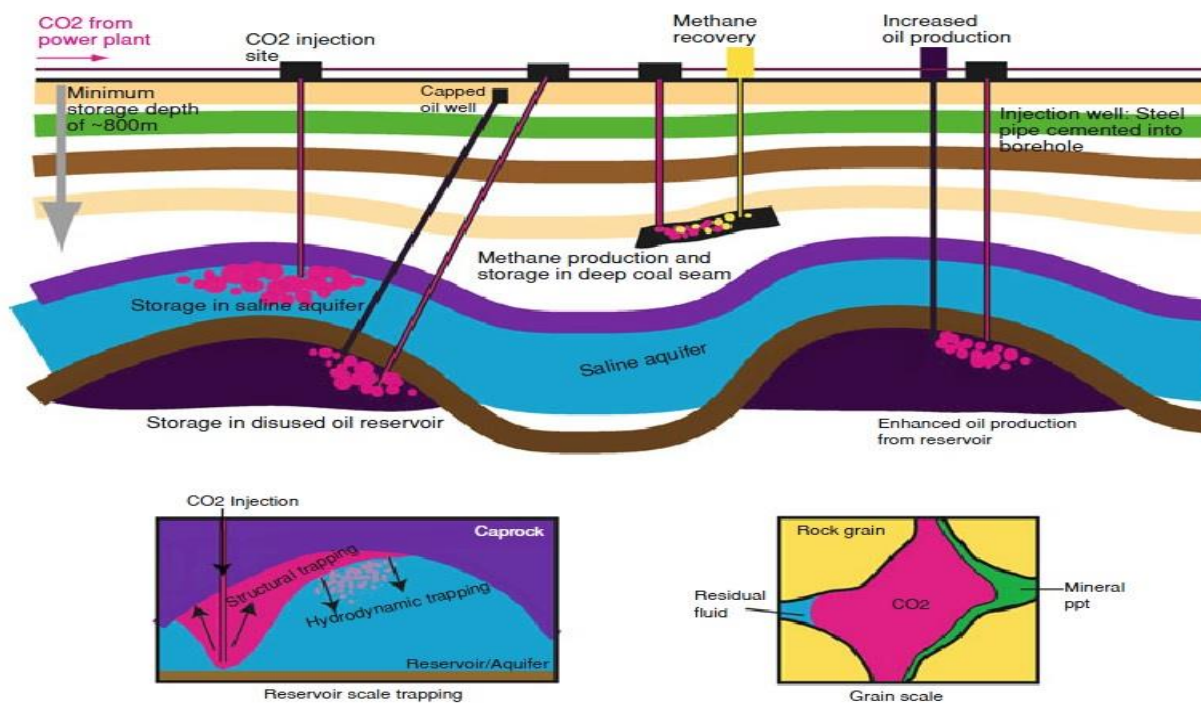


ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Αποθήκευση CO₂ σε υπόγειους ταμιευτήρες σαν μέσο για την απομείωση των ανθρωπογενώς παραγόμενων αερίων θερμοκηπίου»



Αμβράζη Μάριου

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθ. Κ. Αλμπανάκης (Επιβλέπων)
Καθ. Σ. Σταματάκη
Καθ. Α. Γεωργακόπουλος

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος, 2017





ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων εκατοντάδων ετών, η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα αυξάνεται με σταθερό ρυθμό και στις μέρες μας έχει ξεπεράσει τα 370 ppm, όταν πριν την έναρξη της βιομηχανικής εποχής κυμαινόταν μόλις στα 280 ppm. Η αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα, αποδίδεται κυρίως στην καύση γαιάνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για την κίνηση των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, αλλά και για την παραγωγή ενέργειας σε εργοστάσια και βιομηχανίες. Σήμερα, απελευθερώνονται περίπου 20 δισεκατομμύρια τόνοι CO₂ στην ατμόσφαιρα, σε παγκόσμια κλίμακα. Είναι γεγονός ότι υπάρχει μια ολοένα και αυξανόμενη ανησυχία της κοινής γνώμης αλλά και της επιστημονικής κοινότητας, ότι η συνεχόμενη αύξηση στις εκπομπές του CO₂ θα διαταράξει το κλίμα της γης, θα αυξήσει τη στάθμη της θάλασσας τόσο, ώστε πολλές περιοχές που βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο να πλημμυρίσουν και να καταστραφούν ευαίσθητα οικοσυστήματα. Πολλοί ειδικοί από την επιστημονική κοινότητα πιστεύουν, ότι για να αποφευχθεί μια περαιτέρω σοβαρή διαταραχή του κλίματος και των οικοσυστημάτων, πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα μείωσης και σταθεροποίησης των εκπομπών του CO₂, μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Με βάση τις σημερινές εκπομπές, η συγκέντρωση του CO₂ θα συνεχίσει να αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς και μέσα στα επόμενα 50 χρόνια, είναι πολύ πιθανό να έχουν ξεπεραστεί τα ελάχιστα όρια που έχουν τεθεί, για την προστασία οικοσυστημάτων και περιοχών που βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο σε σχέση με τη θάλασσα. Η κατάσταση φαντάζει ακόμα πιο επείγουσα, εάν ληφθούν υπόψη κάποιες προβλέψεις που δείχνουν ότι στα επόμενα 50 έτη οι εκπομπές του CO₂ θα διπλασιαστούν, καθώς οι οικονομίες πολλών αναπτυσσόμενων κρατών ανθούν και η ποιότητα ζωής των κατοίκων τους αυξάνει και αυτή με τη σειρά της. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, είναι αναγκαία μια πολυδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος - μείωσης των εκπομπών CO₂. Αυτή λοιπόν η προσέγγιση θα έχει να κάνει με την πιο αποδοτική παραγωγή και χρήση της ενέργειας, τη χρήση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας, τη χρήση της βιομάζας, τη χρήση πηγών καυσίμου με χαμηλές ή αμελητέες εκπομπές CO₂ και τέλος τη

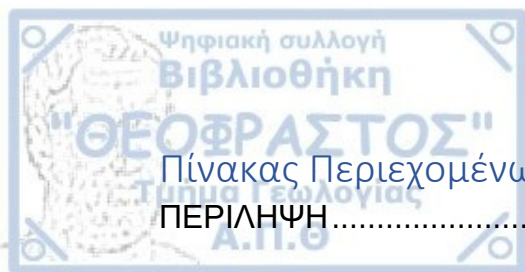


χρήση της τεχνολογίας της παγίδευσης και αποθήκευσης του CO₂ (CO₂ capture and storage - CCS).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εν λόγω διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο ΔΠΜΣ Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων και μολονότι είναι ατομική, ωστόσο είναι αποτέλεσμα συλλογικής προσπάθειας. Έτσι, φτάνοντας στο τέλος της συγγραφής της θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της.

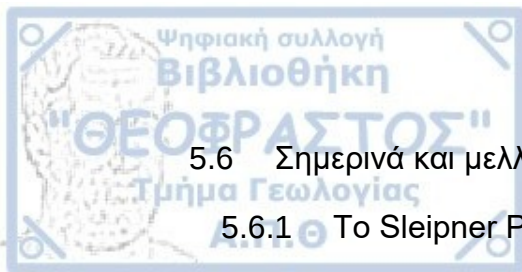
Πρωτίστως θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τον Αν. Καθηγητή του Τμ. Γεωλογίας του Α.Π.Θ. και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Αλμπανάκη Κωνσταντίνο, για την ευκαιρία που μου έδωσε παρέχοντάς μου όλα τα στοιχεία για να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Τον ευχαριστώ παράλληλα για την υποστήριξη, τις συμβουλές, τη βοήθεια που μου παρείχε με τόση προθυμία. Τον ευχαριστώ ακόμη για την άριστη συνεργασία που αναπτύξαμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Τμ. Γεωλογίας του Α.Π.Θ. κ. Γεωργακόπουλο Ανδρέα για τις χρήσιμες συμβουλές του και εύστοχες παρατηρήσεις του. Ακόμη θα ήθελα θερμά να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του ΕΜΠ κ. Σταματάκη Σοφία για την αμέριστη συμπαράσταση και την πολύτιμη βοήθειά της σε στάδια της εργασίας.



Πίνακας Περιεχομένων ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
2 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και το φαινόμενο της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής	9
2.1 Συμφωνία των Παρισίων (Paris Agreement).....	15
3 Δέσμευση του CO ₂	17
3.1 Τεχνολογίες δέσμευσης του CO ₂	17
3.1.1 Διαχωρισμός με χρήση ροφητικών ουσιών / διαλυτών	17
3.1.2 Διαχωρισμός με χρήση μεμβρανών	18
3.1.3 Απόσταξη ροής υγροποιημένου αερίου και διαχωρισμός υπό ψύξη	19
3.2 Συστήματα δέσμευσης του CO ₂	20
3.2.1 Capture from industrial process streams	21
3.2.2 Industrial process capture systems	22
3.3 Post - combustion capture	26
3.3.1 Διαθέσιμες τεχνολογίες.....	27
3.4 Oxy - fuel combustion	32
3.4.1 Έμμεση θέρμανση oxy-fuel – κύκλος ατμού	33
3.4.2 Σχεδιασμός εφαρμογής συστήματος oxy-fuel combustion σε ένα νέο λέβητα καύσης κονιοποιημένου άνθρακα	34
3.4.3 Σχεδιασμός προηγμένου συγκροτήματος στροβιλοκινητήρα μηδενικών εκπομπών	35
3.4.4 Άμεση θέρμανση oxy-fuel – κύκλωμα αεριοστρόβιλου	36
3.4.5 Chemical looping combustion	38
3.5 Pre - combustion capture.....	40
3.5.1 Υπάρχουσες τεχνολογίες	41

4	Μεταφορά του CO ₂	47
4.1	Μεταφορά μέσω αγωγών.....	48
4.2	Μεταφορά μέσω πλοίων	51
5	Γεωλογική αποθήκευση CO ₂	52
5.1	Γενικά χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών κατάλληλων για αποθήκευση CO ₂	55
5.2	Σχηματισμοί κατάλληλοι για αποθήκευση CO ₂	58
5.2.1	Εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου	58
5.2.2	Enhanced oil recovery.....	59
5.2.3	Enhanced gas recovery.....	61
5.2.4	Σχηματισμοί κορεσμένοι σε αλατούχο νερό.....	61
5.2.5	Φλέβες γαιάνθρακα	63
5.2.6	Δευτερεύοντες σχηματισμοί για αποθήκευση CO ₂	64
5.3	Εκτιμώμενος αποθηκευτικός χώρος	66
5.3.1	Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου	66
5.3.2	Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε σχηματισμούς κορεσμένους σε αλατούχο νερό.....	68
5.3.3	Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε κοιτάσματα γαιάνθρακα	69
5.4	Μηχανισμοί παγίδευσης CO ₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς.....	71
5.4.1	Φυσική παγίδευση: στρωματογραφική και δομική.....	72
5.4.2	Φυσική παγίδευση: υδροδυναμική	73
5.4.3	Γεωχημική παγίδευση	73
5.5	Τεχνολογίες παρακολούθησης της κατανομής του CO ₂ στον ταμιευτήρα.....	75
5.5.1	Άμεσες τεχνικές παρακολούθησης της μετακίνησης του CO ₂	76
5.5.2	Έμμεσες τεχνικές παρακολούθησης της μετακίνησης του CO ₂ ..	77

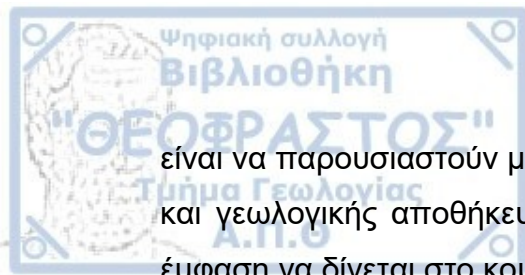


5.6	Σημερινά και μελλοντικά projects αποθήκευσης του CO ₂	80
5.6.1	To Sleipner Project, Βόρεια Θάλασσα.....	83
5.6.2	To Project αποθήκευσης CO ₂ In Salah στην Αλγερία.....	85
6	Συζήτηση	87



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων εκατοντάδων ετών, η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα αυξάνεται με σταθερό ρυθμό και στις μέρες μας έχει ξεπεράσει τα 370 ppm, όταν πριν την έναρξη της βιομηχανικής εποχής κυμαινόταν μόλις στα 280 ppm. Η αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα, αποδίδεται κυρίως στην καύση γαιάνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για την κίνηση των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, αλλά και για την παραγωγή ενέργειας σε εργοστάσια και βιομηχανίες. Σήμερα, απελευθερώνονται περίπου 20 δισεκατομμύρια τόνοι CO₂ στην ατμόσφαιρα, σε παγκόσμια κλίμακα. Η εποχή στην οποία ζούμε, χαρακτηρίζεται από την ανάγκη για ασφαλείς αξιόπιστες και οικονομικές πηγές ενέργειας, οι οποίες με τη σειρά τους ευνοούν την οικονομική ανάπτυξη των κοινωνιών. Αυτό όμως συνοδεύεται και με την αύξηση των εκπομπών CO₂, οι οποίες επηρεάζουν το κλίμα του πλανήτη μας. Σύμφωνα με έρευνες που διενεργήθηκαν, περίπου το 69% των συνολικών εκπομπών CO₂ και το 60% των συνολικών εκπομπών θερμοκηπίου, συνδέεται άμεσα με την παραγωγή ενέργειας. Πρόσφατες μελέτες και έρευνες της International Energy Agency (IEA), έδειξαν ότι οι εάν δεν ληφθούν άμεσα μέτρα για το μετριασμό του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, τότε οι εκπομπές του CO₂, οι οποίες σχετίζονται με τον κλάδο της ενέργειας και πιο συγκεκριμένα με την αυξανόμενη χρήση ορυκτών καυσίμων θα αυξηθούν κατά 130% έως το 2050. Αυτή η αύξηση των εκπομπών, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 4-7 °C, με άμεσες συνέπειες για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Η επιστημονική κοινότητα συμφωνεί ότι είναι απαραίτητη η μείωση των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ κατά 50% έως το 2050. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια «ενεργειακή επανάσταση», η οποία θα περιλαμβάνει αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα, αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την απαλλαγή από τις εκπομπές του άνθρακα κατά την παραγωγή ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η μόνη διαθέσιμη τεχνολογία σήμερα για το μετριασμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που προέρχονται από την εκτεταμένη χρήση ορυκτών καυσίμων, είναι η τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂ (Carbon capture and storage – CCS). Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας

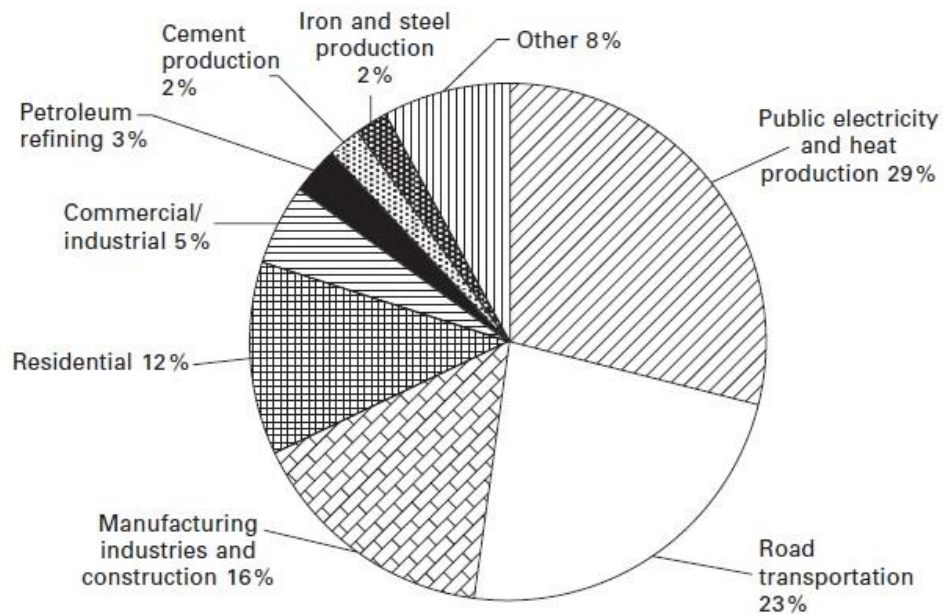


είναι να παρουσιαστούν με διεξοδικό τρόπο οι μέθοδοι δέσμευσης, μεταφοράς και γεωλογικής αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα με τη μεγαλύτερη έμφαση να δίνεται στο κομμάτι της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂.

2 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και το φαινόμενο της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής

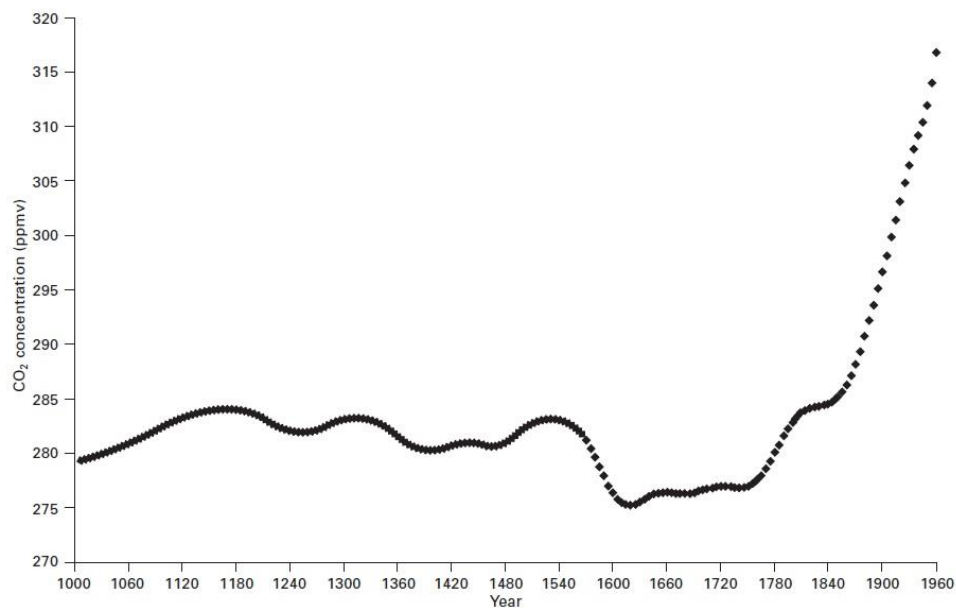
Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ζωής στη γη μας και η απουσία αυτού του φαινομένου θα είχε καταστρεπτικές συνέπειες διότι η μέση θερμοκρασία του πλανήτη θα ήταν περίπου -18°C . Οι βασικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (greenhouse gas emissions - GHGs) το έτος 2004, προέρχονταν από εκπομπές CO_2 λόγω χρήσης ορυκτών καυσίμων σε ποσοστό 56.6%, από εκπομπές CO_2 λόγω της αποψίλωσης των δασών και φθοράς της βιομάζας σε ποσοστό 17.3 %, από εκπομπές μεθανίου (CH_4) σε ποσοστό 14.3 % και τέλος από εκπομπές οξειδίου του αζώτου (N_2O) σε ποσοστό 7.9% (IPCC, 2007). Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το πιο σημαντικό ανθρωπογενές αέριο θερμοκηπίου, παρόλο που δεν είναι τόσο επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία σε σύγκριση με το μεθάνιο, το οποίο παράγεται σε μικρότερες ποσότητες από την καύση ορυκτών καυσίμων. Οι επιστήμονες που ειδικεύονται στο κλίμα και την κλιματική αλλαγή, δεν έχουν καμία αμφιβολία ότι το κλίμα της γης θα γίνει θερμότερο τα επόμενα χρόνια ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης απελευθέρωσης ανθρωπογενών αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, καθιστώντας το πρόβλημα του φαινομένου του θερμοκηπίου ακόμα πιο έντονο. Ωστόσο, υπάρχει μια αβεβαιότητα σχετικά με το εύρος της θέρμανσης που θα υποστεί ο πλανήτης και τις επιπτώσεις που θα υπάρξουν σε περιφερειακό επίπεδο. Μέχρι σήμερα, η πιο αξιόπιστη εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος της γης, προέρχεται από μαθηματικά μοντέλα κλίματος που βασίζονται σε διάφορες φυσικές προσεγγίσεις. Όλα αυτά τα μοντέλα κλίματος προβλέπουν σημαντική θέρμανση του πλανήτη, όταν οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου αυξάνονται με σταθερό ρυθμό.

Από διάφορες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, βρέθηκε ότι οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας είναι ο μεγαλύτερος 'παραγωγός' ανθρωπογενών εκπομπών CO_2 σε σχέση με άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα του Ηνωμένου Βασιλείου, στο οποίο οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας είναι υπεύθυνοι για την εκπομπή περίπου 0.17 Gt CO_2 το έτος 2008 (BERR, 2009). Επίσης άλλη έρευνα έδειξε ότι στο έτος 2006, το 29% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην Ευρώπη των 15 οφειλόταν σε διεργασίες παραγωγής ενέργειας (Εικόνα 2.1). Σύμφωνα με το International Energy Outlook 2008 (EIA, 2008), οι εκπομπές CO_2 σε παγκόσμιο επίπεδο που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας έφταναν περίπου τους 28.1 Gt CO_2 το έτος 2005 και υπάρχουν προβλέψεις ότι αυτό το νούμερο θα αυξάνεται κατά 1.7% το έτος για τη χρονική περίοδο 2005 - 2030.

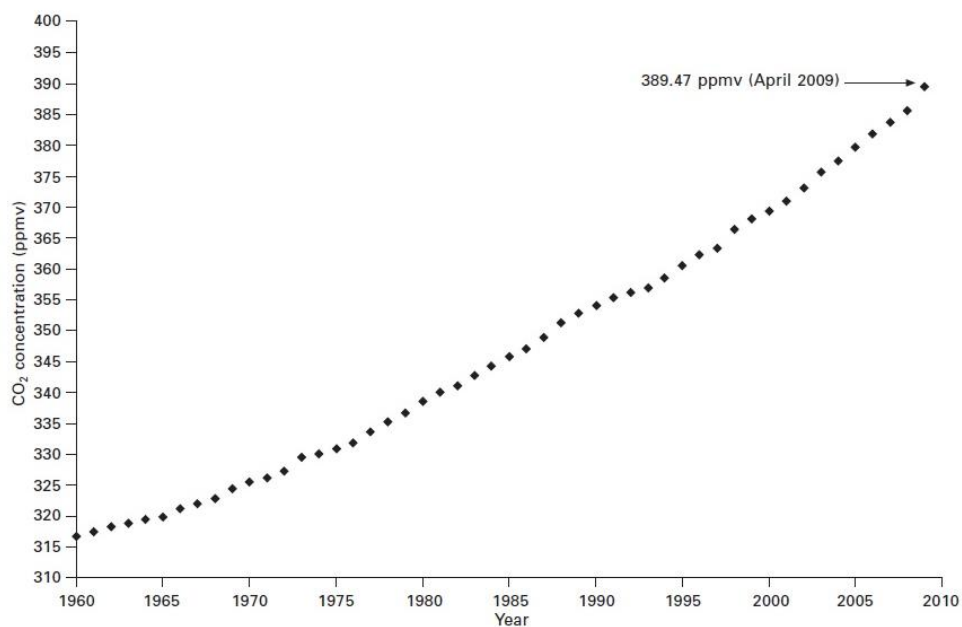


Εικόνα 2.1 : Πηγές εκπομπών CO₂ στην ΕΕ-15 (Σύνολο εκπομπών = 3.46 Gt CO₂) (ΕΙΑ, 2008).

Η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί από τα 280 ppmv πριν την άνθιση της βιομηχανικής εποχής στα 389.47 ppmv, όπως μετρήθηκε τον Απρίλιο του 2009 (Εικόνα 2.2, Εικόνα 2.3)



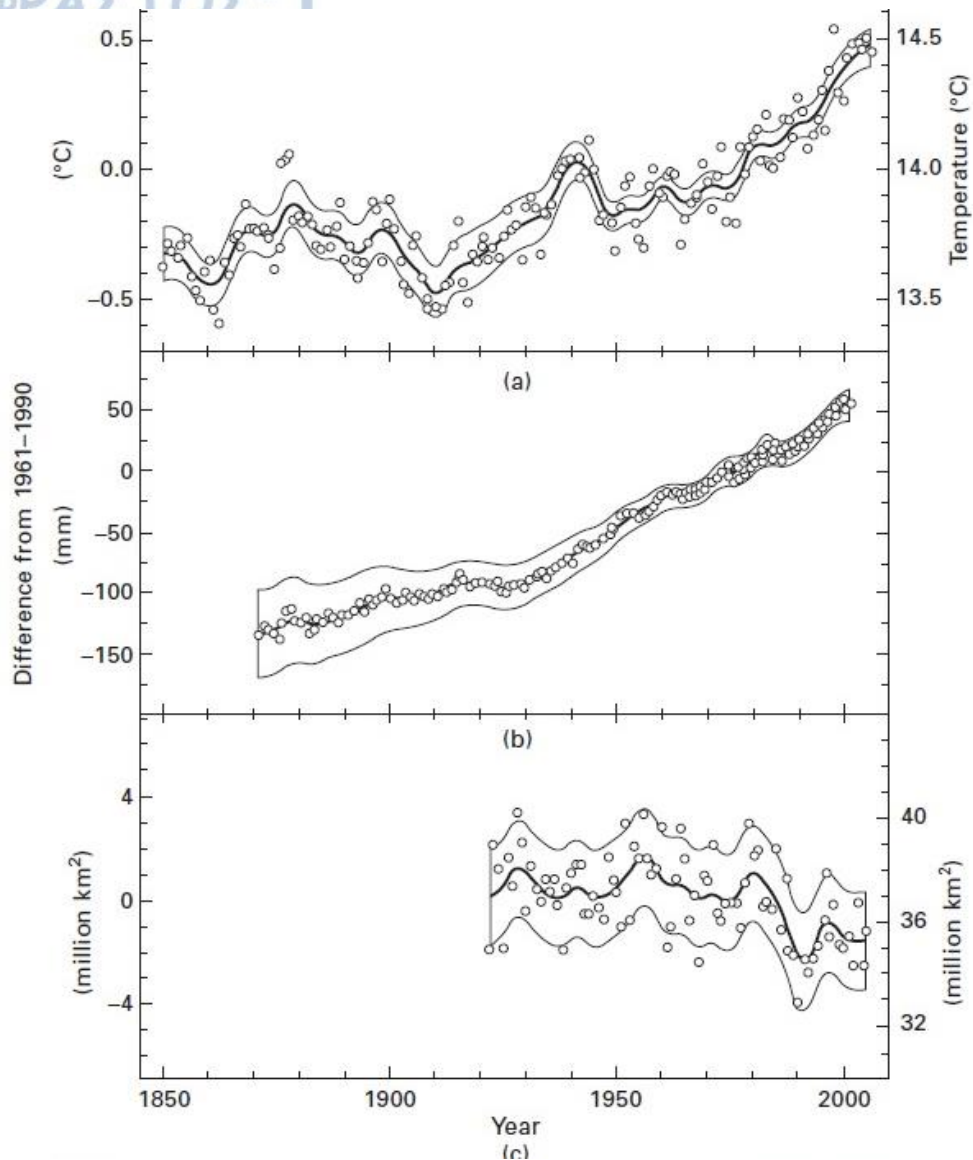
Εικόνα 2.2 : Μέση τιμή των ετήσιων συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικού CO₂ στους πάγους της Ανταρκτικής από το 1010 έως το 1960 (Etheridge et al., 1996)



Εικόνα 2.3 : Μέση τιμή των ετήσιων συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικού CO₂ με βάση άμεσες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Mauna Loa Observatory κατά τη χρονική περίοδο 1960-2009 (Dr Pieter Tans, NOAA / ESRL, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends).



Οι καταστρεπτικές συνέπειες των ολοένα αυξανόμενων εκπομπών CO₂ στο παγκόσμιο κλίμα, είναι καλά τεκμηριωμένες και είναι ξεκάθαρο ότι είναι απαραίτητη η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. (Stocker and Schmittner, 1997; Palmer and Raisanen, 2002; Karl and Trenberth, 2003; Stern, 2006). Σύμφωνα με την έκθεση των United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) του 2007, η κλιματική αλλαγή έχει αποδειχτεί κατηγορηματικά και πέραν κάθε αμφιβολίας ότι συνδέεται με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Στοιχεία που συνηγορούν σε αυτό το συμπέρασμα είναι η παγκόσμια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα και των ωκεανών, η αύξηση της στάθμης της θάλασσας όσο και το εκτεταμένο λιώσιμο των πάγων της Αρκτικής (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4 : Παρατηρούμενες μεταβολές στη α) παγκόσμια μέση τιμή θερμοκρασίας στην επιφάνεια β) παγκόσμια μέση τιμή της στάθμης της θάλασσας γ) τιμή της κάλυψης του χιονιού στο Βόρειο Ημισφαίριο για τους μήνες Μάρτιο – Απρίλιο (IPCC, 2007).

Το United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) το 1994, μέσω του οποίου το Πρωτόκολλο του Κιότο τέθηκε σε πλήρη ισχύ το 2005, υποχρεώνει τα έθνη σε 'σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων των αερίων θερμοκηπίου που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, σε ένα ελάχιστο επίπεδο, το οποίο θα αποτρέψει επικίνδυνες μεταβολές του κλίματος προκαλούμενες από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις'. Σύμφωνα με μελέτες, οι χειρότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής μπορούν να μειωθούν δραματικά εφόσον οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σταθεροποιηθούν κάπου

ανάμεσα στους 450 και 550 ppm CO₂ (Stern, 2006). Το Νοέμβριο του 2008, το UK Climate Act έγινε και επίσημα νόμος του Ηνωμένου Βασιλείου και έθεσε ως στόχο τη μείωση σε ποσοστό της τάξης του 80% των εκπομπών του CO₂ μέχρι το έτος 2050, σε σχέση με τα επίπεδα που είχαν καταγραφεί το έτος 1990. Αυτός ο νόμος κατέστησε το Ηνωμένο Βασίλειο την πρώτη χώρα που έθεσε μια τόσο μακροχρόνια και σημαντική μείωση του διοξειδίου του άνθρακα και την έθεσε σε νομοθετική ισχύ (DECC, 2009). Περαιτέρω δεσμεύσεις συζητήθηκαν στο 15ο Conference of the Parties (COP15) υπό την αιγίδα του United Nations Framework on Climate Change (UNFCCC), το Δεκέμβριο του 2009, με πρόθεση τη δημιουργία μιας διεθνούς συνθήκης που θα δεσμεύει νομικά τα κράτη και θα αντικαθιστά το Πρωτόκολλο του Κιότο που η ισχύς του έληγε το 2012. Οι συζητήσεις μέχρι να φτάσουμε στο COP15 κατέδειξαν την έλλειψη κοινού πνεύματος ανάμεσα στα εμπλεκόμενα κράτη για το πώς θα αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και οι προσδοκίες που υπήρχαν, για τη θέσπιση μιας συνθήκης που θα δέσμευε νομικά τα κράτη πάνω στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, μειώθηκαν σημαντικά (Climatico, 2010). Εν τέλει, υπήρξε μια συμφωνία που περιείχε ιδιαίτερα σημαντικά στοιχεία όμως δεν ήταν νομικά δεσμευτική. Τα στοιχεία κλειδιά αυτής της συμφωνίας ήταν να κρατηθεί μία μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας κάτω των 2 °C, η υποχρέωση των αναπτυσσόμενων κρατών για θέσπιση στόχων μείωσης των εκπομπών, η θέσπιση μέτρων για μετριασμό των εκπομπών για τα αναπτυσσόμενα κράτη και τέλος η θέσπιση οικονομικών κεφαλαίων για την εκκίνηση δράσεων στις αναπτυσσόμενες χώρες, στη μάχη της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής.

2.1 Συμφωνία των Παρισίων (Paris Agreement)

Στο συνέδριο για την κλιματική αλλαγή που πραγματοποιήθηκε στο Παρίσι το Δεκέμβριο του 2015 (COP21), 195 κράτη υιοθέτησαν για πρώτη φορά μια παγκόσμια, νομικά δεσμευτική συμφωνία για το φαινόμενο της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Αυτή η συμφωνία ανάμεσα σε σχεδόν 200 κράτη, θεωρήθηκε από πολλούς παρατηρητές ως κατόρθωμα διότι υπήρξε συναίνεση στο να μειωθούν οι εκπομπές θερμοκηπίου. Τα σημεία κλειδιά της συμφωνίας των Παρισίων είναι τα ακόλουθα:

Χρηματοδότηση: Η συμφωνία υποχρεώνει τα "αναπτυγμένα" κράτη να βοηθήνε οικονομικά τα "αναπτυσσόμενα" κράτη στην προσπάθειά τους να αναπτυχθούν με "πράσινο" τρόπο. Προς το παρόν, τα αναπτυγμένα κράτη είναι υποχρεωμένα να διαθέτουν 100 δισεκατομμύρια δολάρια/έτος στα αναπτυσσόμενα κράτη έως το 2020 για να βοηθήσουν σε αυτή τη μετάβαση, Επιπλέον η συμφωνία επεκτείνει αυτή την οικονομική βοήθεια έως το 2025 και έπειτα αναφέρεται ότι η οικονομική βοήθεια των αναπτυγμένων κρατών προς τα αναπτυσσόμενα θα ξεπερνά τα 100 δισεκατομμύρια δολάρια/έτος.

Υπερθέρμανση του πλανήτη: Η συμφωνία έχει ως στόχο να περιορίσει την αύξηση που παρατηρείται στη μέση παγκόσμια θερμοκρασία, κάτω από τους 2 °C. Αύξηση μεγαλύτερη των 2 °C είναι ικανή να προκαλέσει ακραία φαινόμενα, σύμφωνα με τους επιστήμονες. Η συμφωνία επίσης έχει ως στόχο μακροπρόθεσμα, να γίνουν προσπάθειες για να μειωθεί η αύξηση της θερμοκρασίας στους 1.5 °C, στα επίπεδα της προ-βιομηχανικής εποχής. Εάν επιτευχθεί αυτός ο στόχος, θα μειωθούν σημαντικά οι κίνδυνοι και οι επιπτώσεις που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή.

Εκπομπές αερίων: Πριν και κατά τη διάρκεια της συνόδου κορυφής στο Παρίσι, τα κράτη έδωσαν οικειοθελώς υποσχέσεις σχετικά με το πώς σκοπεύουν να περιορίσουν τις εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου μετά το 2020. Η συμφωνία δεσμεύει τα κράτη να "επιδιώξουν να λάβουν μέτρα στο εσωτερικό τους για να επιτύχουν το στόχο του μετριασμού των εκπομπών"

Μελλοντικές εκπομπές αερίων: Ένα σημείο κλειδί της συμφωνίας αυτής, είναι ο ειδικός μηχανισμός που σχεδιάστηκε έτσι ώστε να ωθεί τα κράτη να μειώνουν περαιτέρω τις εκπομπές αερίων στο μέλλον. Σύμφωνα με την

απόφαση που λήφθηκε, η οποία όμως δεν είναι δεσμευτική, ζητά από τα κράτη να επανεξετάσουν τις υποσχέσεις τις οποίες έχουν δώσει πριν το 2020 και έπειτα να δίνουν νέες υποσχέσεις κάθε πέντε χρόνια. Η υπόσχεση που θα δίνει κάθε κράτος θα πρέπει να "συνιστά μια βελτίωση της προηγούμενης υπόσχεσής του" και θα πρέπει να "αντανακλά τις υψηλότερες φιλοδοξίες του".

Παρακολούθηση της προόδου: Το 2023 προγραμματίζεται να γίνει μια συνάντηση, στην οποία θα αξιολογηθεί η πρόοδος, η οποία έχει γίνει και θα ενθαρρύνονται τα κράτη να δώσουν πιο σημαντικές υποσχέσεις. Αυτή η αξιολόγηση θα συμβαίνει ανά πέντε χρόνια. Η συμφωνία ορίζει σχέδια για ένα πλαίσιο διαφάνειας, στο οποίο θα διαφαίνεται εάν τα κράτη υλοποιούν τις υποσχέσεις τις οποίες έχουν δώσει. Τα κράτη τα οποία δεν τηρούν τις υποσχέσεις τους, θα είναι υπόλογα στα άλλα κράτη. Τα κράτη θα πρέπει να ενημερώνουν για τις εκπομπές αερίων έτσι ώστε να παρακολουθείται η πρόοδος που κάνουν στο να επιτύχουν τον εθνικό τους στόχο. Επιπλέον τα αναπτυσσόμενα κράτη θα πρέπει να παρέχουν πληροφόρηση σχετικά με τη χρηματοδότηση την οποία παρέχουν στα αναπτυσσόμενα κράτη.



Εικόνα 2.5 : Οι εκπρόσωποι των κρατών που συμμετείχαν στη συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή (<https://www.flickr.com/photos/presidenciamx/23430273715>).

3 Δέσμευση του CO₂

Η κύρια εφαρμογή δέσμευσης του CO₂ βρίσκεται σε μεγάλες μονάδες παραγωγής του, όπως τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη ορυκτά καύσιμα, τα διυλιστήρια, εργοστάσια βιομηχανικής χρήσης και γενικότερα εργοστάσια που ειδικεύονται στην παραγωγή σιδήρου, τσιμέντου και χημικών. Αντίθετα η δέσμευση του CO₂ από μικρές και κινητές πηγές στο χώρο των μεταφορών και των κατοικημένων περιοχών, είναι πιο δύσκολη και μη οικονομικά συμφέρουσα σε σχέση με τη δέσμευση σε μεγάλες μονάδες παραγωγής του. Ένας εναλλακτικός τρόπος για τη μείωση αυτών των εκπομπών θα ήταν η χρήση διαφορετικών μορφών ενέργειας όπως είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το υδρογόνο και ο ηλεκτρισμός. Τα δύο τελευταία είδη ενέργειας θα παράγονταν μεν από μεγάλα εργοστάσια παραγωγής που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα σαν καύσιμο αλλά το εργοστάσιο θα χρησιμοποιεί την τεχνολογία δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα.

3.1 Τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂

3.1.1 Διαχωρισμός με χρήση ροφητικών ουσιών / διαλυτών

Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται με την τροφοδοσία και άμεση επαφή του αερίου, που περιλαμβάνει το διοξείδιο του άνθρακα, με μια υγρή ή στερεά ροφητική ουσία η οποία είναι ικανή να δεσμεύσει το CO₂. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1a), η ροφητική ουσία με το δεσμευμένο CO₂, μεταφέρεται σε ένα διαφορετικό δοχείο, όπου γίνεται η απελευθέρωση του CO₂ (regeneration), αφού υποστεί θέρμανση και πτώση της πίεσης ή υπάρξει κάποια αλλαγή στις συνθήκες γύρω από τη ροφητική ουσία. Η ροφητική ουσία που δημιουργείται μετά από αυτό το βήμα (regeneration step), στέλνεται πίσω στην αρχή της διεργασίας για να δεσμεύσει περισσότερο CO₂, κάτι που σημαίνει ότι η διεργασία είναι κυκλική. Σε κάποιες παραλλαγές της παραπάνω διεργασίας, η ροφητική ουσία βρίσκεται σε στερεή μορφή και δεν κυκλοφορεί μεταξύ δοχείων διότι η ρόφηση και η αναγέννηση επιτυγχάνονται με κυκλικές αλλαγές (στην πίεση ή θερμοκρασία) στο δοχείο όπου βρίσκεται και η ροφητική ουσία. Πάντα όμως είναι απαραίτητη μια ροή make-up από ροφητική ουσία έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η φυσική

φθορά της διεργασίας και οι απώλειες της ροφητικής ουσίας. Σε κάποιες περιπτώσεις, η ροφητική ουσία μπορεί να είναι στερεό οξείδιο το οποίο έρχεται σε αντίδραση με ορυκτό καύσιμο ή βιομάζα μέσα στο δοχείο, παράγοντας κυρίως CO_2 και θερμότητα. Έπειτα η χρησιμοποιούμενη ροφητική ουσία μεταφέρεται σε ένα δεύτερο δοχείο όπου επανοξειδώνεται στον αέρα για να ξαναχρησιμοποιηθεί έχοντας υποστεί βέβαια κάποιες απώλειες.

Κάποιες αναδυόμενες διεργασίες, οι οποίες βασίζονται σε νέες υγρές ροφητικές ουσίες ή νέες στερεές αναγεννημένες ροφητικές ουσίες, αναπτύσσονται έχοντας ως στόχο να ξεπεράσουν τους περιορισμούς των ήδη υπαρχόντων συστημάτων. Ένα σύνηθες πρόβλημα αυτών των συστημάτων δέσμευσης του CO_2 , είναι ότι η ροή της ροφητικής ουσίας ανάμεσα στα δοχεία είναι μεγάλη επειδή πρέπει να αντισταθμίσει την τεράστια ροή του CO_2 που επεξεργάζεται το εργοστάσιο. Έτσι, το μέγεθος του απαραίτητου εξοπλισμού και η απαιτούμενη ενέργεια για την αναγέννηση ροφητικής ουσίας είναι μεγάλες, κάτι το οποίο μεταφράζεται σε ένα σημαντικό πρόστιμο λόγω μειωμένης αποδοτικότητας και άρα επιπλέον κόστος. Επίσης σε κάποια συστήματα που χρησιμοποιούνται ακριβές ροφητικές ουσίες, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να διογκωθεί το κόστος λόγω της αγοράς της ροφητικής ουσίας και των καταλοίπων της. Είναι προφανές βέβαια ότι όταν το CO_2 που πρέπει να δεσμευτεί βρίσκεται σε μεγάλη ποσότητα και απαιτούνται πολλοί επαναληπτικοί κύκλοι για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση μιας καλής ροφητικής ουσίας.

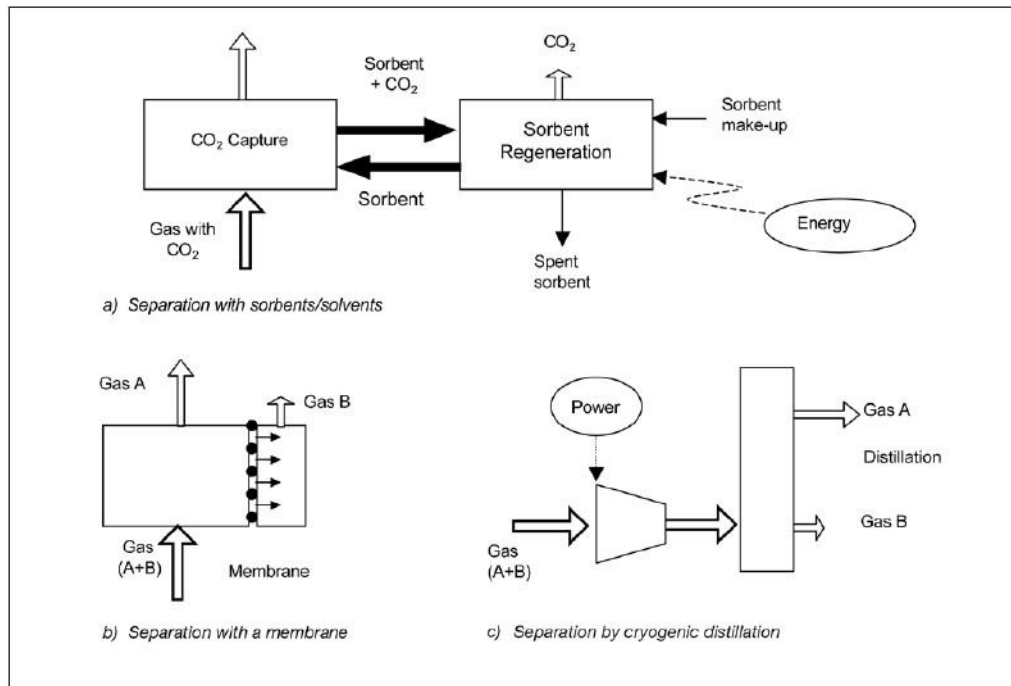
3.1.2 Διαχωρισμός με χρήση μεμβρανών

Οι μεμβράνες (εικόνα 3.1b)) είναι ειδικά κατασκευασμένα υλικά, τα οποία επιτρέπουν την επιλεκτική διείσδυση αερίου από αυτά. Η επιλεκτικότητα που δείχνει η μεμβράνη σε διαφορετικά αέρια είναι στενά συνδεδεμένη με τη φύση του υλικού κατασκευής της, αλλά η ροή του αερίου διαμέσου της μεμβράνης εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης που επικρατεί μέσα στη μεμβράνη. Έτσι είναι λογικό να προτιμώνται ροές αερίων υψηλής πίεσης, για διαχωρισμό με τη χρήση μεμβρανών. Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί τύποι μεμβρανών, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα δέσμευσης του CO_2 . Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων μεμβρανών είναι οι μεμβράνες που

έχουν κατασκευαστεί από πολυμερή, μεταλλικά και κεραμικά υλικά. Παρόλο που ο διαχωρισμός με τη χρήση μεμβρανών βρίσκει πολλές εμπορικές εφαρμογές στη βιομηχανία, ωστόσο δεν έχει ελεγχθεί η αξιοπιστία τους και η οικονομική βιωσιμότητά τους σε συνθήκες απαιτητικές όπως είναι αυτές των συστημάτων δέσμευσης CO₂.

3.1.3 Απόσταξη ροής υγροποιημένου αερίου και διαχωρισμός υπό ψύξη

Ένα αέριο μπορεί να μετατραπεί σε υγρό με τη χρήση μεθόδων όπως είναι η συμπίεση, ψύξη και εκτόνωση. Αφού βρεθεί υπό υγρή μορφή, τα συστατικά του αερίου μπορούν να διαχωριστούν με τη χρήση της στήλης απόσταξης. Η διεργασία με τη χρήση αέρα πραγματοποιείται εμπορικά σήμερα. Το οξυγόνο μπορεί να διαχωριστεί από τον αέρα όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1c) και έπειτα να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα δέσμευσης του CO₂ (oxy-fuel combustion και pre-combustion capture). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το σημείο κλειδί για αυτά τα συστήματα είναι η μεγάλη παροχή οξυγόνου που απαιτείται. Ο διαχωρισμός υπό ψύξη είναι μια επιπρόσθετη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό του CO₂ από άλλα αέρια. Αυτή η μέθοδος είναι δυνατόν να διαχωρίσει προσμίξεις από ροές που περιέχουν υψηλά ποσοστά CO₂, να χρησιμοποιηθεί στην oxy-fuel combustion καθώς και στην αφαίρεση CO₂ από φυσικό αέριο.

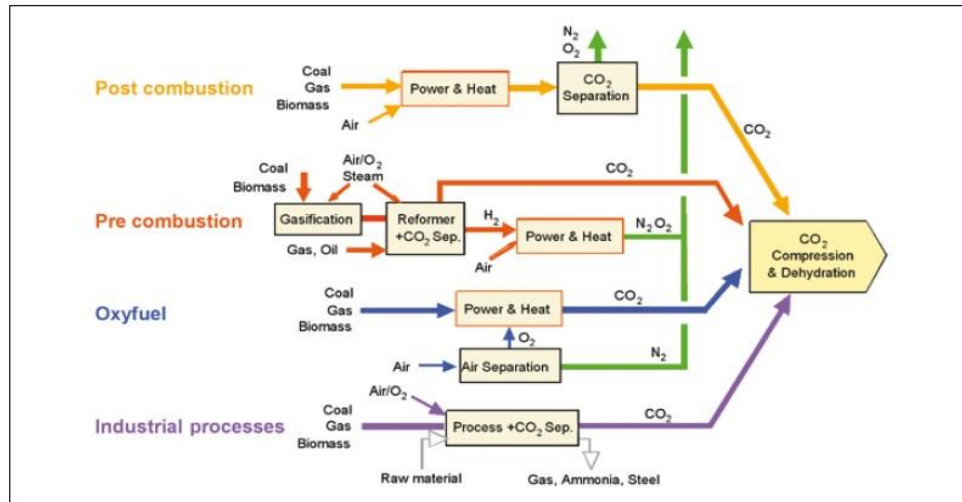


Εικόνα 3.1 : Γενικά σχέδια των κύριων διεργασιών διαχωρισμού που σχετίζονται με τη δέσμευση του CO₂. Τα αέρια τα οποία μπορούν να αφαιρεθούν κατά τη φάση του διαχωρισμού εκτός του CO₂ είναι τα H₂, O₂. Στο σχέδιο b) και c) μία από τις διαχωριζόμενες ροές αερίων (A και B) είναι η συμπυκνωμένη ροή του CO₂, H₂ ή του O₂ και η άλλη είναι μια ροή αερίου που περιέχει όλα τα εναπομείναντα αέρια, τα οποία βρίσκονταν στο αρχικό αέριο (A και B).

3.2 Συστήματα δέσμευσης του CO₂

Υπάρχουν τέσσερα κύρια συστήματα δέσμευσης του CO₂ από εργοστάσια που χρησιμοποιούν ως καύσιμο ορυκτά καύσιμα και βιομάζα:

1. **Capture from industrial process streams** (Δέσμευση από ροές βιομηχανικών διεργασιών)
2. **Post - combustion capture** (Δέσμευση μετά την καύση)
3. **Oxy - fuel combustion** (Δέσμευση Oxy - fuel)
4. **Pre - combustion capture** (Δέσμευση πριν την καύση)



Εικόνα 3.2 : Τα συστήματα δέσμευσης του CO₂ (υιοθετημένα από τη BP).

3.2.1 Capture from industrial process streams

Το διοξείδιο του άνθρακα δεσμεύεται από ροές βιομηχανικών διεργασιών εδώ και 80 χρόνια (Kohl and Nielsen, 1997). Εντούτοις το μεγαλύτερο μέρος του δεσμευόμενου διοξειδίου του άνθρακα εξαερίζονταν στην ατμόσφαιρα διότι δεν υπήρχε καμία πρωτοβουλία ή υποχρέωση να το αποθηκεύσουν κάπου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δέσμευσης του CO₂ από ροές βιομηχανικών διεργασιών, είναι ο καθαρισμός του φυσικού αερίου και η παραγωγή ενός σύνθετου αερίου (synthesis gas) που περιέχει υδρογόνο για την παρασκευή αμμωνίας, αλκοολών και συνθετικών υγρών καυσίμων. Επιπλέον ροές βιομηχανικών διεργασιών που παράγουν CO₂ και δεν πραγματοποιείται δέσμευσή του, είναι η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου και χάλυβα καθώς και οι διεργασίες ζύμωσης για την παραγωγή τροφών και ποτών. Αυτό το διοξείδιο του άνθρακα θα μπορούσε να δεσμευτεί με τη χρήση τεχνικών δέσμευσης που χρησιμοποιούνται στην post - combustion capture, στην oxy - fuel combustion capture και στην pre - combustion capture.

3.2.2 Industrial process capture systems

3.2.2.1 *Natural gas sweetening*

Το φυσικό αέριο, ανάλογα με την προέλευσή του, περιέχει διαφορετικές συγκεντρώσεις CO₂, οι οποίες και πρέπει να αφαιρεθούν. Οι προδιαγραφές των περισσοτέρων σωληνώσεων απαιτούν το ποσοστό ενός αερίου σε CO₂ να μην υπερβαίνει το 2%, έτσι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα διάβρωσης των σωληνώσεων και χρήση περίσσειας ενέργειας για μεταφορά. Επίσης αυτό το χαμηλό ποσοστό σε CO₂ συνδράμει στην υψηλότερη θερμογόνο δύναμη του αερίου.

Είναι γενικά αποδεκτό, ότι η μισή από τη συνολική παγκόσμια παραγωγή ακατέργαστου φυσικού αερίου, περιέχει τουλάχιστον 4% CO₂. Εάν λοιπόν η συνολική παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου το 2003, είναι περίπου 2618.5 δισεκατομμύρια m³ και χρησιμοποιώντας την παραπάνω παραδοχή, για να μειώσουμε το ποσοστό του CO₂ από 4% σε 2% mol, θα χρειαζόταν να αφαιρεθούν τουλάχιστον 50 Mt CO₂ εκείνο το έτος. Είναι χαρακτηριστικό ότι δύο εγκαταστάσεις φυσικού αερίου που χρησιμοποιούνται για διεργασίες δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂, η εγκατάσταση της BP στο Salah της Αλγερίας και η εγκατάσταση της Statoil στο Sleipner στη Βόρεια θάλασσα, δεσμεύουν η καθεμία περίπου 1 Mt CO₂ ανά έτος. Επιπλέον περίπου 6.5 εκατομμύρια t CO₂ το χρόνο, που προέρχονται από τη διεργασία του natural gas sweetening, χρησιμοποιούνται για enhanced oil recovery (EOR) στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (Beecy και Kuuskraa, 2005). Σε αυτές τις διεργασίες ένα μεγάλο μέρος του εισπιεζόμενου CO₂ εντέλει παραμένει στο υπέδαφος.

Ανάλογα με τον όγκο του περιεχόμενου CO₂ στο φυσικό αέριο, το natural gas sweetening (απομάκρυνση H₂S και CO₂) χρησιμοποιεί τις εξής διεργασίες για την πραγματοποίηση του διαχωρισμού:

- ✓ Χρήση χημικών διαλυτών
- ✓ Χρήση φυσικών διαλυτών
- ✓ Χρήση μεμβρανών

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι το natural gas sweetening με τη χρήση διάφορων αλκανο – αμινών. Όταν όμως η συγκέντρωση του CO₂ στο

φυσικό αέριο, είναι υψηλή τότε η χρήση συστημάτων με μεμβράνες είναι πιο οικονομική. Η βιομηχανική εφαρμογή μεμβρανών για δέσμευση του CO₂ από το φυσικό αέριο, ξεκίνησε στις αρχές του 1980 σε μικρές μονάδες και με πολλές αβεβαιότητες (Noble and Stern). Πλέον αυτή η τεχνολογία θεωρείται πολύ δοκιμασμένη και ανταγωνιστική παρέχοντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες (Tabatabaie-Mohammadi, 1999). Τα πλεονεκτήματα αυτά περιλαμβάνουν χαμηλότερο κόστος, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, δυνατότητα εφαρμογής σε απομακρυσμένες περιοχές όπως είναι οι θαλάσσιες περιοχές και ευελιξία.

3.2.2.2 Παραγωγή χάλυβα

Η βιομηχανία παραγωγής σιδήρου και χάλυβα, είναι ο κλάδος εκείνος που απαιτεί τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο. Ο κλάδος αυτός είναι υπεύθυνος για την κατανάλωση του 10-15% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στο χώρο της βιομηχανίας παγκοσμίως (IEA GHG, 2000a). Επίσης η παραγωγή αυτών των προϊόντων συνοδεύεται και με εκπομπές CO₂, που σύμφωνα με μελέτες προσέγγιζαν τους 1442 Mt CO₂ το έτος 1995. Δύο τεχνολογίες παραγωγής σιδήρου και χάλυβα, χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως στη βιομηχανία. Ένα ολοκληρωμένο εργοστάσιο παραγωγής χάλυβα έχει δυναμικότητα περίπου 3-5 Mt χάλυβα ανά έτος και χρησιμοποιεί ως βασικό καύσιμο τον γαιάνθρακα και σε κάποιες περιπτώσεις φυσικό αέριο και πετρέλαιο. Ο μικρός-μύλος χρησιμοποιεί ηλεκτρικούς κλιβάνους με βολταϊκά τόξα για να λιώσει θραύσματα και παράγει περίπου 1 Mt χάλυβα/έτος και καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια της τάξεως των 300-350 kWh/t παραγόμενου χάλυβα. Τα τελευταία χρόνια συνηθίζεται οι μικρο-μύλοι να αναμιγνύουν σπογγώδη σίδηρο (direct reduced iron-DRI) με θραύσματα, έτσι ώστε να αυξηθεί η ποιότητα του παραγόμενου σιδήρου. Για να παραχθεί ο σπογγώδης σίδηρος, απαραίτητη είναι η αντίδραση ενός πλούσιου σε οξυγόνο σιδηρομεταλλεύματος με H₂ και CO. Μέσω αυτής της αντίδρασης παράγεται ανηγμένος σίδηρος (reduced iron), H₂O και CO₂. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι πολλές από αυτές τις διεργασίες παραγωγής σπογγώδους σιδήρου θα μπορούσαν να δεσμεύσουν ρεύματα καθαρού CO₂.

Τα τελευταία χρόνια στη βιομηχανία αυτή υπάρχει η τάση να δοκιμάζονται νέες διεργασίες παραγωγής σιδήρου, οι οποίες χρησιμοποιούν χαμηλότερης ποιότητας γαιάνθρακα σε σχέση με τον κωκοποιημένο γαιάνθρακα που καίγεται στην υψικάμινο. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η διεργασία COREX (von Bogdandy et. Al. 1989), η οποία παράγει μια μεγάλη πλεονάζουσα ποσότητα καύσιμου αερίου δίχως την παρουσία N_2 . Αυτή η ποσότητα καύσιμου αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια δευτερογενή διεργασία για τη μετατροπή σιδηρομεταλλεύματος σε σίδηρο. Σε αυτή τη διεργασία μπορεί να εφαρμοστεί ένα σύστημα πλήρους δέσμευσης του παραγόμενου CO_2 , αφού το CO_2 και το H_2O του αερίου πρέπει να αφαιρεθούν για να επιτρέψουν στο CO και το H_2 να θερμανθούν. Αυτή η διεργασία θα δώσει ως προϊόντα ένα συνδυασμό λιωμένου σιδήρου και σιδήρου με υψηλή ανάκτηση CO_2 .

Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν οι εξής δυνατότητες για δέσμευση των εκπομπών CO_2 από την παραγωγή σιδήρου και χάλυβα:

- ✓ Ανάκτηση CO_2 από τα αέρια υψικάμινου και ανακυκλοφορία των πλούσιων σε CO αερίων στην υψικάμινο. Μια ελάχιστη ποσότητα κωκ είναι απαραίτητη. ακόμα και η υψικάμιнос τροφοδοτείται με ένα μίγμα καθαρού O_2 και ανακυκλοφορούμενου αερίου. Έτσι η υψικάμιнос στην πραγματικότητα χρησιμοποιεί ως καύσιμο οξυγόνο αντί για αέρα και δεσμεύει CO_2 . Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να δεσμευτεί περίπου το 70% του εκπεμπόμενου CO_2 από ένα ολοκληρωμένο εργοστάσιο παραγωγής CO_2 .
- ✓ Απευθείας μείωση του σιδηρομεταλλεύματος, με χρήση υδρογόνου που προέρχεται από ορυκτό καύσιμο του συστήματος pre-combustion capture (Duarte and Reich, 1998). Το καύσιμο, αντί να καίγεται στην υψικάμινο και να εκπέμπει CO_2 στο περιβάλλον, μετατρέπεται σε υδρογόνο και το παραγόμενο CO_2 δεσμεύεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Έπειτα το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως αναγωγικό μέσο για το σιδηρομετάλλευμα. Ανάλογα με την τεχνολογία του συστήματος pre-combustion capture που χρησιμοποιείται, το εκπεμπόμενο CO_2 μπορεί να μειωθεί κατά 90-95%.

3.2.2.3 Παραγωγή τσιμέντου

Η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου είναι υπεύθυνη για το 6% των εκπεμπόμενων ρύπων CO_2 που προέρχονται από στάσιμες πηγές. Για να παραχθεί τσιμέντο απαιτούνται μεγάλες ποσότητες καυσίμου, έτσι ώστε να διαπυρωθεί ο ασβεστόλιθος, δηλαδή να μετατραπεί το ανθρακικό ασβέστιο σε οξείδιο του ασβεστίου με ταυτόχρονη απελευθέρωση CO_2 .

Προς το παρόν, στα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου δεν χρησιμοποιείται κάποια τεχνολογία δέσμευσης του εκπεμπόμενου CO_2 . Εντούτοις υπάρχουν δυνατότητες για εγκατάσταση συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα. Τα απαέρια από αυτή τη βιομηχανία περιέχουν περίπου 15-30% CO_2 κατά όγκο, ποσοστό που είναι μεγαλύτερο από αυτό που περιέχουν απαέρια προερχόμενα από τις βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας και θερμότητας (3-15% κατά όγκο). Θεωρητικά η τεχνολογία δέσμευσης CO_2 post-combustion capture μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτού του είδους τα εργοστάσια, αλλά θα ήταν απαραίτητη η επιπλέον παραγωγή ατμού έτσι ώστε να αναγεννάται ο διαλύτης που δεσμεύει το CO_2 . Το σύστημα oxy-fuel combustion capture μπορεί να αποτελέσει μια ελπιδοφόρα τεχνική για τη δέσμευση του CO_2 στο μέλλον (IEA GHG, 1999). Τέλος μια επίσης καινοτόμος επιλογή για τη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα, θα ήταν η χρήση ασβεστιτικών ροφητικών ουσιών, αφού το ανθρακικό ασβέστιο χρησιμοποιείται κατά κόρον στα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου.

3.2.2.4 Παραγωγή αμμωνίας

Το CO_2 αποτελεί παραπροϊόν της παραγωγής αμμωνίας (NH_3). Υπάρχουν δύο κύριες διεργασίες μέσω των οποίων παράγεται αμμωνία. Η πρώτη έχει να κάνει με την αναμόρφωση με χρήση ατμού, ελαφριών υδρογονανθράκων (φυσικό αέριο, υγραέριο, νάφθα) και η δεύτερη με τη μερική οξείδωση ή αεριοποίηση βαρέων υδρογονανθράκων (άνθρακας, μαζούτ). Περίπου το 85% της παραγόμενης αμμωνίας προέρχεται από διεργασίες αναμόρφωσης μεθανίου. Τα κύρια βήματα αυτής της διεργασίας είναι τα εξής:

- ✓ Καθαρισμός της τροφοδοσίας
- ✓ Κύρια αναμόρφωση μεθανίου με τη χρήση ατμού
- ✓ Δευτερογενής αναμόρφωση, με την προσθήκη αέρα (αυτόματη θερμική αναμόρφωση)
- ✓ Shift conversion του CO και του H₂O σε CO₂ και H₂
- ✓ Αφαίρεση του CO₂
- ✓ Μετατροπή σε μεθάνιο (μια διεργασία που αφαιρεί τα ίχνη CO και CO₂)
- ✓ Σύνθεση της αμμωνίας

Ένα μοντέρνο εργοστάσιο παραγωγής αμμωνίας, χρησιμοποιεί τη διεργασία με χρήση διαλύτη (αμίνες) για να επεξεργαστεί 200000 Nm³/h αερίου προερχόμενου από τον αναμορφωτή. Επίσης παράγει περίπου 72 t/h συμπυκνωμένου CO₂ (Apple, 1997). Η αναλογία παραγωγής CO₂/NH₃ σε ένα σύγχρονο εργοστάσιο είναι περίπου 1.27 tCO₂/tNH₃. Ως εκ τούτου, με παγκόσμια παραγωγή αμμωνίας περίπου 100 Mtonnes/έτος παράγονται και περίπου 127 Mtonnes CO₂/έτος. Εντούτοις, πρέπει να τονιστεί ότι μόνο ένα μέρος από το παραγόμενο CO₂ είναι διαθέσιμο για αποθήκευση, καθώς συχνά τα εργοστάσια παραγωγής αμμωνίας συνδυάζονται με εργοστάσια παραγωγής ουρίας, τα οποία είναι δυνατόν να χρησιμοποιούν από 70-90% του παραγόμενου CO₂. Επίσης περίπου 0.7 Mt CO₂ που δεσμεύονται από εργοστάσια παραγωγής αμμωνίας, χρησιμοποιούνται για enhanced oil recovery στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Beecy and Kuuskraa, 2005) με ένα μεγάλο μέρος του εισπιεζόμενου CO₂ να παραμένει στο υπέδαφος.

3.3 Post - combustion capture

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές CO₂ από στάσιμες πηγές προέρχονται κυρίως από συστήματα καύσης όπως εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, κλιβάνους παρασκευής τσιμέντου και υψικάμινους σε βιομηχανίες παραγωγής χάλυβα. Σε αυτές τις βιομηχανίες μεγάλης κλίμακας, η απευθείας καύση κάποιου καυσίμου με τη βοήθεια αέρα σε ένα θάλαμο καύσης, αποτελεί εδώ και αιώνες την πιο οικονομική μέθοδο εξαγωγής της ενέργειας που περιέχεται στο καύσιμο. Ως εκ

τούτου, γίνεται εύκολα αντιληπτή η σημασία που έχουν τα συστήματα post combustion capture, στο στόχο της μείωσης των εκπομπών CO₂.

Η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα που προέρχεται από τα απαέρια που δημιουργεί η καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας, ονομάζεται post - combustion capture. Έτσι αντί τα απαέρια να απελευθερωθούν κατευθείαν στην ατμόσφαιρα, τροφοδοτούνται σε ειδικό εξοπλισμό, ο οποίος απομονώνει το μεγαλύτερο μέρος του CO₂. Έπειτα το CO₂ μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί σε έναν υπόγειο ταμιευτήρα, μη επιβαρύνοντας το περιβάλλον, ενώ τα υπολειπόμενα απαέρια απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Μια διεργασία χημικής ρόφησης, υπό κανονικές συνθήκες, είναι δυνατόν να απομονώσει το CO₂ από τα απαέρια. Υπάρχουν και κάποιες άλλες τεχνικές, οι οποίες υπό προϋποθέσεις θα μπορούσαν να απομονώσουν το CO₂, αλλά μέχρι σήμερα δεν έχουν φτάσει στο κατάλληλο επίπεδο ανάπτυξης για να χρησιμοποιηθούν ευρέως.

3.3.1 Διαθέσιμες τεχνολογίες

Υπάρχουν μερικές εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά συνθήκη για τη δέσμευση CO₂ από τα απαέρια. Ωστόσο, πολλές μελέτες που διενεργήθηκαν και συγκρίνουν αυτές τις μεθόδους έδειξαν ότι οι διεργασίες απορρόφησης με χρήση χημικών διαλυτών είναι η καλύτερη επιλογή για την pre-combustion capture του CO₂. Αυτό οφείλεται στο ότι προσφέρουν την υψηλότερη αποδοτικότητα δέσμευσης CO₂ σε σχέση με τις άλλες διαθέσιμες διεργασίες.

3.3.1.1 Τεχνολογίες απορρόφησης

Οι διεργασίες απορρόφησης στο pre-combustion capture κάνουν χρήση της αντιστρεπτής χημικής αντίδρασης ενός υγρού αλκαλικού διαλύτη (συνήθως αμίνης) με ένα όξινο αέριο. Το διάγραμμα ροής ενός εμπορικά χρησιμοποιούμενου συστήματος απορρόφησης φαίνεται στο εικόνα 3.3. Αφού τα απαέρια ψυχθούν, έρχονται σε επαφή με τον διαλύτη στον απορροφητή. Ένας φυσητήρας είναι απαραίτητος έτσι ώστε να αντισταθμιστεί η πτώση

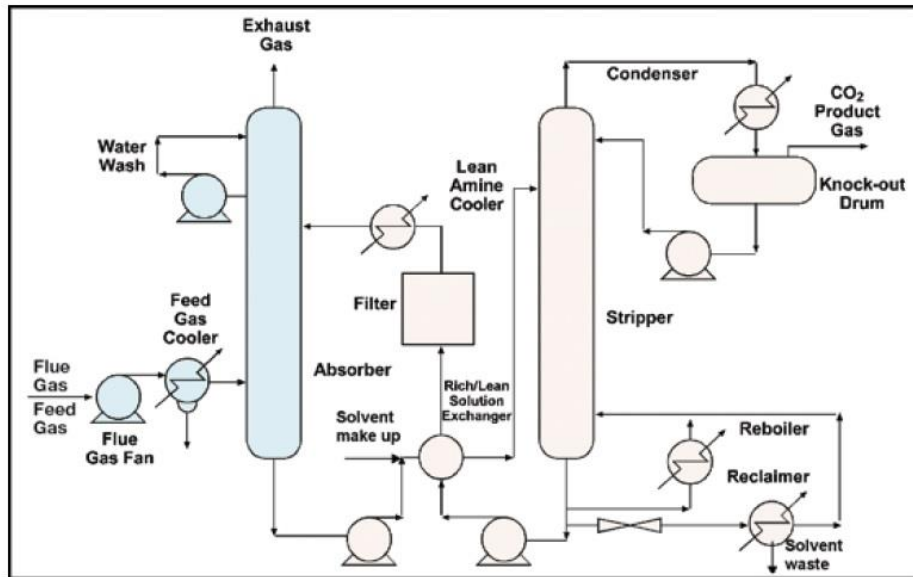
πίεσης που οφείλεται στον απορροφητή. Στις θερμοκρασίες του απορροφητή, που κυμαίνονται ανάμεσα στους 40 και 60 °C το CO₂ είναι συνδεδεμένο με το χημικό διαλύτη μέσα στον απορροφητή. Έπειτα τα απαέρια εισέρχονται ένα στάδιο πλύσης με νερό για να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα διαλύτη και στη συνέχεια εξέρχονται του απορροφητή. Είναι δυνατόν να μειωθεί η συγκέντρωση του CO₂ σε πολύ χαμηλές τιμές στην έξοδο του αερίου, ως αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης στο διαλύτη, όμως χαμηλές τιμές CO₂ στην έξοδο τείνουν να αυξάνουν το ύψος του δοχείου απορρόφησης. Ο διαλύτης, που τώρα περιέχει το χημικά συνδεδεμένο CO₂ εισπιέζεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας στην κορυφή του stripper. Η αναγέννηση του χημικού διαλύτη πραγματοποιείται μέσα στο stripper σε συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας (100-140 °C) και πίεσης ελαφρώς υψηλότερης της ατμοσφαιρικής. Θερμότητα συνεχίζει να μεταφέρεται στον αναβραστήρα έτσι ώστε να διατηρηθούν οι συνθήκες αναγέννησης. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να αναπτυχθεί η κατάλληλη θερμότητα εκρόφησης για την αφαίρεση του χημικά συνδεδεμένου CO₂ και την παραγωγή ατμού που δρα ως αέριο απογύμνωσης. Ο ατμός ανακτάται στο συμπυκνωτή και τροφοδοτείται ξανά στο stripper, ενώ το παραγόμενο αέριο CO₂ εξέρχεται του stripper. Ο διαλύτης, ο οποίος πλέον περιέχει πολύ λιγότερο CO₂, τροφοδοτείται πίσω στον απορροφητή μέσω του εναλλάκτη θερμότητας και ένας ψύκτης του ρίχνει τη θερμοκρασία στα επίπεδα του απορροφητή. Επίσης στην εικόνα 3.3 απεικονίζεται κάποιος περαιτέρω εξοπλισμός που κρίνεται απαραίτητος για τη διατήρηση της ποιότητας του διαλύτη. Αυτός ο εξοπλισμός γενικά περιλαμβάνει φίλτρα, κλίνες άνθρακα, θερμικά χειριζόμενο reclaimer.

Γενικά οι παράμετροι κλειδιά που καθορίζουν την τεχνική και οικονομική λειτουργία ενός συστήματος απορρόφησης CO₂ είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Ταχύτητα ροής των απαερίων: Η ταχύτητα ροής των απαερίων καθορίζει το μέγεθος του απορροφητή και η αγορά του απορροφητή συνεισφέρει σημαντικά στο συνολικό κόστος
- ✓ Το περιεχόμενο CO₂ στα απαέρια: Εφόσον τα απαέρια βρίσκονται συνήθως σε ατμοσφαιρική πίεση, η μερική πίεση του CO₂ θα είναι της τάξης των 3-15 kPa. Σε αυτές τις χαμηλές συνθήκες πίεσης, οι υγρές

αμίνες αποτελούν τους πιο κατάλληλους διαλύτες απορρόφησης (Kohl and Nielsen, 1997).

- ✓ Αφαίρεση CO₂: Πρακτικά η ανάκτηση του CO₂ κυμαίνεται στα επίπεδα του 80% με 95%. Υψηλότερη ανάκτηση CO₂ σημαίνει και μεγαλύτερο οικονομικό κόστος.
- ✓ Ταχύτητα ροής του διαλύτη: Η ταχύτητα ροής του διαλύτη καθορίζει και το μέγεθος του μεγαλύτερου μέρους του εξοπλισμού που απαιτείται για τη διεργασία με εξαίρεση τον απορροφητή.
- ✓ Απαίτηση σε ενέργεια: Η κατανάλωση ενέργειας της διεργασίας είναι το άθροισμα της θερμικής ενέργειας, που είναι αναγκαία για την αναγέννηση των διαλυτών, και της ηλεκτρικής ενέργειας που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των αντλιών υγρού και του φυσητήρα απαερίων. Επιπλέον ενέργεια χρειάζεται για τη συμπύκνωση του ανακτώμενου CO₂ στην πίεση που απαιτείται, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφερθεί και αποθηκευτεί.
- ✓ Απαίτηση σε ψύξη: Η ψύξη κρίνεται αναγκαία έτσι ώστε να πέσει η θερμοκρασία τόσο των απαερίων όσο και των διαλυτών στα επιθυμητά επίπεδα για αποδοτική απορρόφηση του CO₂. Επιπλέον, το προϊόν που εξέρχεται του stripper ψύχεται και αυτό με τη σειρά του για να ανακτηθεί ατμός.
- ✓ Καθαρότητα του ανακτώμενου CO₂: 99.9% κατά όγκο (συνθήκες κορεσμού σε νερό)
Πίεση του CO₂: 50 kPa (μανόμετρο)



Εικόνα 3.3 : Διάγραμμα ροής της διεργασίας για την ανάκτηση του CO₂ από τα απαέρια με τη χρήση της μεθόδου χημικής απορρόφησης.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τρία παραδείγματα εμπορικών διεργασιών δέσμευσης του CO₂ με χρήση συστημάτων post-combustion capture:

- ✓ The Kerr-McGee/ABB Lummus Crest Process (Barchas and Davis, 1992): Αυτή η διεργασία ανακτά CO₂ από κωκ και από λέβητες άνθρακα. Χρησιμοποιεί 15-20% κατά βάρος υδατικό διάλυμα MEA (Μono-Ethanolamine). Η μεγαλύτερη παραγωγή CO₂ από αυτή τη διεργασία που έχει παρατηρηθεί μέχρι στιγμής είναι 800 t CO₂/ημέρα.
- ✓ The Fluor Daniel® ECONAMINE™ Process (Sander and Mariz, 1992, Chapel et al., 1999): Πρόκειται για μια διεργασία που βασίζεται στο διάλυμα MEA (30% κατά βάρος υδατικό διάλυμα) και σε έναν ειδικό αναστολέα που αποτρέπει τη διάβρωση του ανθρακο-χάλυβα. Η διεργασία αυτή είναι ειδικά σχεδιασμένη για ροές αερίου που περιέχουν οξυγόνο. Αυτή η διεργασία έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά εργοστάσια παγκοσμίως, ανακτώντας έως και 320 t CO₂/ημέρα, που με τη σειρά του χρησιμοποιείται στην παραγωγή ποτών και ουρίας.

- ✓ The Kansai Electric Power Co., Mitsubishi Heavy Industries., Ltd., KEPCO/MHI Process (Mimura et al., 1999 and 2003): Αυτή η διεργασία βασίζεται σε στερεοχημικά σταθεροποιημένες αμίνες και ήδη τρεις διαλύτες έχουν αναπτυχθεί. Ο πρώτος διαλύτης χρησιμοποιήθηκε εμπορικά σε μια εφαρμογή παραγωγής ουρίας. Σε αυτή τη διεργασία, παρατηρήθηκαν μικρές απώλειες αμινών και μικρή αποδόμηση του διαλύτη χωρίς τη χρήση ειδικών αναστολέων και προσθέτων. Στην εικόνα 3.4 απεικονίζεται το πρώτο εργοστάσιο εμπορικής ανάκτησης περίπου 200 t CO₂/ημέρα από ροή απαερίων, που λειτουργεί στη Μαλαισία από το 1999 έχοντας ως στόχο την παραγωγή ουρίας.



Εικόνα 3.4 : Εγκατάσταση δέσμευσης CO₂ στη Μαλαισία με χρήση της διεργασίας χημικών KEPCO / MHI. Η εγκατάσταση αυτή παράγει περίπου 200 t CO₂ / ημέρα.

3.4 Oxy - fuel combustion

Στην oxy - fuel combustion, χρησιμοποιείται σχεδόν καθαρό οξυγόνο για την πραγματοποίηση της καύσης αντί για αέρα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τα παραγόμενα απαιρία να αποτελούνται κυρίως από CO_2 και H_2O . Εάν το καύσιμο υποστεί καύση με καθαρό οξυγόνο, τότε η θερμοκρασία της φλόγας είναι ιδιαίτερα υψηλή, αλλά τα παραγόμενα απαιρία που είναι πλούσια σε CO_2 και H_2O , μπορούν να τεθούν υπό καθεστώς ανακύκλωσης στο θάλαμο καύσης έτσι ώστε να τον ψύχουν. Το οξυγόνο συνήθως παράγεται έπειτα από διαχωρισμό του αέρα υπό χαμηλές θερμοκρασίες (cryogenic separation) και τη χρήση νέων τεχνικών που περιλαμβάνουν μεμβράνες και κύκλους chemical looping, έτσι ώστε αυτό να τροφοδοτηθεί στο καύσιμο και να πραγματοποιηθεί η καύση.

Πιο συγκεκριμένα η διεργασία oxy-fuel combustion εξαλείφει το άζωτο από τα απαιρία καίγοντας καύσιμα που περιέχουν άνθρακα με τη βοήθεια είτε καθαρού οξυγόνου είτε ενός μίγματος καθαρού οξυγόνου και απαιριών πλούσια σε CO_2 . Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω της καύσης του καυσίμου με καθαρό οξυγόνο φτάνει τους $3500\text{ }^\circ\text{C}$, κάτι που είναι απαγορευτικό για τον εξοπλισμό των περισσότερων εργοστασίων. Έτσι η θερμοκρασία καύσης περιορίζεται στους $1300\text{-}1400\text{ }^\circ\text{C}$ σε έναν τυπικό κυκλικό στρόβιλο και στους $1900\text{ }^\circ\text{C}$ σε έναν λέβητα που καίει άνθρακα με τη βοήθεια καθαρού οξυγόνου. Η θερμοκρασία καύσης ελέγχεται από την αναλογία των απαιριών και του ύδατος (σε αέρια ή υγρή μορφή) που θα επανακυκλοφορήσουν στο θάλαμο καύσης.

Τα προϊόντα καύσης αποτελούνται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς μαζί με περίσσεια οξυγόνου που είναι απαραίτητη για την πλήρη καύση του καυσίμου. Τα καθαρά πλέον απαιρία, μετά από ψύξη για να συμπυκνωθούν οι υδρατμοί, περιέχουν περίπου $80\text{-}98\%$ CO_2 ανάλογα με το καύσιμο και το σύστημα oxy-fuel combustion που χρησιμοποιήθηκε. Έπειτα το συμπυκνωμένο CO_2 συμπιέζεται, ξηραίνεται και καθαρίζεται περαιτέρω για να τροφοδοτηθεί σε αγωγό που θα το μεταφέρει στην τοποθεσία αποθήκευσης. Η αποδοτικότητα αυτών των συστημάτων φτάνει το 100% . Οι προσμίξεις στο CO_2 είναι αέρια συστατικά όπως SO_x , NO_x , HCl , Hg , προερχόμενα από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, και συστατικά αδρανών αερίων όπως άζωτο,

αργόν, οξυγόνο προερχόμενα από την παροχή οξυγόνου στο σύστημα ή εισροή αέρα στο σύστημα. Το CO₂ μεταφέρεται μέσω αγωγού σε πυκνή υπερκρίσιμη φάση. Τα αδρανή αέρια πρέπει να μειωθούν σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, έτσι ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο δημιουργίας διαφασικής ροής μέσα στον αγωγό. Τα συστατικά των όξινων αερίων πιθανώς να χρειαστούν να αφαιρεθούν, για να υπάρχει συμμόρφωση με την ισχύουσα νομοθεσία για την απόρριψη τοξικών αποβλήτων και γενικότερα να αποφευχθούν περιβαλλοντικά προβλήματα κατά την εισπείση του CO₂ σε ταμιευτήρες ή στον ωκεανό. Επιπλέον το CO₂ θα πρέπει να ξηραθεί για να αποφευχθούν φαινόμενα συμπύκνωσης νερού και διάβρωσης στους αγωγούς μεταφοράς.

Παρόλο που στοιχεία της τεχνολογίας oxy-fuel combustion βρίσκουν χρήση στις βιομηχανίες παραγωγής αλουμινίου, σιδήρου και χάλυβα, γυαλιού, ωστόσο η τεχνολογία δέσμευσης CO₂ με αυτόν τον τρόπο δεν έχει εφαρμοστεί ακόμη εμπορικά. Οι κύριες μέθοδοι, που υπάρχουν για παραγωγή οξυγόνου, είναι η κρυογονική απόσταξη, η προσρόφηση με multi-bed pressure swing units και οι πολυμερείς μεμβράνες. Για διεργασίες που απαιτείται παραγωγή μικρότερη των 200 t CO₂/ημέρα, το σύστημα προσρόφησης αποτελεί την πιο οικονομική λύση. Για τις υπόλοιπες διεργασίες που απαιτούν μεγαλύτερη παραγωγή, η πιο οικονομική λύση είναι ο κρυογονικός διαχωρισμός αέρα (Wilkinson et al., 2003a).

3.4.1 Έμμεση θέρμανση oxy-fuel – κύκλος ατμού

Σε αυτά τα συστήματα, ο oxy-fuel θάλαμος καύσης προσφέρει την απαραίτητη μεταφορά θερμότητας μέσω μιας επιφάνειας σε ένα ρευστό. Το σύστημα έμμεσης θέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε το διαθέσιμο καύσιμο είναι υδρογονάνθρακες είτε το καύσιμο περιέχει άνθρακα. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου για τη δέσμευση CO₂ βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο δοκιμών και αξιολογούνται τα αποτελέσματα από την καύση ανθρακούχων καυσίμων με μίγματα οξυγόνου και απαερίων πλούσιων σε CO₂.

Μια μελέτη πραγματοποιήθηκε και περιλάμβανε ένα τεστ oxy-fuel με ανακυκλοφορία απαερίων χρησιμοποιώντας 160 kW, χρήση κονιοποιημένου

άνθρακα και καυστήρα χαμηλών εκπομπών NO_x (Badcock Energy Ltd. Et al., 1995). Το σύστημα περιλάμβανε ένα τμήμα μεταφοράς θερμότητας για να προσομοιαστούν οι συνθήκες απόθεσης άνθρακα (fouling). Επίσης στο τεστ αυτό υπήρχαν διαφοροποιήσεις της ροής των ανακυκλοφορούμενων αερίων και περίσσεια O_2 . Επιπλέον πραγματοποιήθηκε ένα case-study λειτουργίας ενός oxy-fuel λέβητα παραγωγής ενέργειας της τάξης των 660 MW με σύστημα δέσμευσης CO_2 , συμπίεσης και καθαρισμού. Τα κύρια αποτελέσματα του τεστ ήταν ότι τα επίπεδα NO_x μειώνονται με αύξηση του ρυθμού ανακυκλοφορίας και ότι τα επίπεδα του άνθρακα στην τέφρα δεν εξαρτώνται από τον ρυθμό ανακυκλοφορίας.

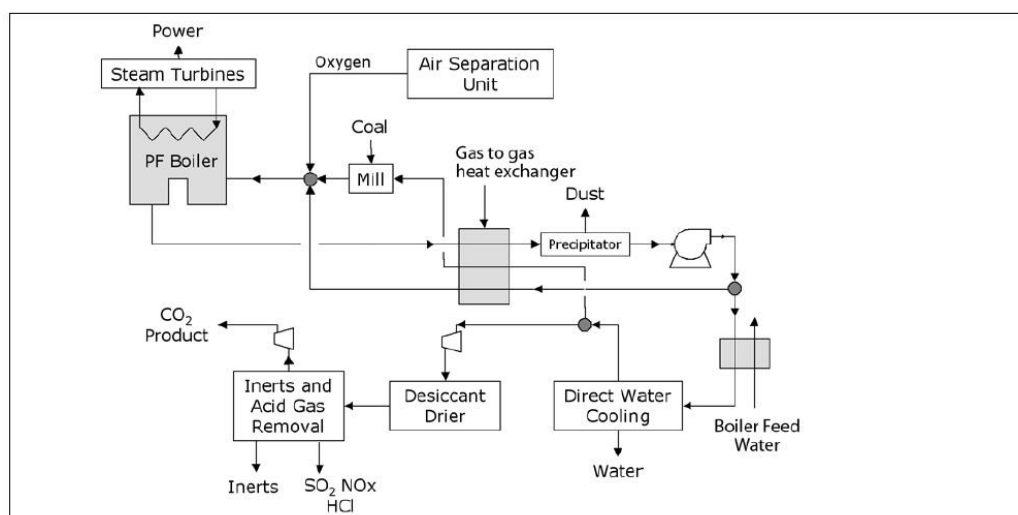
3.4.2 Σχεδιασμός εφαρμογής συστήματος oxy-fuel combustion σε ένα νέο λέβητα καύσης κονιοποιημένου άνθρακα

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτού του συστήματος είναι:

- ✓ Ο σχεδιασμός του καυστήρα και ο ρυθμός ροής των ανακυκλοφορούμενων αερίων επιλέγονται έτσι ώστε να επιτευχθούν οι ίδιες θερμοκρασίες με την καύση με χρήση αέρα.
- ✓ Τα πλούσια σε CO_2 απαέρια από τον λέβητα χωρίζονται σε τρεις ροές αερίων: η πρώτη ροή που ανακυκλοφορεί στον καυστήρα, η δεύτερη ροή που χρησιμεύει ως μέσο μεταφοράς και ξήρανσης της τροφοδοσίας άνθρακα και η τρίτη ροή που αποτελεί το παραγόμενο αέριο. Η πρώτη και η τρίτη ροή ψύχονται με υγρό καθαρισμό για την αφαίρεση υπολειμματικών σωματιδίων, υδρατμών και διαλυτών όξινων αερίων όπως είναι το SO_3 και το HCl . Το οξυγόνο και η παγιδευμένη σκόνη άνθρακα μεταφέρονται μαζί με τη δεύτερη ροή αερίων στον καυστήρα.
- ✓ Η εισροή αέρα που υπάρχει στο λέβητα είναι αρκετή στο να δημιουργήσει αδρανή αέρια ώστε να κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση εξοπλισμού αφαίρεσης αυτών των αερίων.

- ✓ Η χαμηλής θερμοκρασίας ($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$) μονάδα καθαρισμού CO_2 , η οποία είναι συνδεδεμένη με το συμπιεστή CO_2 , δεν θα αφαιρέσει μόνο την περίσσεια του O_2 , N_2 , αργού αλλά και όλα τα NO_x και SO_2 από το ρεύμα του CO_2 . Αυτό κρίνεται απαραίτητο εάν απαιτείται υψηλής καθαρότητας CO_2 για αποθήκευση.

Η ολική μεταφορά θερμότητας είναι βελτιωμένη στην oxy-fuel καύση λόγω του υψηλότερου συντελεστή εκπομπής $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ του αέριου μίγματος στο λέβητα σε σχέση με το άζωτο. Αυτή η βελτίωση μαζί με την ανακυκλοφορία των θερμών απαερίων, αυξάνει την αποδοτικότητα του λέβητα και την παραγωγή ατμού κατά 5% περίπου.



Εικόνα 3.5 : Σχέδιο μιας εγκατάστασης oxy-fuel με χρήση κονιοποιημένου γαιάνθρακα ως καύσιμο.

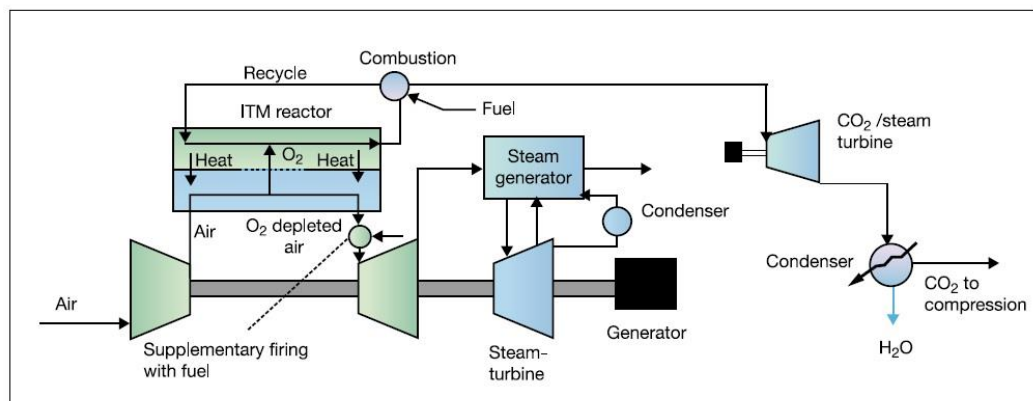
3.4.3 Σχεδιασμός προηγμένου συγκροτήματος στροβιλοκινητήρα μηδενικών εκπομπών

Το προηγμένο συγκρότημα στροβιλοκινητήρα μηδενικών εκπομπών είναι ένας αεριοστρόβιλος έμμεσης θέρμανσης, ο οποίος ενσωματώνει μια μεμβράνη μεταφοράς οξυγόνου σε υψηλή θερμοκρασία και λειτουργεί σε θερμοκρασίες $800\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτή η διεργασία χρησιμοποιεί έναν αεριοστρόβιλο με βάση τον αέρα σε διάταξη συνδυασμένου κύκλου. Τρία είναι τα κύρια βήματα αυτής της

διεργασίας που λαμβάνουν χώρα σε αντιδραστήρα αντί σε θάλαμο καύσης που χρησιμοποιεί συνήθως αεριοστρόβιλος. Τα βήματα αυτά είναι τα εξής:

- ✓ Διαχωρισμός του οξυγόνου από τον θερμό αέρα με χρήση της μεμβράνης και μεταφορά για καύση
- ✓ Καύση
- ✓ Ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των προϊόντων της καύσης και του συμπιεσμένου αέρα

Η καθαρή απόδοση αυτής της διεργασίας κυμαίνεται γύρω στο 49-50% της κατώτερης θερμογόνου δύναμης (LHV), συμπεριλαμβανομένης της συμπίεσης του CO₂ για να γίνει η μεταφορά του. Η διεργασία αυτή μπορεί να βελτιστοποιηθεί με την εγκατάσταση στο σύστημα ενός δευτερογενούς καυστήρα φυσικού αερίου (afterburner). Η καθαρή απόδοση της διεργασίας με αυτή τη βελτίωση του συστήματος ανεβαίνει γύρω στο 52% αλλά περίπου 15% του παραγόμενου CO₂ δεν είναι δυνατόν να δεσμευτεί.



Εικόνα 3.6 : Διάγραμμα ροής του προηγμένου συγκροτήματος στροβιλοκινητήρα μηδενικών εκπομπών.

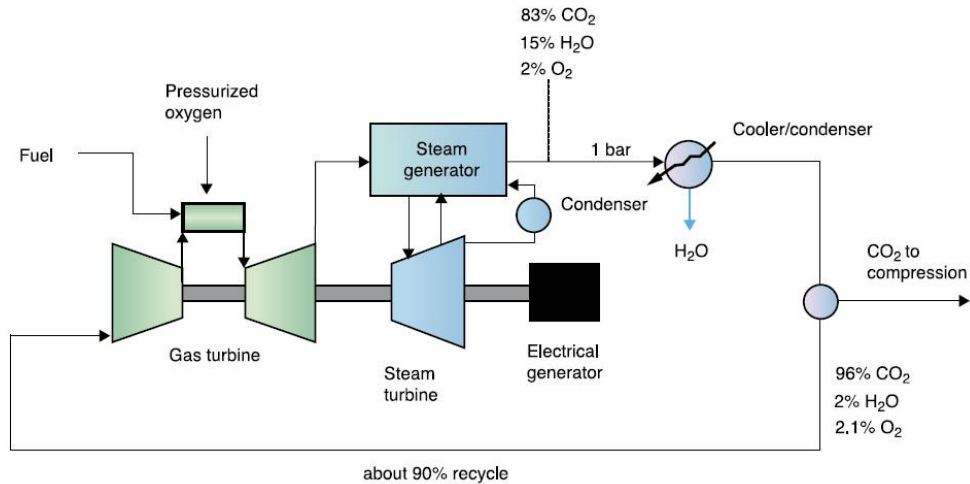
3.4.4 Άμεση θέρμανση oxy-fuel – κύκλωμα αεριοστρόβιλου

Η oxy-fuel καύση πραγματοποιείται με χρήση ανακυκλοφορούμενου ατμού πλούσιου σε CO₂ σε έναν τροποποιημένο αεριοστρόβιλο. Το θερμό αέριο διαστέλλεται στο στρόβιλο και έτσι παράγεται ενέργεια. Η εξάτμιση του στρόβιλου ψύχεται για να προσδώσει θερμότητα στον κύκλο ατμού και οι υδρατμοί συμπυκνώνονται με περαιτέρω ψύξη. Το πλούσιο σε CO₂ αέριο συμπιέζεται στο τμήμα συμπίεσης. Το καθαρό προϊόν της καύσης (πλούσιο σε

CO₂) αφαιρείται από το σύστημα. Μόνο φυσικό αέριο, ελαφροί υδρογονάνθρακες και syngas (CO + H₂) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο.

Στην εικόνα 3.7 απεικονίζεται πώς ένας αεριοστρόβιλος μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να κάνει καύση oxy-fuel με χρήση CO₂ ως ενεργό ρευστό. Το αέριο εξάτμισης που βγαίνει από τη γεννήτρια απόληψης θερμότητας ψύχεται για να συμπυκνωθεί το νερό. Έπειτα το καθαρό παραγόμενο CO₂ αφαιρείται και το υπόλοιπο αέριο ανακυκλοφορεί στο συμπιεστή. Τα κατάλληλα καύσιμα για αυτή τη διεργασία είναι το φυσικό αέριο, ελαφριοί έως μεσαίοι υδρογονάνθρακες και το syngas. Η χρήση του CO₂ ως ενεργό ρευστό στο στρόβιλο απαιτεί τον πλήρη ανασχεδιασμό του αεριοστρόβιλου. Μια πρόσφατη μελέτη (Dillon et al., 2005) δίνει συνολική απόδοση περίπου 45%.

Υπάρχουν δύο παραλλαγές αυτής της διάταξης, οι κύκλοι του Matiant και του Graz (Mathieu, 2003; Jericha et al., 2003). Ο κύκλος του Matiant χρησιμοποιεί το CO₂ ως ενεργό ρευστό και αποτελείται από συμπιεστή ενδοψύξης και στρόβιλο αναθέρμανσης. Το αέριο εξάτμισης προθερμαίνει το ανακυκλοφορούμενο CO₂ σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Η καθαρή συνολική απόδοση LHV κυμαίνεται στο 45-47% και μπορεί να ανέβει άνω του 50% σε μια διάταξη συνδυασμένου κύκλου παρόμοια με αυτή της εικόνας 3.7. Ο κύκλος του Graz αποτελείται από έναν ολοκληρωμένο αεριοστρόβιλο και ένα κύκλωμα με στρόβιλο ατμού. Έχει εκτιμηθεί ότι αυτός ο κύκλος μπορεί να εμφανίσει καθαρή απόδοση μεγαλύτερη του 50%.



Εικόνα 3.7 : Διάγραμμα ροής ενός oxy-fuel αεριοστρόβιλου συνδυασμένου κύκλου. Τα απαέρια ανακυκλοφορούν, συμπιέζονται και χρησιμοποιούνται στο θάλαμο καύσης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του στρόβιλου.

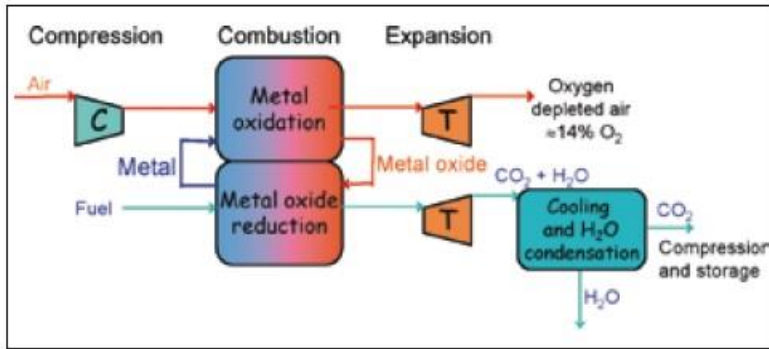
3.4.5 Chemical looping combustion

Αυτή η μέθοδος αρχικά προτάθηκε από τους Richter και Knoche (1983) και αργότερα βελτιώθηκε από τους Ishida και Jin (1994). Η βασική ιδέα αυτής της μεθόδου είναι ο διαχωρισμός της καύσης ενός καυσίμου υδρογονανθράκων ή άνθρακα σε αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής με την εισαγωγή ενός κατάλληλου μεταλλικού οξειδίου που θα δρα ως φορέας οξυγόνου και θα κυκλοφορεί ανάμεσα σε δύο αντιδραστήρες. Ο διαχωρισμός του οξυγόνου από τον αέρα επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση του οξυγόνου ως οξείδιο του μετάλλου. Δεν απαιτείται λοιπόν εξοπλισμός διαχωρισμού του αέρα. Η αντίδραση μεταξύ του καυσίμου και του οξυγόνου επιτυγχάνεται σε έναν δεύτερο αντιδραστήρα με την απελευθέρωση του οξυγόνου από το μεταλλικό οξείδιο σε ένα περιβάλλον αναγωγικό, που προκαλείται από την παρουσία του καυσίμου (είτε υδρογονάνθρακες είτε άνθρακας). Ο ρυθμός ανακυκλοφορίας του στερεού υλικού ανάμεσα στους δύο αντιδραστήρες και ο μέσος χρόνος παραμονής των στερεών σε κάθε αντιδραστήρα, ελέγχουν την ισορροπία θερμότητας και τη θερμοκρασία σε κάθε αντιδραστήρα. Το αποτέλεσμα της καύσης σε δύο αντιδραστήρες σε σύγκριση με την συμβατική καύση σε ένα στάδιο, έγκειται στο ότι το παραγόμενο CO₂ δεν είναι αραιωμένο με αέριο άζωτο, αλλά είναι σχεδόν

καθαρό μετά το διαχωρισμό από το νερό. Έτσι δεν χρειάζεται επιπλέον ενέργεια και εξοπλισμός για το διαχωρισμό του CO₂.

Πιθανά μεταλλικά οξείδια είναι κάποια οξείδια κοινών μετάλλων μεταβατικής κατάστασης (transition-state metals) όπως είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, ο χαλκός και το μαγγάνιο (Zafar et al., 2005). Το μεταλλικό οξείδιο γενικά μπορεί να έχει διάφορες μορφές, αλλά οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει πάνω στο θέμα έδειξαν ότι συνίσταται η χρήση μεταλλικών οξειδίων με διάμετρο των 100-500 μm. Για να μπορούν τα μεταλλικά οξείδια να κινούνται με ευκολία ανάμεσα στους δύο αντιδραστήρες ρευστοποιούνται. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας και μάζας μεταξύ των αερίων και των μεταλλικών οξειδίων. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους αντιδραστήρες είναι της τάξης των 800-1200 °C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες λειτουργίας η παραγωγή NO_x θα είναι πάντα μικρή. Για να αποφευχθεί η απόθεση άνθρακα στον αντιδραστήρα αναγωγής είναι απαραίτητη η χρήση ατμού μαζί με το καύσιμο.

Η αρχή λειτουργίας του chemical looping είναι δυνατόν να εφαρμοστεί είτε σε κύκλωμα αεριοστρόβιλου πεπιεσμένης οξείδωσης και αντιδραστήρων αναγωγής, είτε σε ένα κύκλωμα ατμοστρόβιλου με ατμοσφαιρική πίεση στους αντιδραστήρες. Στην περίπτωση του κυκλώματος αεριοστρόβιλου, ο αντιδραστήρας οξείδωσης αντικαθιστά το θάλαμο καύσης ενός συμβατικού αεριοστρόβιλου. Η εξώθερμη αντίδραση οξείδωσης προσφέρει θερμότητα για την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα που εισέρχεται στο στρόβιλο εκτόνωσης. Έπειτα το ψυχόμενο, χαμηλής πίεσης ρεύμα CO₂ συμπιέζεται σε πίεση που επικρατεί σε έναν αγωγό μεταφοράς ρευστών. Μια άλλη επιλογή είναι η παραγωγή ατμού με χρήση επιφανειών μεταφοράς θερμότητας μέσα στον αντιδραστήρα οξείδωσης. Η καύση σε ατμοσφαιρική πίεση με χρήση της τεχνολογίας της ρευστοποιημένης κλίνης, προϋποθέτει τόσο για το στάδιο οξείδωσης όσο και για το στάδιο αναγωγής, τη χρήση κυκλώματος ατμοστρόβιλου για την παραγωγή ενέργειας. Η τεχνολογία του chemical looping combustion βρίσκεται αυτή τη στιγμή σε πιλοτικό στάδιο και οι έρευνες για την ανάπτυξή του συνεχίζονται.

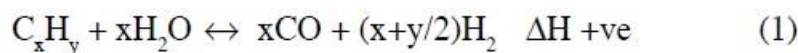


Εικόνα 3.8 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου chemical looping combustion σε ένα κύκλωμα αεριοστροβίλου.

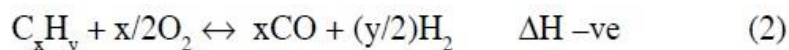
3.5 Pre - combustion capture

Το pre - combustion capture περιλαμβάνει την αντίδραση ενός καυσίμου με οξυγόνο ή αέρα ή ατμό, κάτι το οποίο δίνει κυρίως ένα σύνθετο αέριο (synthesis gas - synsgas) το οποίο αποτελείται από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Οι δύο κύριες μέθοδοι πραγματοποίησης των παραπάνω, είναι είτε η προσθήκη ατμού (αντίδραση 1 – ‘αναμόρφωση ατμού’) είτε η προσθήκη οξυγόνου (αντίδραση 2) κύριο καύσιμο. Στη δεύτερη περίπτωση, η διεργασία ονομάζεται ‘μερική οξείδωση’ όταν εφαρμόζεται σε υγρά και αέρια καύσιμα, ενώ όταν εφαρμόζεται σε στερεά καύσιμα ονομάζεται εξαερίωση. Το μονοξείδιο του άνθρακα έρχεται σε αντίδραση με ατμό σε έναν αντιδραστήρα κατάλυσης (shift converter) και έτσι παράγεται CO₂ και περισσότερο υδρογόνο.

Αναμόρφωση ατμού



Μερική οξείδωση



Water Gas Shift Reaction



Έπειτα το παραγόμενο CO_2 διαχωρίζεται, συνήθως με τη χρήση μιας διεργασίας φυσικής ή χημικής προσρόφησης, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός καυσίμου πλούσιου σε υδρογόνο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές όπως χρήση σε λέβητες, κλιβάνους, τουρμπίνες αερίου, κινητήρες, κυψέλες καυσίμων. Το δεσμευμένο CO_2 μπορεί να μεταφερθεί προς αποθήκευση.

3.5.1 Υπάρχουσες τεχνολογίες

3.5.1.1 Αναμόρφωση με χρήση ατμού αερίων και ελαφρών υδρογονανθράκων

Η αναμόρφωση ατμού είναι η κυρίαρχη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σήμερα για την παραγωγή υδρογόνου και τα μεγαλύτερα εργοστάσια παράγουν έως και 480 t H_2 / ημέρα. Η κύρια πηγή ενέργειας για αυτή τη διεργασία είναι συνήθως το φυσικό αέριο και η διεργασία τότε ονομάζεται 'αναμόρφωση μεθανίου με χρήση ατμού'. Όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μορφές ενέργειας, όπως είναι οι ελαφριοί υδρογονάνθρακες και η νάφθα. Η διεργασία ξεκινά με την αφαίρεση του θείου από την τροφοδοσία, επειδή το θείο αποτελεί δηλητήριο για τον καταλύτη βασισμένο σε νικέλιο που χρησιμοποιείται. Έπειτα προστίθεται ο ατμός. Η αντίδραση αναμόρφωσης (1), η οποία είναι ενδόθερμη αντίδραση, πραγματοποιείται σε υψηλή αντίδραση της τάξης των 800-900 °C. Θερμότητα παρέχεται στους αγωγούς του αντιδραστήρα με καύση μέρους του καυσίμου. Το αναμορφωμένο αέριο ψύχεται σε ένα λέβητα αποβαλλόμενης θερμότητας, ο οποίος παράγει τον απαραίτητο ατμό για να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις και μετά περνά στο σύστημα μετατροπής CO. Αντιδραστήρες μετατροπής CO ενός ή δύο σταδίων χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν το μεγαλύτερο μέρος του CO, που περιέχεται στο syngas, σε CO_2 (3) (εξώθερμη αντίδραση).

Η συμβατική μετατροπή CO δύο σταδίων μειώνει τη συγκέντρωση του CO στο syngas ή στο υδρογόνο στο 0.2 με 0.3%. Αντιδραστήρες μετατροπής CO υψηλής θερμοκρασίας, που λειτουργούν ανάμεσα στους 400 °C και 500 °C και χρησιμοποιούν καταλύτη σιδήρου-χρωμίτη αφήνουν 2-3% CO στο αέριο εξόδου. Η χρήση καταλύτη με βάση το χαλκό είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες 180-350 °C και αφήνει 0.2-1% CO στην εξάτμιση. Η μικρότερη συγκέντρωση CO ευνοεί την υψηλότερη ανάκτηση CO_2 . Μετά το αέριο

παράγεται υδρογόνο μετά από διαχωρισμό του CO_2 με το H_2 . Παλιά εργοστάσια αφαιρούσαν το CO_2 με χρήση μιας διεργασίας χημικής προσρόφησης (διαλύτες) όπως είναι οι αμίνες ή το ανθρακικό κάλιο. Το CO_2 απελευθερωνόταν από την κορυφή του αναγεννητή. Τα μοντέρνα εργοστάσια χρησιμοποιούν τη διεργασία pressure swing adsorber (PSA), όπου όλα τα αέρια εκτός του H_2 προσροφώνται μέσα από μια σειρά εναλλασσόμενων κλινών, που περιέχουν στρώσεις στερεής προσροφητικής ουσίας σαν τον ενεργό άνθρακα, την αλουμίνα και τους ζεόλιθους. Το H_2 που εξέρχεται από το PSA μπορεί να έχει καθαρότητα ως και 99.999%. Το CO_2 περιορίζεται σε ένα ρεύμα, από το κύκλωμα αναγέννησης, που περιέχει ένα μικρό ποσοστό μεθανίου και υδρογόνο. Το ρεύμα αυτό χρησιμοποιείται ως καύσιμο στον αναγεννητή, όπου καίγεται με αέρα και το CO_2 απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μέσω των απαερίων του αναγεννητή. Ως εκ τούτου, για τη δέσμευση CO_2 από μοντέρνα εργοστάσια αναμόρφωσης μεθανίου με τη χρήση ατμού, απαραίτητη είναι η χρήση μιας διεργασίας post-combustion. Εναλλακτικά, το σύστημα PSA θα μπορούσε να σχεδιαστεί για ανάκτηση και CO_2 εκτός από το H_2 και χρήση αέριου καυσίμου ως τρίτο ρεύμα παραγωγής.

3.5.1.2 Μερική οξείδωση αερίων και ελαφρών υδρογονανθράκων

Σε αυτή τη διεργασία, η οποία είναι εξώθερμη, ένα καύσιμο αντιδρά με καθαρό οξυγόνο σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (1250-1400 °C). Όλη η θερμότητα που απαιτείται για την αντίδραση του syngas, παρέχεται από τη μερική καύση του καυσίμου. Έτσι δεν απαιτείται καμία ποσότητα εξωτερικής θερμότητας. Όπως και στη διεργασία αναμόρφωσης με τη χρήση ατμού, το syngas ψύχεται, μετατρέπεται και το CO_2 αφαιρείται από το μίγμα. Σε μεγάλου σκέλους παραγωγή υδρογόνου, το οξυγόνο παρέχεται από μονάδα διαχωρισμού κρυογονικού αέρα. Κάτι τέτοιο απαιτεί υψηλές επενδύσεις και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, αλλά η υψηλότερη απόδοση, το χαμηλό κόστος

της διεργασίας εξαερίωσης και η έλλειψη του N_2 στον syngas αποζημιώνει για τα παραπάνω μειονεκτήματα.

3.5.1.3 Αυτό-θερμική αναγέννηση αερίων και ελαφρών υδρογονανθράκων

Η διεργασία αυτό-θερμικής αναγέννησης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός των δύο διεργασιών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η θερμότητα που είναι απαραίτητη για τον αντιδραστήρα στην αναμόρφωση μεθανίου με χρήση ατμού, παρέχεται από την αντίδραση μερικής οξείδωσης (2) με χρήση αέρα ή οξυγόνου. Αλλά επειδή στον αντιδραστήρα παρέχεται ατμός και μια περίσσεια φυσικού αερίου, η ενδόθερμη αντίδραση αναγέννησης (1) πραγματοποιείται στο καταλυτικό τμήμα του αντιδραστήρα στο κάτω μέρος του καυστήρα μερικής οξείδωσης. Η προσθήκη ατμού ενεργοποιεί την υψηλή μετατροπή του καυσίμου σε υδρογόνο σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτής της διεργασίας κυμαίνεται στους 950-1050 °C, ανάλογα με το σχεδιασμό της διεργασίας. Ένα πλεονέκτημα αυτής της διεργασίας, σε σύγκριση με την αναμόρφωση μεθανίου με χρήση ατμού, είναι το χαμηλό κόστος επένδυσης για τον αντιδραστήρα και η απουσία εκπομπών CO_2 αφού όλη η απελευθέρωση θερμότητας γίνεται εσωτερικά. Εν τούτοις αυτό το πλεονέκτημα εκμηδενίζεται από την ανάγκη για επένδυση στον εξοπλισμό οξυγόνου και το υψηλό κόστος λειτουργίας του. Τα καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διεργασία είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στη διεργασία αναμόρφωσης μεθανίου με χρήση ατμού. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το αέριο τροφοδοσίας πρέπει να μην περιέχει καθόλου θείο στη σύστασή του. Η δέσμευση του CO_2 επιτυγχάνεται όπως στη διεργασία αναμόρφωσης μεθανίου με τη χρήση ατμού, που περιγράφεται παραπάνω.

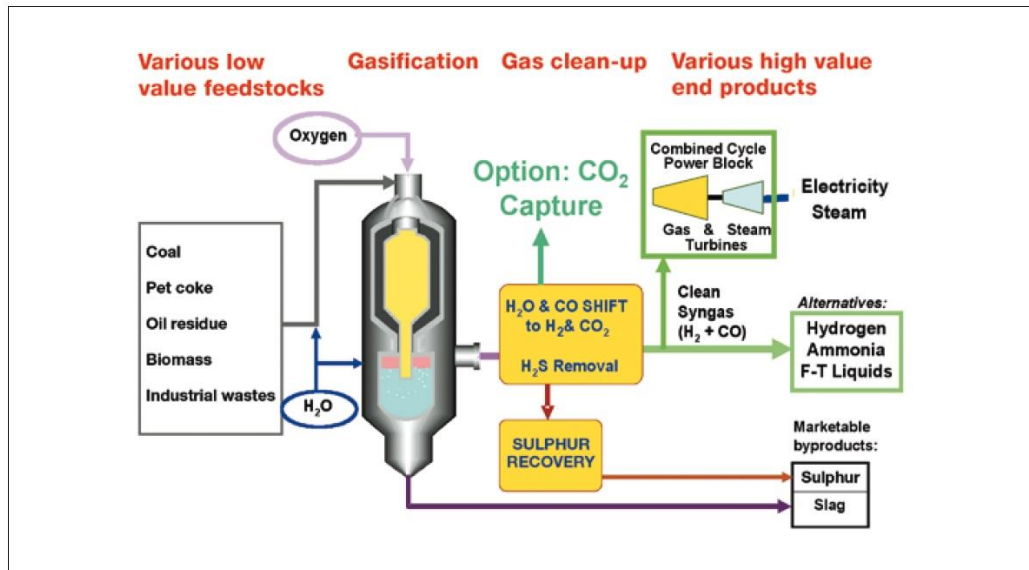
3.5.1.4 Αναγέννηση θερμού αερίου

Και οι τρεις διεργασίες που περιγράφηκαν προηγουμένως παράγουν αέρια υψηλής θερμοκρασίας τα οποία πρέπει να ψυχθούν, παράγοντας σε κάθε περίπτωση, περισσότερο ατμό από αυτό που χρειάζονται οι αντιδράσεις αναγέννησης και μετατροπής. Είναι δυνατή η μείωση αυτής της περίσσειας ατμού, με χρήση προ-θερμαινόμενου αέρα και ενός προ-αναγεννητή στη

διεργασία αναμόρφωσης με τη χρήση ατμού. Μια άλλη τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί γι' αυτό το σκοπό είναι η χρήση θερμού syngas καθώς εξέρχεται από τον κύριο αντιδραστήρα ως το ρευστό θέρμανσης των πλευρικών ελασμάτων, σε έναν αντιδραστήρα αναμόρφωσης ατμού ή υδρογονανθράκων, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί είτε σε σειρά είτε σε παράλληλη διάταξη με τον κύριο αντιδραστήρα (Abbott et al., 2002). Η προσθήκη ενός δευτερογενούς αναγεννητή θερμαινόμενου αερίου μπορεί να αυξήσει την παραγωγή υδρογόνου έως και 33% και να εξουδετερώσει την περίσσεια του παραγόμενου ατμού. Η συνολική απόδοση βελτιώνεται και το κόστος επένδυσης μειώνεται κατά 15%. Η δέσμευση του CO₂ επιτυγχάνεται όπως περιεγράφηκε προηγουμένως στη διεργασία αναμόρφωσης μεθανίου με τη χρήση ατμού.

3.5.1.5 Εξαερίωση του γαιάνθρακα, υπολειμμάτων πετρελαίου ή βιομάζας

Η αεριοποίηση είναι μια χημική διεργασία με στόχο την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας (χημικά, ηλεκτρισμός, καθαρά συνθετικά καύσιμα) χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη προϊόντα εφοδιασμού χαμηλής αξίας όπως είναι ο άνθρακας, τα πετρελαϊκά υπολείμματα διυλιστηρίων και η βιομάζα. Η εξαερίωση βασικά είναι μια αντίδραση μερικής οξείδωσης (2), με τη διαφορά ότι ο ατμός παρέχεται και στον αντιδραστήρα στα περισσότερα στάδια της διεργασίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός στερεάς κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης, συμπαρασυρόμενης ροής αεριογόνου. Ο κάθε εξοπλισμός όμως έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, όσον αφορά το μέσο οξείδωσης (αέρας ή οξυγόνο), τη θερμοκρασία λειτουργίας (έως και 1350 °C), την επικρατούσα πίεση (0.1-7 MPa), το σύστημα τροφοδοσίας (στερεός ή υγρός πολφός), τη μέθοδο ψύξης του syngas (ψύκτης νερού ή μέσω εναλλακτών θερμότητας) και το σύστημα καθαρισμού των αερίων. Αυτές οι εναλλακτικές που υπάρχουν στο σχεδιασμό της διεργασίας κρίνουν το ποσοστό της πρώτης ύλης που μετατρέπεται σε syngas, τη σύστασή του και το κόστος. Γενικά η διεργασία εξαερίωσης θεωρείται κατάλληλη μόνο για μεγάλα εργοστάσια. Τα προϊόντα εξαερίωσης περιέχουν CO, H₂, CO₂, H₂O και προσμίξεις (π.χ N₂, COS, H₂S, HCN, NH₃, Hg) οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν καταλλήλως.



Εικόνα 3.9 : Απλοποιημένο σχέδιο της διεργασίας εξαερίωσης για τη δέσμευση CO₂.

Σύμφωνα με έρευνα, σήμερα υπάρχουν 128 εν λειτουργία εργοστάσια αεριοποίησης με 366 αεριογόνες συσκευές και παραγωγή 42700 MW_t syngas (NETL-DOE, 2002 and Simbeck, 2001a). Επιπλέον υπάρχουν έργα υπό ανάπτυξη που μπορούν να προσθέσουν άλλους 24500 MW_t syngas. Η τεχνολογία δέσμευσης CO₂ είναι καλά εδραιωμένη για συστήματα εξαερίωσης που παράγουν χημικά και συνθετικά καύσιμα (NETL-DOE, 2002). Εργοστάσια παραγωγής αμμωνίας που χρησιμοποιούν την τεχνολογία της εξαερίωσης, επιπλέον διαχωρίζουν H₂ και CO₂, φτάνοντας ημερήσια παραγωγή των 3500 t CO₂. Εργοστάσια παραγωγής καυσίμων και χημικών στη Ν. Αφρική και ένα εργοστάσιο παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου στη Βόρεια Ντακότα παράγουν επίσης μεγάλα ρεύματα σχεδόν καθαρού CO₂. Η εικόνα 3.10 απεικονίζει την εγκατάσταση εξαερίωσης στη Βόρεια Ντακότα, στην οποία δεσμεύονται περίπου 3.3 Mt CO₂/έτος. Το μεγαλύτερο μέρος του δεσμευόμενου CO₂ απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα και μόλις 1.5 Mt CO₂/έτος μεταφέρεται μέσω αγωγού στο Weyburn του Καναδά για enhanced oil recovery και σε ένα project για αποθήκευση σε υπόγειο ταμειυτήρα.



Εικόνα 3.10 : Εγκατάσταση εξαερίωσης γαιάνθρακα στη Βόρεια Ντακότα με ετήσια παραγωγή 3.3 Mt CO₂. Για τη δέσμευση του CO₂, χρησιμοποιείται μια διεργασία φυσικού διαλύτη με κρύα μεθανόλη. Μέρος του δεσμευμένου CO₂ μεταφέρεται στο Weyburn στο Saskatchewan του Καναδά για EOR.

4 Μεταφορά του CO₂

Το CO₂ είναι δυνατόν να μεταφερθεί σε τρεις καταστάσεις: την αέρια, την υγρή και τη στερεά. Συνήθως εμπορικά η μεταφορά πραγματοποιείται μέσω βυτίων, αγωγών και πλοίων εφόσον το διοξείδιο του άνθρακα βρίσκεται σε αέρια ή υγρή μορφή.

Το αέριο εάν μεταφερόταν σε πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική, θα καταλάμβανε τόσο μεγάλο όγκο που θα χρειαζονταν πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις για την επεξεργασία του. Εάν όμως το αέριο συμπιεστεί τότε καταλαμβάνει μικρότερο όγκο και το συμπιεσμένο αέριο μπορεί και μεταφέρεται μέσω αγωγών. Η μείωση του όγκου του αερίου σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται μέσω της μεταφοράς υπό υψηλή πίεση. Βέβαια ο όγκος που καταλαμβάνει ένα αέριο μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με υγροποίηση, στερεοποίηση ή ενυδάτωση. Η υγροποίηση αποτελεί μια εδραιωμένη τεχνολογία για τη μεταφορά αερίου με πλοίο μέσω των τεχνικών LPG (liquefied petroleum gas) και LNG (liquefied natural gas). Η υπάρχουσα λοιπόν τεχνολογία και τεχνογνωσία χρησιμοποιείται και στη μεταφορά υγρού CO₂. Αντίθετα η στερεοποίηση απαιτεί πολύ περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με τις υπόλοιπες επιλογές και αποτελεί υψηλότερου κόστους μέθοδο. Αυτή την περίοδο πραγματοποιούνται μελέτες για την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας για μεταφορά φυσικού αερίου σε μορφή υδριτών, που θα μπορούσε στο μέλλον να αντικαταστήσει την τεχνική του LNG. Εφόσον αυτή η τεχνολογία αναπτυχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό θα μπορούσε στο μέλλον να εφαρμοστεί για τη μεταφορά του CO₂ μέσω πλοίων.

4.1 Μεταφορά μέσω αγωγών

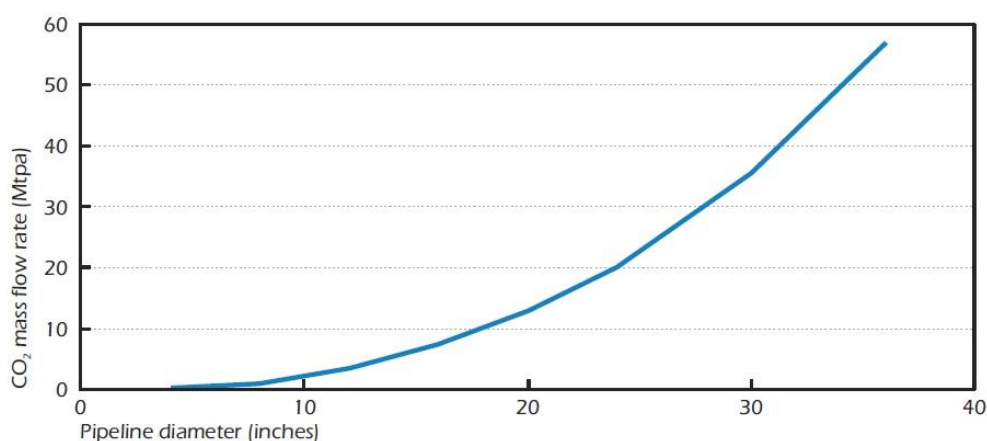


Εικόνα 4.1 : Αγωγοί μεταφοράς CO₂ (<https://www.linkedin.com/pulse/world-first-high-pressure-hot-tap-plugging-co2-pipelines-stats-group>)

Η μεταφορά μικρών ποσοτήτων CO₂ αποτελεί μια εδραιωμένη τεχνολογία, η οποία είναι δυνατόν να μεταφέρει έως και μερικούς Mt το έτος (IPCC, 2005). Σε παγκόσμια κλίμακα, οι αγωγοί μεταφοράς CO₂ καλύπτουν αποστάσεις σχεδόν 5600 km έχοντας διάμετρο έως και 0.762 m και μεταφέρουν 50 Mt/έτος (Gale, 2002).

Οι αγωγοί μεταφοράς CO₂ έχουν πολλές ομοιότητες με τους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου. Το CO₂ ξηραίνεται για να μειωθεί η πιθανότητα διάβρωσης των αγωγών. Αυτοί οι αγωγοί κατασκευάζονται από χάλυβα, οι οποίοι δεν διαβρώνονται από το ξηρό CO₂. Ένα κράμα ανθεκτικό στη διάβρωση χρησιμοποιείται σε μικρά τμήματα των αγωγών πριν τους σταθμούς αφυδάτωσης (IPCC, 2005). Ο πιο παλιός χρονικά αγωγός είναι ο αγωγός κατασκευής του 1972 Canyon Reef pipeline, ο οποίος μεταφέρει 5 Mt CO₂ ανά έτος από εργοστάσια επεξεργασίας αερίου. Ο μεγαλύτερος αγωγός μεταφοράς CO₂ βρίσκεται στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και ονομάζεται Cortez pipeline. Με την πρόσφατη επέκτασή του ο αγωγός τώρα περιλαμβάνει περισσότερες από 12 νέες γεωτρήσεις CO₂, 17 km επιπρόσθετο μήκος,

αποθηκεύονται περίπου 500 Mt CO₂/έτος και το 2050 το νούμερο αυτό θα ξεπεράσει τους 1.5 Gt CO₂/έτος. Εφόσον το CO₂ μεταφέρεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση (10 φορές πυκνότερη από το μεθάνιο) και εφόσον η μέση απόσταση μεταξύ των σταθμών ανύψωσης της πίεσης θα είναι στα 200 km (σε σύγκριση με τα 120-160 km του φυσικού αερίου), η μεταφορά του CO₂ θα απαιτεί λιγότερη ενέργεια απ' ότι η μεταφορά φυσικού αερίου για την ίδια απόσταση. Εν τούτοις το μέγεθος της επένδυσης που απαιτείται είναι αξιοσημείωτο. Προβλέπεται ότι έως το 2050, το δίκτυο αγωγών μεταφοράς CO₂ στις ΗΠΑ θα χρειάζεται να μεταφέρει τρεις φορές το συνολικό όγκο του μεταφερόμενου φυσικού αερίου μέσω αγωγών. Οι μελέτες που έγιναν για την πιθανή ανάπτυξη δικτύων μεταφοράς CO₂ στην Ευρώπη, έδειξαν ότι ανάλογα με τη διαμόρφωση του δικτύου, θα χρειαστούν περίπου 30000 με 150000 km αγωγών για να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες της μεταφοράς του CO₂ (IEA GHG, 2005 a).



Εικόνα 4.2 Διάγραμμα που δείχνει τη σχέση μεταξύ της διαμέτρου του αγωγού και της μέγιστης τιμής της ροής του CO₂ (Williams, et al., 2007).

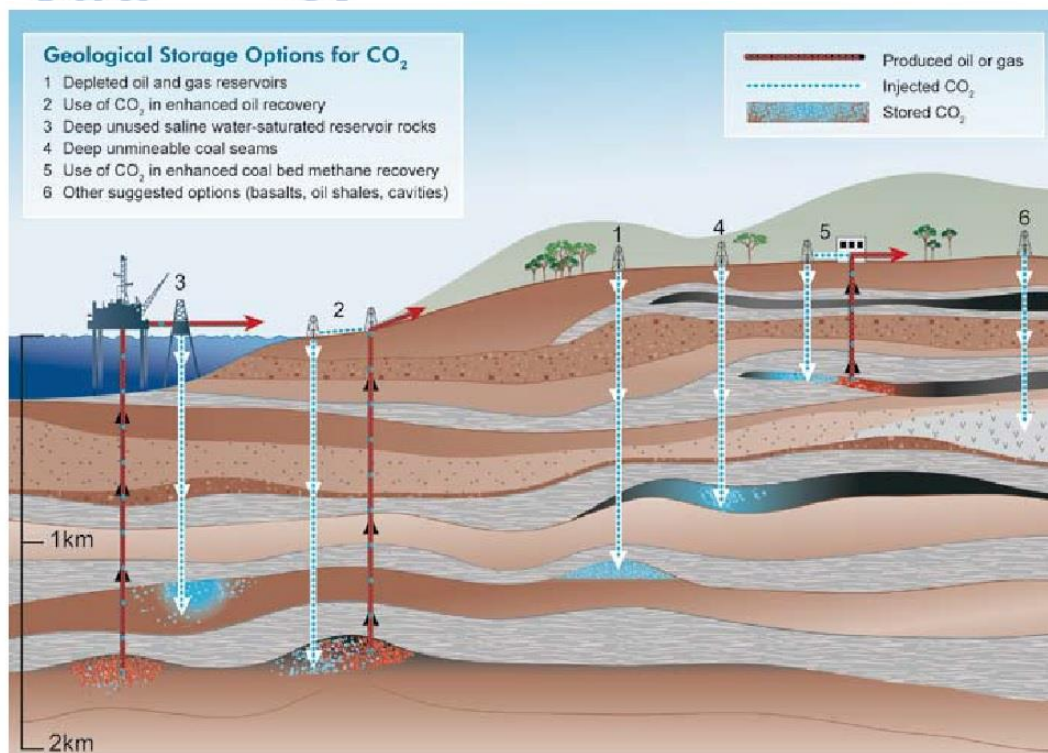
4.2 Μεταφορά μέσω πλοίων



Εικόνα 4.3 : Πλοία ειδικά κατασκευασμένα για τη μεταφορά CO₂ (<https://www.green4sea.com/new-liquid-co2-ship-for-yara>).

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του CO₂ (πίεση, όγκος, θερμοκρασία), του επιτρέπουν να μπορεί να μεταφερθεί είτε μέσω ημι-ψυκτικών δεξαμενόπλοιων (σε συνθήκες -50 °C και 7 bars) είτε μέσω πλοίων μεταφοράς πεπιεσμένου φυσικού αερίου. Η σύγχρονη τεχνολογία εστιάζει σε μεταφορικά πλοία με την ικανότητα μεταφοράς της τάξης των 10–50 kt. Η μεταφορά CO₂ μέσω πλοίων προσφέρει ευελιξία, καθώς επιτρέπει τη συλλογή και το συνδυασμό CO₂ από διαφορετικές πηγές (μικρού έως και μεσαίου μεγέθους) και τη μείωση του κόστους επενδύσεων για υποδομές. Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεταφοράς μέσω πλοίων είναι η προσαρμοστικότητα που υπάρχει σε σχέση με το χρόνο παράδοσης του CO₂ για αποθήκευση σε ταμειυτήρα.

5 Γεωλογική αποθήκευση CO₂



Εικόνα 5.1 : Οι διαθέσιμες επιλογές που υπάρχουν για την αποθήκευση του CO₂ σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς (από Cook, 1999).

Το υπέδαφος αποτελεί το μεγαλύτερο ταμειευτήρα άνθρακα της γης, καθώς η συντριπτική πλειοψηφία του υπάρχοντος άνθρακα βρίσκεται εκεί σε μορφή γαιανθράκων, υδρογονανθράκων, πλούσιων σε οργανικό υλικό αργίλλων και ανθρακικών πετρωμάτων. Η αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς αποτελεί μια φυσική διεργασία του άνω μέρους του φλοιού της γης για εκατομμύρια χρόνια. Το διοξείδιο του άνθρακα που προέρχεται από τη βιολογική, πυριγενή δραστηριότητα και τις χημικές αντιδράσεις μεταξύ πετρωμάτων και ρευστών, συσσωρεύεται φυσικά στο υπέδαφος με τη μορφή ανθρακικών ορυκτών, ως μίγμα αερίου ή ως καθαρό CO₂. Η μηχανική έγχυση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς, πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στο Texas των ΗΠΑ στις αρχές του 1970, ως μέρος διεργασιών enhanced oil recovery (EOR) και από τότε συνεχίζεται σε διάφορα μέρη του κόσμου.

Η αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς ως ένα μέσο για το μετριασμό του φαινομένου του θερμοκηπίου προτάθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970, αλλά χρειάστηκε να φτάσουμε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και την εκπόνηση πολλών μελετών για να αποκτήσει αυτή η ιδέα αξιοπιστία (Marchetti, 1977; Baes et al., 1980; Kaarstad, 1992; Koide et al., 1992; van der Meer, 1992; Gunter et al., 1993; Holloway and Savage, 1993; Bachu et al., 1994; Korbol and Kaddour, 1994). Το 1996, το πρώτο μεγάλο σκέλος project αποθήκευσης CO₂ ξεκίνησε από την πετρελαϊκή εταιρεία Statoil και τους εταίρους της στο κοίτασμα αερίου Sleipner στη Βόρεια Θάλασσα.

Στο τέλος της δεκαετίας του 1990, πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός ερευνητικών προγραμμάτων στις ΗΠΑ, τον Καναδά, την Ιαπωνία, την Ευρώπη και την Αυστραλία. Επιπλέον την ίδια χρονική περίοδο ένας μεγάλος αριθμός πετρελαϊκών εταιριών άρχισαν να ενδιαφέρονται έντονα για την προοπτική της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂, ιδιαίτερα για κοιτάσματα αερίου με υψηλό ποσοστό σε CO₂ όπως το κοίτασμα Natuna στην Ινδονησία, το κοίτασμα In Salah στην Αλγερία και το κοίτασμα Gorgon στην Αυστραλία. Έτσι σε λιγότερο από μια δεκαετία, η προοπτική της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂ μετατράπηκε από μια επιλογή χαμηλού ενδιαφέροντος σε μια επιλογή που μπορεί σημαντικά να μειώσει τους εκπεμπόμενους ρύπους διοξειδίου του άνθρακα.

Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η γεωλογική αποθήκευση του CO₂, πρέπει πρώτα αυτό να συμπιεστεί και να μετατραπεί σε ένα πυκνό ρευστό, σε μια κατάσταση γνωστή και ως 'υπερκρίσιμη κατάσταση'. Ανάλογα με τη γεωθερμική βαθμίδα που επικρατεί στην εκάστοτε περιοχή, η πυκνότητα του CO₂ θα αυξάνει με υψηλό ρυθμό ανάλογα με το βάθος έως και περίπου τα 800 m, όπου από εκεί και βαθύτερα το εισπιεζόμενο ρευστό θα βρίσκεται σε μια υπερκρίσιμη κατάσταση. Η γεωλογική αποθήκευση του CO₂ μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια πληθώρα γεωλογικών σχηματισμών σε ιζηματογενείς λεκάνες, όπως σε γεωλογικές λεκάνες, κοιτάσματα πετρελαίου, εξαντλημένα κοιτάσματα αερίου, φλέβες γαιάνθρακα και σε βαθείς σχηματισμούς κορεσμένους σε αλατούχο νερό. Επιπλέον η γεωλογική αποθήκευση είναι δυνατή τόσο σε χερσαία τμήματα όσο και σε υπεράκτια τμήματα. Είναι

σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν είναι όλες οι γεωλογικές λεκάνες κατάλληλες για γεωλογική αποθήκευση του CO₂. Κάποιες λεκάνες είναι πολύ ρηχές και σε κάποιες άλλες λεκάνες υπάρχουν πετρώματα χαμηλής διαπερατότητας ή πετρώματα χαμηλής δυνατότητας δράσης ως καλύμματα (cap). Οι λεκάνες που θεωρούνται κατάλληλες για αποθήκευση CO₂ είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από πλούσιες συσσωρεύσεις ιζημάτων, διαπερατά πετρώματα κορεσμένα σε υφάλμυρο νερό (αλάτων) και μεγάλης έκτασης πετρωμάτων-καλυμμάτων χαμηλού πορώδους (seals).

Επιπλέον γεννάται και ένα μεγάλο ερώτημα που έχει να κάνει με το εάν η χωρητικότητα των γεωλογικών σχηματισμών είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες για αποθήκευση του CO₂ του πλανήτη τις επόμενες δεκαετίες. Για να μπορέσει να απαντηθεί αυτό το ερώτημα θα ήταν χρήσιμο να γίνει ένα παραλληλισμός μεταξύ των εννοιών 'resources' και 'reserves' που χρησιμοποιούνται για τα ορυκτά κοιτάσματα (McKelvey, 1972). Τα πιστοποιημένα reserves αποτελούν μόνο ένα μικρό ποσοστό από αυτά των resources. Το υπολογιζόμενο νούμερο των resources βασίζεται στην τιμή πώλησης του αγαθού, το κόστος εκμετάλλευσης του αγαθού, τη διαθεσιμότητα των κατάλληλων τεχνολογιών, απόδειξη ότι το αγαθό όντως υπάρχει και ότι η εκμετάλλευση του αγαθού είναι αποδεκτή από την κοινωνία. Παρομοίως, για να μετατραπεί η τεχνικά γεωλογική χωρητικότητα σε οικονομικά συμφέρουσα χωρητικότητα, το project αποθήκευσης θα πρέπει να είναι οικονομικά βιώσιμο, τεχνικά δυνατό, ασφαλές, περιβαλλοντικά βιώσιμο και αποδεκτό από την κοινωνία. Με βάση αυτούς τους περιορισμούς, είναι αναπόφευκτο ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης θα είναι σημαντικά μικρότερη από την τεχνικά δυνατή αποθήκευση.

Τέλος είναι πολύ σημαντικό η γεωλογική αποθήκευση να γίνεται με ασφάλεια έτσι ώστε το εισπιεζόμενο CO₂ να κατακρατείται στον γεωλογικό ταμιευτήρα για το επιθυμητό χρονικό διάστημα (δεκαετίες, αιώνες ή χιλιετίες). Για να διασφαλιστεί η ασφάλεια του κόσμου, οι χώροι αποθήκευσης πρέπει να σχεδιάζονται και να λειτουργούν με κύριο γνώμονα την όσο το δυνατόν μικρότερη πιθανότητα διαρροής. Επιπλέον, πρέπει να αναγνωρίζονται οι πιθανοί 'δρόμοι' διαφυγής του CO₂ από τους ταμιευτήρες και να λαμβάνονται μέτρα παρακολούθησης και αντιμετώπισής τους.

5.1 Γενικά χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών κατάλληλων για αποθήκευση CO₂

Υπάρχουν πολλές ιζηματογενείς περιοχές στον κόσμο (εικόνα 5.2) που είναι κατάλληλες για αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα. Σε γενικές γραμμές οι γεωλογικές τοποθεσίες που είναι κατάλληλες για αποθήκευση του CO₂ πρέπει να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- ✓ Επαρκή χωρητικότητα
- ✓ Το υπερκείμενο γεωλογικό στρώμα να μπορεί να δράσει ικανοποιητικά ως κάλυμμα (sealing caprock)
- ✓ Ένα επαρκώς σταθερό γεωλογικό περιβάλλον έτσι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα που θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα του project

Επιπλέον πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κάποια κριτήρια για να επαληθευτεί η καταλληλότητα μιας υποψήφιας γεωλογικής λεκάνης. Αυτά τα κριτήρια περιλαμβάνουν:

- ✓ Χαρακτηριστικά της λεκάνης (τεκτονική δραστηριότητα, τύπος ιζημάτων, γεωθερμικό και υδροδυναμικό καθεστώς που επικρατεί)
- ✓ Οι διαθέσιμοι πόροι της λεκάνης (υδρογονάνθρακες, γαιάνθρακας, αλάτι)
- ✓ Η ύπαρξη των κατάλληλων υποδομών
- ✓ Κοινωνικά ζητήματα (βαθμός ανάπτυξης και επίπεδο οικονομίας της τοπικής περιοχής, περιβαλλοντικές ανησυχίες)

Επίσης η καταλληλότητα των ιζηματογενών λεκανών για αποθήκευση CO₂ εξαρτάται μερικώς και από την τοποθεσία τους στην ηπειρωτική πλάκα. Λεκάνες οι οποίες σχηματίστηκαν σε μισο-ηπειρωτικές τοποθεσίες (mid-continent locations) ή κοντά στα όρια σταθερών ηπειρωτικών πλακών, αποτελούν ιδανικούς στόχους για μακροχρόνια αποθήκευση του CO₂ λόγω της σταθερότητας και της δομής τους. Τέτοιες λεκάνες είναι δυνατόν να βρεθούν σχεδόν σε όλες τις ηπείρους και γύρω από τον Ατλαντικό, Αρκτικό, Ινδικό Ωκεανό. Επιπλέον η δυνατότητα αποθήκευσης CO₂ σε λεκάνες που βρίσκονται πίσω από βουνά που σχηματίστηκαν από τη σύγκρουση τεκτονικών πλακών, φαίνεται να έχει αρκετά καλές προοπτικές. Τέτοια παραδείγματα υπάρχουν σε λεκάνες κοντά στο Rocky Mountain, στα Appalachia, στις Andes στην ήπειρο της Αμερικής, βόρεια των Alps και των Carpathians και δυτικά των Urals στην ήπειρο της Ευρώπης και νότια του Zagros και των Himalayas στην ήπειρο της

Ασίας. Από την άλλη πλευρά, λεκάνες που βρίσκονται σε τεκτονικά ενεργές περιοχές, όπως αυτές κοντά στον Ειρηνικό Ωκεανό ή στη βόρεια Μεσόγειο, αποτελούν λιγότερο κατάλληλες περιοχές για αποθήκευση CO₂ λόγω του αυξημένου κινδύνου διαρροών του CO₂ (Chiodini et al., 2001; Granieri et al., 2003). Λεκάνες που βρίσκονται στις άκρες τεκτονικών πλακών, όπου υπάρχει καταβύθιση ή ανάμεσα σε ενεργές οροσειρές είναι ακόμα λιγότερο κατάλληλες για αποθήκευση CO₂ λόγω των ισχυρών πτυχώσεων και ρηγμάτων που παρουσιάζουν. Ωστόσο η κάθε λεκάνη πρέπει να εξετάζεται για την καταλληλότητά της σαν ξεχωριστή περίπτωση. Οι λεκάνες οι οποίες είναι εντελώς ακατάλληλες για αποθήκευση CO₂ παρουσιάζουν συνήθως τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Είναι πολύ λεπτές (≤ 1000 m)
2. Έχουν πολύ φτωχές ιδιότητες ταμιευτήρα και καλύμματος
3. Είναι πάρα πολύ ρηγματωμένες και ρωγματομένες
4. Βρίσκονται ανάμεσα σε ζώνες πτυχώσεων
5. Παρουσιάζουν ισχυρά ασύμφωνες αλληλουχίες στρωμάτων
6. Έχουν υποστεί σημαντική διαγένεση
7. Αποτελούνται από ταμιευτήρες που παρουσιάζουν υπερπίεση

Η αποδοτικότητα της αποθήκευσης του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς, ορίζεται ως η ποσότητα του αποθηκευμένου CO₂ ανά μονάδα όγκου (Brennan and Burruss, 2003) και αυτή αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του CO₂. Η ασφάλεια της διαδικασίας της αποθήκευσης επίσης αυξάνεται ανάλογα με το πόσο υψηλή είναι η πυκνότητα του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η άνωση η οποία ευνοεί την ανοδική μετανάστευση του CO₂, είναι ισχυρότερη για ένα ελαφρύ ρευστό. Γενικά η πυκνότητα αυξάνεται σημαντικά ανάλογα με το βάθος όταν το CO₂ βρίσκεται σε αέρια φάση ενώ όταν το CO₂ περνά από την αέρια φάση στην πυκνή φάση τότε η πυκνότητά του αυξάνεται ελάχιστα ανάλογα με το βάθος. Μάλιστα έχουν παρατηρηθεί και περιπτώσεις όπου η πυκνότητα του πυκνού πλέον CO₂ μειώνεται με περαιτέρω αύξηση του βάθους, ανάλογα με τη γεωθερμική βαθμίδα που επικρατεί στην περιοχή (Ennis-King και Paterson, 2001; Bachu, 2003). Ιζηματογενείς λεκάνες οι οποίες χαρακτηρίζονται ως 'κρύες' λόγω της χαμηλής γεωθερμικής βαθμίδας που επικρατεί σε αυτές, είναι πιο ευνοϊκές για αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα (Bachu, 2003) επειδή το CO₂ αποκτά

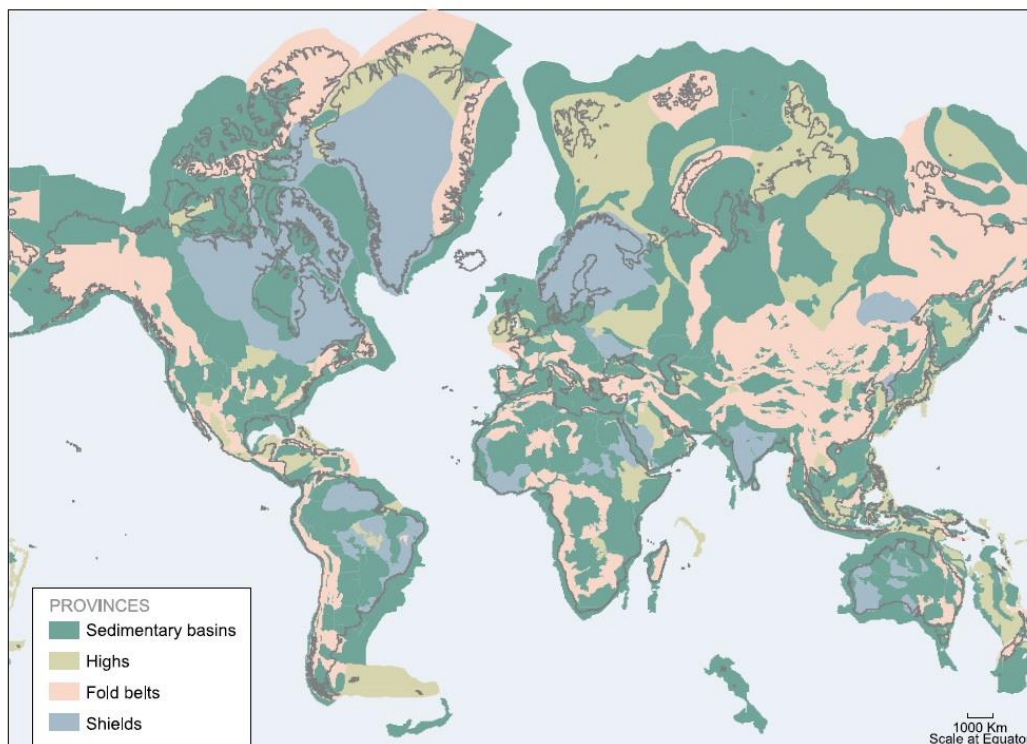
υψηλότερη πυκνότητα σε ρηχότερα βάθη (700-1000 m), ενώ στις χαρακτηριζόμενες 'θερμές' λεκάνες το CO₂ αποκτά την απαιτούμενη πυκνότητα σε μεγαλύτερα βάθη (1000-1500 m). Έτσι γίνεται κατανοητό ότι το βάθος του σχηματισμού αποθήκευσης, είναι δυνατόν να επηρεάσει και την επιλογή της τοποθεσίας αποθήκευσης.

Η ύπαρξη κατάλληλων τιμών πορώδους, πάχους (χωρητικότητα αποθήκευσης) και διαπερατότητας (εισπιδεσιμότητα) του υποψήφιου σχηματισμού, είναι υψίστης σημασίας. Ο σχηματισμός όπου θα γίνει η αποθήκευση του CO₂ θα πρέπει να καλύπτεται από εκτενείς σχηματισμούς που δρουν ως κάλυμμα (άργιλλοι, αλάτια, στρώματα ανυδριτών), για να αποφευχθεί η μετανάστευση του CO₂ σε υπερκείμενους, ρηχούς σχηματισμούς και έπειτα στην επιφάνεια.

Τέλος, η ωριμότητα μιας λεκάνης όσον αφορά τους υδρογονάνθρακες που υπάρχουν σε αυτή αλλά και τη φάση της έρευνας και παραγωγής που έχουν περάσει είναι ένα επιπλέον κριτήριο για την επιλογή της τοποθεσίας αποθήκευσης (Bachu, 2000). Λεκάνες οι οποίες έχουν εξερευνηθεί ελάχιστα για πιθανή ύπαρξη υδρογονανθράκων, αποτελούν αβέβαιους στόχους για αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα λόγω της περιορισμένης γεωλογικής γνώσης που υπάρχει για την περιοχή και της πιθανότητας μόλυνσης μη ανακαλύψιμων υδρογονανθράκων. Οι ώριμες ιζηματογενείς λεκάνες αποτελούν κύριο στόχο για αποθήκευση του CO₂ για τους εξής λόγους:

- ✓ Έχουν γνωστά χαρακτηριστικά
- ✓ Οι περιεχόμενοι σε αυτές υδρογονάνθρακες ή άνθρακας έχουν ήδη ανακαλυφθεί και παραχθεί
- ✓ Κάποιοι πετρελαϊκοί ταμιευτήρες μπορεί να είναι ή να φτάνουν στη φάση της εξάντλησης
- ✓ Η απαραίτητη υποδομή για τη μεταφορά και την εισπίεση του CO₂ μπορεί να είναι ήδη διαθέσιμη

Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι η παρουσία γεωτρήσεων στις ώριμες ιζηματογενείς λεκάνες, μπορεί να αποτελέσουν πιθανές οδούς διαφυγής του εισπιδεζόμενου CO₂ και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία όταν γίνεται ο σχεδιασμός του project αποθήκευσης.



Εικόνα 5.2 : Κατανομή των ιζηματογενών λεκανών ανά τον κόσμο (από Bradshaw και Dance, 2005; Και USGS, 2001a). Γενικά οι ιζηματογενείς λεκάνες αποτελούν τις καλύτερες υποψήφιες περιοχές για αποθήκευση του CO₂. Ωστόσο, υποψήφιες για αποθήκευση του CO₂ μπορούν να βρεθούν και σε περιοχές με ζώνες πτυχώσεων (fold belts) και σε highs. Αντίθετα οι περιοχές shield δεν φαίνονται κατάλληλες για αποθήκευση του CO₂.

5.2 Σχηματισμοί κατάλληλοι για αποθήκευση CO₂

5.2.1 Εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου

Οι εξαντλημένοι ταμειυτήρες πετρελαίου και αερίου αποτελούν κύριους στόχους για αποθήκευση του CO₂ για αρκετούς λόγους. Καταρχάς, το πετρέλαιο και το αέριο που ήταν αρχικά συγκεντρωμένο στις παγίδες δεν διέφυγε για αρκετά εκατομμύρια χρόνια, κάτι που δείχνει την ακεραιότητα και την ασφάλεια της δομής. Δεύτερον, η γεωλογική δομή και οι φυσικές ιδιότητες των περισσοτέρων κοιτασμάτων πετρελαίου και αερίου, έχουν μελετηθεί εκτενώς. Τρίτον, διάφορα υπολογιστικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την πετρελαϊκή βιομηχανία έτσι ώστε να προβλέπεται η κίνηση των ρευστών, η συμπεριφορά εκτόπισης και η παγίδευση των υδρογονανθράκων. Τέλος μέρος της απαραίτητης υποδομής και των γεωτρήσεων υπάρχουν ήδη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις διεργασίες αποθήκευσης του CO₂. Εν τούτοις η χωρητικότητα του ταμειυτήρα μπορεί να είναι περιορισμένη για να αποφευχθούν υπερπτήσεις που μπορούν να βλάψουν το πέτρωμα-κάλυμμα.

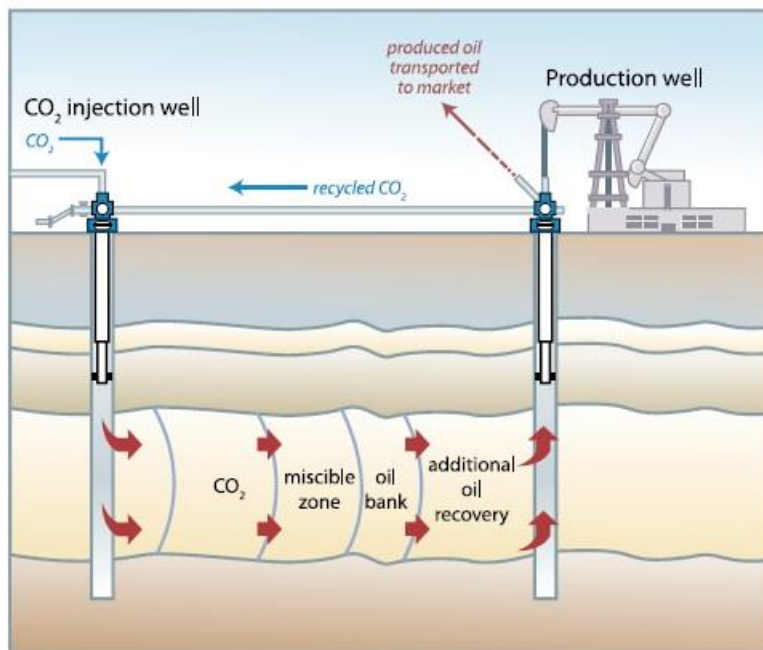
5.2.2 Enhanced oil recovery

Το enhanced oil recovery (EOR) με την εισπίεση CO₂, προσφέρει οικονομικά κέρδη λόγω της αύξησης της παραγωγής. Από την αρχική ποσότητα του πετρελαίου που βρίσκεται παγιδευμένο στους ταμιευτήρες (original oil in place), μόνο το 5-40% μπορεί να ανακτηθεί με χρήση πρωτογενών συμβατικών μεθόδων παραγωγής (Holt et al., 1995). Ένα επιπρόσθετο 10-20% της αρχικής ποσότητας του πετρελαίου μπορεί να ανακτηθεί μέσω μεθόδων δευτερογενούς ανάκτησης (εισπίεση μεγάλων ποσοτήτων νερού). Με χρήση μεθόδων enhanced oil recovery, όπως εισπίεση αναμίξιμων ουσιών σαν το CO₂ είναι δυνατόν ν' ανακτηθεί ένα επιπρόσθετο 7-23% του αρχικού εγκλωβισμένου πετρελαίου (Martin και Taber, 1992; Moritis, 2003).

Η μετατόπιση του πετρελαίου από το εισπιεζόμενο CO₂, βασίζεται στη συμπεριφορά των φάσεων του CO₂ και των μιγμάτων αργού πετρελαίου, τα οποία εξαρτώνται ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία και την πίεση του ταμιευτήρα και τη σύσταση του πετρελαίου. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται, ποικίλλουν από διόγκωση του πετρελαίου και μείωση του ιξώδους όταν εισπνέζονται μη αναμίξιμα ρευστά σε χαμηλές πιέσεις, σε πλήρη μετατόπιση του πετρελαίου όταν χρησιμοποιούνται αναμίξιμα ρευστά σε υψηλές πιέσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ένα ποσοστό του εισπιεζόμενου CO₂ της τάξης του 50-67% επιστρέφει στην επιφάνεια μαζί με το παραγόμενο πετρέλαιο (Bondor, 1992) και συνήθως διαχωρίζεται και επαναεισπνέζεται στον ταμιευτήρα, μειώνοντας έτσι το κόστος λειτουργίας. Η υπόλοιπη ποσότητα του CO₂ παγιδεύεται στον ταμιευτήρα πετρελαίου μέσω διάφορων τρόπων.

Οι ταμιευτήρες πετρελαίου πιθανώς πρέπει να ικανοποιούν κάποια περαιτέρω κριτήρια για να γίνει με επιτυχία η αποθήκευση του CO₂ στις διεργασίες EOR (Klins, 1984; Taber et al., 1997; Kovscek, 2002; Shaw και Bachu, 2002). Σε γενικές γραμμές το βάθος του ταμιευτήρα πρέπει να είναι μεγαλύτερο των 600m. Η εισπίεση μη αναμίξιμων ρευστών συνήθως είναι αρκετή για πετρέλαια μέσης έως υψηλής βαρύτητας (12-25 API). Η εισπίεση αναμίξιμων ρευστών κρίνεται απαραίτητη για ελαφριά πετρέλαια, χαμηλού ιξώδους (25-48 API). Επιπλέον η πίεση του ταμιευτήρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη πίεση ανάμιξης (10-15 MPa), η οποία είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί αναμιξιμότητα ανάμεσα στο πετρέλαιο του ταμιευτήρα και του εισπιεζόμενου

CO₂. Η ετερογένεια του ταμιευτήρα επηρεάζει επίσης την αποδοτικότητα της αποθήκευσης του ταμιευτήρα. Η διαφορά στην πυκνότητα του ελαφρύτερου CO₂ και του πετρελαίου και νερού του ταμιευτήρα, οδηγεί στην κίνηση του CO₂ στο άνω μέρος του ταμιευτήρα. Αυτό το φαινόμενο γίνεται εντονότερο εάν ο ταμιευτήρας είναι σχετικά ομοιογενής και έχει υψηλή διαπερατότητα, επηρεάζοντας αρνητικά τη διαδικασία της αποθήκευσης και την ανάκτηση του πετρελαίου. Κατά συνέπεια η ετερογένεια ενός ταμιευτήρα μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο, επιβραδύνοντας την ανοδική πορεία του CO₂ στο άνω μέρος του ταμιευτήρα και αναγκάζοντάς το να εξαπλωθεί πλευρικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη εισχώρηση του CO₂ στο σχηματισμό και τη μεγαλύτερη δυναμικότητα αποθήκευσης (Bondor, 1992; Kovcek, 2002; Flett et al., 2005).



Εικόνα 5.3 : Σχέδιο το οποίο αναπαριστά την εισπίεση του CO₂ για σκοπούς EOR, με κάποιο ποσοστό του εισπνεζόμενου CO₂ να παγιδεύεται και αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα (από IEA Greenhouse Gas R&D Programme). Το CO₂, το οποίο παράγεται μαζί με το πετρέλαιο διαχωρίζεται και έπειτα εισπνέζεται ξανά στο σχηματισμό.

5.2.3 Enhanced gas recovery

Παρά το γεγονός ότι έως και το 95% του αρχικά παγιδευμένου αερίου στους ταμιευτήρες (original gas in place) μπορεί να παραχθεί με χρήση συμβατικών μεθόδων, ωστόσο η εισπίεση του CO₂ σε εξαντλημένους ταμιευτήρες αερίου είναι δυνατόν να βελτιώσει την ανάκτηση του αερίου, αυξάνοντας ξανά την πίεση του ταμιευτήρα (van der Burgt et al., 1992; Koide και Yamazaki, 2001; Oldenburg et al., 2001). Το enhanced gas recovery έχει μέχρι στιγμής πραγματοποιηθεί μόνο σε πιλοτικό στάδιο (Gaz de France K12B project, Ολλανδία). Κάποιοι ερευνητές όμως ανέφεραν ότι η εισπίεση CO₂ μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερους συντελεστές ανάκτησης αερίου, ειδικότερα εάν τα κοιτάσματα αυτά παρουσιάζουν ετερογένεια (Clemens και Wit, 2002).

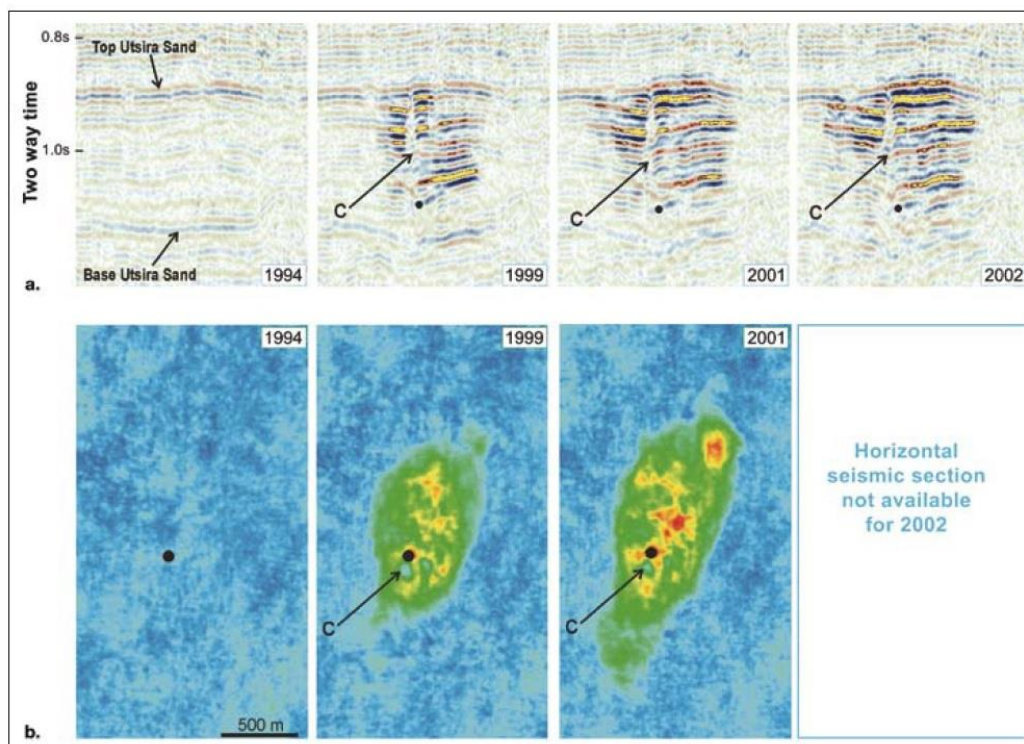
5.2.4 Σχηματισμοί κορεσμένοι σε αλατούχο νερό

Οι σχηματισμοί κορεσμένοι σε αλατούχο νερό είναι ιζηματογενή πετρώματα μεγάλου βάθους, τα οποία είναι κορεσμένα σε νερό σχηματισμού ή άλμη και περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένων σ

. Αυτοί οι σχηματισμοί είναι διαδεδομένοι και περιέχουν τεράστιες ποσότητες νερού, που όμως είναι ακατάλληλο για γεωργική χρήση ή κατάποση από ανθρώπους. Τα νερά σχηματισμού μεταβλητής αλατότητας χρησιμοποιούνται τόσο για την παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας όσο και σε health spas. Επειδή η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί αλλά και επειδή οι περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν καλή δυναμικότητα σε γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζονται από υψηλή ρηγμάτωση και απότομη αύξηση της θερμοκρασίας ανάλογα με το βάθος, η γεωλογική αποθήκευση CO₂ σε αυτούς τους σχηματισμούς δεν θεωρείται ιδανική επιλογή.

Το Sleipner Project στη Βόρεια Θάλασσα αποτελεί το καλύτερο παράδειγμα αποθήκευσης CO₂ σε σχηματισμούς κορεσμένους σε αλατούχο νερό. Επίσης αποτελεί το πρώτο εμπορικό project με στόχο τη γεωλογική αποθήκευση του CO₂. Περίπου 1 Mt CO₂ αφαιρείται ετησίως από το παραγόμενο φυσικό αέριο και εισπνέζεται σε γεωλογικό ταμιευτήρα στο Sleipner. Το CO₂ εισπνέζεται σε φτωχά συνδεδεμένες άμμους (poorly cemented sands) σε βάθος 800-1000 m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Ο ψαμμίτης περιέχει στη μάζα του

λεπτές στρώσεις αργίλλων, οι οποίες και επηρεάζουν την εσωτερική μετακίνηση του εισπιεζόμενου CO₂. Το υπερκείμενο βασικό πέτρωμα-κάλυμμα είναι ένα παχύ και εκτεταμένο στρώμα αργίλλου. Ο κορεσμένος σχηματισμός σε αλατούχο νερό στον οποίο γίνεται η εισπίεση του CO₂, έχει πολύ μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης. Το εισπιεζόμενο CO₂ και οι μετακινήσεις του μέσα στον ταμιευτήρα παρακολουθούνται λεπτομερώς μέσω σεισμικών διασκοπήσεων (seismic time-lapse). Η κάθετη τομή, η οποία φαίνεται στην εικόνα 5.4a, δείχνει την ανοδική μετακίνηση του CO₂, λόγω της άνωσης, αλλά και τη μερική του μετακίνηση πλευρικά λόγω της χαμηλής διαπερατότητας του σχηματισμού. Επίσης φαίνεται ότι το πέτρωμα κάλυμμα αποτρέπει το εισπιεζόμενο CO₂ να διαφύγει του σχηματισμού. Στην εικόνα 5.4b, φαίνεται η σταδιακή επέκταση του CO₂ στον ταμιευτήρα. Έως σήμερα το CO₂ καταλαμβάνει περισσότερα από 5 km² μέσα στο σχηματισμό. Επιπλέον μελέτες και προσομοιώσεις του ταμιευτήρα στο Sleipner έδειξαν ότι η αλμή που θα είναι κορεσμένη σε CO₂ θα αποκτήσει μεγαλύτερη πυκνότητα και θα καταβυθιστεί, εξαλείφοντας τον κίνδυνο μακροπρόθεσμων διαρροών (Lindeberg και Bergmo, 2003).



Εικόνα 5.4 : a) Κάθετες σεισμικές τομές στις οποίες απεικονίζεται η μετακίνηση του εισπνευσμένου CO₂ στο Utsira Sand στο Sleipner Gas Field, με την πάροδο του χρόνου. Φαίνεται καθαρά η καμινάδα του υψηλά κορεσμένου CO₂ (c) πάνω από το σημείο εισπνευσσης (μαύρη κουκίδα) και τα φωτεινά στρώματα (bright layers) που αντιστοιχούν σε υψηλή ακουστική απόκριση λόγω της παγίδευσης του αερίου CO₂ σε στρώματα ψαμμίτη κάτω από οριζόντες χαμηλής διαπερατότητας μέσα στον ταμειευτήρα. b) Οριζόντιες σεισμικές τομές στις οποίες απεικονίζεται το εισπνευσμένο CO₂ στο Sleipner και η επέκτασή του με την πάροδο του χρόνου. Αυτού του είδους η σεισμική παρακολούθηση ολοκληρώθηκε το 2001, έτσι δεν υπήρχαν δεδομένα για το έτος 2002. (από Andy Chadwick και το CO₂STORE project.

5.2.5 Φλέβες γαιάνθρακα

Ο γαιάνθρακας περιέχει κάποιες ρωγματώσεις οι οποίες προσδίδουν μερική διαπερατότητα στο σύστημα. Ανάμεσα σε αυτές τις ρωγματώσεις, ο στερεός άνθρακας διαθέτει ένα πολύ μεγάλο αριθμό μικροπόρων, στους οποίους τα αέρια μόρια που προέρχονται από τις ρωγματώσεις μπορούν να διαχυθούν και να προσροφηθούν. Ο άνθρακας μπορεί με φυσικό τρόπο να προσροφήσει πολλά αέρια και είναι δυνατόν να περιέχει έως και 25 nm³ μεθανίου ανά τόνο άνθρακα σε συνθήκες πίεσης που επικρατούν στις φλέβες γαιάνθρακα. Γενικά το CO₂ προσροφάται πιο εύκολα απ' ό,τι το μεθάνιο. Η ογκομετρική αναλογία του CO₂:CH₄ κυμαίνεται από 1 για ώριμους γαιάνθρακες όπως είναι ο ανθρακίτης, σε 10 ή άνω για νεότερους, μη ώριμους γαιάνθρακες όπως είναι ο λιγνίτης. Εάν λοιπόν εισπνεστεί CO₂ μέσω γεωτρήσεων σε φλέβες γαιάνθρακα,

τότε αυτό θα μετακινηθεί μέσω των ρωγματώσεων του γαιάνθρακα, θα διαχυθεί στη μήτρα του πετρώματος και εν τέλει θα προσροφηθεί στην επιφάνεια των μικροπόρων του γαιάνθρακα, ελευθερώνοντας έτσι αέρια με μικρότερη συνάφεια προς το πέτρωμα (π.χ μεθάνιο). Δηλαδή η εισπίεση CO₂ σε φλέβες γαιάνθρακα, μπορεί να εκτοπίσει το μεθάνιο βελτιώνοντας έτσι την ανάκτηση του μεθανίου (Enhance Coal Bed Methane recovery).

Το CO₂ έχει εισπιαστεί με επιτυχία στο Allison Project και στη Λεκάνη της Alberta στον Καναδά (Gunter et al., 2005), σε βάθη μεγαλύτερα από αυτά που αντιστοιχούν στο κρίσιμο σημείο του CO₂. Η εισπίεση CO₂ σαν μέθοδος ECBM έχει τη δυνατότητα να αυξήσει το ποσοστό του ανακτώμενου μεθανίου στο 90%, σε σύγκριση με το 50% που ανακτάται με χρήση συμβατικών μεθόδων (Stevens et al., 1996).

5.2.6 Δευτερεύοντες σχηματισμοί για αποθήκευση CO₂

5.2.6.1 Βασάλτες

Στρώματα βασαλτών μπορούν να βρεθούν σε μεγάλη αφθονία σε οποιοδήποτε σημείο του κόσμου (McGrail et al., 2003). Συνήθως ο βασάλτης έχει χαμηλό πορώδες, χαμηλή διαπερατότητα και μικρή συνέχεια των πόρων σε σχέση με τον όγκο του. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι η διαπερατότητα του βασάλτη σχετίζεται με ρωγμές στη μάζα του βασάλτη, μέσω των οποίων το CO₂ μπορεί να διαφύγει εκτός και εάν υπάρχει κατάλληλο υπερκείμενο πέτρωμα-κάλυμμα. Παρόλα αυτά, ο βασάλτης παρουσιάζει κάποιες δυνατότητες για παγίδευση ορυκτής ύλης του CO₂ (mineral trapping), επειδή το εισπιαζόμενο CO₂ είναι πιθανόν να αντιδράσει με πυριτικά ορυκτά του βασάλτη και να σχηματίσουν ανθρακικά ορυκτά (McGrail et al., 2003). Περισσότερη έρευνα είναι απαραίτητη για να εξαχθούν πιο χρήσιμα συμπεράσματα αλλά σε γενικές γραμμές οι βασάλτες φαίνεται να μην είναι κατάλληλοι αρκετά για αποθήκευση CO₂.

5.2.6.2 Σχιστόλιθοι πλούσιοι σε πετρέλαιο ή αέριο

Αποθέσεις σχιστολίθων πλούσιων σε πετρέλαιο ή αέριο, υπάρχουν σε πολλά μέρη του κόσμου. Ο μηχανισμός παγίδευσης του πετρελαϊκού σχιστόλιθου είναι παρόμοιος με το μηχανισμό παγίδευσης των γαιανθράκων, δηλαδή προσρόφηση του CO₂ σε οργανικό υλικό. Η χρήση του CO₂ για τη βελτίωση της παραγωγής από κοιτάσματα σχιστολίθων είναι δυνατόν να μειώσει το κόστος της αποθήκευσης του CO₂. Η δυνατότητα για αποθήκευση CO₂ σε πετρελαϊκούς σχιστόλιθους είναι σχετικά άγνωστη λόγω της περιορισμένης έρευνας στο πεδίο αυτό, αλλά ο μεγάλος όγκος σχιστολίθων που υπάρχει αφήνει αισιοδοξία για το μέλλον.

5.2.6.3 Εγκαταλελειμμένα ορυχεία

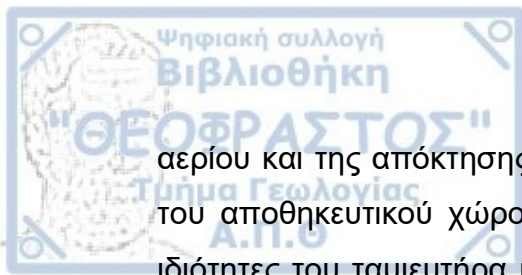
Η καταλληλότητα των ορυχείων για αποθήκευση CO₂, εξαρτάται από τη φύση και την ικανότητα στεγανοποίησης του πετρώματος προς εξόρυξη. Ισχυρά ρωγματωμένα πετρώματα όπως είναι τα πυριγενή ή μεταμορφωμένα σίγουρα αντενδείκνυνται για ένα τέτοιο εγχείρημα. Αντιθέτως ορυχεία που εκμεταλλεύονται ιζηματογενή πετρώματα όπως το ανθρακικό κάλιο, το αλάτι ή στρωματογραφικές συγκεντρώσεις μολύβδου και ψευδαργύρου προσφέρουν κάποιες δυνατότητες για αποθήκευση του CO₂. Τα εγκαταλελειμμένα ανθρακωρυχεία προσφέρουν τη δυνατότητα αποθήκευσης του CO₂, δίνοντας και το πλεονέκτημα της προσρόφησης του CO₂ στον εναπομείναντα άνθρακα (Piessens και Dusaer, 2004). Ωστόσο τα υπερκείμενα πετρώματα των ανθρακικών είναι ισχυρά ρωγματωμένα, κάτι το οποίο αυξάνει τον κίνδυνο για πιθανές διαρροές. Ελπιδοφόρο όμως παράδειγμα μπορεί να αποτελέσει η αποθήκευση φυσικού αερίου σε ένα εγκαταλελειμμένο ανθρακωρυχείο στο Colorado των ΗΠΑ.

5.3 Εκτιμώμενος αποθηκευτικός χώρος

Ως αποθηκευτικός χώρος (storage resource) ορίζεται ο όγκος των πόρων που εκτιμάται ότι βρίσκονται στους γεωλογικούς σχηματισμούς, ενώ ως αποθηκευτική χωρητικότητα (storage capacity) ορίζεται ο όγκος του CO₂ που μπορεί να αποθηκευτεί, σε υπερκρίσιμη κατάσταση, σε έναν συγκεκριμένο γεωλογικό σχηματισμό, με βάση τις γεωλογικές, οικονομικές, και κανονιστικές συνθήκες που τον διέπουν. Οι εκτιμήσεις του αποθηκευτικού χώρου δεν λαμβάνουν υπόψη τους οικονομικούς και ρυθμιστικούς περιορισμούς και επηρεάζονται μόνο από τους φυσικούς περιορισμούς ώστε να καθοριστεί το προσιτό τμήμα του υπεδάφους. Παραδείγματα των φυσικών περιορισμών περιλαμβάνουν την απομόνωση από πόσιμο νερό, τη διαλυτότητα του CO₂ στο νερό, το διαχωρισμό λόγω βαρύτητας (gravity segregation), το πέτρωμα - κάλυμμα, τις τριχοειδείς πιέσεις, την πίεση διάδοσης ρωγματώσεων (fracture propagation pressure) και την αποτελεσματικότητα της εκτόπισης (displacement efficiency). Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη, το κάθετο πάχος του σχηματισμού, το διαθέσιμο πορώδες για την αποθήκευση CO₂ και το ποσοστό της συνολικής έκτασης που είναι προσβάσιμο στο εισπνεζόμενο CO₂. Οι οικονομικοί και κανονιστικοί περιορισμοί περιλαμβάνονται στις εκτιμήσεις της αποθηκευτικής ικανότητας σε CO₂ και υπό τις πιο ευνοϊκές συνθήκες, το 100% αυτής μπορεί να θεωρηθεί ότι ταυτίζεται με την εκτιμώμενη χωρητικότητα.

5.3.1 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου

Τα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν πολλά χαρακτηριστικά που τα καθιστούν εξαιρετικούς χώρους για γεωλογική αποθήκευση του CO₂. Οι κύριοι μηχανισμοί αποθήκευσης που δρουν σε αυτή την περίπτωση είναι η παγίδευση λόγω δομής (structure trapping) και η παγίδευση λόγω διαλυτοποίησης (solubility trapping). Η εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου είναι σχετικά, πιο απλή σε αυτά τα κοιτάσματα απ' ό,τι στους σχηματισμούς που είναι κορεσμένοι σε αλατούχο νερό και στα κοιτάσματα γαιάνθρακα. Ένας από τους λόγους είναι ότι ο χαρακτηρισμός του χώρου είναι πιο ακριβής, ως αποτέλεσμα της εξερεύνησης και της παραγωγής του πετρελαίου ή φυσικού



αερίου και της απόκτησης πολλών δεδομένων για την περιοχή. Οι εκτιμήσεις του αποθηκευτικού χώρου γίνονται με βάση τα ανακτήσιμα αποθέματα, τις ιδιότητες του ταμιευτήρα και τα επί τόπου χαρακτηριστικά του CO₂. Η γενική μορφή της εξίσωσης που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

$$G_{CO_2} = A \cdot h_n \cdot \varphi_e \cdot (1 - S_w) \cdot B \cdot \rho \cdot E \quad (1)$$

Όπου,

G_{CO₂} (μάζα): Εκτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας CO₂ του πεδίου πετρελαίου και φυσικού αερίου.

A (επιφάνεια): Καθορισμένη περιοχή που αξιολογείται για την αποθήκευση του CO₂.

h_n (μήκος): Καθαρό ύψος της στήλης του πετρελαίου και φυσικού αερίου μέσα στον ταμιευτήρα.

φ_e (αδιάστατο μέγεθος): Πορώδες, επί του όγκου που ορίζεται από το καθαρό πάχος.

S_w (αδιάστατο μέγεθος): Μέση τιμή κορεσμού σε νερό εντός της συνολικής έκτασης (A) επί το καθαρό πάχος (h_n).

B (αδιάστατο μέγεθος): Συντελεστής όγκου ταμιευτήρα (μετατρέπει τον όγκο του πετρελαίου ή αερίου στον αντίστοιχο όγκο που καταλαμβάνει σε συνθήκες ταμιευτήρα.

ρ (μάζα/ μήκος στον κύβο): Πυκνότητα του CO₂ σε πίεση και θερμοκρασία στις συνθήκες αποθήκευσης.

E (αδιάστατο μέγεθος): Συντελεστής απόδοσης που αντιπροσωπεύει το κλάσμα του συνολικού όγκου πόρων από τον οποίο έχει παραχθεί πετρέλαιο και / ή φυσικό αέριο αλλά δεν μπορεί να καταληφθεί από CO₂.

5.3.2 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε σχηματισμούς κορεσμένους σε αλατούχο νερό

Ένας αλατούχος υδροφόρος σχηματισμός, ο οποίος αξιολογείται για την αποθήκευση CO₂, ορίζεται ως ένα πορώδες και διαπερατό πέτρωμα που περιέχει νερό με TDS (Ολικά Διαλυμένα Στερεά) μεγαλύτερο από 10,000 ppm. Οι μηχανισμοί αποθήκευσης που δρουν στους σχηματισμούς αυτούς, περιλαμβάνουν παγίδευση λόγω δομής, την υδροδυναμική (hydrodynamic) και υπολειμματική (residual) παγίδευση, τη διάλυση (dissolution) και (ορυκτοποίηση) mineralization. Οι εκτιμήσεις του αποθηκευτικού χώρου που παράγονται με αυτήν τη μέθοδο, δεν λαμβάνουν υπόψη τους δύο τελευταίους μηχανισμούς. Όλα τα ιζηματογενή πετρώματα που περιλαμβάνονται στην εκτίμηση των πόρων αλατούχων υδροφόρων σχηματισμών, πρέπει να έχουν συστήματα εγκλεισμού που να αποτελούνται από σχιστόλιθο, ανυδρίτη και εβαπορίτες. Το πάχος αυτών των καλυμμάτων επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη, κατά την αξιολόγηση. Η ογκομετρική εξίσωση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των πόρων αποθήκευσης σε αυτούς τους σχηματισμούς είναι η ακόλουθη:

$$G_{CO_2} = A_t \cdot h_g \cdot \phi_{tot} \cdot \rho \cdot E \quad (2)$$

Όπου,

G_{CO2} (μάζα): Εκτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας CO₂ του πεδίου πετρελαίου και φυσικού αερίου.

A_t (επιφάνεια): Γεωγραφική ζώνη που καθορίζει τη λεκάνη ή την περιοχή που αξιολογείται για την εκτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας

h_g (Μήκος): Μικτό πάχος του σχηματισμού για την οποία αξιολογείται η αποθηκευτική ικανότητα εντός της λεκάνης ή της περιοχής που ορίζεται από την A_t

φ_{tot} (αδιάστατο μέγεθος): Πορώδες, επί του όγκου που ορίζεται από το καθαρό πάχος

ρ (μάζα/ μήκος στον κύβο): Πυκνότητα του CO₂ σε πίεση και θερμοκρασία στις συνθήκες αποθήκευσης στον συγκεκριμένο σχηματισμό κατά μέσο όρο σύμφωνα με h_g και A_t

E (Ποσοστό): Συντελεστής απόδοσης αποθήκευσης του CO₂ που αντιπροσωπεύει το κλάσμα του συνολικού όγκου πόρων που καταλαμβάνεται από το CO₂.

Υπάρχει μια ποικιλία προσεγγίσεων για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού που είναι απαραίτητα για αυτήν την εξίσωση. Οι γεωλογικές πληροφορίες από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις ή τις γεωλογικές ερευνητικές εργασίες, μπορούν να χρησιμεύσουν στην παροχή πληροφοριών σχετικά με τη λιθολογία και τις γεωφυσικές ιδιότητες των στρωμάτων της περιοχής όπου στοχεύει η αξιολόγηση. Αν τα απαραίτητα στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα, τότε πρέπει πρώτα να προηγηθεί λεπτομερής χαρακτηρισμός της περιοχής. Ο συντελεστής απόδοσης αποθήκευσης (E) εκτιμάται βάσει πολλών παραμέτρων του σχηματισμού, μεταξύ των οποίων το ποσοστό της περιοχής που φέρει τον κατάλληλο σχηματισμό για αποθήκευση (A_n/A_t), το ποσοστό του χώρου αποθήκευσης που έχει το κατάλληλο πορώδες, διαπερατότητα (h_n/h_g) και ποσοστό ενεργού πορώδους (ϕ_e/ϕ_{tot}). Έχει εκτιμηθεί ότι για κλαστικά πετρώματα ο συντελεστής κυμαίνεται από 0.51-5.4%, για δολομίτες από 0.64-5.5% και για ασβεστόλιθους από 0.40-4.1%.

5.3.3 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε κοιτάσματα γαιάνθρακα

Η αποθήκευση του CO₂ σε κοιτάσματα γαιάνθρακα, κατά κανόνα, συνεπάγεται την μετατόπιση του μεθανίου που παράγεται από αυτόν μέσω βιογενούς βακτηριακής δραστηριότητας (σε χαμηλότερης κατάταξης γαιάνθρακες, δηλαδή με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα) ή θερμογόνου ενανθράκωσης (σε υψηλότερης κατάταξης όπως πχ ο λιγνίτης). Υπάρχει η δυνατότητα της ενισχυμένης απόληψης μεθανίου (Enhanced coalbed methane recovery (ECBM)) μέσω της εισπίεσης και αποθήκευσης του CO₂. Η ανάκτηση του

εκτοπισμένου μεθανίου είναι υποχρεωτική δεδομένου ότι πρόκειται για ένα πολύ πιο ισχυρό αέριο θερμοκηπίου από το CO₂. Το μεθάνιο που ανακτάται, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σαν ορυκτό καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Η ογκομετρική εξίσωση για την εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε μη εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα γαιάνθρακα, είναι η εξής:

$$G_{CO_2} = A \cdot h_g \cdot C_s \cdot \rho_{s, \max} \cdot E \quad (3)$$

Όπου,

G_{CO₂} (μάζα): Εκτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας του CO₂ για ένα ή περισσότερα στρώματα γαιάνθρακα.

A (επιφάνεια): Γεωγραφική περιοχή της λεκάνης του άνθρακα όπου εκτιμάται η αποθηκευτική ικανότητα.

h_g (μήκος): Πάχος των στρωμάτων γαιάνθρακα, για τα οποία γίνεται η εκτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας, εντός της γεωγραφικής περιοχής (A) της λεκάνης.

C_s (ποσοστό): Κλάσμα του προσροφημένου CO₂ ανά μονάδα του άνθρακα υπό συνθήκες δεξαμενής

ρ_{s,max} (μάζα/ μήκος στον κύβο): Μέση πυκνότητα προσροφημένου CO₂ (η οποία ορίζεται ως η μάζα του CO₂ που προσροφήθηκε, προς τον όγκο του γαιάνθρακα που την προσρόφησε, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του γαιάνθρακα και την θερμοκρασία, αλλά εδώ χρησιμοποιείται η μέγιστη (max) τιμή που μπορεί να λάβει για έναν δεδομένο σχηματισμό).

E (ποσοστό): Συντελεστής απόδοσης αποθήκευσης CO₂ που αντιπροσωπεύει το κλάσμα του ολικού όγκου άνθρακα, που έρχεται σε επαφή με το CO₂.

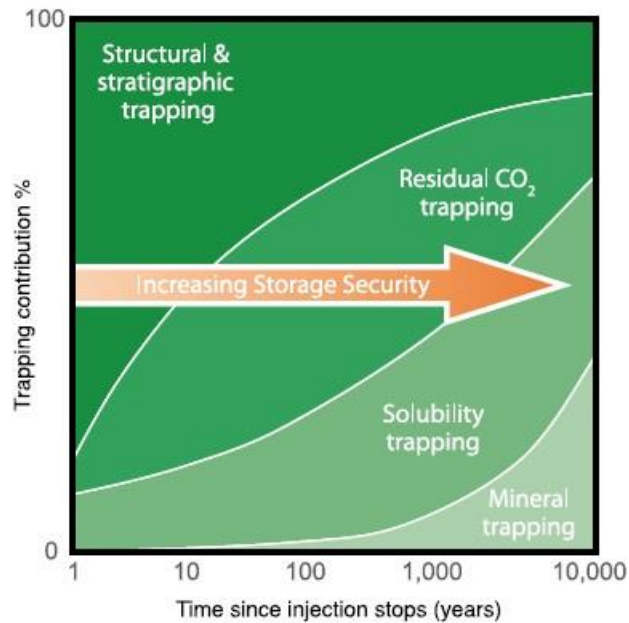
Πρέπει να δίνεται προσοχή στη διάκριση μεταξύ της προσρόφησης στους μικροπόρους του γαιάνθρακα και την υδροδυναμική παγίδευση του CO₂ λόγω του πορώδους που δημιουργεί η ρωγμάτωση (fracture porosity). Επίσης, για γαιάνθρακες κατώτερης ποιότητας (lower rank coals), πρέπει να διεξάγονται

εργαστηριακές δοκιμές προσομοιάζοντας τις συνθήκες του ταμιευτήρα (κυρίως υγρασία και πίεση), καθώς υπάρχει μια αυξανόμενη διαφορά στο πόσο προσβάσιμοι στο CO₂, (ώστε να μπορέσει να προσροφηθεί σε αυτούς και να απελευθερώσει το μεθάνιο) είναι οι μικροπόροι μεταξύ υγρών και ξηρών ανθράκων, κυρίως λόγω χημικής ετερογένειας. Ο συντελεστής απόδοσης αποθήκευσης και εδώ, όπως και στους αλατούχους υδροφόρους σχηματισμούς, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι το ποσοστό της περιοχής που αξιολογείται, το οποίο κατέχουν τα στρώματα γαιάνθρακα, το ποσοστό αυτών των στρωμάτων που φέρουν προσροφητική ικανότητα, το μέρος της περιοχής γύρω από την γεώτρηση εισπίεσης, η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το CO₂ κοκ. Για τα μη εκμεταλλεύσιμα πεδία γαιάνθρακα αυτός ο συντελεστής κυμαίνεται μεταξύ 21-48%.

5.4 Μηχανισμοί παγίδευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς

Η αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς βασίζεται στο συνδυασμό των μηχανισμών φυσικής και γεωχημικής παγίδευσης (Εικόνα 5.5). Οι πιο κατάλληλες θέσεις αποθήκευσης είναι αυτές στις οποίες το CO₂ παραμένει αδρανές σε βάθος χρόνου. Αυτό μπορεί να συμβεί για τους εξής λόγους:

- ✓ Το CO₂ παγιδεύεται μόνιμα κάτω από ένα χαμηλής διαπερατότητας και πυκνό πέτρωμα-κάλυμμα
- ✓ Το CO₂ μετατρέπεται σε στερεά ορυκτά
- ✓ Το CO₂ απορροφάται στις επιφάνειες των μικροπόρων των γαιανθράκων
- ✓ Συνδυασμός των μηχανισμών φυσικής και χημικής παγίδευσης



Εικόνα 5.6 : Η ασφάλεια της αποθήκευσης εξαρτάται από το συνδυασμό της φυσικής και της γεωχημικής παγίδευσης. Με την πάροδο του χρόνου, η φυσική διεργασία της υπολειμματικής παγίδευσης CO_2 και οι γεωχημικές διεργασίες της παγίδευσης διαλυτότητας και ορυκτοποίησης αυξάνουν.

5.4.1 Φυσική παγίδευση: στρωματογραφική και δομική

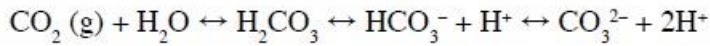
Αρχικά, η φυσική παγίδευση του CO_2 κάτω από χαμηλής διαπερατότητας πετρώματα-καλύμματα αποτελεί το κύριο μέσο αποθήκευσης CO_2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι ιζηματογενείς λεκάνες αποτελούνται από τέτοιες κλειστές, φυσικά οριοθετημένες δομές (παγίδες), οι οποίες είναι κατειλημμένες κυρίως από αλμυρό νερό, πετρέλαιο και αέριο. Οι δομικές παγίδες περιλαμβάνουν τις παγίδες, οι οποίες σχηματίστηκαν από πτυχωμένα ή ρωγματωμένα πετρώματα. Οι στρωματογραφικές παγίδες σχηματίζονται από αλλαγές των πετρωμάτων οι οποίες οφείλονται στη διαφοροποίηση των συνθηκών απόθεσης. Και οι δύο αυτοί τύποι παγίδων κρίνονται κατάλληλοι για την αποθήκευση του CO_2 .

5.4.2 Φυσική παγίδευση: υδροδυναμική

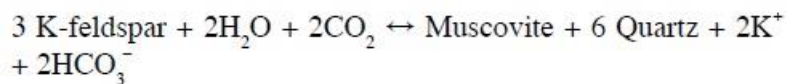
Η υδροδυναμική παγίδευση μπορεί να επιτευχθεί σε σχηματισμούς κορεσμένους σε αλατούχο νερό, στους οποίους τα ρευστά μετακινούνται με πολύ αργό ρυθμό και δεν περιβάλλονται από κάποια κλειστή δομή παγίδευσης. Όταν το CO₂ εισπνέζεται στο σχηματισμό, μετατοπίζει το αλμυρό νερό σχηματισμού και έπειτα μεταναστεύει ανοδικά επειδή είναι λιγότερο πυκνό από το νερό. Όταν φτάσει την κορυφή του σχηματισμού, συνεχίζει πάλι την μετακίνηση τη φορά μέχρι να παγιδευτεί από πετρώματα-καλύμματα δομικών ή στρωματογραφικών παγίδων ή μέχρι να παγιδευτεί από τριχοειδείς πιέσεις στα κενά των πόρων. Η δεύτερη περίπτωση ονομάζεται και υπολειμματική παγίδευση (residual trapping). Μακροπρόθεσμα, θεωρείται δεδομένο ότι σημαντικές ποσότητες του CO₂ διαλύονται στο νερό σχηματισμού και ρέουν μαζί με το υπόγειο νερό.

5.4.3 Γεωχημική παγίδευση

Το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς εισπνέζεται στο υπέδαφος, είναι δυνατόν να αντιδράσει γεωχημικά με το πέτρωμα του ταμιευτήρα και το νερό σχηματισμού, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της χωρητικότητας αποθήκευσης. Αρχικά όταν το CO₂ διαλύεται στο νερό σχηματισμού, λαμβάνει χώρα μια διεργασία η οποία ονομάζεται παγίδευση διαλυτότητας (solubility trapping). Το κύριο πλεονέκτημα της παγίδευσης διαλυτότητας έγκειται στο ότι μόλις το CO₂ διαλυθεί, παύει να υφίσταται σαν ξεχωριστή φάση, χάνοντας έτσι τη δυνατότητα ανοδικής μετανάστευσης λόγω άνωσης. Στο τέλος ένα μέρος του CO₂ θα μετατραπεί σε σταθερά ανθρακικά ορυκτά (mineral trapping), τα οποία αποτελούν την πιο μόνιμη μορφή γεωλογικής αποθήκευσης (Gunner et al., 1993). Η ορυκτή παγίδευση (mineral trapping) θεωρείται ότι είναι μια σχετικά αργή μέθοδος παγίδευσης, η οποία μπορεί να χρειαστεί και 1000 χρόνια για να πραγματοποιηθεί. Παρ' όλα αυτά, η μονιμότητα που προσδίδει η ορυκτή παγίδευση, σε συνδυασμό με τις μεγάλες χωρητικότητες αποθήκευσης που έχουν κάποιοι γεωλογικοί σχηματισμοί, καθιστούν αυτό το χαρακτηριστικό επιθυμητό στην περίπτωση της μακροχρόνιας αποθήκευσης. Η χημική αντίδραση, η οποία αντιπροσωπεύει τη διάλυση του CO₂ σε νερά σχηματισμού είναι η ακόλουθη:



Η διαλυτότητα του CO₂ στο νερό σχηματισμού ελαττώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας. Η διάλυση επιταχύνεται ραγδαία όταν το νερό σχηματισμού και το CO₂ βρίσκονται στο ίδιο κενό πόρων, αλλά μόλις το νερό σχηματισμού κορεστεί με το CO₂, τότε ο ρυθμός διάλυσης επιβραδύνεται και ελέγχεται πλέον από τη διάχυση και το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Το CO₂ διαλυόμενο στο νερό, παράγει ένα ασθενές οξύ, το οποίο έρχεται σε αντίδραση με το νάτριο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο και τον ανθρακικό σίδηρο μέσα στον ταμιευτήρα ή στο σχηματισμό και σχηματίζονται διττανθρακικά ιόντα. Η χημική αντίδραση η οποία αντιπροσωπεύει το παραπάνω είναι:



Η αντίδραση του διαλυμένου CO₂ με ορυκτά μπορεί να είναι ταχεία (μέρες) στην περίπτωση ανθρακικών ορυκτών και αργή (εκατοντάδες με χιλιάδες έτη) στην περίπτωση πυριτικών ορυκτών. Ο σχηματισμός ανθρακικών ορυκτών προκύπτει από τη συνεχή αντίδραση διττανθρακικών ιόντων με ασβέστιο, μαγνήσιο και σίδηρο που περιέχονται σε πυριτικά ορυκτά όπως άργιλλοι, μαρμαρυγίες, χλωρίτες και άστριοι μέσα στη μήτρα του πετρώματος (Gunter et al., 1993, 1997). Τέλος, ο Perkins et al. (2005) εκτιμά ότι όλη η ποσότητα του CO₂ που εισπνέζεται στο Weyburn Oil Field, μέσα στο χρονικό διάστημα των 5000 ετών είτε θα έχει διαλυθεί είτε θα έχει μετατραπεί σε ανθρακικά ορυκτά μέσα στο σχηματισμό αποθήκευσης.

5.5 Τεχνολογίες παρακολούθησης της κατανομής του CO₂ στον ταμειυτήρα

Υπάρχει μια πληθώρα διαθέσιμων τεχνολογιών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κατανομής και μετακίνησης του CO₂ στο υπέδαφος. Ο πίνακας 5.1 συνοψίζει αυτές τις τεχνικές αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε projects αποθήκευσης του CO₂.

Measurement technique	Measurement parameters	Example applications
Introduced and natural tracers	Travel time Partitioning of CO ₂ into brine or oil Identification sources of CO ₂	Tracing movement of CO ₂ in the storage formation Quantifying solubility trapping Tracing leakage
Water composition	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ Major ions Trace elements Salinity	Quantifying solubility and mineral trapping Quantifying CO ₂ -water-rock interactions Detecting leakage into shallow groundwater aquifers
Subsurface pressure	Formation pressure Annulus pressure Groundwater aquifer pressure	Control of formation pressure below fracture gradient Wellbore and injection tubing condition Leakage out of the storage formation
Well logs	Brine salinity Sonic velocity CO ₂ saturation	Tracking CO ₂ movement in and above storage formation Tracking migration of brine into shallow aquifers Calibrating seismic velocities for 3D seismic surveys
Time-lapse 3D seismic imaging	P and S wave velocity Reflection horizons Seismic amplitude attenuation	Tracking CO ₂ movement in and above storage formation
Vertical seismic profiling and crosswell seismic imaging	P and S wave velocity Reflection horizons Seismic amplitude attenuation	Detecting detailed distribution of CO ₂ in the storage formation Detection leakage through faults and fractures
Passive seismic monitoring	Location, magnitude and source characteristics of seismic events	Development of microfractures in formation or caprock CO ₂ migration pathways
Electrical and electromagnetic techniques	Formation conductivity Electromagnetic induction	Tracking movement of CO ₂ in and above the storage formation Detecting migration of brine into shallow aquifers
Time-lapse gravity measurements	Density changes caused by fluid displacement	Detect CO ₂ movement in or above storage formation CO ₂ mass balance in the subsurface
Land surface deformation	Tilt Vertical and horizontal displacement using interferometry and GPS	Detect geomechanical effects on storage formation and caprock Locate CO ₂ migration pathways
Visible and infrared imaging from satellite or planes	Hyperspectral imaging of land surface	Detect vegetative stress
CO ₂ land surface flux monitoring using flux chambers or eddy covariance	CO ₂ fluxes between the land surface and atmosphere	Detect, locate and quantify CO ₂ releases
Soil gas sampling	Soil gas composition Isotopic analysis of CO ₂	Detect elevated levels of CO ₂ Identify source of elevated soil gas CO ₂ Evaluate ecosystem impacts

Πίνακας 5.1 : Σύνοψη των διαθέσιμων άμεσων και έμμεσων τεχνικών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση projects αποθήκευσης CO₂.

5.5.1 Άμεσες τεχνικές παρακολούθησης της μετακίνησης του CO₂

Οι διαθέσιμες άμεσες τεχνικές παρακολούθησης είναι περιορισμένες στις μέρες μας. Κατά την εισπίεση του CO₂ σε EOR projects, το CO₂ εξαπλώνεται μέσα στον ταμιευτήρα με ετερογενή τρόπο, λόγω των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται στη διαπερατότητα του πετρώματος (Moberg et al., 2003). Μόλις το CO₂ φτάσει σε μια παραγωγική γεώτρηση, ο παραγόμενος όγκος του μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί. Στην περίπτωση του Weyburn, όπου υπάρχει ένα project CO₂ – EOR, ο άνθρακας στο εισπνεζόμενο CO₂ έχει διαφορετική ισοτοπική σύσταση από τον άνθρακα του ταμιευτήρα (Emberlay et al., 2002), οπότε η κατανομή του CO₂ καθορίζεται με γενικό τρόπο αξιολογώντας την άφιξη του CO₂ σε διαφορετικές παραγωγικές γεωτρήσεις.

Μια καλύτερη προσέγγιση του ζητήματος, είναι η χρησιμοποίηση ανιχνευτών αρκεί να μην υπάρχουν αέρια ή ισότοπα αερίων στο σύστημα του ταμιευτήρα. (tracers). Αυτοί οι ανιχνευτές θα εισπνέζονται σε συγκεκριμένα πηγάδια και ο χρόνος της άφιξής τους σε πηγάδια παραγωγής ή παρακολούθησης, θα δείχνει τη διαδρομή που ακολουθεί το CO₂ μέσα στον ταμιευτήρα. Πηγάδια παρακολούθησης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να καταγραφεί παθητικά η μετακίνηση του CO₂ μετά το πηγάδι. Εν τούτοις τεχνικές σαν και αυτή, μπορεί δυνητικά να δημιουργήσουν οδούς διαρροής για το CO₂ στην επιφάνεια. Η μετακίνηση των ανιχνευτών στα πηγάδια παραγωγής ή παρακολούθησης δίνει μια ένδειξη για την πλευρική κατανομή του CO₂ μέσα σε έναν ταμιευτήρα. Σε παχείς σχηματισμούς, πολλαπλή δειγματοληψία σε κάθετα πηγάδια παραγωγής ή παρακολούθησης, θα δώσει μια ένδειξη για την κατακόρυφη κατανομή του CO₂ στο σχηματισμό. Σε πολλά πηγάδια όμως, ειδικότερα στα οριζόντια πηγάδια, η απουσία casing (open hole completion) καθιστά την άμεση μέτρηση της εισροής CO₂ δύσκολη υπόθεση.

5.5.2 Έμμεσες τεχνικές παρακολούθησης της μετακίνησης του CO₂

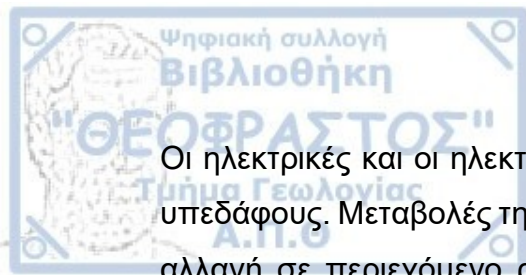
Οι έμμεσες τεχνικές παρακολούθησης της κατανομής του CO₂ στο υπέδαφος περιλαμβάνουν μια πληθώρα σεισμικών και μη-σεισμικών γεωφυσικών και γεωχημικών τεχνικών (Benson et al., 2004; Arts και Winthaegen, 2005; Hoversten και Gesperikova, 2005). Οι σεισμικές τεχνικές βασικά μετρούν την ταχύτητα και την απορρόφηση της ενέργειας των κυμάτων καθώς διαπερνούν πετρώματα στο υπέδαφος. Η διάδοση των κυμάτων στα πετρώματα μεταβάλλεται από τη φύση του εκάστοτε πετρώματος και των περιεχόμενων σε αυτά ρευστών. Γενικά τα σεισμικά κύματα δημιουργούνται με τεχνητό τρόπο έπειτα από έκρηξη ή δόνηση του εδάφους. Τα όργανα παραγωγής των κυμάτων και οι ανιχνευτές τους μπορεί να βρίσκονται στην επιφάνεια (συμβατικά σεισμικά) ή οι ανιχνευτές να βρίσκονται μέσα στα πηγάδια και οι πηγές των κυμάτων να βρίσκονται στην επιφάνεια (vertical seismic profiling). Είναι επίσης δυνατή η τοποθέτηση και των πηγών και των ανιχνευτών στο υπέδαφος (μέσα στα πηγάδια), έτσι ώστε οι παλμοί των κυμάτων να μεταδίδονται οριζόντια μέσα στον ταμιευτήρα (cross-well tomography). Με την πραγματοποίηση ενός ικανοποιητικού αριθμού διασκοπήσεων σε βάθος χρόνου, είναι δυνατή η ανίχνευση της κατανομής του CO₂ μέσα στον ταμιευτήρα, με την προϋπόθεση ότι ο όγκος του CO₂ στον ταμιευτήρα να είναι αρκετά υψηλός ώστε να μπορεί να ανιχνευτεί. Μια διασκόπηση πριν την εισπίεση του CO₂, είναι απαραίτητη και μπορεί να αποτελέσει τη βάση πάνω στην οποία θα γίνουν οι συγκρίσεις με τις επόμενες διασκοπήσεις. Γενικά φαίνεται ότι με τη χρήση των σεισμικών μεθόδων, είναι δυνατή η ταυτοποίηση ακόμα και σχετικά μικρών όγκων CO₂, το οποίο βρίσκεται φυσικά σε ελεύθερη φάση. Οι μέθοδοι σεισμικών time lapse surface 3D, vertical seismic profiling και cross-well tomography (οριζόντια και κατασκόρυφη) χρησιμοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν στο Weyburn.

Σε βαθιές συσσωρεύσεις του CO₂ στο υπέδαφος, όπου η τιμή της πυκνότητας του CO₂ προσεγγίζει την τιμή πυκνότητας των ρευστών του σχηματισμού αποθήκευσης η ευκρίνεια των σεισμικών μεθόδων μπορεί να αναγνωρίσει γύρω στους 2500-10000 t CO₂ που βρίσκεται σε ελεύθερη φάση (Myer et al., 2003; White et al., 2004; Arts et al., 2005). Στο Weyburn, περιοχές με χαμηλούς ρυθμούς εισπίεσης (όγκος πόρων που καταλαμβάνουν οι υδρογονάνθρακες

<2%) παρουσιάζουν μικρή ή μηδαμινή εμφανή σεισμική απόκριση. Αντίθετα σε περιοχές με υψηλούς ρυθμούς εισπίεσης (όγκος πόρων που καταλαμβάνουν οι υδρογονάνθρακες 3-13%), παρατηρούνται σημαντικές σεισμικές ανωμαλίες. Γενικά η σεισμική ευκρίνεια μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος και ανάλογα με κάποιες ιδιότητες των πετρωμάτων.

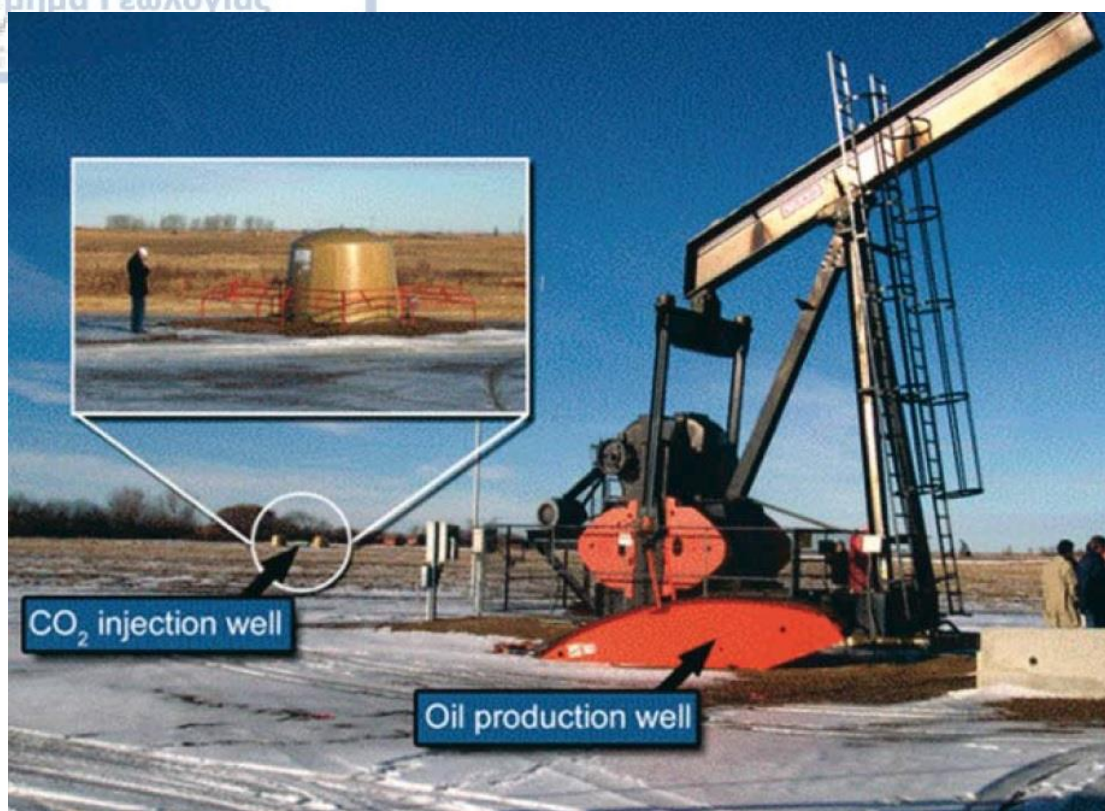
Η χρήση παθητικών σεισμικών μεθόδων (μικροσεισμική) αποτελεί επίσης μια αποτελεσματική μέθοδο παρακολούθησης του CO₂. Οι παθητικές σεισμικές μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν μικροσεισμική δραστηριότητα, η οποία προκαλείται στον ταμιευτήρα λόγω δυναμικών μεταβολών της πίεσης των πόρων ή τη δημιουργία μικρών ρωγμών. Αυτοί λοιπόν οι μικροσεισμοί, οι οποίοι έχουν ένταση της τάξης του -4 με 0 στην κλίμακα του Richter (Wilson και Monea, 2005), είναι δυνατόν να ανιχνευτούν από συστοιχίες αισθητήρων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι συνήθως σε εγκαταλελειμμένα πηγάδια. Αυτή η μικροσεισμική δραστηριότητα είναι εξαιρετικά μικρή, αλλά η παρακολούθησή της μπορεί να επιτρέψει την καταγραφή των μεταβολών της πίεσης και πιθανώς τη μετακίνηση των αερίων μέσα στον ταμιευτήρα.

Η χρήση μη σεισμικών γεωφυσικών μεθόδων για την παρακολούθηση του CO₂, μπορεί να προσφέρει και αυτή χρήσιμα συμπεράσματα. Ηλεκτρικές, ηλεκτρομαγνητικές και βαρυτικές μέθοδοι είναι κάποιες από τις τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό. Οι βαρυτικές μέθοδοι για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί η μετακίνηση του CO₂ στο υπέδαφος. Οι βαρυτικές μέθοδοι μετρούν τις μεταβολές που παρατηρούνται στο υπέδαφος λόγω διαφοροποιήσεων της πυκνότητας, που με τη σειρά τους προκαλούνται από τη μετατόπιση ενός ρευστού από ένα άλλο διαφορετικής πυκνότητας (π.χ το CO₂ αντικαθιστώντας το νερό). Σύμφωνα με τον Benson et al. (2004) οι βαρυτικές μέθοδοι δεν θα έχουν το ίδιο επίπεδο ευκρίνειας με τα σεισμικά. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για να είναι ανιχνεύσιμο το CO₂, απαιτείται μια ελάχιστη ποσότητα της τάξης των μερικών εκατοντάδων χιλιάδων τόνων (τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για ανίχνευση στις σεισμικές μεθόδους). Αυτό μπορεί να είναι αρκετό για τη διαπίστωση της πορείας του CO₂, όχι όμως και για τη διαπίστωση πιθανών διαρροών.



Οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι μετράνε την αγωγιμότητα του υπεδάφους. Μεταβολές της αγωγιμότητας, οι οποίες προκαλούνται από κάποια αλλαγή σε περιεχόμενο ρευστό σχηματισμού, όπως είναι για παράδειγμα η μετατόπιση υφάλμυρων υδάτων υψηλής αγωγιμότητας από το χαμηλής αγωγιμότητας CO_2 , είναι δυνατόν να ανιχνευθούν με ηλεκτρικές ή ηλεκτρομαγνητικές διασκοπήσεις.

5.6 Σημερινά και μελλοντικά projects αποθήκευσης του CO₂



Εικόνα 5.7 : Τυπική δομή της λειτουργίας εισπίεσης του CO₂, όπως γίνεται στο Weyburn.

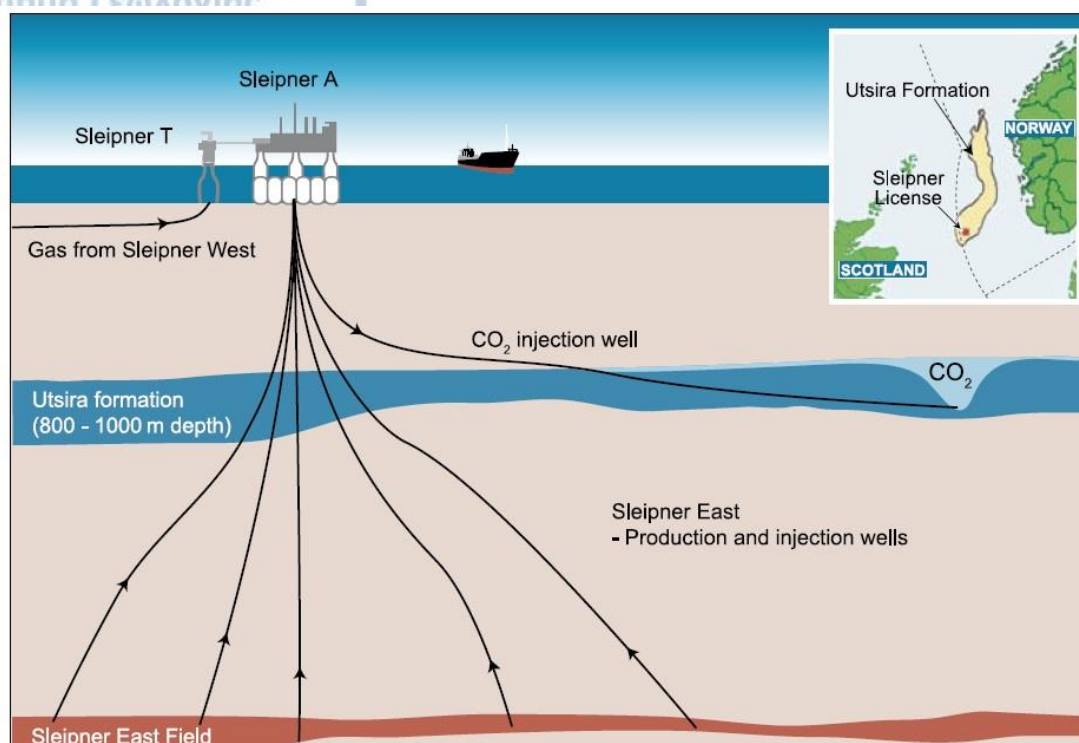
Όπως φαίνεται και στο πίνακα 5.2 υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός πιλοτικών και εμπορικών projects αποθήκευσης CO₂. Έως σήμερα τα περισσότερα projects σχετίζονται με εγκαταστάσεις μαζικής παραγωγής αερίου, το οποίο περιέχει μεγάλη περιεκτικότητα CO₂, της τάξης του 10-15% κατά όγκο όπως είναι το Sleipner στη Βόρεια Θάλασσα, το Snohvit στη Θάλασσα του Barrents, το In Salah στην Αλγερία καθώς και projects εισπίεσης όξινου αερίου στον Καναδά και τις ΗΠΑ. Στο Sleipner Project, που βρίσκεται υπό τη διαχείριση της πετρελαϊκής εταιρείας Statoil, έχουν εισπιεστεί περισσότεροι από 7 MtCO₂ σε ένα βαθύ σχηματισμό κορεσμένο σε αλατούχο νερό από το 1996 όταν ξεκίνησε η διαδικασία. Στο In Salah Gas Field στην Αλγερία, η Sonatrach, η BP και η Statoil εισπιάζουν CO₂ που έχει διαχωριστεί από το φυσικό αέριο στον ταμιευτήρα αερίου έξω από τα όρια του κοιτάσματος αερίου. Η Statoil σχεδιάζει ένα άλλο project στο κοιτάσμα Snohvit στη Θάλασσα του Barrents, όπου το CO₂ θα διαχωριστεί από το αέριο και θα εισπιεστεί σε ένα γεωλογικό σχηματισμό σε μεγαλύτερο βάθος από αυτό του κοιτάσματος αερίου. Η

Chevron προτείνει την παραγωγή αερίου από το Gorgon Field στη Δυτική Αυστραλία, το οποίο περιέχει περίπου 14% CO₂. Το CO₂ θα εισπνεστεί στο Dupuy Formation στο Barrow Island (Oen, 2003). Στην Ολλανδία CO₂ εισπνέζεται σε πιλοτική κλίμακα στο σχεδόν εξαντλημένο παράκτιο κοίτασμα αερίου K-12 B (van der Meer et al., 2005). Επίσης υπάρχουν 44 projects εισπνέσης όξινου αερίου πλούσιου σε CO₂ στο Δυτικό Καναδά, που βρίσκονται εν ενεργεία από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Bachu και Haug, 2005). Παρόλο που αυτά τα projects είναι μικρού σκέλους, αποτελούν σημαντικά παραδείγματα αποτελεσματικής διαχείρισης της εισπνέσης του CO₂ και επικίνδυνων αερίων όπως το H₂S. Επιπλέον κάποιες ευκαιρίες που εμφανίστηκαν σχετικά με το enhanced oil recovery (EOR) αύξησαν περαιτέρω το ενδιαφέρον για τη γεωλογική αποθήκευση του CO₂ (Stevens et al., 2001b; Moberg et al., 2003; Moritis, 2003; Riddiford et al., 2003; Torp and Gale, 2003). Παρόλο που τα projects CO₂-EOR, δεν σχεδιάζονται αποκλειστικά για αποθήκευση του CO₂, ωστόσο μεγάλο μέρος του εισπνεζόμενου διοξειδίου του άνθρακα παραμένει στον ταμιευτήρα. Εν τούτοις η έλλειψη συστηματικής παρακολούθησης των EOR projects, καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την ποσοτική μέτρηση του αποθηκευόμενου CO₂. Στις ΗΠΑ, υπάρχουν περίπου 73 projects CO₂-EOR στα οποία εισπνέζονται έως και 30 Mt CO₂/έτος, από τους οποίους όμως μόνο οι 3 Mt CO₂ προέρχονται από δραστηριότητες που σχετίζονται με ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Στον Καναδά, ένα CO₂-EOR project πραγματοποιήθηκε από την EnCana στο Weyburn Oil Field στο Νότιο Saskatchewan. Το συγκεκριμένο project αναμένεται να εισπνέσει γύρω στους 23 Mt CO₂, δίνοντας έτσι παράταση ζωής στο πετρελαϊκό κοίτασμα κατά 25 χρόνια (Morberg et al., 2003; Law, 2005). Το εισπνεζόμενο CO₂ παρακολουθείται στενά μέσω του IEA GHG Weyburn Project (Wilson και Monea, 2005). Το CO₂-EOR βρίσκεται επίσης υπό συζήτηση για εφαρμογή στη Βόρεια Θάλασσα, όπου μέχρι στιγμής δεν παρατηρείται σχεδόν καθόλου δραστηριότητα αυτού του είδους. Τέλος χώρες όπως το Τρινιντάντ, η Τουρκία και η Βραζιλία έχουν σχέδια για το άμεσο μέλλον σχετικά με projects CO₂-EOR (Moritis, 2002).

Project	Country	Scale of Project	Lead organizations	Injection start date	Approximate average daily injection rate	Total storage	Storage type	Geological storage formation	Age of formation	Lithology	Monitoring
Sleipner	Norway	Commercial	Statoil, IEA	1996	3000 t day ⁻¹	20 Mt planned	Aquifer	Utsira Formation	Tertiary	Sandstone	4D seismic plus gravity
Weyburn	Canada	Commercial	EnCana, IEA	May 2000	3-5000 t day ⁻¹	20 Mt planned	CO ₂ -EOR	Midale Formation	Mississippian	Carbonate	Comprehensive
Minami-Nagoaka	Japan	Demo	Research Institute of Innovative Technology for the Earth	2002	Max 40 t day ⁻¹	10,000 t planned	Aquifer (Sth. Nagoaka Gas Field)	Haizume Formation	Pleistocene	Sandstone	Crosswell seismic + well monitoring
Yubari	Japan	Demo	Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry	2004	10 t day ⁻¹	200 t Planned	CO ₂ -ECBM	Yubari Formation (Ishikari Coal Basin)	Tertiary	Coal	Comprehensive
In Salah	Algeria	Commercial	Sonatrach, BP, Statoil	2004	3-4000 t day ⁻¹	17 Mt planned	Depleted hydrocarbon reservoirs	Krechba Formation	Carboniferous	Sandstone	Planned comprehensive
Frio	USA	Pilot	Bureau of Economic Geology of the University of Texas	4-13 Oct. 2004	Approx. 177 t day ⁻¹ for 9 days	1600t	Saline formation	Frio Formation	Tertiary	Brine-bearing sandstone-shale	Comprehensive
K12B	Netherlands	Demo	Gaz de France	2004	100-1000 t day ⁻¹ (2006+)	Approx 8 Mt	EGR	Rotteigendes	Permian	Sandstone	Comprehensive
Fenn Big Valley	Canada	Pilot	Alberta Research Council	1998	50 t day ⁻¹	200 t	CO ₂ -ECBM	Mannville Group	Cretaceous	Coal	P, T, flow
Recopol	Poland	Pilot	TNO-NTG (Netherlands)	2003	1 t day ⁻¹	10 t	CO ₂ -ECBM	Silesian Basin	Carboniferous	Coal	
Qinshui Basin	China	Pilot	Alberta Research Council	2003	30 t day ⁻¹	150 t	CO ₂ -ECBM	Shanxi Formation	Carboniferous-Permian	Coal	P, T, flow
Salt Creek	USA	Commercial	Anadarko	2004	5-6000 t day ⁻¹	27 Mt	CO ₂ -EOR	Frontier	Cretaceous	Sandstone	Under development
Planned Projects (2005 onwards)											
Snohvit	Norway	Decided Commercial	Statoil	2006	2000 t day ⁻¹		Saline formation	Tubaen Formation	Lower Jurassic	Sandstone	Under development
Gorgon	Australia	Planned Commercial	Chevron	Planned 2009	Approx. 10,000 t day ⁻¹		Saline formation	Dupuy Formation	Late Jurassic	Massive sandstone with shale seal	Under development
Ketzin	Germany	Demo	GFZ Potsdam	2006	100 t day ⁻¹	60 kt	Saline formation	Stuttgart Formation	Triassic	Sandstone	Comprehensive
Otway	Australia	Pilot	CO2CRC	Planned late 2005	160 t day ⁻¹ for 2 years	0.1 Mt	Saline fm and depleted gas field	Waarre Formation	Cretaceous	Sandstone	Comprehensive
Teapot Dome	USA	Proposed Demo	RMOTC	Proposed 2006	170 t day ⁻¹ for 3 months	10 kt	Saline fm and CO ₂ -EOR	Tensleep and Red Peak Fm	Permian	Sandstone	Comprehensive
CSEMP	Canada	Pilot	Suncor Energy	2005	50 t day ⁻¹	10 kt	CO ₂ -ECBM	Ardley Fm	Tertiary	Coal	Comprehensive
Pembina	Canada	Pilot	Penn West	2005	50 t day ⁻¹	50 kt	CO ₂ -EOR	Cardium Fm	Cretaceous	Sandstone	Comprehensive

Πίνακας 5.2 : Υφιστάμενα και μελλοντικά projects γεωλογικής αποθήκευσης CO₂.

5.6.1 Το Sleipner Project, Βόρεια Θάλασσα



Εικόνα 5.8 : Απλοποιημένο σχέδιο του project αποθήκευσης CO₂ Sleipner. Στο άνω δεξιό μέρος φαίνεται η τοποθεσία του project και η έκταση του σχηματισμού Utsira.

Το Sleipner Project, το οποίο είναι υπό τη διαχείριση της Statoil και βρίσκεται στη Βόρεια Θάλασσα περίπου 250 km μακριά από τις ακτές της Νορβηγίας, αποτελεί το πρώτο εμπορικό project που έχει ως στόχο τη γεωλογική αποθήκευση του CO₂ σε σχηματισμό κορεσμένο σε αλατούχο νερό. Το CO₂ (γύρω στο 9%) που προέρχεται από το κοίτασμα αερίου Sleipner West Gas Field διαχωρίζεται από το αέριο και έπειτα εισπνέζεται σε ένα μεγάλο, βαθύ σχηματισμό άλατος περίπου 800 m υπό το βυθό της θάλασσας στη Βόρεια Θάλασσα. Μάλιστα ενεργοποιήθηκε το project Saline Aquifer CO₂ Storage (SACS), το οποίο έχει ως στόχο την έρευνα και την παρακολούθηση της αποθήκευσης του CO₂ στο Sleipner. Από το 1995, το IEA Greenhouse Gas R&D Programme εργάστηκε με τη Statoil για να καθοριστεί ένα πλαίσιο για την έρευνα και την παρακολούθηση της δραστηριότητας της εισπνέσης και της αποθήκευσης του CO₂. Περίπου 1 Mt CO₂/έτος αφαιρείται από το παραγόμενο φυσικό αέριο και εισπνέζεται στον ταμιευτήρα. Η εισπνέση του CO₂ ξεκίνησε τον Οκτώβρη του 1996 και έως τις αρχές του 2005, είχαν εισπνεστεί περισσότεροι

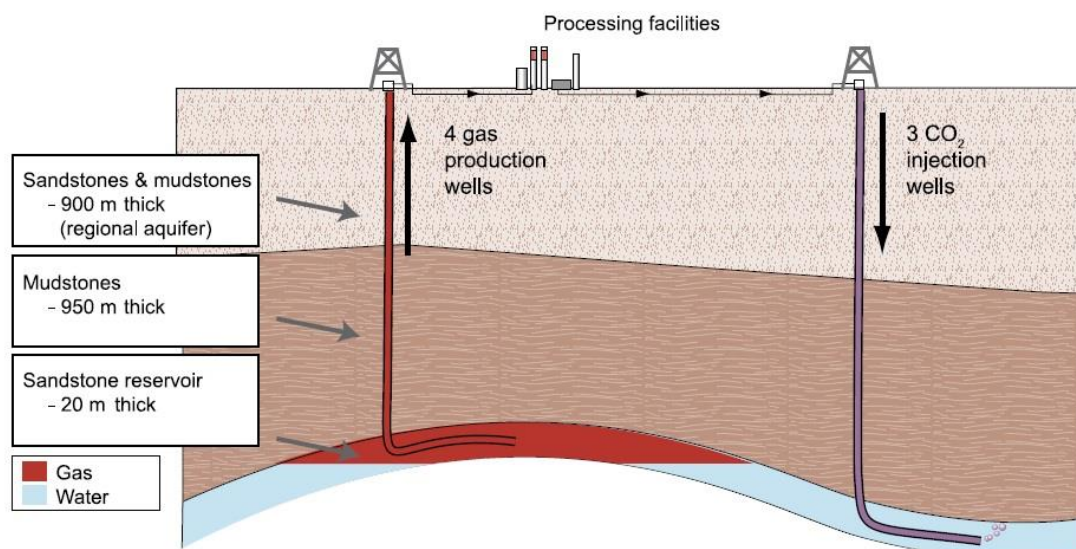
από 7 Mt CO₂ με ρυθμό εισπίεσης 2700 t/ημέρα. Υπολογίζεται ότι έως το τέλος του project θα έχουν αποθηκευτεί συνολικά 20 Mt CO₂. Στην εικόνα 5.7 απεικονίζεται με απλό τρόπο η λειτουργία εισπίεσης και αποθήκευσης του CO₂ στο Sleipner Project.

Ο κορεσμένος σχηματισμός σε αλατούχο νερό στον οποίο το CO₂ εισπιέζεται, είναι ένας κορεσμένος σε άλμη μη συνεκτικός ψαμμίτης που βρίσκεται 800-100 m υπό του πυθμένα της θάλασσας. Ο σχηματισμός περιέχει επίσης λεπτά στρώματα αργίλλων, τα οποία και επηρεάζουν την κίνηση του εισπιεζόμενου CO₂ μέσα στον ταμιευτήρα. Αυτός ο σχηματισμός έχει πολύ μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης, της τάξης των 1-10 Gt CO₂. Το άνω μέρος του σχηματισμού είναι σχετικά επίπεδο και το υπερκείμενο κυρίως κάλυμμα είναι μια εκτεταμένου εύρους και μεγάλου πάχους άργιλλος.

Το project πραγματοποιήθηκε σε τρεις φάσεις. Η Φάση-0 περιελάμβανε συλλογή βασικών δεδομένων και αξιολόγησή τους και ολοκληρώθηκε το Νοέμβρη του 1998. Η Φάση-1 εμπεριείχε την κατανόηση της κατάστασης που βρισκόταν το project έπειτα από τρία χρόνια εισπίεσης CO₂. Τα βασικά κομμάτια αυτής της φάσης περιλαμβάνουν περιγραφές της γεωλογίας του ταμιευτήρα, προσομοίωση του ταμιευτήρα, γεωχημεία, αξιολόγηση της ανάγκης και του κόστους για τη δημιουργία πηγαδιών παρακολούθησης και γεωφυσική μοντελοποίηση. Η Φάση-2, που ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2000, εμπεριείχε ερμηνεία των δεδομένων και επαλήθευση του ήδη χρησιμοποιούμενου μοντέλου.

Η μεταφορά και η πορεία του CO₂ στο σχηματισμό αποθήκευσης παρακολουθείται με επιτυχία με τη χρήση σεισμικών διασκοπήσεων χρόνου αναμονής (seismic time-lapse surveys). Οι διασκοπήσεις επίσης δείχνουν ότι το πέτρωμα-κάλυμμα είναι αποτελεσματικό και αποτρέπει τη διαφυγή του CO₂ από τον ταμιευτήρα. Σήμερα, το πλούμιο του CO₂ στο Sleipner εκτείνεται σε περιοχή που προσεγγίζει τα 5 km². Οι μελέτες και οι προσομοιώσεις του ταμιευτήρα που πραγματοποιήθηκαν για χρονικό διάστημα που καλύπτει εκατοντάδες έως και χιλιάδες έτη, έδειξαν ότι το CO₂ εν τέλει θα διαλυθεί στο ενδοπορικό νερό, το οποίο και θα γίνει βαρύτερο και θα καταβυθιστεί, μειώνοντας την πιθανότητα για διαρροή μακροπρόθεσμα (Lindebergh και Bergmo, 2003).

5.6.2 Το Project αποθήκευσης CO₂ In Salah στην Αλγερία



Εικόνα 5.9 : Σχέδιο του In Salah Gas Project στην Αλγερία. Ένας Mt CO₂ θα αποθηκεύεται κάθε έτος στον ταμιευτήρα αερίου. Κεκλιμένες γεωτρήσεις μεγάλου οριζόντιου μήκους χρησιμοποιούνται για την εισπίεση CO₂ στο τμήμα του ταμιευτήρα που υπάρχει νερό.

Το In Salah Gas Project, που αποτελεί μια κοινοπραξία των εταιρειών Sonatrach, BP και Statoil, βρίσκεται γεωγραφικά στην κεντρική περιοχή της Σαχάρα στην Αλγερία και είναι το μεγαλύτερο project αποθήκευσης CO₂ σε ταμιευτήρα αερίου παγκοσμίως (Riddiford et al., 2003). Το Krechba Field στο In Salah, παράγει φυσικό αέριο από αρκετούς γεωλογικούς ταμιευτήρες με περιεκτικότητα σε CO₂ έως και 10%. Αφού το παραγόμενο αέριο καθαριστεί από το CO₂ μεταφέρεται και προσφέρεται στις αγορές της Ευρώπης. Το διαχωριζόμενο CO₂ εισπνέζεται σε έναν ψαμμιτικό ταμιευτήρα σε βάθος 1800 m και κάθε χρόνο αποθηκεύεται με αυτόν τον τρόπο έως και 1.2 Mt CO₂. Η εισπίεση του διοξειδίου του άνθρακα ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2004 και κατά τη διάρκεια ζωής αυτού του project εκτιμάται ότι θα έχουν αποθηκευτεί περίπου 17 Mt CO₂. Το project αποτελείται από 4 παραγωγικές γεωτρήσεις και από τρεις γεωτρήσεις εισπίεσης CO₂ όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.8. Για την εισπίεση του CO₂ στον ταμιευτήρα διαπερατότητας 5 mD χρησιμοποιούνται οριζόντιες γεωτρήσεις μεγάλου μήκους (long-reach horizontal wells με μήκος οριζόντιου τμήματος έως και 1.5 km).

Το Krechba Field είναι βασικά ένα απλό αντίκλινο. Η εισπίεση του διοξειδίου του άνθρακα γίνεται στο κάτω μέρος (πιο βαθιά) της επαφής αερίου/νερού μέσα

6 Συζήτηση

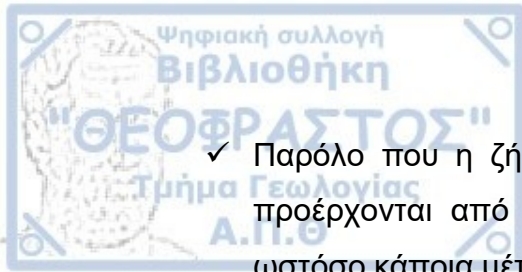
Είναι επιστημονικά εξακριβωμένο ότι τα αέρια θερμοκηπίου επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία του πλανήτη. Από το τέλος του 18ου αιώνα οι συγκεντρώσεις των αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και ιδιαίτερα του CO₂, έχουν αυξηθεί κατά 40%. Ο κύριος λόγος αυτής της αύξησης, είναι η ολοένα και αυξανόμενη χρήση των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την αποψίλωση των δασών. Από την έναρξη της Βιομηχανικής Επανάστασης το 1750 (Le Treut et al. 2007) έως το 2012, η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα αυξήθηκε από τα 280 ppm στα 392.6 ppm. Το Μάιο του 2013 καταγράφηκε από το Mauna atmospheric observatory στη Χαβάη, συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα που ξεπερνούσε τα 400 ppm. Αυτή ήταν η πρώτη φορά εδώ και εκατομμύρια χρόνια, όπου η συγκέντρωση του CO₂ έφτανε το όριο των 400 ppm. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με επιστημονικές αναλύσεις κατά την εποχή του Πλειόκαινου (πριν από 3-5 εκατομμύρια έτη) η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα έφτανε τα 415 ppm. Έτσι αυτή την περίοδο εκτιμάται ότι η παγκόσμια θερμοκρασία κυμαινόταν μεταξύ των 3-40 °C ενώ στους πόλους ήταν ακόμα πιο αυξημένη. Αυτό είχε ως συνέπεια η στάθμη της θάλασσας να είναι 5 έως και 40 m υψηλότερη από ότι είναι σήμερα (Monroe, 2013).

Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους φαινόμενα που θα πλήξουν περαιτέρω το περιβάλλον και τον άνθρωπο, είναι απαραίτητο να ληφθούν μια σειρά πολύπλευρων μέτρων. Χαρακτηριστικό είναι το πλάνο που έχει καταστρώσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, έχοντας ως στόχο το 2050 να υπάρχει μια ισχυρή οικονομία, η οποία θα χαρακτηρίζεται από χαμηλές εκπομπές άνθρακα (low carbon economy). Οι κύριοι πυλώνες αυτού του πλάνου είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ Μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 80% σε σχέση με τις εκπομπές που είχαν καταγραφεί το 1990 έως το 2050.
- ✓ Για να πραγματοποιηθεί πιο ομαλά αυτή η μείωση, έχουν τεθεί οι στόχοι της μείωσης των αερίων θερμοκηπίου κατά 40%, σε σχέση με τις

εκπομπές που είχαν καταγραφεί το 1990, έως το 2030 και κατά 60% έως το 2040.

- ✓ Όλοι οι κλάδοι οι οποίοι συμβάλλουν στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην Ευρώπη, πρέπει να συμβάλλουν στη μετάβαση στη νέα εποχή χαμηλών εκπομπών άνθρακα.
- ✓ Ο κλάδος της παραγωγής ενέργειας έχει τη μεγαλύτερη δυναμική για μείωση των εκπομπών. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αντικαταστήσει εν μέρει τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τις μεταφορές και τη θέρμανση. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο άνεμος, ο ήλιος, το νερό, η βιομάζα καθώς και από εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με καύση ορυκτών καυσίμων, οι οποίες όμως θα χρησιμοποιούν τη τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα (carbon capture and storage technology).
- ✓ Οι εκπομπές που οφείλονται στον τομέα της μεταφοράς είναι δυνατόν να μειωθούν κατά 60% σε σχέση με τις εκπομπές που είχαν καταγραφεί το 1990, έως το 2050. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί βραχυπρόθεσμα με τη βελτίωση των κινητήρων βενζίνης και diesel, ώστε να είναι πιο αποδοτικοί. Μακροπρόθεσμα, η μεγάλη εισαγωγή στην αγορά, υβριδικών και ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα συνδράμει περαιτέρω στη μείωση των εκπομπών.
- ✓ Οι εκπομπές που οφείλονται στη βιομηχανία, μπορούν να μειωθούν κατά 80% έως το 2050. Οι τεχνολογίες που θα χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία θα είναι 'καθαρότερες' και πιο αποδοτικές. Από το 2035 και μετά οι βιομηχανίες οι οποίες δεν θα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές τους, θα χρησιμοποιούν την τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα (carbon capture and storage technology) για να τα καταφέρουν.



- ✓ Παρόλο που η ζήτηση για τρόφιμα αυξάνεται και οι εκπομπές που προέρχονται από το κλάδο της γεωργίας αναμένεται να αυξηθούν, ωστόσο κάποια μέτρα μπορούν να ληφθούν. Είναι δυνατή η μείωση των εκπομπών που προέρχονται από τα λιπάσματα και το ζωικό κεφάλαιο.



Βιβλιογραφία

- Intergovernmental Panel in Climate Change (IPCC) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, (2005).
- Ράππη Χριστιάνα (2013): Τεχνικές παρακολούθησης αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς και διαχείριση κινδύνων.
- International Energy Agency (IEA) , (2008). "CO₂ Capture and Storage".
- Mercedes, M., 2017. *Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Storage Technology*. CRC Press.
- P., J., 2012. *Microseismic Monitoring and Geomechanical Modelling of CO₂ Storage in Subsurface Reservoirs*. Springer Science & Business Media.
- Niemi, A., 2017. *Geological Storage of CO₂ in Deep Saline Formations*. Springer Netherlands.

Ιστοσελίδες

- <https://ec.europa.eu/clima>
- <http://www.bbc.com/news/science-environment-35073297>
- <http://www.telegraph.co.uk/business/0/paris-agreement-climate-change-everything-need-know/>
- <https://www.green4sea.com/new-liquid-co2-ship-for-yara/>
- <http://www.zeroco2.no/projects/sleipner-west>
- <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=613>
- <https://www.forbes.com/sites/mindylubber/2014/09/22/tackling-the-oil-industry-on-climate-change/#fc8542466a1c>
- www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends
- <https://www.eia.gov/>
- <http://www.ipcc.ch/>
- <https://www.flickr.com/photos/presidenciamx/23430273715>
- <https://www.statoil.com>
- <https://www.bp.com>
- <https://www.ice.org.uk/knowledge-and-resources/case-studies/sleipner-carbon-capture-storage-project>

