαινομένων αυτών θα εξαρτώνται από την κατανομή της διαπερατότητας στο χώρο της τοποθεσίας αποθήκευσης, και από το ρυθμό της εισπίεσης (Σχήμα 4.4). Η επίδραση αυτών των περίπλοκων φαινομένων μπορεί να είναι σημαντική για τον καθορισμό της σχετικής σημασίας των τριών βασικών μηχανισμών παγίδευσης.



Εικόνα 6.7: Διαχωρισμός βαρύτητας, ιξώδεις δάκτυλοι, ετερογένεια, και προτιμώμενα μονοπάτια ροής μέσα από πετρώματα καλύμματος καθίζησης θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαφυγή του CO₂ στην επιφάνεια.

1. Επιφάνεια του εδάφους
2. Ιξώδεις δάκτυλοι
3. Στρώματα χαμηλής διαπερατότητας
4. Προτιμώμενα μονοπάτια διαρροής
5. Διαχωρισμός βαρύτητας

Η εμπειρία από την αποθήκευση του φυσικού αερίου σε υδροφόρους και μελέτες, δείχνουν ότι από μηχανική άποψη, τα κυριότερα θέματα της αποθήκευσης του CO₂ αφορούν:

- (1) το ρυθμό της αποθήκευσης του CO₂,
- (2) τη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης (τελικός υπολογισμός του αποθηκευμένου CO₂),
- (3) την ύπαρξη ενός υπερκείμενου πετρώματος χαμηλής διαπερατότητας, και τις πιθανές διαρροές του CO₂ λόγω περιορισμού,
- (4) τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό κατάλληλων υδροφόρων σχηματισμών και δομών των υπερκειμένων,

(5) την αβεβαιότητα που οφείλεται στις ατελείς γνώσεις για τις συνθήκες και τις γεωλογικές διαδικασίες του υπεδάφους, και

(6) την αντίσταση στη διάβρωση των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν σε γεωτρήσεις εισπίεσης και άλλες σχετικές εγκαταστάσεις. Δύο βασικά θέματα διαχωρίζουν την αποθήκευση του CO₂ σε υδροφορείς από τη δέσμευσή του σε φυσικές δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Πρώτον, οι φυσικοί ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου εμφανίζονται χάρη στην ύπαρξη μιας δομικής ή στρωματογραφικής παγίδας. Η ίδια παγίδα ενδέχεται να συγκρατήσει το CO₂. Ο εντοπισμός τέτοιων αποτελεσματικών παγίδων μπορεί να είναι δυσκολότερος για τους σχηματισμούς αλμυρού νερού, και μπορεί να απαιτεί νέες προσεγγίσεις για την επαλήθευση της ακεραιότητας και της έκτασης του υπερκείμενου πετρώματος (Beckman, K. L., et al 1995).

Δεύτερον, η εισπίεση του CO₂ σε έναν αλμυρό σχηματισμό δεν είναι πιθανόν να συνοδεύεται από την αφαίρεση νερού από το σχηματισμό. Η εισπίεση επομένως θα οδηγήσει στην αύξηση της πίεσης στην ευρύτερη περιοχή. Για να μπορέσουν να σχεδιαστούν ασφαλείς και αποδοτικές μέθοδοι αποθήκευσης, πρέπει να γίνει κατανοητό καλύτερα κατά πόσον η αύξηση της πίεσης σε ευρεία κλίμακα θα επηρεάσει την ακεραιότητα του πετρώματος καλύμματος, θα επιφέρει παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους και θα προκαλέσει σεισμικότητα.

Ένα άλλο θέμα που αφορά την αποθήκευση σε σχηματισμούς αλμυρού νερού είναι ο αποδεκτός ρυθμός διαρροής του CO₂ από το σχηματισμό στα ανώτερα στρώματα. Η διαρροή του CO₂ μπορεί να μην αποτελεί κίνδυνο ασφάλειας, ίσως σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι επιθυμητή, καθώς η διαρροή σε ανώτερα στρώματα αυξάνει τις πιθανότητες βελτιωμένης διαλυτότητας ή ορυκτής παγίδευσης. Η αξιολόγηση του αποδεκτού ρυθμού διαρροής, τόσο γενικά όσο και συγκεκριμένα για την κάθε τοποθεσία αποθήκευσης, θα έπρεπε να αποτελεί τμήμα μιας μακροχρόνιας στρατηγικής για την αποθήκευση του CO₂ σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες.

6.6.1. Αποθήκευση σε αλατούχους σχηματισμούς μεγάλου βάθους

Οι αλατούχοι υδροφορείς εμφανίζονται σε ιζηματογενείς λεκάνες σε όλο τον κόσμο, τόσο στην στεριά όσο και στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα και δεν περιορίζονται σε κοιτάσματα υδρογονανθράκων ή ορυκτού άνθρακα. Ωστόσο, ο υπολογισμός της χωρητικότητας αποθήκευσης CO₂ για τους αλατούχους υδροφορείς μεγάλου βάθους σήμερα αποτελεί πρόκληση για τους εξής λόγους:

- Υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί αποθήκευσης, που συμπεριλαμβάνουν τη φυσική παγίδευση κάτω από πέτρωμα καλύμματος χαμηλής διαπερατότητας, τη διάλυση και την ορυκτοποίηση.
- Οι μηχανισμοί αυτοί λειτουργούν τόσο ταυτόχρονα όσο και σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, και το χρονικό διάστημα της αποθήκευσης του CO₂ επηρεάζει τους υπολογισμούς χωρητικότητας. Αρχικά είναι εξίσου σημαντική η ογκομετρική αποθήκευση, όμως αργότερα το CO₂ διαλύεται και αντιδρά με τα ορυκτά.
- Οι σχέσεις και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανισμών αυτών είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες, εξελίσσονται με τον χρόνο, και εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες σε μεγάλο βαθμό.

- Δεν υπάρχει συνοχή στις διαθέσιμες μεθόδους υπολογισμού της χωρητικότητας αποθήκευσης CO₂ (οι διάφορες μελέτες χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους, που δεν επιτρέπουν σύγκριση).
- Συνήθως είναι περιορισμένα τα δεδομένα για σεισμική δραστηριότητα και για τα φρεάτια (αντίθετα με τα δεδομένα των δεξαμενών πετρελαίου και φυσικού αερίου).

Για να γίνουν κατανοητές οι δυσκολίες αξιολόγησης της χωρητικότητας αποθήκευσης CO₂ σε αλατούχους υδροφορείς μεγάλου βάθους, πρέπει πρώτα να γίνει ακριβής η σχέση αλληλεξάρτησης μεταξύ των διαφόρων μηχανισμών παγίδευσης που διέπουν ένα ρεύμα εισπιασμένου CO₂. Επιπλέον, η χωρητικότητα αποθήκευσης των αλατούχων υδροφορέων μεγάλου βάθους καθορίζεται για κάθε ταμειωτήρα χωριστά.

Μέχρι σήμερα, οι περισσότεροι υπολογισμοί της χωρητικότητας αποθήκευσης CO₂ σε αλατούχους υδροφορείς μεγάλου βάθους επικεντρώνονται στη φυσική παγίδευση ή/και τη διάλυση. Οι υπολογισμοί αυτοί υποθέτουν απλοποιημένα ότι δεν λαμβάνουν χώρα γεωχημικές αντιδράσεις ταυτόχρονα με την εισπίεση, τη ροή, και τη διάλυση του CO₂.

Πρόσφατες έρευνες προτείνουν ότι τα αποτελέσματα των γεωχημικών αντιδράσεων χρειάζονται αρκετές χιλιάδες χρόνια μέχρι να έχουν σημαντική επίδραση. Η χωρητικότητα αποθήκευσης CO₂ από την ορυκτή παγίδευση μπορεί να συγκριθεί με τη χωρητικότητα σε διάλυμα ανά μονάδα όγκου του ιζηματογενούς πετρώματος, όταν λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη πόρων στο σχηματισμό, αν και οι ρυθμοί και τα χρονικά πλαίσια των δύο αυτών διαδικασιών διαφέρουν.

Η χωρητικότητα αποθήκευσης CO₂ από την ορυκτή παγίδευση μπορεί να συγκριθεί με τη χωρητικότητα σε διάλυμα ανά μονάδα όγκου του ιζηματογενούς πετρώματος, όταν λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη πόρων στο σχηματισμό, αν και οι ρυθμοί και τα χρονικά πλαίσια των δύο αυτών διαδικασιών διαφέρουν), γεγονός που αντανακλά τόσο τις διαφορετικές υποθέσεις στις οποίες βασίστηκαν οι υπολογισμοί, όσο και την αβεβαιότητα των παραμέτρων. Οι περισσότεροι υπολογισμοί μιλάνε για αρκετές εκατοντάδες Gt CO₂. Οι υπολογισμοί ογκομετρικής χωρητικότητας που βασίζονται σε τοπικές αριθμητικές προσομοιώσεις κλίμακας λεκάνης για την εισπίεση του CO₂ προτείνουν ότι το CO₂ θα καταλάβει το χώρο των πόρων σε μικρό ποσοστό, εξαιτίας του διαχωρισμού βαρύτητας και των ιζώδων δακτύλων.

Ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποίησαν τη μέθοδο προβολής των αποθεμάτων φυσικών πόρων ανά περιοχή και υποθέτουν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση CO₂ στο 1% του συνολικού όγκου των ιζηματογενών λεκανών του κόσμου, ενώ άλλες μελέτες θεωρούν ότι το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 2-6% του όγκου του σχηματισμού. Ωστόσο, έχει ήδη αποδειχτεί ότι δεν υπάρχει συσχετισμός ανάμεσα στη γεωγραφική περιοχή μιας ιζηματογενούς λεκάνης και τη χωρητικότητά της είτε για υδρογονάνθρακες (αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου) είτε για αποθήκευση CO₂.

Έχει υπολογιστεί ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης της Ευρώπης ανέρχεται στους 30–577 Gt CO₂. Βασικοί παράγοντες αβεβαιότητας για την Ευρώπη είναι ο υπολογισμός της παγιδευόμενης ποσότητας (που εκτιμάται στα 3%) και της αποτελεσματικότητας της αποθήκευσης, που εκτιμάται στα 2-6% (2% για κλειστούς υδροφορείς με εμπόδια διαπερατότητας, 6% για ανοιχτούς υδροφορείς με σχεδόν απεριόριστη έκταση, και 4% αν δεν είναι γνωστό αν ο υδροφορέας είναι ανοιχτός ή κλειστός).

Θεωρείται ότι ο όγκος στις παγίδες είναι ανάλογος με τον συνολικό όγκο των πόρων, όμως αυτό μπορεί να μην ισχύει. Οι πρώτες εκτιμήσεις για τη συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης CO₂ σε αλατούχους υδροφορείς μεγάλου βάθους στις

ΗΠΑ υποδείκνυαν ότι το σύνολο ανερχόταν στους 500 Gt CO₂. Πιο πρόσφατοι υπολογισμοί της χωρητικότητας ενός μόνο σχηματισμού στις ΗΠΑ, του Όρους Simon Sandstone, μιλούν για χωρητικότητα 160–800 Gt CO₂, γεγονός που υποδεικνύει ότι η συνολική χωρητικότητα των Ηνωμένων Πολιτειών ενδέχεται να υπερβαίνει τις πρώτες εκτιμήσεις.

Αν υποθεθεί ότι το CO₂ θα διαλυθεί μέχρι κορεσμού σε όλους τους σχηματισμούς μεγάλου βάθους, υπολογίζεται ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης της λεκάνης της Αλμπέρτα στο δυτικό Καναδά είναι 4.000 Gt CO₂ περίπου. Η τιμή αυτή αποτελεί θεωρητικό μέγιστο, γιατί υποθέτει ότι όλο το νερό των πόρων της λεκάνης της Αλμπέρτα θα μπορούσε να κορεστεί με CO₂, γεγονός που δεν είναι ιδιαίτερα πιθανό.

Για την Αυστραλία, οι υπολογισμοί χωρητικότητας αποθήκευσης ύψους 740 Gt CO₂ καθορίστηκαν με τη μέθοδο των συσσωρευτικών κινδύνων χωρητικότητας για 65 πιθανές τοποθεσίες σε 48 λεκάνες. Η συνολική χωρητικότητα της Ιαπωνίας έχει υπολογιστεί στους 1.5–80 Gt CO₂, κυρίως σε υποθαλάσσιους σχηματισμούς.

Στα ανωτέρω ευρέα φάσματα, η κατώτερη τιμή συνήθως αντιστοιχεί στην εκτιμώμενη χωρητικότητα αποθήκευσης των ογκομετρικών παγίδων στους αλατούχους υδροφορείς μεγάλου βάθους, όπου θα μπορούσε να συσσωρευτεί το CO₂ ελεύθερης φάσης. Η ανώτερη τιμή βασίζεται σε επιπρόσθετους μηχανισμούς αποθήκευσης, κυρίως τη διάλυση αλλά και την ορυκτή παγίδευση. Οι διαφορετικές μεθοδολογίες και δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτές τις εκτιμήσεις χωρητικότητας υποδεικνύουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας ως προς τον υπολογισμό της τοπικής ή παγκόσμιας χωρητικότητας σε αλατούχους υδροφορείς μεγάλου βάθους.

Στα παραδείγματα της Ευρώπης και της Ιαπωνίας, η ανώτερη εκτίμηση είναι 15 με 50 φορές μεγαλύτερη από την κατώτερη τιμή. Με παρόμοιο τρόπο, οι εκτιμήσεις της παγκόσμιας χωρητικότητας αποθήκευσης CO₂ επιδεικνύουν ευρύ φάσμα, 100–200,000 Gt CO₂, που αντανάκλα τις διαφορετικές μεθοδολογίες, τα επίπεδα αβεβαιότητας, και το ρόλο των διαφορετικών αποτελεσματικών μηχανισμών παγίδευσης.

6.6.2. Μία περίπτωση αποθήκευσης CO₂ σε βαθύ αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα

Μία περίπτωση αποθήκευσης σε βαθύ αλατούχο υδροφόρο είναι αυτή του ταμιευτήρα φυσικού αερίου Seipner West, ενός από τους μεγαλύτερους στη Βόρεια Θάλασσα. Το φυσικό αέριο που παράγεται εμπεριέχει ως και 9% CO₂, όμως για να είναι οικονομικά εξαγώγιμο και να πληρούνται οι απαιτήσεις των πελατών, θα πρέπει να μειωθεί στο επίπεδο του 2.5%. Σύμφωνα με τη παρούσα παραγωγή αυτό αναλογεί σε εξαγωγή 1 εκατομμύρια τόνων το χρόνο CO₂.

Το Πρόγραμμα Sleipner στη Βόρεια Θάλασσα αποτελεί το καλύτερο διαθέσιμο παράδειγμα προγράμματος αποθήκευσης CO₂ σε αλμυρό σχηματισμό. Ήταν το πρώτο πρόγραμμα εμπορικής κλίμακας για γεωλογική αποθήκευση του CO₂. Περίπου 1 Mt CO₂ απομακρύνεται ετησίως από το παραγόμενο φυσικό αέριο και εισπνέζεται στο υπέδαφος στο Sleipner. Η επιχείρηση ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 1996 και αναμένεται ότι θα έχουν αποθηκευτεί 20 Mt CO₂ μέχρι το τέλος του προγράμματος.

Το CO₂ εισπνέζεται σε χαλαρά αμμώδη πετρώματα στα 800–1000m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Ο ψαμμίτης περιέχει δευτερεύοντα λεπτά στρώματα αργίλου ή σχιστόλιθου, που επηρεάζουν την εσωτερική μετακίνηση του εισπνιζόμενου CO₂. Το βασικό πέτρωμα καλύμματος είναι ένα εκτεταμένο και παχύ στρώμα αργίλου ή σχιστόλιθου.

Ο αλμυρός σχηματισμός στον οποίο εισπιάζεται το CO₂ έχει πολύ μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης. Η μεταφορά και τελική κατάσταση του CO₂ στο Sleipner έχει αποτελέσει αντικείμενο επιτυχούς παρακολούθησης από μακροχρόνιες σεισμικές έρευνες. Οι έρευνες αυτές συνεισέφεραν στη βελτίωση του θεωρητικού μοντέλου για τη μεταφορά και τελική κατάσταση του αποθηκευμένου CO₂. Εικόνες της κάθετης τομής του ρεύματος του CO₂ δείχνουν τόσο την ανοδική μετακίνηση του CO₂ (εξαιτίας των δυνάμεων άνωσης) όσο και το ρόλο των στρωμάτων χαμηλής διαπερατότητας μέσα στο σχηματισμό, που εκτρέπουν τμήμα του CO₂ εγκάρσια, διασκορπίζοντάς το σε μεγαλύτερη έκταση.

Οι έρευνες δείχνουν επίσης ότι το πέτρωμα καλύμματος εμποδίζει τη μετακίνηση έξω από το σχηματισμό αποθήκευσης. Σεισμικά δεδομένα αποδεικνύουν τη σταδιακή αύξηση του ρεύματος CO₂. Σήμερα, το ρεύμα CO₂ στο Sleipner καταλαμβάνει έκταση 5 km περίπου. Μελέτες και προσομοιώσεις του ταμιευτήρα έχουν δείξει ότι το κορεσμένο με CO₂ αλατόνερο τελικά γίνεται πυκνότερο και βυθίζεται, εξαλείφοντας την πιθανότητα μακροπρόθεσμης διαρροής.

Με τις συνήθειες πρακτικές αυτή η ποσότητα CO₂ θα διέφευγε προς την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα την άνοδο της εκπομπής CO₂ ης Νορβηγίας κατά 3%. Για να πετύχει η εταιρεία τους στόχους των εθνικών εκπομπών και να αποφύγει τους φόρους του CO₂ η Statoil μια από τις μεγαλύτερες παραγωγούς εταιρείες πετρελαίου και φυσικού αερίου, χρησιμοποίησε τη στρατηγική της αποθήκευσης σε βαθύ σχηματισμό αλμυρού νερού για το ταμιευτήρα Sleipner.

Η παραγωγή φυσικού αερίου άρχισε στον ταμιευτήρα το 1996 με το παραγόμενο CO₂ να εισπιάζεται στον υδροφόρο Utsira περίπου 800 μέτρα κάτω από το βυθό της Β. Θάλασσας. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι σήμερα και αποτελεί το πρώτο εμπορικό πρόγραμμα μεγάλης κλίμακας υπόγειας αποθήκευσης CO₂ για την αποφυγή κλιματικών αλλαγών. Με τη διαδικασία αυτή η εταιρία απέφυγε υψηλή φορολογία.

Η Statoil διαχειρίζεται τον ταμιευτήρα Sleipner εκ μέρους μίας ομάδας βιομηχανικών εταιρών που παράγουν φυσικό αέριο. Όμως για την πώληση του απαιτείται ο καθαρισμός του ώστε η σχετικά υψηλή περιεκτικότητα του σε CO₂ ~9%, σε ~2.5%. Ο διαχωρισμό από το ρεύμα φυσικού αερίου γίνεται με απορρόφηση του CO₂ σε πύργους διαχωρισμού, ύψους περίπου 20 μέτρων. Τότε το CO₂ που διαχωρίζεται εισπιάζεται στον αλατούχο υδροφόρο Utsira. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αμελητέα εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα. Το πρόγραμμα του ταμιευτήρα Sleipner υπήρξε καινοτόμο στην βιομηχανική ιστορία καθώς ήταν η πρώτη μεγάλης κλίμακας χρησιμοποίηση της τεχνολογίας αποθήκευσης CO₂ (~1 mt CO₂/έτος), αλλά και η πρώτη εκτός ξηράς συμπίεση και εισπίεση CO₂.

ΟΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΥΤΙΚΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ SLEIPNER

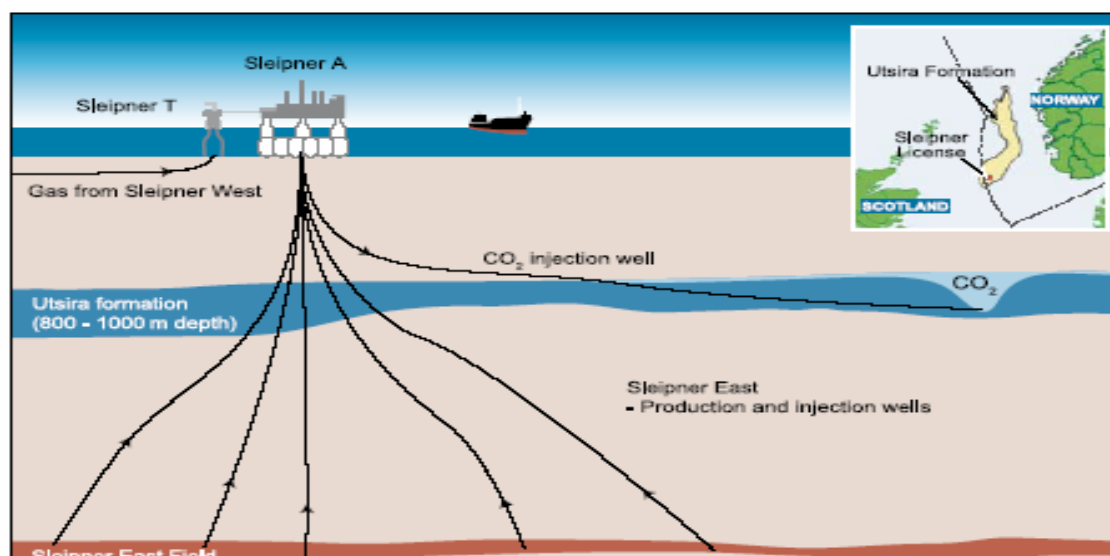
Οι εγκαταστάσεις του δυτικού ταμιευτήρα Sleipner αποτελούνται από δύο κύριες μονάδες την πλατφόρμα Sleipner B (SLB), και την Sleipner T (SLT) την πλατφόρμα εξυγίανσης (treatment), οι οποίες συνδέονται με τις εγκαταστάσεις του Ανατολικού πεδίου. Η SLT συνδέεται φυσικά με την πλατφόρμα Sleipner A από μια γέφυρα. Αλλα μεγαλύτερα συστατικά μέρη της ανάπτυξης περιλαμβάνουν μια γραμμή ροής 12,5 χιλιομέτρου από την SLB στην SLT. Η πλατφόρμα πηγών είναι τηλεχειριζόμενη από το δωμάτιο ελέγχου Sleipner A (SLA) μέσω μιας καλωδιακής γραμμής

Η διαδικασία απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα που χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει το CO₂ από το ρεύμα φυσικού αερίου υψηλής πίεσης είναι βασισμένη στην χρήση αμινών. Το ρεύμα του φυσικού αερίου εισέρχεται από τον πάτο και εξέρχεται από τη κορυφή των δύο συνδεδεμένων πύργων. Το διάλυμα των αμινών (MDEA και νερό) έχει αντίστροφη ροή και όταν εξέρχεται από τα πύργους, έχει απορροφήσει την κύρια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα. Στα επόμενα στάδια αφαιρείται το συλλεχθέν CO₂, κυρίως από την **flash regeneration**. Ο χωρισμός του CO₂ από το διάλυμα αμινών πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό που βρίσκεται σε μια από τις μονάδες της SLT, σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται οι ανταλλάκτες θερμότητας, τα σκάφη πίεσης, οι δεξαμενές αποθήκευσης, οι αντλίες, οι στροβίλοι Pelton και τα φίλτρα. Η αμίνη διανέμεται εκ νέου έπειτα στους δύο πύργους για την περαιτέρω αφαίρεση του CO₂ από το φυσικό αέριο. Η ενέργεια που απελευθερώνεται με τη διαδικασία επεξεργασίας αμινών καταναλώνεται από δύο γεννήτριες, που παράγουν 6 MW της δύναμης, που χρησιμοποιείται στην πλατφόρμα. Η μονάδα διοξειδίου του άνθρακα ζυγίζει ~8200 τόνους και έχει ύψος 35 μέτρα. Οι γενικές δαπάνες ανήλθαν σε περίπου 350 εκ. ευρώ. Η άλλη μονάδα SLT χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του φυσικού αερίου. Μετά από την αφαίρεση του CO₂, το φυσικό αέριο μεταφέρεται στην SLA για εξαγωγή στην ηπειρωτική Ευρώπη και επίσης, για την είσπωση στο υδροφόρο στρώμα Utsira. Ένα ποσοστό του παραχθέντος φυσικού αερίου επανεισάγεται στην ανατολική ταμειυτήρα Sleipner ταμειυτήρα προκειμένου να βελτιωθεί η γενική παραγωγή. Αδειούχοι για το πρόγραμμα του ταμειυτήρα Sleipner West είναι η Statoil με 49.50%, η Esso Norge με 32.24%, η Norsk Hydro με 8.85% και η TotalFinaElf Exploration Norge με 9.41%.

Ο ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ UTSIRA

Ο σχηματισμός Utsira είναι ένας ογκώδης σχηματισμός ψαμμίτη πάχους 200-250m, που βρίσκεται σε βάθος 800-1000m κάτω από το βυθό. Επιλέχθηκε ως ταμειυτήρας για την αποθήκευση του CO₂ που παρήχθη από το δυτικό ταμειυτήρα Sleipner. Το διοξείδιο του άνθρακα που εξαγεται από τη παραγωγή φυσικού αερίου στη Sleipner εισπνέζεται και αποθηκεύεται στο σχηματισμό Utsira 1.000 μέτρα κάτω από το βυθό, παρά απελευθερωμένος στον αέρα. Αυτό γίνεται από ένα σύστημα συμπίεσης και εισπίεσης του CO₂ τεσσάρων σταδίων. Ένα εκατομμύριο τόνοι του διοξειδίου του άνθρακα αποθηκεύονται στο υπέδαφος ετησίως. Υπολογίζεται ότι ο σχηματισμός Utsira είναι σε θέση να αποθηκεύσει μέχρι 600 δισεκατομμύρια τόνους CO₂.

Το διαχωρισμένο CO₂ εγχέεται σε μικρή "δομική ενότητα" βορειοανατολικά της πλατφόρμας SLA. Το CO₂ που δεν διαλύεται στο νερό του σχηματισμού, συλλαμβάνεται μέσα σε αυτήν την ενότητα. Όταν γεμίσει το CO₂ αναμένεται να διαφύγει προς το Βορρά. Το αέριο δεν αναμένεται να φθάσει στη θέση της πλατφόρμας SLA αποφεύγοντας έτσι τα προβλήματα διάβρωσης που σχετίζονται με την εισπίεση CO₂. Τα τρισδιάστατα σεισμικά στοιχεία που καλύπτουν την ανατολική περιοχή Sleipner έχουν χρησιμοποιηθεί για να χαρτογραφηθεί ο σχηματισμός Utsira. Η σεισμική απάντηση αντιπροσωπεύει τις αλλαγές "στη σύνθετη αντίσταση" στο γεμάτο με νερό ταμειυτήρα. Η σύνθετη αντίσταση επηρεάζεται από το CO₂ που εγχέεται στον ταμειυτήρα. Αυτή η αλλαγή στη σεισμική σύνθετη αντίσταση είναι προφανής στα νέα σεισμικά στοιχεία. Η παρουσία του CO₂ και η μετακίνηση του αερίου CO₂ στον ταμειυτήρα σχηματισμού Utsira μπορούν επομένως να ελεγχθούν από την εξέταση των πιο πρόσφατων σεισμικών στοιχείων.



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα της αποθήκευσης CO₂ στο σχηματισμό Utsira στο ταμιευτήρα παραγωγής φυσικού αερίου Sleipner.

6.7. Αποθήκευση του CO₂ σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα

Το CO₂ εισάγεται σε κοιτάσματα άνθρακα, απορροφάται από τις επιφάνειες των στρωμάτων άνθρακα ελευθερώνοντας μεθάνιο το οποίο μπορεί έπειτα να ανακτηθεί σαν ελεύθερο αέριο. Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι τα κοιτάσματα αυτά μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες CO₂ από τον ισοδύναμο όγκο ενός συμβατικού ταμιευτήρα λόγω του ότι ο άνθρακας έχει μεγαλύτερες περιοχές επιφάνειας.

Τα κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα μας παρέχουν την ευκαιρία να δεσμεύσουμε CO₂ και ταυτόχρονα να αυξήσουμε την παραγωγή μεθανίου. Η παραγωγή μεθανίου από βαθιά στρώματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα, στα οποία δεν μπορεί να γίνει εξόρυξη, μπορεί να βελτιωθεί με την εισπίεση CO₂ στα κοιτάσματα, όπου η προσρόφηση του CO₂ προκαλεί την εκρόφηση μεθανίου. Η διαδικασία αυτή παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλου όγκου CO₂, ενώ βελτιώνει και την αποτελεσματικότητα και την οικονομική αποδοτικότητα των εμπορικών επιχειρήσεων φυσικού αερίου.

6.7.1. Κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα

Ο ορυκτός άνθρακας περιέχει ρωγμές (τομές) που δίνουν κάποια διαπερατότητα στο σύστημα. Ανάμεσα στις ρωγμές αυτές, ο στερεός άνθρακας περιέχει πολύ μεγάλο αριθμό μικροπόρων, στους οποίους μπορούν να διασκορπιστούν και να προσροφηθούν τα μόρια του αερίου. Ο ορυκτός άνθρακας μπορεί να προσροφήσει πολλά αέρια φυσικά, και μπορεί να περιέχει μέχρι 25 κανονικά m³ (m³ υπό συνθήκες 1 και 0°C) μεθανίου ανά τόνο άνθρακα, υπό την πίεση που υφίστανται τα κοιτάσματα. Έχει μεγαλύτερη τάση να προσροφά αέριο CO₂ παρά μεθάνιο.

Ο ογκομετρικός λόγος του προσροφήσιμου CO₂:CH₄ κυμαίνεται από το ένα για ώριμους τύπους άνθρακα όπως είναι ο ανθρακίτης, μέχρι το δέκα ή και περισσότερο για νεότερους τύπους άνθρακα, όπως είναι ο λιγνίτης. Το αέριο CO₂ που εισπνέζεται μέσα από φρεάτια θα ρέει μέσα από το σύστημα ρωγμών του ορυκτού άνθρακα, θα διασκορπιστεί στο σχηματισμό, και θα προσροφηθεί στις επιφάνειες των μικροπόρων του ορυκτού άνθρακα, ελευθερώνοντας αέρια με μικρότερη τάση προσρόφησης (π.χ. μεθάνιο).

Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί «πλαστικοποιητή» για τον ορυκτό άνθρακα, μειώνοντας τη θερμοκρασία που είναι απαραίτητη για τη μετάβαση από την υαλώδη εύθριπτη δομή στην ελαστική, πλαστική δομή (μαλακοποίηση του ορυκτού άνθρακα). Σε μία περίπτωση, η θερμοκρασία μετάβασης έπεσε από τους 400 °C υπό 3 MPa σε <30 °C υπό 5.5 MPa πίεση του CO₂. Η θερμοκρασία μετάβασης εξαρτάται από την ωριμότητα του άνθρακα, το οργανικό δομικό περιεχόμενο, το περιεχόμενο της τέφρας, και την περιοριστική τάση και δεν μπορεί εύκολα να αναχθεί σε συνθήκες πεδίου.

Η πλαστικοποίηση ή μαλακοποίηση του ορυκτού άνθρακα μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη διαπερατότητα που θα επέτρεπε την εισπίεση του CO₂. Επιπλέον, καθώς το CO₂ προσροφάται ή/και απορροφάται, ο άνθρακας διογκώνεται, γεγονός που μειώνει τη διαπερατότητα και την εισπιεσιμότητα κατά μία τάξη μεγέθους ή και περισσότερο, αυτό μπορεί να καταπολεμηθεί με αύξηση των πιέσεων εισπίεσης. Σύμφωνα με ορισμένες μελέτες, το εισπιεζόμενο CO₂ μπορεί να αντιδράσει με τον ορυκτό άνθρακα, γεγονός που τονίζει τις δυσκολίες εισπίεσης του CO₂ σε ορυκτό άνθρακα χαμηλής διαπερατότητας.

Το CO₂ όταν εισπνέζεται σε κοιτάσματα ορυκτού άνθρακα, μετατοπίζει το μεθάνιο, βελτιώνοντας την ανάκτηση του CBM. Έχει εισπνέσει CO₂ με επιτυχία στο πρόγραμμα Allison και στη λεκάνη της Αλμπερτα στον Καναδά, σε βάθη μεγαλύτερα από αυτά που αντιστοιχούν στο κρίσιμο σημείο του CO₂. Το διοξείδιο του άνθρακα–ECBM μπορεί δυνητικά να αυξήσει την ποσότητα του παραγόμενου μεθανίου σε ποσοστά 90% του αερίου, σε σύγκριση με το 50% που επιτυγχάνεται με τη συμβατική εξάντληση της πίεσης του ταμιευτήρα.

Η διαπερατότητα του ορυκτού άνθρακα αποτελεί έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες για την επιλογή μιας τοποθεσίας αποθήκευσης. Η διαπερατότητα αυτή επιδεικνύει μεγάλες διακυμάνσεις, και γενικά μειώνεται με το βάθος, καθώς οι ρωγμές κλείνουν όσο αυξάνεται η αποτελεσματική τάση. Τα περισσότερα φρεάτια παραγωγής CBM παγκοσμίως έχουν βάθος κάτω από 1.000 m.

Τα κριτήρια αρχικής επιλογής για ευνοϊκές τοποθεσίες για CO₂ ECBM περιλαμβάνουν:

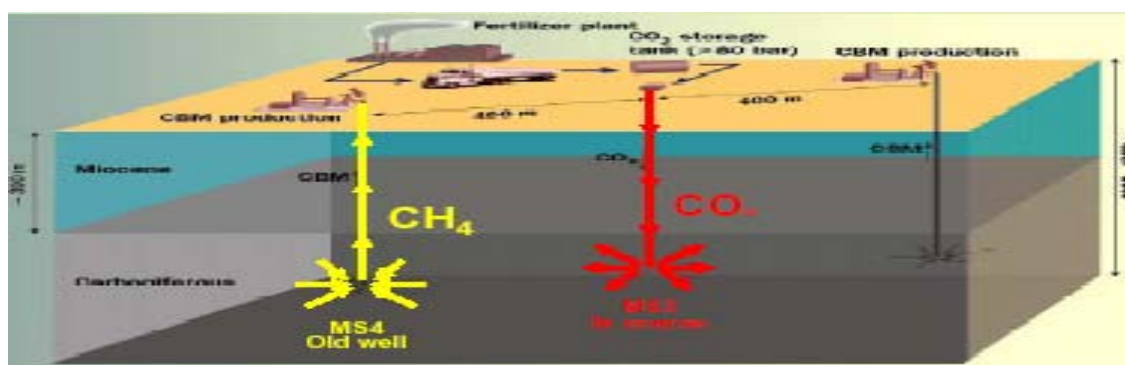
- Την επαρκή διαπερατότητα (δεν έχουν καθοριστεί ακόμα οι ελάχιστες τιμές),
- Την κατάλληλη γεωμετρία του ορυκτού άνθρακα (λίγα και πλούσια στρώματα, αντί για πολλά και λεπτά στρώματα),
- Την απλή δομή (ελάχιστες ρωγμές και αναδιπλώσεις),
- Την ύπαρξη ομοιογενών και περιορισμένων στρωμάτων ορυκτού άνθρακα, που είναι εγκάρσια συνεχή και κάθετα απομονωμένα,
- Το επαρκές βάθος (μέχρι 1.500 m, μεγαλύτερα βάθη δεν έχουν ακόμα μελετηθεί),
- Τις κατάλληλες συνθήκες κορεσμού αερίου (υψηλός κορεσμός αερίου για το ECBM),
- Τη δυνατότητα απομάκρυνσης των υδάτων από το σχηματισμό.

Αν ο ορυκτός άνθρακας δεν εξορυχθεί ούτε αποσυμπιεστεί ποτέ, τότε είναι πιθανό ότι το CO₂ θα αποθηκευτεί για γεωλογικό χρόνο, όμως όπως συμβαίνει με κάθε δυνατότητα γεωλογικής αποθήκευσης, η διαταραχή του σχηματισμού θα μπορούσε να οδηγήσει σε εκκένωση της αποθήκευσης. Το πιθανό μέλλον κάθε κοιτάσματος ορυκτού άνθρακα επομένως, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την καταλληλότητά του για αποθήκευση και για την επιλογή τοποθεσίας αποθήκευσης. Είναι δυνατόν να υπάρξει σύγκρουση ανάμεσα στις πιθανότητες εξόρυξης και αποθήκευσης CO₂, ιδίως για ρηγά στρώματα ορυκτού άνθρακα.

6.7.2. Αποθήκευση σε ορυκτό άνθρακα

Δεν υπάρχουν εμπορικές επιχειρήσεις CO₂-ECBM, και δεν έχει διεξαχθεί καθολική ρεαλιστική αξιολόγηση των δυνατοτήτων αποθήκευσης CO₂ σε σχηματισμούς ορυκτού άνθρακα. Συνήθως, τα εμπορικά κοιτάσματα CBM είναι σε βάθος μικρότερο των 1500m, ενώ η εξόρυξη ορυκτού άνθρακα τόσο στην Ευρώπη όσο και αλλού έχει φτάσει σε βάθος 1000 m. Επειδή το CO₂ δεν πρέπει να αποθηκεύεται σε κοιτάσματα ορυκτού άνθρακα που θα μπορούσαν δυνητικά να εξορυχθούν, το παράθυρο βάθους για την αποθήκευση CO₂ είναι πολύ στενό. Εάν υποτεθεί ότι ο ασφαλτούχος ορυκτός άνθρακας μπορεί να προσροφήσει διπλάσια ποσότητα CO₂ παρά μεθανίου, μια προκαταρκτική ανάλυση των θεωρητικών δυνατοτήτων αποθήκευσης CO₂ σε προγράμματα ανάκτησης ECBM υποδεικνύει ότι θα μπορούσαν να αποθηκευτούν περίπου 60–200 Gt CO₂ σε κοιτάσματα ασφαλτούχου ορυκτού άνθρακα παγκοσμίως.

Πιο πρόσφατες εκτιμήσεις για τις ΗΠΑ κυμαίνονται στους 60 με 90 Gt CO₂, συμπεριλαμβάνοντας υπο-ασφαλτούχους ορυκτούς άνθρακες και λιγνίτες. Τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες υπαγορεύουν ότι οι δυνατότητες πρακτικής αποθήκευσης αντιστοιχούν σε περίπου 7 Gt CO₂ για τον ασφαλτούχο ορυκτό άνθρακα. Εάν υποτεθεί ότι δεν θα γίνει αποθήκευση CO₂ σε αποθέματα ορυκτού άνθρακα χωρίς ανάκτηση CBM, υπολογίζεται ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης ανέρχεται στους 3–15 Gt CO₂, για την ετήσια παραγωγή CBM στις ΗΠΑ το 2003, που ανήλθε σε 0.04 τρις m³ περίπου, και για την εκτιμώμενη μελλοντική παγκόσμια παραγωγή των 0.20 trillion m³. Οι υπολογισμοί αυτοί προϋποθέτουν ότι μπορεί να αποθηκευτεί 0.1 Gt CO₂ για κάθε Tcf παραγόμενου CBM (3.53 Gt CO₂ για κάθε τρισεκατομμύριο m³) και συμφωνούν με τις ανωτέρω μελέτες.



Εικόνα 6.9: Τεχνολογία ECBMR

6.7.3. Βελτιωμένη ανάκτηση μεθανίου

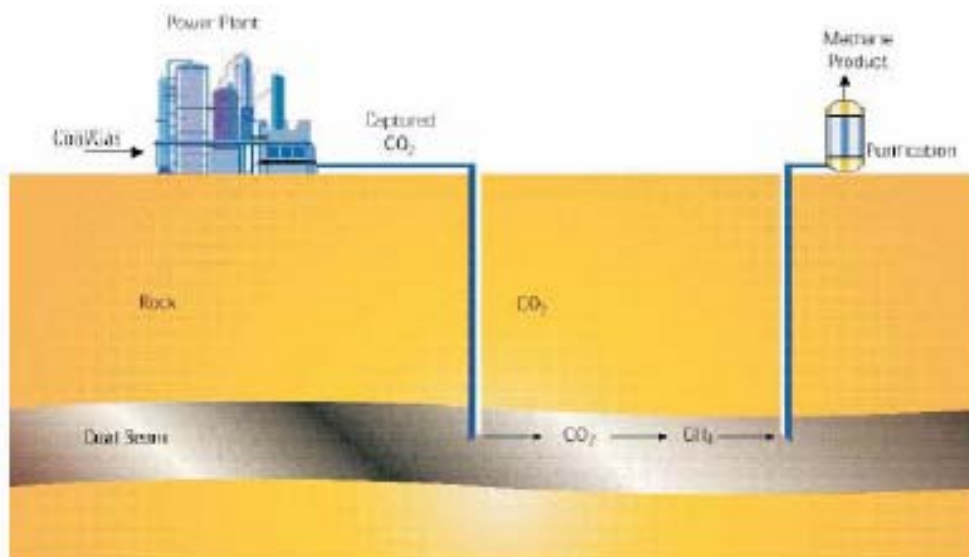
Αυτή η μέθοδος βελτίωσης της παραγωγής μεθανίου από στρώματα ορυκτού άνθρακα ελέγχεται σήμερα σε δύο πιλοτικά προγράμματα στη Βόρεια Αμερική. Σε μία από τις τοποθεσίες παραγωγής στη Λεκάνη Σαν Χουάν (Νέο Μεξικό και Κολοράντο), η διευθύνουσα εταιρεία εισπίαζε 3 εκατομμύρια κυβικά πόδια CO₂ τη μέρα, μέσα από τέσσερις γεωτρήσεις εισπίασης, για μια περίοδο 3 ετών. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η πλήρης λειτουργική ανάπτυξη της μεθόδου αυτής θα οδηγούσε σε αύξηση της επί τόπου ανάκτησης μεθανίου κατά 75%.

Τα βασικά τεχνικά και εμπορικά κριτήρια για την επιτυχή εφαρμογή της τεχνικής αυτής συμπεριλαμβάνουν: (1) την ευνοϊκή γεωλογία, δηλαδή αδρές φλέβες ορυκτού άνθρακα, κορεσμένες από φυσικό αέριο και θαμμένες σε κατάλληλα βάθη, που βρίσκονται σε απλές δομικές τοποθεσίες με επαρκή διαπερατότητα, (2) τη διαθεσιμότητα του CO₂, δηλαδή τις δυναμικές προμήθειες σε CO₂ χαμηλού κόστους, είτε από φυσικές δεξαμενές είτε από ανθρωπογενείς πηγές (π.χ. αέρια καπνοδόχου από ενεργειακές εγκαταστάσεις), και (3) τη ζήτηση του φυσικού αερίου, που περιλαμβάνει την αποδοτική αγορά για τη χρήση του μεθανίου, την ύπαρξη μακροπρόθεσμων τελικών καταναλωτών, και τις ευνοϊκές τιμές του φυσικού αερίου της γεώτρησης (Fulton, P. F., et al 1980).

Η δεύτερη πιλοτική επίδειξη της τεχνικής αυτής βρίσκεται στην Αλμπέρτα του Καναδά. Το πρόγραμμα της Αλμπέρτα ελέγχει τη διαδικασία εισπίασης CO₂ σε ένα από τα βαθιά, μη εξορύξιμα στρώματα ορυκτού άνθρακα της Αλμπέρτα. Πολλά από τα αποθέματα ορυκτού άνθρακα της Αλμπέρτα είναι πλούσια σε μεθάνιο. Η προκαταρκτική εξομοίωση με υπολογιστές υποδεικνύει ότι συγκεκριμένες τεχνικές για τη θραύση του ορυκτού άνθρακα γύρω από τις γεωτρήσεις θα μπορούσαν να βελτιωθούν με ουσιαστική αύξηση του πρωτογενούς μεθανίου. Οι αρχικές δραστηριότητες του προγράμματος αποτελούνταν από έλεγχο με μία γεώτρηση, και σχεδιάστηκαν για να μετρήσουν τις ιδιότητες του φυσικού ταμιευτήρα, να αυξήσουν την πρωτογενή παραγωγή με αποτελεσματική τεχνική θραύσης, και να αξιολογήσουν την υποβοηθούμενη από το CO₂ ανάκτηση μεθανίου (Fulton, P. F., et al 1980).

Τα στρώματα ορυκτού άνθρακα περιλαμβάνουν λεπτές και αδρές φλέβες ορυκτού άνθρακα, είναι διεσπαρμένα με ψαμμίτες, ιλυόλιθους, και αργιλικούς σχιστόλιθους, και συνήθως είναι κορεσμένα από νερό. Αυτή η περίπλοκη διαστρωμάτωση του σχηματισμού καθορίζει το αποθηκευτικό διάστημα ορυκτού άνθρακα. Η στρωματογραφία του σχηματισμού ορυκτού άνθρακα και η δομή /ύπαρξη πόρων/ διαπερατότητα των διακείμενων και επικείμενων στρωμάτων διαφέρουν σε κάθε τοποθεσία και πρέπει να χαρακτηρίζονται ξεχωριστά.

Ωστόσο, αντίθετα με τους φυσικούς ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, τα στρώματα συγκρατούν το μεθάνιο με προσρόφηση και όχι με παγίδευση κάτω από ένα υπερκείμενο ή πλευρικό αδιαπέρατο πέτρωμα. Επομένως, η φύση των επικείμενων και παρακείμενων στρωμάτων αποτελεί σημαντικό θέμα για τη συγκράτηση του CO₂ στο αποθηκευτικό διάστημα ορυκτού άνθρακα μέχρι να προσροφηθεί, και για τη συγκράτηση του μετατοπισμένου μεθανίου μέχρι να αφαιρεθεί. Είναι απαραίτητο να αναπτύχθούν τεχνικές για την επαλήθευση της χωρητικότητας, της σταθερότητας, και της μονιμότητας της αποθήκευσης του CO₂ σε αποθηκευτικά συστήματα ορυκτού άνθρακα (Fulton, P. F., et al 1980).



Τεχνολογία ECBMR χρησιμοποιώντας CO₂

Εικόνα 6.10: Τεχνολογία ECBMR χρησιμοποιώντας CO₂

6.8. Τεχνολογία εισπίεσης - γεωτρήσεων και ολοκλήρωσης φρεατίων

Μέχρι τώρα έχει αναλυθεί μόνο η φύση της τοποθεσίας αποθήκευσης. Όμως αφού καθοριστεί η κατάλληλη τοποθεσία, είναι διαθέσιμη η κατάλληλη τεχνολογία για να εισπιαστούν μεγάλες ποσότητες CO₂ (1–10 Mt CO₂ yr⁻¹) στην υποεπιφάνεια και να λειτουργεί η τοποθεσία με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Το παρόν υποκεφάλαιο εξετάζει τη διαθεσιμότητα της κατάλληλης τεχνολογίας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι ήδη διαθέσιμες πολλές από τις απαραίτητες τεχνολογίες για μεγάλης κλίμακας γεωλογική αποθήκευση CO₂. Η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου έχει αναπτύξει τόσο πολύ την τεχνολογία γεώτρησης και ολοκλήρωσης φρεατίων εισπίεσης, που είναι πλέον δυνατόν να γίνει γεώτρηση και να ολοκληρωθούν κάθετα και εκτεταμένα φρεάτια (συμπεριλαμβανομένων των οριζοντίων φρεατίων) σε σχηματισμούς μεγάλου βάθους, πολλαπλά φρεάτια, και φρεάτια με ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά υγρά¹⁰. Με βάση την εκτεταμένη εμπειρία της πετρελαιοβιομηχανίας, υπάρχουν οι απαραίτητες τεχνολογίες γεώτρησης, εισπίεσης, προσομοίωσης και ολοκλήρωσης προγραμμάτων αποθήκευσης CO₂. Για τα φρεάτια εισπίεσης CO₂, οι βασικοί παράγοντες σχεδιασμού συμπεριλαμβάνουν την πίεση, τα ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά, και τους ρυθμούς παραγωγής και εισπίεσης.

Ο σχεδιασμός ενός φρεατίου εισπίεσης CO₂ έχει πολλές ομοιότητες με το σχεδιασμό ενός φρεατίου εισπίεσης φυσικού αερίου σε κοιτάσματα πετρελαίου ή σε προγράμματα αποθήκευσης φυσικού αερίου. Τα περισσότερα εξαρτήματα πρέπει να προσαρμοστούν σε συνθήκες υψηλότερης πίεσης και να αποκτήσουν μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση. Η τεχνολογία διαχείρισης CO₂ έχει ήδη αναπτυχθεί, για τις επιχειρήσεις EOR και για την αποθήκευση όξινων αερίων. Τα οριζόντια και

¹⁰International Energy Agency, Committee on Energy Research and Technology Working Party on Fossil Fuels “Solutions for the 21st Century: Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels” 2002.

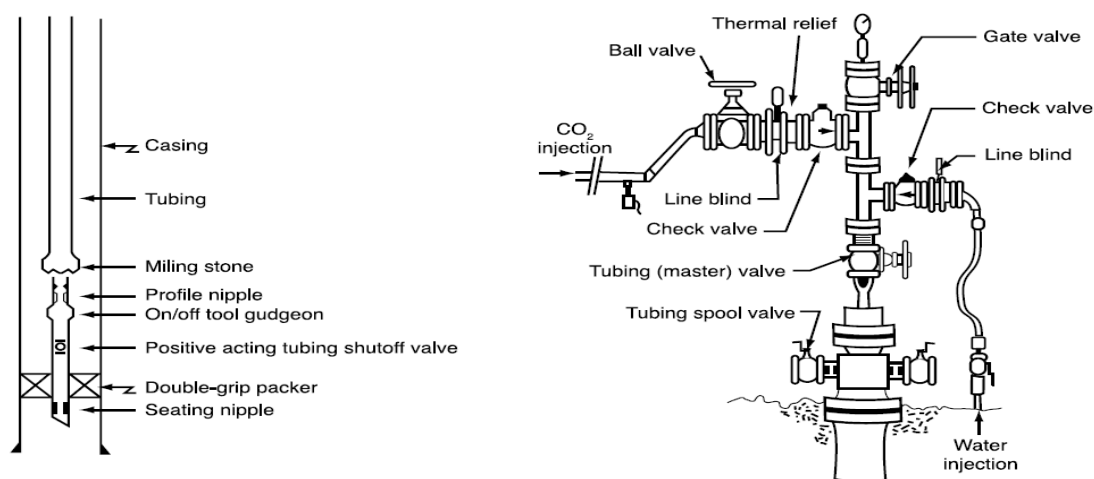
εκτεταμένα φρεάτια αποτελούν καλή επιλογή για τη βελτίωση του ρυθμού της εισπίεσης CO₂ σε ατομικά φρεάτια.

Τα κοιτάσματα του Weyburn στον Καναδά αποτελούν παράδειγμα χρήσης οριζοντίων φρεατίων εισπίεσης για τη βελτίωση της ανάκτησης πετρελαίου και την αύξηση της αποθήκευσης CO₂. Η οριζόντια εισπίεση μειώνει τον αριθμό των απαραίτητων φρεατίων εισπίεσης. Τα οριζόντια φρεάτια έχουν επιπλέον το πλεονέκτημα ότι δημιουργούν προφίλ εισπίεσης που περιορίζει τα αρνητικά αποτελέσματα της προτιμώμενης ροής του εισπνευσμένου αερίου μέσα από ζώνες χαμηλής διαπερατότητας.

Ο απαραίτητος αριθμός φρεατίων για ένα πρόγραμμα αποθήκευσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, που συμπεριλαμβάνουν το ρυθμό συνολικής εισπίεσης, τη διαπερατότητα και το πάχος του σχηματισμού, τις μέγιστες πιέσεις εισπίεσης, και τη διαθεσιμότητα κατάλληλης επιφάνειας για τα φρεάτια εισπίεσης. Γενικά, χρειάζονται λιγότερα φρεάτια για ιζήματα υψηλής διαπερατότητας σε σχηματισμούς αποθήκευσης μεγάλου πάχους, και για προγράμματα με οριζόντια φρεάτια εισπίεσης.

Για παράδειγμα, το Πρόγραμμα Sleipner, που εισπνέζει CO₂ σε έναν σχηματισμό υψηλής διαπερατότητας και πάχους 200m, χρησιμοποιεί μόνο ένα φρεάτιο για να εισπνέσει 1 Mt CO₂ yr⁻¹. Αντίθετα, στο Πρόγραμμα In Salah στην Αλγερία, το CO₂ εισπνέζεται σε σχηματισμό πάχους 20m, με πολύ χαμηλότερη διαπερατότητα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται τρία εκτεταμένα οριζόντια φρεάτια με σχισμές ανά διαστήματα 1 km, για να εισπνευστεί 1 Mt CO₂ yr⁻¹. Το κόστος εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από τον αριθμό και την τεχνολογία ολοκλήρωσης των φρεατίων αυτών. Επομένως, ο προσεκτικός σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση του αριθμού των φρεατίων και των σχισμών είναι σημαντικός για τη διεξαγωγή προγραμμάτων ανταγωνιστικού κόστους.

Η Εικόνα 6.11 απεικονίζει ένα φρεάτιο εισπίεσης και την κεφαλή του. Τα φρεάτια εισπίεσης συνήθως έχουν δύο βαλβίδες ελέγχου του φρεατίου, μία για κανονική χρήση και μία για να κλείνει το φρεάτιο σε κατάσταση ανάγκης. Σε φρεάτια εισπίεσης όξινου φυσικού αερίου, μία βαλβίδα ενσωματώνεται στους σωλήνες ως εξάρτημα ασφαλείας, ώστε αν αποτύχει ο εξοπλισμός στην επιφάνεια να κλείσει αυτόματα το φρεάτιο και να μην υπάρξει ανάστροφη ροή.



Εικόνα 6.11: Φρεάτιο εισπίεσης και κεφαλή

Ερευνητές προτείνουν τη χρήση τέτοιας αυτόματης βαλβίδας σε όλα τα φρεάτια CO₂, ώστε να διασφαλίζεται ότι δεν θα απελευθερώνεται το CO₂ στο σύστημα εισπίεσης. Ο τυπικός εξοπλισμός ενός φρεατίου εισπίεσης περιλαμβάνει ένα σύστημα

δοκιμής πίεσης (double grip packer), ένα εξάρτημα on-off, και μια αυτόματη βαλβίδα αποκλεισμού. Οι δακτύλιοι παρακολούθησης της πίεσης βοηθούν στον εντοπισμό των διαρροών στους σωλήνες και τα συστήματα δοκιμής πίεσης, ο οποίος είναι σημαντικός για τη λήψη άμεσης διορθωτικής δράσης. Για να μη γίνει επικίνδυνη συσσώρευση πίεσης στον εξοπλισμό της επιφάνειας και να αποφευχθεί η απελευθέρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα, η εισπίεση του CO₂ πρέπει να σταματά αμέσως μόλις διαπιστώνεται διαρροή.

Η συσσωρευμένη πίεση μπορεί να εκτονώνεται με δίσκους ρήξης και βαλβίδες ασφαλείας. Πρέπει να υπάρχουν σχέδια διαχείρισης της περίσσειας του CO₂ αν χρειαστεί να κλείσει το φρεάτιο εισπίεσης. Μία επιλογή είναι να υπάρχει εναλλακτικό φρεάτιο εισπίεσης, ή ασφαλείς μέθοδοι εξαέρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Είναι απαραίτητο να γίνεται σωστή συντήρηση των φρεατίων εισπίεσης CO₂, ώστε να αποφεύγονται οι διαρροές και η προβληματική λειτουργία των φρεατίων. Υπάρχουν αρκετές πρακτικές διαδικασίες για να μειωθούν οι πιθανότητες ανεξέλεγκτης ροής του CO₂ και να περιοριστούν τα αποτελέσματα της ροής αυτής εάν λάβει χώρα. Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν: περιοδικές μελέτες ακεραιότητας των φρεατίων εισπίεσης, βελτιωμένες τεχνικές αποφυγής ανεξέλεγκτης ροής (BOP), συντήρηση, εγκατάσταση επιπρόσθετων BOP σε ύποπτα φρεάτια, βελτιωμένη εγρήγορση του προσωπικού, σχεδιασμός προγραμμάτων έκτακτης ανάγκης, και εκπαίδευση άμεσης ανταπόκρισης σε επείγοντα περιστατικά.

Για την εισπίεση CO₂ μέσα από υπάρχοντα φρεάτια, σημαντική είναι η μηχανική κατάσταση του φρεατίου και η ποιότητα της συντήρησης του σκυροδέματος και του φρεατίου. Ένας δακτύλιος διαρροής μπορεί να αποτελέσει οδό απελευθέρωσης CO₂. Η ανάδοχη εταιρεία μπορεί να διεξάγει προγράμματα λεπτομερούς καταγραφής για να προστατεύσει τους σχηματισμούς και να αποφύγει τις διαρροές μεταξύ δεξαμενών. Ένα φρεάτιο που χρησιμοποιείται για εισπίεση πρέπει να είναι εξοπλισμένο με συστήματα δοκιμής πίεσης, για να απομονώνεται η πίεση στα διαστήματα εισπίεσης. Όλα τα υλικά των φρεατίων εισπίεσης πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τις μέγιστες πιθανές τιμές όγκου, πίεσης, και θερμοκρασίας. Στην περίπτωση υγρού αερίου (που περιέχει ελεύθερα ύδατα), πρέπει να χρησιμοποιούνται υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση.

Η τεχνολογία εισπίεσης, γεωτρήσεων και ολοκλήρωσης φρεατίων της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου έχει εξελιχθεί τόσο πολύ που είναι δυνατόν να γίνει η γεώτρηση και να ολοκληρωθεί η κατασκευή κατακόρυφων, πλάγιων και οριζόντιων φρεατίων σε σχηματισμούς μεγάλου βάθους, και φρεατίων με πολλαπλές κατασκευές, αλλά και να γίνει κατάλληλος χειρισμός των διαβρωτικών υγρών. Η βελτιστοποίηση των τεχνικών αυτών για την αποθήκευση του CO₂ ενδέχεται να απαιτήσει την ανάπτυξη μεθόδων για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της αποθήκευσης. Τα μηχανικά και οικονομικά θέματα της μεταφοράς και συμπίεσης του CO₂, θα πρέπει όμως να εξεταστούν μαζί με άλλα μηχανικά θέματα, όπως είναι η επίδραση των προσμίξεων στο ρεύμα του CO₂, πριν μπορέσουμε να κάνουμε έλεγχο σε μεγάλη κλίμακα. Οι πιθανές ανάγκες συμπεριλαμβάνουν:

- τις μεθόδους εισπίεσης πρόσθετων για τον έλεγχο της κινητικότητας του CO₂
- την εξελιγμένη τεχνολογία ολοκλήρωσης φρεατίων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας σάρωσης
- τη χρήση χημικών ή βιολογικών πρόσθετων για τη βελτίωση της ορυκτής παγίδευσης
- την ανάπτυξη και τοποθέτηση επί τόπου αισθητήρων για την παρακολούθηση της διαφυγής του CO₂

- τις τεχνολογίες εισπίεσης, για τον περιορισμό της διαφυγής του CO₂ σε «σημεία διαρροής» και μέσα από διαρροές στο πέτρωμα-καλύμμα

6.9. Ροή CO₂ και διαδικασίες μεταφοράς

Η εισπίεση υγρών σε γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλου βάθους επιτυγχάνεται με την εισαγωγή τους σε φρεάτιο, με χρήση αντλίας. Το τμήμα του φρεατίου που βρίσκεται μέσα στη ζώνη αποθήκευσης είναι είτε διάτρητο είτε καλυμμένο με διαπερατή επιφάνεια, ώστε να μπορεί το CO₂ να εισέλθει στο σχηματισμό. Η διάτρητη ή διαπερατή επιφάνεια έχει συνήθως 10-100 m πάχος, ανάλογα με τη διαπερατότητα και το μέγεθος του σχηματισμού. Η εισπίεση αυξάνει την πίεση κοντά στο φρεάτιο, επιτρέποντας στο CO₂ να εισέλθει στους πόρους που καταλάμβαναν τα υγρά του σχηματισμού.

Όσον αφορά την αύξηση της πίεσης, η ποσότητα και η κατανομή της στο χώρο θα εξαρτηθεί από το ρυθμό της εισπίεσης, τη διαπερατότητα και το μέγεθος του σχηματισμού εισπίεσης, την παρουσία ή απουσία εμποδίων διαπερατότητας στο σχηματισμό, και τη γεωμετρία του τοπικού (υδρογεωλογικού) συστήματος υπόγειων υδάτων. Μετά την εισπίεση στο σχηματισμό, οι βασικοί μηχανισμοί ροής και μεταφοράς που διέπουν τη διάδοση του CO₂ συμπεριλαμβάνουν:

- Τη ροή των υγρών (μεταφορά) που προκαλείται από τη μεταβολή της πίεσης που δημιουργήθηκε από τη διαδικασία εισπίεσης,
- Τη ροή των υγρών που προκαλείται από φυσικές υδραυλικές μεταβολές,
- Την άνωση που προκαλείται από τις διαφορές πυκνότητας μεταξύ του CO₂ και των υγρών του σχηματισμού.
- Τη διάχυση,
- Το διασκορπισμό και το σχηματισμό δακτύλων, που προκαλείται από τις ετερογένειες του σχηματισμού και τις διαφορές κινητικότητας μεταξύ του CO₂ και των υγρών του σχηματισμού,
- Τη διάλυση στα υγρά του σχηματισμού,
- Την ορυκτοποίηση,
- Την παγίδευση στο χώρο των πόρων (σχετική διαπερατότητα),
- Την προσρόφηση του CO₂ σε οργανική ύλη.

Ο ρυθμός ροής των υγρών εξαρτάται από τον αριθμό και τις ιδιότητες των υγρών φάσεων του σχηματισμού. Όταν δύο ή περισσότερα υγρά αναμιγνύονται σε οποιαδήποτε αναλογία, ονομάζονται αναμίξιμα υγρά. Η παρουσία πολλών διαφορετικών φάσεων ενδέχεται να μειώσει τη διαπερατότητα και να επιβραδύνει το ρυθμό μεταφοράς. Όταν εισπνέζεται CO₂ σε ένα ταμιευτήρα φυσικού αερίου, δημιουργείται τοπικά μία φάση αναμίξιμων υγρών, που αποτελείται από φυσικό αέριο και CO₂. Όταν το CO₂ εισπνέζεται σε σχηματισμό αλμυρού νερού μεγάλου βάθους σε υγρή ή υγρόμορφη πυκνή υπερκρίσιμη φάση, είναι αναμίξιμο με το νερό.

Το διοξείδιο του άνθρακα που εισπνέζεται σε ένα ταμιευτήρα πετρελαίου μπορεί να είναι ή να μην είναι αναμίξιμο, ανάλογα με τη σύσταση του πετρελαίου και την πίεση και θερμοκρασία του συστήματος. Όταν το CO₂ εισπνέζεται σε στρώματα ορυκτού άνθρακα, εκτός από ορισμένες από τις ανωτέρω διαδικασίες, λαμβάνει χώρα και προσρόφηση και εκρόφηση αερίων (ιδίως μεθανίου), που ήταν προηγουμένως προσροφημένα στον ορυκτό άνθρακα, καθώς και διόγκωση ή συστολή του ίδιου του ορυκτού άνθρακα.

Επειδή το υπερκρίσιμο CO₂ έχει πολύ χαμηλότερο ιξώδες από το νερό και το πετρέλαιο (κατά μία τάξη μεγέθους ή και περισσότερο), η μεταφορά διέπεται από τις διαφορές κινητικότητας μεταξύ του CO₂ και των υγρών του σχηματισμού. Εξαιτίας της σχετικά υψηλής κινητικότητας του CO₂, μόνο ένα τμήμα του νερού ή του πετρελαίου θα μετατοπιστεί, γεγονός που προκαλεί μέσο κορεσμό του CO₂ κατά 30-60%. Οι ιξώδεις δάκτυλοι μπορούν να εμποδίσουν το CO₂ να καταλάβει όλους τους διαθέσιμους πόρους, ανάλογα με τις ετερογένειες και την ανισοτροπία της διαπερατότητας του πετρώματος. Σε φυσικές δεξαμενές φυσικού αερίου το CO₂ έχει μεγαλύτερο ιξώδες από το φυσικό αέριο, οπότε τα «όρια» είναι σταθερά και οι ιξώδεις δάκτυλοι περιορισμένοι.

Το μέγεθος των δυνάμεων άνωσης που διέπουν την κάθετη ροή θα εξαρτάται από τον τύπο του υγρού στο σχηματισμό. Σε σχηματισμούς αλμυρού νερού, η σχετικά μεγάλη διαφορά πυκνότητας (30-50%) μεταξύ του CO₂ και των υδάτων του σχηματισμού δημιουργεί ισχυρές δυνάμεις άνωσης που οδηγούν το CO₂ προς τα πάνω. Σε δεξαμενές πετρελαίου, η διαφορά πυκνότητας και οι δυνάμεις άνωσης είναι μικρότερες, ιδίως αν το πετρέλαιο και το CO₂ είναι αναμίξιμα. Σε δεξαμενές φυσικού αερίου συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή το CO₂ μεταφέρεται προς τα κάτω εξαιτίας των δυνάμεων άνωσης, επειδή το CO₂ είναι πυκνότερο από το φυσικό αέριο.

Σε αλατούχους υδροφορείς και αποθέματα πετρελαίου, το ρεύμα άνωσης του εισπνευσμένου CO₂ μετακινείται προς τα πάνω, αλλά όχι ομαλά. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα στρώμα χαμηλότερης διαπερατότητας δρα ως εμπόδιο, υποχρεώνοντας το CO₂ να μετακινείται οριζόντια και να γεμίζει κάθε στρωματογραφική ή δομική παγίδα που συναντά. Το σχήμα του ρεύματος του CO₂, καθώς ανεβαίνει μέσα από τα πετρώματα, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ετερογένεια του σχηματισμού, π.χ. από χαμηλής διαπερατότητας επιφάνειες αργλικού σχιστόλιθου. Επομένως, τα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας μέσα στον σχηματισμό αποθήκευσης έχουν ως αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η ανοδική μετακίνηση του CO₂, το οποίο σε αντίθετη περίπτωση θα προσπερνούσε τα βαθύτερα σημεία του σχηματισμού αποθήκευσης.

Καθώς το CO₂ μετακινείται μέσα στο σχηματισμό, ένα τμήμα του διαλύεται μέσα στα ύδατα του σχηματισμού. Σε συστήματα όπου τα ύδατα ρέουν αργά, αριθμητικές προσομοιώσεις ταμειντήρα δείχνουν ότι μέσα σε δεκάδες χρόνια σημαντικό ποσοστό του εισπνευσμένου CO₂ (μέχρι και 30%), θα διαλυθεί στα ύδατα του σχηματισμού. Σε προσομοιώσεις κλίμακας λεκάνης φαίνεται ότι μέσα σε εκατοντάδες χρόνια, το σύνολο του CO₂ διαλύεται στα ύδατα του σχηματισμού. Αν το εισπνευσμένο CO₂ περικλείεται σε κλειστή δομή (δεν υπάρχει ροή των υδάτων του σχηματισμού), η διαδικασία της διάλυσης θα διαρκέσει πολύ περισσότερο, εξαιτίας της περιορισμένης επαφής του CO₂ με μη κορεσμένα ύδατα σχηματισμού.

Όταν το CO₂ διαλυθεί στα υγρά του σχηματισμού, μετακινείται μαζί με τη ροή των τοπικών υπόγειων υδάτων. Σε βαθιές καθιζηματικές λεκάνες, με χαμηλή διαπερατότητα και υψηλή αλατότητα, η ταχύτητα ροής των υπόγειων υδάτων είναι πολύ χαμηλή, της τάξης των mm ή cm ανά έτος. Έτσι, ο ρυθμός μετακίνησης του διαλυμένου CO₂ είναι αρκετά χαμηλότερος από εκείνον του CO₂ διακριτής φάσης.

Το κορεσμένο με CO₂ νερό είναι ελαφρά πυκνότερο (κατά 1% περίπου) από τα αρχικά ύδατα του σχηματισμού, ανάλογα με την αλατότητα. Εξαιτίας της υψηλής κάθετης διαπερατότητας, το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ελεύθερη μεταβίβαση, αντικαθιστώντας το κορεσμένο με CO₂ νερό κοντά στο ρεύμα του CO₂ με μη κορεσμένο νερό, και προκαλώντας ταχύτερους ρυθμούς διάλυσης του CO₂.

Η διαλυτότητα του CO₂ στο αλατόνερο μειώνεται όσο αυξάνει η πίεση, μειώνεται η θερμοκρασία, και αυξάνει η αλατότητα. Σύμφωνα με υπολογισμούς, ανάλογα με την αλατότητα και το βάθος, 20-60 kg CO₂ μπορούν να διαλυθούν σε ένα m³ του υγρού του σχηματισμού. Αν χρησιμοποιήσουμε ένα ομοιογενές αντί για το

ετερογενές μοντέλο, ο απαιτούμενος χρόνος για την πλήρη διάλυση του CO₂ ίσως έχει υποτιμηθεί.

Καθώς το CO₂ μετακινείται μέσα σε ένα σχηματισμό, ένα τμήμα του παραμένει στους πόρους εξαιτίας των τριχοειδών δυνάμεων, φαινόμενο που αναφέρεται ως «παγίδευση του κατάλοιπου CO₂» και μπορεί να ακινητοποιήσει σεβαστές ποσότητες CO₂. Όταν ο ρυθμός παγίδευσης είναι υψηλός και το CO₂ εισπνέζεται στον πυθμένα ενός σχηματισμού μεγάλου πάχους, μπορεί να παγιδευτεί το σύνολο του CO₂ από τον μηχανισμό αυτό, πριν καν φτάσει το πέτρωμα καλύμματος στην κορυφή του σχηματισμού.

Αν και το φαινόμενο αυτό είναι διαφορετικό για κάθε σχηματισμό, έχει αποδειχτεί ότι ο κορεσμός του κατάλοιπου CO₂ μπορεί να φτάνει το 15-25% για πολλούς κοινούς σχηματισμούς αποθήκευσης. Με την πάροδο του χρόνου, μεγάλο μέρος του παγιδευμένου CO₂ διαλύεται στα ύδατα του σχηματισμού, αν και οι κατάλληλες μηχανικές διαδικασίες στον ταμιευτήρα μπορούν να επιταχύνουν ή να αλλοιώσουν την παγίδευση διαλυτότητας.

6.10. Εξελιγμένες τεχνικές αποθήκευσης σε γεωλογικούς σχηματισμούς

Οι τεχνικές αποθήκευσης που περιγράφηκαν στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στις σύγχρονες βιομηχανικές προσεγγίσεις για την παραγωγή πετρελαίου, φυσικού αερίου, και μεθανίου ορυκτού άνθρακα, και για την αποθήκευση φυσικού αερίου. Αν και οι τεχνικές αυτές παρέχουν λογικές βραχυπρόθεσμες επιλογές για την αποθήκευση του CO₂, η βελτιωμένη τεχνολογία της αποθήκευσης του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς ενδέχεται να μειώσει το κόστος, να αυξήσει τη χωρητικότητα, να βελτιώσει την ασφάλεια, ή να αυξήσει τις ωφέλιμες χρήσεις της εισπνέσης του CO₂. Οι βελτιωμένες τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν:

- **Τη βελτιωμένη ορυκτή παγίδευση με καταλύτες ή άλλα χημικά πρόσθετα.** Η μετατροπή του CO₂ σε σταθερά ανθρακούχα ορυκτά αναμένεται να είναι πολύ αργή σύμφωνα με τα υπάρχοντα σενάρια για αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Εάν εντοπίσουμε χημικά ή βιολογικά πρόσθετα που επιταχύνουν το ρυθμό των αντιδράσεων θα βελτιώσουμε την αποτελεσματικότητα της ορυκτής παγίδευσης.
- **Αποθήκευση σε σύνθετους σχηματισμούς.** Οι σχηματισμοί πολλαπλών στρωμάτων, που έχουν πάντα ατελές πέτρωμα καλύμματος (υπερκείμενο), μπορούν να οδηγήσουν στη διασπορά του CO₂. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός διασποράς τόσο καλύτερες είναι οι δυνατότητες αποδοτικής διαλυτότητας και ορυκτής παγίδευσης. Η ανάπτυξη κριτηρίων σχεδιασμού που λαμβάνουν υπόψη τις επιτρεπτές διαρροές στους σχηματισμούς πολλαπλών στρωμάτων θα μπορούσε να αυξήσει τη γεωγραφική κατανομή και τη χωρητικότητα των γεωλογικών σχηματισμών για την αποθήκευση του CO₂.
- **Μικροβιακή μετατροπή του CO₂ σε μεθάνιο.** Είναι γνωστό ότι οι μικροοργανισμοί που παράγουν μεθάνιο από το CO₂ (μεθανογόνοι) εμφανίζονται σε διαφορετικά φυσικά περιβάλλοντα χωρίς οξυγόνο. Αν μπορούσαμε να επιλέξουμε τις τοποθεσίες αποθήκευσης έτσι ώστε να εκμεταλλευτούμε αυτή τη φυσική διαδικασία, θα δημιουργούσαμε ένα υπόγειο «εργοστάσιο μεθανίου». Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε παράλληλα με το CO₂ να εισπνέσουμε πρόσθετα που προκαλούν μεθανογένεση, ώστε να προωθήσουμε την παραγωγή μεθανίου.

- **Παραγωγή υδριτών μεθανίου υποβοηθούμενη από το CO₂.** Οι υδρίτες μεθανίου στα θαλάσσια ιζήματα και το μόνιμα παγωμένο έδαφος εμπεριέχουν τεράστια αποθέματα φυσικού αερίου. Η παραγωγή φυσικού αερίου από τους σχηματισμούς αυτούς παραμένει πρόκληση εξαιτίας της περίπλοκης δομής τους, των μηχανικών ιδιοτήτων τους, και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των υδριτών. Η εισπίεση CO₂ σε σχηματισμούς υδριτών μεθανίου μπορεί να βελτιώσει την παραγωγή φυσικού αερίου, και παράλληλα να προκαλεί αποθήκευση CO₂.

6.11. Αξιολόγηση των υπάρχουσων τεχνολογικών δυνατοτήτων και ανάγκες έρευνας

Ανάγκες λειτουργίας: πρακτικά λειτουργικά θέματα που πρέπει να κατανοηθούν για να καταστεί δυνατή η ασφαλής και χαμηλού κόστους αποθήκευση του CO₂; Τα θέματα αυτά συμπεριλαμβάνουν:

- **Μηχανισμούς παγίδευσης του CO₂:** Ποιος από τους μηχανισμούς παγίδευσης είναι ο σημαντικότερος. Τι είναι γνωστό για τους μηχανισμούς αυτούς.
- **Ροή πολλαπλής φάσης:** μονοπάτια σε πορώδη υλικά, εξομοίωση του μονοπατιού αντίδρασης.
- **Χαρακτηριστικά του ρεύματος του CO₂:** Τι προδιαγραφές υπάρχουν για το ρεύμα του CO₂. Πόσο καθαρό πρέπει να είναι. Τι αποτέλεσμα έχει η έλλειψη καθαρότητας στην αποτελεσματικότητα, το κόστος, την ασφάλεια και τους κινδύνους της αποθήκευσης. Ποια θερμοκρασία και πίεση είναι απαραίτητη στη γεώτρηση.
- **Χαρακτηρισμός του σχηματισμού:** Αξιολόγηση των δυνατοτήτων αποθήκευσης και την ακεραιότητα του πετρώματος καλύμματος. Ποιες ιδιότητες είναι σημαντικότερες για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων και της ακεραιότητας.
- **Τεχνολογία εισπίεσης του CO₂, γεωτρήσεων, και κατασκευής φρεάτων:** Πώς θα εισπνέζεται το CO₂ στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Πώς θα γίνεται η γεώτρηση και η ολοκλήρωση του φρέατος; Υπάρχουν ειδικά θέματα υλικών για την αποθήκευση του CO₂.
- **Αξιολόγηση της απόδοσης:** Σχεδιασμός, πρόβλεψη, και βελτιστοποίηση της αποθήκευσης του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Ποια νέα θέματα πρέπει να μας απασχολήσουν και ποιες νέες προσεγγίσεις θα χρειαστούν.
- **Παρακολούθηση:** Παρακολούθηση των διαρροών του CO₂ στο υπέδαφος. Πώς μπορούμε να εντοπίζουμε και να ποσοτικοποιούμε τις διαρροές. Πώς μπορούμε να εντοπίζουμε και να παρακολουθούμε τη διαλυτότητα και την διαφυγή.

Βιομηχανική εμπειρία: Ποια σχετική βιομηχανική εμπειρία παρέχει την επιστημονική, τεχνολογική, και οικονομική βάση για την αξιολόγηση της αποθήκευσης σε γεωλογικούς σχηματισμούς.

Ωφέλιμη χρήση του CO₂: Υπάρχουν ωφέλιμες χρήσεις του CO₂ που μπορούν ενδεχομένως να μειώσουν το κόστος της αποθήκευσης ή να παρέχουν ένα επιπλέον κίνητρο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας αποθήκευσης του CO₂.

Κανονισμοί, κόστος, και ασφάλεια: Ποιοί οι σχετικοί κανονισμοί, το κόστος και τα θέματα ασφαλείας της αποθήκευσης του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς.

Οι κύριες ανάγκες της έρευνας είναι:

- η ανάπτυξη συστημάτων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της διαφυγής του CO₂ στο υπέδαφος
- η αξιολόγηση και η διασφάλιση της μακροχρόνιας σταθερότητας του δεσμευμένου CO₂
- η μείωση του κόστους και των ενεργειακών απαιτήσεων της αποθήκευσης του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλου βάθους

Οι προδιαγραφές λειτουργίας και οι ανάγκες της αποθήκευσης του CO₂ στους τρεις τύπους γεωλογικών σχηματισμών αξιολογήθηκαν χωριστά. Δεν εκπλήσσει το γεγονός ότι υπάρχουν κοινές ανάγκες σε όλους τους σχηματισμούς. Υπάρχουν ωστόσο σημαντικές διαφορές στην εξέλιξη της διαθέσιμης τεχνολογίας και της επιστημονικής κατανόησης των διαδικασιών που διέπουν την αποθήκευση του CO₂ σε διαφορετικούς τύπους γεωλογικών σχηματισμών. Το Σχήμα 4.5 υπογραμμίζει τις διαφορές και τις ομοιότητες αυτές.

Φυσικές δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου					
Χωρητικότητα τοποθεσίας	Σχετική βιομηχανική εμπειρία	Ωφέλιμη χρήση του CO ₂	Φυσικά ανάλογα αποθήκευσης	Ανάλυση κόστους και ασφάλειας	
<i>Λειτουργικές ανάγκες</i>					
Παρακολούθηση	Αξιολόγηση και πρόβλεψη απόδοσης	Τεχνολογία εισπίεσης, γεωτρήσεων, και ολοκλήρωσης φρεατίων	Χαρακτηρισμός σχηματισμών	Χαρακτηριστικά του ρεύματος απορριμάτων του CO ₂	Μηχανισμοί παγίδευσης

Υδάτινοι σχηματισμοί					
Χωρητικότητα τοποθεσίας	Σχετική βιομηχανική εμπειρία	Ωφέλιμη χρήση του CO ₂	Φυσικά ανάλογα αποθήκευσης	Ανάλυση κόστους και ασφάλειας	
<i>Λειτουργικές ανάγκες</i>					
Παρακολούθηση	Αξιολόγηση και πρόβλεψη απόδοσης	Τεχνολογία εισπίεσης, γεωτρήσεων, και ολοκλήρωσης φρεατίων	Χαρακτηρισμός σχηματισμών	Χαρακτηριστικά του ρεύματος απορριμάτων του CO ₂	Μηχανισμοί παγίδευσης

Κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα					
Χωρητικότητα τοποθεσίας	Σχετική βιομηχανική εμπειρία	Ωφέλιμη χρήση του CO ₂	Φυσικά ανάλογα αποθήκευσης	Ανάλυση κόστους και ασφάλειας	
<i>Λειτουργικές ανάγκες</i>					
Παρακολούθηση	Αξιολόγηση και πρόβλεψη απόδοσης	Τεχνολογία εισπίεσης, γεωτρήσεων, και ολοκλήρωσης φρεατίων	Χαρακτηρισμό σχηματισμών	Χαρακτηριστικά του Ρεύματος απορριμάτων του CO ₂	Μηχανισμοί παγίδευσης

Πίνακας 6.2: Διαφορές και ομοιότητες αποθήκευσης του CO₂ σε διαφορετικούς τύπους γεωλογικών σχηματισμών

6.12. Πίνακες αναγκών έρευνας για τους γεωλογικούς σχηματισμούς κατάλληλους για αποθήκευση

Πίνακας 6.3: Προτεραιότητες έρευνας για την αποθήκευση του CO₂ σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Βραχυπρόθεσμη έρευνα	Μεσοπρόθεσμη έρευνα	Μακροπρόθεσμη έρευνα
1. Κατανόηση της σημασίας των γεωχημικών αντιδράσεων για την ακεραιότητα σφράγισης, τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση, την καθίζηση, τη μακροπρόθεσμη ανάκτηση πετρελαίου	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Πλήρης αξιολόγηση των μεθόδων παρακολούθησης του CO₂ ▪ Βελτίωση της ανάλυσης των μεθόδων σεισμικής παρακολούθησης ▪ Ανάπτυξη δυνατοτήτων επαλήθευσης και παρακολούθησης της αποθήκευσης του CO₂ σε εφαρμογές EOR ▪ Αξιολόγηση και ανάπτυξη ηλεκτρικών μεθόδων για την παρακολούθηση του CO₂ ▪ Αξιολόγηση και ανάπτυξη μεθόδων για την παρακολούθηση της διαλυτότητας και την ορυκτή χαρτογράφηση 	Απόκτηση δεδομένων κόστους και απόδοσης από πλήρη ενιαία επίδειξη αποθήκευσης CO ₂ σε εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας σε εξαντλημένα ή εγκαταλελειμμένα αποθέματα φυσικού αερίου
2. Ανάπτυξη συζευγμένων εξομοιωτών H-M-C-T (υδρολογικών, μηχανικών, χημικών, θερμικών), για την αξιολόγηση της βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης απόδοσης και της ασφάλειας αποθήκευσης	Διεξαγωγή μικρού πιλοτικού Προγράμματος για βελτιωμένη ανάκτηση φυσικού αερίου από εξαντλημένα κοιτάσματα αερίου, με εισπίεση CO ₂	Ανάπτυξη μεθόδων για την αύξηση της απόδοσης της αποθήκευσης από υπάρχοντες υπολογισμούς (όγκος πόρων 1%-10%) σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50%

<p>3. Καθιέρωση αυστηρών κριτηρίων επιλογής τοποθεσιών αποθήκευσης σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Υψηλότερη προτεραιότητα σε προγράμματα EOR ▪ Δεύτερη προτεραιότητα σε εγκαταλελειμμένα κοιτάσματα φυσικού αερίου ▪ Αντιστοίχιση παραγωγών CO₂ με δυνητικές τοποθεσίες αποθήκευσης 	<p>Εφαρμογή πιλοτικού τεστ για την ταυτόχρονη βελτίωση της αποθήκευσης του CO₂ και των τεχνικών EOR</p>	
<p>4. Αξιολόγηση και ανάπτυξη των μεθόδων εντοπισμού εγκαταλελειμμένων γεωτρήσεων σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου</p>		

Πίνακας 6.4: Προτεραιότητες έρευνας για την αποθήκευση του CO₂ σε σχηματισμούς αλμυρού νερού.

Βραχυπρόθεσμη έρευνα	Μεσοπρόθεσμη έρευνα	Μακροπρόθεσμη έρευνα
<p>1. Ανάπτυξη πιλοτικού ελέγχου μικρής κλίμακας, με εισπίεση CO₂ σε ρηχό (<3.000 πόδια) υδροφορέα ή εγκαταστάσεις κατάλληλες για σχηματισμούς αλμυρού νερού</p>	<p>Κατανόηση της κινητικής της διάλυσης του CO₂ και της ορυκτής παγίδευσης</p>	<p>Απόκτηση δεδομένων κόστους και απόδοσης, από πλήρη ενιαία επίδειξη αποθήκευσης CO₂ σε εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας σε αλμυρό σχηματισμό μέτριου βάθους (2.000-5.000 πόδια)</p>
<p>2. Ανάπτυξη συζευγμένων εξομοιωτών H-M-C-T (υδρολογικών, μηχανικών, χημικών, θερμικών), για την αξιολόγηση της βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης απόδοσης και ασφάλειας της αποθήκευσης</p>	<p>Κατανόηση της επίδρασης της αύξησης της πίεσης, εξαιτίας της εισπίεσης CO₂, ως προς την ακεραιότητα του πετρώματος καλύμματος</p>	<p>Ανάπτυξη τεχνολογιών για τον περιορισμό ή τον έλεγχο των διαρροών του CO₂</p>
<p>3. Καθιέρωση αυστηρών κριτηρίων επιλογής τοποθεσιών αποθήκευσης σε υδάτινους σχηματισμούς. Αντιστοίχιση παραγωγών CO₂ με πιθανούς τύπους αποθήκευσης, σύμφωνα με τα κριτήρια επιλογής</p>	<p>Κατανόηση των χαρακτηριστικών των φυσικών δεξαμενών, με στόχο την ελαχιστοποίηση της αρνητικής επίδρασης της εισπίεσης CO₂ στο πέτρωμα καλύμματος</p>	<p>Ανάπτυξη εξελιγμένων θεωριών και τεχνολογιών για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της αποθήκευσης</p>

<p>Αξιολόγηση και ανάπτυξη (εάν κριθεί απαραίτητη) μεθόδων για την αξιολόγηση της ακεραιότητας των πετρωμάτων καλύμματος.</p> <p>Ανάπτυξη μεθόδου ανάλυσης ασφάλειας και τεχνικής στρατηγικής για την έννοια της «επιτρεπτής» έντασης διαρροής</p>	<p>Χρήση φυσικών δεξαμενών CO₂, με στόχο την κατανήση του τρόπου με τον οποίο η ορυκτή παγίδευση συνεισφέρει στη μόνιμη αποθήκευση</p>	<p>Ανάπτυξη μεθόδων απομακρυσμένου ελέγχου, ή άλλων μεθόδων χαμηλού κόστους, για την παρακολούθηση των διαρροών του CO₂</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Πίνακας 6.5: Προτεραιότητες έρευνας για την αποθήκευση του CO₂ σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα

Βραχυπρόθεσμη έρευνα	Μεσοπρόθεσμη έρευνα	Μακροπρόθεσμη έρευνα
<p>Φυσικές και χημικές ιδιότητες του ορυκτού άνθρακα</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Προσρόφηση/εκρόφηση CO₂ ▪ Αλληλεπιδράσεις με SO_x και NO_x ▪ Απόλυτη και σχετική διαπερατότητα ▪ Συμπεριφορά διόγκωσης από την προσρόφηση CO₂ 	<p>Ανάπτυξη εργαλείων εξομοίωσης H-M-C-T για ταυτόχρονη ροή υγρών, προσρόφηση-εκρόφηση φυσικού αερίου, παραμόρφωση και δυναμική της ροής του φυσικού αερίου σε αποθηκευτικά διαστήματα ορυκτού άνθρακα</p>	<p>Απόκτηση δεδομένων κόστους και απόδοσης, από πλήρη ενιαία επίδειξη παραγωγής μεθανίου, παραγωγής ενέργειας, και αποθήκευσης CO₂</p>
<p>Ανάπτυξη αυστηρών κριτηρίων επιλογής δεξαμενών, με στόχο την αξιολόγηση.</p> <p>Αντιστοίχιση παραγωγών CO₂ με πιθανούς τόπους αποθήκευσης, σύμφωνα με τα κριτήρια επιλογής</p>	<p>Διεξαγωγή πιλοτικού ελέγχου Εισπίεσης ερίων καπνοδόχου, με στόχο την αξιολόγηση της ικανότητας του CO₂ να προσροφάται στην επιφάνεια του ορυκτού άνθρακα, μετατοπίζοντας το μεθάνιο, ενώ το άζωτο σαρώνει το μεθάνιο</p>	<p>Ανάπτυξη τεχνολογιών και μεθόδων για εισπίεση και παραγωγή σε σχηματισμούς χαμηλής διαπερατότητας και μεγάλου βάθους</p>
	<p>Ανάπτυξη μηχανικών μεθόδων εισπίεσης και τεχνικών σχεδιασμού για τη Βελτιστοποίηση της αποθήκευσης του CO₂ και της παραγωγής μεθανίου σε στρώματα ορυκτού άνθρακα</p>	<p>Έλεγχος των αλληλεπιδράσεων CO₂, μεθανίου, και ορυκτού άνθρακα σε κορεσμένα από νερό αποθηκευτικά διαστήματα, ώστε να αξιολογηθεί κατά πόσον είναι απαραίτητη η αφαίρεση του νερού πριν από την εισπίεση του CO₂</p>

7. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ CO₂

7.1. Εισαγωγή

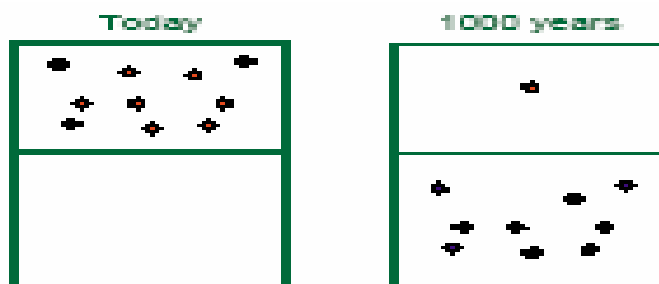
Η θάλασσα αποτελεί δυνητική λεκάνη για την αποθήκευση των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂. Αν και δε γνωρίζουμε τη μακροπρόθεσμη αποδοτικότητα και τις δυνητικές παρενέργειες αυτής της χρήσης της θάλασσας, έχουν προταθεί δύο τρόποι για τη βελτίωση της θαλάσσιας αποθήκευσης (Golomb, D. (1997):

- Η απευθείας εισπίαση σχετικά καθαρού ρεύματος CO₂, που προέρχεται, για παράδειγμα, από ενεργειακές εγκαταστάσεις ή βιομηχανικές διαδικασίες
- Η αύξηση της καθαρής ποσότητας CO₂ που εισάγεται στη θάλασσα από την ατμόσφαιρα, π.χ. μέσω του εμπλουτισμού με σίδηρο

Κατά μέσο όρο, ο ωκεανός έχει 4.000m βάθος, και περιέχει 40.000 GtC¹¹. Αποτελείται από το επιφανειακό στρώμα (θεωρητικά έχει 100m βάθος, στην πράξη όμως αυτό ποικίλλει), το θερμοκλινές (μέχρι το βάθος των 1.000m περίπου), και τα βάθη της θάλασσας κάτω από τα 1.000m. Ο χρόνος κυκλοφορίας των υδάτων μεταξύ της επιφάνειας και των βαθύτερων στρωμάτων κυμαίνεται από τα 250 χρόνια για τον Ατλαντικό, μέχρι τα 1.000 χρόνια για τμήματα του Ειρηνικού Ωκεανού. Η ίδια ποσότητα του άνθρακα που θα προκαλούσε το διπλασιασμό των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων, θα προκαλούσε μεταβολή των θαλάσσιων συγκεντρώσεων κατά λιγότερο από 2% (Golomb, D. 1997).

Σήμερα, η καθαρή ποσότητα άνθρακα που εισάγεται στη θάλασσα, ποσότητας $2 \pm 0,8$ GtC ανά έτος, οφείλεται στην αύξηση του ανθρωπογενούς CO₂ στην ατμόσφαιρα. Μέσα σε 1.000 χρόνια το 85% περίπου των σημερινών ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ θα έχει μεταφερθεί στη θάλασσα. Οι στρατηγικές θαλάσσιας αποθήκευσης έχουν στόχο να επιταχύνουν τη διαδικασία αυτή, για να μειώσουν τόσο το ρυθμό αύξησης των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων CO₂ όσο και τις μέγιστες τιμές τους (Golomb, D. (1997).

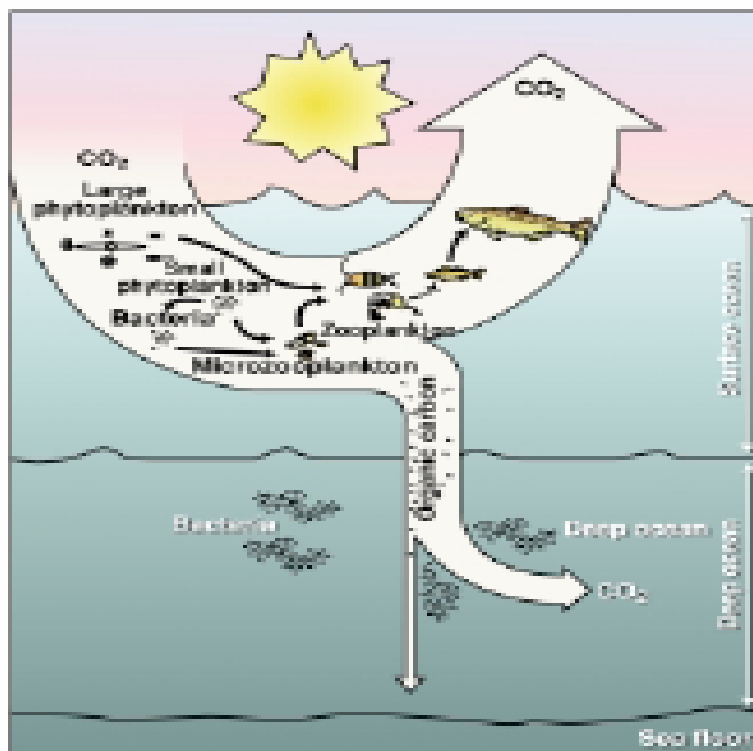
Αν και η θαλάσσια βιομάζα αντιπροσωπεύει μόλις το 0,05% του γήινου οικοσυστήματος, μετατρέπει σχεδόν την ίδια ποσότητα ανόργανου άνθρακα σε οργανική ύλη (50 GtC ανά έτος περίπου) με τις χερσαίες διαδικασίες. Η φωτοσυνθετική σταθεροποίηση του CO₂ από θαλάσσιους οργανισμούς, αλλά και η βύθιση και αργή επαναπολιθοποίηση (remineralization – μετατροπή σε CO₂) του οργανικού άνθρακα, αποτελεί φυσική διαδικασία αποθήκευσης του CO₂ στα βάθη της θάλασσας. Η διαδικασία αυτή συχνά ονομάζεται «βιολογική αντλία» (βλέπε Εικόνα 7.2).



Εικόνα 7.1:

Κάθε χρόνο, η θάλασσα δεσμεύει ενεργά το ένα τρίτο των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂. Σταδιακά (μέσα σε 1.000 χρόνια), το 85% περίπου των σημερινών ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ θα έχει μεταφερθεί στη θάλασσα. Οι στρατηγικές θαλάσσιας αποθήκευσης στοχεύουν στην επιτάχυνση αυτής της φυσικής διαδικασίας, για να μειώσουν τόσο το ρυθμό αύξησης των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων CO₂ όσο και τις μέγιστες τιμές τους (Σήμερα-Σε 1.000 χρόνια)

Εικόνα 7.2: Σχηματικό διάγραμμα της βιολογικής αντλίας. Σε αυτή τη γενική πελαγική τροφική αλυσίδα, το CO₂ δεσμεύεται από το φυτοπλαγκτόν μέσω της φωτοσύνθεσης. Το φυτοπλαγκτόν καταναλώνεται από ζωοπλαγκτόν, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να καταναλωθεί από οργανισμούς που βρίσκονται ανώτερα στην τροφική αλυσίδα, όπως τα ψάρια. Ο οργανικός άνθρακας, με τη μορφή υπολειμμάτων (π.χ. σφαιρίδια περιττωμάτων, οργανισμοί σε αποσύνθεση), βυθίζεται στα βάθη της θάλασσας, ενώ στο δρόμο επανα-απολιθοποιείται σε CO₂ από βακτήρια.



Το θέμα είναι κατά πόσον μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα βάθη της θάλασσας για την αποθήκευση επιπρόσθετου ανθρωπογενούς CO₂. Μικρές αλλαγές σε βιογεωχημικούς κύκλους μπορεί να έχουν τεράστιες επιπτώσεις, πολλές από τις οποίες είναι δευτερεύουσες και επομένως δύσκολο να προβλεφθούν. Παρόλα αυτά, σήμερα η θαλάσσια αποθήκευση του άνθρακα λαμβάνει χώρα σε τεράστια κλίμακα. Επομένως, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διεξάγουμε έρευνα για να κατανοήσουμε καλύτερα τόσο τους κινδύνους όσο και τις ευκαιρίες. Η θάλασσα παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της βιόσφαιρας, επομένως πρέπει να είμαστε εξαιρετικά προσεκτικοί με οποιαδήποτε αλλαγή των λειτουργιών του θαλάσσιου οικοσυστήματος.

Πόσο άνθρακα μπορεί να δεσμεύσει η θάλασσα; Επειδή στα βάθη της θάλασσας επικρατούν υψηλές πιέσεις, στα ύδατα αυτά μπορεί να διαλυθεί μεγάλη ποσότητα CO₂ (που υπερβαίνει τις εκτιμώμενες διαθέσιμες πηγές ορυκτών καυσίμων, της τάξης των 5.000-10.000 Gt C (Golomb, D. 1997)).

7.2. Άμεση εισπίεση CO₂

Για την άμεση εισπίεση του CO₂ στη θάλασσα πρέπει αρχικά να υπάρχει ένα αρκετά περιεκτικό ρεύμα CO₂ και να μεταφερθεί σε θαλάσσιες τοποθεσίες όπου θα δεσμευτεί αποτελεσματικά για αιώνες. Για να επιτευχθεί αυτό, το CO₂ θα έπρεπε να εισπνεστεί ως υγρό κάτω από το θερμοκλινές, δηλαδή σε βάθος μεγαλύτερο από τα 1.000m. Ένας περιορισμός που τίθεται από την προσέγγιση αυτή είναι ότι ταιριάζει περισσότερο σε πηγές μεγάλης ποσότητας στατικού CO₂ με πρόσβαση στις τοποθεσίες αποθήκευσης στα βάθη της θάλασσας – πηγές οι οποίες αντιστοιχούν στο 15-20% των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂.

Σήμερα υπάρχει η τεχνολογία για να προχωρήσουμε με αυτή τη διαδικασία, δεν υπάρχουν όμως οι απαραίτητες γνώσεις για να βελτιστοποιήσουμε το κόστος, να καθορίσουμε την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης (π.χ. τις επιπτώσεις της ως προς τη βελτίωση της κλιματικής αλλαγής), και να κατανοήσουμε τις προκύπτουσες αλλαγές στους βιογεωχημικούς κύκλους της θάλασσας. Το παρόν υποκεφάλαιο πραγματεύεται τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να αποκτήσουμε τις γνώσεις αυτές.

Υπάρχει ποικιλία τεχνικών για την αποθήκευση με άμεση εισπίεση του CO₂. Για παράδειγμα, το CO₂ μπορεί να εισπνεστεί σε μεσαίο βάθος (1.000-2.000m), σε μεγάλο βάθος (>3.000m) σε βυθίσεις στον πυθμένα της θάλασσας, ή και στον υποθαλάσσιο φλοιό της γης. Το CO₂ μπορεί να δεσμευτεί με τη διάλυσή του στη μάζα του νερού ή με το σχηματισμό υδριτών CO₂, οι οποίοι αποτελούν παγόμορφες ενώσεις σε στερεά μορφή. Η μεταφορά του CO₂ μπορεί να γίνει με αγωγούς ή με δεξαμενόπλοια. Σε κάθε περίπτωση, χρειαζόμαστε μοντέλα υπολογισμού για την περιοχή που εκτείνεται μερικά χιλιόμετρα γύρω από το σημείο εισπίεσης, για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τις φυσικές και χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του CO₂ και των θαλάσσιων υδάτων, αλλά και την αλληλεπίδραση ανάμεσα στο εμπλουτισμένο με CO₂ νερό και τα περιβάλλοντα υδάτινα στρώματα.

Πρόκληση αποτελεί και ο καθορισμός της ρυθμιστικής λειτουργίας των ιζημάτων του πυθμένα (π.χ. την ικανότητα του ανθρακικού ασβεστίου να αντιδρά με το CO₂), ώστε να βελτιώσουμε τη θαλάσσια αποθήκευση ως προς την αποτελεσματικότητά της και τις ποσότητες του δεσμευόμενου CO₂. Μια άλλη πρόκληση είναι να κατανοήσουμε την κινητική του σχηματισμού των υδριτών CO₂, ώστε να εκμεταλλευτούμε τις ιδιότητές τους (π.χ. αυξημένη πυκνότητα, χαμηλότερος συντελεστής μεταφοράς μάζας) στην αποθήκευση του άνθρακα. Τέλος, πρέπει να γίνουν αναλύσεις από μηχανικούς, για να εκτιμηθεί το κόστος των διαφόρων διαδικασιών εισπίεσης.

Η αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης εξαρτάται από το ακριβές βάθος και την τοποθεσία της εισπίεσης. Γενικά, όσο πιο βαθιά εισπιέζεται το CO₂ τόσο πιο αποτελεσματικά δεσμεύεται, όμως η εισπίεση σε μεγάλο βάθος απαιτεί πιο εξελιγμένη τεχνολογία, που ενδέχεται να αυξήσει το κόστος. Χρειαζόμαστε πρότυπα γενικής κυκλοφορίας των θαλάσσιων υδάτων σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο (OGCM), για να μπορέσουμε να ποσοτικοποιήσουμε την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης υπολογίζοντας τη μείωση του ατμοσφαιρικού CO₂ σε συνάρτηση με το χρόνο, για

διάφορες τεχνικές θαλάσσιας αποθήκευσης. Ωστόσο, πρέπει πρώτα να βελτιωθούν τα OGCM, για να μειωθεί η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων τους.

Πρέπει να αναλυθούν λεπτομερώς οι επιπτώσεις στο περιβάλλον κοντά στο σημείο εισπίεσης, και να γίνουν κατανοητές οι μακροπρόθεσμες, ευρύτερες επιπτώσεις στη λειτουργία του θαλάσσιου οικοσυστήματος. Θεωρείται ότι η σημαντικότερη περιβαλλοντική επίπτωση θα σχετίζεται με τη μείωση του pH από την αλληλεπίδραση μεταξύ CO₂ και νερού, αν και ενδέχεται να υπάρχουν και άμεσες επιπτώσεις από το ίδιο το CO₂.

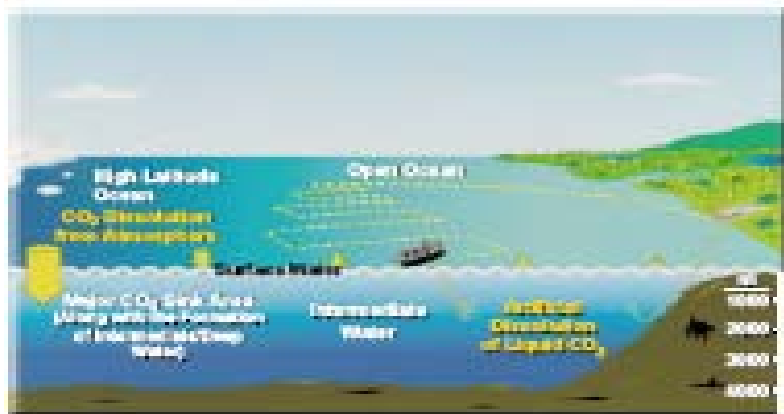
Οι θαλάσσιοι οργανισμοί που κατοικούν σε βάθος 1.000m ή και περισσότερο, έχουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες να επηρεαστούν αρνητικά από την αυξημένη οξύτητα των θαλάσσιων υδάτων, ενώ το ακριβές μέγεθος της επίδρασης αυτής θα εξαρτάται τόσο από το επίπεδο της αλλαγής του pH όσο και από τη χρονική της διάρκεια.

Θα επηρεαζόταν επίσης η μικροβιακή κοινότητα, επιφέροντας άγνωστες επιπτώσεις στις βιογεωχημικές διαδικασίες που παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο θαλάσσιο κύκλο του άνθρακα. Μπορούμε να περιορίσουμε την τοπική συγκέντρωση της επίδρασης αυτής σχεδιάζοντας συστήματα εισπίεσης που να διασκορπούν το CO₂ στο χώρο. Οι συγκεκριμένες ανάγκες έρευνας συμπεριλαμβάνουν τη συλλογή δεδομένων βάσης και την εφαρμογή οικονομικών και αποδοτικών μεθόδων παρακολούθησης. Με ισχυρά μοντέλα πρόβλεψης θα μπορούσαμε επίσης να μειώσουμε το κόστος παρακολούθησης, επικεντρώνοντας τη δειγματοληψία σε περιοχές μεγαλύτερης δυναμικής αντίδρασης.

Χάρη στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, που έχει εξερευνήσει και εκμεταλλευτεί παραγωγικά την ανοιχτή θάλασσα, έχουν γίνει μεγάλα βήματα στην ανάπτυξη της υποθαλάσσιας τεχνολογίας σε μεγάλη απόσταση από την ακτή (offshore). Η εργασία σε βάθος που πλησιάζει τα 2.000m έχει αρχίσει να γίνεται ρουτίνα. Η εργασία σε μεγαλύτερα βάθη, που πλησιάζουν ακόμα και τα 10.000m, είναι δυνατή σε πιο περιορισμένη κλίμακα ή/και χρονικά πλαίσια, όπως έχει φανεί σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους και σε άλλα επιστημονικά προγράμματα.

Ωστόσο, αντιμετωπίζονται ακόμα πολλές τεχνικές προκλήσεις στην εργασία σε μεγάλο βάθος, σε μεγάλη κλίμακα, για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα. Επομένως, φαίνεται ότι αρχικά η καλύτερη στρατηγική είναι να εισπίζεται το CO₂ κάτω από το θερμοκλινές, σε μεσαίο δηλαδή βάθος, μεταξύ 1.000 και 2.000m.

Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι εισπίεσης για την εφαρμογή της στρατηγικής αυτής (Σχήμα 7.3). Μια μέθοδος είναι η μεταφορά του υγρού CO₂ από την ακτή μέσω αγωγών, και η εναπόθεσή του στον πυθμένα της θάλασσας μέσω πολλαπλής εκχύλισης, σχηματίζοντας ένα αυξανόμενο λοφίο σταγονιδίων. Μια άλλη μέθοδος είναι η μεταφορά του υγρού CO₂ με δεξαμενόπλοια και η απελευθέρωσή του στη θάλασσα μέσω αγωγών που ρυμουλκούνται από το κινούμενο πλοίο. Αν και η μεταφορά γίνεται με διαφορετικό τρόπο, τα λοφία που προκύπτουν από τις δύο αυτές μεθόδους παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, και επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι επιστημονικές έρευνες για τις μεθόδους αυτές είναι αλληλοσυμπληρωματικές.



Εικόνα 7.3: Για την εισπίεση του CO_2 σε βάθη μεταξύ 1.000 και 2.000 m, έχει προταθεί ότι το υγρό CO_2 πρέπει να μεταφέρεται από την ακτή με αγωγούς, για εναπόθεση στο θαλάσσιο πυθμένα μέσω πολλαπλής εκχύλισης. Μια άλλη πρόταση είναι να μεταφέρουμε το υγρό CO_2

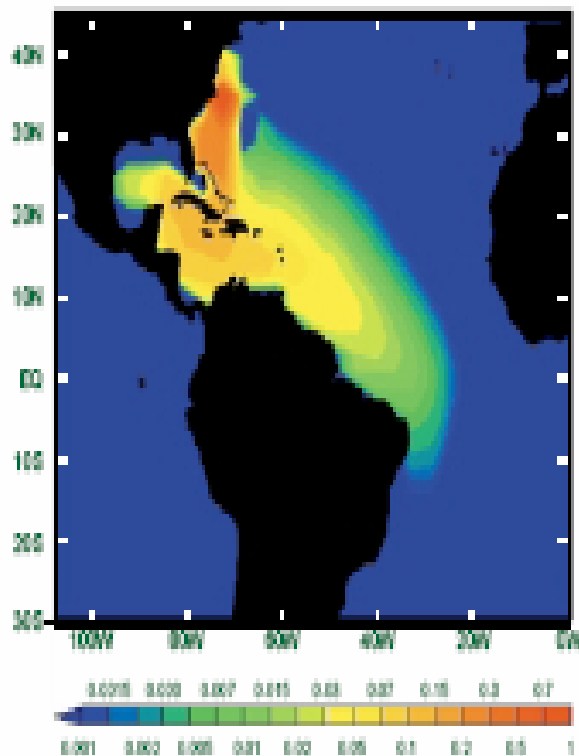
με δεξαμενόπλοια, και στη συνέχεια να το διαχέουμε στη θάλασσα μέσω αγωγού που ρυμουλκείται από το κινούμενο πλοίο.

Από τη στιγμή που το CO_2 αφήνει τον αγωγό, οι δυνατότητές μας είναι πολύ πιο περιορισμένες. Υπάρχουν μοντέλα για το χαρακτηρισμό του λοφίου κοντά στο σημείο εισαγωγής, δεν έχουν όμως επαληθευτεί εμπειρικά. Γνωρίζουμε ότι μπορεί να σχηματιστούν υδρίτες CO_2 από το εισπνευσμένο CO_2 (βλέπε πλαίσιο για το σχηματισμό υδριτών CO_2). Κατανοούμε πλήρως τη θερμοδυναμική συμπεριφορά των υδριτών, και υπάρχει εκτεταμένη διερεύνηση της κινητικής τους. Ωστόσο, ακόμα δεν έχει κατανοηθεί πλήρως η κινητική που διέπει το σχηματισμό και τη διάλυση των υδριτών στα θαλάσσια ύδατα, ιδίως κάτω από τις δυναμικές συνθήκες του λοφίου.

Υπάρχουν τοπικά και παγκόσμια μοντέλα OGCM, που περιγράφουν τι συμβαίνει τελικά στο εισπνευσμένο CO_2 , προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά του σε μεσαίες (δεκάδες με εκατοντάδες χιλιόμετρα) και μεγάλες (εκατοντάδες χιλιόμετρα και άνω) αποστάσεις από το σημείο εισπίεσης (Σχήμα 3.4). Τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσομοιώσουν γενικά χαρακτηριστικά, που προκύπτουν από παρατηρήσεις των πεδίων μεταβατικών ιχνηθετών (π.χ. χλωροφθοράνθρακες, άνθρακας 14, και τρίτιο), των οποίων οι μετακινήσεις στην ανοιχτή θάλασσα μπορούν εύκολα να εντοπιστούν.

Ο τομέας στον οποίο υστερούμε περισσότερο είναι ίσως η κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εισπίεσης CO_2 . Κατανοούμε την ιδιότητα της θάλασσας να εξουδετερώνει την αυξημένη οξύτητα των υδάτων, η οποία οφείλεται στο εισπνευσμένο CO_2 . Επίσης, διαθέτουμε τα κατάλληλα μοντέλα για να προβλέψουμε τις αλλαγές του pH σε απόσταση δεκάδων χιλιομέτρων από το σημείο εισπίεσης. Ωστόσο, γνωρίζουμε ελάχιστα πράγματα για το πώς και πόσο επηρεάζεται η βιοχημεία και τα θαλάσσια οικοσυστήματα σε μεγάλο βάθος από τις αλλαγές του pH, και για τις άλλες επιπτώσεις της εισπίεσης του CO_2 .

Εικόνα 7.4: Προσομοιωμένη κατανομή του άνθρακα που εισπνέζεται σε βάθος 1.720 m, έξω από την ακτή του Ακρωτηρίου Hatteras στη Βόρεια Καρολίνα. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο θαλάσσιο μοντέλο του Lawrence Livermore National Laboratory στις Η.Π.Α. Το μοντέλο αυτό προβλέπει ότι ο άνθρακας παρασύρεται προς το νότο, από ένα υποθαλάσσιο ρεύμα που ρέει κάτω από το Ρεύμα του Μεξικού. Η προσομοίωση αυτού του τύπου είναι απαραίτητη για να μπορούμε να καθορίσουμε με ακρίβεια σε ποια τοποθεσία και σε πιο βάθος είναι πιο αποτελεσματική η εισπνέση CO₂ στον πυθμένα της θάλασσας.



7.3 Βελτίωση της δυνατότητας φυσικής αποθήκευσης του άνθρακα στη θάλασσα

Η φυσική διαδικασία κατά την οποία ο άνθρακας παγιδεύεται από το φυτοπλαγκτόν (πρωτογενής παραγωγή) λαμβάνει χώρα με ρυθμούς 50 Pg Cy και οδηγεί στην αποθήκευση του άνθρακα στα βάθη του ωκεανού, μέσω της βιολογικής αντλίας (βλέπε Σχήμα 3.2). Η βιολογική αντλία έχει να κάνει με τη βαρυτική κατακρήνηση, την αργή επαναπολιθοποίηση και την ταφή των βιογενών υπολειμμάτων που προέρχονται από τα ανώτερα στρώματα της θάλασσας. Το φυτοπλαγκτόν των επιφανειακών υδάτων καταναλώνεται γρήγορα από το ζωοπλαγκτόν, το οποίο μπορεί να καταναλωθεί με τη σειρά του από μεγαλύτερα ζώα, όπως είναι τα ψάρια. Ενώ εκτιμάται ότι το 70-80% του παγιδευμένου άνθρακα ανακυκλώνεται στα επιφανειακά ύδατα, ο υπόλοιπος άνθρακας εξάγεται ως επιμερισμένος οργανικός άνθρακας (POC) στα βάθη της θάλασσας, όπου και επαναπολιθοποιείται αργά από βακτήρια.

Ο εμπλουτισμός της θάλασσας με μικρο-θρεπτικά (όπως ο σίδηρος) και μακρο-θρεπτικά στοιχεία (όπως το άζωτο και ο φώσφορος) αποτελεί στρατηγική που εξετάζεται ως προς τη βελτίωση της καθόδου CO₂ από την ατμόσφαιρα, κάτι που θα επιτάχυνε τη βιολογική αντλία. Επειδή ορισμένες περιοχές της θάλασσας παρουσιάζουν χαμηλά επίπεδα φυτοπλαγκτόν παρά τις υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου, συνειδητοποιήσαμε ότι η έλλειψη σιδήρου μπορεί να περιορίζει την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτόν (βλέπε το πλαίσιο για το πείραμα IRONEX).

Αρχικές βραχυπρόθεσμες μελέτες εμπλουτισμού με σίδηρο σε ύδατα με υψηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά αλλά χαμηλή σε χλωροφύλλη (HNLC) έδειξαν ότι ο επί τόπου εμπλουτισμός των επιφανειακών υδάτων με σίδηρο προάγει την αύξηση του φυτοπλαγκτόν και είναι εφικτός σε κλίμακα δεκάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων.

Ορισμένες εμπορικές επιχειρήσεις προσπαθούν να εκμεταλλευτούν τον εμπλουτισμό της θάλασσας για να αυξήσουν την αλιευτική τους παραγωγή. Αν και ο πρωταρχικός στόχος των επιχειρήσεων αυτών δεν είναι η αποθήκευση του άνθρακα, οι στρατηγικές εμπλουτισμού και οι δυνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι παρόμοιες, και όλες οι δραστηριότητες εμπλουτισμού με στόχο τη βελτίωση της αλιευτικής παραγωγής παρουσιάζουν την αποθήκευση του άνθρακα ως δευτερεύον όφελος.

Για παράδειγμα, η Ocean Farming Inc. έχει σχεδιάσει ένα μεγάλης κλίμακας πρόγραμμα εμπλουτισμού των υδάτων στα ανοιχτά των Νήσων Μάρσαλ με σίδηρο, πυρίτιο, και φώσφορο, για να αυξήσει την αλιευτική παραγωγή του τόνου. Η επιχείρηση αυτή ισχυρίζεται ότι η αποθήκευση του άνθρακα αποτελεί δευτερεύοντα στόχο της. Με παρόμοιο τρόπο, το MARICULT, μια Ευρωπαϊκή κοινοπραξία βιομηχανίας και κυβερνήσεων, διερευνά τις εμπορικές δυνατότητες του εμπλουτισμού των παράκτιων υδάτων για την αύξηση της αλιείας.

Αυτές οι εμπορικές δραστηριότητες προχωρούν, αν και ακόμα δεν γνωρίζουμε τις δυνητικές οικολογικές επιπτώσεις του εμπλουτισμού της θάλασσας. Οι επιπτώσεις αυτές κυμαίνονται από την αλλαγή της ποικιλότητας των ειδών μέχρι την πρόκληση της ανοξίας και σημαντικών αρνητικών επιδράσεων στη δομή και τη λειτουργία των κοινοτήτων της πανίδας. Το θεμελιώδες ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι κατά πόσον οι οποιοσδήποτε αλλοιώσεις του θαλάσσιου οικοσυστήματος δικαιολογούνται από τα οφέλη που αποφέρουν στην ανθρώπινη κοινωνία.

Ο θαλάσσιος εμπλουτισμός μικρής κλίμακας είναι εφικτός τόσο από μηχανική όσο και από οικονομική άποψη. Η τεχνολογία εμπλουτισμού των επιφανειακών υδάτων είναι αρκετά απλή: περιλαμβάνει την απελευθέρωση στοιχείων θρεπτικών για τα μικροφύκη, όπως ο σίδηρος, ο φώσφορος και το άζωτο, από πλατφόρμες σε πλοία ή αεροπλάνα. Πρόσφατα πειράματα εμπλουτισμού με σίδηρο (τα IRONEX I και II) απέδειξαν ότι η έλλειψη σιδήρου περιορίζει την πρωτογενή παραγωγή (φωτοσύνθεση) σε περιοχές τύπου HNLC, που έχουν ύψηλη περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά αλλά χαμηλή σε χλωροφύλλη, στις οποίες υπάρχει περίσσεια αζώτου και φωσφόρου (βλέπε το πλαίσιο για το πείραμα IRONEX). Η εισαγωγή 500 kg σιδήρου σε 72 Km² στον Ειρηνικό προκάλεσε τον 30-πλασιασμό της βιομάζας του φυτοπλαγκτόν, άλλαξε δραματικά την αναλογία των ειδών, και αύξησε το ρυθμό αποθήκευσης του άνθρακα.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες για την παρακολούθηση της αντίδρασης των οικοσυστημάτων στον εμπλουτισμό (ή στην ανθρωπογενή εισπίεση CO₂), που συμπεριλαμβάνουν πειράματα για την πρωτογενή και δευτερογενή παραγωγή, με χρήση τεχνικών ραδιοεντοπισμού. Ο καθορισμός της αντίδρασης των οικοσυστημάτων κάτω από την ευφωτική ζώνη (δηλαδή τη ζώνη στην οποία ο καθαρός ρυθμός της φωτοσύνθεσης είναι θετικός) θα μπορούσε να φανεί χρήσιμος σε τεχνικές επί τόπου φιλτραρίσματος, που καθορίζουν την κατανομή μεγεθών και τη χημεία των POC με ελάχιστη διαταραχή των δειγμάτων (βλέπε Σχήμα).

Για να εξακριβώσουμε την αποδοτικότητα της αποθήκευσης, θα πρέπει να διεξάγουμε έρευνα για τα θαλάσσια αποθέματα άνθρακα, χρησιμοποιώντας βελτιωμένες τεχνολογίες για να χαρακτηρίσουμε τα αποθέματα διαλυμένου και επιμερισμένου οργανικού και ανόργανου άνθρακα, το ρυθμό μεταφοράς μεταξύ των αποθεμάτων αυτών, και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων. Ήδη έχουν αναπτυχθεί ή αναπτύσσονται πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες δειγματοληψίας από πλοίο για πολλές

από τις βασικές παραμέτρους. Συνεχώς αναπτύσσεται και αυξάνεται ο στόλος των αισθητήρων άνθρακα και θρεπτικών στοιχείων, για χρήση σε αγκυροβολημένες, επιπλέουσες, ή αυτόνομες πλατφόρμες παρακολούθησης. Επίσης, συνεχώς αναπτύσσεται και η χρήση οπτικών προσεγγίσεων για την τηλεπαρακολούθηση της θαλάσσιας πρωτογενούς παραγωγής και της βιομάζας του άνθρακα.



Εικόνα 7.5: Το σύστημα επί τόπου φιλτραρίσματος με πολλαπλές μονάδες μεγάλου όγκου (MULVFS) επιτρέπει τον ακριβή καθορισμό των ιδιοτήτων της επιμερισμένης ύλης, ο οποίος απαιτείται για τη συστηματική διερεύνηση των θαλάσσιων αποθεμάτων

άνθρακα και για την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος. Τα δείγματα των MULVFS είναι αρκετά μεγάλα για να καλύψουν τις διαφορετικές ανάγκες πολλών ερευνητικών ομάδων.

Για να προσομοιώσουμε πόσο αποδοτικός είναι ο θαλάσσιος εμπλουτισμός ως στρατηγική αποθήκευσης του CO₂, πρέπει να ξεπεράσουμε δύο προκλήσεις. Πρώτον, πρέπει να μπορούμε να προβλέψουμε την αλλαγή στην εξαγωγή βιομάζας άνθρακα από την επιφάνεια στα βάθη της θάλασσας ως αποτέλεσμα του εμπλουτισμού. Δεύτερον, πρέπει να μπορούμε να προβλέψουμε τι συμβαίνει στον άνθρακα αυτόν αφού φτάσει στα βάθη της θάλασσας.

Είναι δύσκολο να προβλέψουμε τις αλλαγές στην εξαγωγή άνθρακα από τα επιφανειακά ύδατα εξαιτίας του εμπλουτισμού, επειδή εξαρτώνται από τις αλλαγές της δομής των οικοσυστημάτων, που είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν. Τα βιολογικά μοντέλα των επιφανειακών υδάτων έχουν προσομοιώσει την εξαγωγή βιολογικού άνθρακα σε συγκεκριμένες τοποθεσίες με αρκετή ακρίβεια, γενικά όμως τα μοντέλα αυτά είναι «ρυθμισμένα» ώστε να ταιριάζουν με τις παρατηρήσεις από τις τοποθεσίες αυτές. Γίνονται προσπάθειες να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που να μπορεί να εφαρμοστεί παγκόσμια για την πρόβλεψη της εξαγωγής άνθρακα με βάση τα θρεπτικά στοιχεία και τις φυσικές συνθήκες μόνο. Αν και έχουν γίνει μεγάλες πρόοδοι στον τομέα αυτό, ο ανωτέρω στόχος ακόμα δεν έχει επιτευχθεί. Επίσης, θα είναι σημαντικό να παρατηρούμε προσεκτικά κάθε πείραμα θαλάσσιου εμπλουτισμού, για να αναπτύξουμε αξιόπιστα δεδομένα για την αξιολόγηση των μοντέλων προσομοίωσης της θαλάσσιας βιολογίας και οικοσυστημάτων.

Εξίσου δύσκολο είναι να μαντέψουμε τι συμβαίνει στον βιογενή άνθρακα αφού μεταφερθεί στα βάθη του ωκεανού. Σημαντικό στοιχείο για τέτοιες προβλέψεις είναι ο υπολογισμός του βάθους στο οποίο θα οξειδωθεί ο οργανικός άνθρακας, ενώ το βάθος αυτό εξαρτάται από το αν ο άνθρακας είναι επιμερισμένος ή διαλυμένος, από το μέγεθος των σωματιδίων, και από άλλους παράγοντες.

Αφού οξειδωθεί ο οργανικός άνθρακας στα βάθη του ωκεανού, το πρόβλημα γίνεται παρόμοιο με το ζήτημα της εισπίασης CO₂ στα βάθη της θάλασσας – πρόβλεψη της μετακίνησης στη θάλασσα, εξαέρωση του CO₂ (επιστροφή στην ατμόσφαιρα), και

αλληλεπιδράσεις με τα ιζήματα. Έχουν ήδη διεξαχθεί αρκετές προσομοιώσεις για αυτήν την πλευρά του ζητήματος, που βασίστηκαν σε υποθέσεις για την ανάλυση της μεταφοράς του βιολογικού άνθρακα στη θάλασσα και για το βάθος της οξειδωσής του. Οι μελέτες αυτές έχουν συμπεράνει ότι η αποδοτικότητα του θαλάσσιου εμπλουτισμού σε στρατηγικής αποθήκευσης του CO₂ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμό ανάμιξης των επιφανειακών και των βαθέων στρωμάτων της θάλασσας. Αν ο άνθρακας ανέβει στην επιφάνεια μέσω της ανάμιξης αυτής, μπορεί να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα μέσω της εξαέρωσης.

Είναι επείγον να καθοριστούν οι δυνητικές οικολογικές επιπτώσεις του θαλάσσιου εμπλουτισμού μεγάλης κλίμακας τόσο στη βιόσφαιρα όσο και στους βιογεωχημικούς κύκλους. Πρέπει να μπορούμε να προβλέψουμε με ακρίβεια με ποιο τρόπο θα αλλάξουν τα οικοσυστήματα εξαιτίας του βραχυπρόθεσμου ή μακροπρόθεσμου εμπλουτισμού της θάλασσας. Πρέπει επίσης να κατανοήσουμε τη συνολική αποδοτικότητα της φυσικής θαλάσσιας αποθήκευσης του άνθρακα. Επιπλέον, η εφικτότητα του θαλάσσιου εμπλουτισμού απαιτεί τη βελτίωση του σχεδιασμού, της εκτέλεσης και της παρακολούθησης των οικολογικών επιπτώσεων που ίσως αποδειχτεί εξαιρετικά δαπανηρή, επομένως χρειαζόμαστε ισχυρά, δυναμικά μοντέλα πρόβλεψης της αντίδρασης των οικοσυστημάτων, για να μπορούμε να σχεδιάσουμε οικονομικές και αποδοτικές στρατηγικές παρακολούθησης.

7.3.1. IRONEX: Πειράματα εμπλουτισμού με σίδηρο

Ο Ειρηνικός στο ύψος του ισημερινού και ο Νότιος Ωκεανός παρουσιάζουν περίσσεια μακρο-θρεπτικών στοιχείων (αζώτου και φωσφόρου) στα επιφανειακά τους ύδατα. Ο αποβιώσας John Martin των Εργαστηρίων Moss Landing υπέθεσε ότι η περίσσεια των θρεπτικών στοιχείων στις περιοχές αυτές οφειλόταν στην έλλειψη του μικρο-θρεπτικού σιδήρου, περιορίζοντας την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτόν. Το 1993 και το 1995, για να ελεγχθεί αυτή η υπόθεση, διεξήχθησαν στον Ειρηνικό δύο πειράματα εμπλουτισμού με σίδηρο (τα IRONEX I και II), η μετακίνηση του οποίου δεν περιοριζόταν στο χώρο, ενώ σχεδιάζεται και η διεξαγωγή τρίτου πειράματος, στο Νότιο Ωκεανό.

Τα αποτελέσματα του IRONEX II, στο οποίο 500 kg σιδήρου προστέθηκαν σε 72 km² επιφανειακών υδάτων, ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακά. Η κβαντική απόδοση της φωτοσύνθεσης αυξήθηκε σημαντικά μέσα στις επόμενες 2 ώρες, το άζωτο και ο φωσφορος μειώθηκαν, ενώ οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης 30-πλασιάστηκαν μέσα μία εβδομάδα, πλησιάζοντας τα επίπεδα συγκεντρώσεων των τροπικών υδάτων. Η αναλογία των ειδών της κοινότητας του φυτοπλαγκτόν παρουσίασε δραματικές αλλαγές, και μέχρι το τέλος του πειράματος είχαν επικρατήσει τα μεγαλύτερα κύτταρα.

Η αύξηση της χλωροφύλλης οδήγησε στη μείωση της μερικής πίεσης του CO₂ στο γεωγραφικό κέντρο του πειράματος, και στον τριπλασιασμό της παραγωγής διμεθυλοσουλφιδίων, φαινόμενα που επηρεάζουν την κλιματική ρύθμιση. Η διάρκεια του πειράματος ήταν 18 ημέρες – διάρκεια που δεν επαρκεί για να επέλθουν σημαντικές αλλαγές σε υψηλότερα σημεία της τροφικής αλυσίδας – και το φαινόμενο άρχισε να διαλύεται σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά από την τελευταία εισπίεση σιδήρου. Δεν γνωρίζουμε με ακρίβεια πώς θα επηρέαζε ο συνεχής εμπλουτισμός τη δομή του οικοσυστήματος, την εξαγωγή άνθρακα στα βάθη της θάλασσας, και τη ροή των αερίων θερμοκηπίου. Οι επιδράσεις αυτές δεν μπορούν να προβλεφθούν από ένα

μεταβατικό πείραμα, επομένως χρειαζόμαστε πιο μακροπρόθεσμα πειράματα εμπλουτισμού.

7.4. Μακροπρόθεσμες καινοτόμες διαδικασίες θαλάσσιας αποθήκευσης του CO₂

- **Μετατροπή συγκεντρωμένου CO₂ σε σχετικά ισχυρό ανθρακικό οξύ σε ενεργειακές εγκαταστάσεις, χρήση του οξέος για τη διάλυση** ανθρακικών ορυκτών, και διάχυση των διαλυμένων ορυκτών και του CO₂ των διαλυμένων ορυκτών καυσίμων στη θάλασσα. Η τεχνική αυτή θα αύξανε κατά πολύ τις δυνατότητες αποθήκευσης στη θάλασσα και θα διέλυε τις ανησυχίες για την αλλαγή του pH, αφού τα διαλυμένα ανθρακικά ορυκτά εξουδετερώνουν μεγάλο μέρος της οξύτητας του ανθρακικού οξέος. Η προσέγγιση αυτή θα μείωνε τις πιθανότητες επιστροφής στην ατμόσφαιρα μέσω εξαέρωσης, παρακάμπτοντας την ανάγκη άντλησης του CO₂ σε μεγάλα βάθη και αποστάσεις. Οι περιορισμοί στους οποίους υπόκειται η διαδικασία αυτή περιλαμβάνουν την ανάγκη για μεγάλες ποσότητες υδάτων και για μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας ανθρακικών ορυκτών παρά ορυκτού άνθρακα στις ενεργειακές εγκαταστάσεις.
- **Ταφή οργανικού άνθρακα στη θάλασσα.** Τα οργανικά απόβλητα θα μπορούσαν να φυλάσσονται σε ένα παχύ στρώμα στον θαλάσσιο πυθμένα. Οι πηγές του οργανικού άνθρακα θα συμπεριλάμβαναν απόβλητα αγροκτημάτων, μαύρο άνθρακα (carbon-black) από απανθρακωμένα καύσιμα, ή εκβαθυμένα ιζήματα πλούσια σε οργανική ύλη. Η βιομάζα από ταχείας ανάπτυξης θαλάσσια χλόη, φύκη τύπου kelp, και χερσαία πανίδα θα μπορούσε να ταφεί στον θαλάσσιο πυθμένα. Ωστόσο, ίσως αποδειχθεί ότι η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων βιομάζας στα βάθη της θάλασσας είναι πολύ δαπανηρή. Επιπλέον, η ανοξία και η παραγωγή μεθανίου ίσως αποτελούν σοβαρό πρόβλημα της προσέγγισης αυτής.
- **Εξόρυξη υδροξειδίων και ανθρακικών οξέων (π.χ. υδροξείδιο νατρίου, υδροξείδιο καλίου, άλας του ανθρακικού νατρίου) και διάλυσή τους στη θάλασσα.** Όταν διαλυθούν τα ορυκτά αυτά, εξουδετερώνουν την οξύτητα που προκαλείται από το ανθρωπογενές CO₂, και κάνουν πιο αποδοτική τη θαλάσσια αποθήκευση του CO₂. Η περιορισμένη διαθέσιμη ποσότητα των υλικών αυτών στη φύση ίσως είναι καθοριστική για την προσέγγιση αυτή.

7.5. Ανάγκες έρευνας

- Οι διαθέσιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση μιας στρατηγικής εισπίεσης είναι ανεπαρκείς. Για παράδειγμα, πρέπει να απαντηθούν οι εξής ερωτήσεις:
 - ✓ Θα έπρεπε να εισπιάσουμε διαλυμένα ρεύματα CO₂ για να προσπαθήσουμε να αποφύγουμε τις όποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις; Θα επηρεάσει το κόστος η στρατηγική αυτή;
 - ✓ Θα έπρεπε να εισπιάσουμε ρεύματα CO₂ στα βάθη της θάλασσας, για να μεγιστοποιήσουμε το χρόνο συγκράτησης του άνθρακα; Αξίζει τον κόπο να επωμιστούμε το επιπλέον κόστος; Θα είναι διαθέσιμες οι αντίστοιχες τεχνικές δυνατότητες μέχρι το 2025;

- Από την πλευρά της **μηχανικής**, πρέπει να λυθούν τα εξής συγκεκριμένα ερευνητικά θέματα:
 - Ανάπτυξη της τεχνολογίας εισπίεσης. Αν και μπορούμε και σήμερα να εισπίεσουμε το CO₂, χρειαζόμαστε συγκριμένη τεχνολογία, με χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μεγαλύτερο βάθος, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο.
 - Πειραματική επαλήθευση της συμπεριφοράς του CO₂ κοντά στο σημείο εισπίεσης. Η κατανόηση της συμπεριφοράς αυτής ενδέχεται να οδηγήσει σε στρατηγικές εισπίεσης που να ελαχιστοποιούν τις όποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
 - Καλύτερη κατανόηση της δυναμικής ανταπόκρισης (π.χ. κινητική συμπεριφορά) που αντιστοιχεί στο σχηματισμό και τη διάλυση των υδριτών. Αυτό θα ήταν το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη στρατηγικών που εκμεταλλεύονται το σχηματισμό υδριτών για την αποθήκευση του CO₂ (βλέπε Κεφάλαιο 7).
 - Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν περιβαλλοντικοί περιορισμοί, ανάπτυξη στρατηγικών που μεγιστοποιούν την εξουδετέρωση της αυξημένης οξύτητας των υδάτων, μέσω θαλάσσιων ιζημάτων ανθρακικού ασβεστίου. Η προσέγγιση αυτή θα επέφερε δύο θετικά αποτελέσματα: τη μείωση των αλλαγών του pH του νερού, και την αύξηση των δυνατοτήτων της θάλασσας για αποθήκευση του CO₂.
 - Ανάπτυξη τεχνολογίας παρακολούθησης για τις αλλαγές των βιογεωχημικών διαδικασιών και οικοσυστημάτων της θάλασσας.
- Όσον αφορά την **αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών εισπίεσης**, μπορούμε να καλύψουμε συγκεκριμένα κενά γνώσεων εάν οι ερευνητές επιτύχουν:
 - Να βελτιώσουν τις αδυναμίες των OGCM, ιδίως ως προς τα ρεύματα δυτικών ορίων, τα ρεύματα του θαλάσσιου πυθμένα, και τις διαδικασίες κλίμακας υποπλέγματος (π.χ. στρόβιλοι), και να επαληθεύσουν τα μοντέλα αυτά με φυσικούς και ίσως και πειραματικά απελευθερωμένους ιχνηθέτες.
 - Να συνδυάσουν τα αποτελέσματα της εισπίεσης του CO₂ σε κοντινή απόσταση από το σημείο εισπίεσης με τα αντίστοιχα σε μεγάλη απόσταση, μέσω ιεράρχησης των μοντέλων, ή μέσω μη ομοιόμορφων πλεγμάτων. Συγκεκριμένα, θα έπρεπε να συνδυαστούν τα μοντέλα των θαλάσσιων λοφίων με μοντέλα θαλάσσιας κυκλοφορίας σε επίπεδο λεκάνης και σε παγκόσμιο επίπεδο.
- Σχετικά με τις **περιβαλλοντικές επιπτώσεις της άμεσης εισπίεσης**, οι ερευνητές μπορούν να καλύψουν τα σημερινά κενά γνώσεων εάν καταφέρουν (Itaoka, K et al, 2005):
 - Να κατανοήσουν τις επιπτώσεις της τρέχουσας αποθήκευσης CO₂ στη θάλασσα. Το CO₂ ήδη δεσμεύεται στη θάλασσα με φυσικό τρόπο, χωρίς ανθρώπινη βελτίωση ή άμεση εισπίεση, και πρέπει να κατανοήσουμε τις επιπτώσεις του φαινομένου αυτού.
 - Να καθορίσουν τις παραμέτρους της άμεσης εισπίεσης CO₂ που θα ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

- Να κατανοήσουν τις επιπτώσεις της συνεχούς απελευθέρωσης του CO₂ στη βιοχημεία, τα οικοσυστήματα, και τους οργανισμούς της θάλασσας. Εκτός από την αλλαγή του pH, υπάρχουν και άλλες σημαντικές επιπτώσεις;
- Να απαντήσουν στα εξής ερωτήματα: Θα έπρεπε το ρεύμα του εισπνειζόμενου CO₂ να είναι καθαρό (δηλαδή >99%); Επιδεικνύουν τα θαλάσσια οικοσυστήματα ανοχή σε άλλα αέρια, όπως το άζωτο, το υδρογόνο, το CO, το οξυσουλφίδιο του άνθρακα, το αργό, το σουλφίδιο υδρογόνου, το NO_x, το SO₂, και τα μεταλλικά ιχνοστοιχεία; Σε τι επίπεδα; Τι επιπτώσεις θα είχαν τα αέρια αυτά στα θαλάσσια οικοσυστήματα (Itaoka, K et al, 2005);
- Να διερευνήσουν τις επιπτώσεις του CO₂ ως προς τη βιο-διαταραχή των ιζημάτων (βιο-διαταραχή είναι η διαταραχή των θαλάσσιων ιζηματογενών δομών από τις δραστηριότητες των βενθικών οργανισμών). Χάρη στη βιο-διαταραχή, το σκελετικό ανθρακικό ασβέστιο που είναι θαμμένο στα πρώτα δέκα (ή και λίγο περισσότερα) εκατοστά των ιζημάτων, γίνεται διαθέσιμο για την αντίδραση εξουδετέρωσης του δεσμευμένου CO₂.

Για το **θαλάσσιο εμπλουτισμό** ως στρατηγική βελτιωμένης αποθήκευσης του άνθρακα.

- Δε γνωρίζουμε τις επιπτώσεις του μακροπρόθεσμου θαλάσσιου εμπλουτισμού στη δομή και λειτουργία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Ο εμπλουτισμός οδηγεί αναπόφευκτα σε αλλαγές στη δομή του φυτοπλαγκτόν, οι οποίες θα μπορούσαν να επιφέρουν περαιτέρω αλλαγές στη δομή και τη δυναμική της θαλάσσιας τροφικής αλυσίδας. Οι αλλαγές αυτές θα μπορούσαν να έχουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις (τόσο θετικές όσο και αρνητικές) στην αλιεία, που ήδη βρίσκεται υπό κάμψη λόγω της υπερ-αλιείας. Σε οικοσυστήματα λιμνών, ο εμπλουτισμός με σίδηρο και φώσφορο ευνοεί την ανάπτυξη των κυανοβακτηρίων εις βάρος των άλλων τύπων φυτοπλαγκτόν. Η αύξηση αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει πρόβλημα, επειδή ορισμένα είδη κυανοβακτηρίων παράγουν ισχυρές τοξίνες. Βέβαια τα κοινά θαλάσσια κυανοβακτήρια είναι μη τοξικά, πρέπει όμως το θέμα να διερευνηθεί περαιτέρω.
- Οι επιπτώσεις του συνεχούς εμπλουτισμού στους φυσικούς θαλάσσιους βιογεωχημικούς κύκλους μας είναι απολύτως άγνωστες. Οι βιογεωχημικοί κύκλοι του άνθρακα, του αζώτου, του φωσφόρου, του πυριτίου, του θείου, του κοβαλτίου, του ψευδαργύρου, και ίσως και του σεληνίου σε θαλάσσια περιβάλλοντα είναι ιδιαίτερα περίπλοκοι και αλληλένδετοι, ενώ πρόσφατα στοιχεία υποδεικνύουν ότι οι κύκλοι αυτοί ρυθμίζονται από τη διαθεσιμότητα του σιδήρου σε παγκόσμια κλίμακα. Η διαταραχή ενός βασικού κύκλου μπορεί να έχει απροσδόκητες επιπτώσεις.
- Πρέπει να καθορίσουμε τους πιθανούς κινδύνους του εμπλουτισμού που οδηγεί στον ευτροφισμό. Ο ευτροφισμός εξαντλεί το οξυγόνο, γεγονός που θα προκαλούσε το θάνατο των ειδών που απαιτούν οξυγόνο. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή μεθανίου από μικροοργανισμούς. Από την άλλη πλευρά, η έλλειψη οξυγόνου στα ιζήματα του θαλάσσιου πυθμένα θα μπορούσε να ευνοήσει τη διατήρηση του θαμμένου άνθρακα στη θάλασσα, εξαιτίας των αργών ρυθμών της επανα-απολιθοποίησης. Δεν γνωρίζουμε τις επιπτώσεις του εμπλουτισμού στους οργανισμούς που κατοικούν στα ιζήματα (τους βενθικούς οργανισμούς).
- Προς το παρόν, δεν κατανοούμε πλήρως την αποδοτικότητα του θαλάσσιου εμπλουτισμού σε μεγάλη κλίμακα. Η βελτιωμένη παγίδευση του άνθρακα στα

επιφανειακά ύδατα θα αυξήσει την ποσότητα του άνθρακα που δεσμεύεται στα βάθη του ωκεανού; Έχουν γίνει ορισμένες προκαταρκτικές εργασίες προσομοίωσης, όμως τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε απλοποιημένες βιολογικές υποθέσεις και δεν έχουν επαληθευτεί από πραγματικά στοιχεία.

7.6. Έρευνα σε εξέλιξη

Ακολουθεί περιγραφή ερευνητικών προγραμμάτων για την αποθήκευση του CO₂ στη θάλασσα.

Διεθνές πρόγραμμα πειραμάτων πεδίου. Είναι τεχνικά εφικτή η θαλάσσια αποθήκευση του CO₂; Τι επιπτώσεις έχει στο περιβάλλον; Μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε τις επιπτώσεις αυτές οικονομικά; Αυτές τις ερωτήσεις πραγματεύεται ένα διεθνές ερευνητικό πρόγραμμα. Η Ιαπωνία, η Νορβηγία, και οι Η.Π.Α. υπέγραψαν μια Συμφωνία Προγράμματος Διεθνούς Συνεργασίας για τη Θαλάσσια Αποθήκευση του CO₂ το Δεκέμβριο του 1997. Από τότε, ο Καναδάς, η Αυστραλία και η Ελβετία αποφάσισαν να ενταχθούν στο πρόγραμμα, το οποίο συνεχίζει μέχρι τις 31 Μαρτίου του 2008.

Το καλοκαίρι του 2001 διεξήχθη ένα πείραμα πεδίου στα ανοιχτά της ακτής Κονα στη Χαβάη. Τα ερευνητικά ιδρύματα που συμμετέχουν είναι: το Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνολογικών Καινοτομιών για τη Γη (Ιαπωνία), το Νορβηγικό Ινστιτούτο Έρευνας Υδάτων (Νορβηγία), το Ινστιτούτο Ωκεάνιων Επιστημών (Καναδάς) και το MIT, το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασσαχουσέτης (Η.Π.Α.). Γενικός ανάδοχος του προγράμματος είναι το Διεθνές Κέντρο του Ειρηνικού για Έρευνες Υψηλής Τεχνολογίας, που βρίσκεται στη Χαβάη. Για τη διερεύνηση των πιο μακροπρόθεσμων οξέων και χρόνιων βιολογικών επιπτώσεων, ενδέχεται να διεξαχθεί ένα πρόγραμμα σε δεύτερη φάση, σε περιορισμένη ή ημι-περιορισμένη τοποθεσία, π.χ. σε ένα φιόρδ.

Σχηματισμός υδριτών CO₂ στα βάθη της θάλασσας. Μια στρατηγική που έχει προταθεί για τη θαλάσσια αποθήκευση του CO₂ με απευθείας εισπίεση, είναι η δημιουργία μιας «λίμνης CO₂» με μεγάλη διάρκεια ζωής στον πυθμένα της θάλασσας. Για να διερευνήσουν την ιδέα αυτή, ορισμένοι επιστήμονες από το MBARI διεξήγαγαν σειρά πειραμάτων στα βάθη της θάλασσας, με μετατροπή του CO₂ από ορυκτά καύσιμα σε στερεούς υδρίτες (CO₂ 5,75 H₂O).

Πρόσφατα διεξήγαγαν ένα πείραμα με το *Tiburon*, το τηλεχειριζόμενο σκάφος ROV του MBARI, ανοιχτά της κεντρικής ακτής της Καλιφόρνια. Το ROV μετέφερε περίπου 9L υγρού CO₂ σε βάθος 3.650 m, όπου η πίεση είναι ~36 Μρα και η θερμοκρασία 1,6 °C. Το CO₂ βρισκόταν σε έναν αστάλινο συσσωρευτή, στον οποίο ένα πιστόνι προσαρμοζόταν συνεχώς στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η έκχυση του CO₂ γινόταν με την εφαρμογή πίεσης στο πιστόνι από μια αντλία νερού, που λειτουργούσε με βάση τα υδραυλικά συστήματα του σκάφους. Εν μέρει επειδή σε αυτό το βάθος το CO₂ είναι πυκνότερο από το νερό, ο σχηματισμός υδριτών παρουσιάζει δραματικές διαφορές από την ίδια διαδικασία σε πιο ρηγά ύδατα.

Εικόνα 7.6: Πείραμα του MBARI - έκχυση υγρού CO₂ στον πυθμένα της θάλασσας.



Οι επιστήμονες του MBARI παρατήρησαν ραγδαία αύξηση του όγκου των ελεγχόμενων πειραμάτων καθώς υψωνόταν η επιφάνεια αλληλεπίδρασης CO₂-νερού, γεγονός που προκαλούσε την υπερχειλίση του υγρού στο θαλάσσιο πυθμένα για περίπου 100 λεπτά μετά από την εκκίνηση του πειράματος. Απέδωσαν το αποτέλεσμα αυτό στο σχηματισμό ενός υδρίτη, ο οποίος γίνεται εύκολα ορατός ως

μάζα που συσσωρεύεται στον πυθμένα των δεξαμενών. Αυτή η ενσωμάτωση μεγάλης ποσότητας νερού σε στερεά μορφή οδήγησε στην αύξηση του όγκου του συστήματος, με συντελεστή αύξησης 4 ως 7, προκαλώντας την υπερχειλίση του εναπομένοντος CO₂. Η ισχυρή ένταση μεταξύ των επιφανειών αλληλεπίδρασης εξακολούθησε να αποτελεί σταθερό όριο ανάμεσά τους, γεγονός που δεν επέτρεψε στο απελευθερωθέν υγρό CO₂ να αλληλεπιδράσει με τα ιζήματα

Σύγκριση Μοντέλων των Θαλάσσιων Κύκλων του Άνθρακα. Το Διεθνές Πρόγραμμα Γεώσφαιρας-Βιόσφαιρας ξεκίνησε το Πρόγραμμα Σύγκρισης Μοντέλων των Θαλάσσιων Κύκλων του Άνθρακα (OCMIP) το 1995, μέσα από την ομάδα εργασίας Παγκόσμιας Ανάλυσης, Ερμηνείας, και Προσομοίωσης. Το OCMIP αποτελεί διεθνές πρόγραμμα για τη βελτίωση των μοντέλων των θαλάσσιων κύκλων του άνθρακα, μέσα από τη μεταξύ τους σύγκριση και την αξιολόγησή τους με χρήση δεδομένων που προκύπτουν από παρατηρήσεις. Εν μέρει χάρη στην επιπλέον χρηματοδότηση που παρείχε το Πρόγραμμα ΈΡΕΥΝΑΣ, της ΙΕΑ για τα Αέρια Θερμοκηπίου, το Ευρωπαϊκό Ερευνητικό Πρόγραμμα για την Παγκόσμια Θαλάσσια Αποθήκευση και τον Ανθρωπογενή Άνθρακα θα εξετάσει επίσης τις παγκόσμιες επιστημονικές πλευρές του θέματος της αποθήκευσης του CO₂ στα βάθη της θάλασσας.

Συγκεκριμένα, οι ερευνητές θα συγκρίνουν μοντέλα διάχυσης του CO₂ από επτά υποθετικές σημειακές πηγές, για να κατανοήσουν καλύτερα την αποδοτικότητα της αποθήκευσης. Το αμερικανικό τμήμα του OCMIP (που χρηματοδοτείται από το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών και την Εθνική Διοίκηση Αεροναυτικής και Διαστήματος, και συμπεριλαμβάνει το MIT, το Κρατικό Πανεπιστήμιο της Πενσυλβανίας, το Εθνικό Κέντρο Ατμοσφαιρικών Ερευνών, το Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore, και το Πανεπιστήμιο Princeton) έχει αναλάβει να διεξαγάγει την ίδια σειρά αναλύσεων σε μοντέλα από τις Η.Π.Α., όμως δεν είναι ακόμα διαθέσιμη η χρηματοδότηση και για τη δραστηριότητα αυτή.

Το Πρόγραμμα Θαλάσσιας Αποθήκευσης του CO₂ στην Ιαπωνία. Τον Απρίλιο του 2003, ξεκίνησε στην Ιαπωνία ένα 5-ετές εθνικό πρόγραμμα που διερευνούσε τη θαλάσσια αποθήκευση του CO₂. Η ετήσια χρηματοδότηση ξεπερνά τα \$ 10 εκατομμύρια το χρόνο. Τα βασικά ερευνητικά ιδρύματα του προγράμματος αυτού είναι: το Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνολογικών Καινοτομιών για τη Γη, και το Κέντρο Περιβαλλοντικής Μηχανικής Kansai. Το πρόγραμμα αυτό περιλαμβάνει δραστηριότητες ερευνητικής συνεργασίας ανάμεσα σε εθνικά ιδρύματα, ιδιωτικές επιχειρήσεις, και πανεπιστήμια.

Οι ανάγκες Έρευνας περιλαμβάνουν τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του υγρού CO₂ που απελευθερώνεται στη θάλασσα, την ανάπτυξη μηχανικού συστήματος για την εισπίεση του CO₂, την αξιολόγηση των επιπτώσεων του CO₂ στους θαλάσσιους οργανισμούς, την ανάπτυξη μοντέλων αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κοντά στο σημείο εισπίεσης, την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης τύχης του δεσμευμένου CO₂, και τη συμμετοχή σε διεθνή πειράματα πεδίου.

8. ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΟΥ CO₂

Οι εξελιγμένες χημικές τεχνολογίες είναι εναλλακτικές λύσεις αποθήκευσης CO₂ όπως η μετατροπή του δεσμευμένου CO₂ σε καλοήγη, αδρανή υλικά με μεγάλη διάρκεια ζωής, που να μπορούν να αποθηκευτούν στο έδαφος και τις θάλασσες του πλανήτη. Οι περισσότερες από τις εξελιγμένες χημικές προσεγγίσεις που αναφέρονται προϋποθέτουν ότι οι διαδικασίες διαχωρισμού και αποθήκευσης θα παράγουν CO₂ υπό πίεση με ελάχιστα (και συγκεκριμένα) επίπεδα προσμίξεων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Μία προσέγγιση είναι να μετατραπεί το CO₂ σε μη εμπορικά υλικά που είναι αδρανή και με μεγάλη διάρκεια ζωής, όπως το ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO₃). Εφόσον δεν έχουν καμία εμπορική αξία, τα υλικά αυτά θα έπρεπε να δεσμεύονται με σχετικά οικονομικό τρόπο, π.χ. ξαναγεμίζοντας τα φρεάτια που προμήθευσαν αρχικά το μαγνήσιο και τα σχετικά υλικά. Αν αντιδράσει σε MgCO₃, η συνολική παγκόσμια παραγωγή άνθρακα για το 2008 θα μπορεί να περιέχεται σε ένα χώρο 10 km x 10 km x 150 m (DOE).

	Χημική / φυσική μετατροπή	ΔH ₂₉₈ 0 _K (Kcal/mole)
	<i>Παραγωγή ενέργειας</i>	
Καύση ορυκτού άνθρακα	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-94.05
Καύση φυσικού αερίου	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	-191.76
	<i>Αποθήκευση</i>	
Ανθρακικές ενώσεις	$CO_2 + \frac{1}{2}CaSiO_3 + \frac{1}{2}H_2O \rightarrow \frac{1}{2}Ca^{2+} + HCO_3 + \frac{1}{2}SiO_2$	-15.70
Ανθρακικό ιόν	$CO_2 + \frac{1}{3}Mg_3Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow MgCO_3 + \frac{2}{3}SiO_2 + \frac{2}{3}H_2O$	-3.45
Οξαλικό οξύ	$CO_2 + CO + CaSiO_3 \rightarrow CaC_2O_4 + SiO_4$	-31.34

Ένωση έγκλεισης	$\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$	-5.68 _(στούς 1210K)
Υγροποίηση	$\text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{l})$	-1.27 _(στούς 2980K, στις 63.5 atm)
	Αξιοποίηση	
Σύνθεση μεθανόλης	$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	-31.30
(Παραγωγή υδρογόνου)	$(3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + 3/2\text{O}_2)$	(+205.05)
Κυκλική οργανική ανθρακική ένωση	$\text{CO}_2 \pm \text{PhCH}=\text{CH}_2 \pm 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{PhCHO}(\text{C}=\text{O})\text{OCH}_2$	-55.3

Πίνακας 8.1: Θερμοδυναμική των χημικών/ φυσικών μετατροπών που αφορούν το CO₂

Οι ωκεανοί μπορούν επίσης να αποτελέσουν χώρο οικονομικής αποθήκευσης του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να ενσωματωθεί σε μορφές πάγου που ονομάζονται υδρίτες του CO₂, που έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής όταν βρίσκονται σε επαρκές βάθος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αν εισαχθεί σε υδρίτες το CO₂, η συνολική παγκόσμια παραγωγή άνθρακα για το 2008 θα μπορεί να περιέχεται σε ένα χώρο 80 km³ περίπου.

Το διοξείδιο του άνθρακα, το CO, ή ο άνθρακας από την παραγωγή ενέργειας, θα μπορούσαν επίσης να ανακτώνται και να μετατρέπονται σε εμπορικά προϊόντα (π.χ. πλαστικά και ελαστικά) που είναι αδρανή και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Το 1996, η συνολική παγκόσμια παραγωγή των προϊόντων αυτών απαιτήσε περίπου 206 x 10⁶ τόνους άνθρακα, δηλαδή το 3,5% των ανθρωπογενών εκπομπών άνθρακα της ίδιας χρονιάς.

Οι διαδικασίες πρέπει να πληρούν τα εξής κριτήρια:

- Να είναι φιλικές προς το περιβάλλον.
- Να έχουν σταθερότητα και βιωσιμότητα για μακροπρόθεσμη αποθήκευση ή εναπόθεση.
- Να είναι ασφαλείς.
- Να έχουν ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με εναλλακτικές μεθόδους αποθήκευσης ή μείωσης του CO₂.
- Να είναι εξαρχής λογικές, ιδίως ως προς την ενεργειακή ισορροπία.
- Να αναπτυχθούν επαρκείς γνώσεις για τις διαδικασίες αυτές, και για τις θερμοδυναμικές και κινητικές τους πλευρές, ώστε να τις κατανοούμε πλήρως.

Οι χημικές διαδικασίες αποθήκευσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (1) εκείνες που παράγουν αδρανή υλικά και (2) εκείνες που παράγουν χρήσιμα προϊόντα πιθανής εμπορικής αξίας. Οι τεχνολογικές αναγκές εφαρμογής των μεθόδων περιλαμβάνουν:

- (1) την κατανόηση της βασικής χημείας και των απαιτήσεων χημικής μηχανικής,
- (2) την ανάπτυξη, βελτιστοποίηση, και εφαρμογή της διαδικασίας σε μεγάλη κλίμακα,
- (3) πρακτικά ζητήματα περιβαλλοντικού και οικολογικού αντίκτυπου, και θέματα οικονομικής αποδοχής.

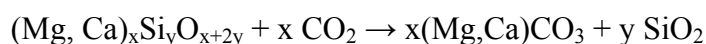
8.1. Αδρανείς καλοήθειες μακροπρόθεσμες μορφές αποθήκευσης

Οι χημικές διαδικασίες για την μετατροπή του CO₂ που έχει ήδη διαχωριστεί και συλληφθεί, ώστε να παραχθούν προϊόντα κατάλληλα για μακροπρόθεσμη αποθήκευση, πρέπει να είναι περιβαλλοντικά αποδεκτά.

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη μίμηση φυσικών χημικών μετατροπών του CO₂, όπως είναι η διάβρωση των πετρωμάτων, που σχηματίζει ανθρακικό ασβέστιο ή μαγνήσιο, και η διάλυση του CO₂ σε θαλάσσια ύδατα, που δημιουργεί διανθρακικά ιόντα. Στη φύση, αυτές οι δύο εξώθερμες αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα αυθόρμητα. Παραδείγματα προϊόντων για εναπόθεση περιλαμβάνουν τις ανθρακικές ενώσεις (CaCO₃/MgCO₃), ανθρακικό ιόν (HCO₃⁻), τους υδρίτες (CO₂•nH₂O), και τα οξυαλκαλικά (CaC₂O₄/MgC₂O₄).

Παρακάτω παρουσιάζονται τέσσερις προσεγγίσεις των διαδικασιών:

1. **Η μετατροπή φυσικών πυριτικών ορυκτών με CO₂** ώστε να παραχθούν γεωλογικά σταθερά ανθρακικά και πυριτικά ορυκτά,

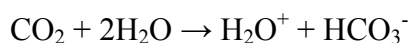


είναι θερμοδυναμικά ευνοϊκή, όπως αποδεικνύεται από τη φυσική διάβρωση των οξειδίων του πυριτίου. Η αντίδραση είναι εξώθερμη, μπορεί να εκτελεστεί σε διακριτά βήματα, και υπάρχουν αρκετές πρώτες ύλες για να προμηθεύσουν τα απαραίτητα οξείδια του πυριτίου. Επίσης πρέπει να σχεδιαστούν οι κατάλληλες συνθήκες ως προς τη θερμοκρασία, το μέσον της αντίδρασης, και τις ρυθμίσεις του αντιδραστήρα, ώστε να μπορεί η μετατροπή αυτή να λάβει χώρα με επαρκώς γρήγορο ρυθμό. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την άμεση εξανθράκωση των ορυκτών οξειδίων του πυριτίου με υπερκρίσιμο CO₂ και νερό, την εξανθράκωση τήγματος άλατος ορυκτών οξειδίων του πυριτίου με ρευστό MgCl₂, και τους μηχανισμούς αντίδρασης της μετατροπής του MgOH σε MgCO₃.

Τα θέματα που απαιτούν περαιτέρω μελέτη περιλαμβάνουν:

- (1) τους μηχανισμούς και την κινητική αυτής της αντίδρασης υγρού-αερίου, καθώς επίσης και τους καταλύτες της και τα απαραίτητα μέσα αντίδρασης,
- (2) τη θερμοδυναμική και την κινητική των αντιδράσεων αερίου-τήγματος άλατος και τη χημεία των χλωριδίων,
- (3) το σχεδιασμό αντιδραστήρων που να τροφοδοτούνται με στερεά και να παράγουν στερεά, τον έλεγχο της φυσικής μορφής των στερεών προϊόντων για τη βελτιστοποίηση της επεξεργασίας τους, και τον έλεγχο της διάβρωσης, και
- (4) τον οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο εξόρυξης των οξειδίων του πυριτίου, την εναπόθεση του προϊόντος ανθρακικής ένωσης/πυριτίας στην επιφάνεια του εδάφους, και τα μεταλλικά ιχνοστοιχεία με παράπλευρα οικονομικά οφέλη.

2. Ένα δεύτερο χημικό σύστημα είναι η **διάλυση του CO₂ στη θάλασσα** (ή σε άλλα φυσικά αποθέματα ύδατος) με τη μορφή του διαλυτού ανθρακικού ιόντος



σε συνδυασμό με την ανάγκη να βρεθεί μια πηγή επιπρόσθετων αλκαλικών ουσιών, ώστε να αποφευχθεί η μείωση του pH του υδάτινου σώματος. Η διαδικασία αυτή είναι σημαντική τόσο για την αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς όσο και για την αποθήκευση στη θάλασσα. Μπορούμε απλώς να τοποθετήσουμε το CO₂ στη θάλασσα, όπου το μεγαλύτερο τμήμα του θα παρέμενε ως διαλυμένο αέριο, ανθρακικές ενώσεις, και ανθρακικό ιόν, αν το CO₂ εισπνεζόταν σε αρκετά μεγάλο βάθος. Η δημιουργία του ανθρακικού ιόντος θα μπορούσε να επιτευχθεί με ανάπτυξη των βιομημητικών διαδικασιών, και να το εναποθέσουμε σε ρηχά ύδατα κοντά στην ακτή, αν προμηθεύσουμε και τα απαραίτητα κατιόντα.

Η χρήση ανθρακικών ιόντων για την αποθήκευση του CO₂ θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- (1) τη χημεία του θαλάσσιου και γλυκού νερού και των ηλεκτρολυτών, την επίδραση των στερεών επιφανειών, και την καθίζηση των ανθρακικών ενώσεων,
- (2) το σχεδιασμό κατάλληλων αντιδραστήρων και εισπνεστήρων για να διευκολυνθεί η αποδοτική ανάμιξη των αντιδρώντων,
- (2) την επίδραση των αυξημένων επιπέδων των ανθρακικών ιόντων στη θαλάσσια ζωή και οικολογία και στο σχηματισμό αποθεμάτων των ανθρακικών ιόντων με εξελιγμένες βιολογικές προσεγγίσεις,
- (3) τους ρυθμούς μεταφοράς από την ατμόσφαιρα στη θάλασσα,
- (4) τους ρυθμούς υποκινούμενης των υποψήφιων οργανισμών που θα παγιδεύουν και θα συγκρατούν το CO₂, και
- (6) τις βιομημητικές διαδικασίες σχηματισμού ανθρακικού ασβεστίου, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου δημιουργίας του απαραίτητου ασβεστίου για την αντίδραση.

3. Οι υδρίτες του CO₂ και του H₂O, που επιδεικνύουν δομικές αναλογίες με τον υδρίτη μεθανίου, μπορούν να αποτελέσουν κατάλληλη μορφή για αποθήκευση μεγάλης κλίμακας σε ψυχρές θάλασσες ή σε ανθρωπογενή συστήματα που προσομοιάζουν στις απαραίτητες συνθήκες. Οι υδρίτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο διαχωρισμό του CO₂ από συστήματα υψηλής πίεσης, και οι ιδιότητές τους ίσως είναι σημαντικές για την κατανόηση και των δύο προσεγγίσεων των διαδικασιών αποθήκευσης στη θάλασσα. Η δημιουργία ενώσεων έγκλεισης ως βήμα διαχωρισμού σε ενεργειακές εγκαταστάσεις ενιαίου μικτού κύκλου εξαέρωσης θα μπορούσε να αποδειχθεί ελκυστική. Οι προκαταρκτικοί υπολογισμοί της απαιτούμενης ενέργειας υποδεικνύουν ότι θα χρειαζόταν το 3-4% της συνολικής ενέργειας των εγκαταστάσεων.

Με βάση όσα ήδη γνωρίζουμε, απαιτείται:

- (1) να βελτιωθεί το διάγραμμα φάσης, της θερμοδυναμικής, και των φυσικών ιδιοτήτων του συστήματος CO₂-H₂O υπό υψηλή πίεση και με την παρουσία των ηλεκτρολυτών και των προσμίξεων που υπάρχουν στη θάλασσα, και να βελτιωθεί η κινητική σχηματισμού και η μακροπρόθεσμη σταθερότητα των ενώσεων έγκλεισης,
- (2) εντοπισμός πρακτικών μεθόδων για εισπύηση και ανάμιξη στα βάθη της θάλασσας
- (3) κατανόηση του τοπικού οικολογικού αντίκτυπου της δημιουργίας υδριτών. Καθορισμός του κατά πόσον η εναπόθεση του CO₂ μπορεί να συνδυαστεί μακροπρόθεσμα με την ανάκτηση καυσίμων μεθανίου από τα αποθέματα υδριτών μεθανίου της θάλασσας.
- 4) Φορμικά και οξαλικά άλατα. Επειδή το CO₂ αποτελεί όξινο αέριο, μπορεί να παγιδευτεί αν χρησιμοποιηθεί μια αλκαλική ουσία που να δημιουργεί σταθερές ενώσεις με το CO₂. Μια διαδικασία που χρησιμοποιεί ένα γραμμομόριο αλκαλικής ουσίας για

να μετατρέψει δύο γραμμομόρια CO₂ – π.χ. η μετατροπή του CO₂ σε πολυανθρακικές ενώσεις χαμηλής ενεργειακής κατάστασης όπως το οξαλικό ασβέστιο/μαγνήσιο (CaC₂O₄/MgC₂O₄) – είναι επιθυμητή εξαιτίας της μεγαλύτερης αναλογίας CO₂-αλκαλικών ουσιών.

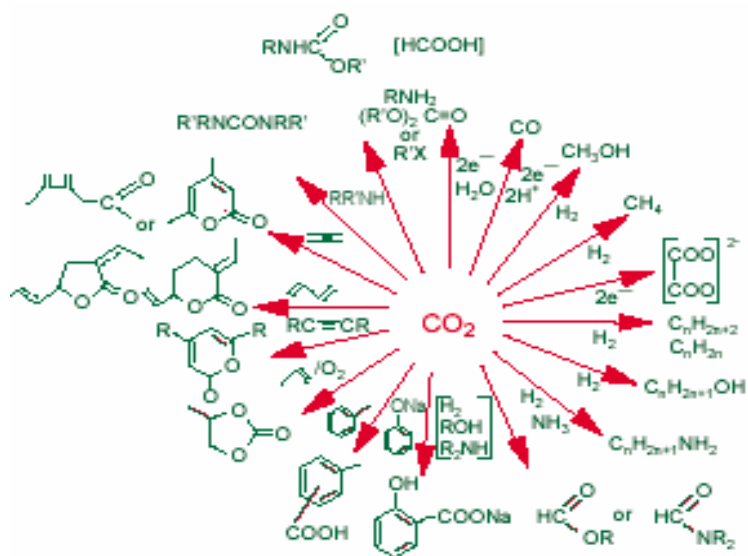
Οι ανάγκες έρευνας περιλαμβάνουν:

- (1) την ανάπτυξη μεθόδων για τη σύνθεση ανανεώσιμων αλκαλικών ενώσεων και για την αποδοτική χρήση των αλκαλικών ουσιών,
- (2) τη χρήση μοριακών μοντέλων για τον εντοπισμό νέων ενώσεων, στις οποίες ένα γραμμομόριο αλκαλικής ουσίας θα δέσμευε αρκετά γραμμομόρια CO₂,
- (3) την εξερεύνηση των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων – που περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις των χημικών αντιδράσεων αλλά και εκείνες της χημικής επεξεργασίας – τόσο για τις εξώθερμες αντιδράσεις με CO₂ όσο και για τις ενδόθερμες αντιδράσεις που απαιτούν μικρή ποσότητα ενθαλπίας, και
- (4) την έρευνα με θέμα τους καταλύτες αντίδρασης, τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, ζητήματα εναπόθεσης στην επιφάνεια, και περιβαλλοντικές ανησυχίες. Τέλος, θα ήταν απαραίτητο να διεξαχθούν μηχανικές μελέτες και αξιολογήσεις συστήματος όσων περιγράφηκαν.

8.2. Προϊόντα από την Χημική Χρήση CO₂

Στόχος της αξιοποίησης του CO₂ είναι ο σχεδιασμός χημικών διαδικασιών για τη μετατροπή του CO₂ που έχει διαχωριστεί και συλληφθεί σε χρήσιμα και ανθεκτικά

προϊόντα, με λογική διάρκεια ζωής (μερικές δεκαετίες ή αιώνες). Το διοξείδιο του άνθρακα, στο σύνολό του ή εν μέρει, μπορεί να συμμετέχει σε πολλές χημικές αντιδράσεις (Σχήμα 5.2).



Εικόνα 8.1: Τρόποι αξιοποίησης του CO₂ στη συνθετική χημεία (Πηγή: Aresta)

Αυτές οι στρατηγικές αξιοποίησης, αν κοιτάξουμε το θέμα από τη σκοπιά της πετροχημικής βιομηχανίας σήμερα, δεν θα έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιήσουν το ανθρωπογενές CO₂ στο σύνολό του. Ωστόσο, τα προϊόντα και τα ανθεκτικά υλικά που θα παράγονται ίσως έχουν μεγαλύτερη αξία και διάρκεια ζωής, και μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον, από τους υπάρχοντες τρόπους παραγωγής των ίδιων προϊόντων.

Επίσης, μπορεί να αναπτυχθούν επιπλέον αγορές, για δημιουργία προϊόντων με συχνή χρήση, όπως είναι τα οικοδομικά υλικά ή τα ανταλλακτικά για σώματα αυτοκινήτων. Ωστόσο, η ευρεία χρήση των προϊόντων με βάση τον άνθρακα θα

απαιτούσε μεγάλες αλλαγές υποδομής, και θα αντιμετώπιζε σκληρό ανταγωνισμό από τις βιομηχανίες που ήδη παράγουν τα προϊόντα που θα μπορούσαν να αντικατασταθούν.

Οι επόμενες παράγραφοι περιγράφουν τέσσερις τελικές χρήσεις που θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι απαιτούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία,

- Ο επιμερισμένος άνθρακας, που προέρχεται από την εξανθράκωση του μεθανίου, θα μπορούσε να μετατραπεί σε νέα σύνθετα υλικά και να χρησιμοποιηθεί σε υλικά οικοδομής με μεγάλη διάρκεια ζωής, όπως είναι το σκυρόδεμα. Πρέπει να βρεθούν οικονομικά βιώσιμες μέθοδοι μετατροπής του στερεού άνθρακα σε ανθεκτικά προϊόντα και νέα σύνθετα υλικά. Σχετικές με αυτό είναι και οι φυσικές ιδιότητες του άνθρακα, αν υποθέσουμε ότι ο άνθρακας προέρχεται από διαδικασίες εξανθράκωσης καυσίμων.

Συγκεκριμένες τεχνολογικές ανάγκες περιλαμβάνουν τον καθορισμό (1) των θερμοδυναμικών διαδικασιών, (2) νέων καταλυτών και αντιδραστήρων, και (3) εναλλακτικών πηγών καυσίμων.

- Χρήση του CO₂ ως τροφοδότη άνθρακα για την παραγωγή πλαστικών ή άλλων παρόμοιων υλικών. Οι σχετικές επιστημονικές και τεχνολογικές ανάγκες περιλαμβάνουν: (1) τον καθορισμό των αντίστοιχων χημικών αντιδράσεων, (2) την ανάπτυξη καταλυτών, και (3) την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της επεξεργασίας. Από περιβαλλοντική άποψη, σημαντική ανάγκη αποτελεί η χρήση του CO₂ για την αντικατάσταση τοξικών ουσιών όπως το φωσγένιο, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισοκυανικών, πολυανθρακικών, και άλλων προϊόντων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική επεξεργασία. Πρέπει να αξιολογηθεί η διάρκεια ζωής των προϊόντων, υπολογίζεται όμως ότι θα πρόκειται για δεκαετίες ή αιώνες. Μια άλλη προσέγγιση θα ήταν η μερική οξειδωση (μέσω αεριοποίησης), για την παραγωγή ενέργειας και CO που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση χημικών διαδικασιών.
- Εναλλακτικά, ίσως είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ο άνθρακας που προέρχεται είτε από καύσιμα είτε από προϊόντα της διαδικασίας καύσης, για να δημιουργήσουμε βελτιωτικά εδάφους ώστε να προαχθεί η αποθήκευση του άνθρακα σε φυσικά συστήματα.

Τέλος, μεγάλη έμφαση έχει δοθεί σε διαδικασίες ουδέτερες ως προς τον άνθρακα, στις οποίες σχηματίζονται χημικά και καύσιμα από τροφοδότηση CO₂, μέσα από τη χρήση ανανεούμενων πηγών ενέργειας. Θα έπρεπε να διεξαχθούν επιστημονικές και τεχνολογικές έρευνες για να βρεθούν νέοι καταλύτες, ηλεκτροκαταλύτες, και αποδοτικοί αντιδραστήρες. Ωστόσο, η λύση αυτή απαιτεί πηγή φτηνού υδρογόνου, για να αντιδράσει με το CO₂. Έχουν προταθεί σχέδια για την προμήθευση υδρογόνου μέσω της διάσπασης του νερού. Η απευθείας χρήση του H₂ ως καύσιμου, ως εναλλακτική λύση για την αντίδραση υδρογόνου-CO₂, θα έπρεπε να ερευνηθεί μέσα από αξιολόγηση συστήματος του κόστους και του οφέλους.

8.3. Απαραίτητες χημικές τεχνολογίες

Προηγουμένως, αναλύθηκαν οι χημικές πλευρές της αποθήκευσης του CO₂ για αποθήκευση στη θάλασσα, με τη μορφή ανθρακικών ιόντων· τα σύμπλοκα στα οποία ένα απλό κατιόν δεσμεύει πολυάριθμα μόρια CO₂· και την αποθήκευση σε υλικά με μεγάλη διάρκεια ζωής, π.χ. πλαστικά, σύνθετα, και χημικά. Οι έννοιες αυτές απαιτούν σημαντική ανάπτυξη της σχετικής επιστήμης και της αντίστοιχης τεχνολογίας.

Για ορισμένες από τις διαδικασίες αυτές αποτελεί μεγάλη βοήθεια η βελτίωση των δυνατοτήτων υπολογισμού σε σχέση με τα μοριακά πρότυπα νέων τρόπων σύνθεσης, τόσο για την παραγωγή προϊόντων με βάση τον άνθρακα, όσο και για την ανάπτυξη βελτιωμένων διαλυτών, όπως είναι οι στερικά τροποποιημένες αμίνες, ώστε να συλλαμβάνεται ο άνθρακας από τα αέρια καπνοδόχου. Πολλές από τις δυνατότητες αυτές αναπτύσσονται ήδη, με στόχο την προαγωγή της δημιουργίας νέων τεχνολογιών ενέργειας και περιβάλλοντος. Μεταξύ άλλων, οι απαραίτητες σχετικές τεχνολογίες συμπεριλαμβάνουν:

- Την ανάπτυξη των καταλυτών που είναι απαραίτητοι για τη βελτίωση της γεωλογικής αποθήκευσης, τη χρήση του άνθρακα στο CO₂, και την εξανθράκωση (π.χ. μιμητική φωτοσύνθεση, δηλαδή χρήση φωτός και TiO₂ για τη διάσπαση του CO₂).
- Την ανάπτυξη νέων διαλυτών και ροφητών για το διαχωρισμό αερίων (π.χ. το O₂ από τον αέρα, ή το CO₂ από τα αέρια καπνοδόχου).
- Την επίτευξη πλήρους κατανόησης της βασικής χημείας για την προσρόφηση CO₂ και την εκρόφιση μεθανίου από αποθέματα ορυκτού άνθρακα.
- Τη διερεύνηση νέων τύπων για λιπάσματα που θα χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη χερσαία και θαλάσσια αποθήκευση.
- Τη δημιουργία μεμβρανών και λεπτών υμενών για εξελιγμένο διαχωρισμό (π.χ. κεραμικές μεμβράνες υψηλής θερμοκρασίας για διαχωρισμό αερίων).
- Την ανάπτυξη υλικών που βοηθούν τη συσσώματωση και τη σύνδεση (π.χ. ορυκτός άνθρακας και ζirkονικό λίθιο), και επικαλύψεων.
- Τη βελτίωση των υλικών υψηλής θερμοκρασίας, ιδίως των οξειδίων μετάλλων (π.χ. κύκλους BaO και BaO₃ για διαχωρισμό υψηλής θερμοκρασίας, ή ανάμιξη NiO ή CoO για χημική καύση με βρόγχους).
- Τη διερεύνηση νέων αντιδραστήρων και των απαραίτητων αισθητήρων και ελέγχων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ανάπτυξη βελτιωμένων καταλυτών και άλλων νέων υλικών.

Κατάλυση. Η ανάπτυξη αποδοτικών καταλυτών, κατάλληλων για χημεία μείωσης πολλαπλών ηλεκτρονίων, αποτελεί τη βασική πρόκληση για τη δημιουργία αποδοτικής τεχνολογίας για τη μείωση του CO₂ σε μεσολαβητές υψηλής ενέργειας. Αρκετή επιτυχία είχε ο σχεδιασμός, η σύνθεση, και η ανάλυση συστημάτων δωρητή-αποδέκτη, κατάλληλων για διαδικασία διαχωρισμού με φορτίο ενός ηλεκτρονίου με βάση το φως.

Οι σύγχρονες έρευνες αποδεικνύουν ότι επιτυγχάνεται αρκετά βελτιωμένη αποδοτικότητα των καταλυτών εάν εισαγάγουμε οξειδοαναγωγική χημεία σε επιφάνειες που βρίσκονται σε περιορισμένο, δομημένο περιβάλλον.

Χρειαζόμαστε νέα δομημένα καταλυτικά συστήματα, κατάλληλα για την εκκίνηση χημικών διαδικασιών μείωσης πολλαπλών ηλεκτρονίων σε ένα μόνο στάδιο. Τα οξειδοαναγωγικά συστήματα που μπορούν να κάνουν συνεργατική συσσώρευση φορτίου μιμούνται τη βιολογική διαδικασία μείωσης του CO₂ στη φωτοσύνθεση, και θα μπορούσαν επομένως να μας προμηθεύσουν με ένα φωτοηλεκτροχημικό σύστημα που θα χρησιμοποιούσε το CO₂ για τη χημική τροφοδότηση της σύνθεσης χημικών με βάση τον άνθρακα.

Επίσης, θα χρειαστούμε νέους καταλύτες για τη βελτίωση του ρυθμού σχηματισμού αλκαλικών ανθρακικών και οξαλικών ενώσεων, αλλά και πρόσθετα για τη βελτίωση της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂. Τα υλικά αυτά θα εισπίζονται μαζί με το CO₂ στην αρχή της διαδικασίας, για να επικαλύψουν το κάλυμμα

πετρώματος ή τα άκρα του φυσικού ταμιευτήρα. Με τον καιρό, ας πούμε μετά από 5 χρόνια, τα υλικά αυτά θα αρχίσουν να αντιδρούν με το εισπνευσμένο CO₂, ώστε να σφραγίσουν τον ταμιευτήρα και να μειώσουν τις πιθανότητες διαρροής.

Νέα υλικά. Χρειαζόμαστε νέα υλικά για να μπορούμε να χειριστούμε τις ακραίες συνθήκες της επεξεργασίας του τετηγμένου άλατος. Οι χημικές προσεγγίσεις (π.χ. οξείδιο του βαρίου και υπεροξείδιο του βαρίου) για το διαχωρισμό αερίων ή τη χημική καύση με βρόγχους (οξείδιο του νικελίου ή του κοβαλτίου αναμειγμένο με ζιρκόνιο σταθεροποιημένο με ύτριο) θα έπρεπε να μελετηθούν γιατί μπορούν να εκμεταλλευτούν τις υψηλές θερμοκρασίες που υπάρχουν στα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας.

Οι διαδικασίες σύνδεσης και συσσωμάτωσης πρέπει να καθοριστούν τόσο για την παρασκευή προϊόντων από επιμερισμένο άνθρακα όσο και για άλλες χρήσεις, π.χ. τη σύλληψη CO₂ από οχήματα. Για παράδειγμα, υλικά όπως το ζιρκονικό λίθιο ενδέχεται να είναι καλοί απορροφητές CO₂ και επομένως να επιτρέπουν τη σύλληψη κάποιου CO₂ από τους ρύπους των οχημάτων. Η προσέγγιση αυτή έχει παραμεληθεί, αξίζει όμως να διερευνηθεί μακροπρόθεσμα, ακόμα και αν το ρίσκο είναι μεγάλο. Για να αναφέρουμε άλλο ένα παράδειγμα, θα έπρεπε να μελετήσουμε σύνθετα υλικά που θα μπορούσαν να προκύψουν από την προσθήκη άνθρακα σε πλαστικά, πολυμερή, υάλους, σκυροδέματα και κεραμικά.

Χημική μορφή του άνθρακα	Παραδείγματα εφαρμογής
Υδάτινα ανθρακικά ιόντα: CO ₃ ^{**} , HCO ₃ [*]	Εναπόθεση στη θάλασσα και σε αλμυρά υδροφόρα στρώματα σε μεγάλο βάθος
Στερεές ανθρακικές ενώσεις: CaCO ₃ , MgCO ₃	Εναπόθεση στη γη, στο βυθό της θάλασσας, και στο υπέδαφος
Υδρίτες: CO ₂ •nH ₂ O, n~6	Εναπόθεση στη θάλασσα και στο βυθό της θάλασσας
Προσρόφηση του CO ₂ σε άνθρακα	Εξαγωγή μεθανίου από στρώματα ορυκτού άνθρακα
Άλλες χαμηλής ενέργειας καταστάσεις του άνθρακα, όπως τα οξαλικά οξέα	Νέες τεχνολογίες εναπόθεσης
Άνθρακας σε στερεά μορφή	Υπόγεια εναπόθεση, τροφοδότηση σύνθετων υλικών
Καύσιμα με βάση τον άνθρακα (π.χ. μεθανόλη)	Κύκλοι καυσίμων με βάση το CO ₂ , εναλλακτική ενέργεια
Άνθρακας δεσμευμένος σε εμπορικά αγαθά με μεγάλη διάρκεια ζωής (π.χ. πλαστικό)	Υλικά οικοδομής με μεγάλη διάρκεια ζωής

Πίνακας 8.2: Προσεγγίσεις της αποθήκευσης με χημικές διαδικασίες, και παραδείγματα εφαρμογής

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σήμερα τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) αποτελούν παγκοσμίως την κυρίαρχη μορφή παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας παρέχοντας το 80-85% αυτής. Μόνο ο άνθρακας (δηλ. γαιάνθρακας, λιγνίτης, λιθάνθρακας) καλύπτει το 25% αυτής ενώ παράλληλα καλύπτει το 50% της ηλεκτροπαραγωγής των ΗΠΑ και το 30% στην Ε.Ε. Κάθε εβδομάδα τίθεται σε λειτουργία κάπου στον κόσμο μία νέα μονάδα ηλεκτροπαραγωγής που καταναλώνει άνθρακα. Η πρόβλεψη και το εφιαλτικό σενάριο είναι, ότι παρά την όποια συμβολή άλλων πηγών ενέργειας (πυρηνικής ενέργειας, ΑΠΕ) η ηλεκτροπαραγωγή από άνθρακα θα διπλασιαστεί διεθνώς μέχρι το 2030, και θα είναι διαρκώς αυξανόμενη κατέχοντας σημαντικό ποσοστό στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα, τουλάχιστον μέχρι το 2050.

Δυστυχώς η χρήση του άνθρακα στην ηλεκτροπαραγωγή ευθύνεται κατά κανόνα για τις μακράν περισσότερες εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα. Για να επιτύχει τόσο η Ε.Ε όσο και η διεθνής κοινότητα τη διατήρηση των αλλαγών του κλίματος σε βιώσιμη μορφή, χρειάζονται πολύ καθαρότερες τεχνολογίες άνθρακα και ουσιαστικότερη μείωση των εκπομπών CO₂.

Στις καθαρές τεχνολογίες άνθρακα συμπεριλαμβάνονται τεχνολογικές δράσεις που στοχεύουν:

- 1) Στην αύξηση της απόδοσης των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων και
- 2) Στην ανάπτυξη οικονομικά εφαρμόσιμων τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (τεχνολογίες Carbon Capture and Storage (CCS)).

Ορισμένες τεχνολογίες ‘καθαρού’ άνθρακα ήδη χρησιμοποιούνται σήμερα στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής με σκοπό την άμβλυση των προβλημάτων ρύπανσης και όξινης βροχής με τη μείωση των εκπομπών SO₂ και NO_x σωματιδίων και σκόνης. Στις τεχνολογίες καθαρού άνθρακα οφείλεται επίσης η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της μετατροπής του άνθρακα σε ηλεκτρική ενέργεια γεγονός που επιτρέπει σημαντικές μειώσεις των εκπομπών CO₂ αν και υπάρχει ευρύ περαιτέρω πεδίο εξέλιξης των τεχνολογιών αυτών.

Σήμερα η πλέον δοκιμασμένη τεχνολογία ‘αύξησης ενεργειακής απόδοσης’ είναι η υπερκρίσιμη τεχνολογία κονιορτοποιημένου άνθρακα (Supercritical PF) η οποία επιτρέπει αποδόσεις της τάξης του 43-45% (για μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με λιθάνρακα) και 40-43% (για μονάδες με λιγνίτη). Άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες είναι της καύσης ανακυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης (CFBC), της ρευστοποιημένης κλίνης υπό πίεση (PFBC) και του Συνδυασμένου Κύκλου με Ενσωματωμένη Εξαερίωση (IGCC).

Πρόκειται για σύνθετες τεχνολογίες υψηλού κόστους που επιτρέπουν βαθμούς απόδοσης έως και 45% με μείωση των εκπομπών ρύπων. Υπενθυμίζεται εδώ ότι στην Ελλάδα ένας τυπικός βαθμός απόδοσης των λιγνιτικών μονάδων της ΔΕΗ, δεν ξεπερνά το 33% με 35% λόγω κυρίως χαμηλής θερμογόνου δύναμης του ελληνικού λιγνίτη.

Επίσης σε ορισμένους τομείς υφίστανται ήδη τεχνολογίες για δέσμευση και αποθήκευση CO₂ ως καθιερωμένες βιομηχανικές πρακτικές. Η τεχνολογία έχει

εμπεδωθεί αρκετά, πρέπει όμως να προσαρμοστεί κατάλληλα για χρήση μεγάλης κλίμακας στην ηλεκτροπαραγωγή. Επιπλέον η εμπορική βιωσιμότητα των τεχνολογιών CCS στα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια θα προετοιμάσει το έδαφος για την εφαρμογή της και σε διεργασίες καύσης που χρησιμοποιούν άλλα ορυκτά καύσιμα ιδίως φυσικό αέριο¹².

Οι κυριότερες εμπορικές ή υπό ανάπτυξη τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς μπορούν να ταξινομηθούν σε 3 κατηγορίες :

- 1) Διαχωρισμός του CO₂ από το καυσαέριο (πχ διαχωρισμός του CO₂ με υγρό διάλυμα σε στήλη απορρόφησης ή έκπλυσης με αμύνες .
- 2) Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (oxy fuel)
- 3) Παραγωγή καυσίμου ελεύθερου από άνθρακα (ο άνθρακας απομακρύνεται από το καύσιμο πριν αυτό οδηγηθεί για καύση).

Με τις τεχνολογίες αυτές επιτυγχάνεται μείωση εκπομπών CO₂ κατά 85% περίπου, με παράπλευρες απώλειες στην αποδοτικότητα του σταθμού αλλά και το αυξημένο κόστος επένδυσης. Για παράδειγμα η καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου μειώνει την απόδοση του λιγνιτικού σταθμού κατά 10,5 ποσοστιαίες μονάδες περίπου, ενώ η έκπλυση με αμίνη κατά 11,5 μονάδες. Έπονται οι διαδικασίες της ασφαλούς μεταφοράς και αποθήκευσης του CO₂ (τάξεως εκατ. τόνων), σε υπόγειους ταμιευτήρες (για την Ελλάδα π.χ πιθανοί χώροι είναι οι ταμιευτήρες στην περιοχή του Πρίνου). Οι γεωλογικοί χώροι υπόγειας αποθήκευσης που θεωρητικά δύνανται να υποδεχθούν το δεσμευμένο CO₂ είναι ενεργοί ή μη ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες μεγάλου βάθους, καθώς και κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα (A.Papadopoulos, 2001).

Αναγνωρίζοντας τη σημασία των ανωτέρω η Ε. Επιτροπή στο πρόσφατο Ενεργειακό Πακέτο, Barroso στο πλαίσιο της Γερμανικής προεδρίας ανανεώνοντας το ενδιαφέρον της για την ανάπτυξη τεχνολογικής πλατφόρμας ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα με μηδενικές εκπομπές (TP zero Emission Plant-ZEP technology Platform) ανακοίνωσε ένα στρατηγικό Ευρωπαϊκό Σχέδιο Ενεργειακών Τεχνολογιών προς την κατεύθυνση αυτή. Παράλληλα οι μεγαλύτερες εταιρίες ηλεκτροπαραγωγής στην Ε.Ε ανακοίνωσαν ότι προγραμματίζουν την κατασκευή 10-12 μονάδων επίδειξης μεγάλης κλίμακας όπου θα δοκιμαστούν τουλάχιστον για πέντε έτη, διάφοροι τρόποι ενσωμάτωσης της CCS στην ηλεκτροπαραγωγή με καύση άνθρακα και αερίου. Ένας τέτοιος στόλος δυναμικότητας 300MW e ανά μονάδα εκτιμάται με το τρέχον τεχνολογικό κόστος ότι απαιτεί πάνω από 5 δις.ευρώ. η επιτροπή δεσμεύεται μέσω του ως άνω σχεδίου ότι θα αυξήσει σημαντικά τη χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα, καθιστώντας τις εν λόγω τεχνολογίες μια από τις προτεραιότητες της περιόδου 2007-2013 (A.Papadopoulos, 2001).

Επισημαίνεται εδώ ότι ο εκ των υστέρων εξοπλισμός των μονάδων με CCS μετά το 2020 συνεπάγεται επίσης σημαντικές επιπλέον επενδύσεις που σήμερα είναι δύσκολο να προβλεφθούν επακριβώς και εξαρτάται από τις προόδους στον τεχνολογικό τομέα κατά τη μεταβατική περίοδο. Οι απαιτήσεις για τον εκ των υστέρων εξοπλισμό εκτιμώνται μεταξύ 600-700 χιλιάδες ευρώ για κάθε εγκατεστημένο MW (για έτοιμες για δέσμευση εγκαταστάσεις που θα κατασκευαστούν από σήμερα μέχρι το 2020 με τις διαθέσιμες τεχνολογίες), ενώ για παλαιότερες μονάδες που ήδη λειτουργούν σήμερα θα είναι πιθανών υψηλότερο.

Πρέπει στα επόμενα χρόνια να κατανοήσουμε ότι όλες οι νέες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα (άνθρακα ή συνδυασμένη δράση άνθρακα και

¹² ΔΕΗ, Γενική Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Παραγωγής, Ετήσια δελτία και αναφορές, 1995-1998, Αθήνα.

αερίου) θα πρέπει να χρησιμοποιούν τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνολογίες (BAT) αναφορικά με την απόδοση και ακόμη όσες δεν είναι εξοπλισμένες με CCS θα πρέπει να είναι έτοιμες τεχνολογικά για τη μεταγενέστερη προσθήκη των τεχνολογιών αυτών (capture-ready coal-fired power plants). Οι τεχνικές προδιαγραφές του όρου capture-ready πρέπει να καθοριστούν το συντομότερο δυνατό. Η Ε.Ε θα πρέπει να εκμεταλλευτεί το γεγονός ότι πλέον του ενός τρίτου της δυναμικότητας ηλεκτροπαραγωγής στην Ε.Ε αναμένεται να φτάσει το τέλος της τεχνικής διάρκειας ζωής της τα επόμενα 10-15 έτη και να εκσυγχρονίσει το στόλο των θερμοηλεκτρικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής εξ αρχής με CCS μειώνοντας σημαντικά το συνολικό κόστος.

Τα πραγματικά κόστη εφαρμογής μιας τέτοιας τεχνολογίας (αθροιστικά κόστος δέσμευσης, συμπίεσης, μεταφοράς και αποθήκευσης), με τα σημερινά δεδομένα κυμαίνονται μέχρι 70 ευρώ ανά τόνο CO₂ επιβαρύνοντας σημαντικά την τιμή της κιλοβατώρας και το κόστος για τον τελικό καταναλωτή και καθιστώντας προς το παρόν απαγορευτικά δαπανηρή την ευρείας κλίμακα χρήση αυτών των τεχνολογιών.

Πέραν του σημαντικού κόστους θα πρέπει να υπάρξει διαχείριση του κινδύνου διαρροής CO₂ κατά τη μεταφορά και αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Δυστυχώς δεν είναι απόλυτα εγγυημένη η στεγανότητα αυτών των σχηματισμών στο διηνεκές, πολύ περισσότερο δε αυτών που αφορούν σεισμογενή χώρα. Το ρυθμιστικό πλαίσιο για την ασφαλή μεταφορά και αποθήκευση CO₂ πρέπει να βασίζεται σε ολοκληρωμένη εκτίμηση του κινδύνου διαρροής CO₂ συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων χωροθέτησης προς ελαχιστοποίηση του κινδύνου διαρροής των συστημάτων παρακολούθησης και της αποκατάστασης σε περίπτωση διαρροής.

Επιπλέον απαιτείται διαμόρφωση κατάλληλου οικονομικού και κανονιστικού περιβάλλοντος που θα παρέχει στήριξη τέτοιων τεχνολογικών λύσεων σε βιομηχανική κλίμακα, καθώς και επαρκές κίνητρο αναλογικά με τα αντίστοιχα οφέλη για επενδυτικά προγράμματα με CCS έναντι άλλων λύσεων χωρίς CCS. Οι μελλοντικοί λόγοι τιμής αερίου-άνθρακα και οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ (ETS, Emission Trading Scheme) που με τη σειρά τους εξαρτώνται από το συνολικό περιβαλλοντικό κανονιστικό πλαίσιο που ισχύει στην Ε.Ε και σε ολόκληρο τον πλανήτη, θα είναι καθοριστικοί παράγοντες κατά τη λήψη τέτοιων επενδυτικών αποφάσεων.

Και φυσικά δε φτάνει να δίνει η Ε.Ε μονίμως το καλό παράδειγμα. Η Ευρώπη ευθύνεται μόνο για το 12-15% της παγκόσμιας εκπομπής αερίων θερμοκηπίου. Η παγκόσμια ετήσια ηλεκτροπαραγωγή μόνο από άνθρακα αναμένεται ότι έως το 2030 θα αυξηθεί κατά 7,8 TWh. Περισσότερο από δύο τρίτα της αύξησης αυτής (70%) αντιστοιχεί στην Ινδία και στην Κίνα και ακόμη 10% σε άλλες χώρες εκτός ΟΟΣΑ. Αν θέλουμε να επιτευχθεί ο στόχος του περιορισμού της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη σε 2°C κατ'άνωτατο όριο πάνω από τα επίπεδα της προ-βιομηχανικής εποχής, θα πρέπει να συνεχιστούν οι προσπάθειες επίτευξης σταθερής μακροπρόθεσμης διεθνούς συμφωνίας μεταξύ των κυρίως ρυπαντών χωρών παγκοσμίως.

Η Ελλάδα όντας η 2^η μεγαλύτερη λιγνιτοπαραγωγός χώρα στην Ευρώπη (μετά τη Γερμανία) με σημαντικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κυρίως λόγω των χαμηλών βαθμών απόδοσης των λιγνιτικών σταθμών, θα πρέπει να συντονιστεί με τις ως άνω προσπάθειες.

Άλλωστε από πρόσφατη μελέτη προσομοίωσης συμβατικού ΑΗΣ της ΔΕΗ, προέκυψε ότι οι συμβατικές λιγνιτικές μονάδες, οι καθαρές τεχνολογίες άνθρακα και οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση λιγνίτη δίνουν το χαμηλότερο κόστος ανά παραγόμενη KWh κυρίως λόγω του χαμηλού και προβλέψιμου κόστους του λιγνίτη. Αντίθετα οι μονάδες φυσικού αερίου λόγω της υψηλής τιμής του καυσίμου και

της αβεβαιότητας που προέρχεται από τις μεγάλες διακυμάνσεις της, φαίνεται ότι έχουν μεγαλύτερο κόστος παραγωγής ενέργειας¹³.

Ειδικότερα οι τεχνολογίες CCS παρουσιάζουν επιμέρους τεχνοοικονομικά και γενικότερα προβλήματα που θα πρέπει να διερευνηθούν σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες της Χώρας : εύρεση ικανών και ασφαλών χώρων αποθήκευσης, επιλογή κατάλληλης μεθόδου μεταφοράς με πλοία ή αγωγούς και ανάπτυξη υποδομών, υπολειπόμενος χρόνος ζωής των λιγνιτικών σταθμών και εγγύτητα στους χώρους αποθήκευσης, υπολειπόμενος χρόνος επάρκειας αποθεμάτων λιγνίτη, αντιδράσεις τοπικών κοινωνιών κλπ.

Τόσο η ΔΕΗ όσο και άλλες εταιρίες που ενδεχομένως δραστηριοποιηθούν στο χώρο, στα πλαίσια της ήδη απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να διερευνήσουν σοβαρά την περίπτωση χρήσης των τεχνολογιών αυτών, εξετάζοντας με ρεαλισμό τα επιμέρους θέματα, τα αντίστοιχα κριτήρια κόστους/οφέλους και πάντα με πρωταρχικό γνώμονα τη διατήρηση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού της Χώρας¹⁴.

¹³ ΔΕΗ, Γενική Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Παραγωγής, Ετήσια δελτία και αναφορές, 1995-1998, Αθήνα.

¹⁴ ΔΕΗ, Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Μεταφοράς, Ετήσια δελτία εκμετάλλευσης, 1995-1998, Αθήνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), “Third Assessment Report –Climate Change 2001”, www.ipcc.ch
- 2) K. Thambimuthu, Paul Freund, “CO₂ Capture and Sequestration from Power Generation”, Studies by the IEA Greenhouse Gas R&D programme.
- 3) Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Απογραφές Εκπομπών 1990-2002.
- 4) IEA, “Putting carbon back into the ground”, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, February 2001.
- 5) “Updated Cost and Performance Estimates for Clean Coal Technologies Including CO₂ Capture–2006”, EPRI Report 1013355, March 2007.
- 6) Energy Policy Act of 2005, U.S. Department of Energy, August 2005.
- 7) Next Generation Nuclear Plant (NGNP), Nuclear Energy Research Initiative, U.S. Department of Energy, <http://nuclear.energy.gov/neri/neNERIresearch.html>
- 8) Next Generation Nuclear Plant (NGNP), Nuclear Energy Research Initiative, U.S. Department of Energy, <http://nuclear.energy.gov/neri/neNERIresearch.html>
- 9) IEA GHG R&D Programme; Leading Options for the Capture of CO₂ Emissions at Power Stations, Report Number PH3/14, April 2000.
- 10) IEA GHG R&D Programme; CO₂ Abatement in Oil Refineries: Fired Heaters, Report Number PH3/31 October 2000.
- 11) International Energy Agency, Committee on Energy Research and Technology Working Party on Fossil Fuels “Solutions for the 21st Century: Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels” 2002.
- 12) CO₂NET Thematic Network, “ Report on the current stage and the need for further research on CO₂ Capture and Storage”, June 2004 www.co2net.org.
- 13) CO₂NET Thematic Network, “ Report on the current stage and the need for further research on CO₂ Capture and Storage”, June 2004 www.co2net.org.
- 14) Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, Volume 1 and Volume 2, EPRI Report 1015325, July 2007.
- 15) “Carbon Sequestration Technology Roadmap and Program Plan”, National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy, April 2007
- 16) “Carbon Capture and Sequestration Systems Analysis Guidelines” U.S. Department of Energy – Office of Energy, National Energy Technology Laboratory, April 2005.
- 17) IEA GHG R&D Program, March 2004.
- 18) IPCC, 2001. Climate Change 2001: Mitigation, Part of third Assessment Report by WGIII of Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001.
- 19) International Energy Agency, Key World Energy Statistics, 1999 edition.
- 20) UK Department of Trade and Industry / Pub. URN 00/1081, “Carbon Dioxide Capture and Storage” Sept. 2000.
- 21) <http://www.snohvit.com/STATOILCOM>
- 22) U.S. Department of Energy, Working Paper on Carbon Sequestration Science and Technology; Feb.1999.
- 23) <http://www.iku.sintef.no/projects/IK23430000/>
- 24) IEA Greenhouse Gas R&D Programme “Carbon Dioxide Capture from Power Stations” 1998.

- 25) U.S. Department of Energy, Working Paper on Carbon Sequestration Science and Technology; Feb. 1999
- 26) www.nitg.tno.nl/projects/eurogeosurveys/projects/GestcoWeb
- 27) <http://www.iku.sintef.no/projects/IK23430000/>
- 28) The Greenhouse Gas Abatement Program:
<http://www.greenhouse.gov.au/ggap/>
- 29) The Greenhouse Challenge:
<http://www.greenhouse.gov.au/challenge/index.html>
- 30) U.S. Department of Energy, Working Paper on Carbon Sequestration Science and Technology; Feb. 1999.
- 31) <http://www.snohvit.com/STATOILCOM>
- 32) Geological Storage of CO₂ from Combustion of Fossil Fuel, Summary Report, Project No. ENK6-CT-1999-00010, November 2004.
- 33) ΔΕΗ, Γενική Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Παραγωγής, Ετήσια δελτία και αναφορές, 1995-1998, Αθήνα.
- 34) ΔΕΗ, Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Μεταφοράς, Ετήσια δελτία εκμετάλλευσης, 1995-1998, Αθήνα.
- 35) Γεώργιος Τσιλιγκιρίδης «Το δυναμικό των εγχώριων ενεργειακών πόρων» 5ο συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας Γ' τόμος (σελ.174,176-180,183-184)
- 36) Next Generation Nuclear Plant (NGNP), Nuclear Energy Research Initiative, U.S. Department of Energy,
<http://nuclear.energy.gov/neri/neNERIresearch.html>.
- 37) **A.Papadopoulos**: “Reducing CO₂ emissions and deregulating the electricity sector in Europe: A contradictory development?”, *Global Nest*, Vol.3, Nr.1, 2001, p.59-70.
- 38) **A.Papadopoulos**: “*Developing Energy Networks in Southeastern Europe*”, *IAEE Newsletter*, Vol.2 / 2000, p.18.20.
- 39) **Kontopoulos, N.**, Fokianou, T., Zelilidis, A., Alexiadis, C., Rigakis, N., “Hydrocarbon potential of the middle Eocene-middle Miocene Mesohellenic piggy-back basin (central Greece): A case study” University of Patras, Department of Geology, 1999.
- 40) **Ispen, K.H.** and F.L. Jacobsen, 1996: The Linde structure, Denmark: an example of a CO₂ depository with a secondary chalk cap rock. *Energy and Conversion and Management*, **37**(6–8), 1161–1166.
- 41) **Itaoka, K.**, A. Saito and M. Akai, 2005: Public acceptance of CO₂ capture and storage technology: A survey of public opinion to explore influential factors. Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), September 5–9, 2004, Vancouver, Canada, v.I, p.1011.
- 42) **Jarrell, P.M.**, C.E. Fox, M.H. Stein and S.L. Webb, 2002: Practical Aspects of CO₂ Flooding. SPE Monograph Series No. 22, Richardson, TX, 220 pp.
- 43) **Jimenez, J.A** and R.J. Chalaturnyk, 2003: Are disused hydrocarbon reservoirs safe for geological storage of CO₂? Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), J. Gale and Y. Kaya (eds.), 1–4 October 2002, Kyoto, Japan, Pergamon, v.I, 471–476.
- 44) **Johnson, J.W.**, J.J. Nitao and J.P. Morris, 2005: Reactive transport modeling of cap rock integrity during natural and engineered CO₂ storage, Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO₂ Capture Project, v. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, S.M. Benson, (ed.), Elsevier, London, pp. 787–814.

- 45) **Kaarstad, O.**, 1992: Emission-free fossil energy from Norway. *Energy Conversion and Management*, **33**(5–8), 619–626.
- 46) **Kaarstad, O.**, 2002: Geological storage including costs and risks, in saline aquifers, Proceedings of workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage, Regina Canada, 2002.
- 47) **Katzung, G.**, P. Krull and F. Kühn, 1996: Die Havarie der UGS-Sonde Lauchstädt 5 im Jahre 1988 - Auswirkungen und geologische Bedingungen. *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, **42**, 19–26.
- 48) **Keith, D.W.** and M. Wilson, 2002: Developing recommendations for the management of geologic storage of CO₂ in Canada. University of Regina, PARC, Regina, Saskatchewan.
- 49) **Keith, D.**, H. Hassanzadeh and M. Pooladi-Darvish, 2005: Reservoir Engineering To Accelerate Dissolution of Stored CO₂ In Brines. Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), September 5–9, 2004, Vancouver, Canada, v.II, 2163-2168.
- 50) **Kempton, W.**, J. Boster and J. Hartley, 1995: Environmental Values in American Culture. MIT Press, Boston, MA, 320 pp.
- 51) **Kling, G.W.**, M.A. Clark, H.R. Compton, J.D. Devine, W.C. Evans, A.M. Humphrey, E.J. Doenigsberg, J.P. Lockword, M.L. Tuttle and G.W. Wagner, 1987: The lake gas disaster in Cameroon, West Africa, *Science*, **236**, 4798, 169–175.
- 52) **Klins, M.A.**, 1984: Carbon Dioxide Flooding, D. Reidel Publishing Co., Boston, MA, 267 pp.
- 53) **Klins, M.A.** and S.M. Farouq Ali, 1982: Heavy oil production by carbon dioxide injection. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **21**(5), 64–72.
- 54) **Klusman, R.W.**, 2003: A geochemical perspective and assessment of leakage potential for a mature carbon dioxide-enhanced oil recovery project and as a prototype for carbon dioxide sequestration; Rangely field, Colorado. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **87**(9), 1485–1507.
- 55) **Knauss, K.G.**, J.W. Johnson and C.I Steefel, 2005: Evaluation of the impact of CO₂, co-contaminant gas, aqueous fluid and reservoir rock interactions on the geologic sequestration of CO₂. *Chemical Geology*, Elsevier, **217**, 339–350.
- 56) **Koide, H.** and K. Yamazaki, 2001: Subsurface CO₂ disposal with enhanced gas recovery and biogeochemical carbon recycling. *Environmental Geosciences*, **8**(3), 218–224.
- 57) **Koide, H.G.**, Y. Tazaki, Y. Noguchi, S. Nakayama, M. Iijima, K. Ito and Y. Shindo, 1992: Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs. *Energy Conversion and Management*, **33**(5–8), 619–626.
- 58) **Koide, H.G.**, M. Takahashi and H. Tsukamoto, 1995: Self-trapping mechanisms of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, **36**(6–9), 505–508.
- 59) **Koide, H.**, M. Takahashi, Y. Shindo, Y. Tazaki, M. Iijima, K. Ito, N. Kimura and K. Omata, 1997: Hydrate formation in sediments in the sub-seabed disposal of CO₂. *Energy-The International Journal*, **22**(2/
- 60) **Ayers, W. B.**, and B. S. Kelso 1989. “Knowledge of Methane Potential for Coalbed Resources Grows, but Needs More Study,” *Oil & Gas Journal*, (October 23): 64–7.
- 61) **Bachu S., W. D.** Gunter, and E. H. Perkins 1994. “Aquifer Disposal of CO₂: Sequestration of CO₂ in Geologic Formations 5-21 Carbon Sequestration

- Research and Development Hydrodynamic and Mineral Trapping,” *Energy Convers. Mgmt.* 35: 269–79.
- 62) **Baes, C. F., Jr.**, S. E. Beall, and D. W. Lee 1980. “The Collection, Disposal and Storage of Carbon Dioxide” pp. 495–519 in *Interactions of Energy and Climate*.
- 63) **Beckman, K. L.**, and P. L. Determeyer 1995. *Natural Gas Storage: Historical Developments and Expected Evolution*, GRI-95/0214, available at www.gri.org/toplevel.html.
- 64) **Bell, G. J.**, and K. C. Rakop 1986. “Hysteresis of Methane/Coal Sorption Isotherms,” SPE 15454, in *Proceedings of the 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*, New Orleans, La., October 5–8, 1986.
- 65) **Bergman P. D.**, and E. M. Winter 1995. “Disposal of Carbon Dioxide in Aquifers in the U.S.,” *Energy Convers. Mgmt.* 36: 523–6.
- 66) **Bergman P. D.**, E. M. Winter, and Z. Y. Chen 1997. “Disposal of CO₂ in Depleted Oil and Gas Reservoirs,” *Energy Convers. Mgmt.* 38: suppl. pp. S211–S216.
- 67) **Bumb, A. C.**, and C. R. McKee 1988. “Gas-well Testing in the Presence of Desorption for Coalbed Methane and Devonian Shale,” *SPE Formation Evaluation*, 3(1): 179–85.
- 68) **Burruss, R. C.** 1977. *Analysis of Phase Equilibria in C-O-H-S Fluid Inclusions*, Mineral. Assoc. Of Canada Short Course Handbook 6, pp. 39–74.
- 69) **Butt, D. P.**, K. S. Lackner, C. H. Wendt, S. D. Conzone, H. Kung, Y. C. Lu, and J. K. Bremser 1996. “Kinetics of Thermal Dehydroxylation and Carbonation of Magnesium Hydroxide,” *J. Am. Ceram. Soc.* , 79: 1892–8.
- 70) **Byrer, C. W.**, and H. D. Guthrie 1997. “Assessment of World Coal Resources for Carbon Dioxide (CO₂) Storage Potential— While Enhancing Potential for Coalbed Methane,” pp. 573–76 in *Greenhouse Gas Mitigation, Technologies for Activities Implemented Jointly, Proceedings of Technologies for Activities Implemented Jointly*, held in Vancouver, Canada, May 26–29, P. W. F. Reimer, A. Y. Smith, and K. V. Thambimuthu, eds., Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- 71) **Byrer, C. W.**, and H.D. Guthrie 1998. “Carbon Dioxide Potential in Coalbeds: A Near-term Consideration for the Fossil Energy Industry,” pp. 593–600 in *The Proceedings of the 23rd International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems*, Clearwater, Fla., March 9–13, 1998, U.S. Department of Energy, Washington, D.C. 5-22 Sequestration of CO₂ in Geologic Formations Carbon Sequestration Research and Development
- 72) **Byrer, C. W.**, and H.D. Guthrie 1998. “Coal Deposits: Potential Resource for Sequestering Carbon Dioxide Emissions From Power Plants,” presented at the Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Interlaken, Switzerland, August 30–September 2, 1998. Proceedings forthcoming.
- 73) **Byrer, C. W.**, T. H. Mroz, and G. L. Covatch 1984. “Production Potential for Coalbed Methane in U.S. Basins,” SPE 12832, presented at the SPE/DOE/ GRI Unconventional Gas Recovery Symposium, Pittsburgh, Pa., May 13–15, 1984.
- 74) **Dove, P., J.** Harris, J. M. Logan, L. Pyrak-Nolte, F. M. Orr, Jr., P. J. Ortoleva, F. Richter, J. W. Rudnicki, N. R. Warpinski, W. R. Wawersik, J. L. Wilson, and T. F. Wong. “Terrestrial Sequestration of CO₂ —An Assessment of Research Needs.” Forthcoming.

- 75) **Dyman, T. S.**, D. D. Rice, J. W. Schmoker, C. J. Wandrey, R. C. Burruss, R. A. Crovelli, G. L. Dolton, T. C. Hester, C. W. Keighin, and J. G. Palacas 1993. "Geologic Studies of Deep Natural Gas Resources in the United States," pp. 171–204 in *The Future of Energy Gases*, D. G. Howell, ed., U.S. Geological Survey, Denver, Colo.
- 76) **Eddy, G. E.**, C. T. Rightmire, and C. W. Byrer 1982. "Relationship of Methane Content of Coal Rank and Depth: Theoretical Versus Observed," SPE / DOE Paper 10800, in *Proceedings of 1982 SPE/DOE Unconventional Gas Recovery Symposium*, Pittsburgh, Pa., May 16–18.
- 77) **Fulton, P. F.**, B. Rogers, N. Shah, and A. A. Reznik 1980. "Study of the Effectiveness of Increasing Methane Production," Chemical and Petroleum Engineering Department, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pa. (Work performed for DOE under contract DE-FG-21- 79MC1083.
- 78) **Fyfe, W. S.**, R. Leveille, W. Zang, and Y. Chen 1996. "Is CO₂ Disposal Feasible?" *Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.* 41: 1433–5.
- 79) **Garrels, R. M.**, and F. T. Mackenzie 1971. *Evolution of Sedimentary Rocks*, W. W. Norton, New York.
- 80) **Gunter, W. D.**, E. H. Perkins, and T. J. McCann 1993. "Aquifer Disposal of CO₂-rich Gases: Reaction Design for Added Capacity," *Energy Convers. Mgmt.* 34: 941–8.
- 81) **Gunter, W. D.**, T. Gentzis, B. W. Rottenfusser, and R. J. H. Richardson 1996. "Deep Coalbed Methane in Alberta, Canada: A Fuel Resource with the Potential of Zero Greenhouse Gas Emissions," pp. 217–22 in *Proceedings of the Third International Conference on Carbon Dioxide Removal*, Cambridge, Mass., September 9–11, 1996.
- 82) **Gunter, W. D.**, S. Bachu, D. H. S. Law, V. Marwaha, D. L. Drysdale, D. E. MacDonald, and T. J. McCann 1996. "Technical and Economic Feasibility of CO₂ Disposal in Aquifers within the Alberta Sedimentary Basin, Canada," *Energy Convers. Mgmt.* 37: 1135–42.
- 83) **Gunter W. D.**, B. Wiwchar, and E. H. Perkins 1997. "Aquifer Disposal of CO₂- rich Greenhouse Gases: Extension of the Time Scale of Experiment for CO₂- sequestering Reactions by Sequestration of CO₂ in Geologic Formations 5-23 Carbon Sequestration Research and Development Geochemical Modeling," *Mineral. And Petrol.* 59: 121–40.
- 84) **Harpalani, S.**, and X. Zhao 1989. "The Unusual Response of Coal Permeability to Varying Gas Pressure and Effective Stress," pp. 65–72 in *Rock Mechanics as a Guide for Efficient Utilization of Natural Resources: Proceedings of the 30th U.S. Symposium*, A. Wahab Kahir, ed., West Virginia University, Morgantown, W.V., June 19–22, 1989.
- 85) **Hendricks, C. A.**, and K. Blok 1995. "Underground Storage of Carbon Dioxide," *Energy Convers. Mgmt.* 36: 539–42.
- 86) **Hertzog, H. J.**, and E. M. Drake 1998. "CO₂ Capture, Reuse, and Sequestration Technologies for Mitigating Global Climate Change," pp. 615–26 in *Proceedings of the 23rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*, Clearwater, Fla., March 9–13.
- 87) **Hitchon, B.**, ed. 1996. *Aquifer Disposal of Carbon Dioxide, Hydrodynamic and Mineral Trapping—Proof of Concept*, Geoscience Publishing Ltd., Sherwood Park, Alberta, Canada.
- 88) **Holloway, S.** 1996. "An Overview of the Underground Disposal of Carbon Dioxide, British Geological Survey," pp. 193–8 in *Proceedings of the Third*

- International Conference on Carbon Dioxide Removal*, Cambridge, Mass., September 9–11, 1996.
- 89) **Holloway, S.** 1997. "An Overview of the Underground Disposal of Carbon Dioxide," *Energy Convers. Mgmt.* 38: s193–s198.
- 90) **Holloway, S.**, and D. Savage 1993. "The Potential for Aquifer Disposal of Carbon Dioxide in the UK," *Energy Convers. Mgmt.* 34: 925–32.
- 91) **Κακαρας, Ε. Δουκέλης, Α.Γιαννακοπουλος, Δ.Κουμανάκος, Α.** «Δεσμευση CO2 στον τομέα ηλεκτροπαραγωγής από λιγνίτη και φυσικό αέριο», Βιβλιοθήκη ΤΕΕ, [http://portal .tee.gr](http://portal.tee.gr)
- 92) **Kim, A. G.** 1977. *Estimating Methane Content of Bituminous Coalbeds from Adsorption Data*, BM-RI-8245, U.S. Bureau of Mines, Pittsburgh, Pa.
- 93) **Koide, H., Y. Tazaki, Y. Noguchi, S. Nakayama, M. Iijima, K. Ito, and Y. Shindo** 1992. "Subterranean Containment and Long-Term Storage of Carbon Dioxide in Unused Aquifers and in Depleted Natural Gas Reservoirs," *Energy Convers. Mgmt.* 33 (5–8): 619–26.
- 94) **Ε. Γεωργοπούλου, Δ. Λάλας, Α. Παπαγιαννάκης** «Ενεργειακός σχεδιασμός και πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων: Η περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας» 5ο Εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας.
- 95) **Ι. Καλδέλλης** «Επίλυση του ενεργειακού προβλήματος των νησιών του Αιγαίου με την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας» 5ο Εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας.
- 96) **Ι. Καλδέλλης, Κ. Σωτηράκη** «Σχεδιασμός – μελέτη λειτουργίας αυτόνομου νησιωτικού φωτοβολταϊκού σταθμού» 6ο Εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας.
- 97) **Ι. Μαυρογιάννης, Θ. Τσούτσος, Ε. Τσελεπής** «Τα φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα-Έρευνα αγοράς» 6ο Εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας.
- 98) **Ν.Χρυσομαλλίδου** κ.ά., 'Πολιτική κινήτρων εξοικονόμησης ενέργειας – Συνολικός σχεδιασμός κινήτρων που αφορά στο κέλυφος υφιστάμενων κτιρίων κατοικιών', Αθήνα, 1995.
- 99) **Π.Λιβέρης, Δ.Αραβαντινός, Α.Παπαδόπουλος, Ν.Τσακίρης,** 'Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας σε δημόσια κτίρια', Δομοτεχνική Α.Ε. – Κ.Ε.Δ. - Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1996.
- 100) Σχέδιο δράσης 'ΕΝΕΡΓΕΙΑ 2001', Τελική έκθεση έργου, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΑΠΕ, Αθήνα, 1995.
- 101) **Χ.Κορωναίος, Α.Παπαδόπουλος, Ν.Μουσιόπουλος:** "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και αειφόρος ανάπτυξη: Εξεργειακή προσέγγιση", Ανακοίνωση που παρουσιάστηκε στο 6ο Εθνικό Συνέδριο Ινστιτούτου Ηλιακής Τεχνικής, Βόλος, 03-05.11.99. Πρακτικά συνεδρίου Τόμος Β, σελ. 459-468.
- 102) IEA GHG R&D Programme; *Leading Options for the Capture of CO₂ Emissions at Power Stations*, Report Number PH3/14, April 2000.
- 103) IEA GHG R&D Programme; *CO₂ Abatement in Oil Refineries: Fired Heaters*, Report Number PH3/31 October 2000.
- 104) **K. Aasberg-Petersen, C Stub Nielsen, S Laegsgaard Jorgnesen** Membrane Reforming for Hydrogen, *Catalyst Today* 46 (1998) 193-201.
- 105) **J.P. Collins** and J.D. Way, Preparation and Characterisation of a Composite palladium Ceramic Membrane, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1993. 32(12):pp3006-3013
- 106) **R.M. de Vos, H Verweij;** High selectivity, high flux Silica membranes for gas separation. *Science* 279 1710-11 (1998).

- 107) **J. Dong, K Wegner**, Y.S. Lin, Synthesis of submicron polycrystalline silicalite films on porous ceramic supports, *J Membrane Sci*, 148, pp233-241 (1998)
- 108) **M. Pan**, Y.S. Lin Template free secondary growth of MFI-type zeolite membranes, *Microporous and Mesoporous Materials*, 43, 319-327 (2001)
- 109) **M.Bracht**, P.T.Alderliesten et Al, Water gas shift membrane reactor for CO₂ control in IGCC systems: techno-economic feasibility study., *Energy Conversion Management* 38 Suppl., ppS159-S164, 1997.
- 110) **J.K Ali** et Al, Irreversible poisoning of Pd-Ag membranes. *Int J. Hydrogen Energy*. 1994. **19** (11):pp877-80.
- 111) **McKinley, D.L.** Metal Alloy for Hydrogen Separation and Purification, US Patent No. 3350845 (1967).
- 112) **Oldenburg, C.M.**, A.J.A. Unger, R.P. Hepple, and P.D. Jordan, On Leakage and Seepage from Geologic Carbon Sequestration Sites, Lawrence Berkeley National Laboratory Report *LBNL-51130*, July 2002a.
- 113) **Oldenburg, C.M.**, T.E. McKone, R.P. Hepple, and A.J.A. Unger, Health Risks from Leakage and Seepage of CO₂ Sequestered in the Subsurface: Requirements and Design of a Coupled Model for Risk Assessment, Lawrence Berkeley National Laboratory Report *LBNL-51131*, July 2002b.
- 114) **Oldenburg, C.M.**, A.J.A. Unger, and R.P. Hepple, On Atmospheric Dispersion of CO₂ Seepage from Geologic Carbon Sequestration Sites, Lawrence Berkeley National Laboratory Report *LBNL-51734*, November 2002.
- 115) **Oldenburg, C.M.**, and A.J.A. Unger, On leakage and seepage from geologic carbon sequestration sites:unsaturated zone attenuation, in prep. for submission to *Vadose Zone Journal*.
- 116) **R. Brubaker**, C. Christiansen, Legal Aspects of Underground CO₂ Storage: Summary of developments under the London Convention and North Sea Conference, the Fridtjof Nansen Institute, 2001.
- 117) **L.Lui, G. Huang**, A. Chakma, Environmental Impacts and Risks of CO₂ Injection for Enhanced Oil Recovery in Western Canada, Fourth International Conference on Greenhouse gas Control Technologies, 1998.
- 118) Pilot Emission Removals, Reductions and Learnings Initiative (PERRL), Using PERRL to Assist New Climate Change Projects, Presentation by Rob James, Environment Canada.
- 119) Environmental Impact Assessment Report for the Blackrock Ventures Inc., Orion Enhanced Oil Recovery Project, Approximately 12 km Northwest of Cold Lake, Alberta, Alberta Environment, 2001.
- 120) **K. Thambimuthu**, Paul Freund, “CO₂ Capture and Sequestration from Power Generation” , Studies by the IEA Greenhouse Gas R&D programme.
- 121) Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Απογραφές Εκπομπών 1990-2002.
- 122) **Tore A Trop**, J.Gale, “ Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects”, *Energy*; Vol 29, pp 1361–1369, 2004.
- 123) IEA, “Putting carbon back Into the ground”, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, February 2001.
- 124) Thematic Network, CO₂NET “ Report on the current stage and the need for further research on CO₂ Capture and Storage”, June 2004 www.co2net.org.
- 125) **Herzong, H.**, Colomb C. “ Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use”, *Enc. of Energy*, Vol 1, 2004.

- 126) **Odenberger, M.**, Svensson, R. “Transportation Systems for CO₂ – Application to Carbon Sequestration” Department of Energy Conversion – Chalmers University of Technology. Goeteborg, Sweden, 2003.
- 127) “Carbon Capture and Sequestration Systems Analysis Guidelines” U.S. Department of Energy – Office of Energy, National Energy Technology Laboratory, April 2005.
- 128) **Golomb, D.** (1997) Transport Systems for Ocean Disposal of CO₂ and their Environmental Effects. Energy Conversion & Management, Vol. 38, 279-286. ISSN 0196-8904.
- 129) **Haugen, H.A.** & Eide, L.I. (1996) CO₂ Capture and Disposal: Energy Conversion & Management, Vol. 37, 1061-1066. ISSN 0196-8904.
- 130) IEA GHG R&D Program, March 2004.
- 131) **Hendriks**, 1994. “Carbon Dioxide Removal from Coal-fired Power Plants”. C.A. Hendriks, Kluwer Academics Publisher, Dordrecht, the Netherlands (1994).
- 132) **Hendriks, C.**, Graus, W. (ECOFYS), Van Bergen, F. (TNO-NITG) “Global Carbon Dioxide Storage Potential and Costs” ECOFYS in cooperation with TNO, 2004.
- 133) International Energy Agency, Key World Energy Statistics, 1999 edition.
- 134) IPCC, 2001. Climate Change 2001: Mitigation, Part of third Assessment Report by WGIII of Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001.
- 135) **Stevens, S.** and J. Gale, “Geologic CO₂ sequestration may benefit upstream industry,” Oil and Gas Journal, May 15, 2000.
- 136) **Turkenburg**, 1999. Fossiele brandstoffen in een duurzame energievoorziening: de betekenis van CO₂-verwijdering, Turkenburg, W.T., and C.A. Hendriks, Natuurwetenschap en Samenleving en Ecofys, Utrecht (1999).
- 137) International Energy Agency, Committee on Energy Research and Technology Working Party on Fossil Fuels “Solutions for the 21st Century: Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels” 2002.
- 138) **Heddle, G.**, Herzog, H., Klett, M., Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Energy and Environment, “The Economics of CO₂ Storage” August 2003.
- 139) U.S. Department of Energy, Working Paper on Carbon Sequestration Science and Technology; Feb. 1999.
- 140) KLIMATEK: <http://www.cmr.no/klimatek/>
- 141) Geological Storage of CO₂ from Combustion of Fossil Fuel, Summary Report, Project No. ENK6-CT-1999-00010, November 2004.
- 142) “Evaluation of Innovative Fossil Fuel Power Plants with CO₂ Removal”, EPRI Report 1000316, December 2000.
- 143) “Updated Cost and Performance Estimates for Clean Coal Technologies Including CO₂ Capture–2006”, EPRI Report 1013355, March 2007.
- 144) Energy Policy Act of 2005, U.S. Department of Energy, August 2005.
- 145) Idaho National Laboratory/EPRI , “The Nuclear Energy Development Agenda: A Consensus Strategy for U.S. Government and Industry”, January 2006, gop.science.house.gov/hearings/energy06/April%2006/Modeen.pdf
- 146) Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, Volume 1 and Volume 2, EPRI Report 1015325, July 2007.

- 147) “Carbon Sequestration Technology Roadmap and Program Plan”, National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy, April 2007.
- 148) **R. Richels**, T. Rutherford, G. Blanford, and Leon Clarke, “Managing the Transition Climate Stabilization, AEI-Brookings Joint Center for Regulatory Studies, Working Paper 07-01.
- 149) “Advancing the Efficiency of Electricity Utilization”, 2006 EPRI Summer Seminar Paper, www.epri.com.
- 150) **E. Kikuchi**, Membrane reactor application to hydrogen production, Catalyst Today 56 (2000) pp 97-101.
- 151) **David Hawkins**, Global Warming, Indepth testimony, <http://www.nrdc.org/globalWarming/tdh0602.asp> IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), “Third Assessment Report –Climate Change 2001”, www.ipcc.ch

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Ερευνητικές δραστηριότητες στον τομέα αποθήκευσης CO₂

Το πρόγραμμα WEYBURN (EOR)¹⁵

Η περιοχή των κοιτασμάτων πετρελαίου στο Weyburn καλύπτει πάνω από 70 τετραγωνικά μίλια στο νοτιοανατολικό Saskatchewan και είναι ένας από τους μεγαλύτερους ταμειυτήρες ακατέργαστου πετρελαίου στον Καναδά (Keith, D.W. and M. Wilson, 2002). Περιέχουν περίπου 1,4 δισεκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου. Η παραγωγή αποτελείται αρχικά από ακατέργαστο πετρέλαιο μέσης-βαρύτητας με χαμηλή αναλογία φυσικού αερίου-πετρελαίου. Χρησιμοποιείται η τεχνική της βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου (EOR), όπου το CO₂ εισάγεται στον ταμειυτήρα με αποτέλεσμα να διαστέλλει και να ωθεί το πετρέλαιο στις οπές παραγωγής αυξάνοντας έτσι την παραγωγικότητα. Το πρόγραμμα Weyburn θα συμβάλει στην κατανόηση των διαδικασιών με τις οποίες απομονώνεται το CO₂¹⁶.

Το πρόγραμμα SACS (αποθήκευση σε υδροφόρο ορίζοντα)¹⁷

Το πρόγραμμα Sleipner είναι παγκοσμίως το πρώτο σε εμπορικό επίπεδο που χρησιμοποιείται η αποθήκευση του CO₂, για τη μείωση των αερίων θερμοκηπίου. Το CO₂ είναι ένα ανεπιθύμητο υποπροϊόν από την παραγωγή φυσικού αερίου στο δυτικό Sleipner¹⁸. Εισάγεται σε αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα στο σχηματισμό Utsira και σε βάθος 800μ. κάτω από τον πυθμένα της Βόρειας Θάλασσας. Ένα ειδικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του φυσικού αερίου από το δυτικό Sleipner είναι το υψηλό περιεχόμενο του (περίπου 9%). Η περιεκτικότητα έπρεπε να μειωθεί σε 2,5% προτού το φυσικό αέριο μπορέσει να μεταπωληθεί. Περίπου 1 εκ.τον. αφαιρούνται ετησίως από το φυσικό αέριο και εισάγονται έπειτα στον γεωλογικό σχηματισμό Utsira¹⁹.

Το πρόγραμμα SNOHVIT²⁰

Το πρόγραμμα Snohvit είναι το δεύτερο μεγαλύτερο πρόγραμμα υποθαλάσσιας αποθήκευσης παγκοσμίως. Αντί της απελευθέρωσης του στην ατμόσφαιρα, το CO₂ που παράγεται με το φυσικό αέριο μπορεί να αποθηκευτεί 2.600μ κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Το φυσικό αέριο από το κοιτάσμα αυτό περιέχει 5- 8% CO₂ που πρέπει

¹⁵ U.S. Department of Energy, Working Paper on Carbon Sequestration Science and Technology; Feb.1999.

¹⁶ <http://www.iku.sintef.no/projects/IK23430000/>

¹⁷ IEA Greenhouse Gas R&D Programme “Carbon Dioxide Capture from Power Stations” 1998.

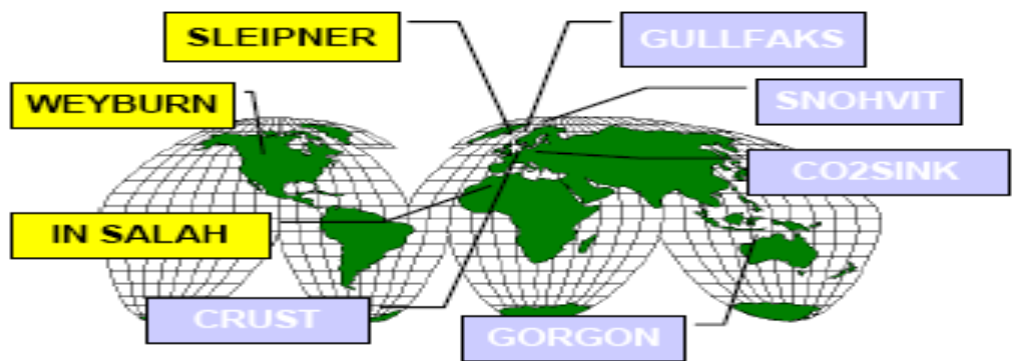
¹⁸ U.S. Department of Energy, Working Paper on Carbon Sequestration Science and Technology; Feb. 1999

¹⁹ www.nitg.tno.nl/projects/eurogeosurveys/projects/GestcoWeb

²⁰ <http://www.iku.sintef.no/projects/IK23430000/>

να μειωθεί λιγότερο από 50 ppmv. Το CO₂, διαχωρίζεται από το φυσικό αέριο με χρήση αμινών (ΜΕΑ) σε στήλες απορρόφησης –αναγέννησης²¹.

Demonstrating CO₂ storage



Συμμετοχή της Ελλάδας σε ερευνητικά προγράμματα αποθήκευσης²²

Γεωλογική αποθήκευση του U.S. Department of Energy, Working Paper on Carbon Sequestration Science and Technology; Feb. 1999, – *Το πρόγραμμα GESTCO*,²³

Το πρόγραμμα αξιολογεί εάν η γεωλογική αποθήκευση του CO₂ μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη μέθοδο για εφαρμογή ευρείας κλίμακας. Διερευνήθηκε η δυνατότητα τεσσάρων κύριων τύπων αποθήκευσης σε επιλεγμένες περιοχές (Δανία, Γερμανία, Γαλλία, Ελλάδα, Ολλανδία, Βέλγιο, Νορβηγία και Ηνωμένο Βασίλειο):

- σε χερσαία / παράκτια αλατούχα υδροφόρα στρώματα με ή χωρίς παράπλευρο σφράγισμα
- σε γεωθερμικούς ταμιευτήρες χαμηλής ενθαλπίας
- σε κοιτάσματα άνθρακα μεγάλου βάθους που περιέχουν μεθάνιο και σε εγκαταλειμμένα ορυχεία άνθρακα ή άλατος
- σε εξαντλημένους ή σχεδόν εξαντλημένους γεωλογικούς σχηματισμούς υδρογονανθράκων

*Το πρόγραμμα NASCENT*²⁴

Το πρόγραμμα στοχεύει στην αντιμετώπιση των βασικών ζητημάτων που συνδέονται με την γεωλογική αποθήκευση του CO₂, συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας μακροπρόθεσμα, την σταθερότητα της υπόγειας αποθήκευσης καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από μία πιθανή διαρροή κάποιου υπόγειου ταμιευτήρα. Υπάρχουν αρκετές περιοχές που περιέχουν φυσικές συσσωρεύσεις CO₂ στην Ελλάδα, Ουγγαρία, Ιταλία, Γερμανία και Γαλλία.

Συγκεκριμένα, ο ορίζοντας στη Φλώρινα είναι κοντά στα σύνορα με την Πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας Πρόκειται για ένα ορίζοντα χαμηλής πίεσης (10 bar) και υψηλής συγκέντρωσης σε CO₂ (>99.5%) διαλυμένο στο νερό. Ο

²¹ The Greenhouse Gas Abatement Program: <http://www.greenhouse.gov.au/ggap/>

The Greenhouse Challenge: <http://www.greenhouse.gov.au/challenge/index.html>

²² U.S. Department of Energy, Working Paper on Carbon Sequestration Science and Technology; Feb. 1999.

²³ <http://www.snohvit.com/STATOILCOM>

²⁴ www.nitg.tno.nl/projects/eurogeosurveys/projects/GestcoWeb

ορίζοντας βρίσκεται σε ποτάμιες αποθέσεις του Μειόκαινου (Miocene fluvial sandstone) ανάμεσα σε στρώματα λιγνίτη σε βάθη μεταξύ 180 και 260m.

Το CO₂ μπορεί να έχει διαμορφωθεί από την αλλαγή και την μετανάστευση των ασβεστόλιθων μέσω ρηγμάτων στα τριτογενή ιζήματα. Αρμόδια μπορεί να είναι ίσως και η ηφαιστιογενή δραστηριότητα 25χλμ ανατολικά στη λεκάνη της Αλμωπίας. Εκεί υπάρχουν εγκαταστάσεις με ετήσια παραγωγή 20.000 – 30.000 τόνους CO₂. Η παραγωγή επιτυγχάνεται με απλό φυσικό διαχωρισμό αερίου – νερού στο φρεάτιο παραγωγής.

Πιθανοί χώροι αποθήκευσης στην Ελλάδα

Οι πιθανοί χώροι στην Ελλάδα όπως μελετήθηκαν και στο ερευνητικό πρόγραμμα GESTCO που προαναφέρθηκε παραπάνω, είναι οι ταμιευτήρες στην περιοχή του Πρίνου με χωρητικότητα 17 Mt, καθώς και ορισμένοι υδροφόροι ορίζοντες όπως στην Αλεξάνδρια και στον Λουδία με χωρητικότητα 2,2Gt²⁵. Επίσης εκτιμάται ότι πιθανό χώρο αποθήκευσης του CO₂ μπορεί να αποτελέσει και η Μεσοελληνική αύλακα αφού σύμφωνα με μελέτες υπάρχει πιθανότητα ύπαρξης υδρογονανθράκων.

Εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης CO₂ σε ελληνικό ΑΗΣ

Στα πλαίσια εργασίας, προσομοιώθηκε συμβατικός λιγνιτικός ατμοηλεκτρικός σταθμός μικτής ισχύος 330 MweI και η δυνατότητα μετατροπής με τεχνολογίες δέσμευσης με αμίνη και κάυσης σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου. Ο ΑΗΣ αποτελείται από ατμολέβητα υπερκρίσιμων χαρακτηριστικών, ατμοστρόβιλο τριών σταδίων πίεσης και προθέρμανση τουτροφοδοτικού νερού από 8 προθερμαντές ατμού.

		Συμβατικός ΑΗΣ	Καύση με O ₂	Δέσμευση με αμίνη
Θερμική ισχύς καυσίμου	MW _{th}	830,0	830,0	830,0
Θερμική κατανάλωση για αναγέννηση διαλύματος	MW _{th}	-	-	256.5
Ισχύς που καταναλώνει η ASU (η _{is} = 0.83)	MW _{el}	-	58.1	-
Ισχύς που καταναλώνουν οι συμπιεστές του CO ₂ (η _{is} = 0.85)	MW _{el}	-	22.4	20.5
Ισχύς που καταναλώνουν οι αντλίες νερού ψύξης	MW _{el}	-	1.5	0.7
Κατανάλωση ισχύος από μονάδα απορρόφησης CO ₂ (ανεμιστήρας καυσαερίου, αντλίες)	MW _{el}	-	-	8.7
Καθαρή ηλεκτρική ισχύς	MW _{el}	293.7	211.0	200.5
Βαθμός απόδοσης μονάδας	%	35.74	25.42	24.16

Πίνακας 1: Αποτελέσματα προσομοίωσης ΑΗΣ

²⁵ Geological Storage of CO₂ from Combustion of Fossil Fuel, Summary Report, Project No. ENK6-CT-1999-00010, November 2004.

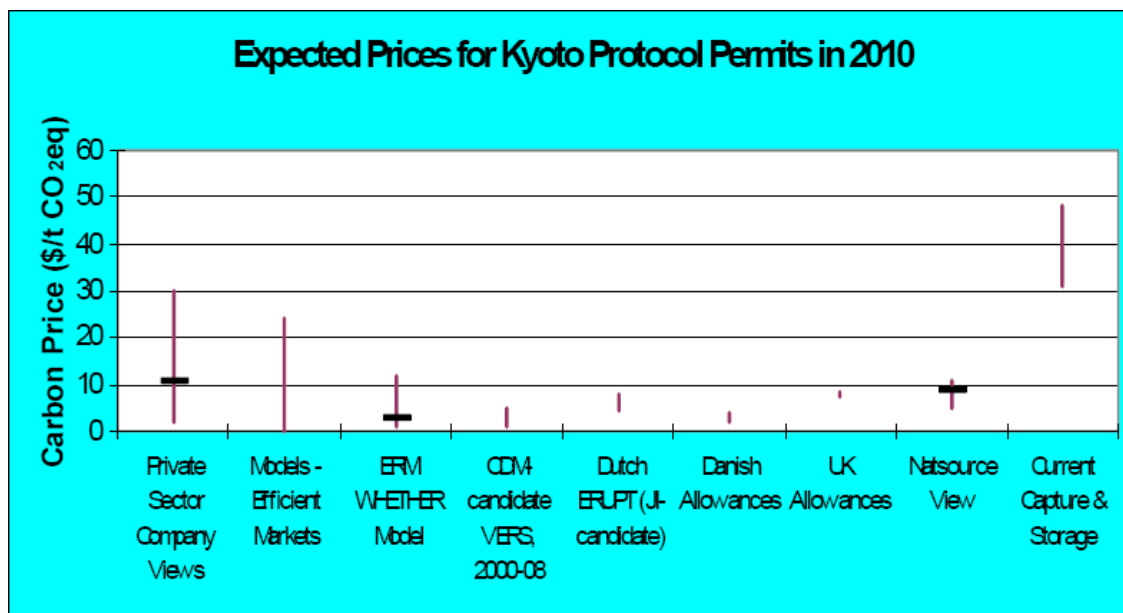
Οι γενικές παραδοχές που έγιναν για την εκτίμηση του κόστους ηλεκτρισμού για τους διάφορους τύπους μονάδων ηλεκτροπαραγωγής είναι οι ακόλουθες:

- Επιτόκιο αναγωγής: 8%
- Πληθωρισμός: 3%
- Κόστος λιγνίτη: 1,8 €/ GJ
- Κόστος φυσικού αερίου: 5,5 €/GJ
- Απόσβεση μονάδας στερεού καυσίμου: 25 έτη
- Απόσβεση μονάδας φυσικού αερίου και αεριοποιημένου λιγνίτη: 15 έτη
- Κόστος συντήρησης και λειτουργίας: 3% του κόστους επένδυσης ετησίως και
- Μεταβλητό κόστος 0,01 €/ kWh για μονάδα λιγνίτη και 0,005 €/kWh για μονάδα φυσικού αερίου
- Ώρες λειτουργίας μονάδας ετησίως: 7500 h
- Λειτουργία μονάδας σε πλήρες φορτίο
- Για την εκτίμηση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής των μονάδων με δέσμευση του CO₂ (έκπλυση καυσαερίου με αμίνες και καύση με καθαρό οξυγόνο) έχει συμπεριληφθεί το κόστος δέσμευσης στον ΑΗΣ αλλά όχι το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης του CO₂
- Κόστος εκπεμπόμενου CO₂ (τιμή που καθορίζεται από την αγορά CO₂): 18 €/tn

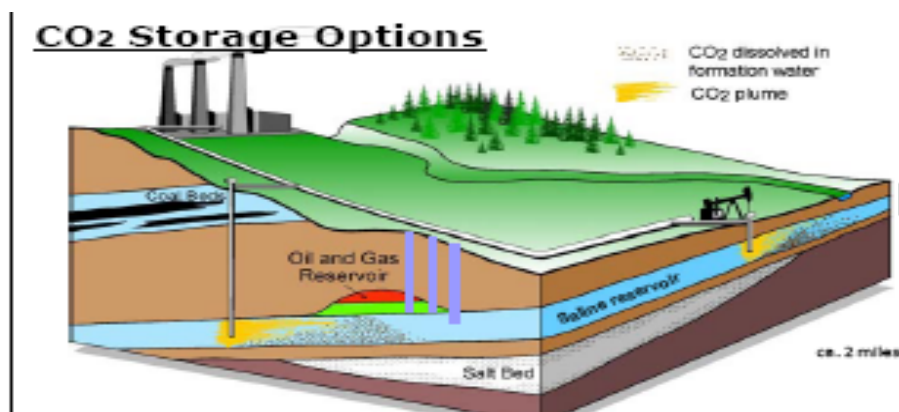
Ειδικές παραδοχές							
		Συμβατική λιγνιτική μονάδα	Συμβατική μονάδα με έκπλυση αμίνης	Συμβατική μονάδα με καύση O ₂	Καθαρές τεχνολογίες άνθρακα	Συνδυασμένος κύκλος Φ.Α.	Συνδυασμένος κύκλος με αεριοποίηση άνθρακα
Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	MWeI	300	200	211	300	380	766
Βαθμός απόδοσης	%	35.4	24.2	25.4	44.0	56.5	43.0
Κόστος επένδυσης	€/kW	1100	1900	1570	1150	600	1370
Ειδικές εκπομπές CO ₂	kg/ kWh	1.075	0.17	0.17	0.865	0.37	0.76

Πίνακας 2: Ειδικές παραδοχές

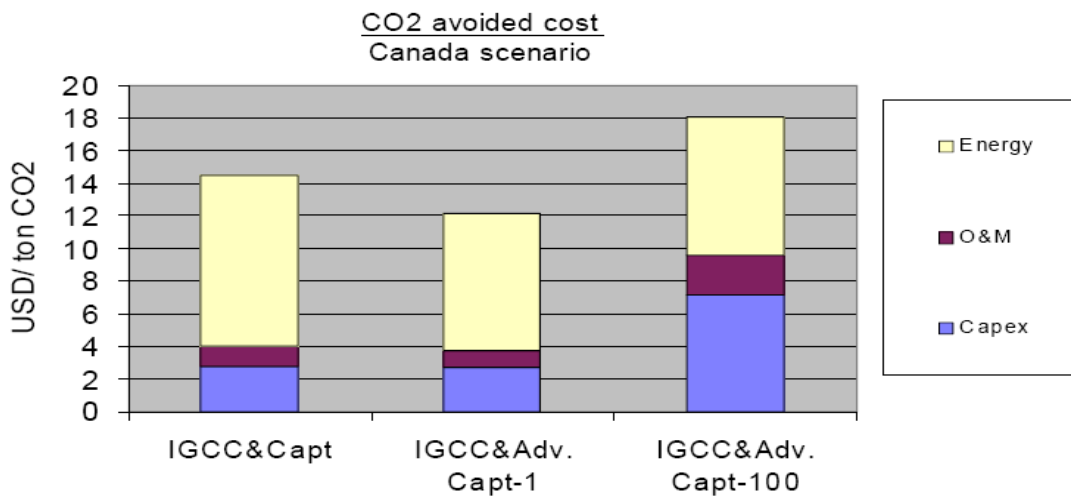
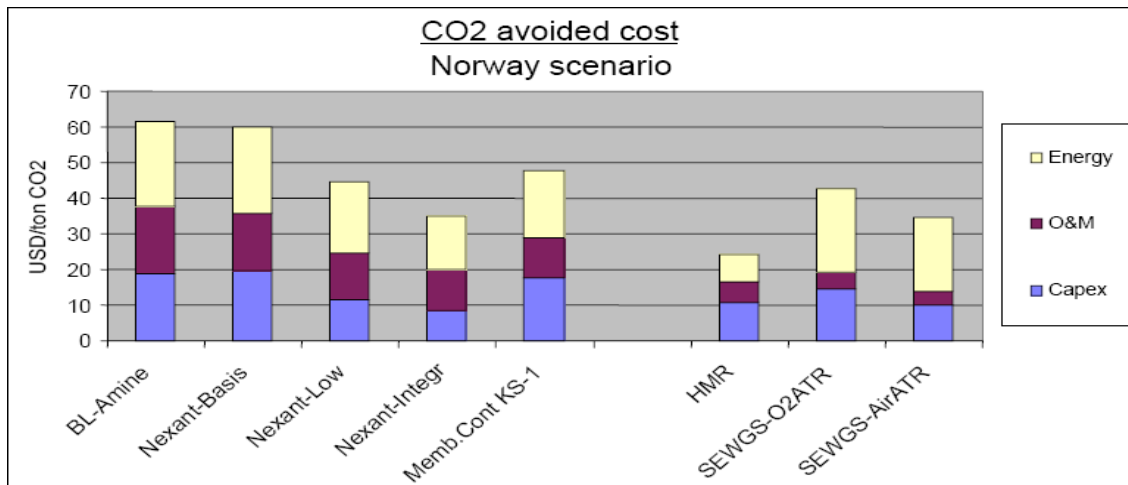
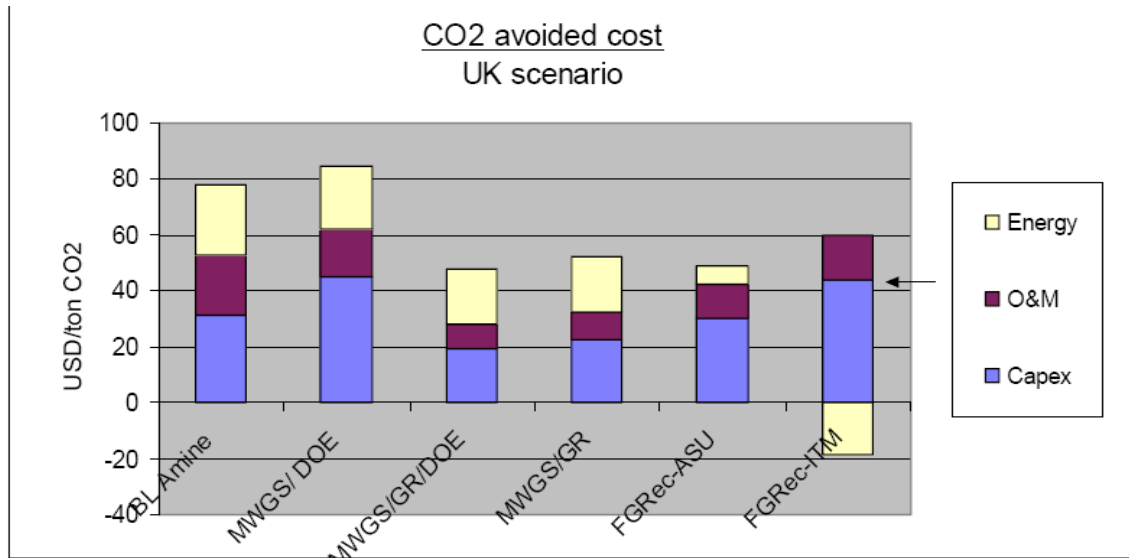
Παράρτημα 2

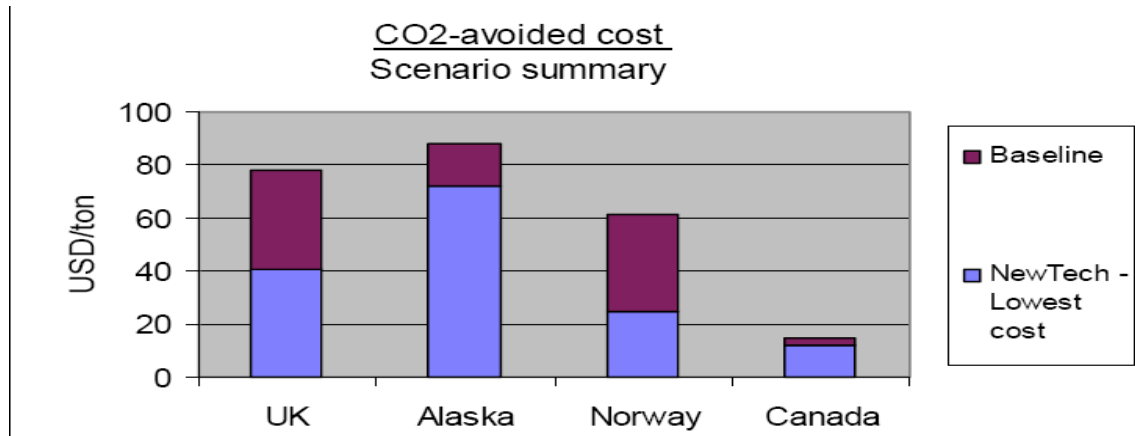
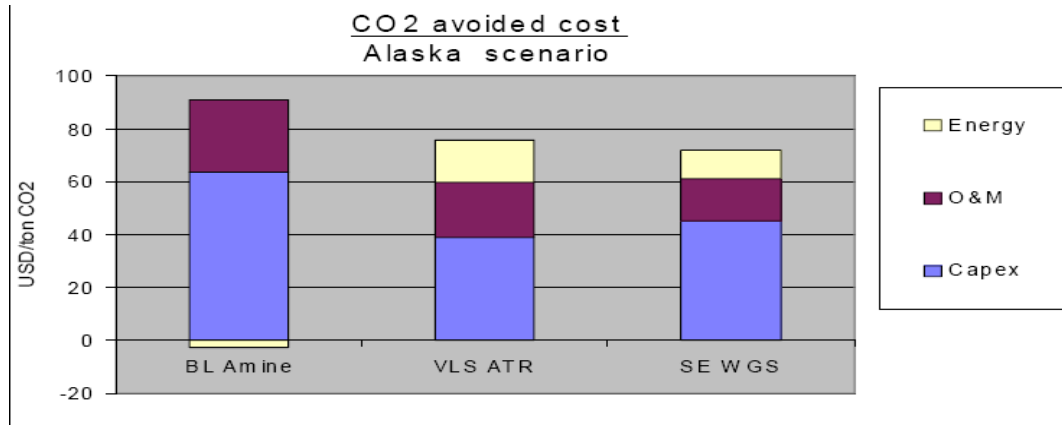


Μέθοδος Γεωλογικής Αποθήκευσης Διοξειδίου του Άνθρακα

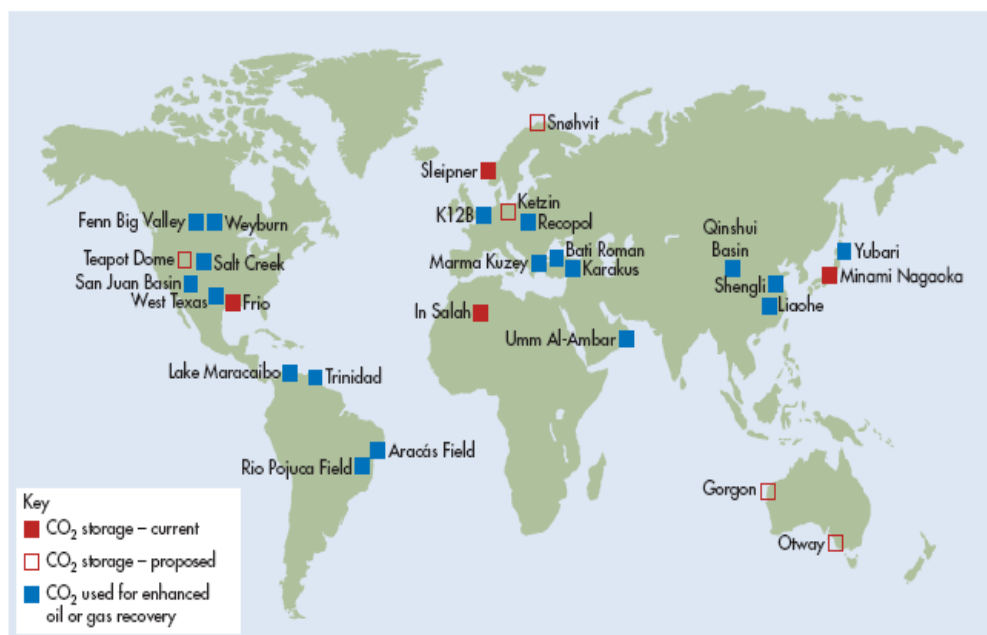
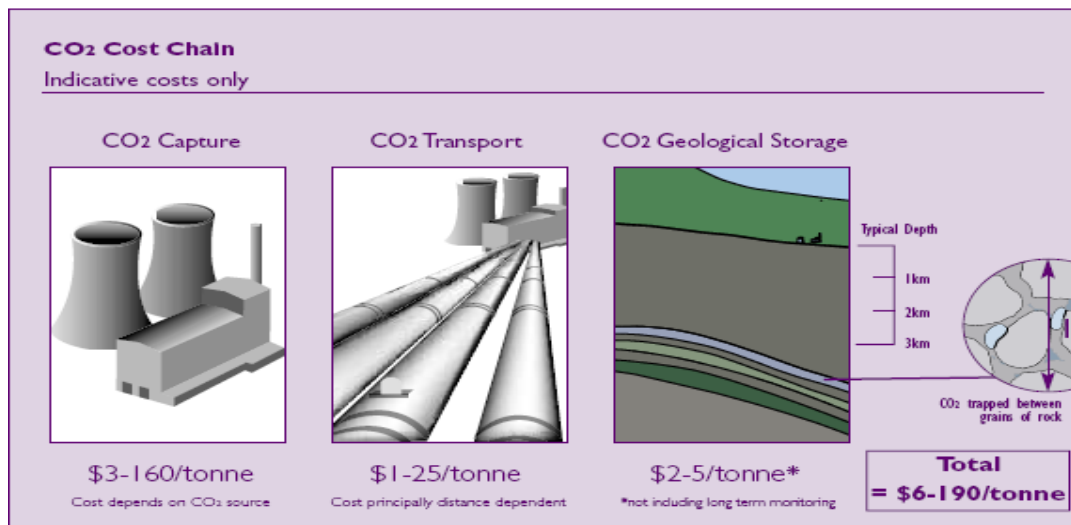


Παράρτημα 3





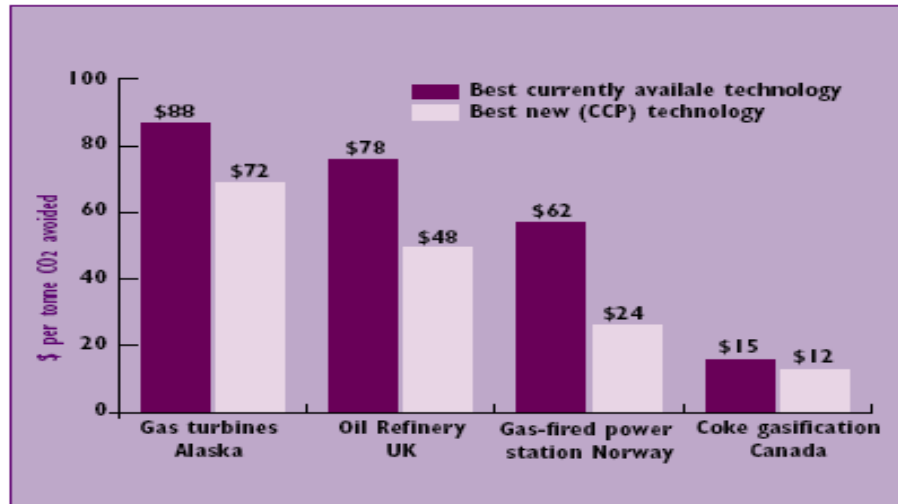
Παράρτημα 4



Location of sites where geological storage of CO₂ and CO₂-enhanced oil and gas recovery takes place, from the IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage

Παράρτημα 5

Potential cost savings of best CO₂ Capture Technologies



Global atmospheric concentration of CO₂

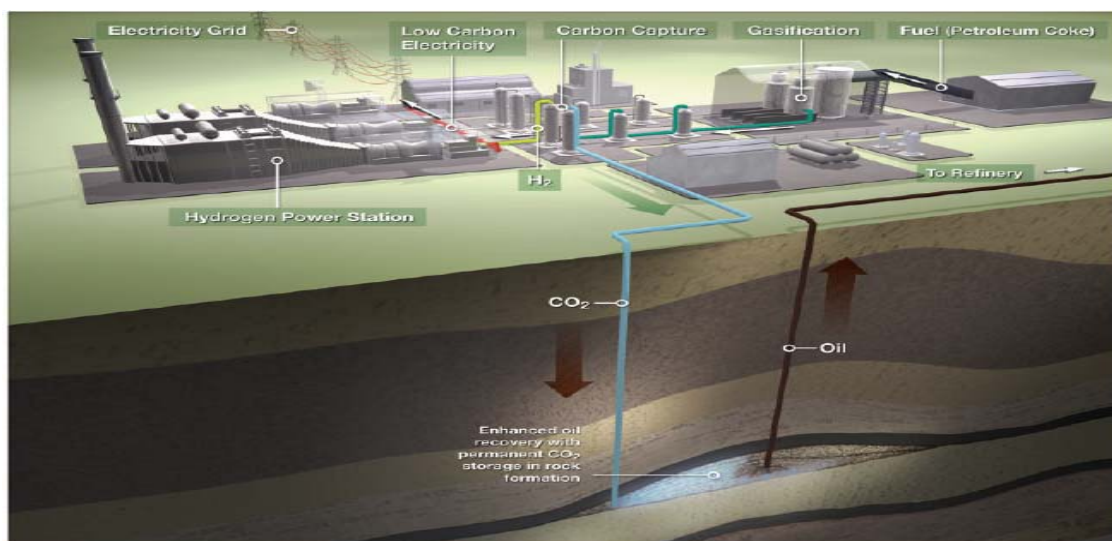
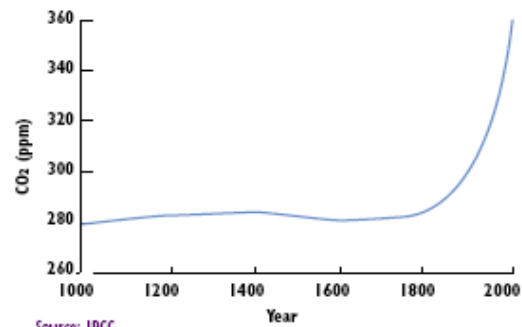
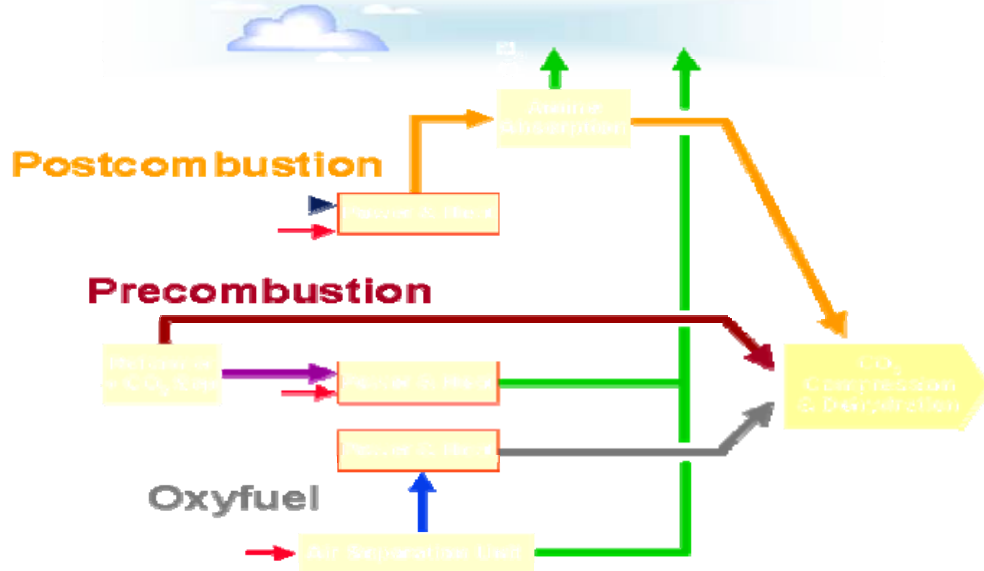


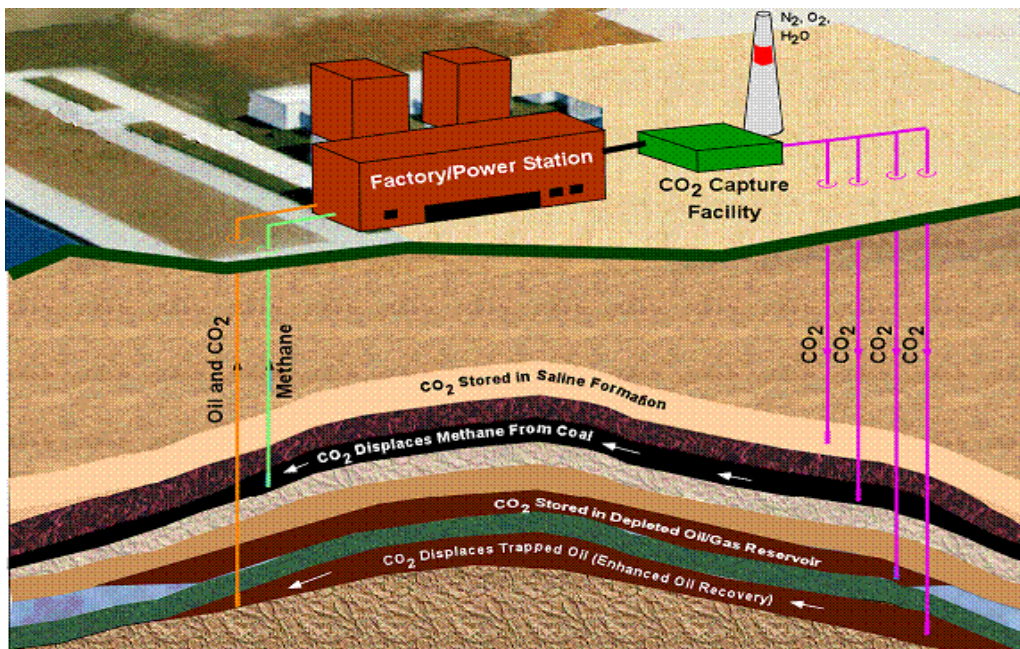
Illustration (courtesy of BP and Edison Mission Group) of a planned power plant in California with CCS

Παράρτημα 6

Capture Technologies



Geologic Storage²⁶



²⁶ Next Generation Nuclear Plant (NGNP), Nuclear Energy Research Initiative, U.S. Department of Energy, <http://nuclear.energy.gov/neri/neNERIresearch.html>