

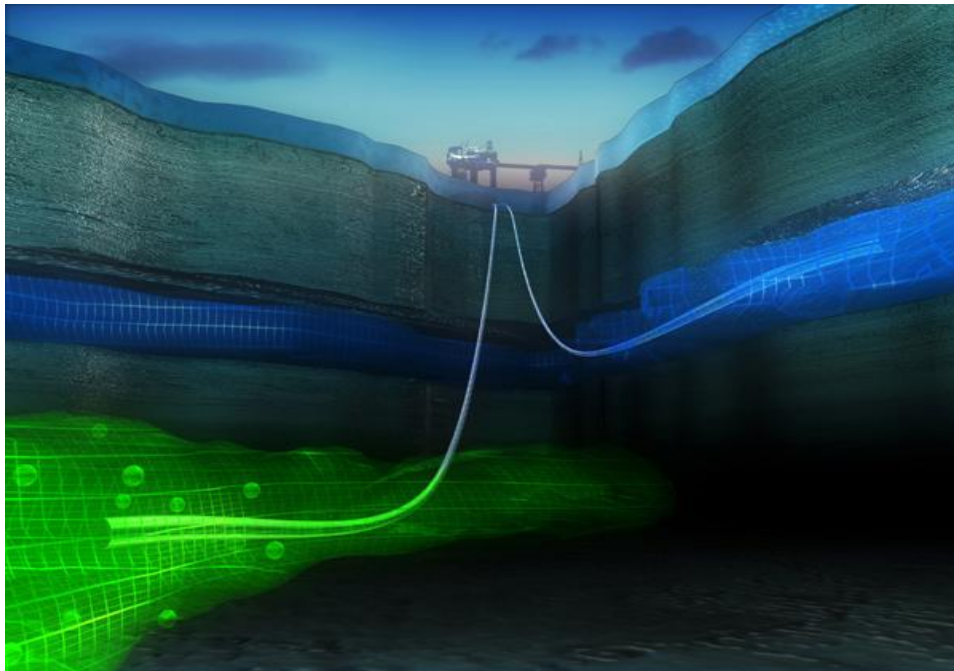


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών

Τομέας Μεταλλευτικής

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂ ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ
ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστιάνα Θ. Ράπτη

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ

Σοφία Σταματάκη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2013

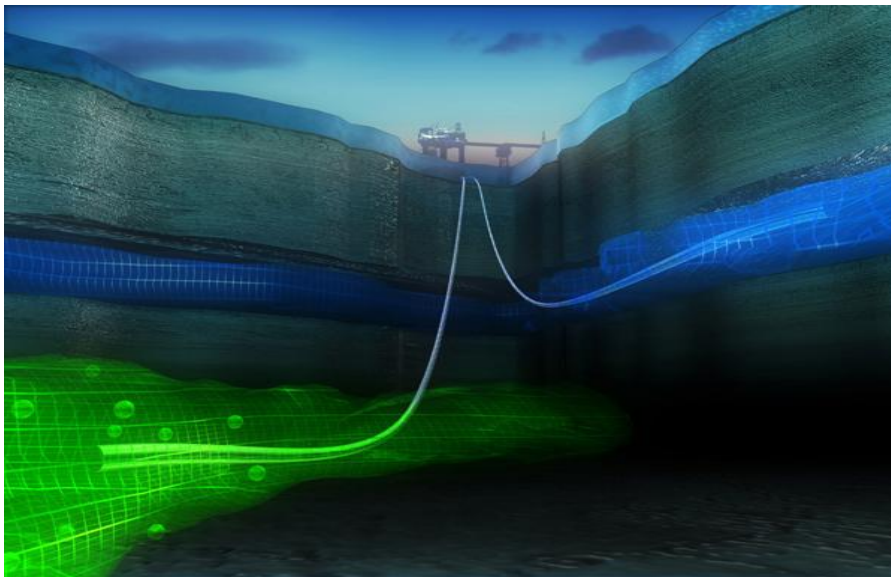


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών

Τομέας Μεταλλευτικής

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂ ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ
ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστιάνα Θ. Ράπτη

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ

Σοφία Σταματάκη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 16/07/2013:

Σ. Σταματάκη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Γ. Αποστολόπουλος, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Α. Μπενάρδος, Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με αφορμή την ολοκλήρωση της εργασίας μου με τίτλο «Τεχνικές Παρακολούθησης Αποθήκευσης CO₂ σε Γεωλογικούς Σχηματισμούς και Διαχείριση Κινδύνων» υπό την επίβλεψη της κας Σταματάκη Σοφίας, καθηγήτριας του Ε.Μ.Π. στον τομέα Μεταλλευτικής, οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς το πρόσωπό της για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, το οποίο μου έδωσε την ευκαιρία να εντυφώσω στις μεθόδους δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς και ειδικότερα στις τεχνικές εκτίμησης, παρακολούθησης και κατ'επέκταση διαχείρισης κινδύνου στα έργα γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂. Ακόμα, θέλω να την ευχαριστήσω για την συνεχή καθοδήγησή της, τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις και την επιστημονική γνώση που μου μετέδωσε τόσο στην διάρκεια διεκπεραίωσης αυτής της εργασίας, αλλά και συνολικά κατά την φοίτησή μου στην σχολή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Ευαγγελία Κόφφα του εργαστηρίου εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, για την υπομονετική καθοδήγησή της και για την συμβολή της στην προετοιμασία του παρόντος πονήματος, αλλά και για την σημαντική επιστημονική της συμβολή στα ειδικότερα θέματα της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη υπομονή και συμπαράσταση, καθώς και τους φίλους μου, μεταξύ των οποίων την φίλη και συνάδελφο Ισμήνη Κατσιμπάρδη για τις πολύτιμες συμβουλές της και την παρότρυνση της όταν συναντούσα κάποια δυσκολία.

Χριστιάνα Θ. Ράπτη

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα τις τελευταίες δεκαετίες, η οποία κατά κύριο λόγο οφείλεται στη χρήση των ορυκτών καυσίμων, οδήγησε αφενός στην αλλαγή της σύστασης της ατμόσφαιρας, αφετέρου σε φαινόμενα ακραίων κλιματικών αλλαγών με σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και τη βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων.

Μια νέα τεχνολογία που υπόσχεται τη μείωση αυτής της συγκέντρωσης, αποτελεί η εφαρμογή της Δέσμευσης, Μεταφοράς και Αποθήκευσης του CO₂ στο υπέδαφος (Capture Carbon Storage, CCS). Σχετικές μελέτες με αυτή την τεχνολογία, υποδεικνύουν ότι αποτελεί μέτρο το οποίο προσανατολίζεται στη λογική των «μηδενικών εκπομπών» (zero emissions) και ότι επίσης είναι μια μακροπρόθεσμου οφέλους λύση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφονται οι μέθοδοι δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς και ειδικότερα δίνεται βάρος στις τεχνικές εκτίμησης και διαχείρισης κινδύνου σε έργα όπου εφαρμόζονται.

Αναλυτικότερα, αναπτύσσονται ξεχωριστά τα στάδια της δέσμευσης του CO₂ σε μεγάλες σταθερές πηγές εκπομπής του (πχ. ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες ορυκτών καυσίμων), της μεταφοράς του (με αγωγούς ή με πλοία) και της αποθήκευσής του σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς. Μελετώνται οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν οι σχηματισμοί αυτοί, τόσο από άποψη της υπεδαφικής δομής τους και σύστασης, όσο και από άποψη των χαρακτηριστικών της επιφάνειας του χώρου αποθήκευσης, αλλά και της ευρύτερης γειτνιάζουσας περιοχής.

Με την βοήθεια διεθνούς βιβλιογραφίας προσδιορίζεται η έννοια του «κινδύνου» σε έργα αποθήκευσης CO₂. Ακολούθως γίνεται μια προσπάθεια καταγραφής μιας δομημένης μεθοδολογίας εκτίμησης και διαχείρισής του, καθότι η έλλειψη προτύπων σε αυτό τον τομέα αποτελεί τροχοπέδη στην ευρεία εφαρμογή των τεχνολογιών CCS και εγείρει το ενδιαφέρον για μελέτη τους.

ABSTRACT

During the last decades the rapid increase in the concentration of CO₂ in the atmosphere, which is caused mainly by the combustion of fossil fuels, led on the one hand, to the change of the composition of the atmosphere and on the other, to extreme phenomena of climate change, causing significant impacts both on human health and the sustainability of ecosystems.

A new technology that promises to reduce this concentration is the application of Capture, Transport and Storage of CO₂ in the subsurface (or Carbon Capture Storage(CCS)). Related studies on this technology indicate that it is a measure which can boost the achievement of «zero emissions» and that it constitutes a long-term benefit solution.

In the present thesis the method of capture, transport and storage of CO₂ in deep geological formations is described and emphasis is given in the techniques of risk assessment and risk management in such projects.

Specifically, the stages of CCS are separately developed. Firstly, CO₂ capture from large stationary emission sources (such as power plants), following transport (through pipelines or ships) and finally storage in suitable geological formations. An extensive study is made about the specifications that a storage site should meet, both in terms of subsurface structure and composition, and in terms of its surface characteristics above the site and in the area of vicinity.

The term of «risk» in storage projects of CO₂ is defined accordingly to the international literature. Then an attempt is made to present a structured methodology for assessing and managing the risk, since the lack of broadly accepted standards restricts the wider application of CCS and raise interest in the study of this field.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή.....	1
1. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ – ΔΕΣΜΕΥΣΗ & ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO₂	4
1.1 Κλιματική Αλλαγή.....	4
1.2 Προέλευση πηγών εκπομπών CO ₂	7
1.3 Κανονιστικό πλαίσιο.....	15
1.3.1 Το Πρωτόκολλο του Κιότο	17
1.3.2 Οργάνωση Συστήματος στην Ελλάδα.....	20
1.3.3 Οι άλλοι δυο μηχανισμοί του Πρωτοκόλλου του Κιότο.....	21
1.4 Κανονιστικό πλαίσιο για τη δέσμευση, μεταφορά & αποθήκευση CO ₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς.....	25
1.5 Εξελίξεις σε επίπεδο Ε.Ε. και Διεθνώς σχετικά τις Τεχνολογίες Δέσμευσης και Αποθήκευσης CO ₂ (CCS).....	30
1.6 Έργα αποθήκευσης CO ₂	34
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ & ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂ (CARBON CAPTURE AND STORAGE,CCS) ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ.....	45
2.1 Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα.....	46
2.1.1 Δέσμευση CO ₂ πριν την καύση (pre-combustion).....	47
2.1.2 Δέσμευση CO ₂ μετά την καύση (post –combustion)	48
2.1.3 Δέσμευση CO ₂ με καύση σε συνθήκες καθαρού O ₂ (oxyfuel combustion).....	49
2.1.4 Κόστος Δέσμευσης.....	54
2.2 Μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα.....	56
2.2.1 Τρόποι Μεταφοράς CO ₂	56
2.2.2 Προδιαγραφές ρεύματος CO ₂ και συνθήκες μεταφοράς	58

2.2.3 Κόστος μεταφοράς	61
2.3 Αποθήκευση CO ₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς.....	63
2.3.1 Χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών αποθήκευσης CO ₂	63
2.3.2 Εναλλακτικές επιλογές γεωλογικών σχηματισμών για την αποθήκευση CO ₂	65
2.4 Κόστος αποθήκευσης CO ₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς	80
2.5 Εκτιμήσεις συνολικού κόστους εφαρμογής CCS.....	81
3.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΡΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	83
3.1 Εκτιμώμενος Αποθηκευτικός χώρος.....	83
3.1.1 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε πεδία πετρελαίου και φυσικού αερίου	84
3.1.2 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε αλατούχους υδροφόρους σχηματισμούς	85
3.1.3 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε κοιτάσματα γαιάνθρακα	86
3.2 Χωρητικότητα γεωλογικών σχηματισμών αποθήκευσης CO ₂	87
3.2.1 Προσέγγιση για την εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας.....	90
3.3 Εισπαισιμότητα γεωλογικών σχηματισμών αποθήκευσης CO ₂	94
3.4 Συγκράτηση CO ₂ από τους γεωλογικούς σχηματισμούς αποθήκευσης.....	97
3.5 Μηχανισμοί παγίδευσης CO ₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς	98
3.5.1 Φυσική παγίδευση.....	98
3.5.2 Γεωχημική παγίδευση.....	101
3.5.3 Συνδυασμός και σενάρια αλληλεπίδρασης των τύπων παγίδευσης.....	102
4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΕ ΕΡΓΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂..	107
4.1 Τι ορίζεται ως κίνδυνος;	107
4.2 Εκτίμηση κινδύνου σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂	107
4.3 Βασικές αρχές της Εκτίμησης του Κινδύνου (Risk assessment) σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂ κατά τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA GHG).....	109

4.4 Εκτίμηση πηγών κινδύνου (Risk source assessment).....	113
4.4.1 Επιλογή και χαρακτηρισμός χώρων αποθήκευσης (Site Selection and characterization).....	113
4.4.2 Αναγνώριση κινδύνων (Risk identification).....	125
4.5 Εκτίμηση της Έκθεσης στον Κίνδυνο (Exposure Assessment).....	131
4.5.1 Αναλυτικός χαρακτηρισμός του χώρου αποθήκευσης (Detailed site characterization).....	131
4.5.2 Μοντελοποίηση (Simulation) του συστήματος αποθήκευσης.....	139
4.6 Εκτίμηση των επιπτώσεων (Effects assessment).....	145
4.6.1 Επιπτώσεις στον άνθρωπο.....	146
4.6.2. Επιπτώσεις στα οικοσυστήματα.....	147
4.6.3 Επιπτώσεις στους υδροφόρους ορίζοντες.....	149
4.7 Χαρακτηρισμός επικινδυνότητας (Risk characterization).....	150
4.7.1 Εργαλεία χαρακτηρισμού και κατ'επέκταση εκτίμησης του κινδύνου.....	152
5. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ (RISK MANAGEMENT) ΣΕ ΕΡΓΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂.....	154
5.1 Αποτίμηση του Κινδύνου (Risk evaluation).....	155
5.2 Αντιμετώπιση του Κινδύνου (Risk treatment).....	156
5.3 Παρακολούθηση και Επαλήθευση (Monitoring and Verification).....	157
5.3.1 Αναγκαιότητα και κύριοι στόχοι της Παρακολούθησης (Monitoring).....	157
5.3.2 Σχεδιασμός προγράμματος παρακολούθησης.....	159
5.3.3 Τεχνολογίες Παρακολούθησης.....	160
5.3.4 Κόστος παρακολούθησης.....	184
5.4 Πιθανά Σενάρια διαρροών σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂	184
5.4.1 Σενάρια Διαρροής σε χερσαία περιβάλλοντα.....	185
5.4.2 Σενάρια Διαρροής σε Θαλάσσια Περιβάλλοντα.....	187
5.4.3 Λοιπά σενάρια κινδύνου.....	189

5.5 Εφαρμογή Μέτρων Αντιμετώπισης/Αποκατάστασης.....	191
5.5.1 Κόστος Αποκατάστασης.....	194
6. Συμπεράσματα.....	196
Βιβλιογραφία.....	204

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της επίδρασης του CO ₂ σε αυτό.....	5
Εικόνα 1.2: Χάρτης κατανομής σε παγκόσμια κλίμακα των μεγάλων σταθερών πηγών CO ₂ ανά MtCO ₂ /έτος [84].....	8
Εικόνα 1.3: Χάρτης κατανομής των βιομηχανικών εγκαταστάσεων που εκπέμπουν CO ₂ στον Ελλαδικό χώρο ανά τομέα.....	22
Εικόνα 1.4: Παγκόσμιος χάρτης έργων μεγάλης κλίμακας [5].....	36
Εικόνα 1.5: Χάρτης έργων γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂ μεγάλης κλίμακας στην Ευρώπη [5].....	37
Εικόνα 1.6: Απεικόνιση εισπίεσης και υπεδαφικής γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂ σε θαλάσσιο περιβάλλον (offshore) στο Sleipner [116].....	42
Εικόνα 1.7: Διασυνοριακή Μεταφορά CO ₂ από τις ΗΠΑ στον Καναδά για εφαρμογή ενισχυμένης απόληψης πετρελαίου και ταυτόχρονη γεωλογική αποθήκευση του CO ₂ [117].....	43
Εικόνα 2.1: Εναλλακτικές λύσεις για την αποθήκευση του CO ₂ σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς [17].....	66
Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής επαύξησης απόληψης πετρελαίου με εισπίεση ρεύματος CO ₂ [102].....	69
Εικόνα 3.1: Παγκόσμιος χάρτης αξιολόγησης του δυναμικού αποθήκευσης [5].....	88
Εικόνα 3.2: Ευρωπαϊκός χάρτης κατανομής των πηγών CO ₂ και των χώρων αποθήκευσης [119].....	89
Εικόνα 3.3: Στρώματα χαμηλής διαπερατότητας aquitard/aquiclude [108].....	99
Εικόνα 3.4: Μηχανισμός υπολειμματικής (εναπομένουσας) παγίδευσης [120].....	100
Εικόνα 3.5: Σχηματισμός όπου υπερισχύει ο μηχανισμός παγίδευσης λόγω δομής [120].....	104
Εικόνα 3.6: Δράση μηχανισμών παγίδευσης σε σχηματισμούς όπου υπερισχύει η εναπομένουσα παγίδευση (α), και σε σχηματισμούς όπου υπερισχύει η παγίδευση λόγω διαλυτοποίησης (β) [120].....	105
Εικόνα 4.1: Απεικόνιση της σχέσης των σταδίων Ελέγχου, Επιλογής και Χαρακτηρισμού ενός χώρου γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂ [38].....	113
Εικόνα 4.2: Μικροδομή συστήματος πετρώματος – ρευστών.....	116
Εικόνα 4.3: Ψυχομετρικό διάγραμμα διαφόρων κινδύνων [46].....	121

Εικόνα 4.4: Σύγκριση της γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂ με άλλους βιομηχανικούς κινδύνους [46].....	122
Εικόνα 4.5: Σχηματική απεικόνιση των κινδύνων που σχετίζονται με την υπεδαφική αποθήκευση του CO ₂ [26].....	125
Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση των πιθανών οδών διαφυγής μέσα από μια γεώτρηση [27].....	127
Εικόνα 4.7: Σχηματική απεικόνιση της μετανάστευσης της άλμης μέσα σε μια ενεργή γεώτρηση λόγω της συμπίεσης από την εισπίεση του CO ₂ [28].....	130
Εικόνα 4.8: Παράδειγμα στρωματογραφικής στήλης (Illinois Basin) [11].....	135
Εικόνα 4.9: Μέθοδος πυρηνοληψίας από τα πλευρικά τοιχώματα της γεώτρησης [118].....	137
Εικόνα 4.10: Τρισδιάστατο επίπεδο μοντέλο προσομοίωσης Open Geo Sys (OGS) [111].....	142
Εικόνα 4.11: Παράδειγμα δυναμικού γεωλογικού 3D μοντέλου [112].....	143
Εικόνα 4.12: Επιπτώσεις έκθεσης ανθρώπου σε διάφορες συγκεντρώσεις CO ₂ στην ατμόσφαιρα [117].....	146
Εικόνα 4.13: Μελέτη επιπτώσεων των υψηλών συγκεντρώσεων CO ₂ στα φυτά στην Latera (Ιταλία) [29].....	147
Εικόνα 4.14: Σχηματική απεικόνιση των υπεδαφικών επιπτώσεων κατά την διάρκεια και μετά το πέρας της βιομηχανικής κλίμακας εισπίεσης του CO ₂ [32].....	149
Εικόνα 4.15: Συσχέτιση FEPs με κινδύνους που ενδέχεται να παρουσιαστούν [37].....	152
Εικόνα 5.1: Τύποι γεωτρήσεων παρατήρησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έργα αποθήκευσης CO ₂ [52].....	164
Εικόνα 5.2: Μέθοδοι παρακολούθησης στην επιφάνεια [54].....	168
Εικόνα 5.3: Απεικόνιση συγκεντρώσεων CO ₂ στον αέρα μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας, Laacher See, Γερμανία [61].....	169
Εικόνα 5.4: Απεικόνιση σεισμικών ερευνών [114].....	173
Εικόνα 5.5: Απεικόνιση οχημάτων βυθομέτρησης σε λειτουργία [61].....	178
Εικόνα 5.6: (a) Εικόνα από υψηλής ανάλυσης βαθυμετρία πολλαπλής δέσμης σε βάθος 300 μέτρων (Mid-Norway), (b) Απεικόνιση κρατήρων βάθους 2-3 μέτρων στη Βόρεια Θάλασσα [61].....	179
Εικόνα 5.7: Ένα σύστημα παρακολούθησης στηριζόμενο πάνω σε σηματοδούρα, με ένα χωνί για την συλλογή του αερίου από τον πυθμένα [61].....	180

Εικόνα 5.8: (a) υδροακουστικός πίδακας (hydroacoustic flare) στη στήλη νερού, (b) ακουστική θολερότητα (acoustic blanking/ turbidity) προκαλούμενη από σκέδαση των P κυμάτων από τις φυσαλίδες αερίου [61].....	180
Εικόνα 5.9: Εφαρμογή δειγματοληψίας επιφανειακών νερών και ανάλυσης τους με ανιχνευτή CDT ώστε να προσδιοριστεί η ύπαρξη διαλυμένου CO ₂ ή άλλων στοιχείων που υποδεικνύουν την ύπαρξη διαρροής [61].....	181
Εικόνα 5.10: Εργαλεία Παρακολούθησης και Σενάρια Διαρροής [91].....	185
Εικόνα 5.11: Επισκόπηση των οδών διαφυγής CO ₂ και των αντίστοιχων μέτρων αποκατάστασης [52].....	191

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Εκπομπές CO ₂ (Mt) ανά είδος ορυκτού καυσίμου (α) και ανά περιοχή (β) για το χρονικό διάστημα από 1971 έως το 2010.....	11
Σχήμα 1.2: Εκπομπές CO ₂ από βιομηχανικές δραστηριότητες για το 2011, σε επίπεδο E.E.-27 [105].....	13
Σχήμα 1.3: Εκπομπές CO ₂ από βιομηχανικές δραστηριότητες για το 2011, για την Ελλάδα [105].....	14
Σχήμα 1.4: Παγκόσμια χρήση ενέργειας ανά πηγή παραγωγής για το έτος 2011 [106].....	15
Σχήμα 1.5: Έργα μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης CO ₂ ανά περιοχή [5].....	35
Σχήμα 2.1: Συνοπτική απεικόνιση τεχνολογιών δέσμευσης CO ₂ [17].....	47
Σχήμα 2.2: Διαφορά CO ₂ που δεσμεύεται από την ποσότητα αυτού που τελικά δεν απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα [24].....	54
Σχήμα 2.3: Κόστος ανά τόνο CO ₂ που αποφεύχθηκε για διαφορετικές τεχνολογίες δέσμευσης [24].....	55
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα φάσεων του CO ₂	61
Σχήμα 2.5: Κόστος μεταφοράς CO ₂ με χρήση χερσαίων, υποθαλάσσιων αγωγών και δεξαμενόπλοιων σε συνάρτηση της απόστασης για τη μεταφορά 6 Mt CO ₂ /έτος [17].....	62
Σχήμα 2.6: Αναλογίες των πηγών που αναμένεται να τροφοδοτήσουν πεδία EOR το 2015 και 2020 [68].....	72
Σχήμα 3.1: Τεχνικό-οικονομική Πυραμίδα Πόρων-Αποθεμάτων [48].....	91
Σχήμα 3.2: Γραφική αναπαράσταση της μέγιστης διαφορικής πίεσης, ΔP.....	96

Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Εκτίμησης Κινδύνου σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂ [44].....	109
Σχήμα 4.2: Χρονολόγιο φάσεων ενός έργου γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂ [62]...	110
Σχήμα 5.1: Η μέθοδος ALARP [41].....	155

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Σταθερές πηγές εκπομπών CO ₂ [17].....	9
Πίνακας 1.2: Προφίλ σταθερών πηγών εκπομπών CO ₂ για το έτος 2011 [104].....	10
Πίνακας 1.3: Έργα μεγάλης κλίμακας που βρίσκονται σε στάδιο Λειτουργίας (operation) και σε στάδιο Δοκιμής (execute) [5].....	38
Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διάφορων τεχνολογιών δέσμευσης.....	51
Πίνακας 2.2: Ενδεικτικά κόστη ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας Υπερκρίσιμου Κονιοποιημένου Άνθρακα (SCPC) με ή χωρίς (reference plant) δέσμευση CO ₂ [84].....	55
Πίνακας 2.3: Εκτιμήσεις κόστους δικτύων μεταφοράς 20 Μtpa (Million tonnes per annum) σε €/τόννο CO ₂ [23].....	62
Πίνακας 2.4: Εκτίμηση χωρητικότητας αποθήκευσης CO ₂ σε Gt για πεδία της Βόρειας Θάλασσας [17].....	73
Πίνακας 2.5: Ιδιότητες έργων αποθήκευσης σε βαθείς αλατούχους υδροφόρους σχηματισμούς [116].....	75
Πίνακας 3.1: Δείκτης εμπιστοσύνης της χωρητικότητας αποθήκευσης του CO ₂	94
Πίνακας 4.1: Κριτήρια κατάταξης επιλεγμένων χώρων αποθήκευσης.....	131
Πίνακας 4.2: Μεθοδολογίες εκτίμησης κινδύνου για έργα γεωλογικής αποθήκευσης [37].....	151
Πίνακας 5.1: Απαιτήσεις παρακολούθησης σε ένα έργο γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂	159
Πίνακας 5.2: Συσχέτιση στόχων παρακολούθησης και τεχνολογιών παρακολούθησης [54].....	162
Πίνακας 5.3: Βασικές τεχνολογίες παρακολούθησης που εφαρμόζονται ανά φάση του έργου.....	163

Πίνακας 5.4: Παράμετροι που μετρούν οι τεχνολογίες παρακολούθησης και εφαρμογές τους.....	182
Πίνακας 5.5: Πιθανά μέτρα αποκατάστασης σε περιπτώσεις διαρροών σε έργα αποθήκευσης CO ₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς [17].....	192

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης τις τεχνικές παρακολούθησης και διαχείρισης κινδύνου σε έργα αποθήκευσης CO₂ σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς. Η αναγκαιότητα μελέτης και ανάπτυξης αυτών των τεχνικών προκύπτει από το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον σχετικά με τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μεγάλης κλίμακας έργων αποθήκευσης CO₂. Τα έργα αποθήκευσης CO₂ αποτελούν τον τελευταίο κρίκο της αλυσίδας των τεχνολογιών Δέσμευσης, Μεταφοράς και Αποθήκευσης CO₂.

Αυτές οι τεχνολογίες, θεωρούνται, ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο καταπολέμησης της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η οποία είναι το κυριότερο φαινόμενο που συντελεί στην κλιματική αλλαγή. Ένας από τους λόγους που δεν έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής ακόμα, είναι η έλλειψη ενός πρότυπου πλαισίου εκτίμησης και διαχείρισης των κινδύνων, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά το στάδιο της υπεδαφικής αποθήκευσης του CO₂.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να παρουσιαστεί ένα δομημένο πλαίσιο που θα βοηθά στον καθορισμό και τον αποτελεσματικό συντονισμό των δραστηριοτήτων που θα εξασφαλίζουν την επίτευξη των στόχων ενός έργου γεωλογικής αποθήκευσης CO₂, δηλ. την μόνιμη και ασφαλή απομόνωσή του στο υπέδαφος. Ένα τέτοιο πλαίσιο μπορεί να εντοπίσει και να αναδείξει μέσω ορισμένων βημάτων, ποιοι κίνδυνοι ενδεχομένως θα παρουσιαστούν, τι επιπτώσεις θα έχουν και πώς μπορούν να προληφθούν ή να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα.

Η προσέγγιση του πλαισίου εκτίμησης και διαχείρισης των κινδύνων σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης, η οποία ακολουθήθηκε, ήταν κατά το πρότυπο που προτείνει το International Energy Agency for Greenhouse Gases στη σχετική μελέτη ανασκόπησης των κατευθυντήριων γραμμών που υπάρχουν σήμερα σε διεθνές επίπεδο πάνω στο θέμα αυτό. Μέσα σε αυτήν την μελέτη διατυπώνεται ξεκάθαρα η ανάγκη αναγνώρισης μιας κοινής μεθόδου προσέγγισης του κινδύνου στα έργα αποθήκευσης CO₂, καθώς και της καθιέρωσης μιας κοινής ορολογίας περί του θέματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, τις αιτίες πρόκλησής του και τις επιπτώσεις του. Ακολουθεί παράθεση των μεγαλύτερων

πηγών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με έμφαση στις πηγές του CO₂. Αναφέρονται τα σχετικά κανονιστικά πλαίσια, με ιδιαίτερη αναφορά στο Πρωτόκολλο του Κιότο και το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Αερίων. Παρουσιάζεται η σχετική με τις μεθόδους Δέσμευσης, Μεταφοράς και Αποθήκευσης του CO₂, νομοθεσία, καθώς και οι εξελίξεις σχετικά με αυτή την τεχνολογία σε επίπεδο ευρωπαϊκό και διεθνές. Τέλος, αναφέρονται τα έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ μεγάλης κλίμακας, που είτε βρίσκονται στο στάδιο λειτουργίας ή ανάπτυξης, είτε ακυρώθηκαν ή αναβλήθηκαν για ποικίλους λόγους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύονται όλες οι συνιστώσες των τεχνολογιών CCS (Carbon Capture Storage). Αρχικά περιγράφονται συνοπτικά τα είδη δέσμευσης και το κόστος της διαδικασίας. Ακολουθεί η παράθεση των τρόπων μεταφοράς του από τον χώρο της δέσμευσης προς τον σχηματισμό της αποθήκευσης. Αναφέρονται πάνω σε αυτό, οι προδιαγραφές που πρέπει να έχει το CO₂ κατά την μεταφορά του και τα κόστη μεταφοράς. Έπειτα καταγράφονται τα χαρακτηριστικά που πρέπει να φέρουν οι γεωλογικοί σχηματισμοί ώστε να κρίνονται κατάλληλοι για την εφαρμογή της αποθήκευσης και αναλύονται οι εναλλακτικές επιλογές αποθήκευσης. Τέλος, αφού αναφερθούν τα ενδεικτικά κόστη και της αποθήκευσης, παρουσιάζεται μια εκτίμηση του συνολικού κόστους των τεχνολογιών CCS.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται εκτενέστερα τα χαρακτηριστικά των αποθήκευτρων σχηματισμών. Αναφέρεται πώς εκτιμάται ο αποθηκευτικός χώρος σε κάθε είδους πεδίο αποθήκευσης. Ακολουθεί η περιγραφή των ιδιοτήτων της χωρητικότητας, εισπνευσιμότητας και συγκράτησης των σχηματισμών αποθήκευσης. Στο τέλος περιγράφονται οι μηχανισμοί παγίδευσης του CO₂, με φυσικές ή χημικές διεργασίες, μέσα στους πόρους των πετρωμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αρχικά δίνεται ο ορισμός της έννοιας του «κινδύνου». Αναφέρεται στη συνέχεια η αναγκαιότητα εκτίμησης του κινδύνου (risk assessment) σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης, καθώς και οι βασικές αρχές που την διέπουν κατά την μελέτη του IEAGHG. Ακολουθώντας αναλύονται οι σημαντικότερες συνιστώσες της διαδικασίας: α) η εκτίμηση των πηγών του κινδύνου (risk source assessment), η οποία περιλαμβάνει την επιλογή και τον χαρακτηρισμό των χώρων της αποθήκευσης και την αναγνώριση των πιθανότερων κινδύνων. β) η εκτίμηση της έκθεσης (exposure assessment), η οποία περιλαμβάνει τον λεπτομερέστερο χαρακτηρισμό του υπεδάφους του χώρου αποθήκευσης και τη μοντελοποίηση του. γ) η εκτίμηση των επιπτώσεων (effects

assessment) των κινδύνων στους ανθρώπους, τα οικοσυστήματα και τους υδροφόρους ορίζοντες. δ) ο *χαρακτηρισμός επικινδυνότητας (risk characterization)*, ο οποίος ενσωματώνει τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω συνιστωσών και δίνει την πιθανότητα εμφάνισης δυσμενών επιπτώσεων λόγω του έργου.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία διαχείρισης του κινδύνου (*risk management*) στην γεωλογική αποθήκευση του CO₂. Οι συνιστώσες της είναι: α) η *αποτίμηση του κινδύνου (risk evaluation)*, που είναι η διαδικασία με την οποία κρίνεται ποιοι κίνδυνοι χρήζουν αντιμετώπισης και με τι προτεραιότητα, β) η *αντιμετώπιση του κινδύνου (risk treatment)*, βάσει της οποίας επιλέγεται ο μηχανισμός αποφυγής ή/και μείωσης του κινδύνου, γ) η *παρακολούθηση και επαλήθευση (monitoring and verification)*, η οποία μαζί με τις μοντελοποιήσεις αποτελεί πηγή δεδομένων σχετικών με τον χώρο αποθήκευσης και γενικότερα με το έργο, βοηθώντας στην λήψη των αποφάσεων ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι του. Σχετικά με την παρακολούθηση, αναπτύσσονται οι στόχοι της , ο τρόπος σχεδιασμού του προγράμματός της, οι διαθέσιμες τεχνολογίες και το κόστος της ως διαδικασία. Ακολούθως, περιγράφονται τα πιθανότερα σενάρια διαρροής του CO₂ τόσο σε χερσαία (onshore) όσο και σε θαλάσσια περιβάλλοντα (offshore), καθώς και ορισμένα ακόμη σενάρια κινδύνων που ενδεχομένως προκύπτουν λόγω του έργου της αποθήκευσης. Στην συνέχεια παραθέτονται ορισμένοι τρόποι αντιμετώπισης σε αντιστοιχία με τα σενάρια κινδύνων (κυρίως διαρροών CO₂). Εν κατακλείδι, γίνεται μια μικρή αναφορά στο εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης σε περίπτωση εμφάνισης κινδύνου, το οποίο περιλαμβάνει τον εντοπισμό του (πχ πηγή διαρροής CO₂) και των μέτρων αντιμετώπισής του.

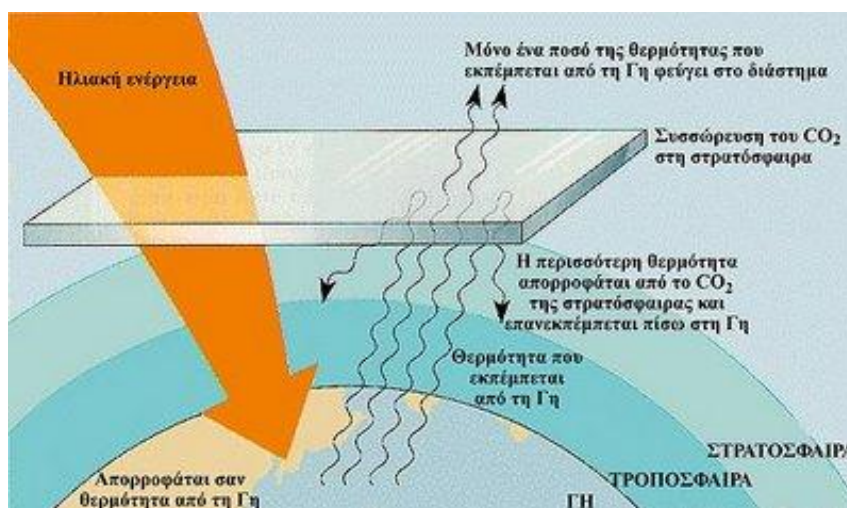
1. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ – ΔΕΣΜΕΥΣΗ & ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO₂

1.1 Κλιματική Αλλαγή

Ο όρος κλιματική αλλαγή αναφέρεται στην μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος, και ειδικότερα στις μεταβολές των καιρικών συνθηκών που εκτείνονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα, ως αποτέλεσμα των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Είναι πλέον δεδομένο ότι ο βασικός παράγοντας που οδηγεί στην μεταβολή του κλίματος του πλανήτη, είναι η ραγδαία αύξηση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου που αποδίδεται κατά κύριο λόγο σε εκπομπές από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Αυτή η αύξηση εντείνει το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή τη δυνατότητα της ατμόσφαιρας να συγκρατεί τη θερμότητα σε επίπεδα αναγκαία για την επιβίωση των ειδών. Όμως, λόγω της αυξανόμενης ρύπανσης της ατμόσφαιρας, μεγάλα ποσά θερμότητας εγκλωβίζονται στην Γη αντί να διαχέονται στο διάστημα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη με απρόβλεπτες και πολυάριθμες συνέπειες για την ζωή σε αυτόν.

Όπως έχουν δείξει πολλές μελέτες μέχρι σήμερα, ο μεγαλύτερος συντελεστής του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Οι εκπομπές του διοξειδίου

του άνθρακα προέρχονται από ανθρώπινες και μη δραστηριότητες. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες περιλαμβάνουν κυρίως την καύση των ορυκτών καυσίμων, τη χρήση χλωροφθορανθράκων(CFC's), την καύση δασικών περιοχών κ.ο.κ. Οι μη ανθρωπογενείς δραστηριότητες, από την άλλη μπορεί να είναι ηφαιστειακές εκρήξεις, γεωθερμικά πεδία, πυρκαγιές που δεν προκλήθηκαν από ανθρώπινο παράγοντα κ.ο.κ. Συνεπώς, λόγω αυτών των εκπομπών και σε συνδυασμό και με τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου(τα οποία αποτελούν κύρια, το μεθάνιο (CH₄), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), και οι υδρατμοί) προκαλείται το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας, η καταστροφή του όζοντος και πληθώρα άλλων φαινομένων που λειτουργούν αλυσιδωτά.



Εικόνα 1.1 : Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της επίδρασης του CO₂ σε αυτό.

Χαρακτηριστικά, πρόσφατες έρευνες της NASA και της Αμερικάνικης Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας, κατέταξαν το 2012 στην ένατη θέση των θερμότερων ετών από το 1880. Μάλιστα, οι εννέα θερμότερες χρονιές καταγράφονται από το 2000 και μετά, με το 2005 να εξακολουθεί να είναι το θερμότερο ως τώρα καταγεγραμμένο έτος. Παρατηρείται, επομένως, μια τάση «υπερθέρμανσης» του πλανήτη, με την μέση ετήσια θερμοκρασία το 2012 να είναι 14.6°C, δηλαδή αυξημένη κατά 1.4 βαθμούς σε σχέση με την μέση θερμοκρασία το 1990. Μέχρι τα τέλη του αιώνα που διανύουμε, η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη αναμένεται να αγγίξει τους 4°C, ποσό διπλάσιο από τα όρια ασφαλείας που θέτουν τα Ηνωμένα Έθνη.

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και ως συνέπεια της αύξησης της θερμοκρασίας, εντοπίζονται επίσης στην άνοδο της στάθμης των θαλασσών λόγω της τήξης των πολικών παγετών, στη συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων όπως ξηρασία, καταιγίδες, πλημμύρες κλπ, στην οξίνιση των ωκεανών λόγω σημαντικού ποσοστού απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Αυτές ακολούθως επιφέρουν σοβαρές μεταβολές στην λειτουργία και την ακεραιότητα των οικοσυστημάτων αλλά και στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Ο κίνδυνος της εξάλειψης ορισμένων ειδών, ο περιορισμός των υδάτινων πόρων, η δημόσια υγεία, η προσφορά τροφής, η βιομηχανία, οι γεωργικές καλλιέργειες, οι μεταφορές και οι υποδομές είναι μερικοί από τους τομείς που επηρεάζονται. Όλα αυτά προσδίδουν στο περιβαλλοντικό πρόβλημα, κοινωνικές, οικονομικές ακόμα και πολιτικές διαστάσεις.

Επίσης, το κλίμα και οι κλιματικές αλλαγές συνδέονται άμεσα και αλληλοεπηρεάζονται με την κατάσταση οικονομικής δυσπραγίας στην οποία έχει περιέλθει ο πλανήτης. Στην έκθεση *Global Risks 2013* που εκπόνησε το Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ (WEF) αυτό αναδείχθηκε ξεκάθαρα, καθώς έδειξε ότι οι κυβερνήσεις παγκοσμίως στρέφονται σε ρυπογόνες ενεργειακές πηγές ως λιγότερο κοστοβόρες. Αυτή η τάση δημιουργεί ένα φαύλο κύκλο, εφόσον στις ακραίες συνθήκες φτώχειας που επικρατούν, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, προστίθενται και τα ακραία καταστροφικά φυσικά φαινόμενα που επιδεινώνουν την κατάσταση. Αναφορικά, το κόστος των φυσικών καταστροφών λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων το 2012 άγγιξε τα 160 δις. δολάρια (Munich Re) με το 67% αυτού του ποσού να οφείλεται στις ζημιές που προκλήθηκαν από τον τυφώνα Σάντι στις ΗΠΑ. Οι απώλειες όμως δεν μετρούνται μόνο με οικονομικούς όρους, αλλά και σε ανθρώπινες ζωές. Το 2012 ο αριθμός των ανθρώπων που έχασαν την ζωή τους από φυσικές καταστροφές ανέρχεται σε 9.500, με 1000 από αυτούς να καταγράφονται ως θύματα του Τυφώνα Μπόφα στις Φιλιππίνες.

Οι δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής δεν μπορούν πλέον να περάσουν απαρατήρητες. Έχουν, λοιπόν, θορυβήσει και ευαισθητοποιήσει την πλειονότητα των ανθρώπων παγκοσμίως και εκτός της επιστημονικής κοινότητας, η οποία έκρουε τον κώδωνα του κινδύνου αρκετά χρόνια τώρα βασιζόμενη σε προβλέψεις μαθηματικών μοντέλων.

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, σε δείγμα 13.000 ανθρώπων από 13 χώρες, εξάχθηκαν

τα εξής συμπεράσματα σχετικά με την άποψη της κοινής γνώμης για την κλιματική αλλαγή:

- 9 στους 10 αναγνωρίζουν ότι το κλίμα έχει αλλάξει τα τελευταία 20 χρόνια και τα $\frac{3}{4}$ αυτών θεωρούν ότι αυτή η μεταβολή αποδεικνύεται επιστημονικά.
- το 73% δηλώνει ότι έχει πληγεί άμεσα από τις συνέπειες της, ιδιαίτερα τα ακραία καιρικά φαινόμενα.
- το 97% μάλιστα δηλώνει πως αγωνιά για αυτό το φαινόμενο, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες οικονομίες πχ. Τουρκία, Χονγκ Κονγκ, Ινδονησία, Μεξικό κοκ). Το ποσοστό μειώνεται λίγο στις αναπτυγμένες χώρες (Γαλλία, Γερμανία, Ελβετία, ΗΠΑ, Ιαπωνία, κοκ) στο 81%.

Τέλος, το 88% πιστεύει ότι μπορούν να περιοριστούν οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής και να βρεθούν καινοτόμες λύσεις [7].

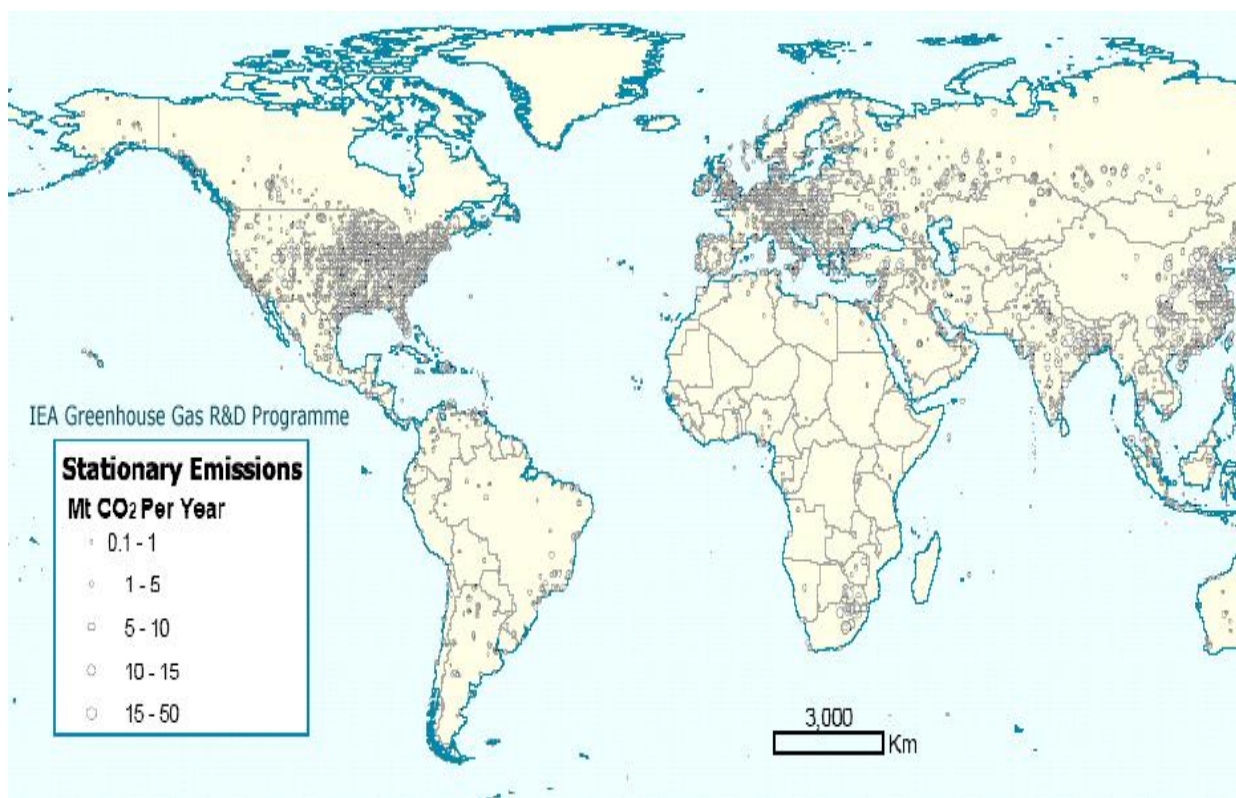
1.2 Προέλευση πηγών εκπομπών CO₂

Η προέλευση των μεγαλύτερων ποσοτήτων εκπομπών CO₂ από την ανθρώπινη δραστηριότητα αφορά κατά βάση σταθερές πηγές και κυρίως εγκαταστάσεις καύσης ορυκτών καυσίμων, βιομηχανικών διεργασιών και επεξεργασίας φυσικού αερίου. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος τους προκύπτει κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων με την οξείδωση του άνθρακα. Επομένως, εντοπίζεται, κυρίως, σε εγκαταστάσεις όπου χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας, σε διυλιστήρια και μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. Αυτές οι εγκαταστάσεις άλλωστε ευθύνονται για παραπάνω από τις μισές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Το CO₂ που δεν προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, παράγεται σε βιομηχανικές μονάδες όπου πραγματοποιούνται διεργασίες όπως:

- * θερμική διάσπαση (calcination) ασβεστόλιθου και δολομίτη στην παραγωγή τσιμέντου και ασβέστη
- * χρήση άνθρακα ως αναγωγικό μέσο στην εμπορική παραγωγή μετάλλων από ορυκτά
- * ζύμωση βιομάζας
- * χρήση καυσίμων ως πρώτες ύλες σε πετροχημικές διεργασίες

Σε άλλες περιπτώσεις, συμπαράγονται εκπομπές από βιομηχανικές διεργασίες και καύση

καυσίμων όπως στην περίπτωση της παραγωγής αλουμινίου.



Εικόνα 1.2 : Χάρτης κατανομής σε παγκόσμια κλίμακα των μεγάλων σταθερών πηγών CO₂ σε MtCO₂/έτος [84].

Περισσότερα στοιχεία για το προφίλ των σταθερών αυτών πηγών είναι δυνατό να ληφθούν από τον Πίνακα 1.1 , τα οποία έχουν εξαχθεί από τη βάση δεδομένων που έχει αναπτυχθεί από το IEA Greenhouse Gas R&D Programme με γεωγραφική κατανομή ανά είδος διεργασίας και χώρα, που εκπέμπουν περισσότερο από 0.1 Mt CO₂ /έτος για το έτος 2000. (Το όριο αυτό επιλέχθηκε καθώς οι πηγές που εκπέμπουν λιγότερο από 0.1 Mt CO₂/έτος μαζί υπολογίζεται ότι αποτελούν λιγότερο από το 1% των εκπομπών από τις σταθερές πηγές που μελετώνται).

Πίνακας 1.1 : Σταθερές πηγές εκπομπών CO₂ [17].

Process	CO ₂ concentration in gas stream % by vol.	Number of sources	Emissions (MtCO ₂)	% of total CO ₂ emissions	Cumulative total CO ₂ emissions (%)	Average emissions/source (MtCO ₂ per source)
CO₂ from fossil fuels or minerals						
Power						
Coal	12 to 15	2,025	7,984	59.69	59.69	3.94
Natural gas	3	985	759	5.68	65.37	0.77
Natural gas	7 to 10	743	752	5.62	70.99	1.01
Fuel oil	8	515	654	4.89	75.88	1.27
Fuel oil	3	593	326	2.43	78.31	0.55
Other fuels ^a	NA	79	61	0.45	78.77	0.77
Hydrogen	NA	2	3	0.02	78.79	1.27
Natural-gas sweetening	NA ^b	NA	50 ^c	0.37	79.16	
Cement production						
Combined	20	1175	932	6.97	86.13	0.79
Refineries						
	3 to 13	638	798	5.97	92.09	1.25
Iron and steel industry						
Integrated steel mills	15	180	630 ^d	4.71	96.81	3.50
Other processes ^e	NA	89	16	0.12	96.92	0.17
Petrochemical industry						
Ethylene	12	240	258	1.93	98.85	1.08
Ammonia: process	100	194	113	0.84	99.70	0.58
Ammonia: fuel combustion	8	19	5	0.04	99.73	0.26
Ethylene oxide	100	17	3	0.02	99.75	0.15
Other sources						
Non-specified	NA	90	33	0.25	100.00	0.37
		7,584	13,375	100		1.76
CO₂ from biomass^f						
Bioenergy	3 to 8	213	73			0.34
Fermentation	100	90	17.6			0.2

^a Other gas, other oil, digester gas, landfill gas.

^b A relatively small fraction of these sources has a high concentration of CO₂. In Canada, only two plants out of a total of 24 have high CO₂ concentrations.

^c Based on an estimate that about half of the annual worldwide natural-gas production contains CO₂ at concentrations of about 4% mol and that this CO₂ content is normally reduced from 4% to 2% mol (see Section 3.2.2).

^d This amount corresponds to the emissions of those sources that have been individually identified in the reference database. The worldwide CO₂ emissions, estimated by a top-down approach, are larger than this amount and exceed 1 Gt (Gielen and Moriyuchi, 2003).

^e For North America and Brazil only. All numbers are for 2003, except for power generation from biomass and waste in North America, which is for 2000.

Συγκεντρωτικά παρατηρείται λοιπόν ότι από τις 7.900 πηγές, οι 4.942 πηγές αντιστοιχούν σε σημειακές πηγές που εκπέμπουν CO₂ (10.539 Mt/έτος) από ορυκτά καύσιμα και αντιπροσωπεύουν τον τομέα της ενέργειας, σε ποσοστό 78,78% εκ του συνόλου των εκπομπών. Ακολουθεί η παραγωγή τσιμέντου με 1175 πηγές που αντιστοιχούν σε 932 Mt/έτος και ποσοστό 6,97 εκ του συνόλου των εκπομπών, τα διυλιστήρια με 638 πηγές και ποσοστό 5,97 του συνόλου των εκπομπών, η βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα με 269 πηγές που εκπέμπουν το 4,83% του συνόλου των εκπομπών, η πετροχημική βιομηχανία με 470 πηγές παράγοντας το 4,70% του συνόλου των εκπομπών και η επεξεργασία φυσικού αερίου καθώς και άλλες πηγές συγκεντρώνοντας το 0,37% και 0,25% του συνόλου των

εκπομπών αντίστοιχα.

Οι τομείς της ηλεκτροπαραγωγής και των βιομηχανικών διεργασιών μαζί, παράγουν το 60% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα, το 35% της ηλεκτροπαραγωγής προέρχεται από ορυκτές πηγές ενέργειας και κατανέμεται σε ποσοστά 73% παραγωγής από άνθρακα, 19% από φυσικό αέριο και 8% από πετρέλαιο (58). Ο άνθρακας λοιπόν, κυριαρχεί ως καύσιμη ύλη και στους δύο παραπάνω τομείς, ενώ η χρήση βιομάζας στη βιομηχανία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε ορισμένες περιοχές όπως η Βραζιλία και η Σκανδιναβία.

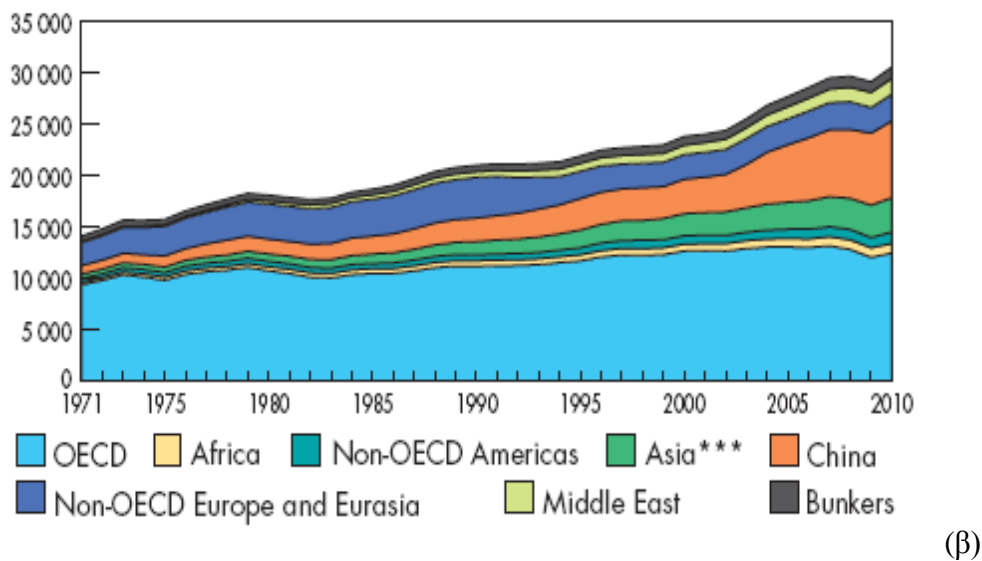
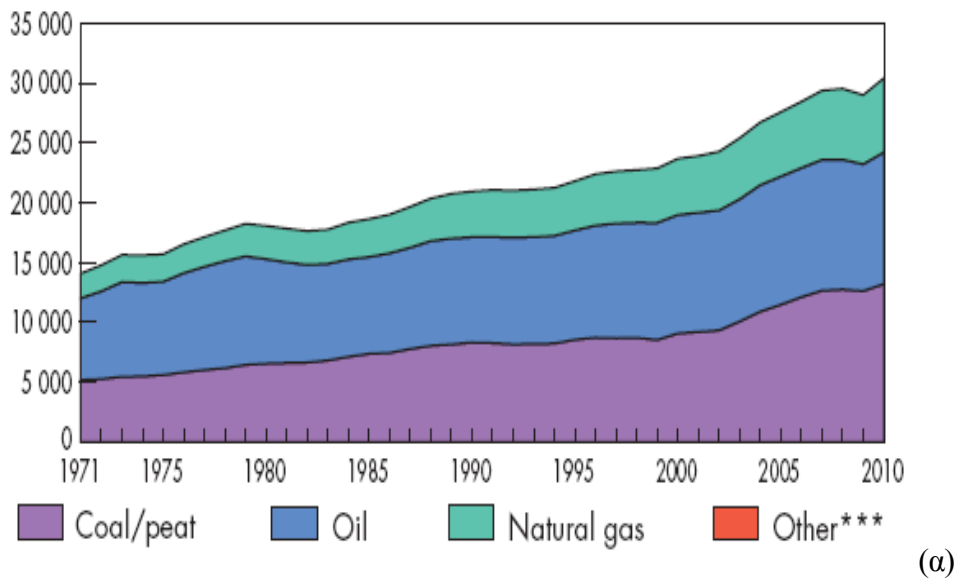
Ο Πίνακας 1.2 παραθέτει το προφίλ σταθερών πηγών CO₂ για το έτος 2011, βάσει του IEA Greenhouse Gas R&D Programme, σε επίπεδο 7.936 σταθερών πηγών.

Πίνακας 1.2 : Προφίλ σταθερών πηγών εκπομπών CO₂ για το έτος 2011 [104]

Greenhouse Gas Emissions from Large Facilities 2011		
Industry Sector	# of Plants	Million Metric Tons CO ₂
Power plants	1,594	2,221
Petroleum & Gas	1,880	225
Refineries	145	182
Chemicals prod.	458	180
Other	1,377	126
Waste	1,593	103
Metals	297	115
Minerals	362	98
Pulp and Paper	230	44
Total	7,936	3,294

Οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έχουν αυξηθεί κατά 117% (κατά μέσο όρο 2% ετησίως) από το 1971 (Σχήμα 1.1 (α)). Το 1971, οι σημερινές χώρες του ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης –OECD) ήταν υπεύθυνες για το 67% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂. Ως συνέπεια της ταχείας αύξησης των εκπομπών στον αναπτυσσόμενο κόσμο, η συμβολή του ΟΟΣΑ για το σύνολο μειώθηκε σε 41% το 2010. Μέχρι στιγμής, οι μεγαλύτερες αυξήσεις στις εκτός ΟΟΣΑ χώρες συνέβη στην Ασία, όπου οι εκπομπές CO₂ της Κίνας από την καύση των καυσίμων έχουν αυξηθεί κατά

5,8% ετησίως μεταξύ 1971 και 2010. Η χρήση του άνθρακα στην Κίνα αύξησε τα επίπεδα των εκπομπών CO₂ κατά 6,6 δισεκατομμύρια τόνους κατά τη διάρκεια των 39 χρόνων, το 2010 (Σχήμα 1.1 (β)).



Σχήμα 1.1: Εκπομπές CO₂ (Mt) ανά είδος ορυκτού καυσίμου (α) και ανά περιοχή (β) για το χρονικό διάστημα από 1971 έως το 2010. (για το Σχήμα α. στο “Other” : συμπεριλαμβάνονται βιομηχανικά απόβλητα και μη ανανεώσιμα αστικά απόβλητα, ενώ στο Σχήμα β. στην Ασία δεν συμπεριλαμβάνεται η Κίνα, παρατίθεται ξεχωριστά)

Με την οικονομική κρίση το 2008, οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ μειώθηκαν κατά 1,8% κατά το έτος 2009. Ωστόσο, η αύξηση των εκπομπών CO₂ ανέκαμψε το 2010 κατά 4,9%.

Το βάρος του άνθρακα στις παγκόσμιες εκπομπές έχει παραμείνει σε περίπου 40% από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, ενώ το μερίδιο του φυσικού αερίου αυξήθηκε από 15% το 1971 σε 20% το 2010. Το μερίδιο του πετρελαίου μειώθηκε από 48% σε 36%.

Η αλλαγή των καυσίμων και η αυξανόμενη χρήση των μη ορυκτών πηγών ενέργειας μείωσε το σύνολο των εκπομπών CO₂ λόγω πρωτογενούς ενεργειακού εφοδιασμού κατά 6% κατά τα τελευταία 39 χρόνια. Παρόλα αυτά, η χρήση των ορυκτών καυσίμων αναμένεται να κυριαρχεί για τις επόμενες δεκαετίες.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, σύμφωνα με τα στοιχεία που παρατίθενται από το European Pollutant Release and Transfer Register για το 2011, το σύνολο των εκπομπών CO₂ ανέρχεται σε 1.899.792.000 t, για βιομηχανικές δραστηριότητες που παρουσιάζονται από 2.168 εγκαταστάσεις σε επίπεδο της ΕΕ-27. Η συμμετοχή των βιομηχανικών δραστηριοτήτων και η συμμετοχή της κάθε χώρας μέλους παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.2 και 1.3. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η αντίστοιχη συμμετοχή βιομηχανικών δραστηριοτήτων για την Ελλάδα το 2011 για 34 εγκαταστάσεις, ενώ το σύνολο των εκπομπών CO₂ που δίνεται για αυτές για το 2011 ανέρχεται στους 57.159.000 t.

Pollutant releases / Summary

Pollutant: Carbon dioxide (CO₂)

Year: 2011

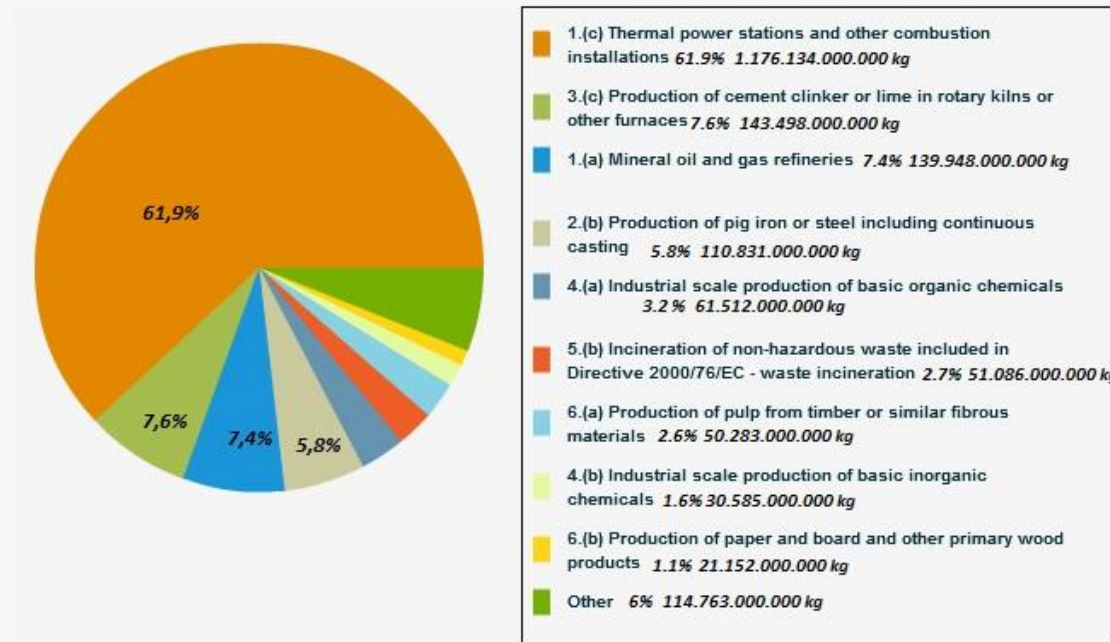
Area: EU27

Facilities: 2,168

All values are yearly releases.

Contents:

- Summary
- Activities
- Areas
- Area Comparison
- Facilities
- Confidentiality



Σχήμα 1.2: Εκπομπές CO₂ από βιομηχανικές δραστηριότητες για το 2011, σε επίπεδο Ε.Ε.-27 [105].

Pollutant releases / Summary

Pollutant: Carbon dioxide (CO₂)

Year: 2011

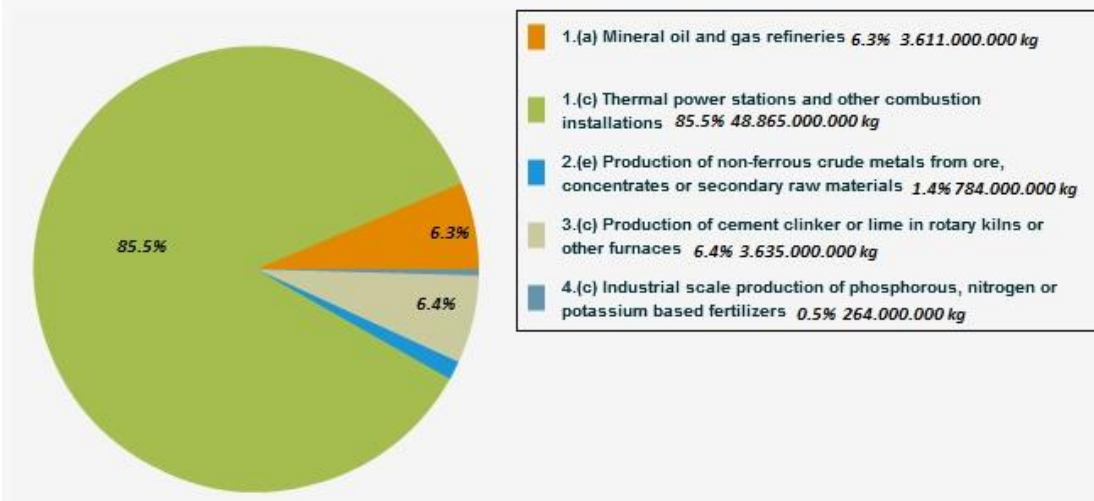
Area: Greece

Facilities: 34

All values are yearly releases.

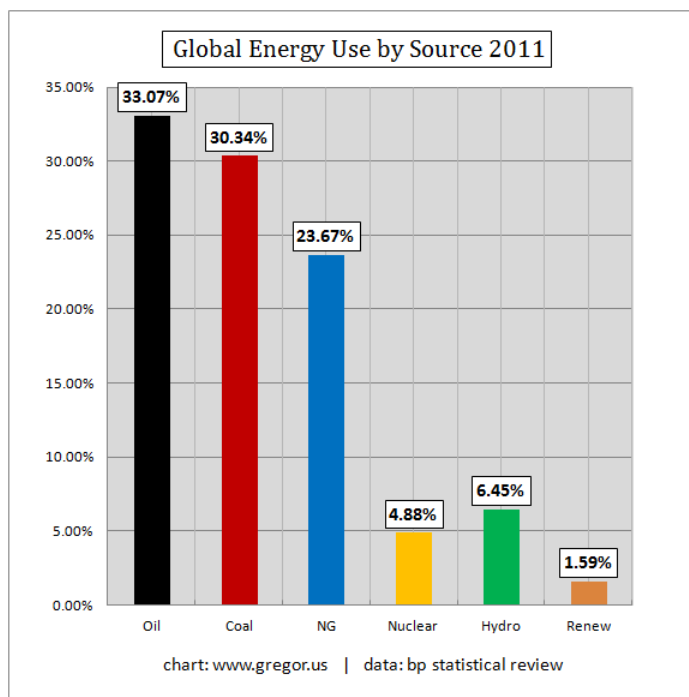
Contents:

- Summary
- Activities
- Areas
- Area Comparison
- Facilities
- Confidentiality



Σχήμα 1.3: Εκπομπές CO₂ από βιομηχανικές δραστηριότητες για το 2011, για την Ελλάδα [105].

Η χρήση των ορυκτών καυσίμων (γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) από την βιομηχανική επανάσταση έως σήμερα είναι ο ακρογωνιαίος λίθος του σύγχρονου τρόπου ζωής (Εικόνα 1.4). Η κυριαρχία τους στον τομέα της παραγωγής ενέργειας είναι αναμφισβήτητη παρόλη την ανάπτυξη άλλων εναλλακτικών πηγών όπως είναι η πυρηνική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές (ηλιακή, αιολική, γεωθερμική ενέργεια κλπ). Αυτό συμβαίνει κυρίως, διότι η απόδοση και το κόστος αυτών των εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας, δεν τους επιτρέπει να καλύψουν τις ολοένα και αυξανόμενες παγκόσμιες ανάγκες σε ενέργεια και τις καθιστά συμπληρωματικές στη πλειοψηφία των περιπτώσεων. Τα ορυκτά καύσιμα αναμένεται να αποτελέσουν την κατεξοχήν πηγή ενεργειακού ανεφοδιασμού τουλάχιστον ως το 2050.



Σχήμα 1.4 Παγκόσμια χρήση ενέργειας ανά πηγή παραγωγής για το έτος 2011 [106].

Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν οι γαιάνθρακες, οι οποίοι παραμένουν, ιδιαίτερα στον αναπτυσσόμενο κόσμο, η πιο φτηνή και αξιόπιστη πηγή ενέργειας. Το 2012 έκλεισε με την παγκόσμια αγορά άνθρακα να αγγίζει τους 850 μεγατόνους, ποσό διπλάσιο του συνόλου του 2000. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) υπολογίζει ότι με αυτόν τον ρυθμό, ο άνθρακας θα αναδειχθεί ως η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας παγκοσμίως πριν το 2030 και ότι η Κίνα και η Ινδία θα ευθύνονται για το 75% της αύξησης της ζήτησής του. Αυτό είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό καθώς η καύση γαιανθράκων κατέχει τα πρωτεία στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως, με σχεδόν 13 δισεκατομμύρια τόνους παραγόμενων εκπομπών ετησίως.

1.3 Κανονιστικό πλαίσιο

Η Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών (UNFCCC) για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών, αποτελεί το πρώτο διεθνές θεσμικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Αυτή η σύμβαση, η οποία τέθηκε σε ισχύ το Μάρτιο του 1994, επέβαλλε, μεταξύ άλλων, σε όλα τα συμβαλλόμενα μέρη την υποχρέωση να θεσπίσουν εθνικά προγράμματα για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης, διαχώρισε τις βιομηχανικές/ανεπτυγμένες χώρες από τις αναπτυσσόμενες,

αναγνωρίζοντας στις πρώτες το γεγονός ότι ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών καθώς και ότι διαθέτουν την θεσμική και χρηματοοικονομική ικανότητα να τις περιορίσουν.

Από το 1995 έως το 2010 έχουν λάβει χώρα 16 συναντήσεις της Διάσκεψης των Μερών (COP), η οποία θεωρείται το ανώτατο όργανο της Σύμβασης-Πλαισίου του ΟΗΕ. Η πρώτη από αυτές ήταν στη Βόννη το Μάρτιο του 1995, όπου ουσιαστικά ξεκίνησαν οι διαπραγματεύσεις που θα τίθεντο σε ισχύ μετά το 2000. Εκεί γίνεται και πρώτη φορά η επεξεργασία της ιδέας ενός πρωτοκόλλου με δεσμευτική ισχύ. Στη δεύτερη συνδιάσκεψη με τη «Διακήρυξη της Γενεύης» στην ομώνυμη πόλη, αναγνωρίζονται και ενσωματώνονται τα επιστημονικά στοιχεία για τις κλιματικές αλλαγές. Εκεί για πρώτη φορά καλούνται οι αναπτυγμένες χώρες να δεσμευτούν για τη μείωση των εκπομπών τους.

Στη τρίτη κατά σειρά Διάσκεψη των Μερών στο Κιότο το 1997, έπειτα από σκληρές διαπραγματεύσεις, προκύπτει η συμφωνία για τη δημιουργία του **Πρωτοκόλλου του Κιότο**, το οποίο όμως θα τεθεί σε ισχύ τελικά τον Φεβρουάριο του 2005 με την επικύρωση των 55 Μερών της UNFCCC. Τελευταία χώρα που το υπέγραψε ήταν η Ρωσία. Οι επόμενες διασκέψεις που θα ακολουθήσουν, θα αφορούν τον καθορισμό των λεπτομερειών και ρυθμίσεων του Πρωτοκόλλου καθώς και την προσπάθεια συμμόρφωσης στους στόχους του από το σύνολο των χωρών. Η διαφορά του από τη Σύμβαση Πλαίσιο είναι ότι δεσμεύει τις χώρες ως προς τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου.

Οι εξελίξεις που θα ακολουθήσουν στον παγκόσμιο αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής θα είναι βραδείς και πολλές φορές ατελέσφορες. Για παράδειγμα, οι διασκέψεις στο Νέο Δελχί το 2002 και στο Πόζναν της Πολωνίας το 2008 θεωρήθηκαν από τις πιο αποτυχημένες, καθώς δε σημειώθηκε καμία πρόοδος έναντι των συμφωνιών για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Άλλες, όπως η σύνοδος στην Κοπεγχάγη το 2009 δεν κατάφερε στο να επιτευχθεί μια δεσμευτική συμφωνία μείωσης των εκπομπών για όλες τις χώρες, αλλά παρόλα αυτά, η Ευρώπη κατάφερε να διατηρήσει τους στόχους της (το λεγόμενο κλιματικό και ενεργειακό πακέτο γνωστό ως «Στόχοι 20-20-20 ('climate and energy package')»), δηλ. μείωση των εκπομπών σε αέρια θερμοκηπίου κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές κατά 20% και αύξηση κατά 20% της ενεργειακής απόδοσης) το οποίο αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους της [Europe 2020 strategy](#) (smart, sustainable and inclusive growth).

Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι έγιναν σημαντικά βήματα στην ενίσχυση των αναπτυσσόμενων χωρών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, τόσο στη συνδιάσκεψη του Μαρακές το 2001, με την ίδρυση τριών ταμείων για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων του φαινομένου, όσο και το 2007 στο Μπαλί όπου δημιουργείται άλλο ένα ταμείο προσαρμογής, το οποίο θα χρηματοδοτεί δράσεις αντιμετώπισης και υποστήριξης των φτωχότερων χωρών.

Η 18η κατά σειρά συνδιάσκεψη στη Ντόχα, οδηγήθηκε σε αποτυχία των διαπραγματεύσεων καθώς μια μικρή πλειοψηφία ανεπτυγμένων κρατών (Πολωνία, Ρωσία, Ιαπωνία, Καναδάς, ΗΠΑ) αθέτησαν τις παλαιότερες δεσμεύσεις και δε δέχτηκαν να αναλάβουν νέες. Εκ διαμέτρου αντίθετο ήταν το κοινωνικά διαμορφωμένο κλίμα καθώς, όπως διαπιστώνεται, η πλειονότητα πλέον γνωρίζει ότι απειλείται από την κλιματική αλλαγή και ίσως μετατραπεί σε μοχλός άσκησης πίεσης προς τις κυβερνήσεις για την υιοθέτηση μιας πράσινης παγκόσμιας συμφωνίας.

Αποτέλεσμα αυτής της συνδιάσκεψης ήταν η παράταση της ισχύος του Πρωτόκολλου του Κιότο ως το 2020. Το επικύρωσαν οι 27 της ΕΕ, η Αυστραλία, Ελβετία και 8 ακόμα βιομηχανικές χώρες. Υπενθυμίζεται πως το Πρωτόκολλο του Κιότο δεσμεύει ανεπτυγμένες μόνο χώρες, καθώς μεγάλοι αναπτυσσόμενοι «φυπαντές», όπως η Κίνα και η Ινδία, αλλά και οι Ηνωμένες Πολιτείες αρνούνται να το επικυρώσουν. Η συμφωνία που επιτεύχθηκε στη Ντόχα περιλαμβάνει την αύξηση της χρηματοδότησης των πλούσιων χωρών προς τις φτωχές, προκειμένου αυτές να καταφέρουν να αναπτύξουν κλιματικές πολιτικές αλλά και να επενδύσουν σε περιβαλλοντικά φιλικές πηγές ενέργειας, με ένα κονδύλι που ανέρχεται σε 100 δισ. δολάρια ως το 2020.

1.3.1 Το Πρωτόκολλο του Κιότο

Το Πρωτόκολλο του Κιότο αποτελεί ίσως τη μόνη απόδειξη καλής θέλησης από τη διεθνή κοινότητα να αντιμετωπίσει συνασπισμένα το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Η έγκριση του έλαβε χώρα στις 11 Δεκεμβρίου 1997 και θεωρείται ως και σήμερα από τις σημαντικότερες διεθνείς νομοθετικές διατάξεις που έχουν θεσπιστεί στον αγώνα καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής. Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα υπέγραψε το Πρωτόκολλο στις 29 Απριλίου 1998. Οι δεσμεύσεις που περιλαμβάνει αφορούν τις εκβιομηχανισμένες χώρες και ως πρώτο στόχο είχε τη μείωση των συνολικών εκπομπών τους κατά 8% την περίοδο 2008-2012 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Τα κράτη-μέλη

της Ευρωπαϊκής Ένωσης ήταν υποχρεωμένα να μειώσουν τις εκπομπές τους κατά 8% για το ίδιο διάστημα ακόμα και αν προσχωρούσαν στην ΕΕ μετά την ημερομηνία αυτή (εξαιρέση αποτελούσαν η Πολωνία, η Ουγγαρία (που τέθηκε στόχος μείωσης εκπομπών το 6%, η Μάλτα και η Κύπρος (δεν αποτελούσαν μέλη του Παραρτήματος Ι του πρωτοκόλλου)). Για την περίοδο πριν το 2008, τα συμβαλλόμενα κράτη υποχρεούνταν να επιτύχουν κάποια πρόοδο όσον αφορά την υλοποίηση των δεσμεύσεων, το αργότερο ως το 2005 και ανά πάσα στιγμή να παρουσιάσουν τα σχετικά διαπιστευτήρια αυτής.

Η Ε.Ε. έχει επίσης δεσμευτεί να μειώσει τις εκπομπές της κατά 20% σύμφωνα με τη δεύτερη περίοδο δέσμευσης του Πρωτοκόλλου η οποία αφορά το διάστημα 2013 - 2020.

Ωστόσο η δέσμευση αυτή διαφέρει σε αρκετά σημεία από την αρχική:

- * Η δέσμευση του Κιότο μετράται με έτη αναφοράς και όχι σε σχέση με το 1990,
- * Απαιτεί από την Ε.Ε. να διατηρεί τις εκπομπές της κατά ένα μέσο όρο 20% κάτω από τα επίπεδα των ετών αναφοράς, όχι μόνο το 2020,
- * Διαφέρει ως προς το αντικείμενο (π.χ. δεν καλύπτει τις αεροπορικές εκπομπές καθώς δεν είναι στο πεδίο εφαρμογής του πρωτοκόλλου αλλά καλύπτει τις εκπομπές από τη χρήση γης, την αλλαγή χρήσης γης και τη δασοκομία, τα οποία δεν καλύπτονταν στην αρχική δέσμευση)

Η Ε.Ε. έχει μία καλή πρόοδο σχετικά με τις δεσμεύσεις της. Το 2011, οι συνδυασμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τα 27 κράτη μέλη ήταν 18,4% κάτω από το επίπεδο του 1990, ενώ κατά την ίδια περίοδο η οικονομία της αυξήθηκε κατά 40%.

Το Πρωτόκολλο αφορά στις εκπομπές έξι αερίων του θερμοκηπίου:

- του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)
- του μεθανίου (CH₄)
- του πρωτοξειδίου του αζώτου (N₂O)
- των υδροφθορανθράκων (HFC)
- των υπερφθοριωμένων υδρογονανθράκων (PFC)
- του εξαφθοριούχου θείου (SF₆)

Το Πρωτόκολλο προσδίδει ένα μεγαλύτερο βάρος στις ανεπτυγμένες χώρες με βάση την

αρχή των «κοινών αλλά διαφοροποιημένων ευθυνών», για δύο λόγους: Ο πρώτος βασίζεται στο ότι αυτές οι χώρες μπορούν πιο εύκολα να «αντέξουν» το κόστος από τη μείωση των εκπομπών και ο δεύτερος στο ότι αυτές οι χώρες ιστορικά έχουν συνεισφέρει περισσότερο στο πρόβλημα, με εκπομπή μεγαλύτερων ποσοτήτων αερίων θερμοκηπίου ανά άτομο απ' ότι οι αναπτυσσόμενες χώρες. Το Πρωτόκολλο, για να προσδώσει στα μέλη ένα σημαντικό βαθμό ευελιξίας ώστε να μπορέσουν να επιτύχουν τους στόχους μείωσης των εκπομπών τους, ανέπτυξε τρεις καινοτόμους μηχανισμούς που λειτουργούν συμπληρωματικά με τις απαραίτητες εγχώριες πολιτικές και μέτρα – γνωστοί ως: Εμπορία Δικαιωμάτων Εκπομπών (Emissions Trading), Από κοινού Υλοποίηση (Joint Implementation) και Μηχανισμός 'Καθαρής' Ανάπτυξης (Clean Development Mechanism). Κάθε χώρα μπορεί, επίσης, να αφαιρεί από το ποσοστό-στόχο της, το CO₂ που απορροφάται από τις λεγόμενες «καταβόθρες CO₂», όπως είναι τα δάση και η καλλιεργήσιμη γη.

Μια χώρα, για να εκπληρώσει τους στόχους που θέτει το Πρωτόκολλο, έχει δύο επιλογές. Η πρώτη είναι να προβεί σε μείωση των εκπομπών αερίων και η δεύτερη το να αξιοποιήσει ορισμένους από τους τρεις μηχανισμούς που διαθέτει το Πρωτόκολλο:

- Εμπορία εκπομπών (Emissions Trading): ένα κράτος το οποίο έχει πετύχει μεγαλύτερη από την προαπαιτούμενη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μπορεί να «πωλήσει» την επιπλέον μείωση του σε ένα άλλο το οποίο δεν έχει εκπληρώσει τους στόχους του.
- Μηχανισμός καθαρής ανάπτυξης (Clean Development Mechanism): μηχανισμός ο οποίος παρέχει κίνητρα στις ανεπτυγμένες χώρες ώστε να υιοθετήσουν καθαρές τεχνολογίες και να βοηθήσουν την μείωση των εκπομπών σε φτωχότερες χώρες μέσω χρηματοδότησης.
- Προγράμματα Κοινής Εφαρμογής (Joint Implementation): περιλαμβάνουν την παροχή κινήτρων στις συμβαλλόμενες χώρες για από κοινού ανάπτυξη προγραμμάτων και στρατηγικής με στόχο τη μείωση των εκπομπών των αερίων.

Σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών

Το σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών έχει αναδειχθεί ίσως ως ο πιο εφαρμόσιμος μηχανισμός περιορισμού των εκπομπών ιδιαίτερα όσων αφορά το διοξείδιο του άνθρακα. *Νομοθετικά θεσπίστηκε με την Οδηγία 2003/87/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του*

Συμβουλίου τον Οκτώβρη του 2003. Σε κάθε κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποδόθηκε ένας συνολικός αριθμός δικαιωμάτων εκπομπών τον οποίο δεν θα πρέπει να υπερβαίνει. Με τη σειρά του το κάθε κράτος μέλος διανέμει τα δικαιώματα εκπομπής αερίων στις υπόχρεες εγκαταστάσεις.

Με την τροποποίηση της οδηγίας 96/61/ΕΚ του Συμβουλίου τίθεται σε εφαρμογή το 2005 το Κοινοτικό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό το βήμα έγινε ώστε να διασφαλιστεί ότι ο ανταγωνισμός στο σύστημα αγοραπωλησίας των εκπομπών δεν θα στρεβλώνεται εντός της εσωτερικής αγοράς.

Η εφαρμογή του συστήματος ξεκίνησε την 1η Ιανουαρίου 2005 και αφορούσε μόνο εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από μεγάλες σταθερές πηγές (εγκαταστάσεις που ανήκουν στις κατηγορίες δραστηριοτήτων που προσδιορίζονται από το Παράρτημα 1 της Οδηγίας). Η πρώτη φάση ολοκληρώθηκε το 2007 ενώ η δεύτερη αφορά την περίοδο 2008-2012. Η Τρίτη φάση αφορά τα έτη 2013-2020 και περιλαμβάνει εκτός από τις σταθερές εγκαταστάσεις και τις αεροπορικές εταιρίες που εμπίπτουν στα κριτήρια του Παραρτήματος 1 της Οδηγίας.

1.3.2 Οργάνωση Συστήματος στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι πλήρες συμβαλλόμενο μέρος της Σύμβασης για τις κλιματικές αλλαγές, έχει κυρώσει το Πρωτόκολλο του Κιότο (Ν. 3017/2002) και είναι ένα από τα 39 συμβαλλόμενα μέρη τα οποία έχουν δεσμευθεί με ποσοτικό απόλυτο όριο των εκπομπών. Το 2ο Εθνικό Πρόγραμμα για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (2000-2010) εγκρίθηκε με την Πράξη Υπουργικού Συμβουλίου (ΠΥΣ) 5/27-2-2003 (ΦΕΚ 58Α / 5.3.03)

Με την ΚΥΑ 54409/2632/2004 (ΦΕΚ 1931Β') ενσωματώθηκε η Οδηγία 2003/87/ΕΚ στο Εθνικό Δίκαιο και καθορίστηκε η λειτουργία του συστήματος στην Ελλάδα. Σύμφωνα με την ΚΥΑ, αρμόδια αρχή για την εφαρμογή του συστήματος ορίζεται το ΥΠΕΧΩΔΕ και συγκεκριμένα το Γραφείο Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (Γ.Ε.Δ.Ε.).

Σύμφωνα με το κοινοτικό σύστημα, τα δικαιώματα εκπομπών μπορούν να μεταβιβάζονται και οι επιχειρήσεις μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν για εκπλήρωση μέρους των υποχρεώσεών τους για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Κάθε κράτος - μέλος έχει την υποχρέωση υποβολής στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενός

Εθνικού Σχεδίου κατανομής με τη συνολική ποσότητα δικαιωμάτων που θα κατανείμει για κάθε περίοδο, και τη κατανομή των δικαιωμάτων αυτών στο φορέα εκμετάλλευσης κάθε εγκατάστασης.

Στην Ελλάδα, το Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης (ΕΚΠΑΑ) σε συνεργασία με το Γ.Ε.Δ.Ε. είναι οι υπεύθυνοι φορείς για την τήρηση μητρώου για την επακριβή καταγραφή της εκχώρησης, της κατοχής, της μεταβίβασης και της ακύρωσης δικαιωμάτων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η κατάρτιση και τήρηση του μητρώου γίνεται κατ' εφαρμογή του Κανονισμού (ΕΚ) 2216/2004 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζεται ο χάρτης με την κατανομή των βιομηχανικών εγκαταστάσεων που εκπέμπουν CO₂ στον Ελλαδικό χώρο ανά τομέα δραστηριότητας, οι οποίες θεωρούνταν και υπόχρεες εγκαταστάσεις στα πλαίσια του εθνικού σχεδίου κατανομής δικαιωμάτων για την περίοδο 2008-2012.

1.3.3 Οι άλλοι δυο μηχανισμοί του Πρωτοκόλλου του Κιότο

Εκτός του μηχανισμού «Εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών» το Πρωτόκολλο του Κιότο προβλέπει άλλους δυο μηχανισμούς μείωσης εκπομπών όπως έχει ήδη αναφερθεί: τον μηχανισμό Καθαρής Ανάπτυξης (ΜΚΑ) και Κοινής Εφαρμογής (ΚΕ) (“Clean Development Mechanism” (CDM) ,Joint Implementation” (JI)).

Με τους δυο αυτούς μηχανισμούς δίνεται η δυνατότητα στους οργανισμούς να υλοποιήσουν έργα που συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων όπως π.χ. η παραγωγή ενέργειας από αιολικούς σταθμούς ή η εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης των αερίων (Carbon Capture). Το σύνολο των ρύπων που θα μειωθούν αντιστοιχούν σ' έναν αριθμό δικαιωμάτων εκπομπών τα οποία, ο οργανισμός που υλοποίησε το έργο, μπορεί είτε να τα πουλήσει στις εταιρείες που έχουν έλλειμμα δικαιωμάτων ή να τα χρησιμοποιήσει για να αντισταθμίσει τα δικά του ελλείμματα σε δικαιώματα.



Εικόνα 1.3: Χάρτης κατανομής των βιομηχανικών εγκαταστάσεων που εκπέμπουν CO₂ στον Ελλαδικό χώρο ανά τομέα (οι εγκαταστάσεις αυτές θεωρούνται και υπόχρεες εγκαταστάσεις στα πλαίσια του εθνικού σχεδίου κατανομής δικαιωμάτων εκπομπών 2008-2012).

Με την οδηγία 2004/101/ΕΚ γίνεται πιο συμβατή η σχέση του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων με τους άλλους δύο μηχανισμούς του Πρωτοκόλλου, καθώς οι φορείς εκμετάλλευσης θα μπορούν να τους χρησιμοποιούν στο πλαίσιο της εμπορίας των εκπομπών και με αυτόν τον τρόπο να τηρούν τις σχετικές δεσμεύσεις τους. Αυτό οφείλεται στο ότι η εν λόγω οδηγία αναγνωρίζει την εγκυρότητα των πιστώσεων που απορρέουν από τα έργα κοινής εφαρμογής (JI) και τον μηχανισμό καθαρής ανάπτυξης (CDM), όπως και τα δικαιώματα εμπορίας εκπομπών, εξαιρουμένων αυτών που παράγονται από πυρηνικές

εγκαταστάσεις και αυτών που αφορούν τις χρήσεις γης, την αλλαγή των χρήσεων γης και των δραστηριοτήτων έργων δασοκομίας. Οι πιστώσεις που απορρέουν από έργα JI αποκαλούνται «μονάδες μείωσης των εκπομπών» (ERU), ενώ οι πιστώσεις που απορρέουν από έργα CDM αποκαλούνται «πιστοποιημένες μειώσεις εκπομπών» (CER).

Για τέταρτο έτος στα πέντε που κυκλοφορούν, τα δικαιώματα ρύπων της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατέγραψαν ετήσιες απώλειες το 2012, τη στιγμή που η ευρωπαϊκή οικονομία κινείται σε υφεσιακούς ρυθμούς. Το ετήσιο συμβόλαιο για το Δεκέμβριο του 2013 έκλεισε στα 6,67 Ευρώ/μετρικό τόνο με την ετήσια πτώση για το 2012 να ανέρχεται σε 8,9% έναντι πτώσης 49% το 2011. Η αξία των Πιστοποιημένων Μειώσεων Εκπομπών (Certified Emission Reductions-CER) μειώθηκε κατά 92% στα 39 σεντς στο δωδεκάμηνο, ενώ οι Μονάδες Μείωσης Εκπομπών (Emission Reduction Units-ERU) κατέγραψαν πτώση 89%.

Εντός της Ε.Ε., το νομοθετικό πλαίσιο, οδηγιών και αποφάσεων του Συμβουλίου και της Επιτροπής για την ενσωμάτωση και υλοποίηση των στόχων και των μηχανισμών του Κιότο, είναι συνοπτικά το ακόλουθο:

- * **Οδηγία 2003/87/ΕΚ** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 13ης Οκτωβρίου 2003, σχετικά με τη θέσπιση συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου εντός της Κοινότητας και την τροποποίηση της οδηγίας 96/61/ΕΚ του Συμβουλίου (establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC).

Ενσωμάτωση στην Ελληνική νομοθεσία με την ΚΥΑ Η.Π. 54409/2632/27-12-2004 (ΦΕΚ 1931Β. 27-12-2004), Σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2003/87/ΕΚ «σχετικά με τη θέσπιση συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου εντός της Κοινότητας και την τροποποίηση της οδηγίας 96/61/ΕΚ του Συμβουλίου» του Συμβουλίου της 13ης Οκτωβρίου 2003 και άλλες διατάξεις.

Με την Υ.Α. 36028/1604/2006 - Έγκριση Εθνικού Σχεδίου Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΕΣΚΔΕ) αερίων θερμοκηπίου περιόδου 2005 –2007, σύμφωνα με το άρθρο 7 της υπ αριθμ. 54409/2632/2004 κοινής υπουργικής απόφασης «Σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2003/87/ΕΚκλπ» (1931/Β)» και σε συμμόρφωση με το άρθρο 11 (παρ. 1) της οδηγίας 2003/87/ΕΚ του Συμβουλίου της 31ης Δεκεμβρίου 2003»

- * **Απόφαση 2004/156/ΕΚ** της Επιτροπής της 29ης Ιανουαρίου 2004, περί θέσπισης κατευθυντηρίων γραμμών για την παρακολούθηση και την υποβολή εκθέσεων σχετικά με τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατ' εφαρμογή της οδηγίας 2003/87/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου
- * **Απόφαση 280/2004/ΕΚ** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 11ης Φεβρουαρίου 2004 για μηχανισμό παρακολούθησης των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου στην Κοινότητα και εφαρμογής του πρωτοκόλλου του Κιότο
- * **Κανονισμός 2216/2004/ΕΚ** της Επιτροπής της 21ης Δεκεμβρίου 2004, σχετικά με τυποποιημένο και ασφαλές σύστημα μητρώου δυνάμει της οδηγίας 2003/87/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και της απόφασης αριθ. 280/2004/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου
- * **Απόφαση 2005/166/ΕΚ** της Επιτροπής της 10ης Φεβρουαρίου 2005 για θέσπιση των κανόνων εφαρμογής της απόφασης αριθ. 280/2004/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τον μηχανισμό παρακολούθησης των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου στην Κοινότητα και εφαρμογής του πρωτοκόλλου του Κιότο
- * **Οδηγία 2004/101/ΕΚ** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Οκτωβρίου 2004 για την τροποποίηση της οδηγίας 2003/87/ΕΚ σχετικά με τη θέσπιση συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου εντός της Κοινότητας, όσον αφορά τους μηχανισμούς έργων του πρωτοκόλλου του Κιότο (amending Directive 2003/87/EC establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community, in respect of the Kyoto Protocol's project mechanisms).
Στην Ελληνική νομοθεσία ενσωματώθηκε με την Υ.Α. Η.Π. 9267/468/2007 - Τροποποίηση της υπ αριθμ. 54409/2632/2004 κοινής υπουργικής απόφασης (1931/Β), σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2004/101/ΕΚ «για την τροποποίηση της οδηγίας 203/87/ΕΚ σχετικά με την θέσπιση συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου εντός της Κοινότητας, όσον αφορά τους μηχανισμούς έργων του πρωτοκόλλου του Κιότο» του Συμβουλίου της 27ης Οκτωβρίου 2004
- * **Απόφαση 2007/589/ΕΚ** της Επιτροπής της 18ης Ιουλίου 2007, περί θέσπισης κατευθυντηρίων γραμμών για την παρακολούθηση και την υποβολή εκθέσεων σχετικά με τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατ' εφαρμογή της οδηγίας 2003/87/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου (2007/589/EC: Commission Decision of 18 July 2007 establishing guidelines for the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the

Council).

1.4 Κανονιστικό πλαίσιο για τη δέσμευση, μεταφορά & αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς

Ειδικότερα όσον αφορά στο θέμα της δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης του CO₂ (CCS) πρέπει να σημειωθεί ότι **δεν υπάρχει σχετική αναφορά** στις προηγούμενες οδηγίες παρά μόνο σε επίπεδο όρων «καταβοθρών» και ταμιευτήρων αερίων θερμοκηπίου.

Παρόλο που η δέσμευση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να εφαρμοστεί με ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ωστόσο για άλλους λόγους, ο ρόλος του στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής δεν είχε αναγνωριστεί τόσο νωρίς όσο άλλα μέτρα αντιμετώπισης. Κατόπιν πρόσκλησης από το COP 7 στο Marrakesh του Μαρόκου και στο πλαίσιο της ανάγκης για μια πιο ευρεία προσέγγιση εκτίμησης των μέτρων αντιμετώπισης για την κλιματική αλλαγή, αποφασίστηκε από το IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) να προχωρήσει στη μελέτη και σύνταξη μιας ειδικής έκθεσης σχετικά με τη δέσμευση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα, η οποία και ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2005.

Κατόπιν σχετικών μελετών (IPCC, IEA) σχετικά με το CCS, που πρακτικά υποδεικνύουν ότι αποτελεί μέτρο το οποίο προσανατολίζεται στη λογική των ‘μηδενικών εκπομπών’ (zero emissions) και ότι επίσης είναι μακροπρόθεσμου οφέλους λύση, η Ευρωπαϊκή Ένωση ίδρυσε το **European Climate Change Programme (ECCP I, ECCP II)** τον Ιούνιο του 2000 με στόχο να βοηθήσει στον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών αλλά και οικονομικά συμφερόντων μέτρων και να επιτρέψει στην ΕΕ να επιτύχει το στόχο της σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Κιότο. Στα πλαίσια του ECCP II πραγματοποιήθηκε μελέτη από Ομάδα Εργασίας που δημιουργήθηκε, σχετικά με τη Δέσμευση και Γεωλογική Αποθήκευση του CO₂, με στόχο να διαπιστωθεί η δυνατότητα της χρήσης της Δέσμευσης και Γεωλογικής Αποθήκευσης του CO₂ ως μέτρο για τη μείωση της κλιματικής αλλαγής. Στην έκθεση που εξέδωσαν τον Ιούνιο του 2006, τονίζεται η ανάγκη για την ανάπτυξη τόσο στρατηγικού αλλά και νομοθετικού πλαισίου για το CCS, πιέζοντας την επιτροπή να πραγματοποιήσει περαιτέρω έρευνα επί του θέματος.

Το Ευρωπαϊκό συμβούλιο στη συνέχεια, με το έγγραφο 7224/07, παρακινεί τα κράτη μέλη και την επιτροπή ώστε να προωθήσουν πιο εντατικά την έρευνα και την ανάπτυξη

του απαραίτητου τεχνικού, οικονομικού και νομοθετικού πλαισίου ώστε να αρθούν τυχόν νομικά εμπόδια και να καταστεί η δέσμευση και αποθήκευση του CO₂ εφαρμόσιμη με ασφαλή περιβαλλοντικό τρόπο μέχρι το 2020 σε νέες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα.

Οι λόγοι που οδήγησαν στην πραγματοποίηση της μελέτης αυτής είναι:

- * Ο γενικότερος στόχος της **μείωσης των εκπομπών της Ε.Ε. ή παγκοσμίως κατά 50% μέχρι το 2050**, για το οποίο έχει καταγραφεί ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μόνο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ενεργειακής απόδοσης (οι οποίες αποτελούν μακροπρόθεσμα τις αειφόρες λύσεις για την ασφάλεια του εφοδιασμού και του κλίματος) αν δεν χρησιμοποιηθεί η δυνατότητα να δεσμευθεί το CO₂ από βιομηχανικές εγκαταστάσεις και να αποθηκευθεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς
- * Περίπου το 1/3 του μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση άνθρακα (κλάδος που φέρει το πιο σημαντικό μερίδιο στις εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα) στην Ευρώπη φτάνουν στο τέλος της ζωής τους μέσα στην επόμενη δεκαετία. Γεγονός που σημαίνει ότι θα πρέπει να **αντικατασταθούν με νέες μονάδες**.
- * Η **ενεργειακή ζήτηση αυξάνει** σε παγκόσμιο επίπεδο με την αύξηση της ζήτησης από χώρες όπως η Κίνα, Ινδία, Βραζιλία, Νότιος Αφρική και Μεξικό, η οποία θα καλυφθεί, με βάση το πιθανότερο σενάριο, στο μεγαλύτερο ποσοστό της από ορυκτά καύσιμα.

Το αποτέλεσμα έδειξε ότι πραγματικά υπάρχει ανάγκη για τη δημιουργία ενός τέτοιου πλαισίου ώστε να μπορέσει να αποτελέσει το CCS ένα διαθέσιμο μέτρο αντιμετώπισης και το οποίο θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί το συντομότερο δυνατό και με ασφαλή περιβαλλοντικό τρόπο.

Κατόπιν αυτού του πλαισίου η Ε. Επιτροπή προχώρησε σε Πρόταση Οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη γεωλογική αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα, στις 23 Ιανουαρίου του 2008 . Ο ακριβής τίτλος της Πρότασης Οδηγίας είναι «Directive of the European Parliament and of the Council, on the geological storage of carbon dioxide and amending Council directives 85/337/EEC, 96/61/EC, Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC and Regulation (EC) No 1013/2006».

Ο στόχος της Οδηγίας αυτής είναι η δημιουργία ενός συγκεκριμένου και σαφούς νομοθετικού πλαισίου για τη γεωλογική αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα τόσο σε επίπεδο Ε.Ε. όσο και σε εθνικό επίπεδο. Η ανάγκη αυτή πηγάζει από το γεγονός ότι η υπάρχουσα νομοθεσία σχετικά με απόβλητα, νερά και βιομηχανικούς ρύπους θα προκαλούσε ένα ασαφές πεδίο για την εφαρμογή της γεωλογικής αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα. Για αυτό το λόγο, εντός της οδηγίας αναφέρονται και σχετικές τροποποιήσεις Οδηγιών και Κανονισμών.

Γενικότερα εκτιμήθηκε ότι η δέσμευση και μεταφορά του CO₂ μπορεί να θεσμοθετηθεί μέσα στην υπάρχουσα νομοθεσία, ενώ για την αποθήκευση κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθεί ένα νέο νομοθετικό πλαίσιο, καθώς θα πρέπει να γίνουν εκτεταμένες τροποποιήσεις της υπάρχουσας νομοθεσίας ώστε να ενταχθούν οι ιδιαιτερότητες που φέρει η αποθήκευση του CO₂. Αναφορά γίνεται και στην παροχή κινήτρων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι εξής Οδηγίες και Κανονισμοί και ο ρόλος που μπορούν να έχουν στη νομοθεσία που επιβάλλει τη δέσμευση και αποθήκευση του CO₂:

Α. Οδηγία 96/61/ΕΚ του Συμβουλίου της 24ης Σεπτεμβρίου 1996 σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης (Integrated Pollution and Prevention Control (IPPC)), η οποία θεωρείται ότι μπορεί να **θεσμοθετήσει τους κινδύνους από τη δέσμευση του CO₂**

Β. Οδηγία 85/337/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 27ης Ιουνίου 1985 για την εκτίμηση των επιπτώσεων ορισμένων σχεδίων δημοσίων και ιδιωτικών έργων στο περιβάλλον (assessment of environmental impact of certain projects (EIA)), η οποία μπορεί να **εκτιμήσει τις επιπτώσεις από τη δέσμευση, μεταφορά μέσω αγωγών σωληνώσεων και αποθήκευσης του CO₂**.

Γ. Οδηγία 2004/35/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21ης Απριλίου 2004 σχετικά με την περιβαλλοντική ευθύνη όσον αφορά την πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής ζημίας (on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage), η οποία μπορεί να **θεσμοθετήσει την περιβαλλοντική ευθύνη από την τοπική ζημία λόγω της δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂**

Δ. Οδηγία 2003/87/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της

13ης Οκτωβρίου 2003, σχετικά με τη θέσπιση συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου εντός της Κοινότητας και την τροποποίηση της οδηγίας 96/61/EK του Συμβουλίου (establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC), η οποία μπορεί να **θεσμοθετήσει την ευθύνη για την κλιματική αλλαγή απαιτώντας την παράδοση των δικαιωμάτων λόγω διαρροής.**

Ε. **Οδηγία 2001/80/EK** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2001 για τον περιορισμό των εκπομπών στην ατμόσφαιρα ορισμένων ρύπων (on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants), στην οποία προστίθεται άρθρο το οποίο προβλέπει ότι οι μονάδες καύσης ($\geq 300\text{MW}$) των οποίων η άδεια λειτουργίας έπεται χρονικά της ισχύος της Οδηγίας (της Πρότασης Οδηγίας εφόσον γίνει Οδηγία), θα πρέπει να διαθέτουν διαθέσιμο χώρο στις εγκαταστάσεις τους για τον εξοπλισμό που απαιτείται για τη δέσμευση, συμπίεση του CO₂ και θα πρέπει να έχουν αξιολογήσει τη διαθεσιμότητα κατάλληλων χώρων αποθήκευσης και κατάλληλων υποδομών μεταφοράς, καθώς και την τεχνική ικανότητα μετασκευής ώστε να δεσμεύεται το CO₂.

Στ. **Οδηγία 2000/60/EK** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων (establishing a framework for Community action in the field of water policy)

Ζ. **Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 1013/2006** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 14ης Ιουνίου 2006 για τις μεταφορές αποβλήτων.

Με βάση τη *δομή της Οδηγίας 2009/31/EK*, επιχειρείται να αντιμετωπιστούν κάποια θέματα σχετικά με τη γεωλογική αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα:

Κεφάλαιο 1: Αντικείμενο, σκοπός και ορισμοί. Διευκρινίζεται ότι ο σκοπός της γεωλογικής αποθήκευσης είναι η περιβαλλοντικώς ασφαλής αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα και η μόνιμη απομόνωσή του σε γεωλογικούς σχηματισμούς και ότι δεν επιτρέπεται αποθήκευση σε υδροφόρους ορίζοντες (water columns).

Κεφάλαιο 2: Καλύπτει τα θέματα επιλογής του τόπου και των αδειών εξερεύνησης

Κεφάλαιο 3: Καλύπτει τα θέματα των αδειών αποθήκευσης. Αιτήσεις, Προϋποθέσεις,

Περιεχόμενο, Επανεξέταση από την Επιτροπή, Μεταβολές, επανεξέταση, επικαιροποίηση και ανάκληση αδειών αποθήκευσης.

Κεφάλαιο 4: Καλύπτει τις υποχρεώσεις κατά την περίοδο εκμετάλλευσης, κατά το κλείσιμο και μετά το κλείσιμο, θέτοντας κριτήρια και διαδικασία αποδοχής ρεύματος CO₂, υποχρεώσεις για παρακολούθηση, για υποβολή εκθέσεων, για επιθεωρήσεις, για μέτρα σε περίπτωση διαρροών ή σημαντικών ανωμαλιών, κατά το κλείσιμο και μετά το κλείσιμο, για χρηματική εγγύηση και για χρηματοδοτικό μηχανισμό.

Κεφάλαιο 5: Προβλέπει θέματα πρόσβασης τρίτων μερών.

Κεφάλαιο 6: Γενικές διατάξεις σχετικά με την αρμόδια αρχή, τη διασυνοριακή συνεργασία, τα μητρώα, την ενημέρωση του κοινού, την υποβολή εκθέσεων από τα κράτη μέλη, κυρώσεις, κλπ..

Κεφάλαιο 7: Συγκεντρώνει τις απαιτούμενες τροποποιήσεις στην υπάρχουσα νομοθεσία συμπεριλαμβανομένου των αναγκαίων υιοθετήσεων από τη νομοθεσία για τα ύδατα και τα απόβλητα

Κεφάλαιο 8: Συγκεντρώνει τις τυποποιημένες τελικές διατάξεις

Τέλος, γίνεται αναφορά για τη νομοθεσία σε *διεθνές επίπεδο* σε σχέση με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, κυρίως στο θέμα της αποθήκευσης, καθώς αντιμετώπιζε νομικά προβλήματα έναντι της:

A. **Σύμβαση του Λονδίνου**(The London Convention «Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter.

B. **Σύμβασης OSPAR** (Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic (known as the "**OSPAR Convention**").

Και στις δύο Συμβάσεις ωστόσο έχουν πραγματοποιηθεί τροποποιήσεις στη μεν πρώτη το 2006 και στη δεύτερη το 2007, με στόχο να επιτρέψουν και να θεσμοθετήσουν την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας.

Στο τέλος της Οδηγίας παρατίθενται τα πολύ σημαντικά Παραρτήματα I και II, τα οποία αφορούν στα εξής θέματα:

Παράρτημα I: Κριτήρια για το χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση του δυνητικού

συγκροτήματος αποθήκευσης και της γύρω περιοχής που αναφέρονται στο Άρθρο 4 παράγραφος 3, καταγράφοντας στοιχεία σημαντικά για τη Φάση 1: Συλλογή δεδομένων, τη Φάση 2: Εκπόνηση τρισδιάστατου στατικού γεωλογικού μοντέλου της γης, Φάση 3: Χαρακτηρισμός της δυναμικής συμπεριφοράς της αποθήκευσης, χαρακτηρισμός ευαισθησίας, εκτίμηση κινδύνου.

Παράρτημα II: Κριτήρια για την κατάρτιση και την επικαιροποίηση του σχεδίου παρακολούθησης που αναφέρεται στο Άρθρο 13 παράγραφος 2 και για την παρακολούθηση μετά το κλείσιμο.

1.5 Εξελίξεις σε επίπεδο Ε.Ε. και Διεθνώς σχετικά τις Τεχνολογίες Δέσμευσης και Αποθήκευσης CO₂ (CCS)

Σε μακροπρόθεσμη βάση, ο ιδανικός στόχος μπορεί να είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα με ελαχιστοποίηση απελευθέρωσης ρύπων, ει δυνατόν μηδενικής εκπομπής. Εκτιμάται πως καθώς τα εργοστάσια θα φτάσουν στα όρια της αποδοτικότητας τους και τα πλούσια σε άνθρακα καύσιμα θα παραμείνουν σε υψηλή ζήτηση, είναι ανάγκη να δοθεί βαρύτητα στην λύση που παρέχουν οι τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα.

Το ενδιαφέρον που αναζωπυρώνεται για την ανάπτυξη και εφαρμογή τους σε μεγαλύτερης και εμπορικότερης κλίμακας έργα, επιβεβαιώνει αυτή την ανάγκη. Βέβαια, για οικονομικούς λόγους, η εφαρμογή των τεχνολογιών CCS πιθανότατα να αφορά καταρχήν τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρισμού, αλλά η εφαρμογή τους εκτιμάται ότι δεν θα σταματήσει εκεί. Αναμένεται να ακολουθήσει μεγάλης κλίμακας εμπορική εφαρμογή των σχετικών τεχνολογιών και για τις εκπομπές βιομηχανικών εγκαταστάσεων, όπως εργοστάσια χάλυβα ή σκυροδέματος, που προβλέπεται να ξεκινήσει το 2030.

Οι τεχνολογίες CCS μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο μέσω του μετριασμού των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και να αποτελέσουν μεταβατικές τεχνολογίες, μέχρι να αναπτυχθούν περαιτέρω και να εφαρμοστούν ευρέως εναλλακτικές λύσεις αντί της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θέσει ως στόχο περίπου το 18% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα να προέρχεται το 2030 από εγκαταστάσεις εξοπλισμένες με τεχνολογία CCS. Οι ηγέτες των χωρών της Ε.Ε. έχουν δεσμευθεί για τη συγκρότηση δικτύου έως 12 μονάδων επίδειξης της εν λόγω τεχνολογίας

ως το 2015.

Παράλληλα, η Ε.Ε. παρέχει κίνητρα για την επίδειξη των τεχνολογιών CCS μέσω του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής της Ε.Ε. καθώς το CO₂ που θα αποθηκεύεται με ασφαλή τρόπο δεν θα συνυπολογίζεται στις εκπομπές. Θα εξασφαλίζονται χρηματοδοτικοί πόροι από τον πλειστηριασμό δικαιωμάτων εκπομπής στο πλαίσιο του εν λόγω συστήματος, οι οποίοι θα δύνανται να χρησιμοποιηθούν για τη συγχρηματοδότηση μονάδων επίδειξης CCS. Στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού σχεδίου για την ανάκαμψη της οικονομίας, διατίθενται 1.050 εκ. ευρώ για έργα επίδειξης της CCS εντός της Ε.Ε.

Ταυτόχρονα, Προγράμματα όπως το **Πρόγραμμα NER300**, το οποίο θεσπίστηκε με το Άρθρο 10α(8) της Οδηγίας Εμπορίας Εκπομπών της Ε.Ε. και αναπτύχθηκε περαιτέρω με την Απόφαση 2010/670/ΕΕ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, αποτελούν επίσης σημαντικά βήματα χρηματοδότησης καινοτόμων έργων χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος είναι να ενθαρρύνει τους επενδυτές του ιδιωτικού τομέα και των κρατών μελών της ΕΕ να επενδύσουν σε πιλοτικά έργα εμπορικής επίδειξης εφαρμογής τεχνολογιών CCS και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην βάση δημιουργίας μιας παγκόσμιας οικονομίας χαμηλού άνθρακα. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω μιας χρηματοδότησης του προγράμματος από την πώληση 300 εκατ. δικαιωμάτων εκπομπών για τους νεοεισερχόμενους (New Entrants Reserve) του αναθεωρημένου συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου της ΕΕ. Το πρόγραμμα προτίθεται να υποστηρίξει τουλάχιστον οκτώ έργα CCS και τουλάχιστον 34 έργα ΑΠΕ, καλύπτοντας το 50% του σχετικού κόστους, με μέγιστο όριο το 15% του συνόλου των διαθέσιμων δικαιωμάτων ανά έργο.

Πέραν της χρηματοδότησης, η σημαντική συνιστώσα του Προγράμματος NER300 είναι η ανταλλαγή γνώσεων. Προβλέπονται μάλιστα δύο «επίπεδα» ανταλλαγής γνώσεων. Το πρώτο επίπεδο στοχεύει στην επιτάχυνση της ανάπτυξης της τεχνολογίας CCS και των καινοτόμων ΑΠΕ με την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ έργων που χρησιμοποιούν παρόμοιες τεχνολογίες. Ενώ το δεύτερο επίπεδο, στοχεύει στην ευρεία διάδοση των πληροφοριών στο ευρύτερο κοινό έτσι ώστε να αυξηθεί η εμπιστοσύνη σε αυτές τις τεχνολογίες.

Ως γνωστόν, στο σύστημα εμπορίας ρύπων συμμετέχει και η Ελλάδα καταβάλλοντας

ετησίως δεκάδες εκατομμύρια ευρώ για αγορά δικαιωμάτων εκπομπής. Μέχρι πρόσφατα όμως δεν είχε κατατεθεί κάποια αξιόλογη επενδυτική πρόταση ώστε να επωφεληθεί, ως χώρα, στα πλαίσια του NER300. Η χρηματοδότηση αφορούσε κυρίως κράτη μέλη τα οποία υλοποιούσαν έργα CCS. Μόλις τον Δεκέμβρη του 2012, Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε την συγχρηματοδότηση, με €1,2 δισεκατομμύρια, 23 καινοτόμων έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η Ελλάδα, μέσω του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, υπέβαλε δύο επιτυχείς προτάσεις που αφορούν έργα ηλιοθερμικής τεχνολογίας (νοτιοανατολική Κρήτη, Φλώρινα) οι οποίες θα επιχορηγηθούν με €86,5εκ, ποσό που αντιστοιχεί στο 7% περίπου του συνόλου του προγράμματος. Νέα πρόσκληση ωστόσο ενδιαφέροντος έχει ήδη ανοίξει από την Ευρωπαϊκή Ένωση με προθεσμία υποβολής σχετικών προτάσεων από τα κράτη μέλη, τον Ιούλιο 2013.

Δυστυχώς ακόμα δεν έχει υπάρξει έμπρακτο ενδιαφέρον για την υλοποίηση ενός πιλοτικού προγράμματος CCS στην χώρα μας. Μια πιθανή εφαρμογή θα μπορούσε να είναι το λιγνιτικό κέντρο της Δ. Μακεδονίας. Έχει αποτελέσει αντικείμενο συζήτησης μια πρόταση για από κοινού ανάπτυξη συστήματος CCS στις μονάδες της Δ. Μακεδονίας και των Σκοπίων με μειωμένο κόστος (συνέδριο του IENE, Θεσσαλονίκη). Ανάλογη πρόταση είχε κατατεθεί και από την εταιρεία Ενεργειακή Αιγαίου ώστε το διοξείδιο του άνθρακα να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της παραγωγής πετρελαίου στην περιοχή του Πρίνου.

Επίσης, έχει δρομολογηθεί ευρωπαϊκό πρόγραμμα 4 εκ. ευρώ από την Ευρώπη για την κατανόηση του μηχανισμού της μακροχρόνιας αποθήκευσης του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς, ως μέρος της προσπάθειας εφαρμογής και ανάπτυξης των τεχνολογιών CCS. Αυτό το πρόγραμμα φέρει το όνομα «ULTimateCO₂» και παρουσιάστηκε στα πλαίσια του συνεδρίου των τεχνολογιών ελέγχου αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Control Conference-GHGT) από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency-IEA) στο Κιότο πριν μερικούς μήνες (Νοέμβριο 2012). Κύριος σκοπός αυτού του προγράμματος είναι η παροχή κατευθυντήριων γραμμών και η απόκτηση μεγαλύτερου βαθμού βεβαιότητας, ειδικότερα όσον αφορά στους χώρους αποθήκευσης, στους φορείς εκμετάλλευσης αλλά και στα υπόλοιπα ενδιαφερόμενα μέρη όπως η επιστημονική κοινότητα, οι επενδυτές, οι φορείς χάραξης πολιτικής και σαφώς η κοινή γνώμη. Ακόμα, η διεξαγωγή του θα επιχειρήσει ουσιαστικά να θέσει μία βάση για μια τεχνολογία η οποία ακόμα δεν έχει δοκιμαστεί σε εμπορική κλίμακα εντός της

Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Για την υπεδαφική αποθήκευση του CO₂ στην Ευρώπη, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας στα πλαίσια του προγράμματος EU Geo Capacity (2009). Δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων GIS η οποία περιελάμβανε μια συνολική χωρητικότητα 360000Mt σε βαθείς αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες, 32000 Mt σε εξαντλημένα πεδία υδρογονανθράκων και 2000 Mt σε πεδία γαιανθράκων. Από αυτήν την χωρητικότητα, οι 116000 Mt αντιστοιχούν σε χερσαίους (onshore) χώρους και οι 244000 στην δυναμικότητα των υποθαλάσσιων (offshore) χώρων αποθήκευσης.

Εφέτος, αναμένεται να ολοκληρωθεί ένα νέο πρόγραμμα, το CO2StoP (CO₂ Storage Potential in Europe) το οποίο θα εκτιμήσει εκ νέου την χωρητικότητα στον ευρωπαϊκό χώρο, συναρτήσει και του κόστους της αποθήκευσης.

Τέλος, από το 2005 έχει δημιουργηθεί μια σύμπραξη μεταξύ ΕΕ και Κίνας για την κλιματική αλλαγή, η οποία προωθεί την ενίσχυση της συνεργασίας με στόχο την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών σχεδόν μηδενικών εκπομπών (near-zero emission coal technology-NZEC) μέσω των τεχνολογιών CCS. Στην πρώτη φάση αυτής της σύμπραξης υπογράφηκε και ένα Μνημόνιο Συνεργασίας μεταξύ της ΕΕ αι της Κίνας και της Κίνας και του Ηνωμένου Βασιλείου ώστε να ξεκινήσουν δυο συντονισμένες μελέτες σκοπιμότητας, το σχέδιο COACH (Cooperation Action with CCS China-EU) (Νοέμβριος 2006) και η πρωτοβουλία NZEC του Ηνωμένου Βασιλείου. Στις 25 Ιουνίου 2009, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε μια ανακοίνωση σχετικά με την επίδειξη της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα και γεωλογικής αποθήκευσης του σε αναδυόμενες οικονομίες και αναπτυσσόμενες χώρες. Μέσω αυτής εγκρίνεται η χρηματοδότηση του έργου ΕΕ-Κίνας για την κατασκευή μονάδας λιθάνθρακα με σχεδόν μηδενικές εκπομπές. Η Τρίτη φάση της σύμπραξης αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2020.

Σε διεθνές επίπεδο, ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό βήμα αποτελεί η ανακοίνωση της δημιουργίας του πρώτου προτύπου εφαρμογής τεχνολογιών CCS παγκοσμίως για τον Καναδά και τις ΗΠΑ. Αυτό το συναινετικό πρότυπο θα δημιουργηθεί από την CSA (Canadian Standards Association σε συνεργασία με το Διεθνές Κέντρο Αξιολόγησης της Απόδοσης για την γεωλογική αποθήκευση του Διοξειδίου του Άνθρακα (International Performance Assessment Centre for Geologic Storage of Carbon Dioxide /IPAC-CO₂) το οποίο είναι μια περιβαλλοντική μη-κυβερνητική οργάνωση. Σκοπός αυτού του προτύπου

είναι να χρησιμοποιηθεί επίσης ως βάση για την δημιουργία διεθνών προτύπων CCS από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO).

Η διαδικασία δημιουργίας ISO έχει ήδη ξεκινήσει την χρονιά που πέρασε με τον σχηματισμό μια Τεχνικής Επιτροπής (ISO/TC265). Η πρώτη συνάντηση πραγματοποιήθηκε στο Παρίσι τον Ιούνιο του 2012. Το Συμβούλιο Τυποποίησης του Καναδά (Standards Council of Canada-SCC) και η Διοίκηση Τυποποίησης της Κίνας έχουν διοριστεί ως η Γραμματεία του προγράμματος εργασίας ISO. Η ολοκλήρωση του προγράμματος πιθανότατα θα πάρει αρκετά χρόνια και θα πρέπει να αναπροσαρμόζεται στα νέα τεχνολογικά δεδομένα.

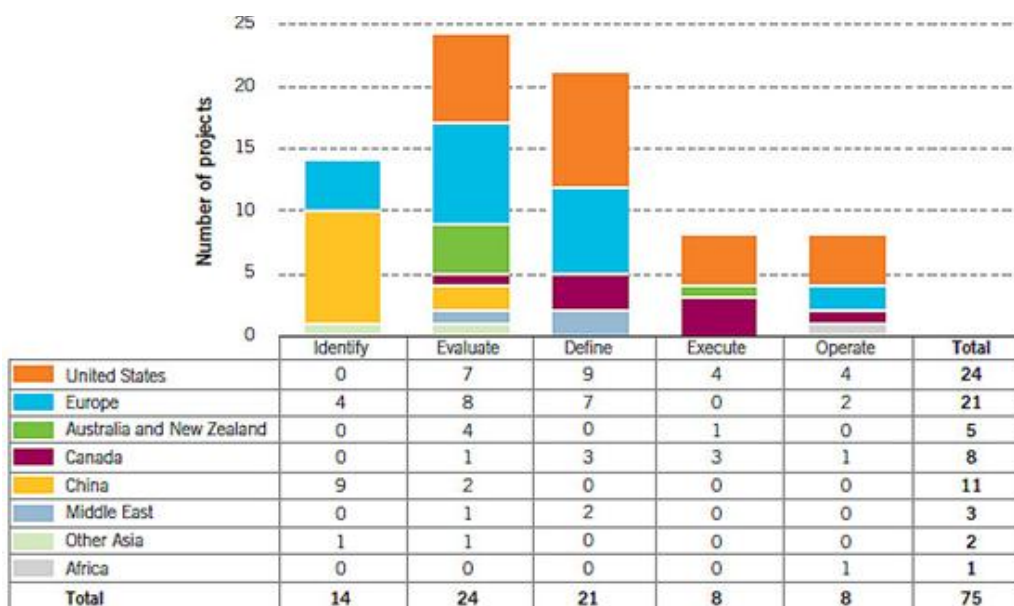
Το πρότυπο αυτό θα αποτελέσει, ίσως, το έναυσμα ώστε να καθιερωθεί στην αντίληψη της κοινής γνώμης η τεχνολογία CCS ως ένα ασφαλές μέτρο μετριασμού των εκπομπών του CO₂. Ακόμα θα παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τις ρυθμιστικές αρχές, την βιομηχανία και τους άλλους φορείς που ασχολούνται με τα έργα CCS παγκοσμίως. Τέλος, θα καθορίσει τις απαιτήσεις και τις συστάσεις όσον αφορά τη γεωλογική αποθήκευση του άνθρακα ώστε να βοηθήσει στην εγκαθίδρυση της περιβαλλοντικά ασφαλούς και μακροπρόθεσμης συγκράτησης του CO₂, ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.

1.6 Έργα αποθήκευσης CO₂

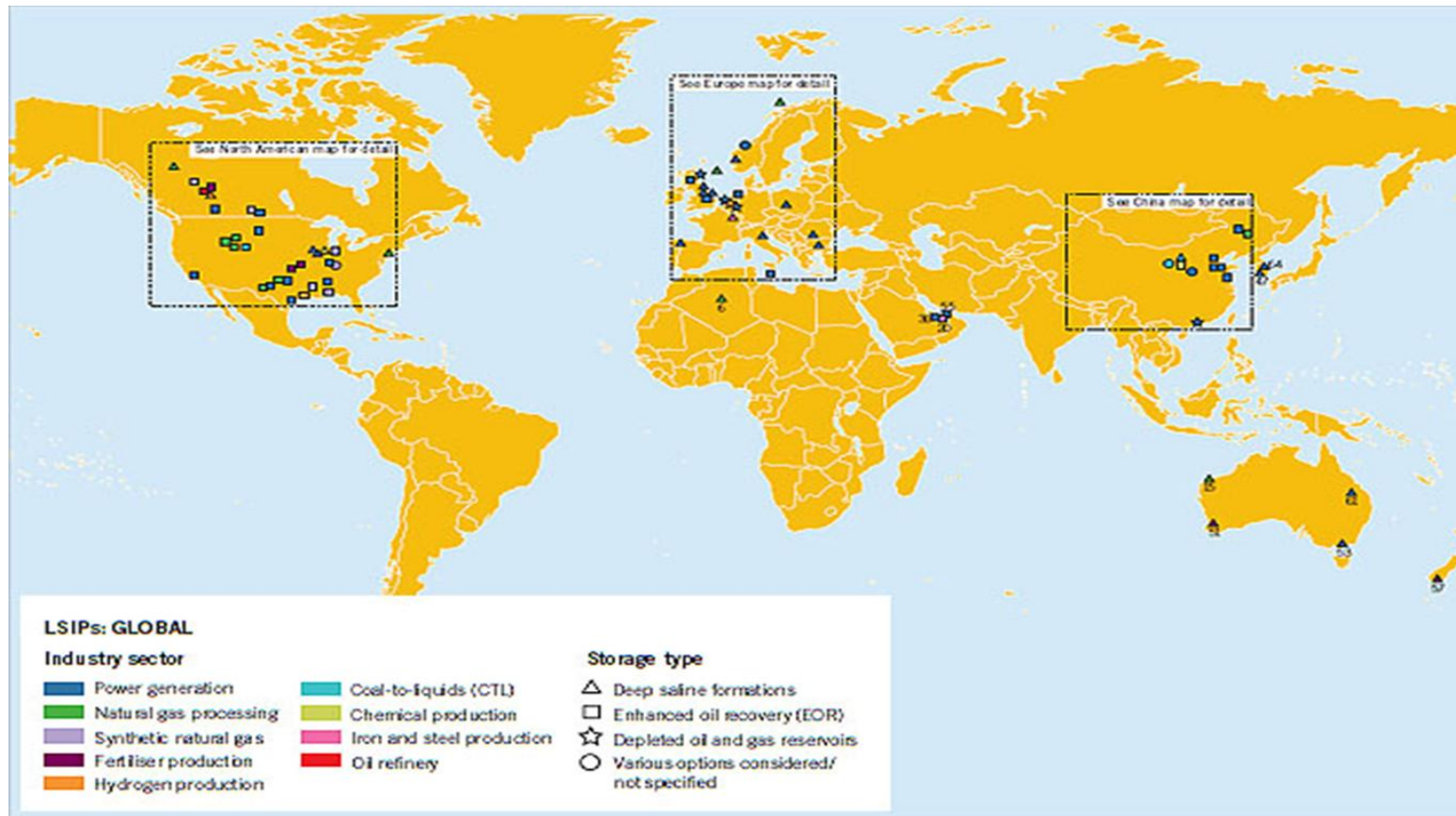
Σύμφωνα με το Global CCS Institute [5], μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2012, έχουν αναγνωριστεί 75 έργα μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης CO₂, παγκοσμίως. Από αυτά, τα 16 βρίσκονται σε καθεστώς λειτουργίας ή κατασκευής (operate or in construction), και φέρουν ένα τελικό δυναμικό δέσμευσης περί τους 36 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως (Mtpa). Τα υπόλοιπα 59 μεγάλα έργα βρίσκονται στα αρχικά στάδια σχεδιασμού της ανάπτυξης (αναγνώρισης (identify), αξιολόγησης (evaluate), ορισμού (define) και τα οποία υπολογίζονται να μπορούν να συνεισφέρουν με άλλα 110 Mtpa.

Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζονται τα μεγάλης κλίμακας έργα ανά περιοχή, ενώ στην Εικόνα 1.4 τα έργα αυτά ανά βιομηχανικό κλάδο και τύπο γεωλογικής αποθήκευσης. Στην Εικόνα 1.5 απεικονίζεται ο χάρτης έργων γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ μεγάλης κλίμακας στην Ευρώπη και τέλος ο Πίνακας 1.3 παραθέτει περισσότερα στοιχεία για τα 16 έργα μεγάλης κλίμακας που βρίσκονται σε στάδιο λειτουργίας (operation) και σε στάδιο δοκιμής

(execute).



Σχήμα 1.5: Έργα μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης CO₂ ανά περιοχή [5]



Εικόνα 1.4 :Παγκόσμιος χάρτης έργων μεγάλης κλίμακας [5]



Εικόνα 1.5: Χάρτης έργων γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ μεγάλης κλίμακας στην Ευρώπη [5]

Πίνακας 1.3: Έργα μεγάλης κλίμακας που βρίσκονται σε στάδιο Λειτουργίας (operation) και σε στάδιο Δοκιμής (execute).[5]

ΕΡΓΟ	ΧΩΡΑ	ΤΥΠΟΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ	ΟΓΚΟΣ CO ₂ (ΜΤΡΑ)	ΤΥΠΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΣΤΑΔΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ					
Val Verde Gas Plants	Ηνωμένες Πολιτείες	Πριν την καύση	1.3 Mtpa	EOR	1972
Enid Fertilizer CO₂-EOR Project	Ηνωμένες Πολιτείες	Πριν την καύση	0.68 Mtpa	EOR	1982
Shute Creek Gas Processing Facility	Ηνωμένες Πολιτείες	Πριν την καύση	7Mtpa	EOR	1986
Sleipner CO₂ Injection	Νορβηγία	Πριν την καύση	1 Mtpa (+0.2 Mtpa στην κατασκευή)	Βαθής αλατούχος σχηματισμός	1996
Great Plains Synfuel Plant and Weyburn–Midale Project	Ηνωμένες Πολιτείες/ Καναδάς	Πριν την καύση	3 Mtpa	EOR	2000
In Salah CO₂ Injection	Αλγερία	Πριν την καύση	1 Mtpa	Βαθής αλατούχος σχηματισμός	2004
Snøhvit CO₂ Injection	Νορβηγία	Πριν την καύση	0.7 Mtpa	Βαθής αλατούχος σχηματισμός	2008
Century Plant	Ηνωμένες Πολιτείες	Πριν την καύση	5 Mtpa (+ 3.5 Mtpa στην κατασκευή)	EOR	2010

ΕΡΓΟ	ΧΩΡΑ	ΤΥΠΟΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ	ΟΓΚΟΣ CO ₂ (ΜΤΡΑ)	ΤΥΠΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΣΤΑΔΙΟ ΔΟΚΙΜΗΣ					
Air Products Steam Methane Reformer EOR Project	Ηνωμένες Πολιτείες	Μετά την καύση	1 Mtpa	EOR	2012
Lost Cabin Gas Plant	Ηνωμένες Πολιτείες	Πριν την καύση	1 Mtpa	EOR	2012
Illinois Industrial CCS Project	Ηνωμένες Πολιτείες	Βιομηχανικός Διαχωρισμός	1 Mtpa	Βαθής αλατούχος σχηματισμός	2013
ACTL with Agrium CO₂ Stream	Καναδάς	Πριν την καύση	0.59 Mtpa	EOR	2014
Boundary Dam Integrated CCS Demonstration Project	Καναδάς	Μετά την καύση	1 Mtpa	EOR	2014
Kemper County IGCC Project	Ηνωμένες Πολιτείες	Πριν την καύση	3.5 Mtpa	EOR	2014
Gorgon Carbon Dioxide Injection Project	Αυστραλία	Πριν την καύση	3.4-4.1 Mtpa	Βαθής αλατούχος σχηματισμός	2015
Quest	Καναδάς	Πριν την καύση	1.08 Mtpa	Βαθής αλατούχος σχηματισμός	2015

Τα 16 αυτά έργα που αναγράφονται στον Πίνακα 1.3, έχουν συνολική ικανότητα δέσμευσης και αποθήκευσης περίπου 36 Mt CO₂, αριθμός που ισοδυναμεί με τις εκπομπές από περισσότερα από 7 εκ. αυτοκίνητα ανά χρόνο ή με (περίπου) τις ετήσιες εκπομπές της Σιγκαπούρης ή της Ν. Ζηλανδίας [115].

Όλα τα έργα που βρίσκονται σε λειτουργία αφορούν είτε αποθήκευση του CO₂ ταυτόχρονα με ενισχυμένη απόληψη πετρελαίου EOR, είτε αποθήκευση σε βαθείς αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες. Η ανάπτυξη νέων έργων γίνεται με πολύ αργούς ρυθμούς. Υπάρχουν 8 μεγάλης κλίμακας έργα, αυτή την στιγμή υπό κατασκευή εκ των οποίων τα 7 βρίσκονται στην Β. Αμερική (4 στις ΗΠΑ και 3 στον Καναδά). Μόνο 2 έργα αφορούν στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής (Boundary Dam στον Καναδά και Kemper County στις ΗΠΑ), τα οποία πουλούν το δεσμευμένο CO₂ για εφαρμογές EOR. Ενώ 3 έργα αφορούν την απομόνωση CO₂ σε βαθείς υδροφόρους σχηματισμούς (Gorgon, Archer Daniels Midland's στο Ιλινόις, το Quest στον Καναδά).

Επίσης, από το 2011 αναγνωρίστηκαν στην Κίνα 5 νέα έργα μεγάλης κλίμακας, τα οποία βρίσκονται σε πολύ αρχικό στάδιο και 3 εξ αυτών αφορούν τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη αν και (παρατηρώντας και τον Πίνακα 1.3) είναι ξεκάθαρο ότι η πριν την καύση δέσμευση έχει την ευρύτερη εφαρμογή, εντούτοις στην Κίνα οι προσπάθειες στρέφονται και προς την ανάπτυξη της δέσμευσης με καύση οξυγόνου (oxyfuel).

Εκτός από τα έργα που σχεδιάζονται, υπάρχουν και άλλα τα οποία ξεκίνησαν, αλλά στη συνέχεια σταμάτησαν ή αναβλήθηκαν εξαιτίας διαφόρων παραγόντων. Συνολικά 8 έργα μεγάλης κλίμακας συνάντησαν κολλήματα ενώ βρίσκονταν σε διάφορα στάδια ανάπτυξής τους. Αναφέρονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις όπως [103], [5]:

ο Έργο Longannet (UK): το οποίο ακυρώθηκε τον Οκτώβρη του 2011 με την αναγγελία του Υπουργείου Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής του Ηνωμένου Βασιλείου, ότι δεν θα χρηματοδοτήσει την κατασκευή εγκαταστάσεων δέσμευσης του CO₂.

ο Έργο Janschwalde (Γερμανία): το οποίο ακυρώθηκε τον Δεκέμβρη του 2011, λόγω έλλειψης στήριξης από την γερμανική κυβέρνηση και λόγω της απουσίας ξεκάθαρα νομικού πλαισίου.

ο Έργο Pioneer (Καναδάς): το οποίο ακυρώθηκε τον Απρίλιο του 2012, επικαλούμενο την ανεπαρκή τιμή των μειώσεων των εκπομπών και των εσόδων από τις πωλήσεις του άνθρακα.

ο Έργο Porto Tolle (Ιταλία): το οποίο αναβλήθηκε με απόφαση του ανώτατου διοικητικού δικαστηρίου του Συμβουλίου της Επικρατείας της Ιταλίας, τον Μάιο του 2011, βασισμένη σε περιβαλλοντικούς λόγους, ύστερα από καταγγελίες οικολογικών ομάδων και της τοπικής βιομηχανίας.

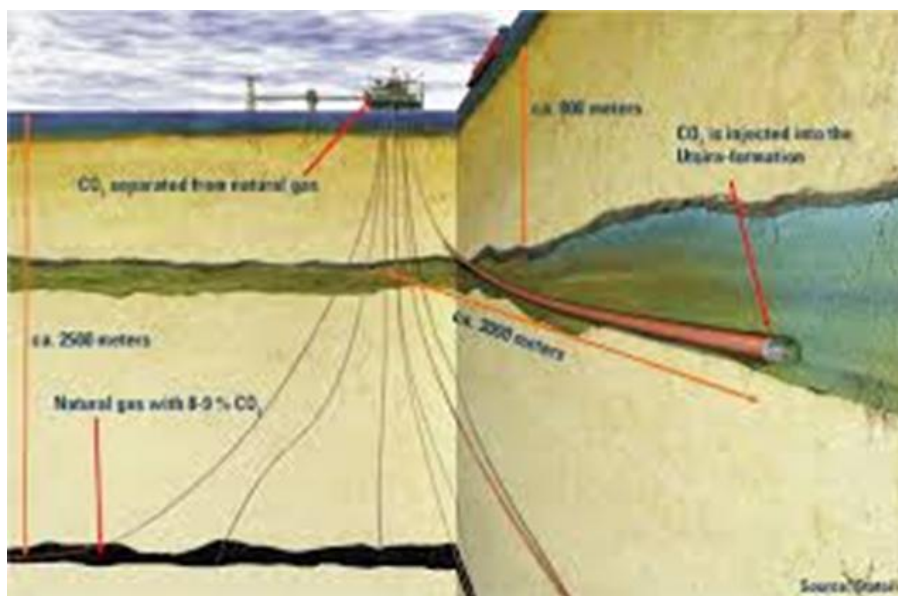
ο Έργο Belchatow (Πολωνία): το οποίο ακυρώθηκε τον Απρίλιο του 2013 διότι δεν πληρούσε τα κριτήρια ώστε να λάβει την χρηματοδότηση από το πρόγραμμα NER 300.

ο Έργο Barendrecht (Ολλανδία): το οποίο ακυρώθηκε από την ολλανδική κυβέρνηση το 2010, καθώς συνάντησε τεράστια αντίδραση από την τοπική κοινωνία για την οποία η εταιρία που το είχε αναλάβει (Shell) δεν ήταν προετοιμασμένη να αντιμετωπίσει.

Μέχρι σήμερα, τα έργα που φέρουν τη μεγαλύτερη εμπειρία στον χώρο της γεωλογικής αποθήκευσης και κατά συνέπεια λειτουργούν σαν «οδηγοί» και για όλα τα υπόλοιπα που βρίσκονται υπό κατασκευή ή σχεδιασμό, είναι τα ακόλουθα:

Sleipner

Το έργο Sleipner ξεκίνησε στην Βόρεια Θάλασσα, στην Νορβηγία, το 1996 υπό την Statoil. Η δέσμευση γίνεται από μονάδα επεξεργασίας φυσικού αερίου (gas processing, Sleipner West field) και η αποθήκευση στον σχηματισμό Utsira, έναν αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα, πάχους 200-250 μέτρων από ψαμμίτη που βρίσκεται σε βάθος περίπου 800-1000 μέτρων κάτω από τον βυθό της θάλασσας. Είναι το πρώτο, παγκοσμίως, έργο γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ εμπορικής κλίμακας και ξεκίνησε ώστε να αποφευχθεί η βαριά φορολογία που επιβαλλόταν βάσει της νορβηγικής νομοθεσίας στο εν λόγω πεδίο εξόρυξης (1 εκ. NOK /ημέρα). Εκτιμάται ότι ο σχηματισμός Utsira μπορεί να αποθηκεύσει περί τα 600 δις τόνους CO₂, ενώ μέχρι σήμερα (με κόστος εισπίεσης \$17US ανά τόνο CO₂) έχει αποθηκεύσει 16 Mt CO₂, δηλ 16 εκ. τόνους CO₂ [102]. Η αποθήκευση παρακολουθείται μέσω τρισδιάστατων σεισμικών ερευνών και θεωρείται αποτελεσματική και ασφαλής, καθώς δεν υπάρχουν ενδείξεις διαρροής μέχρι σήμερα.



Εικόνα 1.6: Απεικόνιση εισπίασης και υπεραδρικής γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ σε θαλάσσιο περιβάλλον (offshore) στο Sleipner [116].

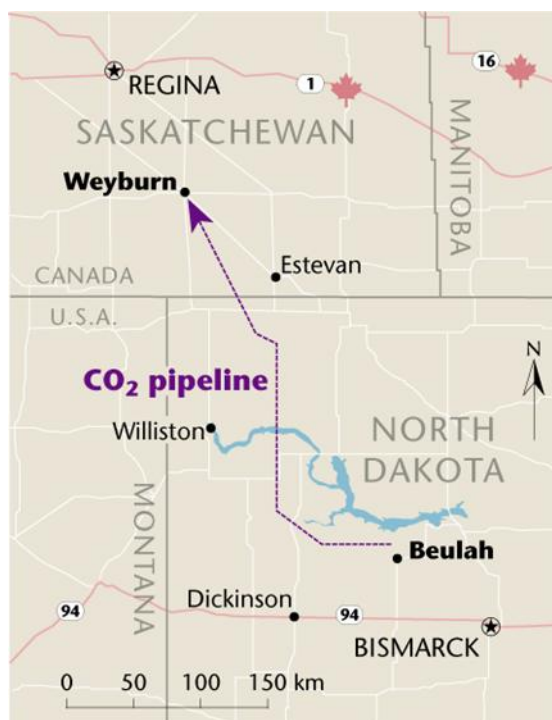
Snohvit

Πρόκειται για το δεύτερο, μεγάλης κλίμακας, έργο από την Statoil, το οποίο ξεκίνησε το 2008 σε μια υποθαλάσσια τοποθεσία βόρεια της Νορβηγίας (Barents Sea). Κίνητρο και εδώ, όπως και στο Sleipner, ήταν η αποφυγή της φορολογίας των εκπομπών CO₂. Η δέσμευση του CO₂ γίνεται από την μονάδα υγροποίησης του φυσικού αερίου (LNG unit) το οποίο παράγεται στο Snohvit. Αφού απομακρυνθεί το CO₂ από το αέριο ρεύμα, διοχετεύεται μέσω αγωγού 150 χλμ πίσω στο πεδίο για εισπίαση σε έναν βαθύ αλατούχο υδροφόρο σχηματισμό. Στις αρχές του 2010, η Statoil ανακοίνωσε ότι η χωρητικότητα του πεδίου ήταν μικρότερη από ό,τι αναμενόταν και τώρα λαμβάνονται μέτρα ώστε να αυξηθεί (μέσω διάνοιξης νέων γεωτρήσεων και / ή ρωγμάτωση του σχηματισμού).

Weyburn

Το Weyburn ξεκίνησε το 2004 και μεταφέρει CO₂ από μια μονάδα αεριοποίησης άνθρακα (Great Plains Synfuels Plant) από τη Βόρεια Ντακότα στο πεδίο ενισχυμένης απόληψης πετρελαίου (EOR) του Weyburn στο Saskatchewan του Καναδά, μέσω ενός αγωγού μεταφοράς μήκους 330χλμ. (Εικόνα 1.7). Η εισπίαση γίνεται σε 2 πεδία, αυτό του Weyburn από την Cenovus Energy και στο πεδίο Midale από την Apache Canada. Η εφαρμογή EOR έχει αυξήσει την απόληψη πετρελαίου κατά 16.000-28.000 βαρέλια/ ημέρα στο Weyburn

και κατά 2.300-5.800 βαρέλια ανά ημέρα στο Midale .



Εικόνα 1.7: Διασυνοριακή Μεταφορά CO₂ από τις ΗΠΑ στον Καναδά για εφαρμογή ενισχυμένης απόληψης πετρελαίου και ταυτόχρονη γεωλογική αποθήκευση του CO₂ [117]

Τον Ιανουάριο του 2011, υπήρξε μια έκθεση αναφοράς για διαρροή στην περιοχή του πεδίου του Weyburn, καθώς εντοπίστηκαν φυσαλίδες αερίου και νεκρά ζώα κοντά σε μια τεχνητή λίμνη της περιοχής. Η ισοτοπική ανάλυση του αερίου, έδειξε ότι πιθανά οι εκπομπές να προέρχονται από την εισπιεζόμενη μάζα του CO₂, αν και το ζήτημα βρίσκεται ακόμα υπό μελέτη.

In Salah

Το έργο In Salah ξεκίνησε το 2004 στην Αλγερία, υπό την BP, Sontrach και Statoil. Η δέσμευση γίνεται επίσης από μονάδα παραγωγής και επεξεργασίας φυσικού αερίου (In Salah Oil Field) και η αποθήκευση γίνεται στον σχηματισμό Krechba, ένα εξαντλημένο πεδίο εξόρυξης φυσικού αερίου κοντά στην μονάδα. Ο σχηματισμός είναι λιθανθρακοφόρος ψαμμίτης (Carboniferous sandstone unit) σε βάθος 1.9 χλμ. Οι εργασίες εισπίεσης αναστάλθηκαν από το 2011 λόγω ανησυχιών για την ακεραιότητα του καλύμματος (seal) του σχηματισμού, αν και δεν έχουν παρατηρηθεί ενδείξεις διαρροής. Χρησιμοποιήθηκε η πρωτοποριακή τεχνική παρακολούθησης μέσω δορυφορικών δεδομένων InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) (η οποία αναλύεται

εκτενέστερα στο 5ο κεφ.) αλλά και πληθώρα άλλων τεχνικών όπως σεισμικά και μικροσεισμικά δεδομένα. Ο σχηματισμός εκτιμάται ότι έχει μια χωρητικότητα της τάξης των 17 εκ τόνων CO₂, ενώ μέχρι την αναστολή των εργασιών, υπολογίζεται ότι αποθηκεύτηκαν επιτυχώς 3.8 Mt CO₂.

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ & ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂ (CARBON CAPTURE AND STORAGE, CCS) ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Στα πλαίσια των τεχνολογιών μείωσης του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, το πιο καινοτόμο βήμα και με τη μεγαλύτερη δυνατότητα για μεγάλες μειώσεις των εκπομπών CO₂ προσφέρουν οι τεχνολογίες CCS. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρόκειται για μια σειρά ενεργειών που περιλαμβάνουν τη δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση του CO₂ σε κατάλληλους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς και όχι μόνο την προσπάθεια μετριασμού των εκπομπών του σε μια βιομηχανική μονάδα.

Εν συντομία, η εφαρμογή των CCS περιλαμβάνει τη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα πριν ή μετά την καύση από μεγάλες σταθερές πηγές, όπως μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, μονάδες επεξεργασίας φυσικού αερίου, αλλά και άλλες βιομηχανικές μονάδες. Έπειτα, ακολουθεί η μεταφορά του μέσω αγωγών ή πλοίων και η εισπίεση του βαθιά μέσα στο έδαφος σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς όπως τα εξαντλημένα πεδία εξόρυξης υδρογονανθράκων, οι βαθείς αλατούχοι ορίζοντες και τα μη

εκμεταλλεύσιμα στρώματα γαιάνθρακα.

Οι εφαρμογές δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ περιλαμβάνουν τεχνολογίες, οι οποίες εφαρμόζονται εδώ και δεκαετίες στην πετρελαϊκή βιομηχανία, γενικότερα στην εξόρυξη, παραγωγή και κατεργασία υδρογονανθράκων, αλλά και στην υπεδαφική αποθήκευση αποβλήτων (όπως πχ acid gas). Συνεπώς, η ιδέα της δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂, δε βασίζεται παρά σε γνωστές τεχνολογίες, που σε ορισμένες περιπτώσεις θα πρέπει βέβαια να αναπροσαρμοστούν για την εξυπηρέτηση ενός νέου σκοπού που είναι η αποθήκευση του CO₂ στα πλαίσια του μετριασμού των εκπομπών του στην ατμόσφαιρα και κατά συνέπεια του περιορισμού του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.

2.1 Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα

Το πρώτο στάδιο μιας εφαρμογής CCS είναι η δέσμευση του CO₂, η οποία αποσκοπεί στην παραγωγή ενός ρεύματος υψηλής συγκέντρωσης σε CO₂, σε υψηλή πίεση, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί εύκολα σε ένα χώρο αποθήκευσης. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί για τη δέσμευση αποτελούν:

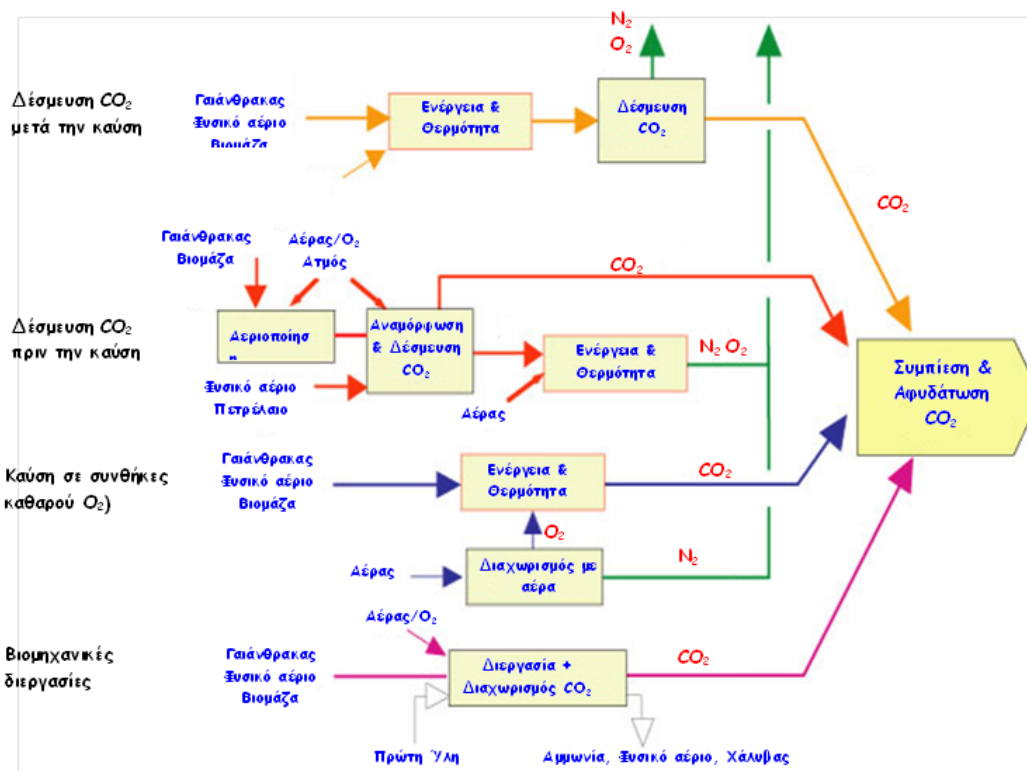
- Το είδος του καυσίμου (στερεό ή αέριο) που χρησιμοποιείται στη διεργασία
- Η συγκέντρωση του CO₂ στο αέριο ρεύμα
- Η πίεση του αέριου ρεύματος

Βάσει των παραπάνω, υπάρχουν τρεις μεθοδολογίες προσέγγισης της τεχνολογίας δέσμευσης CO₂ και είναι οι εξής:

- **Δέσμευση πριν την καύση** (pre-combustion): αφαίρεση του περιεχόμενου άνθρακα (και διαχωρισμός του παραγόμενου CO₂) από το βασικό καύσιμο πριν την καύση.
- **Δέσμευση μετά την καύση** (post-combustion): διαχωρισμός CO₂ από τα απαέρια της καύσης του βασικού καυσίμου με αέρα.
- **Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου** (oxyfuel combustion): διαχωρισμός CO₂ από τα απαέρια της καύσης του βασικού καυσίμου με καθαρό οξυγόνο.

Στο Σχήμα 2.1 δίνονται συνοπτικά οι τεχνολογίες δέσμευσης CO₂, όπως αναφέρονται κατά βάση στα συστήματα καύσης ορυκτών καυσίμων αλλά και σε ορισμένες βιομηχανικές

διεργασίες που συντελούν σημαντικά στις εκπομπές CO₂.



Σχήμα 2.1: Συνοπτική απεικόνιση τεχνολογιών δέσμευσης CO₂ [17].

2.1.1 Δέσμευση CO₂ πριν την καύση (pre-combustion)

Κατ' αυτόν τον τρόπο διαχωρισμού, το CO₂ ανακτάται από ένα ρεύμα διεργασίας πριν το καύσιμο υποστεί καύση. Στο βαθμό που μπορεί να αυξηθεί η συγκέντρωση και η πίεση του περιέχοντος CO₂ στο ρεύμα, δύναται και να μειωθεί το μέγεθος των εγκαταστάσεων και το κόστος της δέσμευσης. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας να δεσμεύουν το CO₂, έχοντας παράλληλα τη μεγαλύτερη δυνατή παραγόμενη ισχύ.

Η διαδικασία διαχωρισμού της μεθόδου απαιτεί την παρουσία μιας μονάδας διαχωρισμού του αέρα, η οποία παράγει ένα ρεύμα σχεδόν καθαρού οξυγόνου. Το οξυγόνο ρέει εντός του αεριοποιητή και αντιδρά με κονιορτοποιημένο άνθρακα προς σχηματισμό του συνθετικού αερίου (CO + H₂) (Syngas). Μέσα σ' έναν αντιδραστήρα (shift reactor) προστίθεται ατμός μαζί με το syngas, παράγοντας επιπλέον υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα (15-60%). Το CO₂ διαχωρίζεται από το ρεύμα των αερίων σε σχετικά υψηλή πίεση (10-80 bar), έτοιμο για μεταφορά και αποθήκευση. Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί

να χρησιμοποιηθεί κατ' επέκταση σε διάφορες διεργασίες παραγωγής ενέργειας.

Στο διαχωρισμό αυτό του CO₂ χρησιμοποιούνται χημικοί ή φυσικοί διαλύτες. Οι χημικοί διαλύτες (πχ αμίνες MDEA (Methyldiethanol amine) επιδρούν με τα απαέρια και απορροφούν επιλεκτικά το CO₂ και έπειτα με πρόσληψη θερμότητας αντιστρέφουν την αντίδραση και το απελευθερώνουν.

Οι φυσικοί διαλύτες (πχ Selexol και Rectisol) διαλύουν το CO₂ με την αύξηση της πίεσης και χωρίς περίπλοκες αντιδράσεις. Το CO₂ απελευθερώνεται από το διαλύτη όταν η πίεση μειωθεί και η θερμοκρασία αυξηθεί. Απαιτείται σημαντικά λιγότερη θερμότητα απ' ότι για την αναγέννηση των χημικών διαλυτών (αμίνες) [24].

Άλλες τεχνολογίες διαχωρισμού μπορεί να είναι: η χρήση μεμβρανών και η χρήση προσροφητικών μέσων (όπως δολομίτης και άλλα ανθρακικά μέσα).

2.1.2 Δέσμευση CO₂ μετά την καύση (post –combustion)

Αυτή η μέθοδος χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εγκατασταθεί τόσο σε νέους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και σε ήδη υπάρχοντες. Περιλαμβάνει την απομάκρυνση του CO₂ από τα απαέρια που παράγονται από την καύση. Η καύση πραγματοποιείται με αέρα. Ο αέρας που χρησιμοποιείται αποτελείται κατά κανόνα κατά 4/5 από άζωτο και τα παραγόμενα απαέρια είναι σε ατμοσφαιρική πίεση και με συγκεντρώσεις CO₂ συνήθως μικρότερες από 15%. Γι' αυτό το λόγο η θερμοδυναμική κινητήρια δύναμη για τη δέσμευση είναι επίσης χαμηλή (μερική πίεση CO₂ < 0.15 atm). Πολλές φορές, σε κάποιους σταθμούς, διενεργείται μια «πλύση» του άνθρακα πριν την τροφοδοσία του εντός του λέβητα. Ουσιαστικά, ο όρος «πλύση» περιλαμβάνει τη διαδικασία διέλευσης του άνθρακα μέσα από μια σειρά υγρών διαφορετικών πυκνοτήτων που απομακρύνουν πολλές από τις βλαβερές προσμίξεις του.

Η δέσμευση του CO₂ από τα απαέρια γίνεται, συνήθως, με χρήση οργανικών διαλυτών (κυρίως υδατικά διαλύματα αμινών). Το CO₂ διαχωρίζεται σε στήλη απορρόφησης από το διάλυμα, ξηραίνεται και συμπιέζεται. Κατόπιν αυτού τα διαλύματα αμινών αναγεννώνται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.

Άλλες πιθανές τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή αναπτύσσονται αποτελούν η χρήση μεμβρανών, η χρήση συστημάτων που βασίζονται σε ανθρακικά μέσα, η χρήση

υδατικής αμμωνίας, κοκ.

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η εφαρμογή της έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση της μονάδας, ιδιαίτερα στην ηλεκτροπαραγωγή. Χαρακτηριστικά, σε μια πρόσφατη έκθεση σχετικά με τη δέσμευση CO₂ σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες αερίου (gas-fired), διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη δέσμευσης μετά την καύση, μειώνει τη θερμική απόδοση της μονάδας συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (Natural Gas Combined Cycle) κατά 7-8%, αυξάνει το κόστος του κεφαλαίου κατά περίπου 80 -120% και αυξάνει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας κατά περίπου 30-40% [61].

2.1.3 Δέσμευση CO₂ με καύση σε συνθήκες καθαρού O₂ (oxyfuel combustion)

Μια εναλλακτική λύση για τη δέσμευση του άνθρακα από ένα αέριο καύσιμο ή από τα απαέρια της καύσης είναι η τροποποίηση της διαδικασίας καύσης έτσι ώστε να αυξηθεί η συγκέντρωση του CO₂ στα απαέρια.

Αυτή η τρίτη διαθέσιμη τεχνολογία δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα περιλαμβάνει την καύση με ρεύμα ανακύκλωσης απαερίων και σχεδόν καθαρό οξυγόνο (περιεκτικότητας O₂>95%). Για να εξασφαλιστεί η παροχή υψηλής καθαρότητας οξυγόνου στο λέβητα, χρησιμοποιείται συνήθως μια κρυογενική μονάδα διαχωρισμού του αέρα (cryogenic air separation unit – ASU). Αυτή η μονάδα απομακρύνει το άζωτο, παράγοντας οξυγόνο, το οποίο ενώνεται στη συνέχεια με ρεύμα ανακύκλωσης απαερίων ώστε να επιτευχθούν θερμοκρασίες καύσης πιο χαμηλές εντός των ορίων αντοχής των υλικών κατασκευής που είναι διαθέσιμα.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι παράγει ένα ρεύμα απαερίων, το οποίο είναι κυρίως CO₂ (>80% κ.ο., 75-95%) σε πίεση περίπου 1 bar και νερό (υδρατμούς). Το νερό αφαιρείται εύκολα με συμπύκνωση και το υπόλοιπο CO₂ μπορεί να καθαριστεί σχετικά ανέξοδα. Η προετοιμασία των απαερίων περιλαμβάνει την ξήρανση του CO₂, την απομάκρυνση του O₂ ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση των αγωγών, ενδεχομένως και την απομάκρυνση άλλων βλαβερών ουσιών, όπως πχ. Ar, N₂, SO₂, NO_x.

Μέχρι σήμερα τα παραδείγματα εφαρμογής καύσης oxyfuel είναι περιορισμένα. Δύο από αυτά είναι το σουηδικό πιλοτικό πρόγραμμα Vattenfall στο Schwarze Pumpe και το έργο της ενεργειακής εταιρίας Total's Lacq στην νοτιοδυτική Γαλλία. Μέσα στο 2012, υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον και ανάπτυξη δοκιμαστικών εφαρμογών, όπως για παράδειγμα από το

ισπανικό κρατικό ίδρυμα CIUDEN το οποίο διενεργεί δοκιμές δέσμευσης με οξυγονοκαύση σε μονάδα παραγωγής ενέργειας με σκοπό τη μετέπειτα εφαρμογή στο έργο Compostilla (Ισπανία). Άλλες δοκιμές που ανακοινώθηκαν είναι από την CS Energy, ως μέρος του σταδίου ανάθεσης του έργου Callide (Αυστραλία), το έργο Kimberlina στην Καλιφόρνια (ΗΠΑ) και ένα ακόμα έργο της Vattenfall στο Janschwalde (Γερμανία) το οποίο αναμένεται να λειτουργήσει το 2015 [5].

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διάφορων τεχνολογιών δέσμευσης.

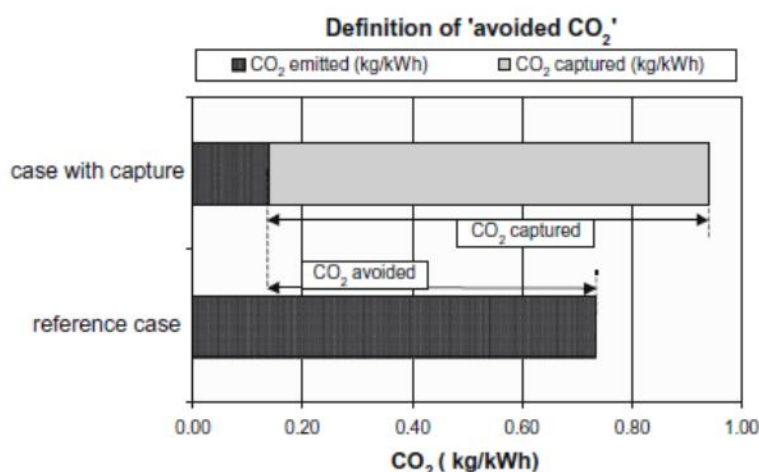
Τεχνολογίες Δέσμευσης			
	Εφαρμογή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δέσμευση πριν την καύση (pre-combustion)	<ul style="list-style-type: none"> Μονάδες Παραγωγής Ενέργειας (πχ κωνιοποιημένου άνθρακα PC, φυσικού αερίου, φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου NGCC, αεριοποίησης, κοκ) Τσιμεντοβιομηχανία Μονάδες αιθανόλης (ethanol plants) 	<ul style="list-style-type: none"> Το παραγόμενο CO₂ λαμβάνεται σε υψηλή συγκέντρωση (15-60% κ.ο.) και σχετικά υψηλή πίεση. Το γεγονός αυτό επιδρά τόσο στο διαχωρισμό του που μπορεί να επιτευχθεί με φυσικές μεθόδους που απαιτούν χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση αλλά και στην επεξεργασία και μεταφορά του καθώς οι όγκοι του αερίου είναι σαφώς μικρότεροι Τα ποσοστά δέσμευσης είναι της τάξης του 80-90% Οι διαθέσιμες τεχνολογίες για διαχωρισμό υπό αυτές τις συνθήκες είναι περισσότερες από την εφαρμογή τους κυρίως στη χημική βιομηχανία (διωλιστήρια, αμμωνία) Ο διαχωρισμός πριν την καύση σε καύσιμα υδρογονανθράκων παράγει H₂ που θεωρείται καθαρό καύσιμο Πιθανότητα μείωσης κόστους συμπίεσης εφόσον το παραγόμενο ρεύμα βρίσκεται ήδη σε υψηλές τιμές πίεσης 	<ul style="list-style-type: none"> Εφαρμόζεται μόνο σε νέες μονάδες και μάλιστα μονάδες GCC Δεν υπάρχει δυνατότητα μετασκευής της τεχνολογίας Η εφαρμογή τόσο της δέσμευσης πριν την καύση όσο και των μονάδων IGCC παρουσιάζουν όμοια κωλύματα, που σχετίζονται με: <ul style="list-style-type: none"> - Διαθεσιμότητα - Κόστος εξοπλισμού - Εκτεταμένη ανάγκη για υποστηρικτικά συστήματα

<p>Δέσμευση μετά την καύση (post-combustion)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Κύρια σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες με καύση σε αέρα • Μονάδες παραγωγής τσιμέντου • Διυλιστήρια πετρελαίου • Πετροχημικά 	<ul style="list-style-type: none"> • Μπορεί να εφαρμοστεί στην πλειονότητα των υπάρχοντων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από άνθρακα • Δυνατότητα μετασκευής της τεχνολογίας (retrofit) σε εγκαταστάσεις • Η δέσμευση CO₂ από απαέρια αποτελεί σχετικά ώριμη τεχνολογία η οποία, ωστόσο, χρειάζεται να εφαρμοστεί σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις • Τα ποσοστά δέσμευσης είναι της τάξης του 80-90% • Το παραγόμενο ρεύμα του CO₂ περιέχει κατά κύριο λόγο μικρότερο αριθμό προσμίξεων απ' ό,τι οι άλλες δύο τεχνολογίες 	<ul style="list-style-type: none"> • Το CO₂ που περιέχεται στα απαέρια (συνυπάρχει με SO₂ και NO_x) βρίσκεται σε χαμηλή συγκέντρωση (3-15%) και σε πίεση περιβάλλοντος. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη για περαιτέρω διεργασίες σχετικά με το διαχωρισμό του, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί. Οι διεργασίες διαχωρισμού και συμπίεσης του CO₂ υπό αυτές τις συνθήκες απαιτούν εξοπλισμό και υψηλή ενεργειακή κατανάλωση. • Εκτιμάται ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής σε ήδη υπάρχουσες μονάδες οδηγεί σε μείωση κατά 20-30% της ηλεκτροπαραγωγής καθώς θα απαιτηθεί ενέργεια τόσο στην ανάκτηση του CO₂ από τα απαέρια όσο και στη συμπίεση του. Μια τέτοια μείωση ειδικά σε μονάδες κονιορτοποιημένου άνθρακα (PC) με ενεργειακή απόδοση 33% θεωρείται δραματική.
---	--	---	--

<p>Δέσμευση με οξυγονοκαύση (oxy-combustion)</p>	<p>Σε οποιοδήποτε είδους μονάδα ακόμα σαν πρόσθετη εγκατάσταση</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Το παραγόμενο CO₂ λαμβάνεται σε πολύ υψηλή συγκέντρωση (>80% κ.ο.) • Δυνατότητα τόσο μετασκευής (retrofit) της τεχνολογίας όσο και της παρεχόμενης ενέργειας (repowering) • Υπάρχει σχετική εμπειρία από τη βιομηχανία χάλυβα, αλουμινίου και υάλου • Τα ποσοστά δέσμευσης μπορεί να φτάσουν το 100% 	<ul style="list-style-type: none"> • Το κόστος του διαχωρισμού O₂ από τον αέρα (με κρυογενική μέθοδος που αποτελεί τη πιο διαδεδομένη μέθοδο), μπορεί να είναι απαγορευτικό καθώς και η ενέργεια που μπορεί να απαιτεί μπορεί να φτάσει και το 20% της ηλεκτροπαραγωγής • Ο κύκλος ψύξης του CO₂ πρέπει να διατηρεί θερμοκρασίες μέσα σε κάποια όρια ανεκτά για τα υλικά του καυστήρα • Μειωμένη αποδοτικότητα της διεργασίας • Ανάγκη για προστιθέμενο βοηθητικό εξοπλισμό
---	--	---	---

2.1.4 Κόστος Δέσμευσης

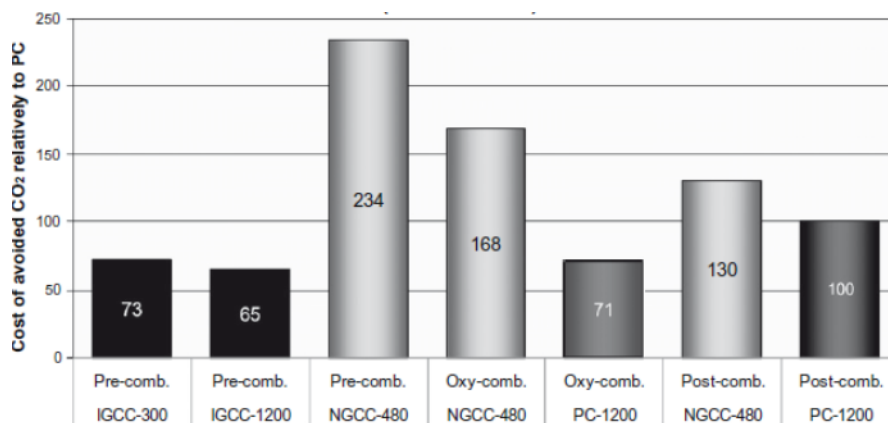
Οι τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂ απαιτούν την κατανάλωση σημαντικής ποσότητας ενέργειας, η οποία μπορεί να προκαλεί σημαντική μείωση της συνολικής απόδοσης του σταθμού. Ως εκ τούτου, πρέπει να καταναλώνεται περισσότερο καύσιμο για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, ένας σταθμός παραγωγής ενέργειας όπου εφαρμόζεται δέσμευση, παράγει πραγματικά περισσότερο CO₂ ανά kWh από ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας χωρίς δέσμευση, όμως περισσότερο από το 85% του CO₂ δεσμεύεται. Συνεπώς, η ποσότητα του CO₂ που στην πραγματικότητα αποφεύγεται από το να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα δεν είναι η ποσότητα που έχει δεσμευτεί, αλλά είναι η διαφορά μεταξύ της ποσότητας που ο σταθμός αναφοράς θα εξέπεμπε χωρίς τη δέσμευση και της ποσότητας που εκπέμπεται από τον σταθμό ηλεκτροπαραγωγής όπου εφαρμόζεται δέσμευση.



Σχήμα 2.2: Διαφορά CO₂ που δεσμεύεται από την ποσότητα αυτού που τελικά δεν απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα [24].

Οι διαφορετικές τεχνολογίες δέσμευσης θα έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στην απόδοση των μονάδων, παρουσιάζοντας μια εξισορρόπηση μεταξύ της ευελιξίας, του κόστους και της αποτελεσματικότητας της καθεμιάς [61]. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι διαφορές κόστους ανά τόνο CO₂ που αποφεύχθηκε μέσω διαφορετικών τεχνολογιών δέσμευσης (σε σύγκριση με μια μονάδα κονιοποιημένου άνθρακα PC). Παρατηρώντας το γράφημα είναι εμφανές ότι το μικρότερο κόστος ανά τόνο CO₂ το δίνει η δέσμευση πριν την καύση σε μονάδα IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) (65%) ενώ το μεγαλύτερο

(234%) εντοπίζεται πάλι σε δέσμευση πριν την καύση, σε μονάδα NGCC (Natural Gas Combined Cycle). Ενώ η δέσμευση πριν την καύση σε IGCC και η δέσμευση με οξυfuel σε μονάδα κονιοποιημένου άνθρακα (Pulverized Coal) κυμαίνονται περίπου στα ίδια επίπεδα.



Σχήμα 2.3: Κόστος ανά τόνο CO₂ που αποφεύχθηκε για διαφορετικές τεχνολογίες δέσμευσης [24].

Επίσης, στον Πίνακα 2.2 δίνονται ενδεικτικά κόστη ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας Υπερκρίσιμου Κονιοποιημένου Άνθρακα (SCPC) με ή χωρίς (reference plant) δέσμευση CO₂.

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικά κόστη ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας Υπερκρίσιμου Κονιοποιημένου Άνθρακα (SCPC) με ή χωρίς (reference plant) δέσμευση CO₂ [84].

Updated Capture (including Compression) Costs for Nth Plant SCPC Gen (Hamilton et al., 2008)		
Reference Plant	Units	SCPC
Total Plant Cost	\$/kWe	1910
CO ₂ emitted	kg/kWh	0.830
Heat Rate (HHV)	Btu/kWh	8868
Thermal Efficiency (HHV)		38.5%
LCOE		
Capital	\$/MWh	38.8
Fuel	\$/MWh	15.9
O&M	\$/MWh	8.0
Total	\$/MWh	62.6
CO₂ Capture Plant		
Total Plant Cost	\$/kWe	3080
CO ₂ emitted @ 90% Capture	kg/kWh	0.109
Heat Rate (HHV)	Btu/kWh	11652
Thermal Efficiency (HHV)		29.3%
LCOE		
Capital	\$/MWh	62.4
Fuel	\$/MWh	20.9
O&M	\$/MWh	17.0
Total	\$/MWh	100.3
\$/tonne CO₂ avoided vs. SCPC		
	\$/tonne	52.2

Σε γενικές γραμμές, η δέσμευση του CO₂ αποτελεί τεχνική με ιδιαίτερα αυξημένο κόστος και μάλιστα, επί του συνόλου της μεθοδολογίας, είναι το σημαντικότερο όλων. Οι μελέτες που πραγματοποιούνται προσανατολίζονται στην προσπάθεια μείωσης του κόστους μέσα από την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται στη δέσμευση και στην ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων, όπου θα αποτιμηθεί η πραγματικότητα.

Τα δεδομένα για το κόστος, όπως αυτά εκτιμούνται στις μελέτες για τη δέσμευση στο πλαίσιο του CCS, βασίζονται σχεδόν αποκλειστικά στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Σε γενικό επίπεδο, οι αναφορές κόστους κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος, ενδεικτικά [17] δίδονται τιμές κόστους δέσμευσης (μη συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς) *US\$ 15-75 ανά τόννο CO₂ σε ηλεκτροπαραγωγές μονάδες, US\$ 5-55 ανά t CO₂ σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας φυσικού αερίου και αμμωνίας και US\$ 25-115 ανά t CO₂ σε άλλες βιομηχανικές διεργασίες.*

2.2 Μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα

Η μεταφορά του CO₂ από το σημείο της δέσμευσης στις περιοχές αποθήκευσης, είναι ένας σημαντικός κρίκος της αλυσίδας των τεχνολογιών Δέσμευσης και Αποθήκευσης του CO₂. Τα κύρια στοιχεία που συνθέτουν το στάδιο αυτό της μεταφοράς του CO₂ είναι τα μέσα μεταφοράς του, οι προδιαγραφές του ρεύματος του CO₂ αλλά και το κόστος.

2.2.1 Τρόποι Μεταφοράς CO₂

Σήμερα υπάρχουν ορισμένα δίκτυα μεταφοράς CO₂, καθώς και άλλων αερίων, ανά τον κόσμο. Όμως, για να επιτευχθεί σημαντική μείωση των αερίων του θερμοκηπίου μέσω της εφαρμογής των τεχνολογιών CCS, πρέπει να γίνουν σημαντικές επενδύσεις και να επεκταθούν σε μεγάλο βαθμό οι υποδομές αυτών των δικτύων.

Οι αγωγοί είναι, και πιθανότατα θα παραμείνουν, η πιο κοινή μέθοδος μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων CO₂. Υπάρχουν ήδη εκατομμύρια χιλιομέτρων συστήματα αγωγών παγκοσμίως τα οποία μεταφέρουν διάφορα αέρια, συμπεριλαμβανομένου και του CO₂, τόσο στην ξηρά όσο και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Μελλοντικά, υπολογίζεται ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι ανάγκες για αγωγούς μεταφοράς θα

κυμαίνονται μεταξύ 8.000-21.000 χλμ ως το 2020, ενώ αντίστοιχα στην Ευρώπη θα κυμαίνονται περί τα 2.300 χλμ, και ως το 2050 αναμένεται να φτάσουν τα 22.000χλμ αγωγών [102]. Μελετάται, επίσης, η πιθανότητα σχεδιασμού σύνθετου συστήματος μεταφοράς, όπου συμπλέγματα αγωγών (και πιθανά και άλλων μέσων μεταφοράς) θα συνδέουν πολλές σημειακές πηγές δέσμευσης με τους χώρους αποθήκευσης. Μετέπειτα, με την ανάπτυξη των CCS σε μεγαλύτερη κλίμακα, τα επιμέρους συμπλέγματα των εγγύτερων πηγών δέσμευσης θα ενώνονται με κόμβους, σχηματίζοντας την μορφή ενός «δέντρου» όπου τα «κλαδιά» είναι οι αγωγοί τροφοδοσίας, ο κορμός θα είναι ο κεντρικός αγωγός μεταφοράς και οι «ρίζες» οι αγωγοί διανομής στους αποθηκευτικούς χώρους. Αυτό μπορεί να μειώσει έως και 25% τις δαπάνες, σε σχέση με ένα σύστημα μεταφοράς σημείου-προς-σημείο, ανάλογα την κλίμακα του συμπλέγματος.

Η μεταφορά μέσω πλοίου μπορεί να είναι μια εναλλακτική λύση για πολλές περιοχές του κόσμου. Ήδη γίνεται, σε μικρή κλίμακα, στην Ευρώπη για την μεταφορά μικρών ποσοτήτων CO₂ (~1000 τόνοι) που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία τροφίμων από παράκτιες σημειακές πηγές. Το CO₂ μεταφέρεται σε υγρή μορφή σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από -25 ως -30°C και πιέσεις μεταξύ 1.4 με 1.7 MPa. Μια τυπική χωρητικότητα του δεξαμενόπλοιου σε CO₂ κυμαίνεται μεταξύ 850 με 1,400tCO₂, όγκος που θεωρείται πραγματικά μικρός για τα δεδομένα της μεταφοράς και αποθήκευσης σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Η μεταφορά CO₂ σε μεγάλη κλίμακα μέσω πλοίων είναι όμως υπό μελέτη, καθώς υπάρχει η διαθέσιμη δοκιμασμένη τεχνολογία από τις μεταφορές υγροποιημένου αερίου πετρελαίου (liquefied petroleum gas- LPG) που διεξάγονται στην πετρελαϊκή βιομηχανία εδώ και πολλά χρόνια. Ήδη σε χώρες όπως η Νορβηγία και η Ιαπωνία γίνονται έργα μελέτης ώστε να σχεδιαστούν μεταφορικά πλοία ειδικά για CO₂. Αναμένεται να είναι πολύ παρόμοια στο σχεδιασμό με αυτά της μεταφοράς του φυσικού αερίου, τα οποία έχουν χωρητικότητα 10.000-40.000 m³ και μεταφέρουν το αέριο σε συνθήκες θερμοκρασίας ως και - 50°C.

Δυνατή είναι και η μεταφορά σχετικά μικρών ποσοτήτων CO₂ μέσω φορτηγών οχημάτων και σιδηροδρόμων. Τα φορτηγά σήμερα χρησιμοποιούνται σε μικρής έκτασης έργα για τη μεταφορά από το σημείο δέσμευσης σε παραπλήσιες περιοχές αποθήκευσης. Δεδομένου, όμως, των μεγάλων ποσοτήτων που θα προκύψουν μελλοντικά με την ευρύτερη εφαρμογή των CCS, είναι αμφίβολο αν τα φορτηγά και οι σιδηρόδρομοι θα μπορούν να καλύψουν

σημαντικό μέρος των αναγκών μεταφοράς.

2.2.2 Προδιαγραφές ρεύματος CO₂ και συνθήκες μεταφοράς

Πριν από τη μεταφορά, το δεσμευμένο CO₂ υπόκειται σε επεξεργασία ώστε να αφαιρεθούν κάποιες πιθανές προσμίξεις και μετέπειτα να συμπιεστεί σε υπερκρίσιμη μορφή. Οι προσμίξεις αυτές, όπως οι υδρατμοί, το H₂S, N₂, μεθάνιο (CH₄), O₂, ο υδράργυρος και οι υδρογονάνθρακες, μπορεί να χρίζουν απομάκρυνσης ή επεξεργασίας πριν τη μεταφορά του CO₂. Αν και δεν έγκειται αυστηρά στο ζήτημα της μεταφοράς, η παρουσία αυτών των συστατικών στο ρεύμα του CO₂, είναι πιθανό σε έργα μεγάλης κλίμακας να δημιουργήσει προβλήματα στα συστήματα των αγωγών, αλλά κυριότερα στο σύστημα της αποθήκευσης.

Οι προσμίξεις στο ρεύμα του CO₂ μπορεί να έχουν βλαβερές συνέπειες στις φυσικές και χημικές ιδιότητές του. Μπορεί να υπάρξουν αλλαγές της φάσης και της πυκνότητας του ρεύματος (κυρίως λόγω της παρουσίας μη συμπτκνώσιμων προσμίξεων που δεν μπορούν να υγροποιηθούν σε ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες πχ N₂, O₂ και Ar), οι οποίες επηρεάζουν τη χωρητικότητα της αποθήκευσης, την εισπνευστικότητα και την τάση άνωσης (buoyancy) του εισπνεζόμενου ρεύματος. Επίσης, προσμίξεις όπως SO_x, NO_x και H₂S μπορεί να επιφέρουν χημικές αλλαγές και να προκαλέσουν διάβρωση τόσο του σχηματισμού αποθήκευσης, όσο και των υλικών των γεωτρήσεων εισπίεσης του CO₂ στο σχηματισμό αποθήκευσης [22].

Η παρουσία μη συμπτκνώσιμων προσμίξεων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του σημείου φυσαλίδας και τη μείωση της κρίσιμης θερμοκρασίας του ρεύματος, εξαιτίας των δικών τους χαμηλών κρίσιμων θερμοκρασιών. Συνεπώς, απαιτείται η εφαρμογή υψηλότερων τιμών πίεσης ρεύματος στους αγωγούς μεταφοράς, ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός 2 φάσεων [22].

Είναι, σε γενικές γραμμές, σημαντικό να υπάρχει μονοφασική ροή του CO₂ μέσα στους αγωγούς και να αποφεύγονται οι απότομες μειώσεις της πίεσης. Αν συνυπάρχουν δύο φάσεις ταυτόχρονα (π.χ. υγρό και αέριο ή υπερκρίσιμο ρευστό και αέριο), δημιουργούνται προβλήματα στους συμπιεστές και στο σύνολο του συστήματος μεταφοράς [17]. Ιδιαίτερα, μικρές αλλαγές στην πίεση ή θερμοκρασία του CO₂ κοντά στο κρίσιμο σημείο, επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στην πυκνότητά του και μειώνουν δραματικά την ταχύτητα ροής του

ρευστού. Για αυτούς τους λόγους, στο σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να λαμβάνεται ένας μεγάλος δείκτης ασφάλειας, ειδικά σε ό,τι αφορά τις πιέσεις, ώστε να αποφεύγονται οι επιπλοκές.

Πριν τη μεταφορά, απομακρύνεται το περιεχόμενο νερό από το ρεύμα του CO₂ ώστε η περιεκτικότητά του να είναι κάτω από 50 ppm, διότι μπορεί να οδηγήσει, μαζί με το CO₂, στον σχηματισμό οξέων (ανθρακικό οξύ), ή σε συνδυασμό με θείο, θειικό οξύ, τα οποία μπορούν να διαβρώσουν τους αγωγούς. Επιπλέον υπό ορισμένες συνθήκες, μπορεί, επίσης, να σχηματιστούν υδρίτες (στερεόμορφοι κρύσταλλοι) και να φράξουν τον αγωγό.

Το H₂S είναι τοξικό ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις της τάξης των 200ppm (DYNAMIS CO₂ quality recommendations). Πιο αυστηρά όρια επιτρέπουν συγκεντρώσεις του έως 0.01% κατ' όγκο [25]. Η παρουσία του απαιτεί μεγάλη προσοχή κατά τη διέλευση του μέσα από αγωγούς, ιδιαίτερα κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Παρόλα αυτά, είναι δυνατή η ασφαλής αποθήκευση του μαζί με CO₂ (acidgas) και εφαρμόζεται σε πολλά ενεργά πεδία στην Αλμπέρτα στον Καναδά και στην βορειοανατολική Βρετανική Κολομβία. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αφυδάτωση είναι αναγκαία προς αποφυγή σχηματισμού θειικού οξέος, το οποίο είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό και μπορεί ακόμα να οδηγήσει και σε ρωγμάτωση των αγωγών.

Η παρουσία του CH₄ επηρεάζει την φαινόμενη επιφανειακή τάση του CO₂ και περιπλέκει την ακριβή πρόβλεψη της ροής του [17]. Επίσης το μεθάνιο, όπως το άζωτο (N₂) και το υδρογόνο (H₂), είναι μη συμπυκνώσιμες προσμίξεις με χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία, απαιτούν αυξημένη αντοχή σωληνώσεων και πρέπει να περιορίζονται σε συγκεντρώσεις κάτω από 4% κατ'όγκο.

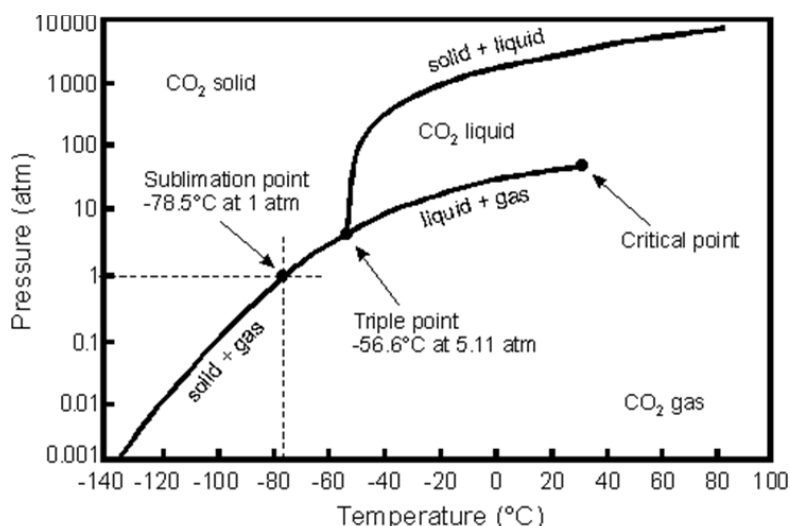
Παρόμοια, το O₂ είναι μία ακόμη μη συμπυκνώσιμη πρόσμιξη και απαιτεί επιπλέον συμπίεση κατά τη μεταφορά και αποθήκευση. Είναι ανεκτό μόνο σε πολύ μικρές ποσότητες (> 0.01% κ.ο.) διότι με την παρουσία του νερού μπορεί να αυξήσει τις καθοδικές αντιδράσεις, προκαλώντας λέπτυνση των τοιχωμάτων του αγωγού μέσω διάβρωσής τους. Σε εφαρμογές EOR μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση στα σημεία εισπίεσης, λόγω εξώθερμων αντιδράσεων με τους υδρογονάνθρακες. Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη αερόβιων βακτηριδίων στον σχηματισμό αποθήκευσης και στα σημεία εισπίεσης [25].

Το διοξείδιο του θείου (SO₂) και τα νιτρικά οξείδια (NO_x) μπορούν εύκολα να φτάσουν στις επιθυμητές συγκεντρώσεις των 100 ppm. Μάλιστα, διερευνάται και η αποθήκευση τους, μαζί με το CO₂, σε συγκέντρωση 5% κ.ο. (50,000 ppmv) όπου δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το κρίσιμο σημείο του CO₂ [25].

Τέλος, ο υδράργυρος, ο οποίος συναντάται συχνά, λόγω του ότι αποτελεί φυσικό υποπροϊόν της διαδικασίας καύσης του άνθρακα, μπορεί να δημιουργήσει λειτουργικά θέματα κατά την εισπίεση, καθώς και επιπτώσεις στην αποθήκευση.

Όπως αναφέρθηκε, *ο πιο αποδοτικός τρόπος μεταφοράς του CO₂ είναι όταν αυτό βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση*. Τα υπερκρίσιμα ρευστά αποτελούν αέρια των οποίων η αέρια φάση κάτω από τόσο υψηλές πιέσεις αποκτούν πυκνότητες αντίστοιχες των υγρών φάσεων τους. Δεδομένης αυτής της υψηλής πυκνότητας αλλά και της ροής που έχουν τελικά ως αέρια, τα καθιστούν κατάλληλα για μεταφορά μέσω αγωγών. Περαιτέρω αύξηση της πίεσης συντελεί σε μεγαλύτερη συμπίεση του ρευστού.

Το κρίσιμο σημείο πλέον του οποίου το CO₂ βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση, είναι σε **πίεση 1.070 psi (ή 73,8 bar) και θερμοκρασία 88°F (ή 31,1°C)**. Γενικά η μεταφορά του γίνεται σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που κυμαίνονται μεταξύ 55°F ως 110°F και 1.250 psi ως 2.200psi [11], διότι στις ήδη υπάρχουσες βιομηχανικές εφαρμογές μεταφοράς του διοξειδίου του άνθρακα με αγωγούς, προτιμάται να χρησιμοποιούνται πιέσεις κατά την είσοδο του ρευστού στους αγωγούς σε τιμές πίεσης μεγαλύτερες του κρίσιμου σημείου, ώστε να διατηρείται το ρευστό σε υπερκρίσιμη κατάσταση καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής μεταφοράς. Το ανώτατο όριο της πίεσης τίθεται, κυρίως, για οικονομικούς λόγους και το κατώτατο από την θερμοδυναμική συμπεριφορά του CO₂, ώστε αυτό να παραμένει στην υπερκρίσιμη φάση. Από την άλλη, το ανώτατο θερμοκρασιακό όριο καθορίζεται από τη θερμοκρασία που προσδίδει ο σταθμός συμπίεσης του ρεύματος CO₂ και τα θερμοκρασιακά όρια του υλικού της εξωτερικής επικάλυψης των αγωγών. Το κατώτατο ρυθμίζεται από την θερμοκρασία του εδάφους τον χειμώνα.



Pressure-Temperature phase diagram for CO₂.



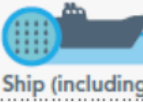
Σχήμα 2.4 : Διάγραμμα φάσεων του CO₂.

Στην περίπτωση των πλοίων πραγματοποιείται μεταφορά του CO₂ σε υγρή φάση. Επίσης, είναι σημαντικό να διατηρούνται σχετικά χαμηλές πιέσεις εντός αυτών. Από διαγράμματα φάσεων του CO₂, προκύπτει ότι είναι λογικό για να διατηρηθούν χαμηλές πιέσεις, να πρέπει να διατηρηθούν θερμοκρασίες κάτω του μηδενός (της τάξης των -20° C). Ωστόσο, τόσο η πίεση όσο και η θερμοκρασία που τελικά θα εφαρμοστεί, προκειμένου να βρίσκεται το CO₂ σε υγρή φάση, εξαρτάται και από τον όγκο του CO₂ που πρόκειται να μεταφερθεί.

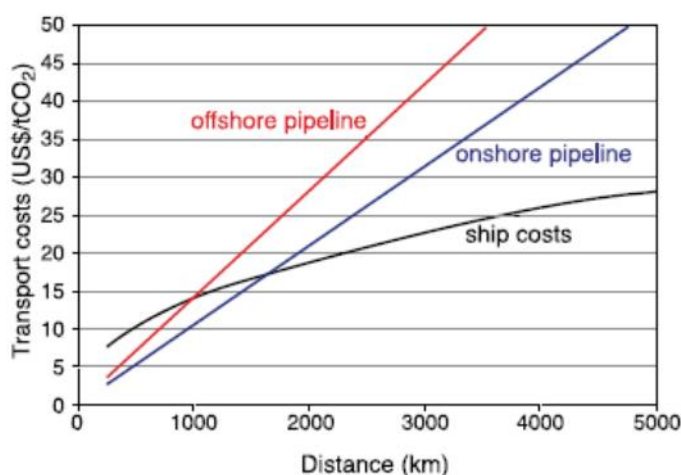
2.2.3 Κόστος μεταφοράς

Το κόστος μεταφοράς του CO₂ εξαρτάται από τον τρόπο μεταφοράς, την απόσταση και από τον όγκο που μεταφέρεται. Οι δύο τρόποι μεταφοράς (αγωγοί onshore και offshore, πλοία) μπορούν να συνδυαστούν κατά την κατασκευή ενός συστήματος μεταφοράς με πολλούς τρόπους (μεταφορά από μια πηγή σε έναν χώρο αποθήκευσης ως και μεταφορά από πολλές πηγές με δίκτυα μεταφοράς σε διαφορετικούς χώρους αποθήκευσης). Επομένως, σχηματίζονται, πιθανά δίκτυα μεταφορών ποικίλων αποστάσεων για τα οποία το κόστος υπολογίζεται ανά τόνο μεταφερόμενου CO₂.

Πίνακας 2.3 : Εκτιμήσεις κόστους δικτύων μεταφοράς 20 Mtpa (Million tonnes per annum) σε €/τόννο CO₂ [23].

Spine Distance km	180	500	750	1500
 Onshore pipeline	1.5	3.7	5.3	n. a.
 Offshore pipeline	3.4	6.0	8.2	16.3
 Ship (including liquefaction)	11.1	12.2	13.2	16.1

Μια συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών τρόπων μεταφοράς του CO₂, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 σε σχέση με την απόσταση που πρόκειται αυτό να μεταφερθεί, χρησιμοποιώντας ως περίπτωση αναφοράς τη μεταφορά 6 Mt CO₂/έτος. Βάσει αυτού προκύπτει ότι η μεταφορά με χρήση πλοίου είναι συμφέρουσα όταν η απόσταση μεταφοράς υπερβαίνει περίπου τα 700 χλμ και οι ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα που πρόκειται να μεταφερθούν είναι σχετικά μικρές, σε σχέση με τη μεταφορά με υποθαλάσσιους αγωγούς. Σε σχέση με τους χερσαίους αγωγούς αυτό διαφοροποιείται στα 1.500 χλμ περίπου. Σχετικά με τη χρήση χερσαίων έναντι υποθαλάσσιων αγωγών το σημείο στο οποίο γίνεται οικονομικότερη η χρήση χερσαίων είναι αρκετά χαμηλότερα και περίπου τα 300 χλμ.



Σχήμα 2.5 : Κόστος μεταφοράς CO₂ με χρήση χερσαίων, υποθαλάσσιων αγωγών και δεξαμενόπλοιων σε συνάρτηση της απόστασης για τη μεταφορά 6 Mt CO₂/έτος [17].

2.3 Αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς

Η δέσμευση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα (Carbon dioxide Capture and Storage (CCS)) σε γεωλογικούς σχηματισμούς αποτελεί όπως προαναφέρθηκε, μια μεθοδολογία κατά την οποία πραγματοποιείται δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται από μεγάλες σταθερές πηγές ως καθαρό αέριο. Κατόπιν μεταφέρεται και εισπνέζεται μέσω γεωτρήσεων, σε συμπιεσμένη μορφή, σε κατάλληλους χώρους αποθήκευσης σε γεωλογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι αποτελούν κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου (oil and gas reservoirs), αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες μεγάλου βάθους (deep saline aquifers) και μη εκμεταλλεύσιμα στρώματα γαιάνθρακα μεγάλου βάθους (deep unminable coal seams). Σύμφωνα με τη μελέτη του *Intergovernmental Panel on Climate Change (2005)*, τα ποσοστά του διοξειδίου του άνθρακα που μπορούν να κατακρατηθούν σε γεωλογικούς σχηματισμούς για τους οποίους έχει πραγματοποιηθεί κατάλληλη επιλογή και διαχείριση, είναι πολύ πιθανό να ξεπεράσει το 99% για 100 χρόνια και πιθανό να ξεπεράσει το 99% για πάνω από 1000 χρόνια.

2.3.1 Χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών αποθήκευσης CO₂

Ως γεωλογικοί σχηματισμοί που είναι κατάλληλοι για αποθήκευση CO₂, νοούνται οι σχηματισμοί οι οποίοι φέρουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- επαρκή χωρητικότητα
- εισπνεσιμότητα
- υπερκείμενο στρώμα ικανό να συγκρατήσει την εισπνεζόμενη μάζα.

Τα στρώματα των σχηματισμών όπου πρόκειται να αποθηκευτεί το CO₂ πρέπει να είναι επαρκούς πάχους και πορώδους. Επίσης, πρέπει να φέρουν και ελάχιστες τιμές διαπερατότητας ώστε να είναι δυνατή η εισπνεση. Συνήθως το πορώδες μειώνεται συναρτήσει του βάθους λόγω της συμπίεσης που δέχεται ο σχηματισμός από τα υπερκείμενα στρώματα. Ο σχηματισμός πρέπει να καλύπτεται από αδιαπέρατα στρώματα (όπως πχ. στρώματα αργίλου ή ανυδριτών) ώστε να εμποδίζεται η μετανάστευση του CO₂ προς τους υπερκείμενους πιο ρηχούς σχηματισμούς και τελικά στην επιφάνεια. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι μόνο οι ψαμμίτες και τα ανθρακικά πετρώματα διαθέτουν το απαιτούμενο πορώδες ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή χωρητικότητα και οι απαιτούμενες τιμές διαπερατότητας ώστε να επιτυγχάνεται η εισπνεσιμότητα. Κρυσταλλικά πετρώματα, μεταμορφωσιγενή και ηφαιστειογενή, όπως για παράδειγμα,

γρανίτης και βασάλτες βάσει των παραπάνω προϋποθέσεων κρίνονται, συνήθως, ακατάλληλοι χώροι αποθήκευσης CO₂ [9].

Ως τέτοιοι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται συνήθως οι σχηματισμοί που βρίσκονται εντός ιζηματογενών λεκανών καθώς συνήθως αυτοί επιδεικνύουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

Επιπλέον κριτήρια για την καταλληλότητα μιας ιζηματογενούς λεκάνης ως προς τη δυνατότητα αποθήκευσης CO₂, σε γεωλογικούς σχηματισμούς εντός αυτής, περιλαμβάνονται και τα παρακάτω τα οποία σχετίζονται τόσο με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης όσο και με την περιοχή και την ανάπτυξη γύρω απ' αυτή.

- ο Χαρακτηριστικά της λεκάνης (τεκτονική δραστηριότητα, τύπος ιζηματογενών σχηματισμών, γεωθερμικές και υδροδυναμικές συνθήκες)
- ο Φυσικοί πόροι εντός της λεκάνης (υδρογονάνθρακες, γαιάνθρακας, αλμυρό νερό)
- ο Βαθμός ανάπτυξης της βιομηχανίας στην περιοχή και βασικές υποδομές
- ο Κοινωνικά ζητήματα, όπως επίπεδο ανάπτυξης, οικονομία, περιβαλλοντικές ανησυχίες, δημόσια εκπαίδευση και στάση της κοινής γνώμης.

Η θέση της ιζηματογενούς λεκάνης πάνω σε μια ηπειρωτική πλάκα είναι πολύ σημαντική. Οι περιοχές που βρίσκονται στο εσωτερικό του ηπειρωτικού μέρους των πλακών ή στα όρια σταθερών λιθοσφαιρικών πλακών, είναι περισσότερο κατάλληλες καθώς παρέχουν ένα πιο σταθερό γεωλογικό περιβάλλον κυρίως από άποψη δομής. Τέτοιες δομές υπάρχουν στο εσωτερικό όλων σχεδόν των ηπείρων καθώς και γύρω από τον Ατλαντικό, Αρκτικό και Ινδικό ωκεανό. Ακόμη λεκάνες, οι οποίες, βρίσκονται κοντά σε ορεινές περιοχές και έχουν δημιουργηθεί από σύγκρουση λιθοσφαιρικών πλακών είναι επίσης περιοχές με ενδιαφέρον για αποθήκευση CO₂. Τέτοια παραδείγματα συναντώνται στις περιοχές κοντά στα Βραχώδη Όρη, τα Απαλάχια και τις Άνδεις στην Αμερική, στα βόρεια των Άλπεων και των Καρπαθίων και στα δυτικά των Ουραλίων στην Ευρώπη, και στα βουνά Ζαγκρός και την οροσειρά των Ιμαλαίων στην Ασία. Τεκτονικά ενεργές ζώνες (π.χ. γύρω από τον Ειρηνικό και στην βόρεια Μεσόγειο) απαιτούν ιδιαίτερη μελέτη πριν επιλεγθούν για ένα έργο αποθήκευσης, καθώς εκτιμάται ότι ο κίνδυνος διαρροής είναι μεγάλος. Λεκάνες κοντά σε ζώνες καταβύθισης στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών είναι πολύ πιθανό να πτυχώνονται και να ρωγματώνονται, δημιουργώντας ένα πολύ ασταθές και αβέβαιο περιβάλλον για αποθήκευση. Παρόλα αυτά, κάθε περιοχή θα πρέπει να εξετάζεται ως

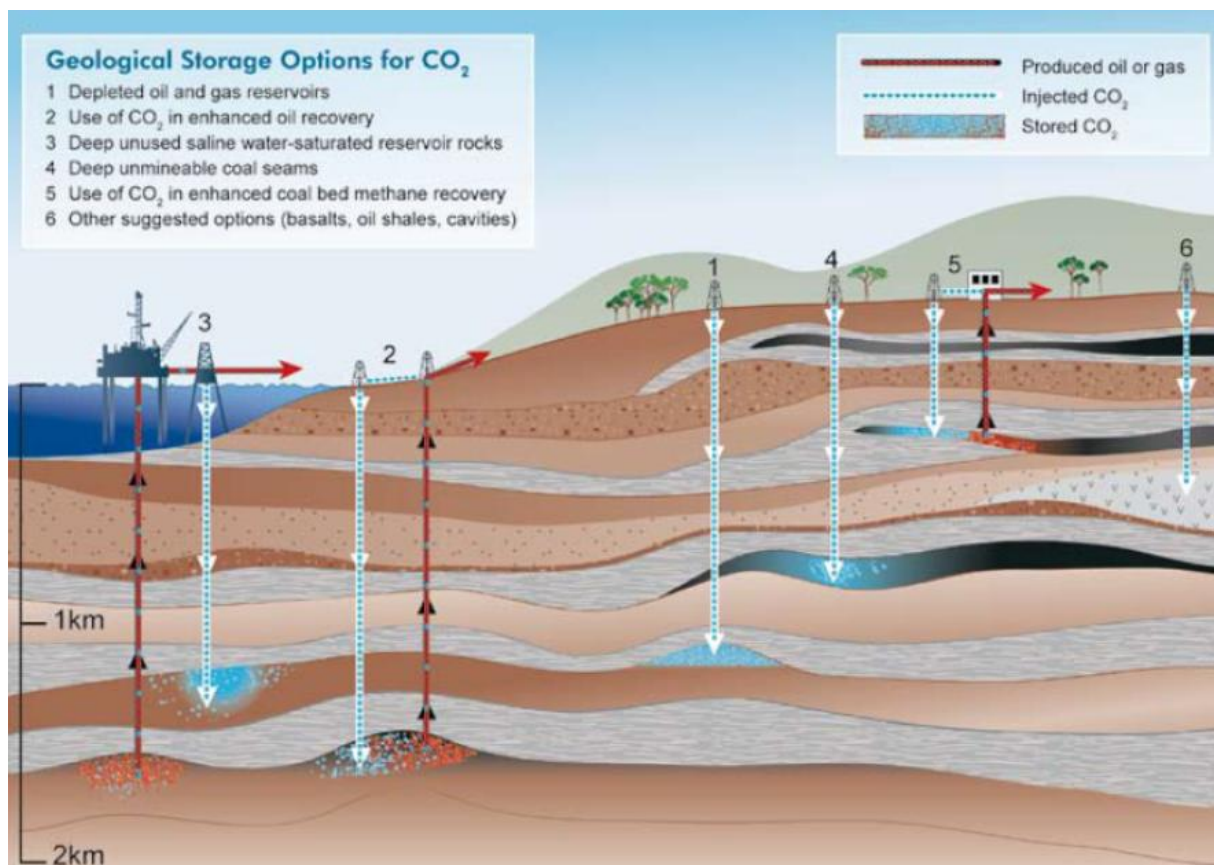
μοναδική περίπτωση. Μερικοί δείκτες ακαταλληλότητας που πιθανότερα να αποκλείσουν την επιλογή μιας περιοχής είναι, μια ιζηματογενής λεκάνη μικρού πάχους (<1000 m), ένας ταμιευτήρας χωρίς επαρκές κάλυμμα ώστε να συγκρατήσει το CO₂, να υπάρχουν πολλές ρωγμές και ρήγματα και επιφάνειες ασυνέχειας, να έχουν υποστεί σε μεγάλο βαθμό διαγένεση ή να αποτελούν ταμιευτήρες υπό μεγάλη πίεση [17].

2.3.2 Εναλλακτικές επιλογές γεωλογικών σχηματισμών για την αποθήκευση CO₂

Εντός των λεκανών αυτών λοιπόν, οι πιθανοί σχηματισμοί που είναι κατάλληλοι για την υπεδαφική αποθήκευση του CO₂ είναι:

- ❖ Εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου (Depleted oil and gas reservoirs)
- ❖ Χρήση του CO₂ στην Επαύξηση Απόληψης Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου (Enhanced Oil Recovery (EOR), Enhanced Gas Recovery (EGR))
- ❖ Σχηματισμοί μεγάλου βάθους κορεσμένοι σε αλατούχο νερό (Deep unused saline water- saturated reservoir rocks)
- ❖ Μη εκμεταλλεύσιμα στρώματα γαιάνθρακα μεγάλου βάθους (Deep unminable coal seams)
- ❖ Χρήση του CO₂ για την Επαύξηση Απόληψης Μεθανίου (Enhanced coalbed methane recovery, ECBM))
- ❖ Άλλες δυνατότητες (βασάλτες, κοιλότητες, αργιλικοί σχιστόλιθοι πλούσιοι σε οργανική ύλη)

Οι παραπάνω επιλογές και δυνατότητες απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.1



Εικόνα 2.1: Εναλλακτικές λύσεις για την αποθήκευση του CO₂ σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς [17].

Αναφορικά με τις εναλλακτικές λύσεις που δίνονται παραπάνω, καταγράφονται τα εξής σημαντικά στοιχεία και χαρακτηριστικά:

Εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου (Depleted oil and gas reservoirs)

Τα εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου βρίσκονται πολύ ψηλά στη λίστα προτίμησης των υποψήφιων περιοχών για αποθήκευση CO₂. Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους:

- Το πετρέλαιο ή το αέριο ήταν παγιδευμένα σε έναν ταμιευτήρα ο οποίος δεν τους επέτρεπε για πολλά εκατομμύρια χρόνια συνήθως, να δραπετεύσουν, γεγονός που αποδεικνύει ότι η δομή και η στρωματογραφία της περιοχής προσφέρουν έναν ασφαλή χώρο αποθήκευσης.
- Οι γεωλογικές δομές της περιοχής και οι φυσικές της ιδιότητες έχουν μελετηθεί και εκτιμηθεί εκτενώς κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης των υδρογονανθράκων.

- Έχουν αναπτυχθεί πολλά υπολογιστικά μοντέλα ώστε να προβλέπεται η μετακίνηση, η συμπεριφορά και η παγίδευση των υδρογονανθράκων, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν και στην περίπτωση της αποθήκευσης CO₂.
- Κάποιες από τις υποδομές και τις γεωτρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα και στο έργο της αποθήκευσης, μειώνοντας το χρόνο εγκατάστασης και το κόστος του έργου.
- Η εισπίεση CO₂ σε σχεδόν εξαντλημένα κοιτάσματα μπορεί να βοηθήσει στην επαύξηση της απόληψης πετρελαίου ή φυσικού αερίου και να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής τους.

Πρέπει, όμως, παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτές οι τοποθεσίες να εφιστάται η προσοχή στην ακεραιότητα (integrity) των γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται καθώς, κατά την όρυξή τους ή σωλήνωσή τους να μην είχε ληφθεί υπόψη ότι θα χρησιμοποιούνταν για εισπίεση CO₂. Συνεπώς, κάθε γεώτρηση πρέπει να αξιολογείται πριν από οποιαδήποτε έναρξη των εργασιών. Σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις, επειδή ακόμα και ο εντοπισμός όλων των γεωτρήσεων είναι δύσκολος, πρέπει να ελέγχεται η ακεραιότητα του αδιαπέρατου στεγανού καλύμματος (caprock) με δοκιμές πίεσης ή χρήση ανιχνευτών.

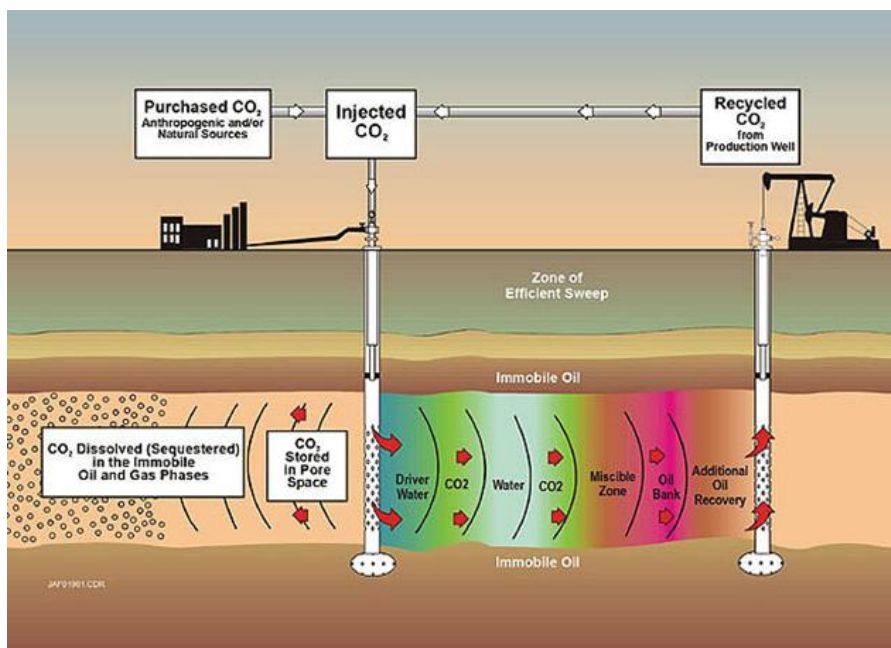
Πρόσθετο μειονέκτημα είναι ότι, πιθανά, δεν θα είναι εκμεταλλεύσιμο το σύνολο της χωρητικότητας του ταμιευτήρα διότι πρέπει να αποφευχθούν τιμές πίεσης που μπορεί να βλάψουν την ακεραιότητά του. Αυτό δυσχεραίνει αρκετά την αποδοτικότητα, ειδικά σε ταμιευτήρες χαμηλού βάθους (περίπου 800 μέτρων), καθώς ο συνδυασμός σχετικά μικρής χωρητικότητας και μεγάλου όγκου CO₂ προς αποθήκευση δυσχεραίνεται ακόμη περισσότερο από το γεγονός ότι σε τέτοια βάθη θα βρίσκεται ακόμα σε αέρια φάση.

Χρήση του CO₂ στην Επαύξηση Απόληψης Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου (Enhanced Oil Recovery (EOR), Enhanced Gas Recovery (EGR))

Η επαύξηση της απόληψης πετρελαίου μέσω της εισπίεσης CO₂ στον ταμιευτήρα, μπορεί να επιφέρει κέρδη από την οριακή παραγωγή πετρελαίου. Από το σύνολο της ποσότητας πετρελαίου που αρχικά υπάρχει στον ταμιευτήρα, εκτιμάται ότι το 5-40 % εξάγεται κατά την πρωτογενή παραγωγή, δηλαδή κατά το διάστημα όπου η παραγωγή βασίζεται στην φυσική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο σύστημα (εκτόνωση ελαφρών υδρογονανθράκων, ώθηση ενεργού υδροφόρου ορίζοντα κλπ). Ένα ποσοστό της τάξης του

10-20% βασίζεται στη δευτερογενή παραγωγή μέσω κατάκλυσης του σχηματισμού με νερό (water flooding) ή εισπίεση αερίων. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται και τριτογενής παραγωγή, η οποία είναι μια επέκταση της δευτερογενούς, αλλά με πιο ανεπτυγμένες μεθόδους μέσω των οποίων παράγεται ένα ποσοστό 7-23% του συνόλου. Μία από αυτές τις μεθόδους είναι και η εισπίεση CO₂ και κατάκλυση του ταμιευτήρα. Η μετατόπιση του πετρελαίου από την εισπίεση CO₂, βασίζεται στη συμπεριφορά των φάσεων των μιγμάτων του CO₂ και του αργού πετρελαίου, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την πίεση του ταμιευτήρα, καθώς και από τη σύνθεση των συστατικών του αργού πετρελαίου. Γι' αυτό το λόγο εφαρμόζονται δύο κύριες μέθοδοι EOR με χρήση CO₂:

A) *Εφαρμογή EOR υπό συνθήκες ανάμειξης*: όπου έχουμε συνεχιζόμενη εισπίεση CO₂ ή εναλλασσόμενη εισπίεση ποσοτήτων νερού και CO₂ (Water Alternated Gas- WAG). Με τη δεύτερη παραλλαγή της μεθόδου επιτυγχάνεται καλύτερη σταθεροποίηση και έλεγχος του μετώπου εισπίεσης [1]. Σ' αυτή την μέθοδο, η πίεση στον ταμιευτήρα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να προσεγγίζει την πίεση αναμιξιμότητας του πετρελαίου και του CO₂ (~1500psi) ώστε να δημιουργηθεί μια ενιαία φάση και να προσδώσει στο πετρέλαιο ιδιότητες που ευνοούν την άντληση του (χαμηλό ιξώδες <12cp, αυξημένη κινητικότητα, χαμηλή επιφανειακή τάση) και μειώνουν τον κορεσμό του υπολειμματικού πετρελαίου (residual oil saturation) στους πόρους του ταμιευτήρα. Για να καθίσταται εφαρμόσιμη αυτή η μέθοδος πρέπει, όπως αναφέρθηκε, οι τιμές της πίεσης του ταμιευτήρα να είναι περί τα 1500 psi και αναλόγως το βάθος του (για μια τυπική βαθμίδα πίεσης 0.5psi/ft) να είναι τουλάχιστον 3000ft (~915m). Επιπλέον, θα ήταν θεμιτό να μην υπάρχουν ρωγματώσεις, ώστε το CO₂ να μην μπορεί να παρακάμψει περιοχές όπου υπάρχει πετρέλαιο και μείνει ελλιπής η σάρωση. Τέλος, το πάχος του ταμιευτήρα πρέπει να είναι χαμηλό (<30 m) ώστε να μη συσσωρεύεται το CO₂ στα υψηλότερα στρώματα του σχηματισμού, καθώς και να είναι κεκλιμένος ώστε να δημιουργείται ένα ευσταθές μέτωπο μετατόπισης.



Εικόνα 2.2 Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής επαύξησης απόληψης πετρελαίου με εισπίεση ρεύματος CO₂ [102].

Β) Εφαρμογή EOR υπό συνθήκες μη ανάμειξης ή διαφορετικά Κυκλική Διέγερση με Διοξείδιο του Ανθρακα (Cyclic Carbon Dioxide Stimulation): Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο πρώτα το CO₂ εισπνέζεται μέσω μιας παραγωγικής γεώτρησης για μερικές ώρες ως μερικές μέρες και έπειτα η γεώτρηση κλείνει για να επιτευχθεί επαρκής διάλυση του CO₂ στο πετρέλαιο. Έπειτα από μερικές εβδομάδες ξαναρχίζει η παραγωγή, εφόσον η κινητικότητα του πετρελαίου έχει αυξηθεί με τους εξής μηχανισμούς: 1) διόγκωση της πετρελαϊκής φάσης μέσω του κορεσμού της με το CO₂, 2) μείωση του ιξώδους με τη διάλυση του CO₂, 3) διαχωρισμός ελαφρότερων υδρογονανθράκων από την πετρελαϊκή φάση και μετέπειτα εκτοπισμός της από αυτούς.

Η εφαρμογή της μεθόδου είναι αποτελεσματική σε κοιτάσματα με υψηλό κορεσμό σε πετρέλαιο, υψηλή τιμή ιξώδους και για θερμοκρασίες και πιέσεις ταμειυτήρα που να εμποδίζουν την ανάμειξη πετρελαίου και CO₂. Επίσης το βάθος του ταμειυτήρα πρέπει και εδώ να είναι τουλάχιστον κοντά στα 2000ft (~600m) και τα κοιτάσματα πρέπει να είναι μεγάλης πυκνότητας (12-25 API). Οι σημαντικότερες λειτουργικές παράμετροι είναι ο όγκος του εισπνέζόμενου CO₂ για κάθε κύκλο, ο αριθμός των κύκλων εισπίεσης και η βαθμίδα πίεσης του ταμειυτήρα κατά την διάρκεια της φάσης παραγωγής [1].

Και στους δύο τύπους EOR συνοψίζοντας, είναι δυνατό να τεθούν ορισμένα κριτήρια καταλληλότητας εφαρμογής τους. Πρωτίστως, είναι προτιμότεροι ταμιευτήρες μικρού πάχους (<20 m το βέλτιστο), με μεγάλη κλίση, ομογενείς σχηματισμούς και κάθετη διαπερατότητα. Για τους οριζόντιους ταμιευτήρες, η απουσία ροής νερού, μεγάλου αέριου καλύμματος και ρωγματώσεων επίσης προτιμάται, ενώ το πάχος του ταμιευτήρα και η διαπερατότητα δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικά.

Σε μερικές περιπτώσεις, βέβαια, είναι καλό να σημειωθεί πως η ανομοιογένεια ενός ταμιευτήρα μπορεί να έχει θετική επίδραση στην αποθήκευση του CO₂ αλλά και στην απόληψη του πετρελαίου. Αυτό συμβαίνει διότι το CO₂ ως λιγότερο πυκνό από το πετρέλαιο ή το νερό στον ταμιευτήρα, έχει την τάση να κινείται προς την οροφή του ταμιευτήρα ιδιαίτερα αν αυτός είναι ομογενής και περατός. Συνεπώς, η ανομοιογένεια εμποδίζει την μετακίνηση του CO₂ προς τα επάνω και το ωθεί στο να εξαπλωθεί πλευρικά ώστε να αναμιχθεί με την πετρελαϊκή φάση ή πιθανώς να αποθηκευτεί.

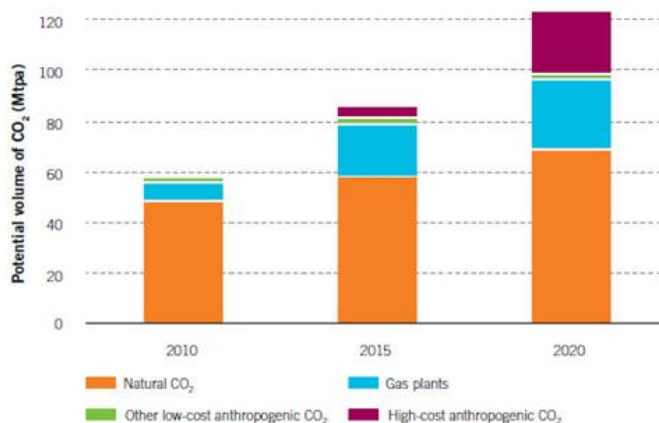
Αξιολογώντας την μέθοδο αυτή η οποία πλέον είναι δοκιμασμένη για πάνω από 30 χρόνια στη βιομηχανία του πετρελαίου, συμπεραίνεται ότι είναι εφαρμόσιμη εφόσον το κόστος της αποθήκευσης μπορεί να μειωθεί από την παραγωγή των επιπλέον ποσοτήτων πετρελαίου. Σαφώς, όμως, έχει ορισμένα μειονεκτήματα:

- Μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μια επιλογή αποθηκευτικού χώρου με περιορισμένη χωρητικότητα και γεωγραφική κατανομή.
- Η χωρητικότητα των εξαντλημένων πεδίων εξόρυξης πετρελαίου κυρίως (και φυσικού αερίου όπως θα δούμε παρακάτω) εκτιμάται ότι είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με άλλα πιθανά μέσα αποθήκευσης, αλλά την περιορίζει ιδιαίτερα το γεγονός ότι το CO₂ αφού εισπνεστεί, παράγεται μαζί με το πετρέλαιο, διαχωρίζεται από αυτό και εισπνέζεται πάλι ώστε να ανακυκλοφορήσει. Αυτή η «ανακύκλωση» του εισπνεζόμενου CO₂, οδηγεί στη σταδιακή μείωση των αναγκών ανεφοδιασμού του έργου με νέο CO₂. Έμπρακτο παράδειγμα αποτελεί το έργο EOR στο Weyburn του Καναδά, όπου από τις αρχές του 2011 η εισπνοή γίνεται με μισή ποσότητα ανακυκλοφορούμενου CO₂ και με άλλη μισή προερχόμενη από ανεφοδιασμό νέων ποσοτήτων CO₂ [102]. Όπου δεν εφαρμόζεται ανακυκλοφορία (π.χ. πεδίο Joffe, Αλμπέρτα, Καναδάς) περίπου 30-40% της ποσότητας του εισπνεζόμενου CO₂ παραμένει αποθηκευμένο. Όταν πλέον

ένα πεδίο EOR δεν παράγει ικανοποιητικές ποσότητες πετρελαίου, δύναται να μετατραπεί εξολοκλήρου σε ταμειυτήρα αποθήκευσης CO₂. Αυτό μπορεί να συμβεί σε διάστημα 15-35 χρόνων, έχοντας ως σημείο αναφοράς τα προαναφερόμενα έργα.

- Ένα επιπλέον εμπόδιο, ίσως, ανακύπτει από το γεωγραφικό συσχετισμό πηγών CO₂ με τα πεδία εφαρμογής EOR. Όσο μεγαλύτερες είναι οι αποστάσεις, τόσο πιο μεγάλο το κόστος του εγχειρήματος μεταφοράς του CO₂ ή τεχνικά δύσκολο ως ακατόρθωτο σε ορισμένες περιπτώσεις. Αυτό βέβαια είναι ένα πρόβλημα που μπορεί να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε γεωλογικό χώρο αποθήκευσης. Όμως σε συνδυασμό με το ζήτημα της χωρητικότητας που περιγράφηκε, καθιστά σαφές ότι μια συνεχής, ίσως και αυξανόμενη παραγωγή πηγή CO₂ (πχ ηλεκτροπαραγωγική βιομηχανία) αργά ή γρήγορα θα χρειαστεί να τροφοδοτήσει και άλλου είδους γεωλογικούς σχηματισμούς για να αποθηκεύσει τις ποσότητες CO₂ που δεσμεύονται.

Τέλος, περίπου το 80% του CO₂ που χρησιμοποιείται σε έργα EOR προέρχεται μέχρι σήμερα από φυσικές πηγές και όχι από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, γεγονός που δε συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση του στην ατμόσφαιρα. Χαρακτηριστικά, μια έρευνα στις Ηνωμένες Πολιτείες έδειξε ότι το 2010 η προμήθεια CO₂ για EOR, το οποίο προέρχεται από φυσικές πηγές άγγιξε το 85% και από διαδικασίες επεξεργασίας φυσικού αερίου μόλις το 13%. Σύμφωνα με την ίδια έρευνα υπολογίζεται ότι η δέσμευση CO₂ από μονάδες επεξεργασίας υδρογονανθράκων θα ανέρχεται σε ποσοστό περίπου 36% μεταξύ του 2010 και 2015 [68]. Ενδεικτικό των μεγεθών είναι το Σχήμα 2.6, που παρουσιάζει τις αναλογίες των πηγών που αναμένεται να τροφοδοτήσουν πεδία EOR για αυτό το διάστημα.



Σχήμα 2.6: Αναλογίες των πηγών που αναμένεται να τροφοδοτήσουν πεδία EOR το 2015 και 2020 [68].

Αυτό αποδεικνύει και το ότι η μέθοδος εφαρμόζεται, κυρίως, για οικονομικούς λόγους και όχι για λόγους καλύτερης διαχείρισης των εκπομπών CO₂ και προστασίας του περιβάλλοντος. Αυτό το γεγονός δικαιολογείται, εν μέρει, λόγω του υψηλού κόστους δέσμευσης CO₂ το οποίο μετακυλύεται στο κόστος προμήθειας του για εφαρμογές EOR.

Σε αντιδιαστολή με τα παραπάνω μειονεκτήματα, περίπου 90 έργα EOR βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία παγκοσμίως, φέρνοντας τη μέθοδο στην κορυφή σε θέμα ποσοτήτων CO₂ που αποθηκεύονται. Η πλειοψηφία αυτών των έργων βρίσκονται στις ΗΠΑ (Permian Basin, Texas), όπου περί τους 30 Mt CO₂/έτος μεταφέρονται μέσα σε ένα σύστημα αγωγών 3000 χλμ και εισπνέζονται στο υπέδαφος. Μεγάλο μειονέκτημα αυτών των έργων αποτελεί το γεγονός ότι γίνεται εισπνέση CO₂ το οποίο προέρχεται από τους φυσικούς ταμιευτήρες στο Κολοράντο και το Νέο Μεξικό. Επίσης, πληθώρα εφαρμογών απαντώνται και σε Καναδά, Κίνα, Βραζιλία, Ουγγαρία, Τρινιδάδ, Τουρκία κλπ. Η επιχείρηση EOR του Weyburn στην περιοχή Saskatchewan, του Καναδά, η οποία ήδη αναφέρθηκε, αποτελεί χαρακτηριστική εφαρμογή ενισχυμένης απόληψης πετρελαίου με εισπνέση CO₂.

Επαύξηση απόληψης φυσικού αερίου

Γενικά ένας ταμιευτήρας φυσικού αερίου ή πετρελαίου θεωρείται εξαντλημένος όταν η πίεση του πέσει κάτω από ένα οικονομικά βιώσιμο επίπεδο (περίπου 30 bar ή 435 psi για φυσικό αέριο). Η παραγωγή φυσικού αερίου μπορεί να φτάσει και ποσοστά κοντά στο 90% των αποθεμάτων πριν το πεδίο εξόρυξης θεωρηθεί εξαντλημένο. Παρόλα αυτά, μπορεί με εισπνέση CO₂ να επανασυμπίεστεί ο ταμιευτήρας επαυξάνοντας με αυτό τον

τρόπο την απόληψη του αερίου και αποθηκεύοντας παράλληλα μέρος του CO₂. Η απόληψη, βέβαια, του υπολειπόμενου αερίου θα είναι περιορισμένη, αλλά πρέπει να αποφέρει αρκετό κέρδος ώστε να καλύπτεται το κόστος της αποθήκευσης.

Δεν υπάρχει βιομηχανική εφαρμογή κυρίως λόγω του φόβου ότι η ποιότητα του αερίου που θα παράγεται θα είναι χαμηλή λόγω της ανάμειξης του με το CO₂. Εντούτοις, αποτελεί μια ενδιαφέρουσα προοπτική καθότι η χωρητικότητα των πεδίων φυσικού αερίου είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των πεδίων πετρελαίου. Η συνολική παγκόσμια χωρητικότητα αποθήκευσης κυμαίνεται μεταξύ 513 και 1.503 GtCO₂. Ένα μέτρο σύγκρισης αποτελεί ο Πίνακας 2.4.

Πίνακας 2.4: Εκτίμηση χωρητικότητας αποθήκευσης CO₂ σε Gt για πεδία της Βόρειας Θάλασσας [17]

Χώρα	Εξαντλημένα πεδία εξόρυξης πετρελαίου	Εξαντλημένα πεδία εξόρυξης φυσικού αερίου
Δανία	0.1	0.4
Ολλανδία	0.0	0.8
Νορβηγία	3.1	7.2
Ηνωμένο Βασίλειο	2.6	4.9
Σύνολο	5.8	13.3

Σχηματισμοί κορεσμένοι σε αλατούχο νερό μεγάλου βάθους (Deep unused salt line water-saturate dreservoir rocks)

Οι αλατούχοι υδροφορείς είναι μεγάλου βάθους ιζηματογενή πετρώματα κορεσμένα συνήθως σε νερό το οποίο συνυπάρχει (formation waters) ή αλατούχο νερό (brine), το οποίο περιέχει σε υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένα άλατα. Αυτοί οι σχηματισμοί είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι και περιέχουν μεγάλες ποσότητες νερού που δεν είναι όμως ούτε πόσιμο ούτε κατάλληλο για γεωργική χρήση. Οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες χρησιμοποιούνται από τις τοπικές χημικές βιομηχανίες, και το νερό, το οποίο είναι παγιδευμένο στους σχηματισμούς και που μπορεί να είναι ποικίλης αλατότητας, χρησιμοποιείται σε spa ή ακόμα και για την παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας. Λόγω μάλιστα της αυξανόμενης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας έχει

προταθεί ο συνδυασμός της παραγωγής της με παράλληλη αποθήκευση CO₂. Όμως οι περιοχές με καλή προοπτική για την εκμετάλλευση της γεωθερμίας, δεν είναι οι πλέον κατάλληλες λόγω της συχνής εμφάνισης ρωγματώσεων και της απότομης υψηλής αύξησης των θερμοκρασιών σε σχέση με το βάθος [17].

Η εισπίεση σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες αποτελεί ουσιαστικά ένα πρόβλημα ροής πολλών ρευστών. Το CO₂ πρέπει να αποθηκεύεται σε σχηματισμούς όπου θα βρίσκεται σε τέτοιες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας ώστε να διατηρείται σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Η πυκνότητα του εισπιεζόμενου CO₂ θα είναι σαφώς υψηλότερη από αυτή που έχει στην αέρια μορφή του, αλλά πάντα μικρότερη από αυτή του νερού των σχηματισμών. Το ιξώδες του CO₂ θα είναι επίσης σημαντικά μικρότερο από αυτό του αλατούχου νερού (brine). Συνεπώς, για να υπάρξουν φαινόμενα μετανάστευσης μακριά από τη γεώτρηση εισπίεσης σ' έναν τέτοιο αποθηκευτικό χώρο, πρέπει το CO₂ να υπερνικήσει τις δυνάμεις βαρύτητας και να αναπτύξει μια δυσμενή σχέση κινητικότητας [13].

Αυτή η διαδικασία φέρει όμως, τα εξής μειονεκτήματα:

- Αυξημένες απαιτήσεις και διεργασίες κατά το στάδιο της επιλογής του τόπου αποθήκευσης, λόγω της σχετικής έλλειψης δεδομένων για τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.
- Έλλειψη πιστοποιημένων μεθόδων όσον αφορά την εξασφάλιση της καταλληλότητας του μέρους, της ακριβούς χωρητικότητάς του και της αντοχής του στο χρόνο.
- Δεν υπάρχει το οικονομικό κίνητρο, όπως για παράδειγμα στην επαύξηση απόληψης πετρελαίου ή αερίου.
- Το μέγεθος της αποθήκευσης (χωρητικότητα) περιορίζεται από την εισπιεσιμότητα του νερού και τον όγκο του υδροφόρου.

Παρόλα αυτά, οι βαθείς αλατούχοι υδροφόροι, εκτιμάται ότι παρέχουν τη μεγαλύτερη χωρητικότητα παγκοσμίως, λόγω του ότι είναι εξαιρετικά διαδεδομένοι. Λόγω της διάδοσής τους, λοιπόν, είναι πολύ πιθανό να βρίσκονται κοντά, γεωγραφικά, σε ένα σταθμό δέσμμευσης CO₂, δίνοντας την δυνατότητα περιορισμού του κόστους μεταφοράς του ρεύματος προς εισπίεση στο χώρο της αποθήκευσης.

Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των σχηματισμών τριών εκ των

μεγαλύτερων έργων αποθήκευσης σε βαθείς αλατούχους υδροφόρους.

Πίνακας 2.5: Ιδιότητες έργων αποθήκευσης σε βαθείς αλατούχους υδροφόρους σχηματισμούς [116].

Όνομα έργου	Πορώδες (%)	Διαπερατότητα (md)	Βάθος (m)	Πάχος σχηματισμού (m)	Λιθολογία καλύμματος	Πάχος καλύμματος (m)
Sleipner	37	5000	1000	250	Αργλικός σχιστόλιθος	75
Snohvit	13	450	2550	60	Αργλικός σχιστόλιθος	30
In Salah	17	5	1850	29	Mudstone	950

Εκτός από τα έργα στον Πίνακα 2.5, υπάρχουν επίσης παραπάνω από 40 έργα εισπίεσης CO₂ μαζί με H₂S (γνωστό ως acid gas λόγω της διαβρωτικής του ικανότητας όταν έρθει σε επαφή με το νερό) στον Καναδά σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου και σε βαθείς υδροφόρους ορίζοντες καθώς και πάνω από 20 στις ΗΠΑ. Αυτό το μίγμα αερίων προέρχεται από μονάδες επεξεργασίας φυσικού αερίου ώστε να πληρεί τις προϋποθέσεις της αγοράς τόσο στη μεταφορά όσο και στην πώλησή του. Υπολογίζεται ότι περίπου 3 MtCO₂ και 3 Mt H₂S έχουν εισπιαστεί στον Καναδά ως το 2007 [16].

Μη εκμεταλλεύσιμα στρώματα γαιάνθρακα μεγάλου βάθους (Deep unminable coal seams)

Τα στρώματα γαιάνθρακα από τη φύση τους είναι αρκετά ρωγματωμένα ώστε να καθίστανται περατά. Ανάμεσα σε αυτές τις ρωγματώσεις (cleats) η συνεκτική μήτρα του πετρώματος φέρει ένα πολύ μεγάλο αριθμό μικροπόρων, όπου μόρια αερίων τα οποία υπάρχουν στις ρωγματώσεις διαχέονται και προσροφώνται σ' αυτή. Αποτελεί, λοιπόν, φυσική ιδιότητα των γαιανθράκων η προσρόφηση πολλών διαφορετικών ειδών αερίων. Για παράδειγμα η προσρόφηση μεθανίου μπορεί να φτάσει και τιμές όγκου ως και 25 m³ (m³ σε συνθήκες 1 atm και 0°C) ανά τόνο γαιάνθρακα. Το CO₂ προσροφάται πιο εύκολα από το μεθάνιο με ογκομετρική αναλογία που διαφέρει, ανάλογα το είδος του γαιάνθρακα. Για «παλαιούς» γαιάνθρακες όπως ο ανθρακίτης, η αναλογία CO₂ : CH₄ προσεγγίζει το 1, ενώ για νεότερους, όπως ο λιγνίτης, μπορεί να φτάσει ως 10 ή και περισσότερο. Κατά την εισπίεση του, συνεπώς, το αέριο CO₂ ρέει μέσα στο σχηματισμό διαμέσου των ρωγματώσεων, διαχέεται μέσα στη μήτρα του πετρώματος και προσροφάται

από την επιφάνεια των μικροπόρων του αντικαθιστώντας και ελευθερώνοντας αέρια με μικρότερη συνάφεια προς το πέτρωμα (πχ. μεθάνιο).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η παγίδευση του CO₂ μελετάται για συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας των περιοχών κάτω από το κρίσιμο σημείο. Η προσρόφηση σταδιακά μετατρέπεται σε απορρόφηση και το CO₂ διαχέεται και διαλύεται μέσα στο γαιάνθρακα και τον «πλαστικοποιεί», δηλαδή τον μετατρέπει από ένα υαλώδες και εύθραυστο υλικό σε ένα υλικό με πλαστική δομή (coal softening). Η παρουσία του CO₂ έχει ως αποτέλεσμα η διαδικασία αυτή να γίνεται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις καθορισμένες, αν και οι τιμές της εξαρτώνται και από πολλούς άλλους παράγοντες (πχ. η περιεκτικότητα σε τέφρα, η περιβάλλουσα πίεση κλπ). Έχει διαπιστωθεί και περίπτωση πτώσης θερμοκρασίας μετατροπής από 400° C για πίεση 3 MPa σε τιμές μικρότερες από 30° C και πίεση 5.5 MPa [17].

Η πλαστικοποίηση των γαιανθράκων μπορεί να λειτουργήσει ανασταλτικά στην εισπίεση του CO₂ καθώς μειώνει τη διαπερατότητά τους, η οποία έχει καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία της αποθήκευσης. Υποστηρίζεται ότι οι τιμές της πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 millidarcy (μD) τόσο για μια επιτυχημένη εισπίεση, όσο και για την παραγωγή μεθανίου όπως θα αναφερθεί παρακάτω [9]. Όταν, λοιπόν, το CO₂ έρχεται σε επαφή με τα στρώματα των γαιανθράκων, αυτά διογκώνονται καθώς το αέριο προσροφάται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας και εισπιεσιμότητας κατά ίσως και δύο τάξεις μεγέθους. Αυτό το γεγονός, ίσως, αντιμετωπίζεται με την αύξηση των τιμών της πίεσης εισπίεσης. Όμως, η αντίδραση του CO₂ με το σχηματισμό ή και το νερό που περιέχει ο σχηματισμός, μπορεί να επιφέρει διάβρωση και κατακρήμνιση στερεών, και να επιδεινώσει την κατάσταση. Γενικά, για αυτούς τους λόγους είναι προτιμότερο να αποφεύγονται εξ αρχής οι χαμηλής ή οριακής διαπερατότητας γαιάνθρακες ώστε να αποφεύγονται οι αρνητικές επιπτώσεις των αντιδράσεων του CO₂ με αυτούς.

Σε γενικές γραμμές, η αποθήκευση CO₂ σε στρώματα γαιανθράκων είναι μια τεχνολογία η οποία βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Επιπλέον σε σχέση με την αποθήκευση στα υπόλοιπα γεωλογικά μέσα, φαίνεται να παρουσιάζει τη χαμηλότερη χωρητικότητα.

Χρήση του CO₂ για την Επαύξηση Απόληψης Μεθανίου (Enhanced coalbed methane recovery, ECBM))

Όπως αναφέρθηκε, εάν εισπνεστεί CO₂ σε ένα κοιτάσμα γαιανθράκων μπορεί να εκτοπίσει το μεθάνιο βοηθώντας με αυτό τον τρόπο στην απόληψή του. Τέτοιο επιτυχημένο παράδειγμα αποτελεί το πρόγραμμα Allison στην Αλμπέρτα του Καναδά. Η επαύξηση απόληψης μεθανίου με χρήση διοξειδίου του άνθρακα πιθανά μπορεί να φτάσει σε ποσοστά απόληψης του αερίου κοντά στο 90% έναντι του 50% έως εξάντλησης της πίεσης του ταμιευτήρα καθεαυτού.

Η διαπερατότητα του κοιτάσματος και εδώ είναι ένας από τους πολλούς παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή του τόπου αποθήκευσης. Γενικά η διαπερατότητα μπορεί να πάρει ένα μεγάλο εύρος τιμών και μειώνεται συναρτήσει του βάθους καθώς οι ρωγματώσεις συμπιέζονται λόγω του βάρους των υπερκειμένων. Χαρακτηριστικά οι περισσότερες γεωτρήσεις παραγωγής μεθανίου έχουν βάθος μικρότερο από 1000 μέτρα. Παρόλα αυτά, είναι αναγκαίο πάντα λόγω της χαμηλής διαπερατότητας, να υπάρχει ένας πυκνός κάναβος γεωτρήσεων, οι οποίες βέβαια μπορεί να δυσκολεύουν τον έλεγχο της δέσμευσης και χρήσης του μεθανίου που παράγεται.

Αναφέροντας ονομαστικά τα βασικά κριτήρια επιλογής μιας δυνητικά κατάλληλης περιοχής εφαρμογής ECBM με CO₂, θα πρέπει να περιλάβουμε την *επαρκή διαπερατότητα*, την *κατάλληλη γεωμετρία του κοιτάσματος* (μικρός αριθμός και μεγάλου πάχους στρώματα γαιανθράκων προτιμώνται), την *απλή δομή* (όχι πολλά ρήγματα και αναδιπλώσεις), την *προτίμηση σε ομογενή, περιορισμένα και πλευρικά συνεχή κοιτάσματα*, το *επαρκές βάθος* (έως τώρα περί τα 1500 μ), τις *κατάλληλες συνθήκες κορεσμού των αερίων* και την *δυνατότητα αφαίρεσης του νερού του σχηματισμού*, εφόσον είναι απαραίτητο.

Λόγω της ποικίλης χωρητικότητας που προσφέρει αυτός ο σχηματισμός αποθήκευσης, η οποία οφείλεται στη διαφορετική προσροφητική ικανότητα κάθε είδους γαιάνθρακα, δεν έχει χαρακτηριστεί ξεκάθαρα ο ρόλος του στην αποθήκευση του CO₂. Ακόμη, εάν τα εν λόγω κοιτάσματα δεν εξορυχθούν ποτέ και οι τιμές πίεσης τους παραμείνουν αναλλοίωτες, τότε η αποθήκευση του CO₂ μπορεί να θεωρηθεί σε βάθος γεωλογικών χρόνων. Εντούτοις, όπως και σε κάθε άλλη δυνατότητα γεωλογικής αποθήκευσης μια διαταραχή του σχηματισμού μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες στην αποθήκευση. Στα κοιτάσματα

γαιανθράκων (ιδιαίτερα αυτά που βρίσκονται σε μικρά βάθη) το μελλοντικό πλάνο εκμετάλλευσης τους διαδραματίζει ίσως τον βασικότερο ρόλο καθώς αυτό θα καθορίσει αν είναι καταλληλότερα για εξόρυξη ή είναι πιο συμφέρουσα μια γεωλογική αποθήκευση CO₂, η οποία μπορεί να συνοδεύεται από ταυτόχρονη απόληψη μεθανίου. Γι' αυτό το λόγο συνήθως σε έργα αποθήκευσης προτιμώνται τα μη εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα, τα οποία βρίσκονται και σε μεγάλα βάθη.

Άλλες δυνατότητες (βασάλτες, κοιλότητες, αργιλικόι σχιστόλιθοι πλούσιοι σε οργανική ύλη)

Μερικές ακόμα γεωλογικές δομές που μελετώνται ώστε να παρέχουν έναν ασφαλή και κατάλληλο χώρο αποθήκευσης, είναι οι βασάλτες, οι αργιλικόι σχιστόλιθοι πλούσιοι σε οργανική ύλη, οι αλατούχες κοιλότητες και τα εγκαταλελειμμένα ορυχεία.

Βασάλτες

Οι βασάλτες αποτελούν ηφαιστειογενή πετρώματα που απαντώνται πολύ συχνά σε μεγάλες ποσότητες στο φλοιό της γης. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους όπως το χαμηλό πορώδες, η χαμηλή διαπερατότητα, κλπ, τους καθιστούν σε πρώτη φάση ακατάλληλους ως χώρο αποθήκευσης CO₂. Μάλιστα οποιαδήποτε διαπερατότητα έχουν αυτοί οι σχηματισμοί, οφείλεται στις ρωγματώσεις που φέρουν, οι οποίες αποτελούν δίοδους διαφυγής του CO₂, εάν δεν υπάρχει ένα αδιαπέρατο πέτρωμα που να περιβάλλει το σχηματισμό και να λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας.

Αν και παρουσιάζουν σαφώς αρκετά μειονεκτήματα, οι βασάλτες μελετώνται σαν χώροι αποθήκευσης, καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα ορυκτοποίησης (mineral trapping) του CO₂.

Αργιλικόι σχιστόλιθοι πλούσιοι σε οργανικά

Οι σχηματισμοί αυτοί, είτε περιέχουν πετρέλαιο ή αέριο, είτε απλά οργανικά υλικά, είναι επίσης πολύ διαδεδομένοι παγκοσμίως και έχουν τους ίδιους μηχανισμούς παγίδευσης με τα στρώματα γαιανθράκων, δηλαδή προσρόφηση του CO₂ σε ένα οργανικό υλικό. Η χωρητικότητα της αποθήκευσης σε αυτούς τους σχηματισμούς δεν έχει προσδιοριστεί, αλλά δεδομένης της διάδοσης των αργιλικών σχιστολίθων πάνω στη γη, αναμένεται να είναι αρκετά σημαντική. Αν όμως τεθούν στην πορεία κριτήρια επιλεξιμότητας ενός τέτοιου σχηματισμού που για παράδειγμα περιορίσουν το βάθος του, τότε ο όγκος του χώρου αποθήκευσης μειώνεται σημαντικά και συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής

διαπερατότητας των σχιστολίθων, η εισπίεση μεγάλου όγκου CO₂ πιθανά να καταστεί απαγορευτική.

Τεχνητές κοιλότητες εντός αλάτων

Έπειτα από την εξόρυξη με διάλυμα (solution mining) ενός κοιτάσματος, μπορούν να δημιουργηθούν αλατούχες κοιλότητες, στις οποίες μπορεί να εισπιαστεί φυσικό αέριο ή άλλα προϊόντα πετρελαίου για προσωρινή ή μόνιμη αποθήκευση. Ανάλογα είναι δυνατή και η εισπίεση CO₂ με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση η αποθήκευση επιδιώκεται να είναι μόνιμη. Παρόλο που μια μόνο κοιλότητα, για παράδειγμα διαμέτρου 100 μέτρων, μπορεί να φιλοξενήσει τη μικρή ποσότητα των περίπου 0.5 Mt υψηλής πυκνότητας CO₂, είναι δυνατή η κατασκευή μιας συστοιχίας από αυτές για μεγάλης κλίμακας έργα. Το είδος του στρώματος που αποτελεί την οροφή της κοιλότητας έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς πρέπει να εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξει πτώση της οροφής της κοιλότητας και απότομη απελευθέρωση του αερίου, αλλά ούτε και σταδιακές διαρροές.

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα τα οποία παρουσιάζουν αυτές οι κοιλότητες είναι η μεγάλη χωρητικότητα ανά μονάδα όγκου (kg CO₂/m³), η αποδοτικότητα και ο καλός ρυθμός ροής εισπίεσης. Από την άλλη τα μειονεκτήματά τους είναι η πιθανότητα απελευθέρωσης του CO₂ σε περίπτωση κατάρρευσης του συστήματος, η σχετικά μικρή χωρητικότητα των μεμονωμένων περισσότερων κοιλοτήτων και τα περιβαλλοντικά προβλήματα της απόθεσης των διαλυμάτων/προϊόντων της εξόρυξης τους. Παρόλα αυτά, οι κοιλότητες εντός αλάτων μπορούν να λειτουργήσουν και ως τόπος προσωρινής αποθήκευσης CO₂, ως μέρος ενός συστήματος διανομής και μεταφοράς του από τις πηγές δέσμμευσης στους ταμιευτήρες αποθήκευσης.

Εγκαταλελειμμένα μεταλλεία

Η καταλληλότητα ενός μεταλλείου ώστε να γίνει χώρος αποθήκευσης CO₂ κρίνεται από τη φύση και τη στεγανοποιητική ικανότητα του προς εξόρυξη πετρώματος. Ισχυρά ρωγματομένα πετρώματα π.χ. πυριγενή ή μεταμορφωμένα, σίγουρα αντενδείκνυνται για ένα τέτοιο εγχείρημα. Αντίθετα ιζηματογενή πετρώματα όπως για παράδειγμα ορυχεία καλλίου και αλατωρυχεία ή στρωματογραφικές συγκεντρώσεις μολύβδου και ψευδαργύρου, κρίνονται καταλληλότερα. Επίσης, εγκαταλελειμμένα ανθρακωρυχεία προσφέρουν τη δυνατότητα προσρόφησης του CO₂ στον εναπομείναντα άνθρακα, κάτι

που τους προσδίδει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως προαναφέρθηκε, αν και εφόσον τα περιβάλλοντα πετρώματα δεν είναι ιδιαίτερα ρωγματομένα, όπως συνηθίζεται. Βέβαια ακόμα δεν υπάρχει ένας ασφαλής τρόπος σφράγισης των μεταλλείων υπό την υψηλή πίεση του αποθηκευμένου αερίου και σε βάθος χρόνου. Ελπιδοφόρο όμως παράδειγμα, μπορεί να αποτελέσει η αποθήκευση φυσικού αερίου σε εγκαταλελειμμένα ανθρακωρυχεία στο Κολοράντο των ΗΠΑ.

2.4 Κόστος αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς

Οι δαπάνες για τη μεταφορά και την αποθήκευση συχνά θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν ένα σχετικά μικρό μερίδιο του συνολικού κόστους του έργου CCS, περίπου 5-7 % σε πολλές περιπτώσεις. Παρόλα αυτά, ευνοείται η μεταφορά του ρεύματος του CO₂ σε υψηλής χωρητικότητας χερσαίες δεξαμενές, με καλή εισπαισιμότητα που να απέχουν λιγότερο από 200 χλμ από την πηγή των εκπομπών. Η μεταφορά του CO₂ σε παρόμοια απόσταση σε υποθαλάσσιο (offshore) σχηματισμό αποθήκευσης, για παράδειγμα, μπορεί να διπλασιάσει τα έξοδα μεταφοράς. Γενικά η αποθήκευση σε θαλάσσια και όχι σε χερσαία αλατούχα υδροφόρα στρώματα, μπορεί να διπλασιάσει ή και τριπλασιάσει το κόστος αποθήκευσης [23].

Ιδιαίτερα, τα κόστη της αποθήκευσης επηρεάζονται πολύ από τη γεωλογία και το είδος του σχηματισμού όπου θα αποθηκευτεί το CO₂. Αν δεν υπάρξει κατάλληλος χώρος που να είναι προσβάσιμος στα μέσα μεταφοράς του CO₂, μπορεί να μην είναι δυνατή η εφαρμογή CCS. Παρόλα αυτά, έχει δειχθεί ότι τα κόστη της αποθήκευσης αποτελούν λιγότερο από 5% επί του συνόλου του κόστους της τεχνολογίας σε ιδανικές συνθήκες, και φτάνουν ως 10% για χώρους αποθήκευσης που δεν φέρουν τις καταλληλότερες γεωλογικές ιδιότητες (πχ φτωχή διαπερατότητα, μικρό πάχος σχηματισμού αποθήκευσης) [102].

Έχουν δημοσιευτεί κατά καιρούς πολλές εκτιμήσεις του κόστους της υπεδαφικής γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂. Η δημοσιευμένη μελέτη του IPCC (2005) δίνει μια εκτίμηση μεταξύ \$5 έως \$8/τόνο. Άλλες εκτιμήσεις παρουσιάζουν τα κόστη μεταξύ 4- 12 € ανά τόνο CO₂ [8], όπου συγκεκριμένα 4€/τόνο για την αποθήκευση στα εξαντλημένα πεδία υδρογονανθράκων και 5€/ τόνο για αποθήκευση σε βαθείς αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες, ενώ για αποθήκευση σε υποθαλάσσιους (offshore) σχηματισμούς υπολογίζεται σε 11-12€/ τόνο CO₂. Η πιο πρόσφατη εκτίμηση κυμαίνεται μεταξύ \$3.2-\$6/ τόνο CO₂ [6].

Πρέπει να σημειωθεί πως όταν η αποθήκευση συνδυάζεται με ενισχυμένη απόληψη υδρογονανθράκων (EOR ή EGR), ή με ECBM, τα οφέλη από την αύξηση της παραγωγής μπορεί να αντισταθμίσουν ένα μέρος του κόστους δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂. Οι χερσαίες εργασίες EOR αποδίδουν ποσά της τάξης των 10-16 US \$ ανά τόνο CO₂. Το οικονομικό όφελος της ενισχυμένης παραγωγής, όμως, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εκάστοτε τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Παρόλα αυτά, τα οικονομικά οφέλη από τις εργασίες EOR και ECBM αυξάνουν τις πιθανότητες να βρεθούν οικονομικά αποδοτικές λύσεις για τη γεωλογική αποθήκευση του CO₂ [17].

2.5 Εκτιμήσεις συνολικού κόστους εφαρμογής CCS

Τα κόστη μιας εφαρμογής CCS είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη βιωσιμότητα ενός τέτοιου έργου. Ακόμη και καθορίζοντας μια τιμή για το αποθηκευμένο CO₂ μέσω του φορολογικού συστήματος ή μέσω της αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, οι επιχειρήσεις μπορεί να αποφασίσουν να πληρώσουν το αντίτιμο της απελευθέρωσης του στην ατμόσφαιρα, παρά το κόστος της δέσμευσης του, εάν η πρώτη λύση είναι φθηνότερη.

Τυπικό κόστος των CCS σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από US\$ 30 έως 90/t CO₂ ή ακόμα και περισσότερο, ανάλογα με την τεχνολογία, την καθαρότητα του CO₂ και το χώρο αποθήκευσης. Από αυτά, \$20-80/t αφορούν τη δέσμευση, \$1-10/t ανά 100 χιλιόμετρα τη μεταφορά και \$2-5/t την αποθήκευση και παρακολούθηση [84]. Το συνολικό κόστος μεταφοράς του CO₂ μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το μέγεθος του έργου, όπως κατέδειξε μια μελέτη για τη μεταφορά και την αποθήκευση στην Latrobe Valley της Αυστραλίας [70]. Παρόμοια, διαφορετικοί γεωλογικοί χώροι αποθήκευσης έχουν, επίσης, διαφορετικό κόστος. Σε συνεργασία με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ και την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος, η ICF International υπολόγισε το κόστος της γεωλογικής αποθήκευσης στις ΗΠΑ βάσει του είδους του χώρου αποθήκευσης. Το συνολικό κόστος ανά τόνο CO₂ κυμαίνεται από \$4.28 για την αποθήκευση σε χερσαίους εξαντλημένους ταμειυτήρες φυσικού αερίου ως - 66.25 \$ για τις χερσαίες εφαρμογές EOR. (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι μπορεί να υπάρξει κέρδος αντί για κόστος από τα αναμενόμενα έσοδα της ενισχυμένης απόληψης πετρελαίου) [70].

Υποθέτοντας έναν λογικό ρυθμό ανάπτυξης της τεχνολογίας, το συνολικό κόστος της εφαρμογής CCS αναμένεται να πέσει κάτω από \$25/t CO₂ ως το 2030. Το κόστος δέσμευσης αποτελεί, σαφώς, το μεγαλύτερο ποσοστό σε κάθε περίπτωση.

3.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΡΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1 Εκτιμώμενος Αποθηκευτικός χώρος

Ως αποθηκευτικός χώρος (*storage resource*) ορίζεται ο όγκος των πόρων που εκτιμάται ότι υπάρχουν στους γεωλογικούς σχηματισμούς, ενώ ως αποθηκευτική ικανότητα (*storage capacity*) ορίζεται ο όγκος του CO₂ που μπορεί να αποθηκευτεί, σε υπερκρίσιμη κατάσταση, σε έναν συγκεκριμένο γεωλογικό σχηματισμό, βάσει των γεωλογικών, οικονομικών, και κανονιστικών συνθηκών που τον διέπουν.

Οι εκτιμήσεις του αποθηκευτικού χώρου δεν λαμβάνουν υπόψη τους οικονομικούς και ρυθμιστικούς περιορισμούς και θεωρούν μόνο τους φυσικούς περιορισμούς ώστε να καθορίσουν 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 (ή ζώνες περιορισμού), 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 πορώδες

που διατίθεται 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 [38].

3.1.1 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε πεδία πετρελαίου και φυσικού αερίου

Τα πεδία πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν πολλά χαρακτηριστικά που τα καθιστούν εξαιρετικούς χώρους για γεωλογική αποθήκευση του CO₂. Οι κύριοι μηχανισμοί αποθήκευσης που δρουν 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 πεδία απ' ό,τι στους αλατούχους υδροφόρους σχηματισμούς και στα πεδία άνθρακα. 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 ογκομετρικής εξίσωσης που χρησιμοποιείται είναι η εξής [38] :

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

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.

3.1.2 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε αλατούχους υδροφόρους σχηματισμούς

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 [38]. Όλα τα ιζηματογενή πετρώματα που περιλαμβάνονται στην εκτίμηση των πόρων αλατούχων υδροφόρων σχηματισμών, πρέπει να έχουν συστήματα εγκλεισμού που να συνίστανται από σχιστόλιθο, ανυδρίτη και εβαπορίτες. Το πάχος αυτών των καλυμμάτων δεν εξετάζεται, επίσης, κατά την αξιολόγηση.

Η ογκομετρική εξίσωση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των πόρων αποθήκευσης σε αυτή την περίπτωση 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 αλατούχου σχηματισμού
- 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 υπάρχοντα 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 ασβεστόλιθο από 0.40-4.1%.

3.1.3 Εκτίμηση του αποθηκευτικού χώρου σε κοιτάσματα γαιάνθρακα

Η αποθήκευση του CO₂ σε κοιτάσματα άνθρακα, κατά κανόνα, συνεπάγεται την μετατόπιση του μεθανίου που παράγεται από αυτόν μέσω βιογενούς βακτηριακής δραστηριότητας (σε χαμηλότερης κατάταξης γαιάνθρακες, δηλ με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα) ή θερμογόνου ενανθράκωσης (σε υψηλότερης κατάταξης όπως πχ ο λιγνίτης). Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 (παράγραφος 2.3.2), υπάρχει η δυνατότητα της ενισχυμένης απόληψης μεθανίου (Enhanced coalbed methane recovery (ECBM)) μέσω της εισπίεσης και αποθήκευσης του CO₂. Η ανάκτηση του εκτοπισμένου CH₄ είναι υποχρεωτική δεδομένου ότι πρόκειται για ένα πολύ πιο ισχυρό αέριο θερμοκηπίου από το CO₂. Το μεθάνιο που ανακτάται, μπορεί 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 CO₂ του για ένα ή περισσότερα στρώματα άνθρακα
- 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 άνθρακες 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 άνθρακα, 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 άνθρακα αυτός ο συντελεστής κυμαίνεται μεταξύ 21-48%.

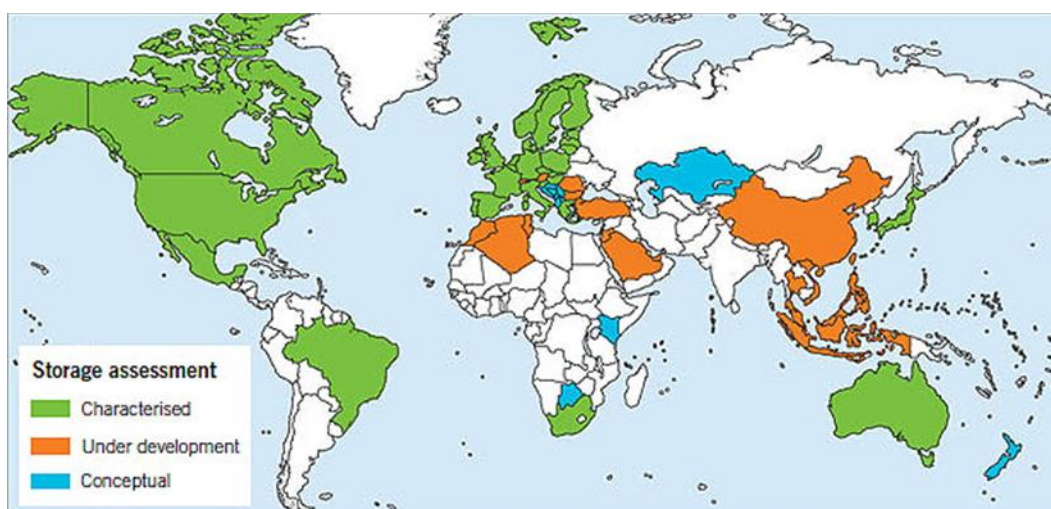
3.2 Χωρητικότητα γεωλογικών σχηματισμών αποθήκευσης CO₂

Η χωρητικότητα ενός ταμιευτήρα ο οποίος προορίζεται για χώρο μόνιμης αποθήκευσης CO₂ δεν εξαρτάται μόνο από το είδος και τις ιδιότητες του πετρώματος που τον αποτελεί, αλλά και από το γενικότερο γεωλογικό περιβάλλον μέσα στο οποίο βρίσκεται. Για παράδειγμα, σε έναν μικρής έκτασης ταμιευτήρα (σχηματισμό αποθήκευσης) με πλήρως απομονωμένα (δηλ. δεν επικοινωνούν με γειτονικούς σχηματισμούς) και μη ελαστικά πετρώματα (δηλ. δεν παραμορφώνονται ώστε να αλλάξει ο όγκος τους) να τον περιβάλλουν, η χωρητικότητα του θα είναι μικρή και μπορεί να καθιστά το έργο ασύμφορο. Αυτό συμβαίνει διότι ο μόνος διαθέσιμος χώρος για αποθήκευση θα είναι αυτός που θα δημιουργείται από την συμπίεση του νερού ή των ρευστών του ταμιευτήρα.

Επίσης, εάν τα φυσικώς υπάρχοντα ρευστά στα κενά των πόρων του σχηματισμού, δεν βρουν κάποια διέξοδο εκτόπισης, τότε αυτός ο χώρος θα είναι ιδιαίτερα περιορισμένος. Αυτό μπορεί να διορθωθεί μέσω τεχνικής παρέμβασης, για παράδειγμα με την άντληση πετρελαίου ή αερίου (σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων), ή και νερού στην περίπτωση εισπίεσης σε υδροφόρους ορίζοντες. Μεγάλη προσοχή πρέπει επίσης να δίνεται στην τυχόν ύπαρξη ρηγμάτων, καθώς εκτός από δίοδο μετανάστευσης του CO₂ προς την επιφάνεια, όπως θα δούμε στην συνέχεια, υπάρχει και δυνατότητα να δημιουργήσουν

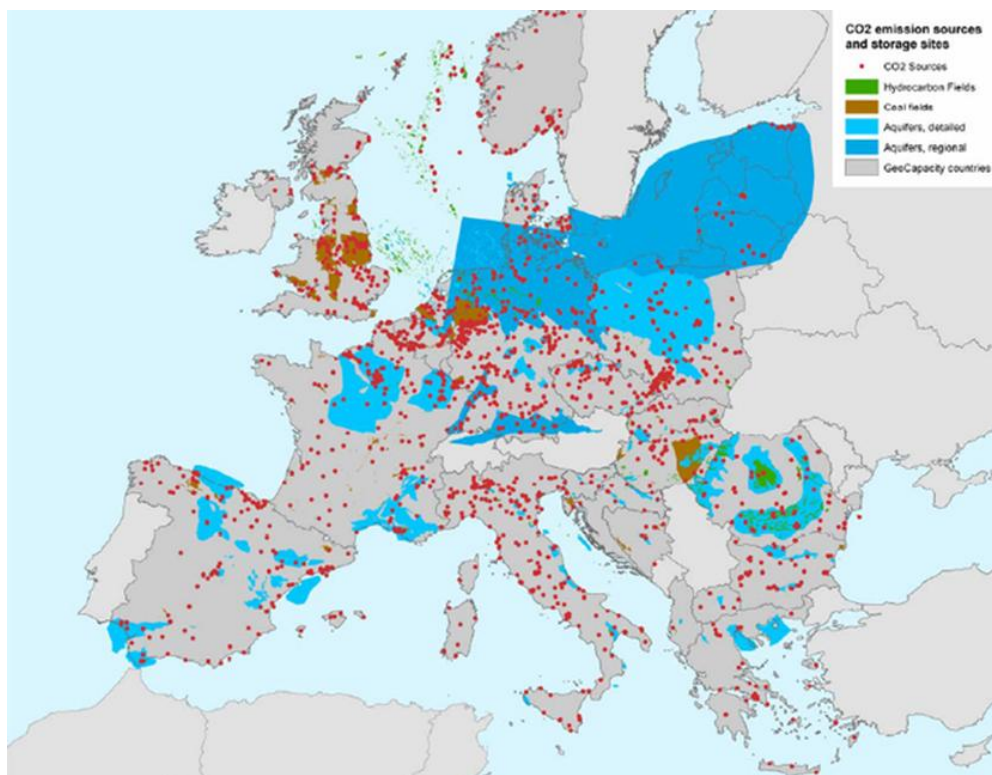
εσωτερικά εμπόδια στην ομαλή κατανομή του CO₂ εντός του ταμειυτήρα, διαχωρίζοντας τον σε τμήματα με μικρή ή και καθόλου επικοινωνία μεταξύ τους και μειώνοντας έτσι την ωφέλιμη χωρητικότητά του.

Έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες εκτίμησης του δυναμικού αποθήκευσης παγκοσμίως, οι οποίες συνεχώς ανανεώνονται και αναθεωρούνται όσο η τεχνολογία εξελίσσεται και η γεωλογία του υπεδάφους και η συμπεριφορά των συστημάτων αποθήκευσης γίνονται περισσότερο κατανοητές. Δεν έχουν εκτιμηθεί πλήρως όλοι οι σχηματισμοί που, ενδεχομένως, κρίνονται κατάλληλοι για αποθήκευση. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1, στην Β. Αμερική και στην Αυστραλία, οι περιοχές που μελετώνται ή εφαρμόζεται εισπίαση, έχουν χαρακτηριστεί από άποψη χωρητικότητας. Το ίδιο ισχύει και για το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, αλλά στην Ασία και στην Αφρική οι έρευνες περί της χωρητικότητας, βρίσκονται σε εξέλιξη ή έχει γίνει μόνο μια θεωρητική εκτίμηση.



Εικόνα 3.1: Παγκόσμιος χάρτης αξιολόγησης του δυναμικού αποθήκευσης [5].

Στην Εικόνα 3.2 απεικονίζεται ο χάρτης με την κατανομή, σε επίπεδο Ευρώπης, των πηγών CO₂ και των πιθανών χώρων αποθήκευσης όπως προέκυψαν από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Geo Capacity, την χρονιά 2009.



Εικόνα 3.2: Ευρωπαϊκός χάρτης κατανομής των πηγών CO₂ και των χώρων αποθήκευσης [119].

Οι λεκάνες στις οποίες παράγονται υδρογονάνθρακες, και οι οποίες αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το μισό των ιζηματογενών περιοχών παγκοσμίως, έχουν μεν περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης, αλλά γνωστή γεωλογική σύνθεση και δυνατότητα συγκράτησης των υδρογονανθράκων.

Σε ταμειυτήρες υδρογονανθράκων με περιορισμένη εισροή νερού από υποκείμενο υδροφορέα, η εισπνεζόμενη ποσότητα CO₂ θα καταλάβει κυρίως το χώρο όπου προηγουμένως υπήρχαν υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο ή φυσικό αέριο). Ωστόσο, σε περίπτωση που υπάρξει υπολειμματική παγίδευση ποσοτήτων νερού (λόγω τριχοειδών δυνάμεων, επίδρασης βαρύτητας κ.ο.κ) τότε ένα μέρος του χώρου δεσμεύεται περιορίζοντας την δυνατότητα αποθήκευσης των εισπνεζόμενων ποσοτήτων. Στα ανοικτά πετρελαϊκά συστήματα (όπου η πίεση διατηρείται με την εισροή νερού), ο διαθέσιμος χώρος των πόρων για αποθήκευση CO₂ υφίσταται επιπλέον μείωση λόγω του όγκου του εισρέοντος νερού.

Μεγάλο πρόβλημα στην εκτίμηση της χωρητικότητας αποτελεί και η αβεβαιότητα για το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο αναμένεται η εκμετάλλευση του πετρελαίου ή αερίου ώστε ο ταμειυτήρας να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια αποκλειστικά για την αποθήκευση

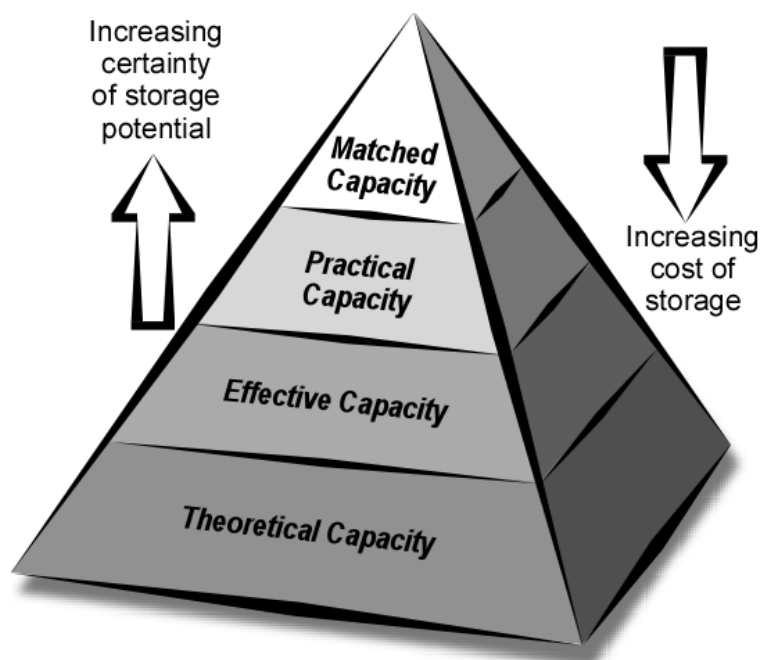
του CO₂. Αυτό είναι κάτι που καθορίζεται κυρίως από οικονομικούς παράγοντες (πχ. εκάστοτε τιμή πετρελαίου) και όχι τόσο από τεχνικούς, συνεπώς είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Μέχρι σήμερα λίγα μεγάλα πεδία υδρογονανθράκων θεωρούνται εξαντλημένα.

Η παγκόσμια χωρητικότητα των εφαρμογών EOR υπολογίζεται μεταξύ 61 και 123 Gt CO₂, βάσει των καταγεγραμμένων ταμιευτήρων. Συνυπολογίζοντας και τους προς ανακάλυψη ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, η συνολική χωρητικότητα κυμαίνεται μεταξύ 675 και 900 Gt CO₂ [17]. Προς το παρόν, πρωτίστως επιδιώκεται η μεγιστοποίηση των κερδών από την απόληψη των υδρογονανθράκων και έπεται η διαδικασία της αποθήκευσης. Μάλιστα, πολλές φορές, η βελτιστοποίηση των εσόδων από την παραγωγή πετρελαίου, απαιτεί ελαχιστοποίηση της ποσότητας του CO₂ που συγκρατείται στον ταμιευτήρα.

Οι βαθείς αλατούχοι υδροφόροι σχηματισμοί, εκτιμάται, ότι αποτελούν μεγάλους αποθηκευτικούς χώρους, αλλά δεδομένου ότι δεν υπάρχουν εξαρχής πολλά στοιχεία για τα γεωλογικά χαρακτηριστικά τους, ο βαθμός αβεβαιότητας, όσον αφορά την ακεραιότητα και τις ιδιότητες του ταμιευτήρα, είναι πολύ μεγάλος. Η ακριβής εκτίμηση της συνολικής τους χωρητικότητας, παρόλα αυτά, είναι μια πολύ δύσκολη υπόθεση, διότι η αποθήκευση σε αυτού του είδους τους σχηματισμούς, περιλαμβάνει πολλούς μηχανισμούς παγίδευσης, οι οποίοι δρουν ταυτόχρονα και σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες και ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες στην περιοχή ενδιαφέροντος. Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι υπολογισμού, αλλά ο μόνος τρόπος είναι να γίνεται εκτίμηση της χωρητικότητας μεμονωμένα ανά περίπτωση μελέτης.

3.2.1 Προσέγγιση για την εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας

Η έννοια της χωρητικότητας μπορεί να ξεκινά από την απλή εκτίμηση του όγκου των εν δυνάμει γεωλογικών σχηματισμών που είναι διαθέσιμοι για να υποδεχθούν ποσότητες CO₂, και να καταλήγει στην εκτίμηση του οικονομικά διαθέσιμου μέρους του ως άνω όγκου που μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί. Η ευρεία θεώρηση της έννοιας χωρητικότητα αποδίδεται παραστατικά στο Σχήμα 3.1 όπου παρουσιάζεται η τεχνικό-οικονομική πυραμίδα της σταδιακής εξέλιξης της έννοιας αυτής.



Σχήμα 3.1: Τεχνικο-οικονομική Πυραμίδα Πόρων-Αποθεμάτων [48].

Παρατηρείται ότι μεταβαίνοντας προς την κορυφή της πυραμίδας, δηλαδή προς την Λειτουργική ικανότητα αποθήκευσης, αυξάνεται ο βαθμός βεβαιότητας της εκτίμησης του αποθηκευτικού χώρου, ταυτοχρόνως μειώνεται και το κόστος της αποθήκευσης. Η πραγματική χωρητικότητα, όμως, θα είναι κατά πολύ μικρότερη αυτής που αρχικά είχε εκτιμηθεί.

Πιο συγκεκριμένα, οι υποκατηγορίες είναι οι εξής [49].:

- ο Θεωρητική αποθηκευτική ικανότητα (Theoretical capacity) ή Συνολικός όγκος πόρων: είναι το φυσικό όριο του τι μπορεί να δεχθεί το γεωλογικό σύστημα. Η εκτίμηση αυτής της χωρητικότητας γίνεται με την υπόθεση πως ολόκληρη η ικανότητα του συστήματος για αποθήκευση CO₂ (στους χώρους των πόρων, ως διάλυμα στα ρευστά του σχηματισμού, προσροφούμενο από την μάζα του γαιάνθρακα) είναι προσβάσιμη και αξιοποιείται πλήρως η δυναμικότητά του. Βεβαίως, είναι ένα μη ρεαλιστικό σενάριο, διότι πάντα υπάρχουν περιορισμοί τεχνικής, οικονομικής και νομικής φύσεως.
- ο Πραγματική αποθηκευτική ικανότητα (Effective storage capacity ή Prospective capacity): αντιπροσωπεύει ένα υποσύνολο της θεωρητικής αποθηκευτικής ικανότητας που εκτιμάται. Η πραγματική ικανότητα αντιπροσωπεύει το φυσικά προσβάσιμο μέρος που ικανοποιεί συγκεκριμένα μια σειρά από γεωλογικά και μηχανικά κριτήρια,

για παράδειγμα, έχει κατάλληλη διαπερατότητα ή περιβάλλεται από μη διαπερατούς σχηματισμούς που θα σταθούν εμπόδιο στην μετανάστευση του CO₂ εκτός του σχηματισμού αποθήκευσης. Αυτή η εκτίμηση συνήθως αλλάζει με την απόκτηση νέων δεδομένων για τον χώρο [49].

- ο Πρακτική ή Ενδεχόμενη αποθηκευτική ικανότητα (Practical storage capacity ή Contingent storage capacity): είναι ένα υποσύνολο της πραγματικής αποθηκευτικής ικανότητας που προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά, νομικά και κανονιστικά, οικονομικά εμπόδια και τους περιορισμούς των υποδομών του έργου αποθήκευσης. Η πρακτική χωρητικότητα ανταποκρίνεται περισσότερο στην έννοια του «αποθέματος».
- ο Λειτουργική αποθηκευτική ικανότητα (Operational or Matched storage capacity): αποτελεί το υποσύνολο της πρακτικής ικανότητας αποθήκευσης και προκύπτει από την αντιστοίχιση των μεγάλων σταθερών πηγών CO₂ με τις γεωλογικές πηγές αποθήκευσης που είναι κατάλληλες από άποψη χωρητικότητας, εισπρεσιμότητας και ποσοστού εφοδιασμού ρεύματος CO₂ απ' αυτές τις πηγές. Αυτή η χωρητικότητα βρίσκεται στην κορυφή της πυραμίδας των πόρων- αποθεμάτων και αντιστοιχεί στον όρο «αποδεδειγμένα εμπορεύσιμα αποθέματα» της εξορυκτικής βιομηχανίας.

Οι αρχικές εκτιμήσεις της χωρητικότητας μπορούν να διεξαχθούν μέσω τριών διαφορετικών μεθόδων [41]:

(1) *μέσω ογκομετρικών μεθόδων* (αναφέρονται και ως στατικές μέθοδοι),(38) οι οποίες δίνουν συντηρητικές και αισιόδοξες εκτιμήσεις για το ογκομετρικό κλάσμα του συνολικού όγκου του σχηματισμού που καταλαμβάνει το πορώδες και μπορεί να πληρωθεί με CO₂. Για κλειστές δομές (closed contour structures) η χωρητικότητα είναι συνήθως της τάξης 1-2% του όγκου των πόρων λόγω της αυξημένης συσσώρευσης των πιέσεων (pressure build-up),

(2) *μέσω αναλυτικών ή ημιαναλυτικών μεθόδων* οι οποίες περιλαμβάνουν τη μοντελοποίηση της κίνησης του CO₂ και των πιέσεων που επικρατούν στη ζώνη εισπίεσης,

(3) *μέσω αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης του ταμιευτήρα* (numerical reservoir simulation methods) όπου διεξάγονται προσομοιώσεις ενός περιορισμένου αριθμού σεναρίων βέλτιστης και χειρότερης περίπτωσης (best-worst case scenario).

Οι δύο τελευταίες μέθοδοι αναφέρονται και ως δυναμικές μέθοδοι εκτίμησης χωρητικότητας [38] και μπορούν να εφαρμοστούν, κυρίως, μετά τον πλήρη χαρακτηρισμό ενός χώρου αποθήκευσης και την έναρξη της εισπίεσης, ώστε να υπάρχουν περισσότερα δεδομένα που θα τροφοδοτήσουν τις προσομοιώσεις ώστε να γίνεται σύγκριση με την πραγματική απόδοση του ταμιευτήρα (history matching).

Όλες οι μέθοδοι φέρουν ένα βαθμό αβεβαιότητας ως προς τις εκτιμήσεις τους. Αυτό είναι αναπόφευκτο, αλλά το επίπεδο της αβεβαιότητας, όσον αφορά την χωρητικότητα αλλά και τις υπόλοιπες παραμέτρους του χώρου αποθήκευσης, μειώνεται κατά τη διάρκεια ανάπτυξης ενός έργου αποθήκευσης, καθώς αποκτώνται όλο και περισσότερα δεδομένα στην διάρκεια ανάπτυξης του έργου

Το US Department of Energy (US DOE) προτείνει τη χρήση ενός δείκτη εμπιστοσύνης (confidence indicator) ώστε να εκφραστεί ο βαθμός εμπιστοσύνης στην εκτίμηση της χωρητικότητας αποθήκευσης του CO₂. Αυτός καθορίζεται με βάση την ποσότητα και την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση, και την ποικιλομορφία του γεωλογικού περιβάλλοντος αποθήκευσης.

Ο προτεινόμενος δείκτης εμπιστοσύνης παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1. Σε τιμές ίσες με 1 χαρακτηρίζεται ο χαμηλότερος δείκτης εμπιστοσύνης και σε τιμές ίσες με 9 ο υψηλότερος.

Πίνακας 3.1: Δείκτης Εμπιστοσύνης στην εκτίμηση της χωρητικότητας αποθήκευσης του CO₂

		Δείκτης Εμπιστοσύνης		
Ανομοιογένεια Υπεδάφους	Περίπλοκη δομή υπεδάφους, πολλές ασυνέχειες στις ιδιότητες του σχηματισμού, εμφάνιση χαρακτηριστικών τεκτονικά παραμορφωμένων περιοχών	5	3	1
	Μετρίως ετερογενής υπεδαφική δομή και ανισοτροπία, μικρή δυνατότητα πρόβλεψης των ιδιοτήτων των πετρωμάτων (rock properties) σε απόσταση ως 10 μιλίων	7	5	3
	Σχετική δομική ομοιογένεια του εδάφους, δυνατότητα πρόβλεψης των ιδιοτήτων των πετρωμάτων του σχηματισμού για αποστάσεις > 10 μιλίων	9	7	5
Πυκνότητα γεωτρήσεων κατά μέσο όρο	>1 γεώτρηση/τ. μίλι	> 1 γεώτρηση/ 9 τετρ.μίλια	> 1 γεώτρηση/ 100 τ. μίλια	
Αποστάσεις σημείων διεξαγωγής Σεισμικών Ερευνών	>1 γραμμή/ 10 μίλια	>1 γραμμή/ 50 μίλια	>1 γραμμή/ 100 μίλια	
		Πυκνότητα Δεδομένων		

3.3 Εισπνεσιμότητα γεωλογικών σχηματισμών αποθήκευσης CO₂

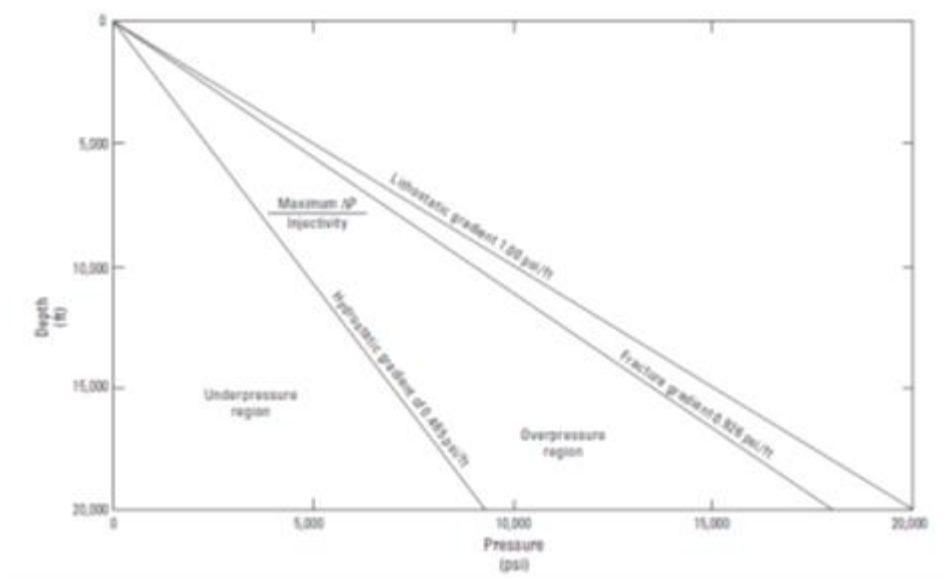
Η εισπνεσιμότητα (injectivity) χαρακτηρίζει την ευκολία με την οποία το ρευστό, στην προκειμένη περίπτωση η μάζα του CO₂ η οποία βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση, μπορεί να εισπνέζεται σε ένα γεωλογικό σχηματισμό. Αυτή η ευκολία μπορεί να προσδιοριστεί με έναν δείκτη εισπνεσιμότητας (injectivity index), ο οποίος ποσοτικοποιεί την αύξηση της πίεσης (μέσα στον σχηματισμό όπου γίνεται η εισπνεση) εξαιτίας της

εισπίεσης ενός γνωστού όγκου ρευστών, και με γνωστό ρυθμό εισπίεσης [107]. Μαθηματικά αυτό ορίζεται ως ο ρυθμός εισπίεσης του CO₂, διαιρούμενος με την διαφορά πίεσης μεταξύ του σημείου εισπίεσης εντός της γεώτρησης και της μέσης πίεσης που επικρατεί στο σχηματισμό [17].

Τα χαρακτηριστικά της ζώνης εισπίεσης που επηρεάζουν την εισπιεσιμότητα είναι κυρίως το πάχος της, η διαπερατότητά της και οι τιμές της πίεσης που επικρατούν στο χώρο αποθήκευσης. Βασικό παράγοντα αποτελεί και η ύπαρξη τυχόν εμποδίων στην ροή (flow baffles) του CO₂ εντός του σχηματισμού της αποθήκευσης ή απομονωμένων τμημάτων εντός του σχηματισμού που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, όπως και ορισμένες γεωχημικές και γεωμηχανικές διαδικασίες που μπορεί να συμβούν εντός της ζώνης εισπίεσης στο χώρο αποθήκευσης, είναι δύσκολο να εκτιμηθούν εάν δεν έχει προηγηθεί στο χώρο αυτό εκμετάλλευση πετρελαίου ή φυσικού αερίου, η οποία θα έχει δώσει σαφώς πολλά γεωλογικά δεδομένα για το χώρο [41].

Αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο στην μελέτη της εισπιεσιμότητας ενός σχηματισμού όπου στοχεύεται να αποθηκευτεί μόνιμα CO₂, είναι να καθοριστεί η τιμή εκείνης της πίεσης (για έναν συγκεκριμένο ρυθμό εισπίεσης και ποσότητας που εισπιέζεται) η οποία μπορεί να οδηγήσει σε διάρρηξη του πετρώματος του σχηματισμού. Προκειμένου να καθοριστεί η οριακή αυτή τιμή, πρέπει να υπάρχουν πληροφορίες σχετικές με τις βαθμίδες πιέσεων του ταμιευτήρα (σχηματισμού αποθήκευσης) (reservoir pressure gradient) και τις τιμές των πιέσεων όπου μπορεί να υπάρξει ρωγμάτωση του σχηματισμού, ανάλογα με το βάθος (Fracture gradient). Από την συσχέτισή τους, προκύπτει η μέγιστη διαφορική πίεση (maximum pressure differential), η οποία προσδιορίζεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 : Γραφική αναπαράσταση της μέγιστης διαφορικής πίεσης, ΔP. Το μέγεθος της μέγιστης διαφορικής πίεσης είναι η αύξηση της πίεσης του σχηματισμού, λόγω της εισπίεσης του CO₂, την οποία ένας σχηματισμός θα μπορούσε, θεωρητικά, να αντέξει πριν υποστεί ρωγμάτωση. Για τις συνθήκες ταμειυτήρα σε βάθος 8.000ft, η μέγιστη πίεση ΔP είναι 3.698 psi, (17.8 PPG για τον τομέα του πετρελαίου, ή 25.5 Mpa).(Lauri Burke,2011)

Δεν πρέπει η πίεση του σχηματισμού να υπερβεί την τιμή πίεσης που θα οδηγήσει στην ρωγμάτωση του, διότι διακυβεύεται η ακεραιότητα του χώρου αποθήκευσης. Ωστόσο, οι τιμές της εισπίεσης (οι οποίες επηρεάζουν όπως είπαμε την πίεση του σχηματισμού) δεν μπορούν να είναι πολύ χαμηλές, γιατί μπορεί να καταστεί αντιοικονομική η εισπίεση (πχ πολύ χαμηλοί ρυθμοί εισπίεσης ή η πίεση του εισπιεζόμενου CO₂ δεν είναι αρκετή ώστε να μπορέσει να εκτοπίσει τα ρευστά του σχηματισμού και να αποθηκευτεί στους πόρους του).

Εκτός των τιμών της πίεσης εισπίεσης, άλλα λειτουργικά χαρακτηριστικά του έργου της αποθήκευσης που καθορίζουν την εισπιεσιμότητα, περιλαμβάνουν το μήκος και τον προσανατολισμό της γεώτρησης εισπίεσης. Η εισπιεσιμότητα μπορεί να αυξηθεί με τη μεγιστοποίηση του μήκους των μη σωληνωμένων τμημάτων της γεώτρησης (δηλαδή το τμήμα που είναι ανοιχτό (open hole) και επιτρέπει τη διέλευση του CO₂ στη ζώνη εισπίεσης), με την όρυξη οριζόντιων γεωτρήσεων με μη σωληνωμένα τμήματα σε μεγαλύτερο μήκος εντός του σχηματισμού ενδιαφέροντος σε σχέση με τις αντίστοιχες κατακόρυφες, ή με την αύξηση του αριθμού των γεωτρήσεων εισπίεσης του CO₂ [43].

Η κατανόηση της εισπνευσιμότητας ενός χώρου αποθήκευσης απαιτείται για λόγους σχεδιασμού ενός έργου αποθήκευσης. Ορισμένες παράμετροι, όπως ο αριθμός των γεωτρήσεων και ο σχεδιασμός τους (κάθετες, οριζόντιες, με αυξημένη διάμετρο, πολλαπλές-πλευρικές (multi-lateral), κ.λπ.), αλληλοεπηρεάζονται απ' αυτήν την ιδιότητα του χώρου αποθήκευσης και με κατάλληλους χειρισμούς είναι δυνατή η βελτιστοποίησή της.

3.4 Συγκράτηση CO₂ από τους γεωλογικούς σχηματισμούς αποθήκευσης

Η συγκράτηση του CO₂ εντός των ορίων του σχηματισμού στον οποίο στοχεύεται η αποθήκευσή του, είναι συνάρτηση δύο παραμέτρων: του συστήματος περιορισμού διαφυγής (πέτρωμα/κάλυμμα) και των μηχανισμών παγίδευσης.

Όταν επιλέγεται ένας χώρος αποθήκευσης, ο βαθμός στον οποίο θεωρείται ότι μπορεί να απομονώσει/συγκρατήσει το CO₂, εκτιμάται με βάση τον τύπο του σχηματισμού, το πάχος του, το βάθος στο οποίο βρίσκεται, την πλευρική έκταση του πρωτεύοντος καλύμματος (seal) και τη σεισμική δραστηριότητα της περιοχής. Βασικό ρόλο έχει, στα πρώτα στάδια μελέτης των κατάλληλων περιοχών αποθήκευσης, η ποσότητα των δεδομένων που υπάρχουν διαθέσιμα για την περιοχή, το πόσο πρόσφατα είναι και σε τι βάθος φτάνουν οι πληροφορίες που υπάρχουν σχετικά με το υπέδαφος.

Αξίζει να σημειωθεί σ' αυτό το σημείο, ότι για τις περιπτώσεις, ειδικά των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, που θεωρείται ότι οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι εξαιρετικά πολλές λόγω της προϋπάρχουσας μελέτης του χώρου πριν και κατά την εκμετάλλευσή τους, τα δεδομένα, ειδικότερα, για το πέτρωμα/κάλυμμα δεν θεωρούνται ότι είναι σημαντικά. Και αυτό γιατί στην περίπτωση των υδρογονανθράκων το κάλυμμα εκ φύσεως κάλυπτε ομαλά το αποθήκευτρο πέτρωμα με τα ρευστά εντός αυτού και ταυτόχρονα αποτελούσε και ένδειξη ότι πιθανά κάτω από αυτό βρίσκονται υδρογονάνθρακες. Η μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του δεν αποτελούσε μέρος της συστηματικής μελέτης των αντίστοιχων χαρακτηριστικών του αποθήκευτρο πετρώματος. Στην περίπτωση όμως της αποθήκευσης CO₂, η μελέτη για το πέτρωμα/κάλυμμα πρέπει να είναι εκτενής, προκειμένου να υπάρχει ασφαλής και μόνιμη αποθήκευση.

3.5 Μηχανισμοί παγίδευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς

Με την εισπίεση του CO₂ μέσα στον αποθηκευτικό χώρο, που όπως αναφέρθηκε είναι ένα σύστημα πετρωμάτων και ρευστών στους πόρους του, υπάρχουν ορισμένοι μηχανισμοί που παγιδεύουν το CO₂ μέσα σε αυτόν σε διάφορες μορφές, εξασφαλίζοντας τη μονιμότητα της αποθήκευσης του. Αυτοί οι μηχανισμοί διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

α) παγίδες που περιορίζουν την πλευρική ροή των ρευστών (στρωματογραφικές και τεκτονικές παγίδες) που σχηματίζουν ουσιαστικά ένα χώρο συγκράτησης της εισπνεζόμενης μάζας του CO₂ στη θέση της, και

β) μηχανισμοί που λειτουργούν κατά τη διάρκεια της ροής και εξασθενούν την κινητικότητα του CO₂ συναρτήσει της απόστασης που διανύει.

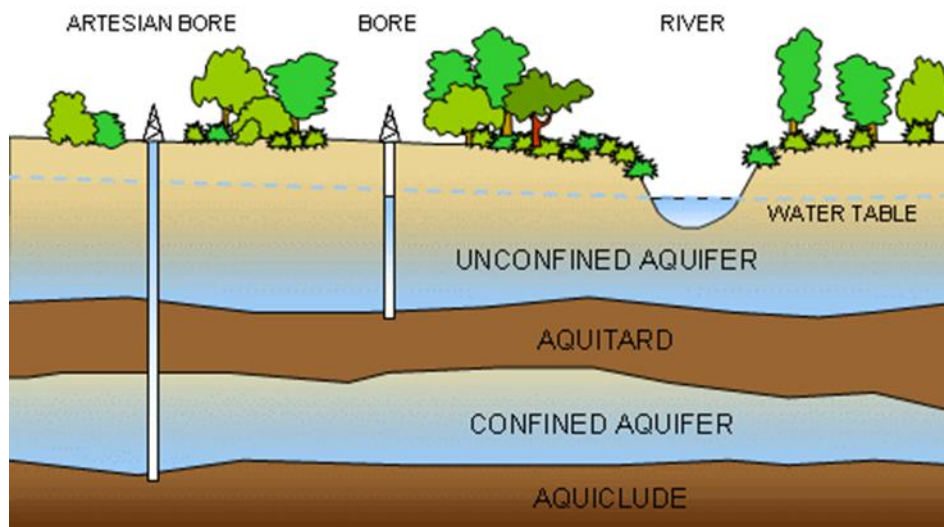
Μια άλλη μορφή διάκρισης τους, τους διαχωρίζει με βάση τις λειτουργίες που τους στηρίζουν, σε μηχανισμούς φυσικής και γεωχημικής παγίδευσης.

3.5.1 Φυσική παγίδευση

Παγίδευση λόγω δομής ή στρωματογραφική παγίδευση (stratigraphic and structural)

Πρόκειται για τον κυρίαρχο μηχανισμό παγίδευσης, καθώς ως αρχική συνθήκη για τη γεωλογική αποθήκευση CO₂ θεωρείται η ύπαρξη ενός πολύ χαμηλής διαπερατότητας στρώματος-καλύμματος (caprock) πχ. σχιστόλιθου ή κάποιου άλατος, το οποίο θα λειτουργεί σαν ασπίδα στην μετανάστευσή του. Αυτό κρίνεται απαραίτητο διότι το CO₂ αφού εισπνεστεί σε υπερκρίσιμη κατάσταση, μπορεί να είναι πιο επιπλεύσιμο από τα υπόλοιπα ρευστά που συνυπάρχουν στους πόρους του πετρώματος. Έτσι, το CO₂ θα διηθηθεί μέσα από τους πόρους του σχηματισμού μέχρι να φτάσει στην οροφή του όπου και θα συναντήσει ένα αδιαπέρατο πλέον στρώμα.

Τα χαμηλής διαπερατότητας εμπόδια μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: aquicludes (υδροαδιαπέρατα), τα οποία είναι πετρώματα όπως το ορυκτό άλας (halite) που είναι ουσιαστικά αδιαπέρατο, αν δεν είναι ρωγματωμένο, και aquitards (ημιυδροπερατά) τα οποία είναι πετρώματα όπως σχιστόλιθοι και πηλίτες που έχουν σημαντικό πορώδες, αλλά, λόγω του μικρού μεγέθους των πόρων αλλά και του μεγέθους των «λαιμών» μεταξύ των πόρων, έχουν πολύ χαμηλή διαπερατότητα.



Εικόνα 3.3: Στρώματα χαμηλής διαπερατότητας aquitard/aquiclude [108]

Το πορώδες των aquitards είναι συνήθως πληρωμένο με νερό. Αν το νερό αυτό εμφανίζεται ως μία συνεχής φάση μέσα στο σύστημα του πορώδους του σχηματισμού (συμπεριλαμβανομένου του νερού που περιέχει διαλυμένο CO₂) τότε μπορεί να περάσει μέσα από το πορώδες, αν και πολύ αργά, εάν υπάρξει μια διαφορά πίεσης. Το νερό μπορεί, επίσης, να μεταναστεύσει και μέσα και από τα δύο είδη σχηματισμών (aquicludes και aquitards) μέσω των ρωγματώσεων, όπως ρήγματα, εάν υπάρχουν.

Ειδικότερα, αν η γεωμετρία του υπεδάφους δεν περιέχει ρήγματα ή πτυχώσεις, τότε πρόκειται για στρωματογραφική παγίδα. Οι στρωματογραφικές παγίδες σχηματίζονται από τον διαφορετικό τρόπο που αποθέτονται σε μια περιοχή τα διαφορετικά είδη πετρωμάτων που συνθέτουν το γεωλογικό σχηματισμό.

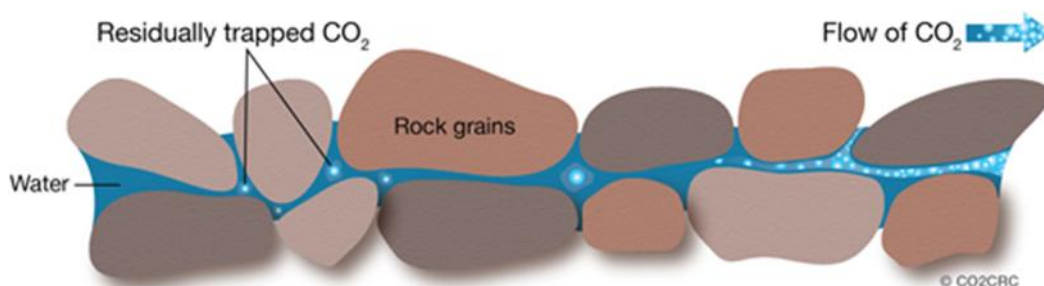
Αν όμως η παγίδευση γίνει στην κορυφή κάποιου αντίκλινου ή σε κάποιο κεκλιμένο μπλοκ ρήγματος τότε ονομάζεται φυσική παγίδευση λόγω δομής. Οι τεκτονικές παγίδες μπορεί να δημιουργηθούν από αναδιπλώσεις ή ρωγματώσεις πετρωμάτων. Τα ρήγματα, συγκεκριμένα, μπορεί να λειτουργήσουν δυνητικά είτε ως φυσικά εμπόδια, είτε ως δίοδοι για τη ροή των ρευστών υπό διαφορετικές συνθήκες.

Υδροδυναμική παγίδευση (hydrodynamic trapping)

Η υδροδυναμική παγίδευση μπορεί να συμβεί σε αλατούχους υδροφορείς που δεν είναι απομονωμένοι, αλλά τα ρευστά μεταναστεύουν με πολύ αργό ρυθμό (της τάξης των cm/χρόνο) σε μεγάλες αποστάσεις. Επειδή το CO₂ είναι λιγότερο πυκνό από το νερό του

σχηματισμού (15-20 φορές λιγότερο σε έναν αλατούχο υδροφόρο σε βάθος 1000 μ) όταν εισπνέζεται αρχικά μετατοπίζει το ρευστό αλλά έπειτα επιπλέει μεταναστεύοντας προς τα επάνω. Καθώς, λοιπόν, το CO₂ κινείται, νέο ρευστό έρχεται και το αντικαθιστά γεμίζοντας πάλι τα κενά των πόρων. Όμως, μια μικρή ποσότητα CO₂ παγιδεύεται από τριχοειδείς δυνάμεις στα κενά αυτά και σταματά να ρέει.

Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται υπολειμματική ή εναπομένουσα παγίδευση (residual trapping) και σε αυτόν οφείλεται πολλές φορές και η παγίδευση ποσοτήτων πετρελαίου για διαστήματα εκατομμυρίων χρόνων. Η εναπομένουσα παγίδευση κορεσμού παρουσιάζεται επειδή ένα μέρος της ποσότητας του εισπνιζόμενου CO₂ παραμένει πίσω, όταν η μεγαλύτερη μάζα του περνάει μέσα από το σχηματισμό αποθήκευσης. Αυτή η μικρή ποσότητα παγιδεύεται από τριχοειδείς δυνάμεις και από πολύ μικρής κλίμακας τεκτονικές ή στρωματογραφικές παγίδες (πχ ανάμεσα στους κόκκους του πετρώματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4). Ο υπολειπόμενος κορεσμός μπορεί να είναι της τάξης του 5-30% και ως εκ τούτου μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό μηχανισμό παγίδευσης, ιδιαίτερα εάν η εισπίεση γίνεται σε έναν ετερογενές σχηματισμό [33].



Εικόνα 3.4 Μηχανισμός υπολειμματικής (εναπομένουσας) παγίδευσης [120].

Επίσης, αν το CO₂ παγιδευτεί σε κάποια τεκτονική ή στρωματογραφική παγίδα στο σχηματισμό στεγανοποίησης, μακροπρόθεσμα θα διαλυθεί μέσα στο νερό του σχηματισμού και θα μεταναστεύσει μαζί του. Η σχέση μεταξύ της ποσότητας της ελεύθερης φάσης του CO₂ και της διαλυμένης ποσότητάς του υποδεικνύει το πόσο μακριά μπορεί να μεταναστεύσει έως ότου παγιδευτεί με κάποιο από τους παραπάνω τρόπους. Παράγοντες που κυρίως επηρεάζουν το μήκος της μετανάστευσης είναι η

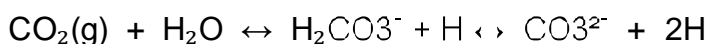
στρωματογραφική ετερογένεια (πχ ύπαρξη ιλύος, αργιλικών, γαιανθράκων κλπ), οι γεωχημικές αντιδράσεις που αναφέρονται παρακάτω καθώς και η θερμοκρασία.

3.5.2 Γεωχημική παγίδευση

Παγίδευση λόγω διαλυτοποίησης (solubility trapping)

Κατά τη διαδικασία αυτή, το CO₂ διαλύεται στο νερό του σχηματισμού και παύει να υπάρχει πλέον ως διακριτή ξεχωριστή φάση και να έχει ανοδικές τάσεις που μπορεί να το οδηγήσουν εκτός του σχηματισμού όπου στοχεύεται να αποθηκευτεί. Το ποσοστό της παγίδευσης με διάλυση εντός του αλατούχου νερού (brine) θα εξαρτηθεί από το πόσο καλά αναμιγνύεται το CO₂ με το νερό του σχηματισμού μόλις εισπνεστεί. Εάν σχηματιστεί μια συσσώρευση CO₂ και σταθεροποιηθεί σε μια θέση εντός του σχηματισμού αποθήκευσης, η διάχυση του μέσα στο νερό θα είναι ταχύτερη εάν η συσσώρευση έχει τη μορφή λεπτού στρώματος με υψηλό λόγο εμβαδού επιφάνειας ως προς τον όγκο του. Ωστόσο, τις πιο πολλές φορές, η διάλυση μπορεί να είναι αργή, της τάξης των χιλιάδων ετών [33].

Η διαλυτότητα του CO₂ στο νερό αυξάνεται όσο αυξάνει η πίεση, και μειώνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού. Όσο μεγαλύτερη ποσότητα CO₂ διαλύεται στο νερό, τόσο αυξάνει η πυκνότητά του, με αποτέλεσμα όλο μαζί το νέο μίγμα να αρχίζει να βυθίζεται προς το κάτω μέρος του σχηματισμού. Αυτό επιτρέπει στο CO₂ να διασκορπιστεί ακόμα περισσότερο μέσα στο νερό και να διαλύεται όλο και μεγαλύτερη ποσότητα. Αν, όμως, το πάχος του σχηματισμού δεν είναι μεγάλο, η περιοχή ανάμιξης τους θα είναι περιορισμένη και το ίδιο και η ποσότητα που μπορεί να διαλυθεί, καθώς ο ρυθμός διάλυσης επιβραδύνεται πολύ όταν το ρευστό κορεστεί. Η παρακάτω γεωχημική αντίδραση περιγράφει τη διαλυτοποίηση του CO₂ στο νερό των σχηματισμών [33].



Ορυκτή παγίδευση (mineral trapping)

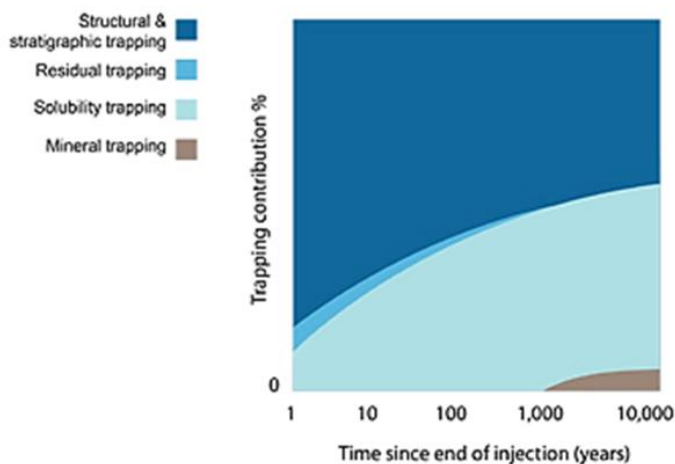
Ο τελικός μηχανισμός παγίδευσης αφορά στην ορυκτή παγίδευση. Όταν το CO₂ διαλύεται στο νερό, παράγει ένα ασθενές ανθρακικό οξύ, το οποίο σε βάθος χρόνου αντιδρά με τα ορυκτά του περιβάλλοντος πετρώματος και σχηματίζει σταθερά ανθρακικά ορυκτά. Ο σχηματισμός αυτών των ορυκτών προκύπτει από τη συνεχιζόμενη αντίδραση των διττανθρακικών ιόντων με ασβέστιο, μαγνήσιο και σίδηρο από πυριτικά ορυκτά όπως

καθορίσουν τη σχετική αναλογία με την οποία θα δράσουν οι μηχανισμοί παγίδευσης. Από την άλλη, η κίνηση του CO₂ εξαρτάται τόσο από τη δομή του ταμειυτήρα όσο και από τη σύνθεση του συστήματος πετρωμάτων και ρευστών που τον αποτελούν.

Κατά την εισπίεση, το CO₂ σχηματίζει μια «φουσαλίδα» γύρω από την γεώτρηση εκτοπίζοντας πλευρικά και κατακόρυφα τα ρευστά του σχηματισμού. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της ελεύθερης φάσης του CO₂ και του νερού δίνουν το έναυσμα ώστε να ενεργοποιηθούν οι γεωχημικοί μηχανισμοί παγίδευσης. Με τον καιρό, το CO₂ το οποίο δεν έχει ακινητοποιηθεί μέσω του μηχανισμού της εναπομένουσας παγίδευσης, θα αντιδράσει με τα επί τόπου ρευστά και θα σχηματίσει ανθρακικό οξύ μέσω της παγίδευσης λόγω διαλυτοποίησης. Αυτή η τελευταία διεργασία μπορεί να διαρκέσει δεκάδες ως εκατοντάδες χρόνια έως ότου επέλθει το επόμενο στάδιο/μηχανισμός παγίδευσης. Έχει δειχθεί ότι τα δύο αυτά είδη παγίδευσης λειτουργούν κατά κάποιο τρόπο ανταγωνιστικά. Η μεν πρώτη αποτελεί το κυρίαρχο μηχανισμό παγίδευσης σε χαμηλής διαπερατότητας υδροφόρους ορίζοντες ενώ η δεύτερη σε υψηλής διαπερατότητας υδροφόρους ορίζοντες [15].

Εντέλει, το διαλυμένο CO₂ θα αντιδράσει με τα ορυκτά του ταμειυτήρα και αν η ορυκτολογική σύνθεση το επιτρέπει, θα σχηματιστούν ανθρακικά ιόντα πχ. HCO₃. Αυτή η ονομαζόμενη ιοντική παγίδευση εκτιμάται πως διαρκεί απο εκατοντάδες ως χιλιάδες χρόνια. Περαιτέρω διάσπαση αυτών των ορυκτών μπορεί να οδηγήσει σε καταβύθιση νέων ανθρακικών ορυκτών, φέρνοντας έτσι το CO₂ στην πιο σταθερή, ασφαλή μορφή του αποθήκευσης μέσω της ορυκτολογικής παγίδευσης (δράση σε βάθος χρόνου χιλιετιών).

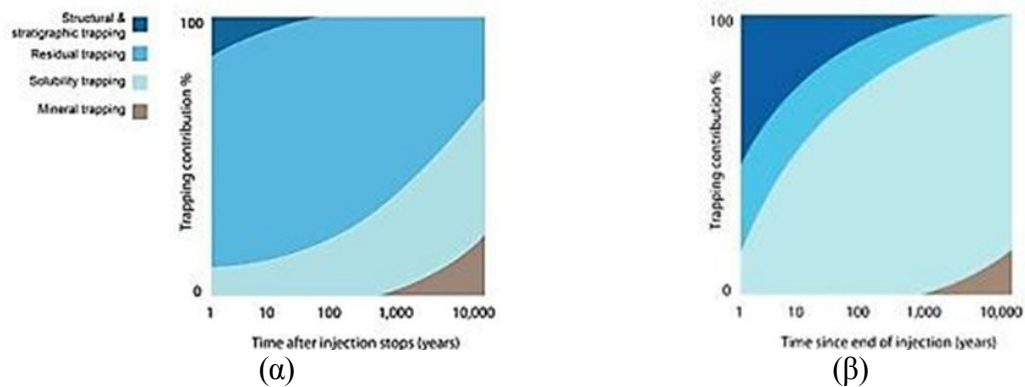
Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι συνθήκες είναι τέτοιες, που κάποιο από τα περιγραφόμενα είδη παγίδευσης επικρατεί ποσοτικά ή και χρονικά. Για παράδειγμα, στην περίπτωση εισπίεσης σε έναν ταμειυτήρα πυριτικής άμμου, ο οποίος αποτελεί μια δομική παγίδα, η δράση των μηχανισμών σε σχέση με τον χρόνο μπορεί να απεικονιστεί σχηματικά όπως στην Εικόνα 3.5. Το CO₂ θα κινηθεί στην οροφή του σχηματισμού χωρίς να αντιδράσει με τον χαλαζία και εμφανίζοντας ελάχιστη εναπομένουσα παγίδευση. Το μεγαλύτερο μέρος θα παραμείνει εκεί σε ελεύθερη μορφή με ελάχιστη ποσότητα από αυτό να διαλύεται στα ρευστά (brine) του σχηματισμού με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 3.5 Σχηματισμός όπου υπερσχύει ο μηχανισμός παγίδευσης λόγω δομής [120].

Σε άλλη περίπτωση, όπου η εισπίεση διενεργείται σε έναν μεγάλου πάχους ετερογενή αλατούχο υδροφόρο σχηματισμό με μικτά μεγέθη πόρων και χαμηλή κάθετη διαπερατότητα, η προς τα πάνω κίνηση του CO₂ θα εμποδίζεται από διάφορα επίπεδα πολύ χαμηλής διαπερατότητας. Αυτό θα δημιουργεί ένα είδος παγίδευσης λόγω δομικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού αποθήκευσης. Έτσι, η μόνη διέξοδος είναι να κινηθεί αργά με το νερό του σχηματισμού, αφήνοντας πολλά περιθώρια να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός εναπομένουσας παγίδευσης. Το υπολειπόμενο αυτό παγιδευμένο στους πόρους του πετρώματος CO₂, τελικά θα διαλυθεί στο νερό του σχηματισμού, ακολουθώντας την πορεία που φαίνεται στην Εικόνα 3.6(α).

Τέλος, εάν η εισπίεση γίνεται σε μεγάλης έκτασης αλατούχο υδροφόρο σχηματισμό μεγάλης διαπερατότητας, το CO₂ θα μετακινηθεί εύκολα προς τα πάνω και θα απλωθεί σε έκταση μόλις συναντήσει το αδιαπέρατο στρώμα. Τελικά θα διαλυθεί μέσα στον αλατούχο υδροφόρο. Εδώ το ποσοστό της εναπομένουσας παγίδευσης θα είναι πολύ μικρό και σαφώς θα υπερσχύσει ο μηχανισμός της παγίδευσης λόγω διαλυτοποίησης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.6(β).



Εικόνα 3.6: Δράση μηχανισμών παγίδευσης σε σχηματισμούς όπου υπερισχύει η εναπομένουσα παγίδευση (α), και σε σχηματισμούς όπου υπερισχύει η παγίδευση λόγω διαλυτοποίησης (β) [120].

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΕ ΕΡΓΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂

4.1 Τι ορίζεται ως κίνδυνος;

Όπως κάθε μεγάλης κλίμακας βιομηχανική δραστηριότητα, τα έργα CCS περιλαμβάνουν μια σειρά από κινδύνους. Πολλοί από αυτούς είναι παρόμοιοι με κινδύνους που συχνά απαντώνται σε βιομηχανικά ανάλογα έργα, όπως η μεταφορά και αποθήκευση του φυσικού αερίου, η υπεδιαφική διάθεση αποβλήτων κοκ.

Ο κίνδυνος ορίζεται ως η πιθανότητα εμφάνισης ενός γεγονότος με αρνητικές συνέπειες ως προς τους στόχους του έργου, επί την σοβαρότητα των συνεπειών αυτών.

Οι στόχοι ενός έργου CCS έχουν διαφορετικές πτυχές. Εκτός από το προφανές που είναι η μακροπρόθεσμη συγκράτηση του CO₂ στο υπέδαφος, μέριμνα πρέπει να δοθεί στο πώς αυτό μπορεί να γίνει με τον οικονομικότερο, ασφαλέστερο, κοινωνικά αποδεκτό τρόπο και σύμφωνα πάντα με τις ισχύουσες νομοθετικές διατάξεις και κανονιστικά πλαίσια.

4.2 Εκτίμηση κινδύνου σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂

Για τον καθορισμό και τον αποτελεσματικό συντονισμό των δραστηριοτήτων που θα εξασφαλίσουν την επίτευξη των στόχων του έργου, είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός πλαισίου αξιολόγησης κινδύνων. Αυτή η διαδικασία μπορεί να εντοπίσει και να αναδείξει,

μέσω ορισμένων βημάτων, από τα πρώτα κιόλας στάδια του έργου, ποιοι κίνδυνοι ενδεχομένως θα παρουσιαστούν, τι επιπτώσεις θα έχουν και πώς μπορούν να προληφθούν ή να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα.

Από τα πρώιμα στάδια της ανάπτυξης της έννοιας της εκτίμησης του κινδύνου σε έργα δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂, έγινε φανερό ότι προκειμένου να τύχουν δημόσιας αποδοχής τέτοια έργα δύο είναι τα βασικά στοιχεία-κλειδιά που πρέπει να αναδειχθούν/αποδειχθούν: ότι η τεχνολογία είναι ασφαλής και ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της είναι περιορισμένες.

Η ασφάλεια τέτοιων έργων, ως ένα βαθμό, μπορεί να αποδειχθεί μέσω των προγραμμάτων παρακολούθησης που εφαρμόζονται σε δοκιμαστικές εργασίες εισπίεσης CO₂ που βρίσκονται σήμερα σε εξέλιξη. Ωστόσο, ενώ τα πρώτα αποτελέσματα απ' αυτές τις εργασίες δείχνουν ότι δε συμβαίνουν διαρροές σήμερα, τα προγράμματα αυτά δεν παρέχουν κατ' ανάγκη την εμπιστοσύνη μακροπρόθεσμα, δηλαδή για χρονικά διαστήματα τάξεως πολλών δεκάδων ετών μετά το πέρας των εργασιών εισπίεσης [109].

Οι μελέτες εκτίμησης κινδύνου μπορούν να βοηθήσουν στην ανάπτυξη των προγραμμάτων παρακολούθησης για τις περιοχές εισπίεσης, στηριζόμενες σε προβλέψεις για τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του CO₂ και αξιολογώντας τη δυνατότητα ύπαρξης διαρροής, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Άλλωστε, για να εξασφαλισθεί η δημόσια αποδοχή της δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂ (CCS), πρέπει να υπάρχει εμπιστοσύνη στις προβλέψεις που γίνονται απ' αυτές τις μελέτες. Γι' αυτό ο τρόπος διεξαγωγής τους πρέπει (εκτός του να βασίζεται στην καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία) να είναι ανοικτός και διαφανής, ώστε να μπορούν τα αποτελέσματά τους να είναι πλήρως κατανοητά απ' όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη ώστε να μπορεί να γίνει πλήρης εκτίμηση των πιθανών συνεπειών του έργου για το περιβάλλον, τον άνθρωπο, την τοπική κοινωνία, κ.ο.κ.

Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται διάφορες προσεγγίσεις σχετικά με την αξιολόγηση, την ανάλυση, τον εντοπισμό και την διαχείριση του κινδύνου γενικά και ειδικά σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂, όπως η προσέγγιση κατά ISO 31000 [45], η κατά DNV 2012 [41], η κατά το πλαίσιο OSPAR [40] και τέλος, το πλαίσιο του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας για τα Αέρια του Θερμοκηπίου (IEAGHG, International Energy Agency for Greenhouse Gases) [44] το οποίο αποτελεί συγκερασμό των προαναφερθέντων

προσεγγίσεων και συνιστά τη βάση της ανάλυσης που ακολουθείται στην παρούσα εργασία.

4.3 Βασικές αρχές της Εκτίμησης του Κινδύνου (Risk assessment) σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ κατά τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA GHG)

Ο κίνδυνος, όπως ήδη αναφέρθηκε, προσδιορίζεται από την πιθανότητα εμφάνισης ενός γεγονότος που επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις σ' ένα έργο και από το μέγεθος αυτών των επιπτώσεων.

Όσον αφορά την γεωλογική αποθήκευση του CO₂, η αξιολόγηση του κινδύνου εστιάζεται, κύρια, στις δυσμενείς επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει η πιθανή διακύβευση της ακεραιότητας της αποθήκευσης, με αποτέλεσμα την διαρροή στο χώρο αποθήκευσης. Αυτό με την σειρά του επιφέρει πολλών ειδών επιπτώσεις, για παράδειγμα κινδύνους για τη δημόσια υγεία, τα οικοσυστήματα, τη διαρροή εκπομπών CO₂ πίσω στην ατμόσφαιρα, οικονομικές απώλειες για το έργο, κοκ.

Η Εκτίμηση του Κινδύνου μπορεί, λοιπόν, εκ νέου να οριστεί ως η επαναληπτική διαδικασία της αναγνώρισης, εκτίμησης και μετριασμού των κινδύνων και αποτελείται από τις εξής συνιστώσες.

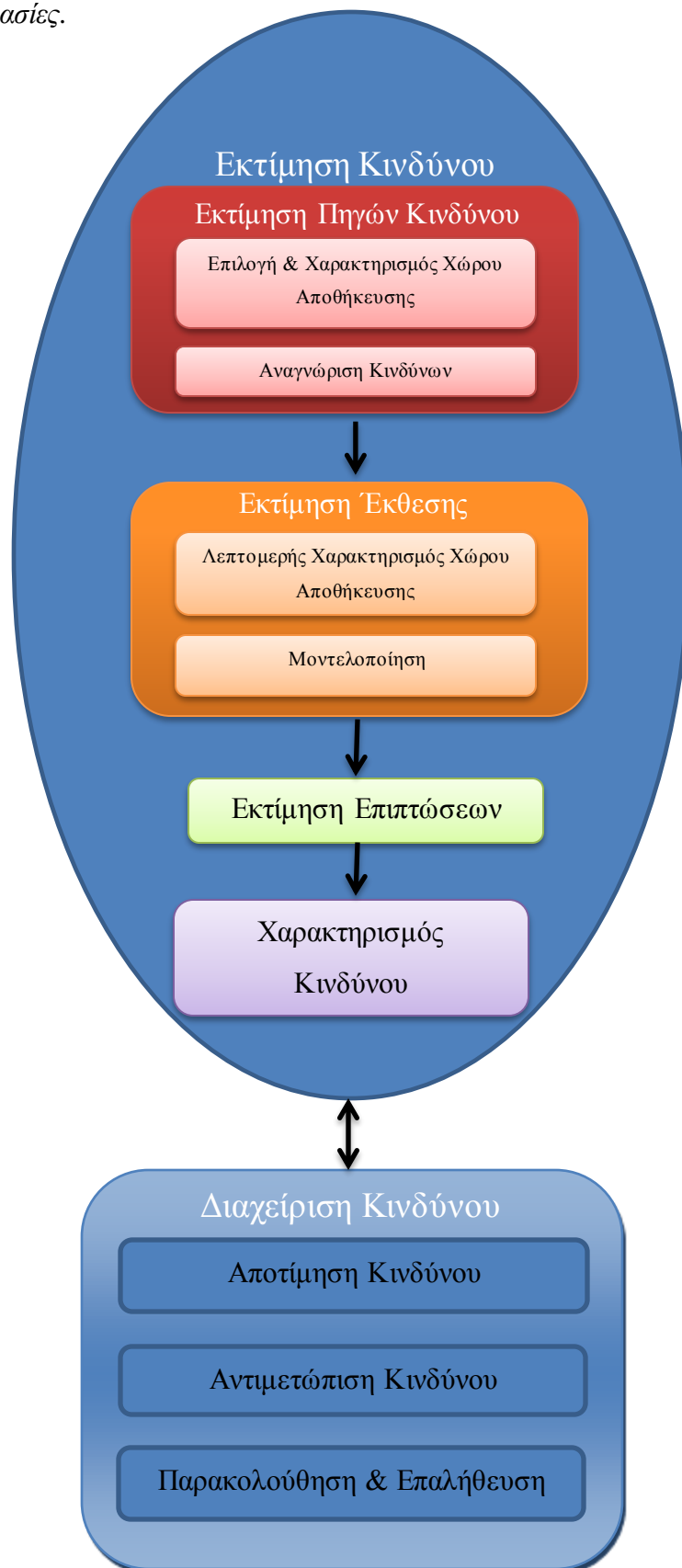
α) η εκτίμηση των πηγών του κινδύνου (*risk source assessment*), η οποία περιλαμβάνει την επιλογή και τον χαρακτηρισμό των χώρων της αποθήκευσης και την αναγνώριση των πιθανότερων κινδύνων.

β) η εκτίμηση της έκθεσης (*exposure assessment*), η οποία περιλαμβάνει τον λεπτομερέστερο χαρακτηρισμό του υπεδάφους του χώρου αποθήκευσης και τη μοντελοποίηση του.

γ) η εκτίμηση των επιπτώσεων (*effects assessment*) των κινδύνων στους ανθρώπους, τα οικοσυστήματα και τους υδροφόρους ορίζοντες.

δ) ο χαρακτηρισμός επικινδυνότητας (*risk characterization*), ο οποίος ενσωματώνει τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω συνιστωσών και δίνει την πιθανότητα εμφάνισης δυσμενών επιπτώσεων λόγω του έργου.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής της Εκτίμησης του Κινδύνου για την ανάπτυξη έργων εμπορικής κλίμακας γεωλογικής αποθήκευσης, όπου διαφαίνονται οι επιμέρους διαδικασίες.

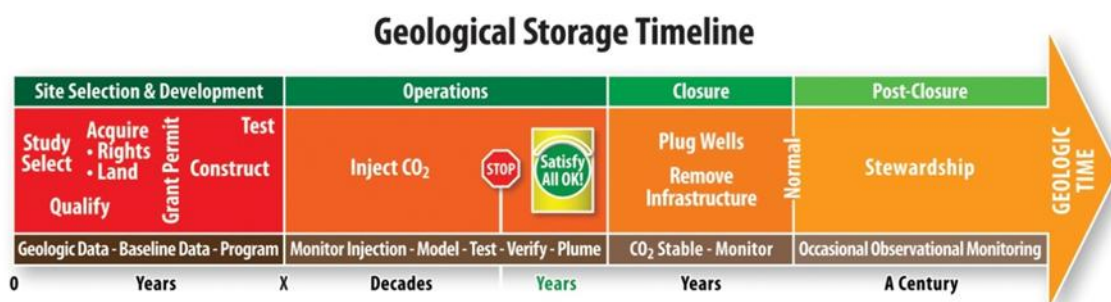


Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Εκτίμησης Κινδύνου σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ (τροποποιημένο από International Energy Agency GHG)[44]

Η εκτίμηση του κινδύνου σαν διαδικασία έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά. Το ένα, όπως ήδη επισημάνθηκε, είναι ο επαναληπτικός της χαρακτήρας καθ' όλη τη διάρκεια του έργου. Το άλλο είναι το ότι διενεργείται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το στάδιο και τις ανάγκες του έργου στο οποίο εφαρμόζεται.

Για παράδειγμα, στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης του έργου, εφαρμόζεται ποιοτικού τύπου ανάλυση (δεδομένου ότι μπορεί να μην υπάρχουν πολλά δεδομένα διαθέσιμα) ώστε να γίνει η επιλογή των χώρων αποθήκευσης. Στο επόμενο, όμως, στάδιο που θα διενεργηθεί λεπτομερής χαρακτηρισμός των επιλεγμένων χώρων, μπορεί η μορφή της ανάλυσης να είναι ποσοτική και να δώσει εκτιμήσεις σχετικά με τις πιθανότητες και επιπτώσεις των κινδύνων, που να φέρουν μικρό βαθμό αβεβαιότητας.

Ως εκ τούτου κρίνεται σωστό να εξετάζεται η διαδικασία της αξιολόγησης του κινδύνου σε σχέση με τις φάσεις που συνιστούν τον κύκλο ζωής ενός έργου αποθήκευσης CO₂. Ένα έργο γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ εξελίσσεται σε τρεις κύριες φάσεις: την φάση της Ανάπτυξης (Development ή Pre-Operation Phase), της Εισπίεσης (Injection ή Operation Phase) και τη φάση μετά την Εισπίεση (Post-Injection ή Post-Operation Phase), όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Χρονολόγιο Φάσεων ενός έργου γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ [62]

(1) Φάση Ανάπτυξης ή Φάση πριν τη Λειτουργία

Σε αυτό το στάδιο διεξάγεται ο έλεγχος (screening) και επιλογή (selection) των πιθανών χώρων αποθήκευσης μιας δεδομένης περιοχής ώστε να αναπτυχθεί μετέπειτα το σχέδιο των γεωτρήσεων της εισπίεσης του CO₂ (well engineering plan). Αυτό μπορεί να διαρκέσει 3 ως 5 χρόνια [110] και οι πληροφορίες που θα συγκεντρωθούν, καθώς και το γενικό πλάνο του έργου που θα αναπτυχθεί σε αυτό το στάδιο (το οποίο περιλαμβάνει το

σχέδιο των γεωτρήσεων, την περιβαλλοντική μελέτη επιπτώσεων κοκ) θα χρησιμοποιηθούν για την αίτηση χορήγησης της άδειας αποθήκευσης ώστε να προχωρήσει η κατασκευή των εγκαταστάσεων του έργου.

Η πρώτη αξιολόγηση του κινδύνου η οποία θα γίνει σε αυτό το στάδιο, θα έχει τη μορφή την αξιολόγησης της απόδοσης του χώρου αποθήκευσης μακροπρόθεσμα. Δηλαδή, ποια θα είναι η αναμενόμενη συμπεριφορά του συστήματος της αποθήκευσης, βάσει των δεδομένων/πληροφοριών που έχουν αποκτηθεί για το χώρο αποθήκευσης. Θα αναπτυχθούν γεωλογικά μοντέλα για το συγκεκριμένο χώρο αποθήκευσης και θα δημιουργηθεί μια βάση αναφοράς (baseline monitoring) πάνω στην οποία θα σχεδιαστεί η παρακολούθηση του έργου.

(2) Φάση Εισπίεσης ή Φάση Λειτουργίας

Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την κατασκευή και την προετοιμασία του έργου, καθώς και την εισπίεση του CO₂ στον αποθηκευτικό χώρο και η διάρκεια του κυμαίνεται από 30 έως 50 χρόνια. Καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του έργου απαιτείται αναθεώρηση της άδειας αποθήκευσης, βάσει της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2009/31/EK για τα έργα CCS. Η επανεξέταση της άδειας μελετά εάν η διαχείριση του χώρου αποθήκευσης είναι σε συμμόρφωση με τους όρους της άδειας. Αυτό γίνεται με την επανάληψη διαδικασιών όπως ο χαρακτηρισμός του χώρου, η αξιολόγηση του κινδύνου, η παρακολούθηση και η επαλήθευση βραχυπρόθεσμων προβλέψεων της απόδοσης του συστήματος (short term performance assessment), οι οποίες πρέπει να συνάδουν με τις αρχικές μακροπρόθεσμες προβλέψεις.

(1) Φάση μετά την Εισπίεση

Αυτή η τελική φάση του έργου αποθήκευσης διακρίνεται σε δύο στάδια: το στάδιο του Κλεισίματος (site closure), όπου έχει σταματήσει η εισπίεση και γίνεται ο παροπλισμός της εγκατάστασης και το στάδιο μετά το Κλείσιμο, όπου συμπεριλαμβάνεται και η περίοδος μετά την μεταφορά ευθύνης του έργου από τον ανάδοχο στην αρμόδια εθνική αρχή (3).

4.4 Εκτίμηση πηγών κινδύνου (Risk source assessment)

4.4.1 Επιλογή και χαρακτηρισμός χώρων αποθήκευσης (Site Selection and characterization)

Η ανάλυση και αξιολόγηση των δεδομένων μιας περιοχής η οποία φέρει σχηματισμούς και συνθήκες πιθανά κατάλληλες για να εφαρμοστεί ένα μεγάλης κλίμακας έργο γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ είναι μια διαδικασία η οποία εξελίσσεται σταδιακά, κυρίως κατά την πρώτη φάση της ανάπτυξης του έργου. Σαν διαδικασία, όμως, έχει επαναληπτικό χαρακτήρα και διεξάγεται καθ' όλη την διάρκεια ζωής του έργου ώστε να συμπεριλάβει τα νέα δεδομένα που προκύπτουν, μέσα από αλληλένδετες διαδικασίες όπως είναι ο χαρακτηρισμός του χώρου, οι μοντελοποιήσεις και ο χαρακτηρισμός των κινδύνων που ενέχει.

Η φύση των δεδομένων που μελετώνται σ' έναν υποψήφιο χώρο αποθήκευσης ποικίλει (γεωλογικά, κοινωνικά, οικονομικά κοκ), όπως και η ποσότητα και ο βαθμός επεξεργασίας τους σε κάθε στάδιο του έργου.

Έλεγχος περιοχών αποθήκευσης (Site Screening)

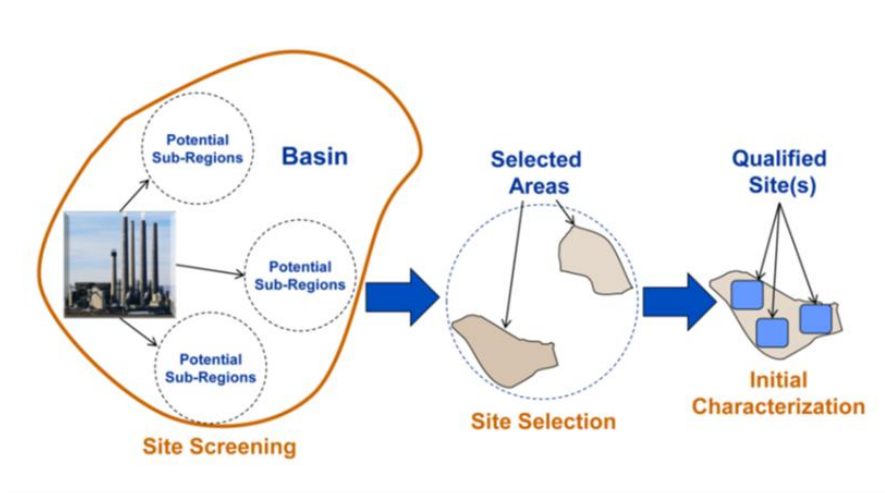
Ο σκοπός του σταδίου του Ελέγχου (Screening) είναι να αξιολογήσει τα υπάρχοντα σύνολα δεδομένων για μια περιοχή, και να εντοπίσει πιθανούς χώρους αποθήκευσης εντός καθορισμένων υποπεριοχών. Η αρχική αξιολόγηση που διεξάγεται κατά το στάδιο αυτό, αξιολογεί τις δυνητικά κατάλληλες υποπεριοχές (sub-regions) μέσω της ανάλυσης του κάθε στοιχείου που τις χαρακτηρίζει. Αυτά τα στοιχεία είναι γεωλογικά, κοινωνικά στοιχεία της περιοχής και στοιχεία που αφορούν το περιβάλλον που συνορεύει με τον εν δυνάμει χώρο της αποθήκευσης (proximity data). Το αποτέλεσμα είναι μια σειρά από επιλεγμένες περιοχές, οι οποίες στη συνέχεια κατατάσσονται με βάση κριτήρια που έχουν ήδη καθοριστεί. Οι περιοχές με την υψηλότερη κατάταξη επιλέγονται προς περαιτέρω διερεύνηση στο επόμενο στάδιο.

Προκειμένου το κόστος σ' αυτό το στάδιο να διατηρείται στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο, η αξιολόγηση θα πρέπει να βασίζεται σε άμεσα προσβάσιμες και αξιόπιστες πηγές δεδομένων (πχ ακαδημαϊκές πηγές, εθνικές γεωλογικές έρευνες και στοιχεία από κρατικές επιτροπές για τη διαχείριση των φυσικών πόρων -υδάτων, πετρελαίου, φυσικού αερίου κοκ).

Επιλογή χώρων αποθήκευσης (Site selection)

Ο σκοπός αυτού του σταδίου είναι η περαιτέρω αξιολόγηση των περιοχών που επιλέχθηκαν προηγουμένως (λόγου χάρη στην ευρύτερη γεωγραφική περιοχή μιας λεκάνης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1) και η ανάπτυξη μιας σύντομης λίστας των χώρων αποθήκευσης που πληρούν τις προϋποθέσεις και κρίνονται κατάλληλοι για να γίνει ένας πρώτος χαρακτηρισμός τους (initial characterization). Η επιλογή των χώρων αποθήκευσης χρησιμοποιεί τα υπάρχοντα δεδομένα και αναλύσεις από το προηγούμενο στάδιο του έλεγχου (screening) και τα εμπλουτίζει ώστε να αξιολογήσει τόσο τεχνικά όσο και μη τεχνικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων περιοχών. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής: γεωλογικά δεδομένα του υπεδάφους, κανονιστικές απαιτήσεις, δεδομένα από μοντελοποιήσεις, λοιπά δεδομένα του χώρου αποθήκευσης καθώς και το κοινωνικό πλαίσιο.

Δημιουργείται ένα Σχέδιο Ανάπτυξης (site development plan) για κάθε επιλεγμένο χώρο και εκτιμάται, βάσει αυτού, και η οικονομική βιωσιμότητα του υπό μελέτη έργου.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση της σχέσης των σταδίων Ελέγχου, Επιλογής και Χαρακτηρισμού ενός χώρου γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ [38]

α) Ανάλυση βασικών γεωλογικών δεδομένων

Τα στοιχεία που πρέπει να εξετάζονται σε μια ενδεχομένως κατάλληλη περιοχή για την αποθήκευση CO₂, όσον αφορά τη φύση της γεωλογίας της, αφορούν στα ακόλουθα:

- Μελέτη πιθανών σχηματισμών εισπίεσης, η οποία περιλαμβάνει την ανάλυση γεωλογικών χαρτών για τον προσδιορισμό της λιθολογικής και στρωματογραφικής φύσης των σχηματισμών της περιοχής, του πάχους των ζωνών εισπίεσης, του πορώδους και της διαπερατότητας.. Αναλύονται, επίσης, διαγραφίες (logs) από γεωτρήσεις, πετροφυσικά δεδομένα και χάρτες σεισμικότητας.
- Αξιολόγηση επαρκούς βάθους των σχηματισμών ώστε να επιτυγχάνονται συνθήκες ύπαρξης του CO₂ σε υπερκρίσιμη κατάσταση και η αποθήκευση καθίσταται οικονομικά αποδοτικότερη και ασφαλέστερη εφόσον δεν έρχεται σε επαφή με υδροφόρους/ πηγές πόσιμων υδάτων.
- Μελέτη ύπαρξης συστήματος περιορισμού/εγκλεισμού (confining system) το οποίο πρέπει να περιβάλλει τη ζώνη εισπίεσης και να αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλου πάχους και αδιαπέρατους που να επεκτείνονται επαρκώς πλευρικά ώστε να εξασφαλίζουν την συγκράτηση της εισπνεζόμενης μάζας του CO₂. Πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στοιχεία που αφορούν το πέτρωμα- κάλυμμα του σχηματισμού αποθήκευσης, τις γεωτρήσεις που το διαπερνούν, τα γεωλογικά ρήγματα και την σεισμική δραστηριότητα της περιοχής, καθώς επίσης την ύπαρξη σχηματισμών χαμηλής διαπερατότητας (πχ σχιστόλιθος ή αλατούχα πετρώματα), τις πιέσεις που επικρατούν, καθώς και τις γεωχημικές/γεωμηχανικές διεργασίες που ενδεχομένως λαμβάνουν χώρα.

Σχηματισμοί εισπίεσης

Η ζώνη εισπίεσης είναι ένας γεωλογικός σχηματισμός, ή ομάδα σχηματισμών ή και μέρος ενός σχηματισμού επαρκούς έκτασης, πάχους, πορώδους και διαπερατότητας ώστε να φιλοξενήσει την εισπνεζόμενη μάζα του CO₂ και με τον απαιτούμενο ρυθμό εισπίεσης [43]. Πρόκειται για σχηματισμό στόχο (target formation) στον οποίο θα εισπνεστεί το CO₂ και θα αποθηκευτεί κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, συμπεριλαμβανομένης και της περιόδου μετά το πέρας των εργασιών εισπίεσης. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που κρίνονται αποδεκτοί για την εισπίεση και γεωλογική αποθήκευση του CO₂, έχουν αναλυθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 2. Κάθε τύπος παρουσιάζει τα δικά του πλεονεκτήματα αλλά και προκλήσεις όσον αφορά ένα έργο αποθήκευσης.

Ο φορέας του έργου θα πρέπει να αναπτύξει ένα αρχικό στρωματογραφικό και διαρθρωτικό πλαίσιο, δεδομένης της ετερογένειας του υπεδάφους. Η ανάλυση θα πρέπει να περιλαμβάνει (τουλάχιστον) την ανάπτυξη μιας στρωματογραφικής στήλης της

περιοχής που να περιλαμβάνει τους πιθανούς τύπους αποθήκευσης, τις ζώνες απομόνωσης, τους χάρτες που να παρουσιάζουν τη δομή και το πάχος τους (structure and isopach maps), τεκτονικούς και στρωματογραφικούς χάρτες, την κλίση τους (reservoir dip), καθώς και άλλα δεδομένα όπως η λιθολογία, το πορώδες, η διαπερατότητα και οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν.

Στο πλαίσιο αυτής της ανάλυσης, θα συσχετιστούν δεδομένα που θα ληφθούν μέσω των γεωτρήσεων από την διαδικασία αξιολόγησης του σχηματισμού (formation evaluation), απ' όλη την περιφέρεια των περιοχών που περιβάλλουν τη ζώνη ενδιαφέροντος. Μ' αυτό τον τρόπο θα χαρτογραφηθούν οι οροφές και οι βάσεις των στρωμάτων των γνωστών σχηματισμών της περιοχής. Ο βαθμός εμπιστοσύνης αυτού του πλαισίου εξαρτάται από την ποιότητα και την ποσότητα των διαθέσιμων δεδομένων.

Τυχόν υπάρχοντα σεισμικά δεδομένα στην ευρύτερη περιοχή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικύρωση αυτού του πλαισίου. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα σεισμικά δεδομένα, συνιστάται η αγορά ή απόκτησή τους αφού μια περιοχή επιλεγεί για περαιτέρω αξιολόγηση.

Επαρκές βάθος σχηματισμού αποθήκευσης

Για τη μεγιστοποίηση του δυναμικού της αποθήκευσης, το σύνολο της ζώνης εισπίεσης θα πρέπει να είναι σε μεγάλο βάθος ώστε το CO₂ να αποθηκεύεται υπό υπερκρίσιμες συνθήκες. Αυτό επιτυγχάνεται σε βάθος τουλάχιστον 800 μέτρων κάτω από την επιφάνεια, σε 88,3 βαθμούς F ελάχιστη θερμοκρασία, και σε 1,071.3 psi ελάχιστη πίεση. Σ' αυτό το συνδυασμό θερμοκρασίας και πίεσης, το CO₂ έχει τέτοια πυκνότητα που θυμίζει υγρή φάση και οι τιμές της κυμαίνονται περίπου, μεταξύ 31 και 50 λίβρες ανά κυβικό πόδι (δηλ. 500 έως 800 κιλά ανά κυβικό μέτρο). Ο όγκος του CO₂, από την άλλη, είναι σημαντικά μειωμένος σε σύγκριση με την αέρια φάση του σε μικρότερο βάθος. Αυτός ο συνδυασμός παραμέτρων εξασφαλίζει την αποτελεσματική αξιοποίηση του υπόγειου χώρου αποθήκευσης.

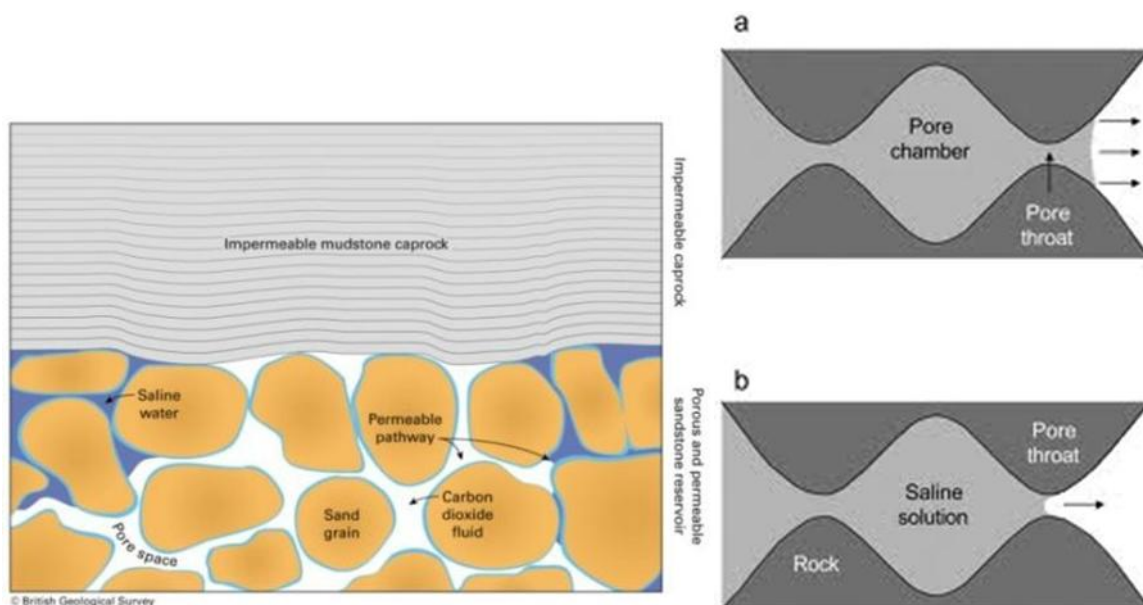
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να κριθούν κατάλληλοι σχηματισμοί που βρίσκονται σε μικρότερο βάθος και οι συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές για να παγιδευτεί το CO₂ σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Για παράδειγμα, το γερμανικό πρόγραμμα Ketzin βρίσκεται σε βάθος που το CO₂ μέσα στο σχηματισμό αποθήκευσης βρίσκεται σε συνθήκες που βρίσκονται στα όρια αλλαγής των φάσεων. Σε

άλλες περιπτώσεις, μπορεί να επιλεγθεί για την αποθήκευση μια αποσυμπιεσμένη δεξαμενή αερίου, όπως πχ ένα εξαντλημένο πεδίο εξόρυξης φυσικού αερίου. Η χαμηλή πίεση του παρέχει εύκολη αποθήκευση υπό συνθήκες υψηλής απομόνωσης, ωστόσο το CO₂ θα επανέλθει στην αέρια φάση μόλις εισέλθει στον ταμειυτήρα αποθήκευσης.

Σύστημα περιορισμού (πέτρωμα/κάλυμμα)

Η σημασία της ύπαρξης ενός συστήματος περιορισμού ως πέτρωμα κάλυμμα (caprock) έχει ήδη επισημανθεί. Είναι κρίσιμης σημασίας η παρουσία ενός συστήματος απομόνωσης που αποτελείται από μία ή περισσότερες ζώνες περιορισμού, ικανές σε μεγάλο βαθμό να ανακόψουν ή να επιβραδύνουν τους ρυθμούς της ανοδικής μετανάστευσης των ρευστών του περιβάλλοντος όπου γίνεται η εισπίαση του CO₂, όπως φαίνεται στη Εικόνα 4.2.

Οι ζώνες περιορισμού αποτελούνται, συνήθως, από λεπτόκοκκα πετρώματα (πχ σχιστόλιθοι και άργιλοι, ή κρυσταλλικά πετρώματα (πχ. στρώματα αλατούχων σχηματισμών, ανυδρίτες). Οι μικροί «λαιμοί» μεταξύ των πόρων αυτών των πετρωμάτων, παρέχουν ένα τριχοειδή φραγμό (capillary barrier) που δεν επιτρέπει την είσοδο του CO₂ μέσα στο σύστημα των πόρων. Γι αυτό η ροή μέσω τέτοιων πετρωμάτων περιορίζεται στη διάχυση (diffusion). Παραδείγματα κατάλληλων σχηματισμών που μπορούν να αποτελέσουν ζώνες περιορισμού και απομόνωσης, περιλαμβάνουν αποθέσεις σχιστόλιθου και μεγάλου πάχους στρώματα εβαποριτών, όπως γύψος ή αλάτια [11].



Εικόνα 4.2 :Μικροδομή συστήματος πετρώματος – ρευστών.

Η έκταση, το πάχος, η λιθολογία, το πορώδες, η διαπερατότητα και η τριχοειδής πίεση, είναι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την ακεραιότητα του συστήματος περιορισμού και πρέπει όσο το δυνατόν να προσδιορίζονται. Επίσης, πρέπει να διενεργείται ανάλυση των ρηγμάτων και πτυχώσεων των σχηματισμών (faulting and folding) με βάση την τεκτονική της περιοχής και τα στοιχεία από τις γεωτρήσεις.

Η ανάλυση των υπάρχοντων γεωλογικών δεδομένων μπορεί να παράσχει πληροφορίες σχετικά με την παρουσία ή μη περιοριστικής ζώνης(-ών) στην περιοχή, συμπεριλαμβανομένου του τύπου του σχηματισμού, του βάθους, του πάχους, και της πλευρικής έκτασης του.

β) Ανάλυση Γειτνιάζουσας Περιοχής

Μια ακόμα συνιστώσα του χώρου αποθήκευσης που πρέπει να εξετάζεται, αφορά την αξιολόγηση των περιφερειακών δεδομένων της περιοχής ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχουν περιορισμοί εκτός των υπεδαφικών γεωλογικών χαρακτηριστικών, που μπορεί να αποτελέσουν ανασταλτικό παράγοντα ή να καταστήσουν απαγορευτική την ανάπτυξη ενός έργου αποθήκευσης CO₂. Τέσσερα (4) χαρακτηριστικά μιας περιοχής αποτελούν τα ελάχιστα ως προϋπόθεση για να κριθεί κατάλληλος ένας χώρος για περαιτέρω αξιολόγηση.

❖ Προστατευόμενες και ευαίσθητες περιοχές

Πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την προστασία της γης, του αέρα και του νερού κατά τη διάρκεια της χωροθέτησης, ανάπτυξης, λειτουργίας και κλεισίματος του έργου αποθήκευσης σε κάθε περίπτωση. Στο αρχικό στάδιο του Ελέγχου όμως, πρέπει να διεξάγεται προσεκτική εξέταση στα περιβαλλοντικά ευαίσθητα χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής του έργου. Οι προστατευόμενες και ευαίσθητες περιοχές όπως οι υγρότοποι, τα εθνικά πάρκα, οι ιστορικοί χώροι και οι βιότοποι ευαίσθητης πανίδας, απαιτούν πρόσθετα μέτρα για την προστασία τους. Ως εκ τούτου, είναι σκόπιμο να εξαιρεθούν στο στάδιο αυτό ή να υπάρξει μια διαβούλευση με τις αντίστοιχες ρυθμιστικές αρχές σχετικά με πρόσθετες απαιτήσεις.

Υπάρχει μια σειρά από μεθόδους για την επιτυχή ανάπτυξη παρόμοιων υποδομών στη βιομηχανία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου σε τέτοιες περιοχές, αλλά απαιτούν προσεχτικούς χειρισμούς, οι οποίοι σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτούν επιπλέον χρόνο και κόστος για το έργο. Πρέπει, λοιπόν, σε αυτό το πρώιμο στάδιο, ο φορέας του έργου να

προσδιορίσει, αξιολογήσει, και να προετοιμάσει ένα σχέδιο μετριασμού των επιπτώσεων για την αντιμετώπιση των προστατευόμενων ειδών της περιοχής.

❖ Πληθυσμιακά κέντρα

Η παρουσία ενός κέντρου πληθυσμού κοντά σε μια υποψήφια τοποθεσία δεν είναι ένας λόγος, εξαρχής, απόρριψης ενός πιθανού χώρου αποθήκευσης. Ωστόσο, υπάρχει μια σειρά από ζητήματα που πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά όταν αυτός γειτνιάζει με μια πυκνοκατοικημένη περιοχή. Αυτά περιλαμβάνουν τις προκλήσεις που συνδέονται με την απόκτηση άδειας για τις δραστηριότητες του χαρακτηρισμού του χώρου, τα δικαιώματα εκμετάλλευσης του χώρου, των πόρων (pore space), καθώς και την προσβασιμότητα του δικτύου των αγωγών μεταφοράς του CO₂.

Τα παραπάνω ζητήματα μπορεί να οδηγήσουν σε καθυστερήσεις του έργου και αύξηση του κόστους τόσο στην ανάπτυξη του όσο και μελλοντικά. Επομένως είναι προτιμότερο να αποφεύγονται περιοχές που είναι κοντά σε αστικά κέντρα, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες για δαπάνες για την ανάπτυξη του έργου σε μια περιοχή όπου η γη αξιολογείται ως πολυτιμότερη και οι πιθανότητες καταβολής αποζημίωσης αυξάνονται δεδομένης της εγγύτητας σε μια αστική περιοχή.

❖ Υπαρξη άλλων εκμεταλλεύσεων/κοιτασμάτων

Η ανάπτυξη ενός έργου γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ κοντά σε υφιστάμενες εκμεταλλεύσεις πόρων υδρογονανθράκων έχει διττό χαρακτήρα. Από τη μία η ύπαρξή τους μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το υπέδαφος με ελάχιστη επένδυση χρόνου και κεφαλαίου, από την άλλη κάθε γεώτρηση που περνά μέσα από τη ζώνη εισπίεσης αποτελεί υποψήφια οδό διαρροής του CO₂. Για παράδειγμα, οι γεωτρήσεις παραγωγής υδρογονανθράκων που δεν έχουν τσιμεντωθεί μεταξύ της ζώνης παραγωγής και του περιβλήματος της επιφάνειας, μπορεί να δημιουργήσουν διόδους μετανάστευσης του CO₂ στα ανώτερα γεωλογικά στρώματα πάνω από τον ταμιευτήρα. Για το λόγο αυτό, απαιτείται προσεκτική ανάλυση όλων των υφιστάμενων υποδομών (υπόγειων και επιφανειακών), ώστε να προσδιοριστεί ο βαθμός στον οποίο η παρουσία τους μπορεί να επηρεάσει το έργο της αποθήκευσης.

Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι η βιομηχανία πετρελαίου εξελίσσεται, οι νέες τεχνολογίες επιτρέπουν την εκμετάλλευση πόρων που θεωρείτο είτε τεχνικά μη εφικτή, είτε οικονομικά ασύμφορη. Είναι απαραίτητη, λοιπόν, η περιφερειακή ανάλυση όλων των

υφιστάμενων κοιτασμάτων και η διερεύνηση της πιθανότητας μελλοντικά να καταστούν εκμεταλλεύσιμα. Λοιπές εκμεταλλεύσεις ορυκτών πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη για τους ίδιους λόγους.

❖ *Σύστημα των αγωγών*

Κατά την διάρκεια του σταδίου Ελέγχου, πρέπει να αξιολογείται η εγγύτητα του χώρου αποθήκευσης σε ένα ήδη υπάρχον σύστημα αγωγών ή σε περιοχή όπου να μπορέσουν να αποκτήσουν «δικαίωμα» για την εγκατάσταση του συστήματος μεταφοράς.

Στις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις αγωγών πρέπει να αξιολογηθούν χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος, η χωρητικότητά τους και η ηλικία τους. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι πολλοί υπάρχοντες αγωγοί είναι πιθανό να κριθούν ακατάλληλοι για μετατροπή της χρήσης τους στο να μεταφέρουν CO₂ σε υπερκρίσιμη κατάσταση, λόγω των περιορισμών της πίεσης και πιθανώς, λόγω των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένοι.

Εάν δεν υπάρχει καθόλου υποδομή αγωγών, είναι προτιμότερο να επιλεγθούν περιοχές με σχηματισμούς που μπορούν να αποτελέσουν χώρους αποθήκευσης, οι οποίες θα βρίσκονται πλησιέστερα στην πηγή δέσμευσης του CO₂ και δεν θα χρειάζεται ένα εκτεταμένο δίκτυο αγωγών για την μεταφορά του. Δεδομένου, όμως, ότι το κόστος μειώνεται ανά μονάδα όγκου που αποθηκεύεται, περιοχές με μεγάλο δυναμικό αποθήκευσης μπορούν να συμβάλουν στη γρήγορη απόσβεση του κόστους κατασκευής του συστήματος αγωγού μεταφοράς και συνεπώς να προτιμηθούν έστω και αν απέχουν αρκετά από την πηγή δέσμευσης.

❖ *Ανάλυση Κοινωνικού Πλαισίου*

Σ' αυτό το στάδιο, στόχος είναι να αναπτυχθεί ένα επικοινωνιακό πλάνο και να τεθεί μια βάση επικοινωνίας με τις τοπικές κοινότητες που γειτνιάζουν με τις πιθανές τοποθεσίες που θα επιλεγούν για ένα έργο αποθήκευσης. Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις που έχει η κοινή γνώμη σχετικά με τα σχέδια ιδιοκτησίας της γης, την προσέγγιση γύρω από χώρους όπως αγροτεμάχια, τουριστικές περιοχές κοκ και πώς επηρεάζονται βάσει αυτών οι αδειοδοτήσεις και εγκρίσεις που απαιτούνται για το έργο. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα εφαρμογών CCS που είτε καθυστέρησαν είτε ματαιώθηκαν λόγω της εναντίωσης της κοινής γνώμης σε μια περιοχή, για παράδειγμα:

- το έργο της *Vattenfall στο Spremburg της Γερμανίας*, το οποίο απέβλεπε στην δέσμευση και αποθήκευση έως και περίπου 100.000 μετρικών τόνων CO₂ από μονάδα καύσης άνθρακα. Παρά τη θετική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, υπήρχε ανησυχία από τους κατοίκους της περιοχής για διαρροή του CO₂ και πρόκληση βλαβών στη δημόσια υγεία.
- ένα έργο US\$92.8 εκατ. δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα στην πόλη *Greenville του Οχάιο* το οποίο ήρθε αντιμέτωπο με τους φόβους των τοπικών αξιωματούχων (και τουλάχιστον μία ομάδα πολιτών) ως προς τη μείωση των αξιών των ακινήτων.

Παρόμοια παραδείγματα τέτοιων έργων που είτε ματαιώθηκαν, είτε αναβλήθηκαν υπάρχουν πολλά, ορισμένα από αυτά αναφέρθηκαν και στο πρώτο κεφάλαιο (παράγραφος 1.6)

Παρακάτω θα αναπτυχθούν κάποια στοιχεία, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει κατανοητό πώς μια κοινότητα ενδέχεται να αντιμετωπίσει ένα τέτοιο έργο, ποιες στρατηγικές μπορεί να αναπτύξει ο φορέας του έργου ώστε να έχει με το μέρος του την κοινή γνώμη, και ποιά είναι τα πιθανά αναμενόμενα οφέλη ή και κίνδυνοι του έργου για την κοινότητα. Πρόκειται για προκαταρκτικό κοινωνικό χαρακτηρισμό του έργου, ο οποίος θα επεκταθεί και στα μετέπειτα στάδιά του.

Φαινόμενο NIMBY (Not In My Back Yard)

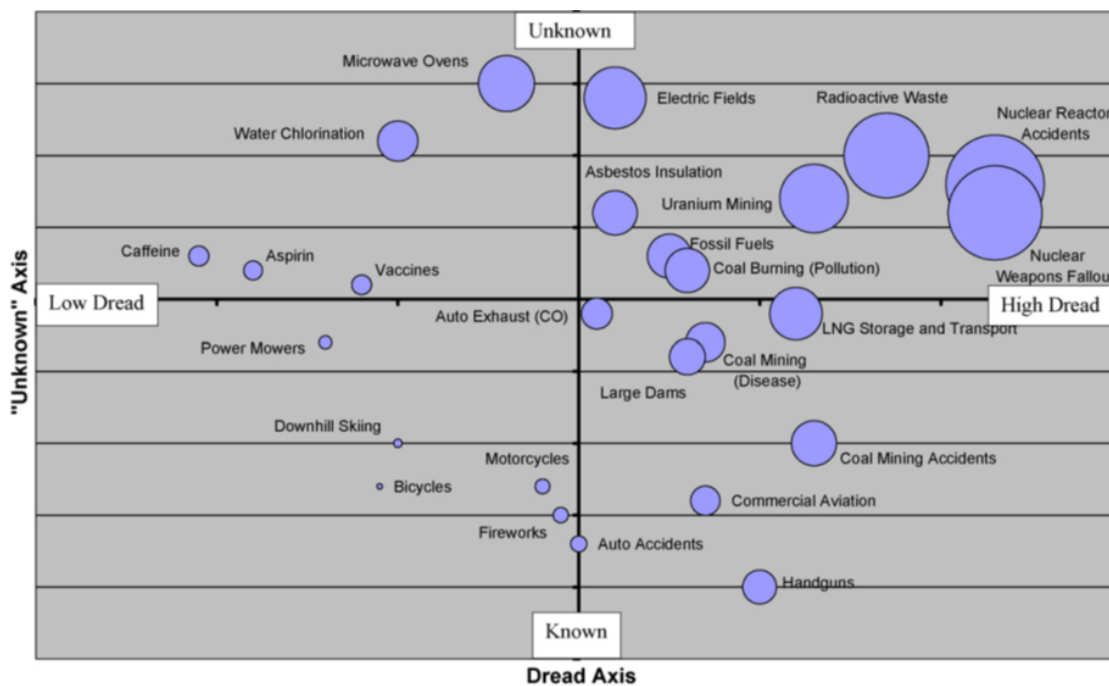
Το φαινόμενο NIMBY χαρακτηρίζει περιπτώσεις όπου το ευρύτερο κοινό αποδέχεται μια τεχνολογία και τα οφέλη της, αλλά η τοπική κοινωνία δε θέλει να αποδεχτεί το κόστος για αυτήν (οικονομικό, κοινωνικό) από τις εγκαταστάσεις της εκάστοτε μονάδας στην περιοχή της. Σαν όρος το NIMBY έχει συνδεθεί πολύ με τις τεχνολογίες CCS, καθώς ο συνδυασμός τους χρησιμοποιείται ευρέως τόσο από την επιστημονική κοινότητα, όσο και από την πολιτική και τους φορείς χάραξης πολιτικής για να εξηγήσουν την αρνητική αντίδραση των τοπικών κοινωνιών.

Η γενική δημόσια αντιμετώπιση δεν πρέπει να συγχέεται με τη στάση του τοπικού πληθυσμού ως προς τις τεχνολογίες CCS και πιο συγκεκριμένα τα έργα αποθήκευσης του CO₂. Ο πληθυσμός αυτός τις περισσότερες φορές διχάζεται ανάμεσα σε δύο ανταγωνιστικές θέσεις: την επιθυμία για την απασχόληση και την οικονομική ανάπτυξη στην τοπική κοινωνία, και τις ανησυχίες σχετικά με την πιθανή διαρροή CO₂ από τον τόπο

αποθήκευση και την εν δυνάμει οικολογική ζημιά. Στη περίπτωση των CCS μπορούν να προσμετρηθούν, ως επιπλέον θετικό στοιχείο, τα αναγνωρισμένα παγκόσμια οφέλη της εφαρμογής τους στην καταπολέμηση του μείζονος θέματος της κλιματικής αλλαγής, το οποίο δεν αφήνει περιθώριο σε καμία κοινωνία να ισχυριστεί πως μένει ανεπηρέαστη.

Για την προσέγγιση-αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η δημόσια αντίληψη σχετικά με τον κίνδυνο που αφορά τα έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂. Σε αυτό μπορεί να συμβάλει η μελέτη της αντίληψης του κινδύνου με τη χρήση ψυχομετρικών μοντέλων. Αυτά τα μοντέλα αναπτύχθηκαν αρχικά στη δεκαετία του 1980, με έρευνες όπου ζητούνταν από τους συμμετέχοντες να αξιολογήσουν μια σειρά από κινδύνους ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους και την επικινδυνότητά τους [46]. Ο κίνδυνος ορίζονταν βάσει δύο διαστάσεων, του «φόβου» που προκαλούσε και του πόσο «άγνωστος» θεωρούνταν. Βάσει αυτών των παραμέτρων φτιάχεται ένα διάγραμμα κατάταξης διαφόρων κινδύνων (Εικόνα 4.3).

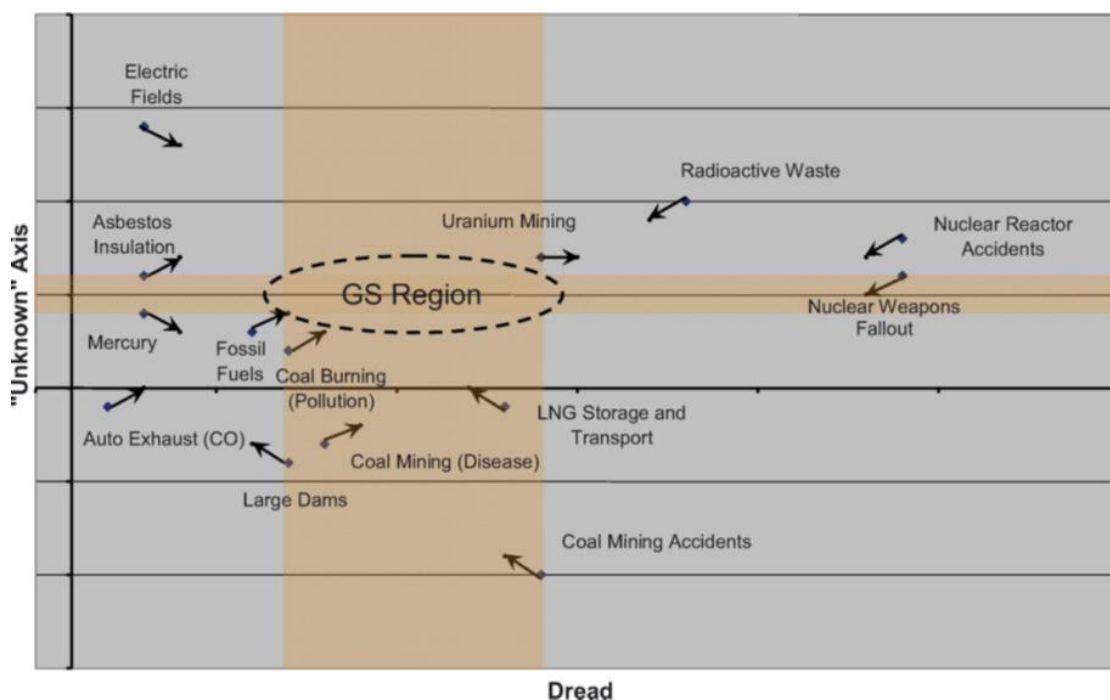
Με παρόμοιο τρόπο, καθίσταται δυνατόν να γίνει μια κατάταξη των κινδύνων της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂ μέσω της σύγκρισης τους με άλλους γνωστούς ήδη μετρημένους κινδύνους. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την πιθανή δημόσια αντίδραση στην τεχνολογία CCS και να γίνει κατανοητό το πώς η κοινή γνώμη αντιλαμβάνεται τις πληροφορίες σχετικά με αυτήν (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.3: Ψυχομετρικό διάγραμμα διαφόρων κινδύνων [46].

Στην Εικόνα 4.3 η διάσταση του «αγνώστου» αποτελεί τον κάθετο άξονα, και του «φόβου» που προκαλεί ο κίνδυνος τον οριζόντιο. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται καθημερινοί κίνδυνοι (πχ. καφεΐνη, φούρνος μικροκυμάτων, πυροτεχνήματα κοκ) έως κίνδυνοι από την βαριά βιομηχανία (καύση ορυκτών καυσίμων, εξόρυξη ουρανίου, πυρηνικοί αντιδραστήρες κοκ). Η αντίληψη του κοινού ως προς τον κίνδυνο υποδεικνύεται από το μέγεθος του σημείου (μεγαλύτερος κίνδυνος απεικονίζεται με μεγαλύτερο κύκλο). Το κοινό είναι πολύ πιο πρόθυμο να αποδεχθεί τους κινδύνους στο κάτω αριστερό τμήμα του γραφήματος, διστακτικό σε κινδύνους που θεωρεί «αγνώστους» έστω και αν δεν δημιουργούν μεγάλο φόβο (πάνω αριστερά τμήμα) και κρατά αρνητική στάση έναντι των κινδύνων που τοποθετούνται στο πάνω δεξιά τεταρτημόριο.

Αντίστοιχα στην Εικόνα 4.4 απεικονίζεται το πάνω δεξιά τεταρτημόριο του ψυχομετρικού πλαισίου. Η σκιασμένη περιοχή στο διακεκομμένο κύκλο απεικονίζει την γεωλογική αποθήκευση (Geological Storage) του CO₂ και φαίνεται ότι η δημόσια αντίληψη την κατατάσσει στο ίδιο επίπεδο με μια σειρά υφιστάμενων τεχνολογιών που φέρουν μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η γεωλογική αποθήκευση θεωρείται περίπου το ίδιο «επικίνδυνη» με την εξόρυξη ουρανίου, τα ραδιενεργά απόβλητα και περισσότερο «επικίνδυνη» από την αποθήκευση φυσικού αερίου και αρκετά πιο επικίνδυνη από τα ατυχήματα κατά την εξόρυξη γαιανθράκων.



Εικόνα 4.4 : Σύγκριση της γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ με άλλους βιομηχανικούς κινδύνους.

[46].

Δημογραφικές τάσεις

Οι δημογραφικές τάσεις μιας περιοχής μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση του κοινωνικού της πλαισίου. Η συλλογή δεδομένων περιοχών μπορεί να γίνει μέσω ιστοσελίδων που επικεντρώνονται σε δημογραφικά δεδομένα (πχ βάση δεδομένων Απογραφής του κράτους), ακαδημαϊκά περιοδικά και εκθέσεις, από τα τοπικά μέσα ενημέρωσης, από βάσεις δεδομένων οικονομικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων κοκ. Αυτή η διαδικασία μπορεί να βοηθήσει στο να απαντηθεί το κατά πόσο η ανάπτυξη του έργου αντιστρατεύεται τις προσδοκίες της τοπικής κοινωνίας.

Χρήσεις γης

Είναι σημαντικό να αξιολογείται η χρήση της γης και το περιβαλλοντικό ιστορικό των περιοχών που εξετάζονται. Τα στοιχεία που πρέπει να εξετάζονται είναι κυρίως τα εξής: 1) Αν στην περιοχή αναπτύσσεται βιομηχανική δραστηριότητα, 2) Αν η τοπική κοινωνία είναι εξοικειωμένη με εργασίες όπως η διάνοιξη γεωτρήσεων, η διεξαγωγή ερευνών, η κατασκευή του αγωγού κλπ, 3) Αν υπάρχει ισχυρή γεωργική παρουσία στην περιοχή, και 4) Εάν υπάρχουν περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές ή περιοχές που έχουν υποστεί παλιότερα κάποιο πλήγμα από παρόμοιες βιομηχανικές δραστηριότητες.

❖ Λοιπά δεδομένα καταλληλότητας του χώρου αποθήκευσης

Μερικά ακόμα στοιχεία που υποδεικνύουν την καταλληλότητα ενός χώρου για την εφαρμογή του έργου της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂, είναι τα ακόλουθα:

- Η υποδομή του χώρου αποθήκευσης: Περιλαμβάνεται η αξιολόγηση της αναγκαίας υποδομής του έργου, συμπεριλαμβανομένης αυτής που απαιτείται για την συμπίεση, μεταφορά του CO₂, την παρακολούθηση (monitoring) και τις γεωτρήσεις. Διεξάγεται, επίσης, και μελέτη σκοπιμότητας για τους αγωγούς μεταφοράς, όσον αφορά το κόστος τους, τη χωροθέτησή τους και την αδειοδότηση για την διάνοιξη διαδρομών (Right of Ways).
- Ο προσδιορισμός της περιοχής αξιολόγησης (Area of Review): Εκτίμηση του δυναμικού επιφανείας και των θεμάτων ιδιοκτησίας του χώρου των πόρων. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι και συνιστάται να χρησιμοποιείται σειρά μεθόδων για τον καθορισμό της περιοχής που πρέπει να καλυφθεί στην παρούσα ανάλυση. Τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων θα πρέπει να εξετάζονται ως προς τις

επιπτώσεις στην AoR τόσο των πιέσεων, όσο και της μετανάστευσης της μάζας του CO₂.

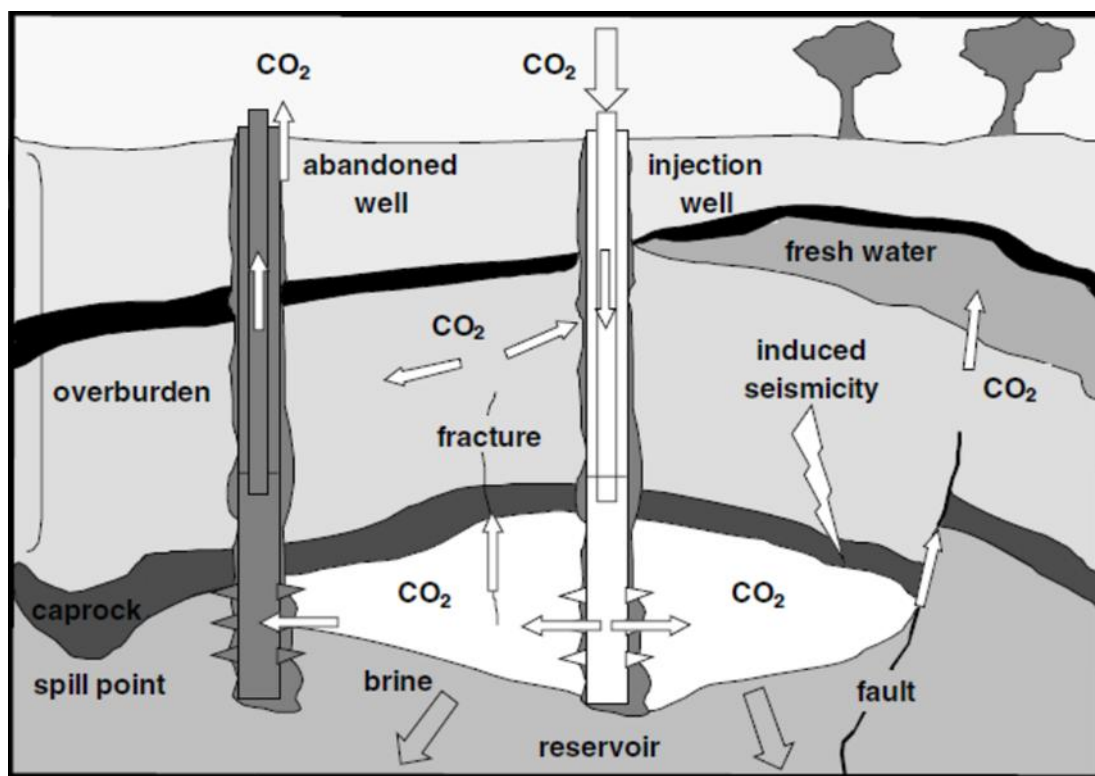
- Ο προσδιορισμός θεμάτων προσβασιμότητας της επιφάνειας: Αξιολόγηση των πιθανών ζητημάτων της επιφάνειας, που θα πρέπει να περιλαμβάνει ένα σχέδιο αντιμετώπισης πιθανών δυσκολιών στην προσβασιμότητα του χώρου και σε περιβαλλοντικά ζητήματα. Διεξάγεται, επίσης, εκτίμηση των επιπτώσεων του έργου (π.χ., οικονομικού χαρακτήρα, κοινωνικές κοκ) τα αποτελέσματα της οποίας ενσωματώνονται στα κριτήρια κατάταξης των χώρων αποθήκευσης πριν τον λεπτομερέστερο χαρακτηρισμό τους.
- Η εξέταση του ιδιοκτησιακού καθεστώτος του χώρου των πόρων: Αξιολόγηση των κανόνων ιδιοκτησίας του χώρου των πόρων για τις επιλεγμένες περιοχές (πχ. μεταλλευτικά δικαιώματα). Χρησιμοποιούνται και τα αποτελέσματα της εκτίμησης της περιοχής αξιολόγησης (AoR) για να αξιολογηθεί ο αριθμός των ιδιοκτητών του χώρου των πόρων που αναμένεται να επηρεαστούν από την μετανάστευση της εισπνεζόμενης μάζας του CO₂.

4.4.2 Αναγνώριση κινδύνων (Risk identification)

Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς μπορούν να καταταχθούν στις ακόλουθες εξής 5 κατηγορίες [26]:

1. Διαρροή CO₂: αφορά την μετανάστευση του CO₂ από τον στοχευμένο χώρο αποθήκευσης προς άλλους σχηματισμούς και τελικά εν δυνάμει στην ατμόσφαιρα.
2. Διαρροή CH₄: αφορά την μετανάστευση του CH₄ λόγω της εκτόπισης του από το εισπνεζόμενο CO₂.
3. Προκαλούμενη σεισμικότητα: αφορά την εκδήλωση (μικρο)σεισμικών δονήσεων, που προκαλούνται από την εισπίεση του CO₂.
4. Εδαφική μετατόπιση: αφορά την καθίζηση ή ανύψωση της επιφάνειας της γης, ως συνέπεια των μεταβολών της πίεσης που προκαλείται από την εισπίεση του CO₂
5. Μετακίνηση ρευστών: αφορά την μετακίνηση της άλμης και άλλων ρευστών του σχηματισμού εξαιτίας της εισπίεσης CO₂ , ιδιαίτερα προς ανοιχτούς υδροφόρους ορίζοντες.

Οι κίνδυνοι αυτοί απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5: Σχηματική απεικόνιση των κινδύνων που σχετίζονται με την υπεδιαφική αποθήκευση του CO₂. [26]

Διαρροή CO₂

Όταν εισπνέζεται το CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς, μπορεί να μεταναστεύσει από τον ταμιευτήρα, μέσω του υπεδάφους, στους πλευρικούς υπερκείμενους σχηματισμούς και στη συνέχεια προς την ατμόσφαιρα ή και την βιόσφαιρα. Πέραν της διαρροής στην ατμόσφαιρα, το CO₂ μπορεί να μετακινηθεί και προς άλλους σχηματισμούς. Η μετανάστευση του μπορεί να αλλάξει τη χημική σύνθεση των υπόγειων υδατικών πόρων, είτε άμεσα (με τη διάλυση του στο νερό, προκαλώντας επακόλουθη διάλυση άλλων ανόργανων και οργανικών υλικών), είτε έμμεσα (με την κινητοποίηση και τη μεταφορά στοιχείων μέρους του γεωλογικού συστήματος στα υπόγεια ύδατα). Επίσης, η μετανάστευση του μπορεί να επηρεάσει άλλους γειτονικούς ταμιευτήρες, όπως για παράδειγμα να μολύνει έναν ταμιευτήρα φυσικού αερίου επηρεάζοντας την καθαρότητά του [48].

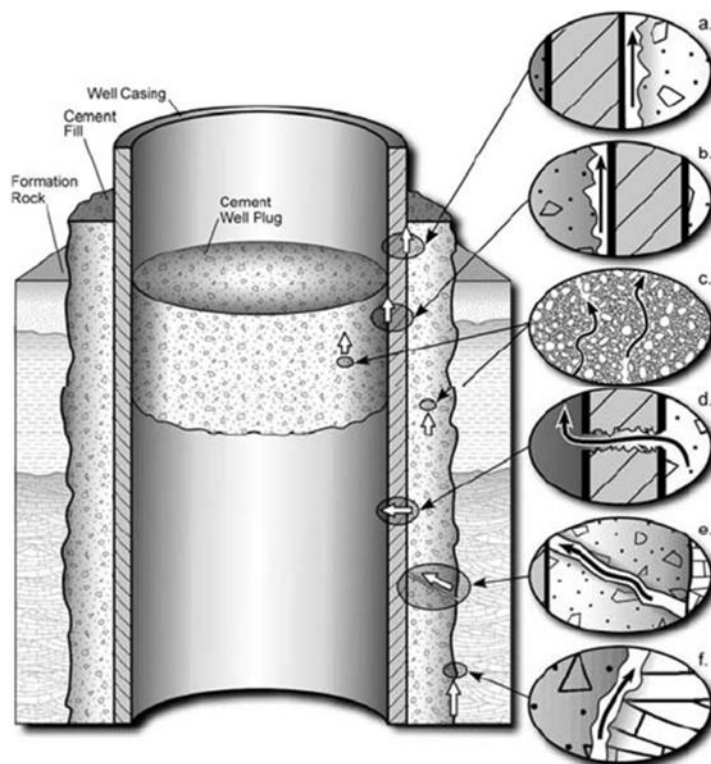
Μηχανισμοί διαρροής CO₂

Το δυναμικό μιας ενδεχόμενης διαρροής του CO₂ εξαρτάται τόσο από την ακεραιότητα των γεωτρήσεων όσο και από το πέτρωμα/κάλυμμα (caprock), καθώς και τους μηχανισμούς παγίδευσης που δρουν στο εκάστοτε περιβάλλον αποθήκευσης.

Οι γεωτρήσεις αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο κίνδυνο διαρροής. Είναι σύνηθες φαινόμενο η μετανάστευση του CO₂ μέσα από τη γεώτρηση (διάκενο μεταξύ σωλήνωσης και τοιχωμάτων του σχηματισμού σε μη τσιμεντωμένα τμήματα) ή μέσω τμημάτων της γεώτρησης που δεν έχουν σωληνωθεί ή η σωλήνωση είναι χαμηλής ποιότητας [20]. Αυτά παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 4.6.

Με την παρουσία του νερού, το CO₂ γίνεται όξινο. Με την αύξηση της πίεσης ή της μάζας του CO₂ που εισπνέζεται προς αποθήκευση, αυξάνει η υγρή του φάση, καθώς διαλύεται στο νερό μειώνοντας το pH του. Έτσι ουσιαστικά το CO₂ δρα σαν ανθρακικό οξύ, διαβρώνοντας υλικά όπως το τσιμέντο και ο χάλυβας [27]. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την ακεραιότητα της τσιμεντώσεως της γεώτρησης, αν και μερικοί τύποι τσιμέντου μπορεί να σχηματίσουν ένα προστατευτικό στρώμα ανθρακικής σύστασης (carbonate) που θα εμποδίζει την περαιτέρω υποβάθμιση του τσιμέντου. Η εταιρεία Schlumberger, για παράδειγμα, έχει αναπτύξει ένα νέο, ανθεκτικό στη διάβρωση που προκαλεί το CO₂ [110]. Το τσιμέντο αυτό περιέχει μειωμένη ποσότητα τσιμέντου Portland και η δοκιμή έδειξε ότι εμφανίστηκε ενανθράκωση, αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα και πιο ομοιογενώς [27].

Ο κίνδυνος διαρροής μέσω εγκαταλελειμμένων γεωτρήσεων είναι ανάλογος προς τον αριθμό τους, το βάθος τους και την μέθοδο σφραγίσματος που χρησιμοποιήθηκε για την εγκατάλειψή τους. Σε μερικές περιπτώσεις, ο αριθμός των γεωτρήσεων σε γειτνίαση μπορεί να είναι μεγάλος. Για παράδειγμα, στην Αλμπέρτα στον Δ. Καναδά, όπου έχουν διανοιχθεί παραπάνω από 350.000 γεωτρήσεις. Η διάχυση του CO₂ μέσα από το τσιμέντο ή τη σωλήνωση, είναι γενικά μια πολύ αργή διαδικασία, (της τάξης των 20 cm ανά 100 yr) [17]. Όμως η σταδιακή αποικοδόμηση της τσιμεντώσεως μπορεί να επηρεάσει τη διαπερατότητα του τσιμέντου και να αυξήσει τα ποσοστά διαρροής στο χρόνο.



Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση των πιθανών οδών διαφυγής μέσα από μια γεώτρηση [27] (a) διαφυγή μεταξύ σωλήνωσης και τσιμεντώσης (b) διαφυγή μεταξύ σωλήνωσης και τσιμεντώσης μιας εγκαταλελειμμένης γεώτρησης (c) διαφυγή διαμέσου των πόρων του τσιμέντου (d) διαφυγή διαμέσου ρωγμών της σωλήνωσης (e) διαμέσου ρωγμών της τσιμεντώσης (f) διαφυγή μεταξύ τσιμεντώσης και τοιχώματος της γεώτρησης.

Τυχόν απότομη και ανεξέλεγκτη διαρροή CO₂ από τη γεώτρηση (blowout) μπορεί να ανιχνευτεί και αντιμετωπιστεί από το σύστημα αποτροπής εκρήξεων (BOP) με αποτέλεσμα την σφράγιση της γεώτρησης και τη σταδιακή και ελεγχόμενη εξισορρόπηση του πηγαδιού [47].

Η πιθανότητα διαρροής CO₂ μέσω κάποιου ρήγματος, γενικά, θεωρείται μικρότερη απ' ό τι διαμέσου των γεωτρήσεων, δεδομένου ότι διενεργείται προσεχτική επιλογή και χαρακτηρισμός του χώρου αποθήκευσης πριν την έναρξη των εργασιών εισπίεσης. Αυτή η άποψη ενισχύεται από τις παρατηρήσεις σε χώρους που εκ φύσεως φιλοξενούν CO₂ (φυσικά ανάλογα) όπως επίσης και από τη δράση των μηχανισμών παγίδευσης οι οποίοι σε βάθος χρόνου μειώνουν την πιθανότητα εμφάνισης διαρροών [48].

Διαρροή CH₄

Η εισπίεση CO₂ σε εξαντλημένους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, στρώματα γαιάνθρακα και βαθείς αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή μεθανίου και ελαφρών αλκανίων (alkanes), τα οποία βρίσκονται πάντα στους δύο πρώτους ταμιευτήρες και πιο σπάνια σε βαθείς υδροφόρους [26]. Το μεθάνιο έχει μεγαλύτερη κινητικότητα από το CO₂ και είναι πιο επικίνδυνο όταν συγκεντρώνεται σε περιορισμένους χώρους. Όπως γίνεται κατανοητό, λοιπόν, η διαρροή του μπορεί να επιφέρει πολλές επιπτώσεις παγκόσμιες και τοπικές, γι αυτό πρέπει να αντιμετωπίζεται με την ίδια σοβαρότητα όπως και μια πιθανή διαρροή του εισπνεζόμενου CO₂.

Προκαλούμενη Μικρο-Σεισμικότητα

Η εισπίεση μεγάλων ποσοτήτων ρευστού σε έναν ταμιευτήρα, αυξάνει την πίεση των πόρων και έτσι τροποποιεί τα υφιστάμενα πεδία τάσεων. Μικρές αυξήσεις της πίεσης δίπλα σε πιθανά ρήγματα, μειώνουν τις τριβές αυξάνοντας τις πιθανότητες ολίσθησης τους (fault slip) [69]. Έτσι προκαλείται διάρρηξη ή και ενεργοποίηση ρηγμάτων και μπορεί να εμφανιστούν φαινόμενα μικροσεισμικότητας ή δυνητικά και καταστροφικές σεισμικές δονήσεις. Πιθανά να προκληθούν ζημιές/αστοχίες στο πέτρωμα κάλυμμα και τις γεωτρήσεις και να προκληθούν διαρροές CO₂ και ζημιές σε κτίρια και υποδομές.

Είναι γνωστό εδώ και μισό αιώνα ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες σε υπόγειους χώρους μπορεί να αυξήσουν την πιθανότητα πρόκλησης μικρο-σεισμών. Η προκαλούμενη σεισμικότητα εμφανίζεται σε διάφορα πεδία, όπως η εξόρυξη υδρογονανθράκων, η απόθεση υγρών αποβλήτων με εισπίεση και η υπεδαφική αποθήκευση φυσικού αερίου [34].

Η κύρια ανησυχία επικεντρώνεται στη ζημιά που μπορεί να υποστεί η ακεραιότητα του καλύμματος του ταμιευτήρα λόγω μετρίου ή μικρού μεγέθους προκαλούμενων σεισμών. Παρόλα αυτά, σε περιπτώσεις όπως το Weyburn στα 11 χρόνια έρευνας και εργασιών εισπίεσης βιομηχανικής κλίμακας (σχεδόν 2,8 εκατ. τόνους «νέου» CO₂ ετησίως και πάνω από 5 εκατομμύρια τόνους ετησίως, αν συμπεριληφθούν και οι ανακυκλούμενοι) δεν έχει διαπιστωθεί καμία ενεργοποίηση ή δημιουργία ρήγματος και το κάλυμμα του ταμιευτήρα παραμένει άθικτο (Dr. Malcolm Wilson, Petroleum Technology Research Centre (PTRC)).

Συμπερασματικά, ο κίνδυνος της προκαλούμενης σεισμικότητας από την αποθήκευση CO₂ μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τον έλεγχο της πίεσης της εισπίεσης. Δυσκολίες θα

υπάρξουν όταν ο χώρος αποθήκευσης βρίσκεται σε μια τεκτονικά πολύ ενεργή περιοχή (με πολλά ενεργά ρήγματα) όπως για παράδειγμα στην Ιαπωνία ή την Καλιφόρνια.

Εδαφική μετατόπιση

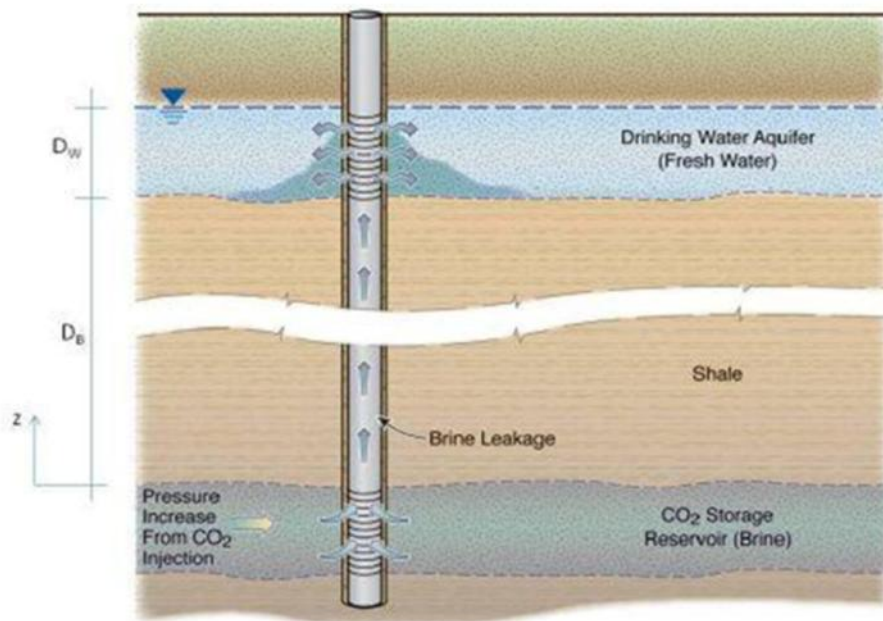
Είναι πιθανό η επιφάνεια της γης να υποστεί μικρή βύθιση ή ανύψωση λόγω των μεταβολών της πίεσης στην οποία υπόκειται κατά τις διεργασίες εισπίεσης. Αυτές οι εδαφικές παραμορφώσεις μπορεί να προκαλέσουν ζημιές σε κτίρια και υποδομές ή την σεισμικότητα που αναλύθηκε προηγουμένως.

Σε έργα αποθήκευσης CO₂ είναι ιδιαίτερα λίγες οι πιθανότητες πρόκλησης ανύψωσης του εδάφους, όσο η μέγιστη πίεση αποθήκευσης διατηρείται κάτω από την γεωστατική πίεση. Οι καθιζήσεις μπορεί, επίσης, να προκληθούν από τη χημική αντίδραση μεταξύ του CO₂ (το οποίο έχει διαλυθεί σε άλμη) και του πετρώματος του ταμιευτήρα και κατά συνέπεια, ο ταμιευτήρας υπό το βάρος των υπερκείμενων σχηματισμών μπορεί να υποστεί καθίζηση, φαινόμενο περισσότερο πιθανό σε ανθρακικά πετρώματα με υψηλό πορώδες [47].

Εκτόπιση ρευστών ταμιευτήρα

Η εισπίεση του CO₂ σε υπόγειους υδροφορείς μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση σε ανώτερους ορίζοντες του αλμυρού νερού (brine) (Εικόνα 4.7). Αυτό μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες ενέργειες και να έχει αρνητική επίδραση στην ποιότητα του εδάφους και των χρήσεων του καθώς και στα επιφανειακά νερά που χρησιμοποιούνται ως πόσιμα ή για άρδευση [34].

Επισημαίνεται ότι η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (United States Environmental Protection Agency -USEPA) ανέπτυξε πρόσφατα ένα σχέδιο κανονισμού σε συνεργασία με την Safe Drinking Water Act (SDWA), στόχος του οποίου είναι η προστασία των υπόγειων πηγών πόσιμου νερού από δραστηριότητες σχετικές με την εισπίεση ρευστών σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς [43]. Βάσει του κανονισμού αυτού, πρέπει να ορίζεται μια ευρεία περιοχή στην οποία καταγράφονται όλες οι περιπτώσεις που μπορούν να ενεργούν ως δίοδοι για την κίνηση των ρευστών εισπίεσης προς υπερκείμενους υδροφορείς, να παρακολουθούνται στενά και εάν είναι απαραίτητο, να λαμβάνονται διορθωτικά μέτρα.



Εικόνα 4.7: Σχηματική απεικόνιση της μετανάστευσης της άλμης μέσα σε μια ενεργή γεώτρηση λόγω της συμπίεσης από την εισπίεση του CO₂. [28]

4.5 Εκτίμηση της Έκθεσης στον Κίνδυνο (Exposure Assessment)

4.5.1 Αναλυτικός χαρακτηρισμός του χώρου αποθήκευσης (Detailed site characterization)

Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου επιλογής και την διεξαγωγή ενός αρχικού χαρακτηρισμού μιας, εν δυνάμει, περιοχής αποθήκευσης βάσει των υπάρχοντων δεδομένων, οι πλέον κατάλληλοι επιλεγμένοι χώροι αξιολογούνται και κατατάσσονται σε μια λίστα με βάση το μητρώο κινδύνων που έχει αναπτυχθεί στην φάση της αναγνώρισης των κινδύνων. Αυτή η κατάταξη θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη, επίσης, παράγοντες όπως το νομικό πλαίσιο, το κόστος, το χρονοδιάγραμμα του έργου, την απόδοση του συστήματος αποθήκευσης και τη δημόσια αποδοχή.

Τα κριτήρια κατάταξης μπορεί να συνοψίζονται και στη μορφή ενός πίνακα όπως ο Πίνακας 4.1[41]:

Πίνακας 4.1: Κριτήρια κατάταξης επιλεγμένων χώρων αποθήκευσης

	Χώρος 1	Χώρος 2	Χώρος 3	Χώρος 4
Κίνδυνοι HSE	1	4	2	3
Κόστος	3	2	1	4
Χρονοδιάγραμμα	4	1	2	3
Απόδοση της Αποθήκευσης	1	4	3	2

Αυτή η κατάταξη δεν βοηθά απαραίτητα στην επιλογή του προτιμώμενου χώρου αποθήκευσης, αλλά στο να αναγνωριστούν οι χώροι που φέρουν το μεγαλύτερο βαθμό κινδύνου. Όπως είναι αναμενόμενο, χώροι με φυσική ακεραιότητα, ή και με υπάρχουσες εγκαταστάσεις, προτιμώνται έναντι αυτών που χρειάζονται πολλές τεχνικές παρεμβάσεις ή περιορισμούς ώστε να καταστούν ασφαλείς.

Μετά την κατάταξη αυτή, είναι αναγκαίο να διενεργείται λεπτομερέστερος χαρακτηρισμός των χώρων. Η διάκριση ανάμεσα στον αρχικό χαρακτηρισμό και τον λεπτομερή, έγκειται στο επίπεδο της πρόσθετης χρηματοδότησης και της λεπτομέρειας της ανάλυσης του χώρου στο πλαίσιο της προετοιμασίας του για ένα εμπορικής κλίμακας έργο αποθήκευσης. Ο λεπτομερής χαρακτηρισμός θα πρέπει να περιορίζεται στους χώρους με δυνατότητες εμπορικής εκμετάλλευσης για λόγους οικονομίας, χρόνου και επενδύσεων, διότι θεωρείται η πιο χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία κατά την επιλογή του τελικού χώρου αποθήκευσης. Μπορεί να περιλαμβάνει την εκ νέου αξιολόγηση της ευρύτερης γεωλογίας, την παραγωγή νέων δεδομένων ή και την επανεπεξεργασία και παρερμηνεία των υφιστάμενων γεωλογικών, σεισμικών και τεχνικών δεδομένων, καθώς και των αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης ροής [20].

Χαρακτηρισμός του πρωτογενούς καλύμματος (caprock)

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη συλλογή στοιχείων σχετικά με το πρωτογενές κάλυμμα του χώρου αποθήκευσης και των σχετικών ιδιοτήτων του που σχετίζονται με την στεγανοποίηση της αποθήκευσης. Σε περιοχές όπου το κάλυμμα απομόνωνε δεσμευμένους υδρογονάνθρακες (κάλυμμα σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων), η μελέτη επικεντρώνεται στο χαρακτηρισμό των γεωμηχανικών ιδιοτήτων του και την ύπαρξη πιθανών ρηγμάτων.

Για τα πρωτογενή καλύμματα άλλων πιθανών σχηματισμών αποθήκευσης (που δεν έχουν καμία απόδειξη ότι έχουν/περιείχαν υδρογονάνθρακες), υπάρχουν μια σειρά από άλλους

δείκτες που μπορούν να επιβεβαιώσουν τις δυνατότητες συγκράτησης του CO₂. Ο πιο κοινός δείκτης είναι η διαφορά στην αλατότητα των ρευστών του σχηματισμών των υπερκείμενων και υποκείμενων στρωμάτων του καλύμματος. Αυτή η ιδιότητα διαπιστώνεται με δειγματοληψία ρευστών (πάνω και κάτω από το πέτρωμα/κάλυμμα και με μια απλή ανάλυση του επιπέδου αλατότητας και του προφίλ των περιεχομένων αλάτων) και αποτελεί απόδειξη ότι τα ρευστά των σχηματισμών δεν έρχονται σε επαφή ώστε να εξισορροπείται η αλατότητα τους. Συνεπώς αποδεικνύεται η ακεραιότητα και στεγανότητα του καλύμματος.

Δείκτης της ακεραιότητας του καλύμματος είναι και η διαφορά πίεσης ή θερμοκρασίας μεταξύ των υπερκείμενων και υποκείμενων σχηματισμών του. Αυτό είναι πιο δύσκολο να επαληθευτεί, καθώς οι θερμοκρασίες των σχηματισμών επηρεάζονται από τη διακύμανση της θερμοκρασίας της λάσπης διάτρησης (drilling mud), και την τσιμέντωση, και η αποκατάσταση της θερμοκρασιακής ισορροπίας μπορεί να πάρει χρόνο.

Εάν οι παραπάνω δείκτες δεν δώσουν θετικές ενδείξεις για την ακεραιότητα του καλύμματος, τότε μπορεί να διερευνηθεί η διαφορική συγκέντρωση ευγενών αερίων στο πέτρωμα/κάλυμμα. π.χ. Ήλιο (Helium) ή Ραδόνιο (Radon), (τα οποία δημιουργούνται στο μανδύα και μεταναστεύουν προς τα πάνω). Αυτό το είδος της ανάλυσης απαιτεί δειγματοληψία πυρήνα (core material) το οποίο πρέπει να ληφθεί με πολύ ειδικές διαδικασίες για τη διατήρηση των επί τόπου αερίων.

Η έλλειψη θετικών ενδείξεων από τους παραπάνω δείκτες δεν αποδεικνύει, απαραίτητα, ότι ένα κάλυμμα δεν μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά κατά τη γεωλογική αποθήκευση του CO₂. Δοκιμές γεωτρήσεων, οι οποίες εφαρμόζονται στα πλαίσια της αξιολόγησης του σχηματισμού (ιδιαίτερα σε χώρους αποθήκευσης φυσικού αερίου) μπορεί επίσης, να παρέχουν θετική επιβεβαίωση της στεγανότητας του καλύμματος, όπως:

1. *Οι δοκιμές άντλησης νερού:* Γίνεται εισπίεση νερού σε αλατούχους υδροφόρους σχηματισμούς μέσω της γεώτρησης για παρατεταμένες χρονικές περιόδους (περισσότερο από ένα μήνα) και παρακολουθείται η μεταβολή των πιέσεων πάνω από το κάλυμμα μέσω μιας γεώτρησης παρακολούθησης. Οποιαδήποτε διαρροή κατά μήκος του καλύμματος, ανιχνεύεται ως μεταβολή της πίεσης στα υπερκείμενα στρώματα.

2. *Κάθετες δοκιμές παρεμβολής* (vertical interference test): χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή ενός ρευστού και τη συμπεριφορά των τιμών της πίεσης σε ένα σχηματισμό που αποτελείται από δύο διαπερατές ζώνες, οι οποίες διαχωρίζονται από μια συμπαγή ζώνη χαμηλής διαπερατότητας («tight zone»).

Σε περίπτωση όπου και αυτές οι δοκιμές δεν παρέχουν θετική επιβεβαίωση της στεγανότητας του πετρώματος/καλύμματος, τότε θα πρέπει να θεωρηθεί ότι αυτό φέρει χαρακτηριστικά που εξυπηρετούν φαινόμενα διαρροής. Απαιτείται σ' αυτήν την περίπτωση να διενεργηθεί περαιτέρω χαρακτηρισμός των υπερκείμενων στρωμάτων του (δηλ. ακολουθίες των στρωμάτων και των σχηματισμών πάνω από τον στοχευμένο σχηματισμό αποθήκευσης) και να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτά μπορεί να παρέχουν δυνατότητες περιορισμού μιας πιθανής μετανάστευσης του CO₂[42].

Χαρακτηρισμός ήδη υπαρχόντων γεωτρήσεων

Ενδεχομένως σε έναν χώρο αποθήκευσης να υπάρχουν παλαιότερες γεωτρήσεις από προηγούμενες δραστηριότητες παραγωγής υδρογονανθράκων. Αυτές οι γεωτρήσεις δεν πρέπει εκ των προτέρων να θεωρηθεί ότι αποτελούν κίνδυνο για την ακεραιότητα του έργου της αποθήκευσης. Είναι απαραίτητο όμως να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και να προσδιοριστούν [41]:

1. ποιες απ' αυτές διατρέχουν το συγκρότημα αποθήκευσης,
2. ποιες, γειτνιάζουσες σε αυτές τις γεωτρήσεις, περιοχές του σχηματισμού αποθήκευσης αναμένεται να υποβληθούν σε υψηλές τιμές ή μεγάλες διαβαθμίσεις τιμών πίεσης,
3. ποιες από αυτές αποτελούν μέρος μιας αναγνωρισμένης οδού διαρροής ή πιθανά να εμφανίσουν διαρροή,
4. τα μέγιστα επίπεδα όγκου CO₂ που μπορεί να διαρρεύσουν από μια τέτοια γεώτρηση,
5. σε ποιες κατηγορίες ανήκουν οι γεωτρήσεις αυτές (πχ. γεωτρήσεις που χρειάζονται ή όχι μετατροπές για να χρησιμοποιηθούν ασφαλώς, γεωτρήσεις που επιβάλλεται να σφραγιστούν και να παρακολουθηθούν πριν ξεκινήσουν οι εργασίες εισπίεσης κλπ).

Συνιστάται η διεξοδική μελέτη όλων των διαθέσιμων αρχείων των υφιστάμενων γεωτρήσεων, στο πλαίσιο του χαρακτηρισμού του χώρου αποθήκευσης, καθώς και η

ποιοτική αξιολόγηση των κινδύνων, ώστε να προσδιοριστεί η πιθανότητα μελλοντικής διαρροής από αυτές, η οποία θα επηρεάσει την απόδοση της αποθήκευσης. Εάν δεν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα δεδομένα για την αξιολόγησή τους και επειδή η επαναδιάτρηση μιας σφραγισμένης γεώτρησης δεν είναι πάντα εύκολη και φέρει κάποιο κόστος (εκτός αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς του έργου, οπότε σαφώς συμφέρει έναντι της διάνοιξης μιας καινούργιας γεώτρησης), εναλλακτικά, η γεώτρηση μπορεί να τεθεί υπό παρακολούθηση και να προετοιμαστεί ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης (contingency plan) για την αντιμετώπιση μιας πιθανής διαρροής [42].

Εάν γεωτρήσεις διέρχονται από το πρωτογενές κάλυμμα του σχηματισμού αποθήκευσης και διεισδύουν στη ζώνη εισπίεσης, εκτός του ότι μπορεί να παρέχουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες και να τροφοδοτήσουν το χαρακτηρισμό του χώρου, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τους σκοπούς του έργου της αποθήκευσης. Αυτό, βέβαια, μπορεί να γίνει μόνο έπειτα από έλεγχο της καταλληλότητας της γεώτρησης μέσω δοκιμών της μηχανικής της ακεραιότητας (mechanical integrity tests).

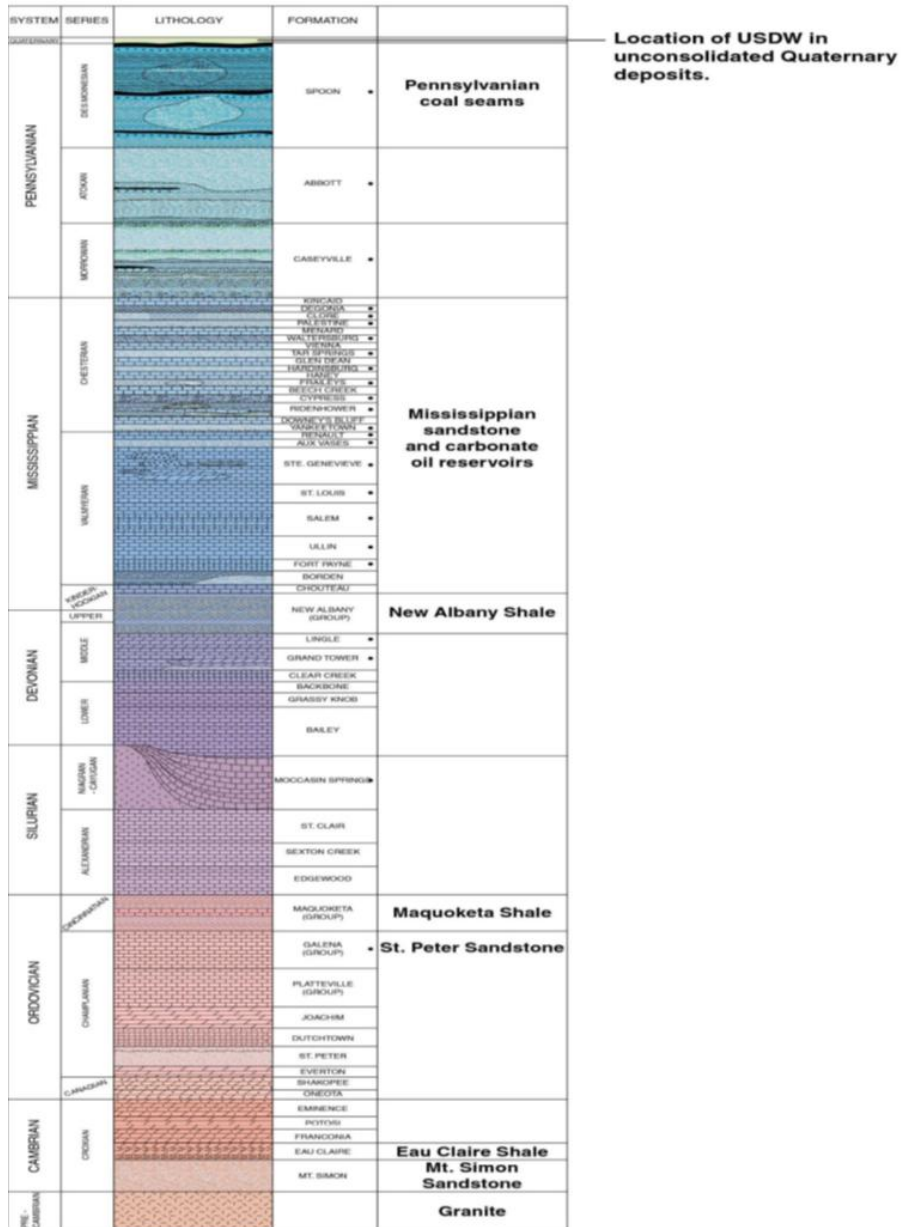
Ανάλυση δεδομένων αναφοράς (Baseline data)

Σ' αυτό το στάδιο επεκτείνεται η προηγούμενη υπεδαφική ανάλυση που διενεργήθηκε κατά την επιλογή της τοποθεσίας, ώστε να συμπεριλάβει όλα τα βασικά δεδομένα: γεωλογικά, γεωχημικά, γεωμηχανικά, υδρογεωλογικά και τις βασικές γραμμές ροής των ρευστών. Οι προηγούμενες πηγές δεδομένων περιελάμβαναν υπάρχοντα γεωλογικά και σεισμικά δεδομένα και στοιχεία από προϋπάρχουσες γεωτρήσεις (offset well logs, well cores). Τα υπάρχοντα δεδομένα δεν είναι ποτέ αρκετά για να χαρακτηριστεί επαρκώς ο χώρος αποθήκευσης. Ως εκ τούτου, ίσως χρειαστεί να διανοιχτούν νέες γεωτρήσεις ώστε να αποκτηθούν νέες διαγραφίες γεωτρήσεων (well logs) και πυρήνες (cores), δοκιμών παραγωγής (drill stem tests (DSTs), δείγματα ρευστών του σχηματισμού και να τοποθετηθούν αισθητήρες πίεσης και θερμοκρασίας. Τα στοιχεία που θα αποκτηθούν σ' αυτό το στάδιο, θα αποτελέσουν τις γραμμές αναφοράς για το σχεδιασμό των γεωτρήσεων και τον μετέπειτα σχεδιασμό και διεξαγωγή της παρακολούθησης του χώρου αποθήκευσης.

Αρχικά, πρέπει να γίνει μια ενδελεχής υπεδαφική έρευνα της ζώνης εισπίεσης, η οποία θα λειτουργήσει σα βάση για τα μοντέλα του χώρου και η οποία πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον: μια στρωματογραφική/log στήλη (Εικόνα 4.8), μια λεπτομερή περιγραφή της αρχιτεκτονικής του σχηματισμού αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένης της ζώνης εισπίεσης

και της ζώνης περιορισμού, το μοντέλο απόθεσης (*depositional model*), χάρτες πορώδους. Οποιαδήποτε πρόσθετα δεδομένα από μια νέα γεώτρηση πρέπει να ενσωματώνονται στις προηγούμενες αναλύσεις.

STRATAGRAPHIC COLUMN OF THE ILLINOIS BASIN



Εικόνα 4.8: Παράδειγμα στρωματογραφικής στήλης (Illinois Basin) [11]

Αξιολόγηση σχηματισμού (Formation evaluation) μέσω των γεωτρήσεων

❖ Μέθοδος γεωφυσικών διαγραφιών (loggings)

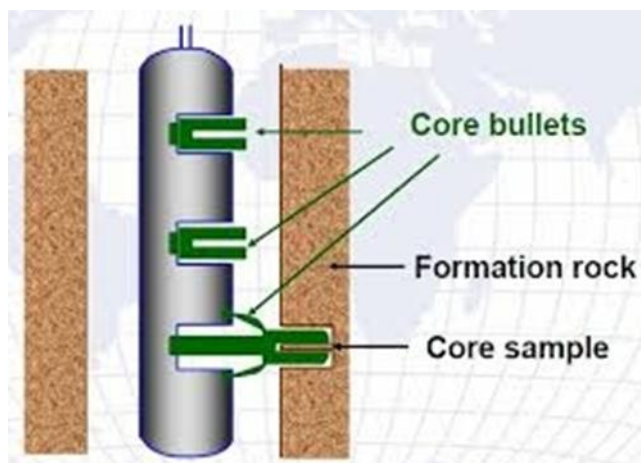
Οι διαγραφίες της λάσπης (mud logging) και ο χαρακτηρισμός των ρευστών γίνονται συχνά κατά τη διάρκεια γεώτρησης. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, την παρατήρηση του σχηματισμού που διατρέεται από τα θρύμματα που ανακτώνται και έρχονται στην επιφάνεια από το κυκλοφορούν ρευστό. Η ανάλυση χρησιμοποιείται για να επιβεβαιωθεί η παρουσία και το βάθος των διαφόρων αναμενόμενων λιθολογιών της ζώνης εισπίεσης και των ζωνών περιορισμού.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα όργανα των διαγραφιών (logging tools) παρέχουν πληροφορίες για το τι είδους πετρώματα υπάρχουν και ποιες είναι οι ιδιότητες αυτών. Συχνά εφαρμόζεται η μέθοδος των διαγραφιών σε γειτονικές (ή offset) γεωτρήσεις, που βρίσκονται μέσα στην περιοχή αξιολόγησης, ώστε να γίνει ο συσχετισμός της ζώνης εισπίεσης και των ζωνών περιορισμού, να καθοριστούν οι συνθήκες μιας περιοχής πριν την εισπίεση, και να προσδιοριστεί η μεταβλητότητα και η ανισοτροπία στην περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα που λαμβάνονται πριν την έναρξη των εργασιών εισπίεσης, χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στην ανάπτυξη των μοντέλων και την εκτίμηση της μετανάστευσης του «θυσάνου» του CO₂ μελλοντικά ή τις αντιδράσεις που ενδεχομένως θα προκληθούν από την παρουσία του παγιδευμένου CO₂. Συχνά η μέθοδος εφαρμόζεται και στις γεωτρήσεις παρακολούθησης, οι οποίες ελέγχονται τακτικά για την ανίχνευση CO₂.

❖ Μέθοδος πυρηνοληψίας

Δείγματα πυρήνα (core samples) μπορούν να παράσχουν δεδομένα τόσο για τις ζώνες περιορισμού όσο και για τον σχηματισμό εισπίεσης. Οι πυρήνες επιτρέπουν τη φυσική και χημική εξέταση και ανάλυση των βασικών ιδιοτήτων των ζωνών που εξετάζονται για την αποθήκευση. Ιδιαίτερα η χημική ανάλυση του πυρήνα μπορεί να βοηθήσει στο να προβλεφτούν οι πιθανές μακροπρόθεσμες αντιδράσεις εξαιτίας της παρουσίας του CO₂.

Η πλευρική πυρηνοληψία (Εικόνα 4.9). μικρής διαμέτρου πυρήνα (περίπου μιας ίντσας) από τα πλευρικά τοιχώματα της γεώτρησης, επιτρέπει την οικονομική συλλογή δειγμάτων από πολλαπλά επίπεδα και την αξιολόγηση σχηματισμών για τους οποίους δεν υπάρχει κάποια προηγούμενη γνώση.



Εικόνα 4.9: Μέθοδος πυρηνοληψίας από τα πλευρικά τοιχώματα της γεώτρησης [118]

❖ Δοκιμές παραγωγής (Drill stem testing)

Οι δοκιμές αυτές διεξάγονται ενόσω η διατρητική στήλη βρίσκεται ακόμα εντός της γεώτρησης και αναφέρονται ως Drill Stem Tests ή DSTs. Πρόκειται για μια διαδικασία προσδιορισμού της παραγωγικής ικανότητας της γεώτρησης, της πίεσης, της διαπερατότητας της έκτασης (ή ένα συνδυασμό αυτών) του σχηματισμού αποθήκευσης [110]. Με τη χρήση προσωρινών διαφραγμάτων (packers) απομονώνεται η ζώνη ενδιαφέροντος και στην συνέχεια, μέσω βαλβίδων γίνεται παραγωγή ρευστών του σχηματισμού και ελέγχεται ο χρόνος ροής. Μετά τη δοκιμή, ο εξοπλισμός ανακτάται μέσα από τη γεώτρηση. Ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους στόχους της δοκιμής, αυτή μπορεί να είναι μικρής (μία ώρα ή λιγότερο) ή μεγάλης διάρκειας (αρκετές ημέρες ή εβδομάδες). Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών γίνεται με εμπορικό λογισμικό.

❖ Δειγματοληψία ρευστών του σχηματισμού (Reservoir fluid testing)

Δείγματα ρευστών συλλέγονται από τη γεώτρηση, διατηρούνται στις επί τόπου συνθήκες και αποστέλλονται σε εργαστήριο για ανάλυση και χαρακτηρισμό (σύσταση, οπτική φασματομετρία, φθορισμό, ογκομετρική ανάλυση, προσδιορισμό φυσικών ιδιοτήτων).

Οι επί τόπου ιδιότητες των ρευστών μπορούν να προσδιοριστούν και με τη χρήση προηγμένων εργαλείων μέσα στη γεώτρηση (downhole tools). Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ανάλυση των ρευστών απευθείας στον σχηματισμό, με πολύ καλά αποτελέσματα. Οι ιδιότητες που μελετώνται είναι η πυκνότητα και το ιξώδες των ρευστών, η χημική τους σύσταση, (ολικά διαλυμένα στερεά TDSs, παρουσία CO₂, θείου κοκ), πίεση και θερμοκρασία των ρευστών. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές επαύξησης απόληψης του

πετρελαίου EOR, ο προσδιορισμός της χημικής σύνθεσης των ρευστών είναι πολύ σημαντικός, καθώς επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής.

Ειδικότερα στις δοκιμές ρευστών σε γεωλογικούς σχηματισμούς αποθήκευσης CO₂, περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της συμβατότητας των ρευστών (αναμιζιμες ή μη φάσεις), προϊόντα αντιδράσεων και η καθίζηση των διαλυμένων στερεών (πχ άλας). Με αυτά τα δεδομένα προσδιορίζεται η αποδοτικότητα μιας γεώτρησης εισπίεσης και επίσης, τροφοδοτούνται τα μοντέλα του χώρου αποθήκευσης για την περίοδο της εισπίεσης και μετά το πέρας αυτής.

4.5.2 Μοντελοποίηση (Simulation) του συστήματος αποθήκευσης

Ο σκοπός της μοντελοποίησης είναι να προβλέψει τη μελλοντική απόδοση ενός συγκεκριμένου χώρου αποθήκευσης μέσω αριθμητικών μεθόδων που προσομοιώνουν, όσο πιο πιστά γίνεται, τα μέρη που συγκροτούν το σύστημα αποθήκευσης και τις φυσικές και χημικές διαδικασίες που σχετίζονται με αυτήν. Μέσω των δραστηριοτήτων που έχουν προαναφερθεί, αποκτώνται οι πληροφορίες που απαιτούνται για να αναπτυχθεί ένα αρχικό μοντέλο πρόβλεψης.

Αν και η μοντελοποίηση έχει εφαρμογές σ' όλες τις φάσεις ενός έργου αποθήκευσης CO₂, οι δραστηριότητες μοντελοποίησης συγκεκριμένα στην επιλογή τοποθεσίας, στοχεύουν στον εντοπισμό κατάλληλων υποψηφίων θέσεων που έχουν επαρκή ικανότητα αποθήκευσης, σύστημα περιορισμού, καθώς και δυνατότητα συγκράτησης του εισπνεζόμενου CO₂ πάνω από εκατοντάδες χρόνια [38].

Όταν το έργο βρίσκεται σε λειτουργία (Φάση εισπίεσης), οι μετρήσεις που αποκτώνται μέσω της παρακολούθησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επαληθεύσουν ότι το έργο λειτουργεί όπως προβλέπουν τα μοντέλα. Ως εκ τούτου, η αντιστοίχιση/επαλήθευση των αρχικών μοντέλων με τα επικαιροποιημένα, μέσω των νέων δεδομένων, μοντέλα είναι κρίσιμη. Μ' αυτό τον τρόπο ελέγχονται οι παραδοχές (οι οποίες έγιναν αρχικά ίσως λόγω ελλιπών δεδομένων) σχετικά με την καταλληλότητα της ζώνης εισπίεσης να δέχεται και να συγκρατεί το CO₂ εντός των σχηματισμών στόχων. Επιπλέον, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ευαισθησίας είναι χρήσιμα για την εκτίμηση της σημασίας της αβεβαιότητας των δεδομένων.

Καθορισμός παραμέτρων μοντελοποίησης

Ο προσδιορισμός του τύπου του μοντέλου (-ων) (στατικά και δυναμικά μοντέλα) και οι παράμετροι της μοντελοποίησης, είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Οι παράμετροι θα πρέπει να καθορίζονται από τα αποτελέσματα της γεωλογικής αξιολόγησης του υπεδάφους, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών της ζώνης εισπίεσης, των μηχανισμών του συστήματος περιορισμού και τις ιδιότητες των πετρωμάτων και των ρευστών του σχηματισμού (*rock properties*). Δεδομένα από ανάλογα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να καλυφθούν τα όποια κενά των δεδομένων των παραμέτρων στα αρχικά στάδια της επιλογής του χώρου, ενώ αργότερα τα μοντέλα θα εμπλουτιστούν από δεδομένα από τις δοκιμές πεδίου (*field tests*) και την αξιολόγηση του σχηματισμού (*formation valuation*).

Επίσης, προσδιορίζονται οι απαιτήσεις σε δεδομένα για να μειωθεί το επίπεδο αβεβαιότητας και περιλαμβάνεται ανάλυση κόστους για τον προσδιορισμό της αξίας της απόκτησης τους. Η συλλογή των δεδομένων θα πρέπει να εξισορροπεί το όφελος από τη μείωση της αβεβαιότητας έναντι του κόστους της κτήσης τους. Εάν είναι διαθέσιμα σεισμικά δεδομένα για το χώρο αποθήκευσης (λόγου χάρι από προηγούμενες εργασίες παραγωγής υδρογονανθράκων) πρέπει να ενσωματώνονται στην ανάπτυξη των μοντέλων.

Στατικά Γεωλογικά Μοντέλα

Κατά το στάδιο της επιλογής του χώρου αποθήκευσης, αναπτύσσονται μοντέλα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν έπειτα για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων. Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/31/EK [3] απαιτεί αρχικά την εκπόνηση τρισδιάστατου στατικού γεωλογικού μοντέλου (-ων) του χώρου αποθήκευσης, βάσει των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί. Αυτά απεικονίζουν το σχηματισμό αποθήκευσης, τη ζώνη περιορισμού, τη λιθολογία των υπερκείμενων πετρωμάτων μέχρι την επιφάνεια και τις υδραυλικά συνδεδεμένες περιοχές και τα εμπεριεχόμενα ρευστά.

Πιο συγκεκριμένα, ένα στατικό γεωλογικό μοντέλο θα πρέπει να περιγράφει [41],[3]:

- Τη γεωλογική δομή της φυσικής παγίδευσης (συμπεριλαμβανομένης και της γεωμετρίας της διεπιφάνειας μεταξύ της ζώνης εισπίεσης και του καλύμματος).
- Τις γεωμηχανικές, γεωχημικές ιδιότητες του ταμιευτήρα και του υπερκείμενου εδάφους (υπερκείμενα στρώματα, καθεστώς πιέσεων, ροές των ρευστών, σφραγιστικές στρώσεις, πορώδεις και περατούς ορίζοντες) και των περιβαλλόντων σχηματισμών.

- Τη σύνθεση και κατανομή των ρευστών του ταμιευτήρα και των υπερκείμενων και περιβαλλόντων σχηματισμών.
- Την επιφανειακή και κατακόρυφη έκταση του συγκροτήματος αποθήκευσης και τα όρια των σχηματισμών του.
- Τον όγκο του πορώδους χώρου και τη διαπερατότητα (συμπεριλαμβανομένης της κατανομής του πορώδους και, εάν είναι δυνατόν, του μέρους αυτού που επικοινωνεί υδραυλικά εντός της ζώνης εισπίεσης).
- Το χαρακτηρισμό των συστημάτων ρωγματώσεων και άλλων δομικών χαρακτηριστικών που αποτελούν δυνητικό κίνδυνο στην μακροπρόθεσμη συγκράτηση του CO₂, καθώς και της παρουσίας ανθρωπογενών διόδων που διαπερνούν το συγκρότημα αποθήκευσης (πχ γεωτρήσεις).
- Τους οικονομικούς ή περιβαλλοντικούς παράγοντες πάνω ή κάτω από το συγκρότημα αποθήκευσης.

Αριθμητικές Προσομοιώσεις – Numerical Simulations

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κίνηση ή τη συμπεριφορά του CO₂ όταν αυτό εισπιαστεί στο υπέδαφος. Αυτές οι προσομοιώσεις είναι σημαντικά εργαλεία της Εκτίμησης του Κινδύνου. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κίνηση ή για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της παρακολούθησης (monitoring) και τον αποτελεσματικότερο χαρακτηρισμό του χώρου αποθήκευσης (site characterization).

Δυναμικά Μοντέλα υπεδαφικών διεργασιών

Τα δυναμικά μοντέλα (Εικόνα 4.10) περιλαμβάνουν ποικιλία προσομοιώσεων κατά διάφορα χρονικά βήματα της εισπίεσης CO₂ στο χώρο αποθήκευσης και βασίζονται στα τρισδιάστατα στατικά γεωλογικά μοντέλα που προηγήθηκαν. Οι βασικές πτυχές του χαρακτηρισμού της δυναμικής συμπεριφοράς της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂ μπορούν να εξηγηθούν χρησιμοποιώντας τέσσερις υπεδαφικές διεργασίες (THMCB): α) θερμικές και υδρολογικές (*Thermal Hydrologic*), β) γεωμηχανικές (*Mechanical*), γ) χημικές (*Chemical*), δ) βιολογικές (*Biological*).

Τα αριθμητικά μοντέλα των διαδικασιών αυτών βασίζονται στις κύριες σχέσεις της διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Επιπλέον χρησιμοποιούνται φαινομενολογικές ή εμπειρικές καταστατικές εξισώσεις (equations of state), κινηματικές

συνθήκες και άλλες σχέσεις που εκφράζουν την αλληλεξάρτηση ή τις συσχετίσεις μεταξύ των διεργασιών.

Σήμερα διατίθενται πολύ εξελιγμένοι κώδικες που εφαρμόζονται στην παραγωγή υδρογονανθράκων (συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών EOR), γεωθερμικής ενέργειας κοκ και οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά και στην μοντελοποίηση της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂. Για παράδειγμα:

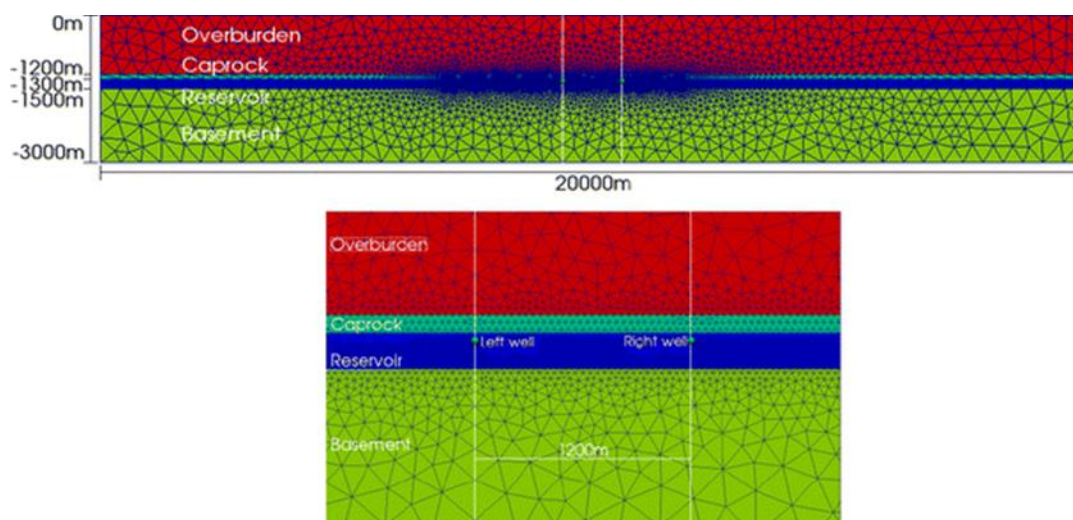
❖ Λογισμικό για την προσομοίωση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς θερμότητας:

- TOUGH 2: είναι ένας προσομοιωτής πολυφασικής ροής ρευστού και μεταφοράς θερμότητας σε πορώδη και ρωγματομένα μέσα. Η οικογένεια των κωδικών TOUGH έχει εφαρμοστεί στους τομείς της γεωθερμίας, της διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων και στη γεωλογική αποθήκευση του CO₂

- STOMP-WCSE (Subsurface transport over multiple phases – Water, CO₂, salt and energy): προσομοιώνει τη ροή θερμότητας και την υδρογεωλογική ροή, καθώς και άλλα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος, μέσω ισοζυγίων μάζας, ορμής και ενέργειας των ρευστών φάσεων.

❖ Λογισμικό προσομοίωσης ταμιευτήρων υδρογονανθράκων όπως:

ECLIPSE, GEM, VIP και COMET 3 είναι παραδείγματα προσομοιωτών ταμιευτήρων υδρογονανθράκων που χρησιμοποιούνται σε μοντέλα ανάκτησης υδρογονανθράκων. Οι οικογένειές κωδικών VIP, GEM και ECLIPSE έχουν εφαρμοστεί για τη μελέτη διαδικασιών ροής (CO₂, νερού και πετρελαίου) και μεταφοράς θερμότητας υπεδαφικά, μοντελοποιώντας φυσικά και χημικά (πχ διαλυτότητα του CO₂) φαινόμενα που σχετίζονται με την εισπίεση CO₂ σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων.



Εικόνα 4.10: Τρισδιάστατο επίπεδο μοντέλο προσομοίωσης Open Geo Sys (OGS) (111)

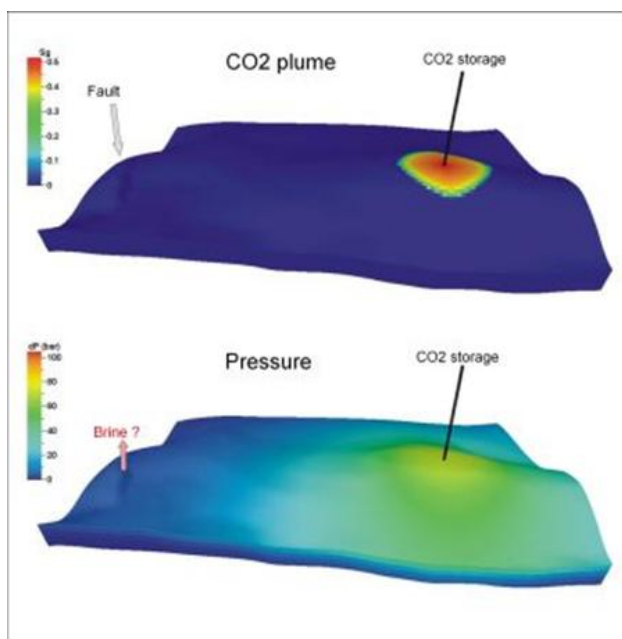
Όπως έχει αναφερθεί, η εισπίεση του CO₂ οδηγεί σε αύξηση της πίεσης στη ζώνη εισπίεσης και στις ζώνες περιορισμού, ενέχοντας τον κίνδυνο, εάν αυτή η πίεση υπερβεί το όριο ρωγμάτωσης, να επηρεάσει την ακεραιότητα του αποθηκευτικού χώρου. Ως εκ τούτου, οι υδρολογικές-γεωμηχανικές διεργασίες είναι ζωτικής σημασίας για να καθοριστούν οι πιθανότητες να εμφανιστούν οι παρακάτω επιπτώσεις σε ένα συγκεκριμένο χώρο αποθήκευσης [41]:

- Αλλαγές προκαλούμενες από την καταπόνηση των σχηματισμών, λόγω των μεταβολών της πίεσης ή της θερμοκρασίας, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την ακεραιότητα του πρωτογενούς καλύμματος, καθώς και λοιπά γεωμηχανικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη μακρόχρονη συγκράτηση του CO₂ (για παράδειγμα, η καταπόνηση λόγω προκαλούμενων θερμοκρασιών γύρω από τη γεώτρηση).
- Παραμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους και πιθανότητα εμφάνισης μικροσεισμικότητας, ως αποτέλεσμα της εισπίεσης και αποθήκευσης του CO₂.

Σε γενικές γραμμές, η γεωμηχανική συμπεριφορά περιλαμβάνει τις επιπτώσεις της πίεσης των ρευστών, της ελαστικής και μη αναστρέψιμης παραμόρφωσης, και τις αλλαγές στο προφίλ των ρωγματώσεων του σχηματισμού. Οι παραμορφώσεις, ελαστικές ή μη, μπορούν να προσομοιαστούν με εμπορικά πακέτα όπως το ABAQUS και το FLAC 3D.

Για παράδειγμα, στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζεται η κατανομή των πιέσεων εντός του ταμιευτήρα κατά την εισπίεση και μετά το πέρας αυτής. Παρατηρείται ότι οι τιμές της πίεσης μειώνονται όσο απομακρύνεται η μάζα του CO₂ από το σημείο εισπίεσης. Στη

διαδικασία αυτή επιχειρείται να αξιολογηθεί κατά πόσον το μέτωπο του εισπνεζόμενου CO₂ θα εκτοπίσει τα ρευστά του σχηματισμού (brine), ώστε να φτάσει μέχρι το ρήγμα που διακρίνεται στα αριστερά.



Εικόνα 4.11: Παράδειγμα δυναμικού γεωλογικού 3D μοντέλου. Αριθμητική προσομοίωση της κίνησης του CO₂ και της διάδοσής της πίεσης στον περιβάλλοντα χώρο του σημείου της εισπίεσης [112]

Ένα γεωμηχανικό μοντέλο θα πρέπει να περιέχει, τουλάχιστον, μια απλοποιημένη απεικόνιση των υπερκειμένων και μια πιο λεπτομερή απεικόνιση του γεωλογικού συστήματος αποθήκευσης. Η γεωμετρία του θα πρέπει να βασίζεται στη χωρική κατανομή των στρωμάτων, όπως αυτά έχουν απεικονιστεί και στο στατικό γεωλογικό μοντέλο(-α), αλλά η απεικόνισή τους θα εμπλουτιστεί με τις μηχανικές ιδιότητες και επιτόπου καταπονήσεις που έχουν διαπιστωθεί κατά τον χαρακτηρισμό του εκάστοτε χώρου αποθήκευσης.

Η μελέτη των χημικών αντιδράσεων μεταξύ του πετρώματος και των ρευστών του σχηματισμού και του CO₂ είναι επίσης απαραίτητη για την αξιολόγηση της ακεραιότητας της αποθήκευσης και της συμπεριφοράς του CO₂ αλλά και για την ανάπτυξη της παρακολούθησης, μετά το πέρας της εισπίεσης.

Τα γεωχημικά μοντέλα βοηθούν στην κατανόηση των πιθανών γεωχημικών επιπτώσεων στη χωρητικότητα, την εισπνεσιμότητα και στην στεγανότητα της αποθήκευσης. Παρέχουν

εκτιμήσεις/προβλέψεις για τη χημική δραστηριότητα των εμπειριχόμενων ρευστών και των σχηματισμών [41] σχετικά με:

- Τη ζώνη εισπίεσης: περιλαμβάνονται τα αρχικά γεωχημικά χαρακτηριστικά της ζώνης στις επί τόπου συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, η επίδραση των γεωχημικών αντιδράσεων με το εισπιεζόμενο ρεύμα του CO₂ στην χωρητικότητα και εισπιεσιμότητα, οι αλλαγές στην σύνθεση των ρευστών του σχηματισμού και οι συμπεριφορά κάθε φάσης.
- Στο πρωτογενές κάλυμμα: περιλαμβάνονται τα αρχικά γεωχημικά χαρακτηριστικά του πρωτογενούς καλύμματος στις επί τόπου συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, οι πιθανές γεωχημικές αντιδράσεις του CO₂ ή ρεύματος ρευστού+CO₂ με το πέτρωμα ή τα ορυκτά του καλύμματος και η επίδραση των φαινομένων αυτών στην ικανότητα του καλύμματος για μακροπρόθεσμη συγκράτηση του CO₂.
- Στις γεωτρήσεις: αφορά στις γεωτρήσεις που μπορεί να έρθουν σε επαφή με το CO₂ ή με ρευστό επιφορτισμένο με CO₂ και περιλαμβάνει τις πιθανές επιπτώσεις των γεωχημικών αντιδράσεων στην ακεραιότητα των υλικών της γεώτρησης. Οι γεωτρήσεις που θα υποδειχθούν ως επιρρεπείς στο να εμφανίσουν κινδύνους, θα υποστούν περαιτέρω μελέτη και θα τεθούν σε προτεραιότητα για παρακολούθηση.

Κώδικες όπως PFLOTRAN, NUFT και TOUGHREACT, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη των χημικών αντιδράσεων μεταξύ του πετρώματος και των ρευστών του σχηματισμού και του CO₂.

Τέλος, δραστηριότητες μικροοργανισμών μπορεί να έχουν σημαντική χημική και φυσική επίδραση στα υπεδαφικά περιβάλλοντα. Στο πλαίσιο της υπεδαφικής αποθήκευσης του CO₂, η κυτταρική και εξωκυτταρική παραγωγή βιομάζας από μικροοργανισμούς, μπορεί να προκαλέσει έμφραξη των πόρων του σχηματισμού και να οδηγήσει σε μειωμένη διαπερατότητα [37]. Οι μικροοργανισμοί μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη διαπερατότητα μέσα από τη διάλυση ορυκτών και την κατακρήμνιση τους. Πρόκειται για ένα επιστημονικό πεδίο που δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητό και απαιτείται περαιτέρω έρευνα.

4.6 Εκτίμηση των επιπτώσεων (Effects assessment)

Οι επιπτώσεις μπορούν να διαιρεθούν σε οξείες (βραχυπρόθεσμες) και χρόνιες (μακροπρόθεσμες). Οι οξείες συνέπειες είναι άμεσες και οδηγούν σε καταστάσεις

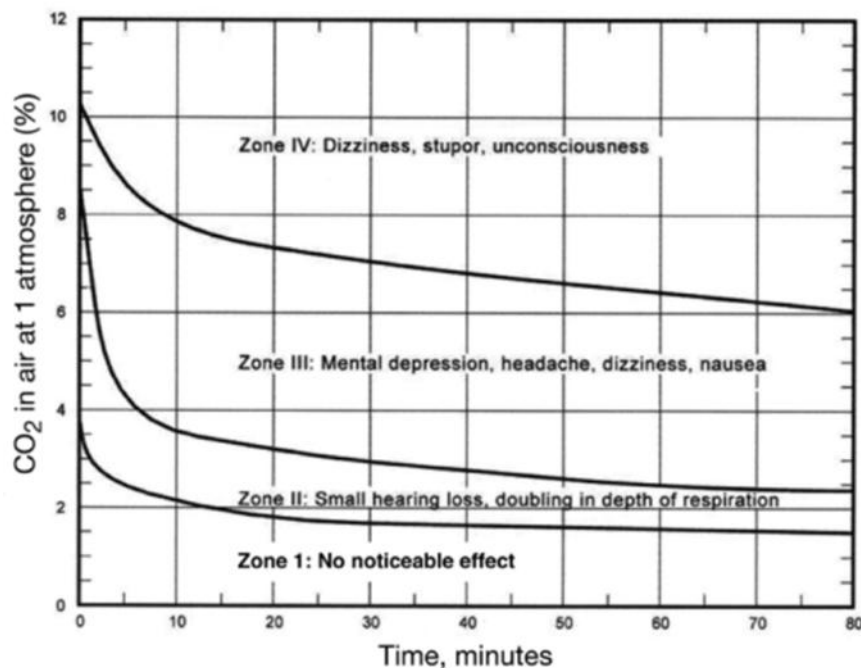
έκτακτης ανάγκης που αφορούν στην ασφάλεια των ατόμων. Οι χρόνιες επιπτώσεις-συνέπειες είναι εκείνες που μπορεί να είναι ακόμα πιο σοβαρές, αλλά που εμφανίζονται σε μεγαλύτερα χρονικά πλαίσια [35].

Μια άλλη κατηγοριοποίηση που μπορεί να γίνει στις πιθανές επιπτώσεις των κινδύνων της αποθήκευσης είναι η εξής [17]:

- Οι παγκόσμιες επιπτώσεις που προκύπτουν από την απελευθέρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα, η οποία επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης του CO₂.
- Οι τοπικές και περιφερειακές επιπτώσεις, που σχετίζονται με τις άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις της αποθήκευσης του CO₂ στους ανθρώπους ή τα οικοσυστήματα, το περιβάλλον, άλλους πόρους, κλπ. Οι πρώτες συνδέονται άμεσα με τη διαρροή του CO₂ από τον ταμιευτήρα, ενώ οι δεύτερες έχουν να κάνουν με τον εκτοπισμό των φυσικά υφιστάμενων ρευστών (πχ υδροφόροι, αέρια όπως μεθάνιο κοκ) ή την αύξηση των πιέσεων λόγω της εισπίεσης του CO₂.

4.6.1 Επιπτώσεις στον άνθρωπο

Οι άμεσες επιπτώσεις της έκθεσης σε υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ (πχ σε περιορισμένους εξωτερικούς χώρους, σπηλιές, ή κτίρια) δημιουργούν πιθανούς κινδύνους για τους ανθρώπους και τα χερσαία οικοσυστήματα. Τα σημερινά επίπεδα συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα κυμαίνονται στο ~0.038%. Το CO₂ δεν είναι τοξικό, αλλά για συγκεντρώσεις πάνω από 2% μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα και πάνω από 7-10% απώλεια των αισθήσεων και θάνατο [17]. Για συγκέντρωση πάνω από το 3% υπεισέρχεται απώλεια ακοής και διαταραχές της όρασης. Το διοξείδιο του άνθρακα δρα επίσης ως τοπικό αγγειοδιασταλτικό, για αυτό μπορούν να εξηγηθούν πολλά από τα συμπτώματα που σχετίζονται με την τοξικότητα του, συμπεριλαμβανομένων της νάρκωσης, του πονοκέφαλου και της ζάλης (Εικόνα 4.12). Οι συγκεντρώσεις του επηρεάζονται πολύ από την τοπογραφία και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες [34]. Ιδιαίτερα για συγκεντρώσεις 50%, όπου είναι πυκνότερο από τον αέρα, είναι αυξημένος ο κίνδυνος να συσσωρευτεί σε περιορισμένους /κλειστούς χώρους.



Εικόνα 4.12: Επιπτώσεις έκθεσης ανθρώπου σε διάφορες συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα [17].

Η αποθήκευση CO₂ κοντά σε κατοικημένες περιοχές αυξάνει την πιθανότητα επιβλαβούς έκθεσης των ανθρώπων σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσής του. Παραμένει το γεγονός ότι σε περίπτωση αργών διαρροών, το πιθανότερο είναι αυτές να περάσουν απαρατήρητες καθώς η ποσότητα CO₂ θα διαχέεται στην ατμόσφαιρα με τρόπο παρόμοιο με την φυσική απαέρωση της γης, τη βιολογική αναπνοή και την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. Είναι εξαιρετικά απίθανο να προκύψει μια μεγάλου μεγέθους απελευθέρωση CO₂ από τους γεωλογικούς ταμιευτήρες αποθήκευσης του [31].

Παρόλα αυτά, εκτός από την εγγύτητα σε κατοικημένες περιοχές, υπάρχει ένας συνδυασμός μεταβλητών που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση του κινδύνου μιας πιθανής διαρροής CO₂ και των επιπτώσεών της. Μερικές από αυτές τις μεταβλητές είναι και οι καιρικές συνθήκες, η τοπογραφία, το υδρολογικό δίκτυο της περιοχής κοκ.

4.6.2. Επιπτώσεις στα οικοσυστήματα

Οι ακριβείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απελευθέρωσης CO₂ δεν είναι απόλυτα και σε βάθος κατανοητές. Η αναπνευστική φυσιολογία και ο έλεγχος του pH είναι οι κύριοι δείκτες της απόκρισης όλων των μορφών ζωής σε μια επικίνδυνη έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις CO₂. Οι ανθρώπινες επιδράσεις αποτελούν χρήσιμα μοντέλα για άλλα

θηλαστικά, αλλά και για ό,τι φέρει την ιδιότητα της αναπνευστικής λειτουργίας. Κάποιοι οργανισμοί μπορεί να είναι πιο ευαίσθητοι από τους ανθρώπους σε αυξημένα επίπεδα CO₂, αλλά τα προληπτικά όρια καθιστούν απίθανο ότι θα υπάρξει κάποια καταστροφική οικολογική επίπτωση [34].

Παραδείγματος χάριν, η εξαγωγή αερίων διοξειδίου του άνθρακα από γεωθερμικούς αεραγωγούς ή γεωθερμικές πηγές, δίνει την ευκαιρία για μελέτη και κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για μια σειρά συγκεντρώσεων CO₂ και χρονικής διάρκειας έκθεσης σε αυτό. Η έλλειψη μακροπανίδας σε τέτοια περιβάλλοντα μπορεί να είναι ενδεικτική του φυσιολογικού στρες που προκαλείται από τις αυξημένες ποσότητες CO₂.

Έχει παρατηρηθεί ότι μία συγκέντρωση μέχρι περίπου 20-30% του CO₂ στον αέρα του εδάφους (soil air) αυξάνει το βαθμό ανάπτυξης της βλάστησης. Πάνω από αυτό το όριο αντίθετα, η επιβίωση της βλάστησης είναι δύσκολη.



Εικόνα 4.13: Μελέτη επιπτώσεων των υψηλών συγκεντρώσεων CO₂ στα φυτά στην Latera (Ιταλία) [29].

Μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διαρροής CO₂ στα χερσαία οικοσυστήματα διεξήχθη σ' ένα φυσικό χώρο διαρροής CO₂ στην Latera (Ιταλία), το Laacher See (Γερμανία), και την περιοχή Asgard (UK), όπου έγινε εισπίεση του CO₂ στο έδαφος σε ελεγχόμενες συνθήκες. Η επίδραση της αύξησης των συγκεντρώσεων CO₂ στις γεωχημικές αντιδράσεις φαίνεται να είναι πολύπλοκη, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της ορυκτολογικής σύστασης των εδαφών παρέμεινε αμετάβλητο. Οι βοτανικές μελέτες τόσο

στην Latera , όσο και στο Asgard έδειξαν ότι η αύξηση των συγκεντρώσεων του CO₂ επηρεάζει την σύνθεση των ειδών και της χλωρίδας. Στο Asgard οι πληθυσμοί των μικροβίων ήταν χαμηλοί στην περιοχή της εισπίεσης και δεν δραστηριοποιούνταν. Αντιθέτως, για παρόμοιες συγκεντρώσεις στην Latera, τα μικρόβια παρέμεναν δραστήρια, υποδηλώνοντας την ικανότητα προσαρμοστικότητας [29].

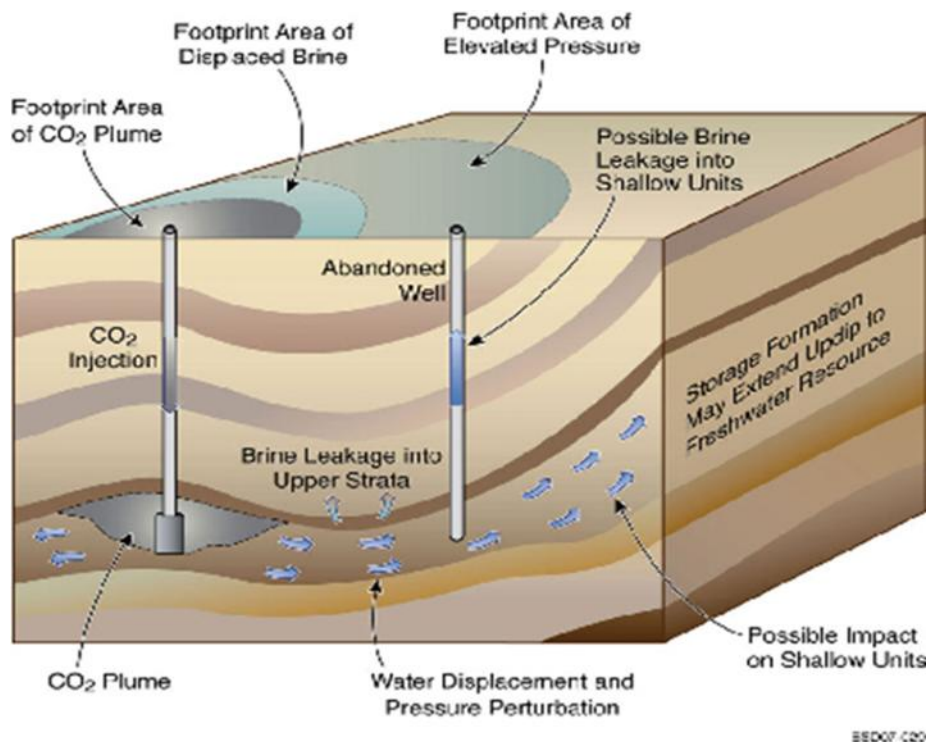
Παρατηρήθηκε πως λίγα μέτρα από την περιοχή απορροής του CO₂, η βλάστηση επανέρχεται στα φυσιολογικά της επίπεδα. Το "ίχνος" της γεωλογικής αποθήκευσης αναμένεται να είναι μικρό σε σύγκριση με το συνολικό ποσό των υπόγειων οικότοπων που διατίθενται για τους όποιους οργανισμούς. Συνεπώς, ακόμα και αν μια συγκεκριμένη κοινότητα επηρεάζεται, ο αντίκτυπος επί του συνόλου της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημάτων της γης θα είναι αμελητέος [31].

4.6.3 Επιπτώσεις στους υδροφόρους ορίζοντες

Όταν η αποθήκευση του CO₂ γίνεται σε βαθείς αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες, η διαρροή του θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο τις υπερκείμενες πηγές των υπογείων υδάτων. Αυτό μπορεί να γίνει μέσα από τις εξής διαδικασίες [32]:

- ❖ Με την μετανάστευση του CO₂ προς μια υπόγεια πηγή πόσιμου νερού και την διάλυση του σε αυτό, αυξάνοντας την οξύτητά του, η οποία με την σειρά της μπορεί να ενισχύσει τη διαλυτότητα επικίνδυνων ανόργανων συστατικών.
- ❖ Σε βαθείς σχηματισμούς αποθήκευσης, οι ιδιότητες διάλυσης του CO₂ αναμένεται να οδηγήσουν στην έκπλυση οργανικών ενώσεων που υπάρχουν στο μητρικό πέτρωμα του ταμειυτήρα (π.χ., αρωματικοί υδρογονάνθρακες όπως βενζόλιο). Η μετέπειτα μεταφορά των μολυσμένων με CO₂ ρευστών και η εισβολή τους σε έναν υδροφόρο, οδηγεί σε μόλυνση του.
- ❖ Η εισπίεση CO₂ μαζί με ρύπους, όπως H₂S το οποίο είναι υποπροϊόν της αεριοποίησης του άνθρακα. Το CO₂ μαζί με το H₂S μπορεί, επίσης, να διαρρεύσει σε μια πηγή πόσιμου νερού και να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα του ή να αλληλεπιδράσει με την οργανική ύλη του ταμειυτήρα.

Σε εργαστηριακές δοκιμές που διεξήχθησαν από το πανεπιστήμιο Duke (Βόρεια Καρολίνα, ΗΠΑ) το CO₂ προκάλεσε σε ορισμένα δείγματα συγκεντρώσεις αλκαλίων και αλκαλικών γαιών, μαγγανίου, κοβαλτίου, νικελίου και σιδήρου αυξημένες κατά περισσότερο από 2 τάξεις μεγέθους από το κανονικό.



Εικόνα 4.14: Σχηματική απεικόνιση των υεδαφικών επιπτώσεων κατά την διάρκεια και μετά το πέρας της βιομηχανικής κλίμακας εισπίεσης του CO₂ [32].

4.7 Χαρακτηρισμός επικινδυνότητας (Risk characterization)

Το επόμενο βήμα σε μια λεπτομερή Εκτίμηση του Κινδύνου, είναι ο προσδιορισμός των πιθανοτήτων εμφάνισης των πιθανών συνεπειών και η αξιολόγηση των επιπτώσεων τους. Ο χαρακτηρισμός της επικινδυνότητας ενσωματώνει τις πληροφορίες από την εκτίμηση της έκθεσης (exposure assessment) και την εκτίμηση των επιπτώσεων (effects assessment) για να παράσχει μια εκτίμηση της πιθανότητας των δυσμενών επιδράσεων [20]. Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/31/EK [3] δίνει τους ακόλουθους ορισμούς για τις παραπάνω αξιολογήσεις:

- Εκτίμηση έκθεσης είναι η διαδικασία αξιολόγησης που γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και την κατανομή και τις δραστηριότητες του ανθρώπινου πληθυσμού πάνω από το συγκρότημα αποθήκευσης, και τη δυναμική συμπεριφορά και τύχη του CO₂ που διαρρέει από δυναμικές οδούς που εντοπίστηκαν από την διεξαγωγή των δυναμικών μοντέλων και τον χαρακτηρισμό του χώρου.
- Εκτίμηση επιπτώσεων είναι η διαδικασία αξιολόγησης με βάση την ευαισθησία των συγκεκριμένων ειδών, κοινοτήτων ή ενδιατημάτων που συνδέονται με συμβάντα

δυναμικής διαρροής, τα οποία εντοπίζονται, επίσης από τις παραπάνω περιγραφόμενες διαδικασίες (της αξιολόγησης του κινδύνου). Όπου έχει σημασία, θα περιλαμβάνονται οι συνέπειες της έκθεσης σε υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ στη βιόσφαιρα (συμπεριλαμβανομένων εδαφών, θαλάσσιων ιζημάτων και βενθικών υδάτων) και λόγω μειωμένου pH στα εν λόγω περιβάλλοντα ως συνέπεια της διαρροής του CO₂. Θα περιλαμβάνει επίσης εκτίμηση των επενεργειών άλλων ουσιών που μπορεί να είναι παρούσες σε ρεύματα διαρρέοντος, CO₂, (είτε ακαθαρσιών που είναι παρούσες στο ρεύμα εισπίεσης ή νέων ουσιών που σχηματίζονται μέσω της αποθήκευσης του CO₂). Οι επενέργειες αυτές θα συνεκτιμώνται σε φάσμα χρονικών και χωρικών κλιμάκων και θα συνδέονται με φάσμα διαφόρων τάξεων μεγέθους συμβάντων διαρροής.

Ο χαρακτηρισμός του κινδύνου γίνεται με βάση πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο χώρο αποθήκευσης. Οι παράγοντες που αξιολογούνται μπορεί να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου δεδομένης της φάσης του έργου και της συνεχούς συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των μοντέλων πρόβλεψης. Οι πηγές και τα επίπεδα της αβεβαιότητας που σχετίζονται με την εκτίμηση των κινδύνων, θα είναι συνάρτηση των υποθέσεων/παραδοχών των δεδομένων και μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν κατά το χαρακτηρισμό.

Με δεδομένες τις μεγάλες κλίμακες χρόνου που απαιτούνται για την προβλεπόμενη αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς, θα ήταν χρήσιμο να γίνει διάκριση μεταξύ των διεργασιών που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό των κινδύνων στο εγγύς μέλλον κατά τη διάρκεια της εισπίεσης και του κλεισίματος και τις μακροπρόθεσμες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μετά το κλείσιμο του χώρου αποθήκευσης [20]. Με αυτόν τον τρόπο οι κίνδυνοι που χρειάζονται άμεση απόκριση μπορούν να εντοπιστούν, να τεθούν σε προτεραιότητα και να αντιμετωπιστούν, ενώ αυτοί που δεν αναμένονται άμεσα ή δεν είναι τόσο σημαντικοί, να τεθούν υπό παρακολούθηση. Οι κίνδυνοι των οποίων ο χαρακτήρας ή η σημαντικότητα δεν είναι πλήρως κατανοητοί, θα υποβληθούν σε περαιτέρω ανάλυση ή έρευνα. Όσο λαμβάνονται ολοένα και περισσότερες πληροφορίες από το χαρακτηρισμό, τη μοντελοποίηση και την παρακολούθηση του χώρου αποθήκευσης, η κατάταξη αυτή των κινδύνων μπορεί να αναθεωρείται [37].

4.7.1 Εργαλεία χαρακτηρισμού και κατ'επέκταση εκτίμησης του κινδύνου

Από την βιβλιογραφία αναδεικνύονται διάφορα εργαλεία/κατευθυντήριες γραμμές για τον χαρακτηρισμό και κατ'επέκταση την εκτίμηση των κινδύνων. Κατά κύριο λόγο αυτά αποτελούν λύσεις/κατευθυντήριες οδηγίες (guidelines) που αφορούν επιμέρους τμήματα της εκτίμησης του κινδύνου, όπως αυτή έχει περιγραφεί ως τώρα με βάση την έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA GHG). Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές από αυτές τις μεθόδους στο Πίνακα 4.2, ο οποίος τις κατατάσσει επίσης σε διάφορες κατηγορίες.

Πίνακας 4.2: Μεθοδολογίες εκτίμησης κινδύνου για έργα γεωλογικής αποθήκευσης [37]

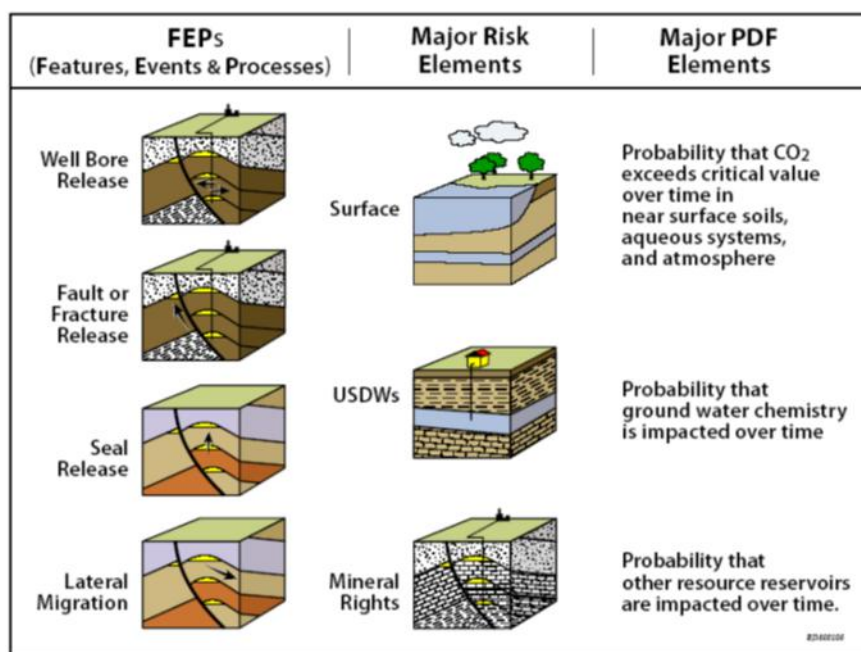
Tool	Methodology Family
Quintessa FEP database	Qualitative, FEPs screened by experts
TNO Risk Assessment Methodology	Expert-elicited probability and consequence matrices
CO ₂ QUALSTORE guideline, DNV	Qualitative/Semi-quantitative with "panel" inputs
Carbon Storage Scenario Identification Framework (CASSIF), TNO	Qualitative, scenario-based
Risk Identification and Strategy using Quantitative Evaluation (RISQUE), URS	Semi-quantitative, expert-elicited probability and consequence matrices
Screening and Ranking Framework (SRF), LBNL	Qualitative, expert-elicited probabilities
Certification Framework (CF), LBNL	Quantitative, system-level model, probabilities partly calculated using fuzzy logic
Vulnerability Evaluation Framework (VEF), U.S. EPA	Qualitative
Performance Assessment (PA), Quintessa	Evidence-support (three-valued) logic (ESL) Distinguishes cases of poor-quality data from uncertain data
CarbonWorkflow* Process for Long-term CO ₂ Storage	Semi-quantitative; FEPs ranked through expert elicitation using a risk matrix approach
CarbonSCORE* software to preassess potential CO ₂ storage sites	All evaluated criteria are quantitatively weighted, jointly evaluated, and summarized
Oxand Performance & Risk (P&R™) Methodology	Quantitative Risk matrix evaluation: semi-quantitative
CO ₂ -PENS, LANL	Quantitative, hybrid system-process model

Αυτές οι κατηγορίες αφορούν την ποιοτική, ημιποσοτική ή ποσοτική προσέγγιση των επιμέρους τμημάτων (στα οποία συμπεριλαμβάνεται και ο χαρακτηρισμός του κινδύνου) της εκτίμησης του κινδύνου. Ο κύριος όγκος αυτών αφορούν ποιοτικές εκτιμήσεις, δεδομένου της πολυπλοκότητας ενός συστήματος αποθήκευσης και της έλλειψης δεδομένων από έργα αποθήκευσης CO₂ μεγάλης κλίμακας.

Μια προσέγγιση για να γίνει αυτή η ανάλυση, είναι η χρήση μιας βάσης δεδομένων που περιλαμβάνει Χαρακτηριστικά (Features), Γεγονότα (Events) και Διαδικασίες (Processes) του μηχανικού γεωλογικού συστήματος του χώρου της αποθήκευσης, τα οποία επηρεάζουν την συμπεριφορά του. Τα Χαρακτηριστικά αποτελούν στατικές οντότητες του

συστήματος αποθήκευσης, ενώ τα Γεγονότα και οι Διαδικασίες αποτελούν τα δυναμικά φαινόμενα που το χαρακτηρίζουν. Μερικά παραδείγματα τέτοιων FEPs είναι: οι γεωτρήσεις ή ρήγματα όπου μπορεί να υπάρξει διαρροή (χαρακτηριστικά), αυξήσεις της πίεσης εισπίεσης ή σεισμοί (γεγονότα) και μετακίνηση του CO₂ λόγω βαρύτητας ή οι μηχανισμοί παγίδευσης (διαδικασίες).

Μια εκτενής βάση δεδομένων περίπου 200 πιθανών FEPs που αφορούν την αποθήκευση του CO₂ έχει δημιουργηθεί και δημοσιευτεί από τον οργανισμό Quintessa (<http://co2fepdb.quintessa.org/current/PHP/frames.php>). Αυτή η προσέγγιση έχει προκύψει αρχικά από δεδομένα έργων μεγάλης κλίμακας, όπως το Sleipner (Νορβηγία), το Weyburn (Καναδάς), το In Salah (Αλγερία) και το έργο Decatur (Ιλινόις, ΗΠΑ) [30] και με τον καιρό εμπλουτίζεται και με στοιχεία και από άλλα έργα.



Εικόνα 4.15: Συσχέτιση FEPs με κινδύνους που ενδέχεται να παρουσιαστούν [37].

Αναγνωρίζοντας τα FEPs σε ένα σύστημα αποθήκευσης, μπορεί ομάδα ειδικών να τα συσχετίσει με πιθανούς κινδύνους που ενδέχεται να εμφανιστούν, καθώς και τις επιπτώσεις τους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.15. Για παράδειγμα, εάν εντοπίζονται ρήγματα που διαπερνούν έναν χώρο αποθήκευσης, είναι πολύ πιθανός ο κίνδυνος διαρροής του CO₂ στην επιφάνεια και κατά συνέπεια στην ατμόσφαιρα, ή η μετανάστευση του σε έναν υδροφόρο πόσιμου νερού (USDW). Αυτοί οι κίνδυνοι με την σειρά τους

μπορεί να επιφέρουν επιπτώσεις, όπως η αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στο έδαφος (soil gas) ή η αλλαγή της χημείας του νερού με το οποίο έρχεται σε επαφή (πχ. υπόγειος υδροφόρος ή/και επιφανειακή λίμνη).

Άλλη παρόμοια μεθοδολογία ποιοτικού χαρακτηρισμού του κινδύνου είναι το πλαίσιο CASSIF (Carbon Storage Scenario Identification Framework), το οποίο είναι ένα πλαισίου ανάλυσης σεναρίων κινδύνου (scenario analysis framework) [36]. Βάσει αυτού του πλαισίου, μια ομάδα εμπειρογνωνόνων, εξετάζει και κατασκευάζει μοντέλα τριών κύριων σεναρίων διαρροής (μέσω γεωτρήσεων, μέσω ρηγμάτων και μέσω του πετρώματος/καλύμματος) μέσω των οποίων γίνεται η αναγνώριση των πιθανότερων σεναρίων κινδύνων.

Είναι δύσκολο να γίνει ποσοτικός χαρακτηρισμός και κατ'επέκταση εκτίμηση του κινδύνου. Η προσέγγιση μιας ποσοτικής εκτίμησης μπορεί να γίνει κυρίως μέσω υβριδικών μοντέλων, τα οποία βασίζονται σε μελέτες φυσικών ανάλογων συστημάτων. Το CO₂-PENS (Predicting Engineered Natural Systems) είναι ένα από αυτά. Τα δεδομένα στα οποία συνήθως βασίζεται αυτού του είδους το μοντέλο, προέρχονται από εργαστηριακά πειράματα, από δοκιμές στο πεδίο της αποθήκευσης ή και από μοντελοποιήσεις.

5. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ (RISK MANAGEMENT) ΣΕ ΕΡΓΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂

Η διαχείριση του κινδύνου αποτελεί το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση του κινδύνου σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂.

Η διαχείριση του κινδύνου αποτελεί μια δομημένη διαδικασία με σκοπό τον εντοπισμό και την αποτίμηση των κινδύνων που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο έργο, λαμβάνοντας υπόψη τη γνώμη των ενδιαφερομένων μερών και το πλαίσιο πάνω στο οποίο έχει βασιστεί το έργο. Απώτερος σκοπός είναι να ληφθούν αποφάσεις για οποιαδήποτε τροποποίηση των διαδικασιών του έργου, η οποία θα μειώνει τα επίπεδα του κινδύνου και ο προσδιορισμός της εφαρμογής κατάλληλων τεχνικών παρακολούθησης και στρατηγικών αντιμετώπισης του εναπομείναντος κινδύνου [17].

Πρόκειται, λοιπόν, για τη διαδικασία λήψης των αποφάσεων, λαμβάνοντας υπόψη πολιτικούς, κοινωνικούς, οικονομικούς και τεχνικούς παράγοντες σε σχέση με τις πληροφορίες που απορρέουν από την αξιολόγηση του κινδύνου (Risk assessment), έτσι

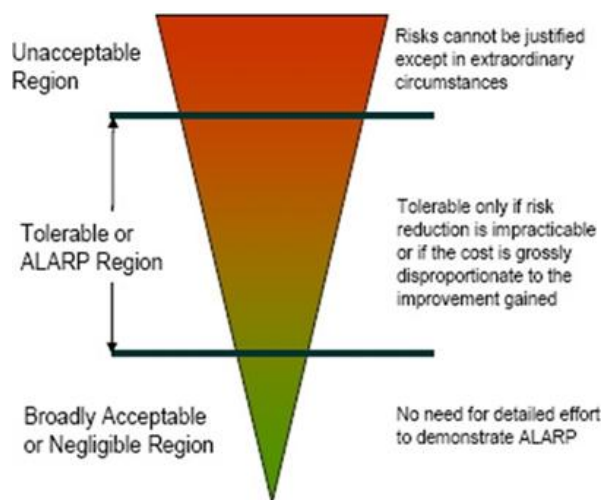
ώστε να επιλεγούν και να εφαρμοστούν οι κατάλληλες δράσεις για να αποτραπεί ένας οποιοσδήποτε κίνδυνος [44].

Τα βασικά τμήματα που δομούν τη διαχείριση του κινδύνου βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4) είναι η αποτίμηση του κινδύνου (risk evaluation), η αντιμετώπιση του κινδύνου (risk treatment) και η παρακολούθηση και επαλήθευση (monitoring and verification).

5.1 Αποτίμηση του Κινδύνου (Risk evaluation)

Ο σκοπός της αποτίμησης του κινδύνου είναι να στηρίζει τη λήψη αποφάσεων με βάση τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, σχετικά με το ποιοί κίνδυνοι χρίζουν αντιμετώπισης και με τι προτεραιότητα. Η αποτίμηση, δηλαδή, καθορίζει τη σημαντικότητα ενός κινδύνου και τα επίπεδα ανοχής ως προς αυτόν, θέτοντας τις βάσεις για τη μετέπειτα αντιμετώπισή του.

Η πιο κοινή προσέγγιση για τον καθορισμό του επιπέδου ανοχής του κινδύνου είναι η μέθοδος ALARP (As Low As Reasonably Practicable), η οποία διακρίνει 3 ζώνες ανοχής:



Σχήμα 5.1: Η μέθοδος ALARP [41].

- Η ανώτερη ζώνη, όπου το επίπεδο του κινδύνου θεωρείται ως μη αποδεκτό και η αντιμετώπιση είναι απαραίτητη ανεξαρτήτως κόστους.
- Η μεσαία ή «γκρίζα» ζώνη, όπου το επίπεδο του κινδύνου θεωρείται αποδεκτό μόνο εφόσον η αντιμετώπισή του δεν είναι δυνατή ή το κόστος της είναι δυσανάλογα μεγάλο σε σχέση με τη βελτίωση που επιφέρει.

- Η κατώτερη ζώνη, όπου το επίπεδο του κινδύνου θεωρείται αμελητέο ή τόσο μικρό που δεν απαιτούνται μέτρα αντιμετώπισης.

Η αποτίμηση του κινδύνου που πραγματοποιείται σ' αυτό το σημείο, αφορά τον καθορισμό της σημαντικότητας του σε ένα πιο υψηλό επίπεδο όπου καθορίζονται και τα επίπεδα ανοχής ως προς αυτό. Η αποτίμηση του κινδύνου σε επίπεδο διαχείρισης, όπως αυτή πραγματοποιείται σε συνδυασμό με την αντιμετώπιση του κινδύνου και την παρακολούθηση, απαιτεί την ανάπτυξη σεναρίων διαρροής CO₂ (καταγράφηκε ως ο πιθανότερος κίνδυνος στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην αναγνώριση των κινδύνων). Τα σενάρια αυτά παρατίθενται στην παράγραφο 5.4 του κεφαλαίου.

5.2 Αντιμετώπιση του Κινδύνου (Risk treatment)

Η αντιμετώπιση του κινδύνου συνίσταται στη διαδικασία αναγνώρισης και αξιολόγησης των μέσων τροποποίησης του κινδύνου. Οι τρόποι αυτοί συνοψίζονται στους εξής [45]:

- Αποφυγή του κινδύνου λαμβάνοντας την απόφαση να μην αρχίσει ή να διακοπεί η δραστηριότητα που τον προκαλεί.
- Απομάκρυνση της πηγής του κινδύνου.
- Αλλαγή των πιθανοτήτων εμφάνισης του κινδύνου ή και των δυσμενών επιπτώσεων του.
- Επιμερισμός της ευθύνης του κινδύνου με άλλα μέρη (πχ μέσω οικονομικής κάλυψης).
- Διατήρηση του κινδύνου στη βάση τεκμηριωμένης απόφασης.

Η επιλογή του τρόπου αντιμετώπισης περιλαμβάνει την εξισορρόπηση μεταξύ του κόστους και του οφέλους από την εφαρμογή του, δεδομένων και του νομικού πλαισίου, της κοινωνικής ευθύνης και της ευθύνης απέναντι στο περιβάλλον. Συνήθως λαμβάνεται συνδυασμός μέτρων αντιμετώπισης, τα οποία υπόκεινται σε παρακολούθηση (monitoring) για να διαπιστωθεί αν σε βάθος χρόνου παραμένουν αποτελεσματικά.

Η αντιμετώπιση του κινδύνου σ' αυτό το σημείο, επίσης αναπτύσσεται σε ένα υψηλό επίπεδο όπου οι αποφάσεις για τα μέσα τροποποίησης του κινδύνου είναι πιο επιτελικές. Η αντιμετώπιση του κινδύνου εκτός από το επίπεδο χρειάζεται να δομείται σε συνεργασία με την αποτίμηση του κινδύνου και την παρακολούθηση, ώστε να αναπτύσσονται τα απαραίτητα μέτρα αντιμετώπισης/αποκατάστασης του κινδύνου. Η αντιμετώπιση του

κινδύνου σε αυτό το επίπεδο παρουσιάζεται στη παράγραφο 5.5 του κεφαλαίου μετά την ανάπτυξη των σχετικών τμημάτων/βημάτων που συνθέτουν τη διαχείριση του κινδύνου.

5.3 Παρακολούθηση και Επαλήθευση (Monitoring and Verification)

Η παρακολούθηση αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της Διαχείρισης του Κινδύνου. Τα αποτελέσματά της καταγράφονται και χρησιμοποιούνται ως βάση επανεξέτασης ολόκληρου του πλαισίου της διαχείρισης [45]. Μαζί με τη μοντελοποίηση εμπεριέχεται σ' όλα τα στάδια του έργου και επαναλαμβάνεται ανατροφοδοτώντας η μία την άλλη ως διαδικασίες, με δεδομένα για το χώρο αποθήκευσης, ακόμα και μετά το κλείσιμο του (52). Στο πλαίσιο αυτό η Επαλήθευση καλείται να επιβεβαιώσει τις αρχικές προβλέψεις που είχαν αρχικά υλοποιηθεί για το έργο και αναμόρφωση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση του.

5.3.1 Αναγκαιότητα και κύριοι στόχοι της Παρακολούθησης (Monitoring)

Η εφαρμογή της παρακολούθησης αποτελεί ζωτικό μέρος ενός έργου υπεδαφικής γεωλογικής αποθήκευσης CO₂, καθώς και μια διαδικασία που επιβάλλεται από τις κανονιστικές οδηγίες για την αδειοδότηση τέτοιου είδους έργων. Συγκεκριμένα η παρακολούθηση αποτελεί Άρθρο (Άρθρο 13, παρ.2) της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2009/31/EK σχετικά με την αποθήκευση CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς και μάλιστα η κατάρτιση του σχεδίου παρακολούθησης αποτελεί το Παράρτημα II αυτής.

Οι στόχοι της παρακολούθησης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- ◇ Η εξασφάλιση της δημόσιας υγείας και η ασφάλεια του τοπικού περιβάλλοντος
- ◇ Η επιβεβαίωση της ποσότητας του CO₂ που αποθηκεύθηκε και των προβλέψεων που είχαν προηγηθεί
- ◇ Η καταγραφή της μετανάστευσης του αποθηκευμένου CO₂ (μοντέλα προσομοίωσης)
- ◇ Η επιβεβαίωση της υλοποίησης και αποτελεσματικότητας των μηχανισμών παγίδευσης
- ◇ Η παροχή έγκαιρης πληροφόρησης για τυχόν διαρροές ή αστοχίες
- ◇ Η βελτιστοποίηση του έργου αποθήκευσης

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/31/ΕΚ (Άρθρο 13) (3) πρέπει να πραγματοποιείται παρακολούθηση των μονάδων εισπίεσης, του συγκροτήματος αποθήκευσης (συμπεριλαμβανομένου, όπου υπάρχει δυνατότητα, του θυσάνου CO₂) και κατά περίπτωση του γύρω περιβάλλοντος, για σκοπούς:

- α) σύγκρισης μεταξύ της πραγματικής και της αναπαριστώμενης με μοντέλο συμπεριφοράς του CO₂ και του νερού του σχηματισμού στον τόπο αποθήκευσης,
- β) ανίχνευσης σημαντικών ανωμαλιών,
- γ) ανίχνευσης της μετανάστευσης του CO₂,
- δ) ανίχνευσης της διαρροής του CO₂,
- ε) ανίχνευσης σημαντικών αρνητικών επενεργειών στο γύρω περιβάλλον, μεταξύ άλλων ιδίως στο πόσιμο νερό, τους ανθρώπινους πληθυσμούς ή χρήστες της γύρω βιόσφαιρας,
- στ) αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας τυχόν διορθωτικών μέτρων που αφορούν σε περιπτώσεις διαρροών ή σημαντικών ανωμαλιών,
- ζ) ενημέρωσης της αξιολόγησης της βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης ασφάλειας και ακεραιότητας του συγκροτήματος αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης του κατά πόσον το αποθηκευμένο CO₂ θα παραμείνει πλήρως και μονίμως αποθηκευμένο.

Η παρακολούθηση επίσης πρέπει να τονιστεί ότι αφορά τη συνολική διάρκεια του έργου που σημαίνει ότι θα πρέπει να καλύπτει τόσο τη φάση πριν την έναρξη λειτουργίας της αποθήκευσης, τη φάση λειτουργίας της αποθήκευσης (φάση εισπίεσης CO₂), όσο και μετά το τέλος της λειτουργίας (με το τέλος της εισπίεσης CO₂). Ο Πίνακας 5.1 παραθέτει για τον κύκλο ζωής ενός έργου γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ στις διάφορες αυτές φάσεις του, τις γενικές απαιτήσεις για παρακολούθηση.

Πίνακας 5.1: Απαιτήσεις παρακολούθησης σε ένα έργο γεωλογικής αποθήκευσης CO₂

Κύκλος ζωής του έργου και απαιτήσεις παρακολούθησης (τροποποιημένος από Benson, 2005)			
Φάση πριν τη λειτουργία	Κατά τη λειτουργία	Φάση κλεισίματος	Μετά το κλείσιμο
Επιλογή και Χαρακτηρισμός χώρου	Επιβεβαίωση ρυθμών εισπίεσης	Σταματά η εισπίεση	Τα καταγεγραμμένα αρχεία παραδίδονται στις ρυθμιστικές αρχές
Εκτίμηση Κινδύνου	Εντοπισμός θέσης Θυσάνου CO ₂	Απομακρύνονται οι επιφανειακές εγκαταστάσεις και σφραγίζονται οι γεωτρήσεις	Η παρακολούθηση θα κριθεί απαραίτητη μόνο εάν δεν έχει εξασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη ασφάλεια του χώρου αποθήκευσης
Καθορισμός αρχικών συνθηκών παρακολούθησης (base line monitoring)	Επιβεβαίωση ασφαλών εργασιών	Επιβεβαίωση μακροπρόθεσμης ασφάλειας του χώρου αποθήκευσης	
Χωροθέτηση γεωτρήσεων εισπίεσης και παρακολούθησης	Εντοπισμός και αποφυγή περιβαλλοντικών προβλημάτων		
	Βαθμονόμηση Μοντέλων	Βαθμονόμηση Μοντέλων	

5.3.2 Σχεδιασμός προγράμματος παρακολούθησης

Το πρόγραμμα παρακολούθησης θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να παρέχονται επαρκείς πληροφορίες για να μπορέσουν να εφαρμοστούν έγκαιρα και αποτελεσματικά τα μέτρα μετριασμού των κινδύνων και της αποκατάστασης των επιπτώσεων, σε περίπτωση απρόβλεπτων γεγονότων. Επίσης, σημαντικό είναι να καταστεί δυνατή η ικανοποιητική στρατηγική κλεισίματος του χώρου αποθήκευσης.

Κατά το σχεδιασμό της παρακολούθησης, λοιπόν, σε κάθε φάση του έργου, πρέπει να επανεξετάζονται όλες οι διαθέσιμες τεχνικές παρακολούθησης και να επιλέγονται αυτές οι οποίες κρίνονται καταλληλότερες με βάση τους στόχους του συγκεκριμένου έργου, την ισχύουσα νομοθεσία, την εκτίμηση κινδύνου που έχει προηγηθεί και τις ιδιαιτερότητες του χώρου αποθήκευσης.

Επαναλαμβάνεται σε αυτό το σημείο η σημασία σε επίπεδο παρακολούθησης στον κύκλο ζωής ενός έργου αποθήκευσης. Για κάθε φάση του έργου θα πρέπει να καθορίζονται τα ακόλουθα στο πρόγραμμα παρακολούθησης (Ευρωπαϊκή Οδηγία, 1.1 Παραρτήματος II):

- α) οι παράμετροι που παρακολουθούνται
- β) η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία παρακολούθησης και η αιτιολόγηση της επιλογής της τεχνολογίας
- γ) οι θέσεις παρακολούθησης και η λογική χωρικής δειγματοληψίας

δ) η συχνότητα εφαρμογής και η λογική της χρονικής δειγματοληψίας.

Η επιλογή των τεχνολογιών παρακολούθησης θα πρέπει να βασίζεται στις διαθέσιμες βέλτιστες πρακτικές. Γι αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικό, όπως άλλωστε είναι σημαντικό και για το σύνολο του προγράμματος παρακολούθησης, αυτό να υπόκειται σε επικαιροποίηση ώστε να συνεκτιμώνται επίσης και τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται κατά την εφαρμογή του.

5.3.3 Τεχνολογίες Παρακολούθησης

Υπάρχει μια πληθώρα τεχνολογιών που επιτρέπουν την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας ενός έργου αποθήκευσης.

Είναι σαφές ότι για να επιτευχθεί κάποιος στόχος της παρακολούθησης, το πλέον πιθανό είναι να χρειαστεί ένας συνδυασμός ή μια ακολουθία τεχνολογιών παρακολούθησης κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Αυτό αποτυπώνεται στον Πίνακα 5.2 που παρουσιάζει τη συσχέτιση των στόχων της παρακολούθησης σε επίπεδο αρχικού σχεδιασμού αυτής στο έργο και με ποιες προσεγγίσεις/τεχνολογίες αυτοί επιτυγχάνονται.

Μια πρώτη γενική κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών παρακολούθησης, η οποία βασίζεται στο επίπεδο ωριμότητας και χρήσης τους σε ανάλογα έργα, είναι η κάτωθι [60]:

α. Οι κύριες (primary) τεχνολογίες, οι οποίες αποτελούν δοκιμασμένες τεχνολογίες και στοχεύουν στην εκτίμηση του CO₂ που αποθηκεύεται εντός του χώρου αποθήκευσης, δύνανται να προστατεύσουν έναντι επιπτώσεων στην υγεία, την ασφάλεια και το περιβάλλον από φαινόμενα που συνδέονται με την εισπίεση και τυχόν διαρροές και μπορούν να αντιμετωπίσουν πιθανές καταστάσεις διαρροών. Αποτελούν τεχνολογίες γνωστές και έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς από την πετρελαϊκή βιομηχανία αλλά και στο γεωλογικό χαρακτηρισμό του υπεδάφους.

β. Οι δευτερεύουσες (secondary) τεχνολογίες, οι οποίες αποτελούν τεχνολογίες ρουτίνας, συχνά χαμηλού κόστους, ενώ συνήθως χρησιμοποιούνται στο χαρακτηρισμό ενός χώρου αποθήκευσης για την ανάπτυξη προσομοιώσεων του συγκεκριμένου χώρου, λειτουργούν κατά κύριο λόγο επικουρικά στις κύριες.

γ. Οι πιθανές (potential) τεχνολογίες. Αφορούν τεχνολογίες πιο εξειδικευμένες, οι οποίες είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσες δεδομένου ότι ασχολούνται σε ερευνητικό επίπεδο με την καλύτερη κατανόηση της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του CO₂ σε χώρους

αποθήκευσης, με τη μετανάστευση του CO₂ στο χώρο αποθήκευσης, με τη μακροπρόθεσμη ακεραιότητα της αποθήκευσης κλπ. Δύνανται επίσης να χρησιμοποιηθούν αργότερα και σαν εργαλείο παρακολούθησης.

Σε γενικές γραμμές οι βασικές τεχνολογίες παρακολούθησης καθώς και επιπλέον μετρήσεις για την ενίσχυση της παρακολούθησης που δύνανται να υλοποιούνται σε κάθε φάση ενός έργου γεωλογικής αποθήκευσης CO₂, φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Οι τεχνολογίες παρακολούθησης που αναπτύσσονται παρακάτω, παρουσιάζονται κατηγοριοποιημένες ως εξής :

- Τεχνολογίες παρακολούθησης ρυθμών και πιέσεων εισπίεσης CO₂
- Τεχνολογίες παρακολούθησης της ατμόσφαιρας (Atmospheric monitoring)
- Παρακολούθηση κοντά στην επιφάνεια (Near surface monitoring)
- Παρακολούθηση στο υπέδαφος (Sub surface monitoring)
- Παρακολούθηση σε υδάτινα περιβάλλοντα

Η κατηγοριοποίηση αυτή καλύπτει ουσιαστικά τους στόχους της παρακολούθησης καλύπτοντας τόσο θέματα πιθανών επιπτώσεων από διαρροές σε υπόγεια ύδατα, ατμόσφαιρα, οικοσυστήματα, αλλά και θέματα ασφάλειας και αποτελεσματικότητας του έργου αποθήκευσης.

Πίνακας 5.2: Συσχέτιση στόχων παρακολούθησης και τεχνολογιών παρακολούθησης. [54] Με πράσινο χρώμα είναι οι μέθοδοι που πιθανότερα χρησιμοποιούνται, ενώ με μπλε αυτές που δύνανται να χρησιμοποιηθούν.

	Μέτρηση πιέσεων στην κεφαλή της γεώτρησης και στον σχηματισμό	Μέτρηση ρυθμού εισπίεσης και παραγωγής	Δοκιμές πίεσης στην σωλήνωση και τον δάκτυλο της γεώτρησης	Προσδιορισμός θερμοκρασίας	Διαγραφίες γεωτρήσεων	Μελέτη σύνθεσης αερίων και ρευστών	Σεισμικές έρευνες	Ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις	Βαρυτομετρία	Μετρήσεις παραμόρφωσης επιφάνειας	Μετρήσεις με τιτόμετρα	Απεικόνιση από τον αέρα ή μέσω δαυλάδαυ	Παρακολούθηση Ζώνης αποστράγγισης και αερίων εδάφους	Παρακολούθηση ροών στην επιφάνεια	Παρακολούθηση ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων
Σκοπός παρακολούθησης															
Προσδιορισμός αρχικών συνθηκών	■			■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	
Έλεγχος εισπίεσης	■	■	■	■	■										
Εντοπισμός θέσης θυσάνου CO ₂	■				■	■	■	■	■	■					
Έλεγχος ακεραιότητας γεωτρήσεων	■				■	■	■	■	■			■	■	■	■
Προσδιορισμός αποδοτικότητας αποθήκευσης και των διαδικασιών της	■	■			■	■	■	■	■						
Βαθμονόμηση των μοντέλων και επιβεβαίωση (ή μη) της απόδοσής τους	■	■		■	■	■	■	■	■						
Προσδιορισμός επιφανειακής διαρροής (seepage)												■	■	■	■
Προσδιορισμός HSE επιπτώσεων						■	■	■	■	■	■	■	■		
Έλεγχος μικροσεισμικότητας										■	■				
Προσδιορισμός μέτρων αποκατάστασης	■				■	■	■	■	■			■	■	■	■
Inventory verification	■	■	■				■	■	■			■	■	■	■

Πίνακας 5.3: Βασικές τεχνολογίες παρακολούθησης που εφαρμόζονται ανά φάση του έργου

	Βασικές τεχνολογίες παρακολούθησης	Επιπλέον μετρήσεις για ενίσχυση της παρακολούθησης
Φάση πριν τη λειτουργία	<p>Διαγραφίες εντός γεωτρήσεων (well logs)</p> <p>Πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead pressure)</p> <p>Πίεση του σχηματισμού</p> <p>Δοκιμές μέτρησης ρυθμού εισπίεσης</p> <p>Σεισμικές μελέτες</p>	<p>Βαρυτικές μελέτες</p> <p>Ηλεκτρομαγνητικές μελέτες</p> <p>Παρακολούθηση ροών CO₂</p> <p>Πίεση και ποιότητα νερού πάνω από το σχηματισμό αποθήκευσης</p>
Φάση λειτουργίας	<p>Πίεση στην κεφαλή της (wellhead pressure)</p> <p>Μετρήσεις ρυθμού εισπίεσης</p> <p>Παρακολούθηση του ατμοσφαιρικού CO₂ στην κεφαλή της γεώτρησης</p> <p>Μικροσεισμικότητα</p> <p>Σεισμικές μελέτες</p>	<p>Διαγραφίες εντός γεωτρήσεων (well logs)</p> <p>Βαρυτικές μελέτες</p> <p>Ηλεκτρομαγνητικές μελέτες</p> <p>Συνεχής παρακολούθηση ροών CO₂ σε διάφορους σταθμούς</p> <p>Πίεση και ποιότητα νερού πάνω από το σχηματισμό αποθήκευσης</p>
Φάση με το τέλος της λειτουργίας	<p>Σεισμικές μελέτες</p>	<p>Βαρυτικές μελέτες</p> <p>Ηλεκτρομαγνητικές μελέτες</p> <p>Συνεχής παρακολούθηση ροών CO₂ σε διάφορους σταθμούς</p> <p>Πίεση και ποιότητα νερού πάνω από το σχηματισμό αποθήκευσης</p> <p>Παρακολούθηση της πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης για κάποια χρόνια πριν την εγκατάλειψη των γεωτρήσεων</p>

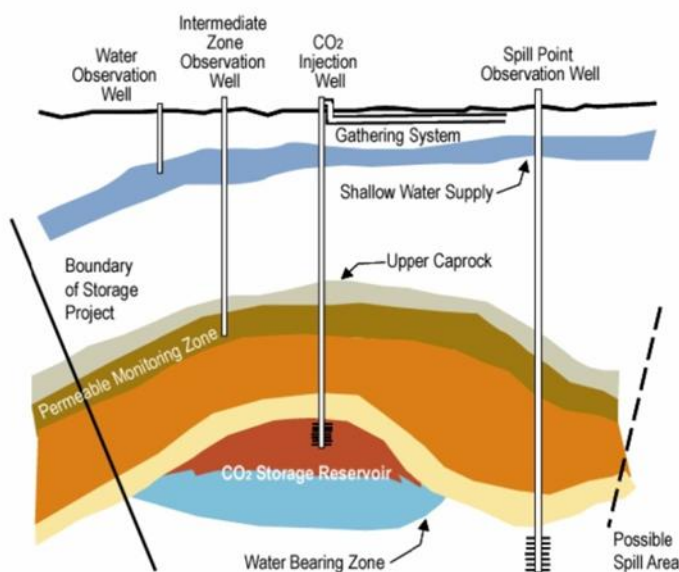
Τεχνολογίες παρακολούθησης ρυθμών και πιέσεων εισπίεσης CO₂

Η παρακολούθηση αυτή πραγματοποιείται συνήθως με τη χρήση γεωτρήσεων για την παρακολούθηση της αποθήκευσης του CO₂.

Η όρυξη γεωτρήσεων παρακολούθησης (observation wells) γίνεται σε κάποια απόσταση από τις γεωτρήσεις εισπίεσης και ως σκοπό έχει την απευθείας μέτρηση των συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης ενός χώρου αποθήκευσης, καθώς και την ανάλυση της σύστασης των ρευστών του υπεδάφους. Πρόκειται για μια σχετικά ακριβή μέθοδο, η οποία όμως παρέχει πολύτιμα δεδομένα και βοηθά στην ερμηνεία των σεισμικών ερευνών αλλά και στο σχεδιασμό των μοντέλων του σχηματισμού.

Οι γεωτρήσεις παρακολούθησης (ή παρατήρησης) (Εικόνα 5.1) μπορούν, επίσης, να ορυχθούν και στους υπερκείμενους ή παρακείμενους σχηματισμούς του χώρου αποθήκευσης. Περιοδικά αντλούνται ρευστά για να διαπιστωθεί εάν έχουν μολυνθεί με CO₂. Εάν διαπιστωθεί κάποια διαρροή, αυτές οι γεωτρήσεις μπορούν να μετατραπούν και σε γεωτρήσεις παραγωγής του CO₂ ώστε αυτό να ανακτηθεί και να εισπιαστεί εκ νέου.

Η παρακολούθηση μέσω γεωτρήσεων γίνεται, εκτός από τη δειγματοληψία, και μέσω της εκτέλεσης διαγραφιών και της διεξαγωγής διαφόρων δοκιμών. Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται και στις γεωτρήσεις εισπίεσης, καθώς είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ελέγχεται η μηχανική τους ακεραιότητα και η ομαλή διεξαγωγή των εργασιών της εισπίεσης. Πολλών ειδών διαγραφίες χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό, συμπεριλαμβανομένων διαγραφιών θερμοκρασίας, θορύβου, (διαγραφίες ραδιενεργών ιχνηθετών (radioactive tracer logs), αλλά και διαγραφίες που απεικονίζουν μικρορωγμές στη σωλήνωση της γεώτρησης (cement bond logs) [51].



Εικόνα 5.1: Τύποι γεωτρήσεων παρατήρησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έργα αποθήκευσης CO₂ [52].

Οι γεωτρήσεις παρατήρησης έχουν χρησιμοποιηθεί σε έργα αποθήκευσης φυσικού αερίου, καθώς και σε εφαρμογές απόθεσης επικίνδυνων αποβλήτων. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι αυτού του είδους οι γεωτρήσεις να μη θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα και την ιδιότητα της συγκράτησης του χώρου αποθήκευσης.

Τεχνολογίες παρακολούθησης της ατμόσφαιρας (Atmospheric monitoring)

Οι τεχνικές παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ποιότητας βοηθούν στον εντοπισμό συγκεντρώσεων CO₂, οι οποίες ξεπερνούν τα φυσιολογικά επίπεδα, προσδιορίζοντας έτσι το πού βρίσκεται μια πιθανή διαρροή. Αυτού του είδους η παρακολούθηση εκτιμάται ότι έχει το μικρότερο κόστος και τη μεγαλύτερη αμεσότητα στις μετρήσεις, ενώ παράγονται δεδομένα με μεγάλη συχνότητα τα οποία καλύπτουν πολλές παραμέτρους (πχ. ταχύτητα και κατεύθυνση του αέρα, υγρασία, αναλογίες αερίων, κοκ).

Παρόλα αυτά, λόγω της ανάμιξης του αέρα και της αφθονίας πηγών που εκπέμπουν CO₂ (βλάστηση, άλλες βιομηχανίες, κοκ) είναι δύσκολο να εντοπιστεί μια μικρή διαρροή. Επίσης, εάν οι διαφεύγουσες ποσότητες CO₂ εντοπιστούν εφόσον έχουν ήδη φτάσει στην επιφάνεια, τότε ίσως να είναι πλέον δύσκολο να εφαρμοστούν μέτρα αποκατάστασης και να ελεγχθεί η διαρροή.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής [60]:

✚ Ανιχνευτές CO₂ (CO₂ detectors): Πρόκειται για μικρές και φορητές συσκευές, οι οποίες λειτουργούν με βάση τις αρχές της υπέρυθρης ανίχνευσης και μετρούν συγκεντρώσεις CO₂ σε σχέση με τα υπόλοιπα αέρια. Είναι μια απλή διαθέσιμη τεχνολογία ποιοτικής ανίχνευσης υψηλής συγκέντρωσης CO₂ και δε μπορεί να προσδιορίσει τον ρυθμό ή την έκταση μιας διαρροής.

✚ Συνδιακύμανση δινών (Eddy covariance) (Εικόνα 5.2(α)): Πρόκειται για τεχνική μέτρησης ροής συγκεντρώσεων CO₂ σε ένα ύψος πάνω από το έδαφος, υπολογίζοντας παράλληλα μικρομετεωρολογικές μεταβλητές (πχ ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία και θερμοκρασία). Ανιχνεύει το CO₂ σε μεγάλη έκταση και σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας ακριβή δεδομένα, αλλά απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός και επεξεργασία των δεδομένων. Επίσης, οι μετρήσεις μπορεί να επηρεαστούν από τα καιρικά φαινόμενα και από εκπομπές CO₂ από άλλες πηγές (δημιουργία «θορύβου»).

✚ Σύστημα εντοπισμού διαρροών (Advanced Leak Detection System): Είναι ένα σύστημα ανίχνευσης διαρροών, το οποίο μέσω ενός ευαίσθητου ανιχνευτή τριών αερίων (CO₂, CH₄, ολικών υδρογονανθράκων) και ένα ενσωματωμένο σύστημα GPS μπορεί να προσδιορίσει τις συγκεντρώσεις CO₂ σε σχέση με τη γεωγραφική τους θέση. Χρησιμοποιείται συχνά και στην παρακολούθηση των αγωγών (pipeline monitoring) και μπορεί να διαχωρίσει ένα σήμα διαρροής από άλλες διαδικασίες που παράγουν CO₂.

Απαιτεί πολύ χρόνο η επεξεργασία των δεδομένων και η απόκριση σε μια πιθανή διαρροή δεν θα είναι άμεση.

✚ Laser Systems and Light Detection/ Ranging (LIDAR): Πρόκειται για μια μέθοδο ραντάρ (δηλαδή μετράται ο χρόνος καθυστέρησης μεταξύ της μετάδοσης του παλμού και της επιστροφής του ανακλώμενου σήματός του). Μια συσκευή παράγει μια ακτίνα laser πολλών μέτρων σε μήκη κύματος που απορροφώνται από το CO₂. Αυτή η ακτίνα ανακλάται σε ένα κάτοπτρο και όταν επιστρέφει, μετράται η εξασθένισή της και προσδιορίζεται η συγκέντρωση του CO₂ που συνάντησε. Εφαρμόζεται σε περιοχές περιορισμένης πρόσβασης και καλύπτει μεγάλες περιοχές σε μικρό χρονικό διάστημα, εντοπίζοντας γρήγορα διαρροές και καθιστώντας έτσι αποτελεσματικά τα μέτρα αποκατάστασης. Τα μειονεκτήματά της είναι ότι απαιτεί βέλτιστες καιρικές συνθήκες και δίνει μεγάλα σύνολα δεδομένων που είναι δύσκολα στη διαχείριση.

✚ Ιχνηθέτες (Tracers): Πρόκειται για χημικές ενώσεις, οι οποίες μπορούν να εισπνευστούν μαζί με το CO₂ και να χρησιμοποιηθούν ως το «δακτυλικό αποτύπωμα» του ώστε σε περίπτωση διαρροής του να μπορεί να διαχωριστεί από CO₂ που ενδεχομένως προέρχεται από άλλες πηγές. Χρησιμοποιούνται τεχνητοί ιχνηθέτες (πχ υπερφθοράνθρακες PFTs), οι οποίοι ανιχνεύονται σε ppb, ή φυσικοί, όπως σταθερά ισότοπα C, H, O, S. Στην αξιολόγηση μιας διαρροής, αυτή η μέθοδος μπορεί να παρέχει απαραίτητες πληροφορίες για την πορεία ροής του CO₂, όμως δεν είναι απολύτως κατανοητό το πώς αλληλεπιδρούν οι ιχνηθέτες με τα ρευστά και τους σχηματισμούς στο υπέδαφος, γεγονός που δυσκολεύει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Παρακολούθηση κοντά στην επιφάνεια (Near surface monitoring)

Οι τεχνικές παρακολούθησης, οι οποίες εφαρμόζονται κοντά στην επιφάνεια είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τον έλεγχο των υπόγειων πηγών υδάτων που βρίσκονται σε μικρό βάθος. Επίσης, παρέχουν πληροφορίες για σημαντικές μεταναστεύσεις ποσοτήτων CO₂ κάθετα προς την επιφάνεια. Οι τεχνικές αυτές κοστίζουν λιγότερο από τις μεθόδους παρακολούθησης που διεξάγονται βαθιά μέσα στο υπέδαφος και καθώς οι διαφεύγουσες ποσότητες CO₂ παραμένουν στο υπέδαφος περισσότερο χρονικό διάστημα απ' ό τι στην ατμόσφαιρα, αυξάνονται οι πιθανότητες εντοπισμού μιας πιθανής διαρροής.

Παρόλα αυτά, η παρακολούθηση κοντά στην επιφάνεια φέρει παρόμοιους περιορισμούς μ' αυτήν που γίνεται στην ατμόσφαιρα. Υπάρχουν πολλές πηγές παραγωγής CO₂

(μικροοργανισμοί που ζουν στο έδαφος, βλάστηση, κοκ) που καθιστούν δύσκολο τον εντοπισμό διαρροής της εισπνεζόμενης μάζας και πολλοί παράγοντες που καθιστούν δύσκολη την ανάλυση των αποτελεσμάτων (π.χ. υγρασία του εδάφους, εναλλαγές πιέσεων, θερμοκρασία ανά ημέρα ή και εποχή, κοκ). Ακόμα, όπως και στις ατμοσφαιρικές μεθόδους, η μέτρηση μιας διαρροής γίνεται σχετικά με καθυστέρηση κι αυτό ενδεχομένως να έχει κάποιο αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα των μέτρων αντιμετώπισής της.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται εδώ είναι οι εξής [60]:

✚ Παρακολούθηση απόκρισης του οικοσυστήματος (Ecosystem stress monitoring):

Πρόκειται για μελέτη των οποιωνδήποτε αλλαγών στο οικοσύστημα που κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται σε μια διαρροή CO₂, μέσω δορυφορικής απεικόνισής του, λήψη αεροφωτογραφιών, με χρήση έγχρωμης υπέρυθρης ορθοφωτογράφισης (color infrared orthoimagery). Για τη σωστή ερμηνεία των δεδομένων που προκύπτουν, πρέπει να είναι κατανοητές οι μεταβολές στις οποίες υπόκεινται η χλωρίδα (σύνθεση, ποσότητα, κοκ), όταν οι συνθήκες αλλάζουν. Προσοχή πρέπει να δίνεται στο να μην παρερμηνεύονται μεταβολές στο οικοσύστημα που μπορεί να οφείλονται σε άλλους παράγοντες και όχι σε μια διαρροή του εισπνεζόμενου CO₂.

✚ Παρακολούθηση υπογείων υδάτων (Groundwater monitoring):

Ίσως υπάρξουν επιπτώσεις στα υπόγεια ύδατα που μπορεί να προκύψουν από την μετανάστευση CO₂ σε υπόγειες πηγές πόσιμου νερού. Μ' αυτή την μέθοδο μπορούν να αξιολογηθούν οι τυχόν αλλαγές σε μια χρονική περίοδο με τη μέτρηση: του pH, της ειδικής αγωγιμότητας, της αλκαλικότητας, των κύριων χημικών συστατικών καθώς και των ιχνοστοιχείων, των διαλυμένων αερίων, των σταθερών ισοτόπων, των ραδιοϊσοτόπων (14C) και του οξειδοαναγωγικού δυναμικού, ώστε να προσδιοριστεί η περιοχή και οι επιπτώσεις της μετανάστευσης του CO₂. Αυτές οι παράμετροι προσδιορίζονται με δειγματοληψία μέσω γεωτρήσεων αλλά και από επιφανειακές πηγές πριν και μετά την εισπνοή και με σύγκριση των αποτελεσμάτων. Και εδώ απαιτείται προσοχή στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορεί να αλλάξουν την ποιότητα του νερού, εκτός από το CO₂ που αποθηκεύεται.

✚ Υπερφασματική απεικόνιση (Thermal Hyperspectral Imaging)(Εικόνα 5.2(γ)):

Η υπερφασματική απεικόνιση συλλέγει πληροφορίες μέσω αισθητήρων (χειρός ή δορυφορικοί) και τις επεξεργάζεται. Οι πληροφορίες αυτές αποτελούνται από ένα σύνολο εικόνων από ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, οι οποίες συνδυάζονται για να

σχηματίσουν ένα τρισδιάστατο μοντέλο προς επεξεργασία και ανάλυση. Στόχος και εδώ είναι η αξιολόγηση της ακεραιότητας της βλάστησης γύρω από την περιοχή εισπίεσης, σε σημεία που μπορεί να μην είναι προσβάσιμα από το έδαφος. Απαιτείται πολύ καλός εξοπλισμός (γρήγοροι υπολογιστές, ευαίσθητοι αισθητήρες και μεγάλης δυναμικότητας συσκευές αποθήκευσης).

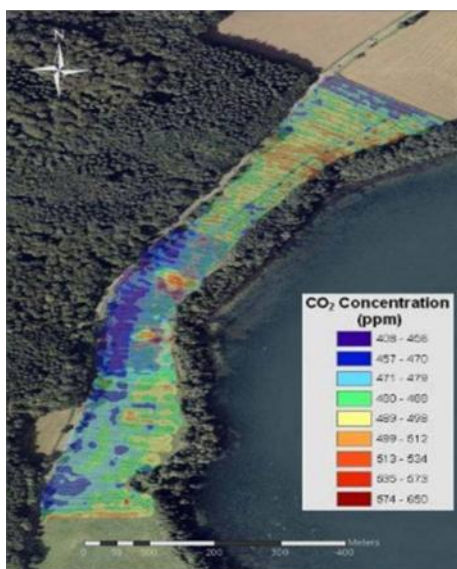


Εικόνα 5.2: Μέθοδοι παρακολούθησης στην επιφάνεια: (α) πύργος παρακολούθησης ροών (Eddy covariance), (β) μετρήσεις αερίων εδάφους (soil gas), γ) Υπερφασματική απεικόνιση της βλάστησης [54].

✚ Ιντερφερομετρικό ραντάρ (Interferometric Synthetic Aperture Radar, SAR και InSAR): Πρόκειται για μια τεχνολογία κατά την οποία κύματα ραντάρ στέλνονται στο έδαφος μέσω δορυφόρου και μετράται η ανάκλασή τους ώστε να προσδιοριστεί η θέση της επιφάνειας του εδάφους. Παράγονται έτσι διαδοχικές απεικονίσεις του, οι οποίες συγκρινόμενες μπορούν να δώσουν την κατακόρυφη παραμόρφωση της επιφάνειας της γης που έχει συμβεί στο ενδιάμεσο διάστημα. Μ' αυτόν τον τρόπο μετράται η απόκριση της επιφάνειας σε αυξημένες πιέσεις (λόγω της εισπίεσης και μετακίνησης του CO₂) αλλά δεν εντοπίζεται ακριβώς η θέση του θυσάνου του CO₂ υπογείως. Με τη μέθοδο αυτή καλύπτονται μεγάλες αποστάσεις (~100 τετρ. χλμ) και δυσπρόσιτες περιοχές, αλλά για να

είναι αποδοτική πρέπει να εφαρμόζεται σε περιοχές με απλή τοπογραφία (όχι απομακρυσμένες περιοχές), ελάχιστη βλάστηση και ελάχιστη χρήση γης ώστε να μη διαταράσσεται το σημείο ανάκλασης και λαμβάνεται στρεβλωμένη εικόνα.

✚ Color Infrared Transparency Film: Πρόκειται για μέθοδο λήψης αεροφωτογραφιών με ευαίσθητα στρώματα φιλμ που απεικονίζουν και τα χρώματα του υπέρυθρου φάσματος (Εικόνα 5.3). Οι φωτογραφίες λαμβάνονται από αεροσκάφος ή μέσω δορυφόρου ή ακόμα και σε μικρό ύψος από το έδαφος και καθορίζουν το πόσο υγιής είναι η βλάστηση μιας περιοχής (καθότι αποτελεί έναν δείκτη ύπαρξης διαρροής CO₂ στην περιοχή). Ο συνδυασμός των μηκών κύματος που υπόκεινται σε επεξεργασία, παρέχει με σχετική ακρίβεια το τι συμβαίνει στην περιοχή. Η παρουσία μάζας νερού αλλοιώνει την ποιότητα της εικόνας λόγω της απορρόφησης των μηκών κύματος κοντά στο υπέρυθρο φάσμα (εμφανίζεται ως μαύρο).



Εικόνα 5.3: Απεικόνιση συγκεντρώσεων CO₂ στον αέρα μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας, Laacher See, Γερμανία [61].

✚ Τιλτόμετρα (Tiltmeter): Πρόκειται για όργανα σχεδιασμένα να μετρούν και να ποσοτικοποιούν πολύ μικρές αλλαγές από την οριζόντιο είτε στην επιφάνεια είτε σε βάθος (σαν αλφάδι). Τοποθετούνται σε συστοιχίες που εγκαθίστανται είτε στην επιφάνεια της γης, είτε υπεδαφικά σε γεωτρήσεις και προσδιορίζουν την επιφανειακή παραμόρφωση που προκαλείται από την αλληλεπίδραση του CO₂, με τα ρευστά και τους βραχώδεις σχηματισμούς. Η παραμόρφωση αυτή κατά κανόνα είναι της τάξης μερικών εκατοστών.

Μ' αυτήν την μέθοδο μπορεί να υπολογιστεί και το εμβαδόν της επιφάνειας παραμόρφωσης, αλλά όχι άμεσα η μάζα του εισπνεζόμενου CO₂.

✚ Θάλαμος συσσώρευσης ροών (Flux Accumulation Chambers): Πρόκειται για ένα θάλαμο με ανοικτό πυθμένα (κλίμακα cm) που τοποθετείται είτε απευθείας στην επιφάνεια του εδάφους ή σε ένα κολάρο εγκατεστημένο στο έδαφος. Ο αέρας που περιέχεται στο θάλαμο, κυκλοφορεί δια μέσου ενός υπέρυθρου αναλυτή αερίων (IRGA-infrared gas analyzer) και υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης του CO₂ σ' όλη την επιφάνεια του εδάφους στο σημείο μέτρησης. Προσφέρει έναν εύκολο και γρήγορο τρόπο προσδιορισμού της ροής του CO₂ από το έδαφος σε μια μικρή καθορισμένη περιοχή και επιτρέπει τη συλλογή υψηλής ποιότητας δειγμάτων αερίων, στα οποία μπορούν να ανιχνευτούν φυσικώς απαντώμενοι ιχνηθέτες (ισότοπα ή ευγενή αέρια) ή εισηγμένοι τεχνητά ιχνηθέτες (με εισπίεση όπως περιγράφηκε πιο πάνω). Η παρακολούθηση μεγάλης περιοχής όμως απαιτεί πολλές εγκαταστάσεις και οι εποχιακές μεταβολές των ροών του εδάφους (soil gas flux) δυσκολεύουν τις ορθές εκτιμήσεις μιας πιθανής διαρροής. Επίσης, η μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική εάν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται κοντά στη επιφάνεια ή το έδαφος είναι υγρό ή παγωμένο.

✚ Επαγωγική πόλωση (Induced polarization): Κατά την μέθοδο αυτή επάγεται ηλεκτρικό ρεύμα (εναλλασσόμενο) στο υπέδαφος μέσω ενός ζεύγους ηλεκτροδίων και μετράται η απόσβεση της τάσης που δημιουργείται μέσω ενός δεύτερου ζεύγους ηλεκτροδίων. Το φαινόμενο της επαγωγικής πόλωσης παρατηρείται όταν διακόπτεται η παροχή του ρεύματος, καθώς η τάση δεν επιστρέφει ακαριαία στο μηδέν αλλά φθίνει σιγά σιγά, δείχνοντας ότι έχει αποθηκευτεί φόρτιση στους σχηματισμούς. Πρόκειται για μια γεωφυσική τεχνολογία απεικόνισης που χρησιμοποιείται για ανίχνευση μεταλλικών υλικών στα στρώματα κάτω από την επιφάνεια, ιδιαίτερα μεταλλευμάτων.

✚ Μετρήσεις φυσικού δυναμικού (Spontaneous (Self) Potential): Πρόκειται για μια γεωηλεκτρική μέθοδο που βασίζεται στις μετρήσεις, που διεξάγονται από την επιφάνεια, των φυσικών διαφορών δυναμικού που οφείλονται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος. Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι απλός και αποτελείται από δύο μη πολωμένα ηλεκτρόδια, συνδεδεμένα με ένα μετρητή τάσης (millivoltmeter), τα οποία διεισδύουν στο έδαφος. Αυτή η μέθοδος βοηθά στην ταχεία αναγνώριση του εδάφους, κυρίως όσον αφορά μεταλλοφορίες, αλλά δίνει μόνο ποιοτικά αποτελέσματα και για βάθη περίπου ως 30 μέτρα.

✚ Παρακολούθηση της ζώνης αποστράγγισης και των αερίων του εδάφους (Soil and vadose zone gas monitoring) (Εικόνα 5.2 (β)): Με την μέθοδο αυτή αφού γίνει δειγματοληψία αερίων από το έδαφος και τη ζώνη αποστράγγισης, αναλύεται η σύστασή τους (με υπέρυθρο αναλυτή ή αέρια χρωματογραφία, κοκ) ώστε να διαπιστωθεί εάν υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ που ίσως υποδεικνύουν την ύπαρξη διαρροής. Παρέχει αρκετά ακριβείς πληροφορίες για την παρουσία του CO₂ αλλά βασικό ρόλο έχει ο κánaβος της δειγματοληψίας. Αν η χωρική ανάλυση είναι μεγαλύτερη, τότε αυξάνεται το κόστος και ο χρόνος κάλυψης μιας περιοχής, αλλά τα δεδομένα είναι πιο ακριβή.

✚ Δισδιάστατες σεισμικές έρευνες μικρού βάθους (2D shallow seismic): Πρόκειται για μια γεωφυσική μέθοδο παρακολούθησης που βασίζεται στον προσδιορισμό του χρόνου μεταξύ της δημιουργίας ενός σεισμικού κύματος (μέσω μιας τεχνητής ελεγχόμενης πηγής, π.χ. μηχανές δόνησης ή χρήση δυναμίτιδας) και της επιστροφής της ανάκλασής του στους σεισμικούς ανιχνευτές (γεώφωνα). Καταγράφοντας αυτόν τον χρόνο μπορεί να γίνει εκτίμηση του βάθους των σχηματισμών που δημιούργησαν την ανάκλαση. Προκύπτει μ' αυτόν τον τρόπο ένα κατά προσέγγιση γεωλογικό προφίλ της περιοχής που παρουσιάζεται σαν μια δισδιάστατη τομή μέσα στη γη. Εάν τα γεώφωνα είναι τοποθετημένα σε μια ευθεία γραμμή, τότε πρόκειται για σεισμική έρευνα σε δύο διαστάσεις, ενώ εάν σχηματίζουν πλέγμα, τότε έχουμε έρευνα σε τρεις διαστάσεις. Οι σεισμικές έρευνες βασίζονται στην αλλαγή της ταχύτητας του κύματος καθώς αυτό διέρχεται από διαφορετικά υλικά. Μπορεί, λοιπόν, μ' αυτόν τον τρόπο να δοθεί μια εικόνα του υπεδάφους και της παρουσίας αέριας φάσης του CO₂, αλλά δεν μπορεί να εντοπιστεί το CO₂, το οποίο έχει διαλυθεί στα υπόγεια ύδατα.

Παρακολούθηση στο υπέδαφος (Subsurface monitoring)

Η παρακολούθηση στο υπέδαφος είναι η βασικότερη διαδικασία μέσω της οποίας αναγνωρίζεται η θέση της θυσάνου του εισπνεζόμενου CO₂, ο τρόπος διάδοσης της πίεσης και η μηχανική ακεραιότητα του σχηματισμού αποθήκευσης και του πρωτογενούς καλύμματος. *Ο χαρακτηρισμός και η μοντελοποίηση είναι τα πρώτα εργαλεία επιβεβαίωσης της καταλληλότητας της ζώνης εισπίεσης και μέσω της ανατροφοδότησής τους με δεδομένα από τις μεθόδους παρακολούθησης (πχ δειγματοληψία πυρήνων, διαγραφίες, κοκ) επιβεβαιώνουν τις αρχικές προβλέψεις σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος αποθήκευσης.*

Η παρακολούθηση που διεξάγεται στο υπέδαφος γίνεται μέσω των γεωτρήσεων, γεγονός που την καθιστά κοστοβόρα. Οι τεχνικές δε μπορούν να ποσοτικοποιήσουν απευθείας το CO₂ που βρίσκεται στο σχηματισμό αποθήκευσης και να διαπιστώσουν αν μέρος του έχει διαφύγει. Η επιβεβαίωση της μη ύπαρξης διαρροής ή μετανάστευσης του CO₂ από τα προβλεπόμενα όρια της αποθήκευσης, γίνεται με άμεσο τρόπο.

Οι τεχνικές παρακολούθησης στο υπέδαφος είναι οι εξής [60]:

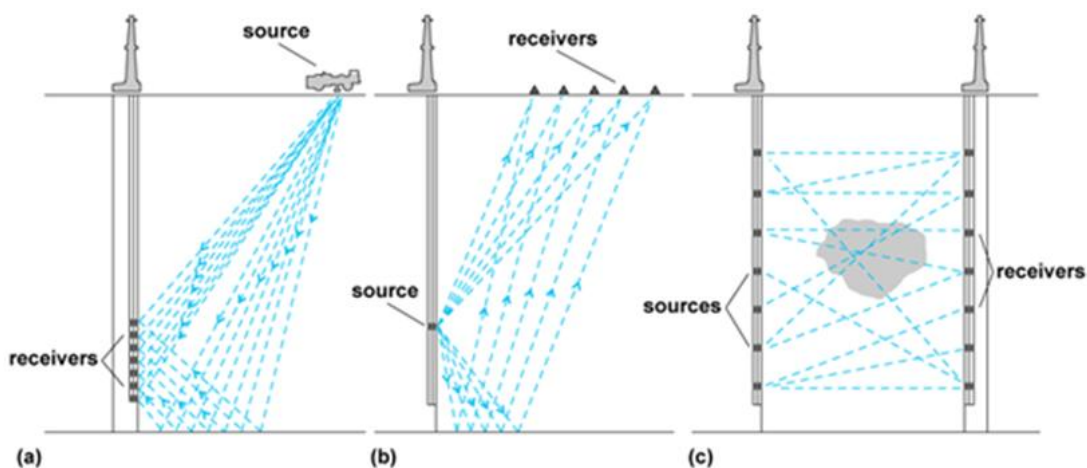
✚ Τρισδιάστατες σεισμικές έρευνες (3D seismic time-lapse survey): Αυτή η μέθοδος

βασίζεται στις ίδιες αρχές που περιγράφηκαν στις δισδιάστατες σεισμικές έρευνες. Στην περίπτωση 3D έρευνας, αναπτύσσεται ένα δισδιάστατο πλέγμα επιφανειακών πηγών και αισθητήρων. Τα δεδομένα που καταγράφονται, συνδυάζονται για να παράγουν μια τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους. Οι συμβατικές επιφανειακές σεισμικές έρευνες καταγράφουν μόνο τα επιμήκη P κύματα (Primus), ενώ οι πιο εξελιγμένες (multi-component) καταγράφουν αμφότερα, και τα επιμήκη και τα διαμήκη κύματα (S). Είναι η μόνη διαθέσιμη τεχνική που αξιολογεί το σύνολο του όγκου της περιοχής ενδιαφέροντος με την υψηλότερη ανάλυση, ενώ οι υπόλοιπες, συνήθως δίνουν μέρος της (πχ κοντά στην γεώτρηση, κατά μήκος των τόξων των δεκτών, κοκ). Το μειονέκτημά της είναι ότι δεν μπορεί να ανιχνεύσει το διαλυμένο ή παγιδευμένο CO₂ και συνεπώς δε μπορεί να γίνει ποσοτικοποίηση του αποθηκευμένου όγκου.

✚ Κάθετο σεισμικό προφίλ (Vertical Seismic Profile): πρόκειται για μια σεισμική μέθοδο

κατά την οποία η σεισμική ενέργεια μεταδίδεται περιοδικά στους υπόγειους σχηματισμούς από μια επιφανειακή πηγή μέσα (Εικόνα 5.4(β)(γ)) ή κοντά (offset) σε μια γεώτρηση (Εικόνα 5.4(α)). Τα σεισμικά κύματα μπορούν να ανιχνευτούν από τους δέκτες (γεώφωνα), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι είτε κατά μήκος της γεώτρησης, είτε στην επιφάνεια. Σχηματίζεται μ' αυτόν τον τρόπο ένα κατακόρυφο σεισμικό προφίλ των υπόγειων σχηματισμών που περιβάλλουν τη γεώτρηση.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων των επιφανειακών σεισμικών ερευνών (καθ' ότι έχει μεγαλύτερη ανάλυση). Επίσης, παράγει εμπειριστατωμένες πληροφορίες σχετικά με τη συγκέντρωση και μετανάστευση του CO₂ πλησίον της γεώτρησης και οριοθετεί τις πιθανές οδούς μετανάστευσης του (πχ ρήγματα)



Εικόνα 5.4: Απεικόνιση σεισμικών ερευνών: a) Offset κάθετο σεισμικό προφίλ, b) Ανεστραμμένο σεισμικό προφίλ, c) Crosswell τομογραφία [114].

✚ [Μικροσεισμικές έρευνες \(Microseismic passive survey\)](#): Η προσέγγιση αυτή παρέχει μια εικόνα των ρηγμάτων, ανιχνεύοντας μικροσεισμούς που προκαλούνται από διατμητική ολίσθηση (shear slippage). Η θέση των μικροσεισμικών γεγονότων προσδιορίζεται μέσω μιας ενδοφρεάτιας συστοιχίας δεκτών, τοποθετημένης σε κάποιο βάθος σε μια γεώτρηση δίπλα σε αυτή της εισπίεσης. Η μικροσεισμική χαρτογράφηση μπορεί να γίνει και μέσα στην ίδια τη γεώτρηση εισπίεσης, εφόσον δεν υπάρχουν άλλες κατάλληλες εκτός χρήσης γεωτρήσεις. Πολύ συχνά συνδυάζονται οι μικροσεισμικές έρευνες με τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα τιλτόμετρα. Η μέθοδος παρέχει ένα σύνολο δεδομένων σε τρισδιάστατη μορφή, το οποίο μπορεί να συμβάλει στη χαρτογράφηση σημαντικών χαρακτηριστικών της πίεσης και των ευάλωτων περιοχών (πχ. ρηγμάτων) του σχηματισμού αποθήκευσης,

✚ [Crosswell σεισμικές έρευνες \(Cross well seismic\)](#): Αυτού του είδους οι σεισμικές έρευνες διεξάγονται μεταξύ γεωτρήσεων και χαρακτηριστικό τους είναι πώς, τόσο οι πηγές των σεισμικών κυμάτων όσο και οι αποδέκτες, βρίσκονται μέσα στις ίδιες τις γεωτρήσεις μεταξύ των οποίων διεξάγεται η έρευνα. Οι συστοιχίες των δεκτών έχουν σταθερές καθορισμένες θέσεις μέσα στη γεώτρηση. Αντίθετα, οι πηγές ανελκύνονται με αργό ρυθμό μέσα στις γεωτρήσεις και σε προκαθορισμένες θέσεις πυροδοτούνται. Τυπικές αποστάσεις μεταξύ γειτονικών πηγών κυμαίνονται μεταξύ 2.5 ft (0.8 m) και 20ft (6m). Οι αποστάσεις των δεκτών είναι συνήθως παρόμοιες. Αυτή η τεχνολογία εφαρμόζεται για την οριοθέτηση ενός ταμιευτήρα, το χαρακτηρισμό και την παρακολούθησή του. Η παρακολούθηση των αλλαγών στις συνθήκες του ταμιευτήρα (πχ κορεσμός ή πίεση) είναι

ιδιαίτερα αποτελεσματική αλλά απαιτεί πολλαπλές επαναλήψεις στην ίδια θέση, έτσι ώστε να υπάρχει μια κατά διαστήματα απεικόνιση του. Η απεικόνιση των ιδιοτήτων του ταμιευτήρα μπορεί να συνεισφέρει στον χαρακτηρισμό του.

✚ Μαγνητοτελλουρική μέθοδος (Magnetotelluric sounding): Πρόκειται για μια ακόμη γεωφυσική μέθοδο απεικόνισης των υποεπιφανειακών δομών της γης, η οποία επιτυγχάνεται με τη χαρτογράφηση της χωρικής διακύμανσης της αντίστασης της γης. Τα φυσικώς μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία της γης μετρώνται σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων (0,0001 ως 10000Hz). Μπορεί να εξετάσει τη γη σε βάθος αρκετών δεκάδων χιλιομέτρων, αλλά σαν μέθοδος απαιτεί ακόμα περαιτέρω ανάπτυξη όσον αφορά την παρακολούθηση της κίνησης του CO₂ στο υπέδαφος.

✚ Ηλεκτρομαγνητική Αντίσταση (Electromagnetic Resistivity): Πρόκειται για μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (electrical conductivity) του υπεδάφους, συμπεριλαμβανομένου του εδάφους, των υπογείων υδάτων, των πετρωμάτων και των θαμμένων αντικειμένων. Οι ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές είναι ευαίσθητες ως προς τα ρευστά των πόρων των σχηματισμών του υπεδάφους, και γι' αυτό έχουν προταθεί για χρήση απεικόνισης του CO₂ σε εφαρμογές EOR. Τα ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα συνήθως παρουσιάζονται ως απεικονίσεις περιγράμματος (contour plots).

✚ Τομογραφία ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (Electromagnetic Induction Tomography): Αυτή η τεχνική απεικονίζει τις μεταβολές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη γη. Για παράδειγμα, οι βραχώδεις σχηματισμοί, οι οποίοι περιέχουν πολύ νερό στους πόρους τους, είναι περισσότερο αγωγάμοι απ' ό,τι αυτοί που περιέχουν CO₂. Η πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι πομποί που λειτουργούν ως πηνία επαγωγής (μαγνητικό δίπολο) και εγκαθίστανται στην επιφάνεια ή σε γεωτρήσεις και μαζί με τους δέκτες σχηματίζουν μια διαμόρφωση που περιβάλλει την περιοχή ενδιαφέροντος. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή 3D εικόνων των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, βάσει των οποίων μπορεί να βελτιωθεί ο χαρακτηρισμός του χώρου αποθήκευσης και να εντοπιστεί η θέση του εισπιαζόμενου CO₂.

✚ Παρακολούθηση πίεσης στο δακτύλιο και στον πυθμένα της γεώτρησης (Annular and bottom-hole pressure monitoring): Πρόκειται για δοκιμές πίεσης. Ενδεικτικά, αναφέρεται και εδώ ότι οι τιμές των ασκούμενων πιέσεων, κατά τις δοκιμές αυτές στο

δακτύλιο της γεώτρησης, κυμαίνονται μεταξύ 200 έως 2500 psi για διάστημα περίπου 30 λεπτών. Το νερό είναι συνήθως το μέσο συμπίεσης που διοχετεύεται στο δακτύλιο, επιτρέπεται, όμως και η χρήση αζώτου ή συμπιεσμένου αέρα ως πηγή πίεσης, εάν ο δακτύλιος έχει πληρωθεί από κάποιο υγρό.

✚ [Pulsed Neutron Capture](#): Πρόκειται για μια τεχνική, η οποία επιτρέπει μέσα από την παραγωγή διαγραφιών, να προσδιοριστεί ο κορεσμός του CO₂, η λιθολογική σύσταση των πετρωμάτων και το πορώδες κοντά στη γεώτρηση. Πρόκειται δηλαδή για ένα εργαλείο υψηλής ανάλυσης για τον εντοπισμό συγκεκριμένων γεωλογικών παραμέτρων γύρω από το περίβλημα της γεώτρησης.

✚ [Τομογραφία ηλεκτρικής αντίστασης \(Electrical Resistivity Tomography\)](#): Είναι μια γεωφυσική τεχνική για την απεικόνιση των υποεπιφανειακών δομών, μέσω ηλεκτρικών μετρήσεων που γίνονται στην επιφάνεια ή μέσω ηλεκτροδίων σε μία ή περισσότερες γεωτρήσεις. Πρόκειται για μια τεχνική υποεπιφανειακής απεικόνισης που μετρά την ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Electrical Resistivity) σε εδάφη και πετρώματα. Το σύστημα απόκτησης δεδομένων παίρνει μια σειρά μετρήσεων τάσης και ρεύματος από επιφανειακές ή τοποθετημένες υπεδιαφικά συστοιχίες ηλεκτροδίων (δίπολα ηλεκτροδίων) τα οποία τοποθετούνται ανά διαστήματα (~5 ft) πάνω σε έναν άξονα. Τα αποτελέσματα δίνουν την τοποθεσία και το σχήμα των ζωνών ηλεκτρικής αντίστασης και βοηθούν στον λεπτομερή γεωλογικό χαρακτηρισμό της περιοχής.

✚ [Διαγραφίες γεωτρήσεων εισπίεσης \(Injection well logging\)](#): Οι διαγραφίες δημιουργούνται με την κάθοδο ενός ειδικού οργάνου μέσα στη γεώτρηση, το οποίο δημιουργεί το προφίλ μίας ή περισσότερων φυσικών ιδιοτήτων κατά μήκος αυτής. Υπάρχει μια ποικιλία διαγραφιών, οι οποίες μπορούν να μετρήσουν πολλές παραμέτρους που έχουν να κάνουν λόγου χάρη με την κατάσταση της γεώτρησης ως την σύνθεση των ρευστών που υπάρχουν στο πορώδες του σχηματισμού καθώς και την ορυκτολογία του.

✚ [Ακουστικές διαγραφίες \(Sonic Logging\)](#): Πρόκειται για μια μέθοδο μέτρησης παραμέτρων (πχ του πορώδους) του σχηματισμού. Μέσω μιας συσκευής καταγραφής ήχου (η οποία αποτελείται από πομπούς και δέκτες) μετράται το διάστημα διέλευσης ενός ηχητικού κύματος, το οποίο μεταδίδεται μέσα στο σχηματισμό. Χρησιμοποιείται, εκτός

από τον προσδιορισμό του πορώδους, για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας, την ανίχνευση ρηγμάτων και τον λιθολογικό χαρακτηρισμό του χώρου αποθήκευσης.

✚ Άλλου είδους διαγραφίες: Μερικές ακόμα διαγραφίες που χρησιμοποιούνται είναι

(α) οι διαγραφίες πυκνότητας (RHOB logs) οι οποίες μας δίνουν την πυκνότητα του σχηματισμού (μήτρας και ρευστών) ως συνάρτηση του βάθους, (β) οπτικές διαγραφίες (optical logs) όπου γίνεται επιθεώρηση της γεώτρησης με μια κάμερα που κατέρχεται μέσα σ' αυτήν και δίνει την δυνατότητα οπτικής ανίχνευσης για ενδεχόμενη διάβρωση, ρωγμές στη σωλήνωση, χαλαρές αρθρώσεις (joints) κοκ, (γ) διαγραφίες ακεραιότητας τσιμεντώσης (cement bond logs) οι οποίες, επίσης μετρώντας την εξασθένηση και τον χρόνο μετάδοσης ενός ηχητικού σήματος, προσδιορίζουν την κατάσταση του περιβλήματος της γεώτρησης (πάχος, παραμόρφωση, διάβρωση κοκ), χωρίς βέβαια να μπορεί να γίνει αξιολόγηση της διαπερατότητας του τσιμέντου ή των γεωχημικών τροποποιήσεων που μπορεί να υποστεί λόγω της αλληλεπίδρασης με το CO₂, (δ) διαγραφίες με χρήση φυσικής ακτινοβολίας γ (gamma-ray logs) οι οποίες, εκμεταλλευόμενες το γεγονός ότι διαφορετικά πετρώματα εκπέμπουν διαφορετικές ποσότητες ακτινοβολίας γ, δίνουν έναν ποιοτικό προσδιορισμό του σχηματισμού, (ε) διαγραφίες αντίστασης (Resistivity logs), οι οποίες διεξάγονται μέσα σε γεωτρήσεις που περιέχουν κάποιο αγώγιμο ρευστό και μετρώντας την αγωγιμότητα των πετρωμάτων και ρευστών του σχηματισμού, επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό του.

✚ Βαρυτικές μέθοδοι (Time lapse Gravity): Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί μετρήσεις

βαρυτικού πεδίου μιας σειράς διαφορετικών σημείων/τοποθεσιών σε μια περιοχή ενδιαφέροντος, ώστε να παρατηρηθούν αλλαγές ή διακυμάνσεις στις πυκνότητες των ρευστών λόγω της αποθήκευσης του CO₂. Μ' αυτόν τον τρόπο μπορούν να ανιχνευτούν αλλαγές στη μάζα και ενδεχομένως παραμορφώσεις της επιφάνειας λόγω της διαδικασίας αποθήκευσης ή λόγω μιας πιθανής διαρροής στα υπερκείμενα στρώματα. Τα όρια της ανίχνευσης του CO₂ είναι πολύ εξειδικευμένα ως προς το χώρο αποθήκευσης, δηλαδή εξαρτάται από το βάθος του ταμιευτήρα (απαιτείται σχετικά μικρό βάθος πάντα), τις φυσικές του ιδιότητες και τις συνθήκες της έρευνας. Σενάρια διαρροής κατά μήκος μιας λεπτής ζώνης διαδρομής (πχ ρήγματα, διακλάσεις, γεωτρήσεις κοκ) δεν είναι ανιχνεύσιμα και επίσης, υπάρχει πάντα μια δυσκολία απομόνωσης των άλλων πηγών μεταβολής της βαρύτητας που μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

 Μελέτη υδατικής γεωχημείας (Aqueous geochemistry): Η μέτρηση της

γεωχημικής εξέλιξης της υπόγειας υδρολογίας των σχηματισμών, συμπεριλαμβανομένων του διαλυμένου CO₂, της πυκνής φάσης του CO₂ καθώς και άλλων ρευστών, των οποίων απαιτείται δειγματοληψία σε τακτική βάση. Η παρακολούθηση μπορεί να γίνει σε γεωτρήσεις, οι οποίες διαπερνούν τον ταμιευτήρα, είτε σε γεωτρήσεις παρακολούθησης οι οποίες διαπερνούν τους υπερκείμενους σχηματισμούς. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι οι εξής: pH, αλκαλικότητα, διαλυμένα αέρια, υδρογονάνθρακες, τα σταθερά ισότοπα, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, ειδική αγωγιμότητα, η πυκνότητα, οι φυσικοί και τεχνητοί ιχνηθέτες κ.α. Αυτή η μέθοδος παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για να επιβεβαιωθούν τα προβλεπόμενα μοντέλα και είναι η μόνη διαθέσιμη τεχνική για να επιβεβαιωθεί η παγίδευση του CO₂ μέσω διαλυτοποίησης ή ορυκτής παγίδευσης (mineral trapping), καθώς και για να ανιχνευτούν οι γεωχημικές αντιδράσεις, οι οποίες μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα του συστήματος αποθήκευσης.

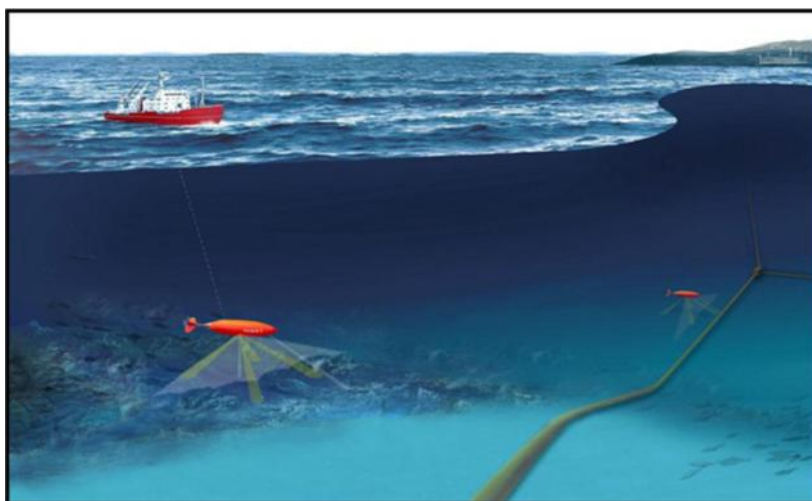
Παρακολούθηση σε υδάτινα περιβάλλοντα

Τα έργα υπεδιαφικής αποθήκευσης CO₂ σε υπεράκτια περιβάλλοντα δεν εγείρουν μεγάλη ανησυχία εκ μέρους της κοινωνίας, καθότι είναι πιο απομακρυσμένα απ' ό,τι τα χερσαία σε σχέση με την ανθρώπινη παρουσία. Παρόλα αυτά, για να αποφευχθούν οι επιπτώσεις στο οικοσύστημα και για να είναι αποδοτικό το έργο, επιβάλλεται σαφώς να εφαρμόζονται τεχνικές παρακολούθησης.

Σ' αυτές τις περιπτώσεις, ο εξοπλισμός παρακολούθησης πρέπει να αντέχει σ' ένα «εχθρικό» περιβάλλον (ιδιαίτερα για τα μακροπρόθεσμα συστήματα παρακολούθησης). Το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης είναι μεγάλο και απαιτείται υψηλή εξειδίκευση του προσωπικού (πχ δύτες) ή αναγκαία η ύπαρξη τηλεκατευθυνόμενων οχημάτων και υποστηρικτικών σκαφών. Το πλεονέκτημα είναι ότι η πρόσβαση στο θαλάσσιο πυθμένα είναι πιο εύκολη απ' ό,τι σε μια επιφάνεια στη στεριά, η οποία μπορεί να καλύπτεται με κτίρια, δρόμους, βλάστηση κ.ο.κ. Ακόμα οι φυσικές ιδιότητες του νερού ως του περιβάλλοντος μέσου, παρέχουν πλεονεκτικές συνθήκες ελέγχου, μιας διαρροής για παράδειγμα, επειδή η φυσική διαφορά μεταξύ του CO₂ και του νερού είναι μεγαλύτερη από εκείνη του CO₂ και του αέρα.

Οι προτεινόμενες μέθοδοι παρακολούθησης σε υδάτινα περιβάλλοντα είναι οι εξής [61]:

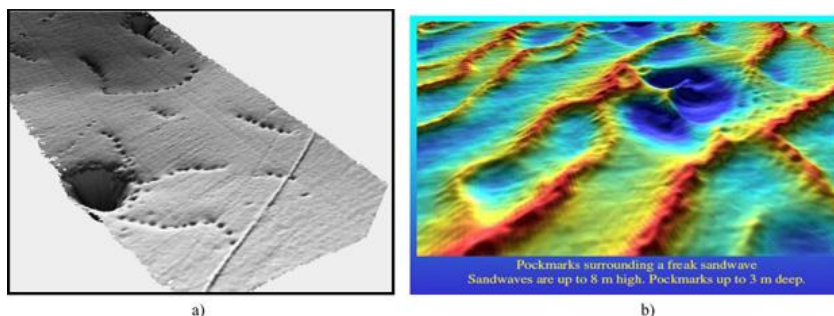
✚ Σάρωση με βυθόμετρο (Sidescan sonar bathymetry): Το βυθόμετρο είναι μια συσκευή (σόναρ), η οποία σαρώνει τον πυθμένα με μια ακουστική δέσμη (διευρυμένη προς τα πλάγια και πολύ στενή προς τη μπροστινή διεύθυνση) και το χαρτογραφεί, δίνοντας έτσι μια ακριβή εικόνα μεγάλων περιοχών του ωκεανού. Αρχικά η βυθομέτρηση γινόταν από πλοία, ενώ μετέπειτα άρχισαν να χρησιμοποιούνται υποθαλάσσια ρυμουλκούμενα ή αυτόνομα οχήματα (autonomous underwater vehicles - AUV). Τα βαθυμετρικά δεδομένα μπορούν να δώσουν εικόνες υψηλής ανάλυσης (έως και κλίμακα cm) (Hellevang et al. 2007), οι οποίες επιτρέπουν την ανίχνευση ακόμα και πολύ μικρών αλλαγών στη μορφολογία του πυθμένα, που προκαλείται από μια πιθανή διαρροή CO₂ στη στήλη ύδατος. Επίσης τα συστήματα σόναρ έχουν υψηλή ευαισθησία στον εντοπισμό αερίων και θεωρείται από πειράματα που έχουν γίνει, ότι μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες παρακολούθησης ενδείξεων για πιθανές διαρροές από τον πυθμένα.



Εικόνα 5.5: Απεικόνιση οχημάτων βυθομέτρησης σε λειτουργία [61].

✚ Βαθυμετρία πολλαπλής δέσμης (Seabed multibeam bathymetry): Η απλή διαμόρφωση μιας συσκευής βαθυμετρίας πολλαπλής δέσμης μπορεί να αποτελείται από δύο βυθόμετρα (που είναι και πομποί και δέκτες), έναν υψηλής συχνότητας και ένα χαμηλότερης συχνότητας, τα οποία δίδουν πληροφορίες για τα ρηχά ιζήματα, καθώς και για το βάθος. Μια σειρά απ' αυτές τις συσκευές τοποθετείται είτε σε ένα πλοίο (κατά μήκος της καρίνας) είτε σε ένα AUV και χαρτογραφεί τον πυθμένα (Εικόνα 5.6), ενώ

παράλληλα μπορεί να εντοπίσει διαρροές αερίου σε μορφή φυσαλίδων ή διαλυμένο στη στήλη του νερού (liquid gas).

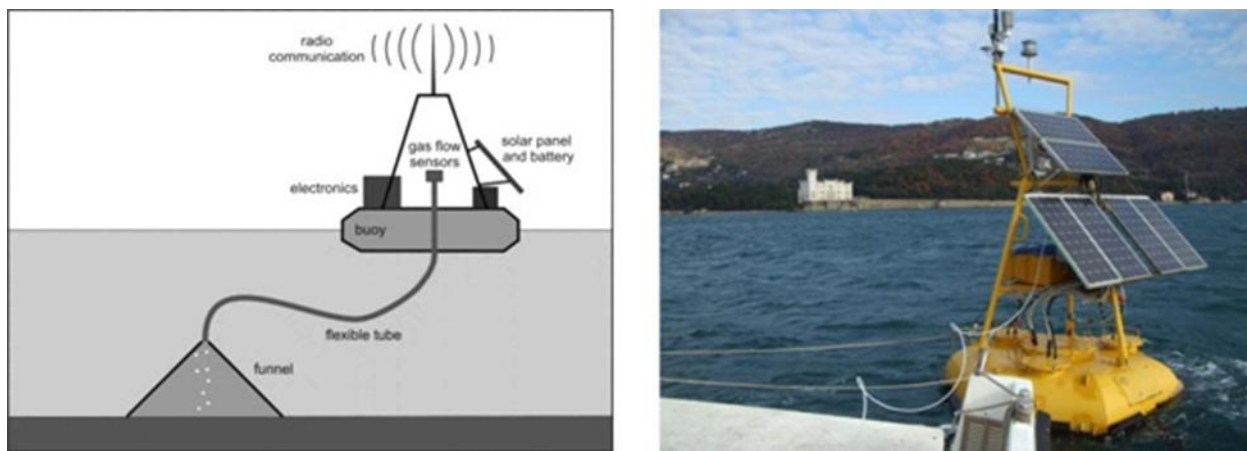


Εικόνα. 5.6: (a) Εικόνα από υψηλής ανάλυσης βαθυμετρία πολλαπλής δέσμης σε βάθος 300 μέτρων (Mid-Norway). Ο μεγάλος κρατήρας που διακρίνεται στον πυθμένα έχει διάμετρο 30 μέτρων και οι μικρότεροι (σε ομάδες) 5 μέτρων και βάθος 1 μέτρου. Η γραμμή προς τα δεξιά είναι αγωγός μεταφοράς. (b) Απεικόνιση κρατήρων βάθους 2-3 μέτρων στη Βόρεια Θάλασσα [61]

✚ Συστήματα μακροπρόθεσμης παρακολούθησης διαρροής: Είναι σημαντικό, μόλις μια διαρροή εντοπιστεί μ' έναν από τους παραπάνω τρόπους, να παρακολουθείται ο ρυθμός ροής και η ανάπτυξή της. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω του GasQuant, το οποίο είναι ένα υδροακουστικό σύστημα που τοποθετείται στον πυθμένα και το οποίο αναπτύχθηκε για να παρακολουθήσει τη χρονική μεταβλητότητα της απελευθέρωσης των φυσαλίδων που διαρρέουν. Μια άλλη επιλογή είναι το σύστημα OAWRS (Long Range Ocean Acoustic Waveguide Remote Sensing), το οποίο λειτουργεί με χαμηλότερες συχνότητες και έχει μικρότερη ανάλυση αλλά μπορεί να ανιχνεύσει σημαντικές διαρροές σε μεγάλη έκταση.

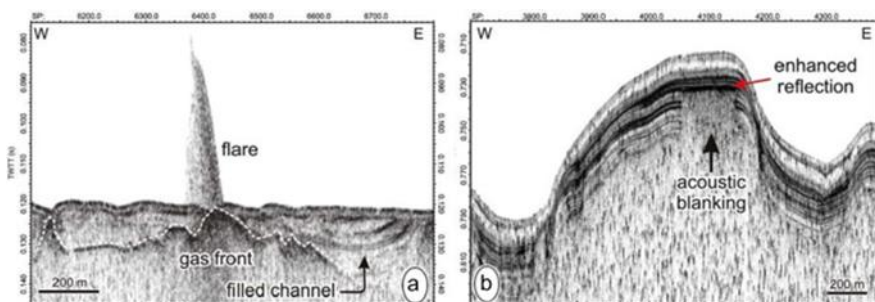
✚ Ανάλυση της χημείας των ρευμάτων φυσαλίδων (Bubble stream chemistry): Εάν εντοπιστούν ρεύματα φυσαλίδων, μπορεί να γίνει δειγματοληψία και να αναλυθεί η σύστασή τους. Η δειγματοληψία πρέπει να γίνεται κοντά στο σημείο διαρροής (διότι οι φυσαλίδες μπορεί να διαλυθούν ή να παρασυρθούν από ρεύματα καθώς ανεβαίνουν στην επιφάνεια). Συνήθως αυτό γίνεται με τη χρήση ενός ανιχνευτή CTD (Conductivity Temperature Depth) που συνδέεται με καλώδιο με το σκάφος. Έχουν αναπτυχθεί όμως και πολλοί άλλοι τρόποι δειγματοληψίας: (α) μέσω τηλεχειριζόμενου οχήματος (Remotely Operated Vehicle- ROV) το οποίο μπορεί να μεταφέρει δεδομένα και οπτικές εικόνες σε πραγματικό χρόνο στο χειριστή, (β) μέσω ενός συστήματος ανίχνευσης που στηρίζεται σε μια σχεδία/σημαδούρα, η οποία συνδέεται με ένα χωνί μέσα στη θάλασσα όπου γίνεται η συλλογή του αερίου (μια τροποποίηση του συστήματος, για εγκατάσταση σε ανοιχτή θάλασσα, χρησιμοποιεί μια σημαδούρα αντί για σχεδία και συνδέεται με το χωνί μέσω

ενός εύκαμπτου σωλήνα), (γ) μέσω ενός πλήρως αυτόνομου βυθιζόμενου συστήματος, το οποίο αποτελείται από ένα συλλέκτη αερίου, μία κεφαλή αισθητήρα και ένα περίβλημα πίεσης για τα ηλεκτρονικά συστήματα και το τροφοδοτικό (Εικόνα 5.7).



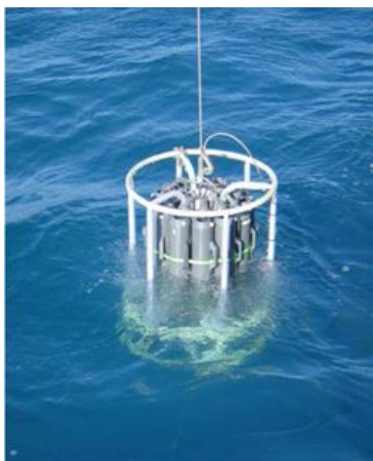
Εικόνα 5.7: Ένα σύστημα παρακολούθησης στηριζόμενο πάνω σε σημαδούρα, με ένα χωνί για την συλλογή του αερίου από τον πυθμένα [61].

✚ Προφίλ ανάκλασης (High-resolution (HR) reflection profile): πρόκειται για μεθόδους σεισμικής ανάκλασης που χρησιμοποιούν ακουστικές πηγές υψηλής συχνότητας (πχ βυθόμετρα, boomers, sparkersκοκ) και δημιουργούν τα προφίλ HR. Ουσιαστικά αναγνωρίζονται οι διαρροές ως υδροακουστικές ανωμαλίες (πχ. Εικόνα 5.8) και ποσοτικοποιείται η ροή τους. Ακόμη και μικρές ποσότητες αερίου μπορεί να δημιουργήσουν μια ισχυρή ακουστική απόκριση στη στήλη του νερού ή σε υποεπιφανειακά ιζήματα, λόγω των εξαρτώμενων από τη συχνότητα επιπτώσεων στις ταχύτητες και την εξασθένηση των επιμηκών P-κυμάτων.



Εικόνα 5.8: (α) υδροακουστικός πίδακας (hydroacoustic flare) στη στήλη νερού, (β) ακουστική θολερότητα (acoustic blanking/ turbidity) προκαλούμενη από σκέδαση των P κυμάτων από τις φυσαλίδες αερίου [61]

✚ Χημεία επιφανειακών υδάτων (Surface water chemistry): οι μέθοδοι της παρακολούθησης της χημείας των επιφανειακών υδάτων για την ποσοτικοποίηση της διαρροής CO₂ από τον πυθμένα στην υπερκείμενη στήλη ύδατος, μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες ομάδες: αυτές που μετρούν τα διαλυμένα αέρια (πχ από τις φυσαλίδες που διέρρυσαν και διαλύθηκαν ή από τη διαρροή αλατούχου νερού επιφορτισμένου με CO₂ (άμεσες μετρήσεις) και εκείνες που εστιάζουν στον εντοπισμό διαλυμένων στοιχείων και ενώσεων (πχ I, Br, SO₄, ή στοιχεία που απελευθερώνονται από τις αλληλεπιδράσεις του CO₂ με τους σχηματισμούς) που μπορούν να συνδέονται με νερά βαθιάς προέλευσης (π.χ. τον πυθμένα), τα οποία θα μπορούσαν να μεταναστεύσουν μαζί με τη διαρροή αερίου (έμμεσες μετρήσεις). Η ανάλυση των δειγμάτων των αερίων γίνεται συνήθως επί τόπου (πιο σπάνια σε εργαστήριο) (Εικόνα 5.9) με αισθητήρες διαφόρων ειδών, π.χ. με αισθητήρες NDIR (non-dispersive infrared), ηλεκτροχημικούς, φασματογράφους μάζας, χρωματομετρικούς (colorimetric) αισθητήρες, κοκ. Για τις άμεσες μετρήσεις, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο οι ανιχνευτές CTD. Τα προκύπτοντα δεδομένα μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν, μέσω διαφόρων προσεγγίσεων μοντελοποίησης, για να εκτιμηθεί η ροή των μετρούμενων ενώσεων και κατά συνέπεια η ροή του CO₂ που διαρρέει.



Εικόνα 5.9: Εφαρμογή δειγματοληψίας επιφανειακών νερών και ανάλυσης τους με ανιχνευτή CDT ώστε να προσδιοριστεί η ύπαρξη διαλυμένου CO₂ ή άλλων στοιχείων που υποδεικνύουν την ύπαρξη διαρροής [61].

Ο Πίνακας 5.4 παρουσιάζει λίγο πιο συγκεντρωτικά τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς και παραμέτρους που συνήθως μετρώνται και τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν απ' αυτές [17].

Πίνακας 5.4: Παράμετροι που μετρούν οι τεχνολογίες παρακολούθησης και εφαρμογές τους

Τεχνολογία μέτρησης	Παράμετροι μέτρησης	Παράδειγμα εφαρμογής της μέτρησης
Ανιχνευτές (φυσικοί ή τεχνητοί εισηγμένοι στον σχηματισμό)	Χρόνος μετακίνησης των ανιχνευτών Συμμετοχή του CO ₂ στο πετρέλαιο ή στο αλμυρό νερό Ανίχνευση πηγών διαρροής CO ₂	Ανίχνευση της ροής CO ₂ μέσα στο σχηματισμό Ποσοτικοποίηση της ποσότητας που παγιδεύτηκε μέσω διαλυτοποίησης Εντοπισμός διαρροών
Σύσταση του νερού	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ Βασικά ιόντα Ιχνοστοιχεία Αλατότητα	Ποσοτικοποίηση της παγίδευσης μέσω διαλυτοποίησης και ορυκτοποίησης Ποσοτικοποίηση αλληλεπιδράσεων CO ₂ – νερού – σχηματισμού Εντοπισμός διαρροών προς υδροφόρους ορίζοντες μικρού βάθους
Πίεση υπεδάφους	Πίεση σχηματισμού Πίεση στο δακτύλιο μεταξύ τοιχωμάτων γεώτρησης – σωλήνωσης Πίεση υπόγειου υδροφορέα	Ρύθμιση της πίεσης στο σχηματισμό για αποφυγή ρωγμάτωσης Προσδιορισμός της κατάστασης της σωλήνωσης και των σωλήνων εισπίεσης Εντοπισμός διαρροών από το σχηματισμό
Διαγραφίες εντός γεωτρήσεων (well logs)	Αλατότητα ενδογενούς νερού Ταχύτητα διάδοσης ηχητικών σημάτων Κορεσμός σε CO ₂	Ανίχνευση της ροής CO ₂ μέσα και πάνω από τον ταμειυτήρα Ανίχνευση μετανάστευσης αλμυρού νερού προς αβαθείς υδροφόρους ορίζοντες Βαθμονόμηση ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων για την εκτέλεση τρισδιάστατης διασκόπησης
Τρισδιάστατη σεισμική απεικόνιση μετά από κάποιο χρονικό διάστημα	Ταχύτητα διάδοσης κυμάτων P και S Ορίζοντες ανάκλασης Εξασθένηση σεισμικού μεγέθους	Ανίχνευση της ροής CO ₂ μέσα και πάνω από τον ταμειυτήρα

Κατακόρυφο σεισμικό προφύλ και σεισμική διασκόπηση μεταξύ γεωτρήσεων (crosswell seismic imaging)	Ταχύτητα διάδοσης κυμάτων P και S Ορίζοντες ανάκλασης Εξασθένηση σεισμικού μεγέθους	Λεπτομερής καταγραφής κατανομής του CO ₂ στον ταμιευτήρα Εντοπισμός διαρροών διαμέσου ρηγμάτων και ασυνεχειών
Παθητική σεισμική παρακολούθηση	Θέση, μέγεθος και χαρακτηριστικά σεισμικών γεγονότων	Δημιουργία ασυνεχειών στον ταμιευτήρα και στον αδιαπέρατο σχηματισμό
Ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές	Αγωγιμότητα του σχηματισμού Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή	Εντοπισμός κινήσεων CO ₂ μέσα και πάνω από τον ταμιευτήρα Εντοπισμός μετανάστευσης αλμυρού νερού προς αβαθείς υδροφόρους ορίζοντες
Μετρήσεις βαρύτητας μετά από κάποιο χρονικό διάστημα	Αλλαγές πυκνότητας λόγω ροής των ρευστών	Εντοπισμός κινήσεων CO ₂ μέσα και πάνω από τον ταμιευτήρα Ισοζύγιο μάζας CO ₂ στο υπέδαφος
Επιφανειακή παραμόρφωση	Κλίση Κάθετη και οριζόντια μετατόπιση με χρήση ιντερφερόμετρου και GPS	Εντοπισμός γεωμηχανικών επιδράσεων στον ταμιευτήρα και στον αδιαπέραστο σχηματισμό Εντοπισμός οδών μετανάστευσης του CO ₂
Αεροφωτογραφίες και υπέρυθρες απεικονίσεις από δορυφόρο ή αεροπλάνο	Υπερφασματική απεικόνιση της επιφάνειας	Εντοπισμός πίεσης από την ανάπτυξη βλάστησης
Παρακολούθηση της επιφανειακής ροής του CO ₂	Απελευθέρωση CO ₂ από την επιφάνεια του εδάφους στην ατμόσφαιρα	Ανίχνευση, εντοπισμός και ποσοτικοποίηση διαρροών CO ₂
Δειγματοληψία εδάφους για ανίχνευση αερίων	Σύσταση αερίων εδάφους Ανάλυση ισοτόπων CO ₂	Ανίχνευση υψηλών συγκεντρώσεων CO ₂ Αναγνώριση πηγών υψηλών συγκεντρώσεων CO ₂ στα αέρια εδάφους Αποτίμηση επιπτώσεων στα οικοσυστήματα

5.3.4 Κόστος παρακολούθησης

Στην παρακολούθηση οφείλεται μόνο ένα μικρό ποσοστό από το συνολικό κόστος μιας εφαρμογής CCS [54] το οποίο όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 (παράγραφος 2.5) συνυπολογίζεται συνήθως με το κόστος της αποθήκευσης όταν εκτιμάται το συνολικό κόστος των CCS. Παρόλα αυτά, όπως ήδη αναφέρθηκε, το κόστος είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των εργαλείων παρακολούθησης σ' ένα έργο γεωλογικής αποθήκευσης CO₂.

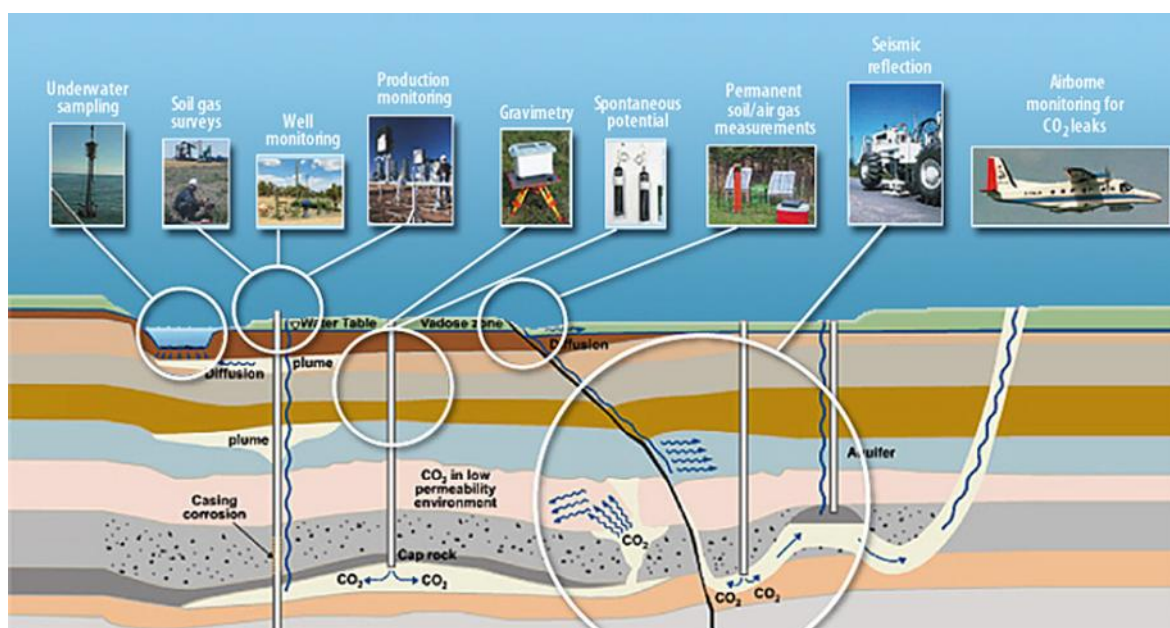
Πιο συγκεκριμένα, το κόστος των σεισμικών ερευνών και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων τους είναι περίπου \$10.000 ανά km² και \$1.000 ανά km² αντίστοιχα. Το κόστος των βαρυτικών και ηλεκτρομαγνητικών ερευνών είναι περίπου \$1.000 ανά σταθμό (ένας σταθμός ανά km²). Η παρακολούθηση των επιφανειακών ροών (10 σταθμών) κοστίζει περίπου \$70.000 για την εγκατάσταση ανά σταθμό και \$10.000 ανά σταθμό για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι διαγραφίες που ελέγχουν την ακεραιότητα των τοιχωμάτων της γεώτρησης κοστίζουν \$20.000 ανά γεώτρηση εισπίεσης/έτος [54].

Σε γενικές γραμμές, οι σεισμικές έρευνες αποτελούν τον κυριότερο οδηγό του κόστους της παρακολούθησης διότι είναι από τα σημαντικότερα και πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εργαλεία. Δεν υπάρχει κάποια άλλη μέθοδος που να τις αντικαθιστά και έχουν αναδειχθεί ως μέσο παρακολούθησης με πολύ υψηλή αποτελεσματικότητα στις εφαρμογές τους στα έργα Weyburn και Sleipner.

5.4 Πιθανά Σενάρια διαρροών σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂

Ο πιθανότερος κίνδυνος σε ένα έργο γεωλογικής αποθήκευσης είναι η διαρροή του CO₂ με κάποιον από τους μηχανισμούς που περιγράφηκαν στην αναγνώριση των κινδύνων (παράγραφος 4.4.2). Η αναγνώριση ορισμένων σεναρίων (που αφορούν την διαρροή του CO₂) που ενδέχεται να προκύψουν και η παρακολούθηση του έργου για ενδείξεις πραγματοποίησής τους, είναι η ουσία της διαχείρισης του κινδύνου.

Η Εικόνα 5.10 παρουσιάζει μία σχηματική απεικόνιση διαφόρων σεναρίων διαρροής και τα αντίστοιχα εργαλεία παρακολούθησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό αυτών.



Εικόνα 5.10: Εργαλεία Παρακολούθησης και Σενάρια Διαρροής [91].

Τα σενάρια διαρροής που παρουσιάζονται σ' αυτήν την ενότητα, αφορούν σενάρια διαρροής που μπορούν να λάβουν χώρα σε χερσαία περιβάλλοντα, σε θαλάσσια περιβάλλοντα και σε κάποια λοιπά σενάρια.

5.4.1 Σενάρια Διαρροής σε χερσαία περιβάλλοντα

Η μορφή μιας διαρροής από το χώρο αποθήκευσης μπορεί να εμφανιστεί με πολλά διαφορετικά μοτίβα (πχ σημειακή διαρροή, διαρροή με διάχυση, κοκ), να ποικίλει σε ποσότητα και σε διάρκεια αλλά και στη σημαντικότητα των επιπτώσεών της. Παρατίθενται τα πιο πιθανά σενάρια που αναμένεται να απαντηθούν σ' ένα έργο γεωλογικής αποθήκευσης σ' ένα χερσαίο γεωλογικό σχηματισμό [59]:

- ο Απευθείας απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα μέσω μιας γεώτρησης (μεγάλη ροή για μικρό χρονικό διάστημα (πχ. μέρες)): Αυτό το σενάριο προκύπτει από μια αποτυχία σφράγισης της γεώτρησης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μια απευθείας διαρροή του CO₂ στην ατμόσφαιρα και πιθανά τη συγκέντρωση του σε μεγάλες ποσότητες στην εγγύς περιοχή του σημείου απελευθέρωσης. Αυτές οι αυξημένες συγκεντρώσεις μπορεί να παρουσιάσουν κίνδυνο για την πανίδα και χλωρίδα της περιοχής έως και θάνατο. Οι επιπτώσεις, παρόλα αυτά, εντοπίζονται σε μια ακτίνα μερικών μέτρων από το σημείο απελευθέρωσης και διαρκούν μόνο όσο η πίεση διατηρείται. Αν συμβεί κατά τη διάρκεια λειτουργίας ή παρακολούθησης του έργου, τότε θα ληφθούν διορθωτικά μέτρα για την

άμεση αντιμετώπιση της διαρροής. Επιπλέον, η βαρύτητα των επιπτώσεων θα καθοριστεί από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων η τοπογραφία της περιοχής, η ευαισθησία του οικοσυστήματος, κ.ο.κ.

ο Τοπική διαρροή στο έδαφος από γεωτρήσεις, ρήγματα και ρωγματώσεις, η οποία οδηγεί σε υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ κοντά στην επιφάνεια: Οι κύριες επιπτώσεις αυτού του είδους διαρροής είναι το στρες ή ο θάνατος των φυτών ως αποτέλεσμα της αύξησης της οξύτητας (acidification) ή τοξικότητας (toxicity) του εδάφους καθώς και η άμεση επιρροή των συγκεντρώσεων του CO₂ στο ριζικό τους σύστημα. Οι δευτερογενείς επιπτώσεις αφορούν στην παραγωγικότητα, την ποιότητα των καλλιεργειών, τον ανταγωνισμό των ειδών, κ.ο.κ. Η διαρροή μπορεί να έχει άμεσες συνέπειες επί του υπεδάφικου οικοσυστήματος (υποδοχέων), το οποίο με τη σειρά του θα έχει κάποιον αντίκτυπο και στο οικοσύστημα της επιφάνειας. Οι ρυθμοί αύξησης των συγκεντρώσεων μπορεί να είναι σχετικά αργοί και το φαινόμενο να αναπτύσσεται σε διάρκεια μηνών ή και περισσότερο. Σ' αυτήν την περίπτωση δίνεται η δυνατότητα προσαρμογής σε ορισμένα είδη τα οποία είναι πιο ανθεκτικά στις χημικές αλλαγές του εδάφους. Η ύπαρξη διαπερατών χαρακτηριστικών τα οποία δεν είχαν αναγνωριστεί κατά την έρευνα του χώρου αποθήκευσης ή η δημιουργία τους λόγω σεισμικής δραστηριότητας (φυσικής ή προκαλούμενης από την εισπίεση) είναι οι κύριοι λόγοι εμφάνισης αυτού του σεναρίου.

ο Τοπική διαρροή στο έδαφος από γεωτρήσεις, ρήγματα και ρωγματώσεις, η οποία οδηγεί μακροπρόθεσμα σε χαμηλές συγκεντρώσεις CO₂ κοντά στην επιφάνεια: Αυτό το σενάριο αφορά τις χαμηλότερες ροές CO₂ που μπορεί να οδηγήσουν σε μακροπρόθεσμες χρόνιες επιπτώσεις στο περιβάλλον κοντά στην επιφάνεια. Εδώ κυριαρχεί η σταδιακή υποβάθμιση της ποιότητας των φυτών, ως αποτέλεσμα της παρατεταμένης έκθεσης τους στο CO₂ και ως εκ τούτου υπάρχουν και δευτερογενείς επιπτώσεις που αφορούν τους οικοτόπους, την ποιότητα των τροφίμων, κ.ο.κ.

ο Διαρροή σε λίμνη φρέσκου νερού μέσω ρηγμάτων/ ρωγματώσεων: Η κυριότερη επίπτωση αυτού του σεναρίου είναι η αύξηση της οξύτητας της λίμνης και οι δευτερογενείς επιπτώσεις της. Αν η λίμνη αποτελεί πηγή πόσιμου νερού ή χρησιμοποιείται για αρδευτικούς σκοπούς, θα υπάρξουν και δευτερογενείς επιπτώσεις στον άνθρωπο, δηλαδή επηρεάζονται και όλοι οι οργανισμοί που ζουν μέσα σ' αυτήν ή απ' αυτήν. Γενικά, θεωρείται ένα μη πιθανό σενάριο, διότι απαιτείται να βρίσκεται ένας τέτοιος όγκος νερού πολύ κοντά στο σύστημα αποθήκευσης και να συνδέονται με κάποιο τρόπο (πχ ρήγμα)

ώστε να συμβεί μια μεγάλης κλίμακας διαρροή, γεγονός που είναι σχετικά εύκολο να ελεγχθεί με την κατάλληλη επιλογή του χώρου αποθήκευσης. Μόνο πολύ ειδικές συνθήκες μπορούν να διαμορφώσουν ένα τέτοιο σενάριο, όπως μια φυσική ανάλογη καταστροφή που συνέβη στη Lake Nyos.

- ο Διαρροή μέσω διάχυσης (diffuse) σε επιφανειακά και κοντά στην επιφάνεια συστήματα: Αυτό το σενάριο είναι σχετικά απίθανο να συμβεί σε σχέση με τα προηγούμενα και σε κάθε περίπτωση οι όποιες επιπτώσεις του θα είναι σημαντικά μικρότερης βαρύτητας.

- ο Τοπική διαρροή σε υδροφόρους που μπορεί να αποτελούν πηγές πόσιμου νερού ή νερού για άρδευση: Οι πιο οξείες επιπτώσεις θα οφείλονται σε μια τοπική απελευθέρωση CO₂ διαμέσου μιας γεώτρησης ή κατά μήκος ενός ρήγματος ή ρωγμάτωσης. Η κύρια επίδραση είναι η υποβάθμιση της ποιότητας του υδροφόρου ως αποτέλεσμα βιογεωχημικών αλλαγών, όπως η αύξηση της οξύτητας και η έκπλυση βαρέων μετάλλων. Η φύση και το μέγεθος αυτών των αποτελεσμάτων εξαρτώνται από τα μοναδικά χαρακτηριστικά του χώρου αποθήκευσης και το γεωχημικό περιβάλλον του υδροφόρου. Μπορεί, επίσης, να εμφανιστούν επιπτώσεις στα μικρόβια που κατοικούν στον υδροφόρο ορίζοντα.

- ο Απελευθέρωση σε αστικό περιβάλλον: Οι επιπτώσεις αυτού του σεναρίου είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης δυσμενών ή και θανατηφόρων συνεπειών για τον άνθρωπο, λόγω της συσσώρευσης CO₂ σε υπόγειες κατασκευές. Παρόλα αυτά, λόγω της αυξημένης επικινδυνότητας για τον άνθρωπο, αλλά και της μη κοινωνικής αποδοχής, αποφεύγεται η εγκατάσταση ενός έργου αποθήκευσης κοντά σε κατοικημένες περιοχές· συνεπώς το σενάριο αυτό έχει πάρα πολύ λίγες πιθανότητες να συμβεί.

5.4.2 Σενάρια Διαρροής σε Θαλάσσια Περιβάλλοντα

Σύμφωνα μ' ένα φυσιολογικό σενάριο ανάπτυξης του έργου (δηλ. απουσία οποιασδήποτε διαρροής του CO₂) οι πληθυσμοί των θαλάσσιων οργανισμών θα παρουσιάζουν φυσικές διακυμάνσεις σε ένα ευρύ φάσμα χρονοδιαγραμμάτων, από πολύ βραχυπρόθεσμα (π.χ. ημερήσιες μεταβολές λόγω της παλίρροιας), και μακροπρόθεσμα (π.χ. αργή πρόσχωση της θαλάσσιας λεκάνης σε διάρκεια πολλών εκατοντάδων χιλιάδων χρόνων). Οι φυσικές αυτές μεταβολές, αλλά και όποιες άλλες που προκαλούνται από ποικίλους παράγοντες (πχ

ρύπανση) θα πρέπει να γίνονται κατανοητές, προκειμένου να διακρίνονται απ' αυτές που προκαλούνται λόγω της διαρροής του CO₂.

Τα εναλλακτικά σενάρια, λοιπόν, που μελετώνται είναι τα εξής [59]:

- ο Τοπική απευθείας διαρροή ελεύθερης φάσης CO₂ μέσω των ιζημάτων ή απευθείας στη στήλη νερού πάνω από τον πυθμένα μέσω μιας σημειακής πηγής: Αυτό το σενάριο μπορεί να οφείλεται σε αποτυχία της σφράγισης της γεώτρησης, αλλά και σε διαρροή μέσω ρηγμάτων ή ρωγματώσεων, όπως μπορεί να συμβεί και σ' ένα χερσαίο οικοσύστημα. Το κατά πόσο θα είναι τοπικές οι επιπτώσεις μιας διαρροής, θα εξαρτηθεί από το βαθμό στον οποίο διαλύεται και κατά συνέπεια αναμιγνύεται το CO₂ με το νερό των πόρων (pore waters) των ανώτερων ιζημάτων ή με τη στήλη του νερού πολύ κοντά στο θαλάσσιο πυθμένα. Η διάλυση με τη σειρά της, θα εξαρτηθεί από το ρυθμό της διαρροής, το ποσοστό μετακίνησης του νερού πάνω από την περιοχή διαρροής (το οποίο καθορίζεται από παράγοντες όπως το βάθος του νερού, το καθεστώς των κυμάτων, της παλίρροιας και των ρευμάτων), τη θερμοκρασία του νερού και την αλατότητα. Η διάλυση του CO₂ μπορεί να παράγει ένα θύσανο σχετικά πυκνότερου νερού, που είτε θα βυθιστεί στον πυθμένα ή θα απλωθεί κατά μήκος του (αν η διάλυση συμβεί αμέσως μετά τη διαρροή σε μικρή απόσταση από τον πυθμένα). Οι επιπτώσεις θα εξαρτηθούν από τη συμπεριφορά του θυσάνου, την επιφανειακή του έκταση και το πάχος του.

- ο Απευθείας απελευθέρωση με διάχυση ελεύθερης φάσης CO₂ μέσω των ιζημάτων ή απευθείας στη στήλη νερού σε μια μεγάλη περιοχή: Αυτό το σενάριο έχει πολύ λίγες πιθανότητες να συμβεί σε σχέση με τα υπόλοιπα, όπως δείχνει και η εμπειρία από τα φυσικά ανάλογα. Οι διαρροές μέσω διάχυσης μέσα από τα ιζήματα του πυθμένα μπορούν να επηρεάσουν τα βενθικά συστήματα και τη βιοχημεία με διαφορετικό τρόπο απ' ότι ο θύσανος που μπορεί να εξαπλωθεί στη στήλη του νερού κοντά στον πυθμένα.

- ο Τοπική διαρροή νερού επιφορτισμένου με CO₂ μέσω των ιζημάτων ή απευθείας στη στήλη νερού μέσω μιας σημειακής πηγής: Αυτό το σενάριο μπορεί να οφείλεται α) σε σχετικά χαμηλής ροής διαρροή μέσω μιας γεώτρησης που δεν έχει σφραγιστεί καλά, β) σε διαρροή μέσω ρηγμάτων/ ρωγματώσεων διαμέσου των οποίων το CO₂ μεταφέρεται και αναμιγνύεται με το νερό του σχηματισμού, ή γ) στην περίπτωση όπου οι πρωταρχικές οδοί υπερκαλύφθηκαν από ιζήματα του πυθμένα, μέσω των οποίων το CO₂ μετακινείται (μέσω της μήτρας του ιζήματος) και αναμιγνύεται ταυτόχρονα με το θαλασσινό νερό. Αυτό το σενάριο φέρει πολλές ομοιότητες μ' εκείνο της διάχυσης του CO₂ πολύ κοντά στον

πυθμένα. Το νερό που είναι επιφορτισμένο με CO₂ αναμένεται να εξαπλωθεί στον πυθμένα, πλευρικά από το σημείο διαρροής. Ωστόσο μπορεί, γύρω από το σημείο διαρροής, να αναπτυχθεί μια μάζα νερού που φέρει CO₂ στους πόρους του ιζήματος/πετρώματος κάτω από το σχηματισμό. Αυτή η μάζα θα έχει μεγαλύτερο πάχος από τη σχετικά ρηχή ζώνη που αναπτύσσεται στην περίπτωση ενός θυσάνου που σχηματίζεται και εξαπλώνεται στον πυθμένα κοντά σε μια πηγή διαρροής ελεύθερης φάσης CO₂, όπως περιγράφηκε πιο πάνω. Επίσης, αυτό το σενάριο ίσως να φέρει σοβαρότερες συνέπειες, στους θαλάσσιους οργανισμούς του βυθού, από εκείνο της διαρροής ελεύθερης φάσης CO₂.

- ο Διαρροή με διάχυση νερού επιφορτισμένου με CO₂ μέσω των ιζημάτων και τελικά στη στήλη του νερού σε μια μεγάλη περιοχή: Αυτό το σενάριο είναι πιο πιθανό να συμβεί όπου το CO₂ διαλύεται στο νερό εντός των πόρων των ιζημάτων σε βάθος και επεκτείνεται πλευρικά μέσα στο πέτρωμα χωρίς να διαρρέει από ένα συγκεκριμένο σημείο. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα τα ιζήματα/πετρώματα κάτω από τον πυθμένα να φορτίζονται με CO₂ σε μια μεγάλη έκταση και να ακολουθεί μετά η διάχυση. Συνεπώς αναμένονται πολλές επιπτώσεις στους οργανισμούς μέσα στα ιζήματα, στα πετρώματα κάτω από τον πυθμένα και εν συνεχεία στα πελαγικά οικοσυστήματα.

5.4.3 Λοιπά σενάρια κινδύνου

Εκτός από τα σενάρια διαρροών, τα υπόλοιπα σενάρια που αφορούν τις επιπτώσεις της υπεδιαφικής γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ σε χερσαία (onshore) και θαλάσσια (offshore) περιβάλλοντα, φέρουν σημαντικές ομοιότητες και γι' αυτό το λόγο θα παρουσιαστούν μαζί πιο κάτω.

- ο Εκτόπιση αλατούχου νερού σχηματισμού εξαιτίας δραστηριοτήτων αποθήκευσης (χερσαία και θαλάσσια περιβάλλοντα): Μερικές πτυχές αυτού του σεναρίου συνδέονται με τα σενάρια διαρροής επιφορτισμένου νερού, που περιγράφηκε πιο πάνω. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να γίνει εσκεμμένη παραγωγή αλατούχου νερού του σχηματισμού κατά τη διάρκεια των λειτουργιών εισπίεσης. Η διάθεση στη συνέχεια αυτού του νερού μπορεί να προκαλέσει δευτερογενείς συνέπειες.

- ο Επιπτώσεις λόγω ακούσιας ανθρώπινης παρεμβολής: Αυτό είναι ένα σενάριο πιθανότερο να συμβεί σε περιοχές όπου υπάρχουν σημαντικοί υπολειπόμενοι πόροι (κυρίως υδρογονανθράκων) προς εκμετάλλευση. Τα σενάρια αυτά δεν έχουν υψηλή

προτεραιότητα στη λίστα αξιολόγησης. Άλλωστε οι κύριες επιπτώσεις τους λόγω της ανθρώπινης παρεμβολής, συμπεριλαμβάνονται ήδη στα σενάρια που έχουν οριστεί. Για παράδειγμα, εάν γίνει μια γεώτρηση η οποία διαπερνά το σχηματισμό αποθήκευσης, τότε τα αποτελέσματα της διαρροής στη χερσαία ή θαλάσσια βιόσφαιρα θα είναι παρόμοια με αυτά της διαρροής CO₂ από μια σημειακή πηγή όπως αναπτύχθηκαν πιο πάνω. Οι κίνδυνοι που εμπλέκονται σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι η ευθύνη του φορέα που είναι υπεύθυνος για την εξερεύνηση και ο οποίος πρέπει να γνωρίζει την ύπαρξη κοιτασμάτων όπου γίνεται ή πιθανά να γίνει εκμετάλλευση και βρίσκονται στον εγγύς χώρο του συστήματος αποθήκευσης.

- ο Ξαφνική απελευθέρωση ελεύθερης φάσης CO₂ λόγω ανακύκλισης «turn-over» θαλάσσιου νερού επιφορτισμένου με CO₂ (θαλάσσια περιβάλλοντα): Αυτό το σενάριο θεωρείται ότι έχει πολύ λίγες πιθανότητες, καθώς προϋποθέτει την ύπαρξη στάσιμων υδάτων στο βυθό της θάλασσας. Το θαλασσινό νερό όμως κινείται ως επί το πλείστον σε όλο το βυθό, αποτρέποντας τη συσσώρευση νερού επιφορτισμένου με CO₂, με ελάχιστες εξαιρέσεις (πχ σε ορισμένα φιόρδ, υπάρχουν λεκάνες όπου η κυκλοφορία του νερού είναι περιορισμένη).

- ο Απελευθερώσεις που σχετίζονται με σεισμική δραστηριότητα: Αυτό το σενάριο προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία, ειδικά στην νότια Ευρώπη (πχ Ελλάδα και Ιταλία) όπου η σεισμική δραστηριότητα είναι έντονη. Οι επιπτώσεις είναι παρόμοιες μ' αυτές των τοπικών σεναρίων διαρροών που περιγράφηκαν πιο πάνω. Οι παράγοντες διαρροής πρέπει να μελετώνται, σ' αυτά τα σενάρια, υπό το πρίσμα μιας διαρροής μεγάλης ποσότητας CO₂ σε μικρό χρονικό διάστημα.

- ο Προκαλούμενη σεισμικότητα λόγω των εργασιών εισπίεσης του CO₂: οι επιπτώσεις της προκαλούμενης σεισμικότητας θα είναι παρόμοιες μ' αυτές της φυσικής σεισμικής δραστηριότητας.

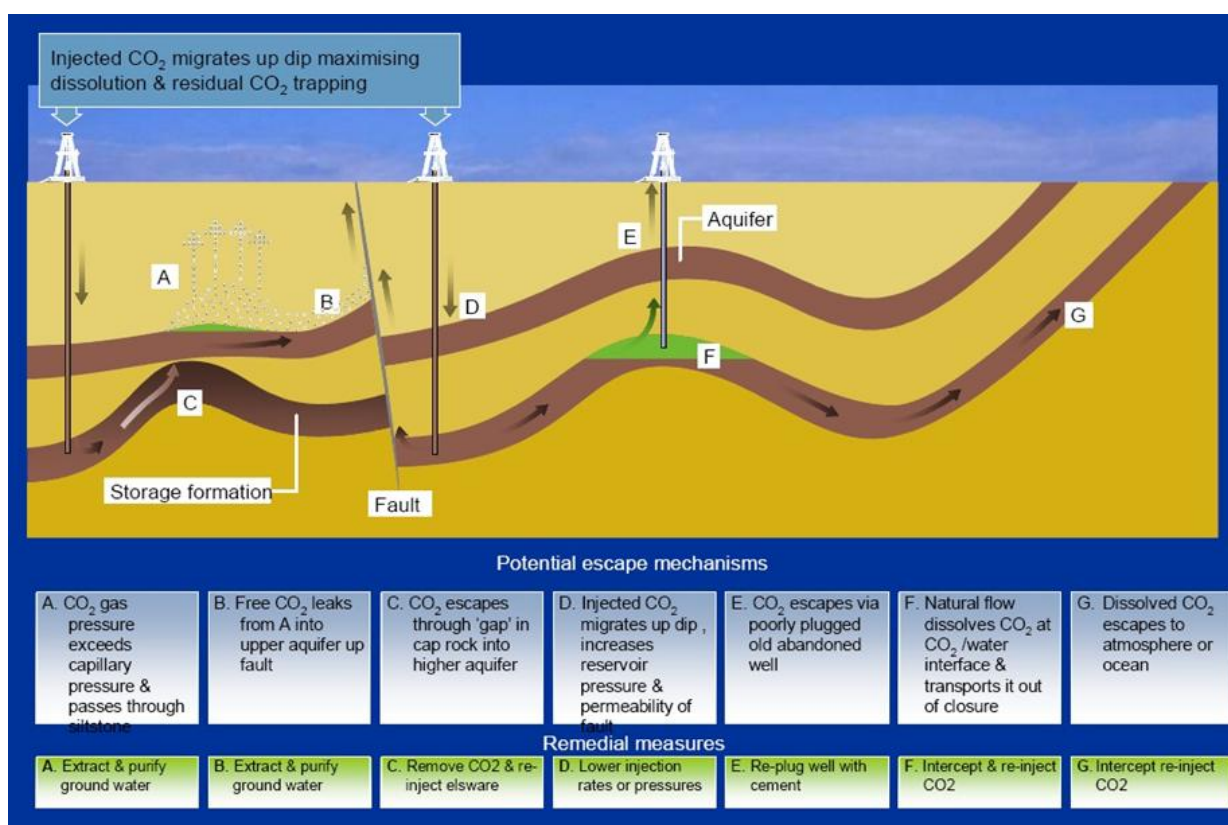
- ο Ξαφνική διαρροή CO₂ λόγω υπερπίεσης κατά τη λειτουργία του έργου: Κατά τη διάρκεια των λειτουργιών μπορεί να συμβεί μια διαρροή λόγω υπερπίεσης του σχηματισμού αποθήκευσης και να οδηγήσει σε blowout της γεώτρησης, ρωγμάτωση του σχηματισμού, κοκ.

- ο Θερμικό σοκ των οργανισμών στο περιβάλλον μιας πιθανής διαρροής: Η διαρροή CO₂ μπορεί να συνοδεύεται από μια αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα αν αυτή συμβεί αρκετά γρήγορα. Οι οργανισμοί, λοιπόν, κοντά στην περιοχή της διαρροής μπορεί να

υποστούν ένα θερμικό σοκ. Αυτό θα συμβεί σε περιορισμένο τοπικό επίπεδο. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη σε όλες τις παραλλαγές των σεναρίων τοπικής απελευθέρωσης που περιγράφηκαν.

5.5 Εφαρμογή Μέτρων Αντιμετώπισης/Αποκατάστασης

Η αναγνώριση των σεναρίων κινδύνου με τη βοήθεια των τεχνολογιών παρακολούθησης, έχει ως απώτερο στόχο τη δημιουργία ενός πλάνου έκτακτης ανάγκης (contingency plan) για τον εκάστοτε χώρο αποθήκευσης. Σύμφωνα μ' αυτό το πλάνο, προβλέπονται κάποια μέτρα αποκατάστασης (remediation measures), τα οποία θα εφαρμοστούν σε περίπτωση που εμφανιστεί κάποιο από τα παραπάνω σενάρια [52] και σκιαγραφείται στην Εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11: Επισκόπηση των οδών διαφυγής CO₂ και των αντίστοιχων μέτρων αποκατάστασης [52]

Στον Πίνακα 5.5 συνοψίζονται οι διάφορες τεχνικές αποκατάστασης των χώρων αποθήκευσης που δύνανται να εμφανίσουν διαφόρους τύπους διαρροών. Καταγράφονται ως πιθανές μέθοδοι αποκατάστασης, καθώς πηγάζουν κυρίως από έργα αποθήκευσης

φυσικού αερίου, αποκατάστασης υπόγειων υδάτων και εδαφών καθώς από την απόθεση επικίνδυνων αποβλήτων σε γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλου βάθους.

Πίνακας 5.5 Πιθανά μέτρα αποκατάστασης σε περιπτώσεις διαρροών σε έργα αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς [17].

Σενάριο	Μέτρα Αντιμετώπισης
<p>Διαρροή μέσω ασυνεχειών και ρηγμάτων του σχηματισμού</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ελάττωση της πίεσης εισπίεσης, εισπίζοντας με χαμηλότερο ρυθμό ή μέσω περισσότερων γεωτρήσεων • Ελάττωση της πίεσης του σχηματισμού με απομάκρυνση νερού ή άλλων ρευστών που βρίσκονται αποθηκευμένα • Αναχαίτιση της διαρροής με γεωτρήσεις άντλησης κοντά στη θέση της διαρροής • Δημιουργία υδραυλικού φραγμού με αύξηση της πίεσης του ταμιευτήρα ανάντη της διαρροής • Ελάττωση της πίεσης του ταμιευτήρα δημιουργώντας οδούς διαφυγής των ρευστών προς νέους χώρους του ταμιευτήρα • Διακοπή της εισπίεσης για μέχρι να σταθεροποιηθεί η κατάσταση στον ταμιευτήρα • Διακοπή της εισπίεσης, παραγωγή του CO₂ και εισπίεση του ξανά σε πιο κατάλληλες δομές του ταμιευτήρα
<p>Διαρροή μέσω ενεργών ή εγκαταλελειμμένων γεωτρήσεων</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Επισκευή των γεωτρήσεων με τυποποιημένες μεθόδους νέας ολοκλήρωσης της γεώτρησης, όπως αντικατάσταση της σωλήνων εισπίεσης και των πωμάτων απομόνωσης . • Επισκευή των γεωτρήσεων με εισπίεση τσιμέντου στο δακτύλιο μεταξύ σωλήνωσης και σχηματισμού. • Σφράγιση και εγκατάλειψη των γεωτρήσεων που δεν μπορούν να επισκευαστούν με τις πιο πάνω μεθόδους. • Διακοπή των αιφνίδιων διαρροών (blow-outs) σε γεωτρήσεις εισπίεσης ή εγκαταλελειμμένες με τυπικές μεθόδους (kill techniques), όπως για παράδειγμα εισπίεση πυκνής λάσπης μέσα στη σωλήνωση.

<p>Συγκέντρωση CO₂ στη ζώνη εξαερισμού του εδάφους (vadose zone) και στα αέρια του εδάφους</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Οι συγκεντρώσεις αερίου CO₂ στο υπόγειο νερό απομακρύνονται ή τουλάχιστον ακινητοποιούνται μέσω γεωτρήσεων που διέρχονται από την περιοχή συγκέντρωσης CO₂ και το απομακρύνουν. Κατ' αυτό τον τρόπο οι εξαγόμενες ποσότητες CO₂ είτε απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα είτε επαναεισπίζονται σε κατάλληλους υπόγειους ταμειυτήρες • Το υπολειμματικό CO₂ που παραμένει παγιδευμένο σε ακίνητη αέρια φάση μπορεί να απομακρυνθεί με τη διαλυτοποίησή του σε νερό και άντληση • Το CO₂ που έχει διαλυτοποιηθεί σε αβαθές υπόγειο νερό μπορεί να απομακρυνθεί αν χρειαστεί με άντληση του νερού στην επιφάνεια και αερισμό του. Το νερό είτε εισπίζεται έπειτα πίσω στο σχηματισμό είτε χρησιμοποιείται άμεσα. • Αν λόγω της οξίνισης του υπόγειου νερού (με την εισαγωγή του CO₂ στον υδροφόρο ορίζοντα) ενεργοποιήθηκαν μέταλλα ή άλλα ιόντα, τότε αυτά απομακρύνονται με κατάλληλες μεθόδους άντλησης και επεξεργασίας. Εναλλακτική μέθοδος αποτελεί η δημιουργία υδραυλικών φραγμών για ακινητοποίηση και περιορισμό των ρυπογόνων στοιχείων μέσω κατάλληλου δικτύου γεωτρήσεων εισπίεσης και άντλησης. Άλλες μέθοδοι αποκατάστασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι λεγόμενες παθητικές μέθοδοι που βασίζονται σε βιογεωχημικές διεργασίες.
<p>Διαρροές προς την ζώνη εξαερισμού (vadose zone) και συγκέντρωση στα αέρια του εδάφους</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Το CO₂ μπορεί να απομακρυνθεί από τη ζώνη εξαερισμού και τα αέρια του εδάφους μέσω τυποποιημένων τεχνικών με χρήση ατμού από οριζόντιες και κατακόρυφες γεωτρήσεις • Οι διαρροές από τη ζώνη εξαερισμού προς την επιφάνεια του εδάφους μπορούν να μειωθούν ή να αναχαιτιστούν μέσω πωμάτων (caps) ή φραγμών ατμού (gas vapor barriers). Η άντληση κάτω από τα πώματα ή τους φραγμούς ατμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαντλήσει το συσσωρευμένο CO₂ της ζώνης εξαερισμού • Αν το CO₂ βρίσκεται σε πυκνή αέρια φάση, τότε πιθανά συσσωρεύεται σε κοιλότητες στο υπέδαφος. Το συσσωρευμένο CO₂ είναι δυνατόν τότε να αντληθεί και είτε να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα είτε να εισπιαστεί σε σταθερότερο ταμειυτήρα. • 'Παθητικές τεχνικές' που βασίζονται στη διάχυση και τη βαρομετρική διακύμανση μπορούν να εφαρμοστούν για να εξαντλήσουν με αργό ρυθμό εφάπαξ διαρροές CO₂ στη ζώνη εξαερισμού. Η μέθοδος αυτή δεν είναι αποτελεσματική για συνεχείς διαρροές, λόγω της αργής εξέλιξής της • Η οξίνιση των εδαφών λόγω του CO₂ μπορεί να αντιμετωπιστεί με πότισμα και αποστράγγιση του εδάφους. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν γεωργικά πρόσθετα όπως η υδράσβεστος για την εξουδετέρωση του εδάφους
<p>Διαρροή μεγάλων ποσοτήτων CO₂ στην ατμόσφαιρα</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Για μείωση της συγκέντρωσης CO₂ στο εσωτερικό κτιρίων χρησιμοποιούνται μεγάλοι ανεμιστήρες που αραιώνουν ταχύτητα τη συγκέντρωση CO₂ σε επίπεδα ασφαλείας. • Σε περίπτωση διαρροής μεγάλων ποσοτήτων CO₂ σε μεγάλες εκτάσεις ο μόνος τρόπος αραιώσης του είναι οι φυσικοί άνεμοι. • Σε περίπτωση συνεχών διαρροών, για την αντιμετώπιση των κινδύνων έκθεσης σε υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ σε συγκεκριμένες θέσεις ή και λόγω περιόδων με χαμηλές ταχύτητες ανέμων, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες για καλύτερη διασπορά του CO₂ στο χώρο
<p>Συγκέντρωση CO₂ εντός σε εσωτερικούς χώρους με χρόνια</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Οι αργές διαρροές εντός εσωτερικές εγκαταστάσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με χρήση τεχνικών που αναπτύχθηκαν για τον έλεγχο εκπομπών ραδίου και πτητικών οργανικών ενώσεων σε κτίρια. Οι δύο βασικές μέθοδοι ελέγχου εκπομπών εντός κτιρίων είναι ο αερισμός και η ρύθμιση της πίεσης στο υπόγειο ή στα θεμέλια του

διαρροή μικρής κλίμακας	κτιρίου με στόχο την αραιώση της αντίστοιχης ένωσης προτού εισέλθει στην ατμόσφαιρα εντός του κτιρίου.
Συγκέντρωση CO ₂ στα επιφανειακά νερά	<ul style="list-style-type: none"> • Στις περιπτώσεις συγκέντρωσης ποσοτήτων CO₂ σε επιφανειακά νερά μικρού βάθους (π.χ. αβαθείς λίμνες) ή ρέοντα (π.χ. ρυάκια), το διαλυμένο CO₂ θα απελευθερωθεί γρήγορα πίσω στην ατμόσφαιρα. • Σε περιπτώσεις ήρεμων νερών μεγάλου βάθους (π.χ. μεγάλες λίμνες) η απομάκρυνση του CO₂ έχει πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενεργών συστημάτων εξαερισμού του συσσωρευμένου αερίου. (παραδείγματα, η λίμνη Nyos και Monoun στο Καμερούν)

5.5.1 Κόστος Αποκατάστασης

Το κόστος αποκατάστασης ποικίλει ανάλογα με το είδος της διαρροής CO₂ που πρέπει να αντιμετωπιστεί και τον τρόπο αντιμετώπισης. Για παράδειγμα, ο εντοπισμός μιας πηγής διαρροής, η οποία προέρχεται από μια εγκαταλελειμμένη γεώτρηση είναι περίπου \$100.000 ανά έρευνα. Αν πρόκειται για διαρροή από μια γεώτρηση εισπίεσης και πρέπει να γίνει ακριβής εντοπισμός της θέσης της πηγής διαρροής, τότε το κόστος ανεβαίνει στα \$300.000 ανά γεώτρηση, ενώ αν η διαρροή οφείλεται στα γεωλογικά χαρακτηριστικά του χώρου (π.χ. ρωγμάτωση στο πρωτογενές κάλυμμα) τότε μια 3D σεισμική έρευνα στην περιοχή (π.χ. έκτασης 20 τετρ. μιλίων) για τον εντοπισμό της, θα κόστιζε \$100.000 ανά τετρ. μίλι (συνολική διαδικασία και ερμηνεία των αποτελεσμάτων).

Το κόστος σφραγίσματος μιας γεώτρησης μπορεί να κυμανθεί μεταξύ \$20.000 και \$80.000 ανάλογα με το τι ενέργειες πρέπει να γίνουν για τη σφράγιση και τη θέση (εύκολα προσβάσιμη ή όχι) της γεώτρησης. Σ' αυτό προστίθεται το κόστος όρυξης μιας νέας γεώτρησης ώστε να συνεχιστεί απρόσκοπτα η εισπίεση, το οποίο κυμαίνεται περί τα \$2.5 εκ. για μια γεώτρηση βάθους 7500ft. Αντίθετα, το κόστος αποκατάστασης μιας γεώτρησης (εάν έχει εντοπιστεί μια μικρή διαρροή) κυμαίνεται μεταξύ \$30.000 και \$50.000 ανάλογα την κατάσταση της γεώτρησης.

Σε γενικές γραμμές το κόστος πρόληψης μιας διαρροής μέσω ενός προγράμματος παρακολούθησης και αποκατάστασης, εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται μεταξύ \$120 και \$130 εκ. ανά χώρο αποθήκευσης. Εάν υποθεθεί η εισπίεση 258 εκ τόνων CO₂, αυτό το ποσό ανάγεται σε \$0.45 ως \$0.50 ανά τόνο [52].

Τα προβλήματα διαρροής, πρέπει να αντιμετωπίζονται με τον πιο άμεσο και αποτελεσματικό τρόπο, διότι υπάρχει πάντα η περίπτωση να ανακληθεί η άδεια αποθήκευσης εάν θεωρηθεί ότι ο χώρος αποθήκευσης δεν πληροί πλέον τις προϋποθέσεις. Κάτι τέτοιο θα αύξανε πάρα πολύ το κόστος, καθώς θα χρειαζόταν να διεξαχθούν έρευνες για να βρεθεί άλλος κατάλληλος χώρος, να μεταφερθεί μέρος ή και όλη η ποσότητα του CO₂ που έχει εισπιαστεί και να αποκατασταθεί ο χώρος που εγκαταλείπεται.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η κλιματική αλλαγή, και ιδιαίτερα το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο προκαλεί την υπερθέρμανση του πλανήτη, αποτελεί ένα μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα. Καθώς το CO₂ είναι το αέριο με τη σημαντικότερη συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, προκύπτει η ανάγκη λήψης μέτρων, τα οποία θα μειώσουν τα επίπεδα των συγκεντρώσεών του στην ατμόσφαιρα. Από τις Τεχνολογίες Μείωσης Εκπομπών Διοξειδίου του Άνθρακα, αυτή που αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη εφαρμογή, η Δέσμευση, Μεταφορά και Αποθήκευση του CO₂ (Capture Carbon Storage - CCS) σε υπεδάφικους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η ανάπτυξη της CCS αναμένεται να είναι σημαντική τα προσεχή χρόνια, καθώς παρά τη στροφή προς τους φιλικότερους προς το περιβάλλον τρόπους παραγωγής ενέργειας (ΑΠΕ, πυρηνική ενέργεια, γεωθερμία, κοκ), η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων (η οποία συνεπάγεται τη συνέχιση παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων εκπομπών CO₂) αναμένεται να κυριαρχεί στο ενεργειακό προσκήνιο.

Η δέσμευση του CO₂ αφορά μεγάλες σταθερές σημειακές πηγές (κυρίως μονάδες ηλεκτροπαραγωγής) αλλά μελλοντικά ενδέχεται να μην περιοριστεί εκεί, αλλά να αναπτυχθούν τεχνολογίες για δέσμευση του CO₂ απευθείας από την ατμόσφαιρα ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί CCS και για εκπομπές από κινητές πηγές (αυτοκίνητα, αεροπλάνα κοκ). Η μέθοδος δέσμευσης με την ευρύτερη εφαρμογή είναι η μέθοδος πριν την καύση, αλλά αναπτύσσεται και έχει εφαρμογές και η μέθοδος με καύση οξυγόνου (oxy-fuel)

καθώς το παραγόμενο ρεύμα CO₂ είναι καθαρότερο και τα ποσοστά δέσμευσης μπορεί να προσεγγίσουν το 100%. Οι εκπομπές CO₂ σε ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας όπου εφαρμόζεται δέσμευση είναι περισσότερες από ένα σταθμό χωρίς δέσμευση, ωστόσο ποσοστό μεγαλύτερο του 85% αυτών δεσμεύονται. Οι εκπομπές τελικά που απελευθερώνονται αποτελούν τη διαφορά αυτών που προέρχονται από ένα σταθμό χωρίς δέσμευση και ένα σταθμό με δέσμευση.

Το κόστος της δέσμευσης κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος. Ενδεικτικά σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες κυμαίνεται από US\$ 15-75/t CO₂, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις φυσικού αερίου και αμμωνίας US\$ 5-55/t CO₂, και σε άλλες βιομηχανικές διεργασίες US\$ 25-115/t CO₂.

Σε κάθε περίπτωση, οι έρευνες πρέπει να προσανατολιστούν στη μείωση του κόστους των τεχνολογιών δέσμευσης, καθώς αυτό αποτελεί και το μεγαλύτερο ποσοστό (δύναται να κυμαίνεται από 65-85%) του συνολικού κόστους της εφαρμογής CCS.

Η μεταφορά του CO₂ στους χώρους αποθήκευσης του, πραγματοποιείται με χρήση κυρίως αγωγών και πλοίων και λιγότερο συχνά με βαγόνια/φορτηγά. Η επιλογή γίνεται με εκτίμηση του κόστους σε σχέση με την ποσότητα που πρέπει να μεταφερθεί και την απόσταση. Σημαντικές παράμετροι είναι οι προδιαγραφές του ρεύματος CO₂ και οι συνθήκες μεταφοράς του, οι οποίες το διατηρούν σε υπερκρίσιμη κατάσταση (υγρή φάση).

Το κόστος της μεταφοράς μπορεί να κυμαίνεται US\$ 1-10/t CO₂ και ανά 100km μεταφοράς, αντιστοιχώντας σε ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 3 -10% (ανά 100km μεταφοράς) του συνολικού κόστους της εφαρμογής CCS.

Καταλληλότεροι σχηματισμοί για την εισπίεση και μόνιμη αποθήκευση του CO₂ αναδεικνύονται οι *εξαντλημένοι ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου* (όπου μπορεί συνδυαστικά να εφαρμοστεί και επαύξηση της απόληψης υδρογονανθράκων - EOR) καθώς και οι *βαθείς αλατούχοι υδροφόροι σχηματισμοί*. Οι μεν πρώτοι έχουν το πλεονέκτημα ότι αποτελούν γεωλογικούς χώρους με μεγάλο αριθμό διαθέσιμων δεδομένων και με αποδεδειγμένη δυνατότητα στεγανότητας και περιορισμού/συγκράτησης της μάζας του CO₂ εντός της ζώνης εισπίεσης. Ωστόσο εκτιμούνται και πάλι ότι παρέχουν περιορισμένη χωρητικότητα και γεωγραφική κατανομή και ειδικά σε σχέση με τις πηγές δέσμευσης CO₂. Οι δε αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης χωρητικότητας και μεγάλης διαθεσιμότητας ως υπονήφειες θέσεις (ευρεία γεωγραφική κατανομή), παρέχοντας δυνατότητα για μεγάλης κλίμακας εμπορικά έργα CCS. Θα

πρέπει, στην περίπτωση αυτή, να ληφθεί υπόψη ότι το κόστος της έρευνας για την πρόσκτηση όλων των απαραίτητων δεδομένων για το χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση της υποψήφιας περιοχής είναι σημαντικά υψηλό. Έργα «οδηγού», όπως το Sleipner (αποθήκευση σε αλατούχο υδροφόρο σχηματισμό) και το Weyburn (εφαρμογή EOR με ταυτόχρονη αποθήκευση CO₂) πιστοποιούν την εφαρμοσιμότητα των σχετικών τεχνολογιών. Αξίζει να σημειωθεί για τα δύο αυτά έργα, ότι ξεκίνησαν λόγω οικονομικών κινήτρων και όχι για λόγους περιορισμού των εκπομπών CO₂. Στη Νορβηγία λόγω υψηλής φορολόγησης των εκπομπών CO₂ και στις ΗΠΑ λόγω EOR με χρήση CO₂ που δεσμεύεται και όχι φυσικών πηγών του (συνήθης είναι η συνήθης πρακτική λόγω κόστους).

Βασικές παράμετροι για το χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση ενός δυνητικού χώρου αποθήκευσης είναι η *ωφέλιμη χωρητικότητα*, η *εισπαισιμότητα* και η *δυνατότητα της ασφαλούς μακροπρόθεσμης συγκράτησης* του CO₂. Για την αποτίμηση των παραμέτρων αυτών, απαιτείται η εκτενής και συστηματική μελέτη των υπεδιαφικών γεωλογικών και γεωμηχανικών χαρακτηριστικών του εκάστοτε χώρου καθώς και των γεωχημικών και βιολογικών διεργασιών που δύνανται να λαμβάνουν χώρα κατά την εισπίεση αλλά και σε βάθος χρόνου προς τον τελικό στόχο της «μόνιμης» συγκράτησης του CO₂.

Το κόστος της αποθήκευσης εξαρτάται από το είδος του σχηματισμού και εκτιμάται στο εύρος των US\$ 5-8/t CO₂. Το κόστος ανέρχεται στα US\$ 5/t CO₂ για τα εξαντλημένα πεδία υδρογονανθράκων, στα US\$ 6,5/t CO₂ για τους βαθείς αλατούχους υδροφορείς και στα US\$ 14-15,5/t CO₂ σε υποθαλάσσιους σχηματισμούς. Στο συνολικό κόστος του CCS εκτιμάται ότι προσμετρά ως ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 5,5 – 6,5% (και το οποίο καλύπτει και την παρακολούθηση του χώρου).

Οι κίνδυνοι της γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂ είναι ανάλογοι με αυτούς που χαρακτηρίζουν σχετικά όμοια έργα, όπως για παράδειγμα η εξόρυξη υδρογονανθράκων, η υπεδιαφική αποθήκευση φυσικού αερίου, κοκ). Οι κίνδυνοι αυτοί προέρχονται, κυρίως, από:

- την εγγενή γεωλογική αβεβαιότητα που φέρει ένας χώρος αποθήκευσης, ιδιαίτερα όταν δεν έχει προηγηθεί κάποιου άλλου είδους εκμετάλλευση σε αυτόν (π.χ υπόγειοι υδροφορείς) ώστε να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα και όταν αφορά σε χώρους πολύ μεγάλου μεγέθους.
- τη μέχρι στιγμής άγνωστη μακροπρόθεσμη δυναμική συμπεριφορά του αποθηκευτικού χώρου και των διεργασιών ορυκτοποίησης του εισπιασθέντος CO₂.

Αν και επίσημες εκτιμήσεις αναφέρουν ότι η αποθήκευση μπορεί να θεωρηθεί μόνιμη και ασφαλής κατά 99% (IPCC) για βάθος χρόνου χιλιάδων ετών, εντούτοις, αυτό βεβαίως δεν έχει αποδειχτεί έστω και για κάποιο μεγάλο χρονικό διάστημα, δεδομένου ότι το «παλαιότερο» έργο αποθήκευσης (Sleipner) έχει διανύσει μία πορεία μόλις 17 χρόνων έως σήμερα.

Η Εκτίμηση του κινδύνου (Risk Assessment) και η Διαχείριση του κινδύνου (Risk Management) αποτελούν σημαντικές συνιστώσες ενός έργου αποθήκευσης CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς, το οποίο επιβάλλει τόσο η φύση του έργου όσο και η ίδια η νομοθεσία της Ε.Ε. με την «*Οδηγία 2009/31/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2009 σχετικά με την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς*». Βασικό ρόλο, επίσης, έχει η κοινοποίηση του κινδύνου (Risk communication) η οποία εκτός των άλλων, βοηθά στην ανταλλαγή πληροφοριών/δεδομένων ανάμεσα στις δύο αυτές συνιστώσες, αλλά υποχρεώνει και τα ενδιαφερόμενα μέρη (κράτος, διαχειριστής, λειτουργός, κοινή γνώμη, κλπ) να ενημερωθούν και να συμμετέχουν στο έργο εγκαίρως αλλά και καθ'όλη τη διάρκεια αυτού.

Στα πλαίσια της μεθοδολογίας που ακολούθηθηκε προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα σχετικά με την Εκτίμηση του Κινδύνου:

- Η ασφάλεια της αποθήκευσης του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς πρώτα από όλα εξαρτάται από την προσεκτική επιλογή του χώρου αποθήκευσης που ακολουθείται από τον χαρακτηρισμό του επιλεγμένου πεδίου αποθήκευσης (storage site) το οποίο πρέπει να αποτελείται από σχηματισμούς επαρκούς διαπερατότητας και βάθους και να περιβάλλεται από κατάλληλο πέτρωμα/κάλυμμα (caprock) . Εκτός όμως από την ανάλυση του υπεδάφους, κρίσιμη είναι και η εξέταση των χαρακτηριστικών της γειτνιάζουσας περιοχής του έργου, σχετικά με το αν πρόκειται για μια περιβαλλοντικά ευαίσθητη περιοχή, αν επηρεάζεται η εκμετάλλευση άλλων κοιτασμάτων (πχ πετρελαίου)ή άλλου είδους χρήση της γης (πχ γεωργικές εργασίες), αν είναι δυνατόν να υπάρξουν οι κατάλληλες επιφανειακές υποδομές για το έργο και εάν το έργο μπορεί να γίνει αποδεκτό από την τοπική κοινωνία.
- Οι κίνδυνοι που αναγνωρίζονται στη γεωλογική αποθήκευση CO₂, αφορούν σε διαρροή CO₂, διαρροή CH₄, προκαλούμενη σεισμικότητα, εδαφική μετατόπιση και μετακίνηση ρευστών. Ο σημαντικότερος κίνδυνος που πιθανά να εμφανιστεί σε

ένα έργο γεωλογικής αποθήκευσης είναι αυτός της μετανάστευσης του CO₂ έξω από το στοχευμένο σχηματισμό αποθήκευσης. Οι μηχανισμοί διαρροής είναι πολλοί, συνεπώς και τα σενάρια σχετικά με το πώς, πού και με ποιό τρόπο μπορεί να συμβεί ποικίλουν. Οι κυριότεροι δίοδοι διαρροής μπορεί να είναι είτε ανθρωπογενείς (λόγου χάρη οι γεωτρήσεις) είτε φυσικές (πχ. ρωγματώσεις ή ρήγματα).

- Σε ότι αφορά την εκτίμηση της έκθεσης στον κίνδυνο, αναδεικνύεται ως απαραίτητη διαδικασία η μοντελοποίηση του χώρου αποθήκευσης. Μέσω αυτής μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά της εισπνεζόμενης μάζας του CO₂ (πχ την μορφή της ροής του μέσα στον σχηματισμό αποθήκευσης, το αν θα συναντήσει κάποιο οδό διαρροής κοκ) και μετέπειτα μέσω της παρακολούθησης να επιβεβαιωθεί ότι το σύστημα αποθήκευσης αποδίδει σύμφωνα με τις αρχικές προβλέψεις. Τα μοντέλα δημιουργούνται σύμφωνα με τα αρχικά δεδομένα που υπάρχουν για τον χώρο αποθήκευσης και συνεχώς καλιμπράρονται και επανασχεδιάζονται όσο αναπτύσσεται το έργο.
- Οι επιπτώσεις της διαρροής του CO₂ μπορεί να είναι:
είτε μακροπρόθεσμες (σε γεωλογικούς χρόνους) και σε παγκόσμια κλίμακα, εφόσον το CO₂ δεν απομονώνεται στο υπέδαφος και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα, η τεχνολογία CCS δεν θα αποτελέσει αποτελεσματικό μέτρο μείωσης των εκπομπών CO₂, είτε βραχυπρόθεσμες και σε τοπικό επίπεδο, καθώς οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα, τα αέρια του εδάφους (soil gas) ή τους υδροφόρους ορίζοντες μπορεί να επιφέρουν δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα.
- Αν και το CO₂ δεν είναι τοξικό, η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις του έχει δυσμενείς επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία, όσο και σε ένα οικοσύστημα. Ιδιαίτερης σημασίας είναι οι επιπτώσεις από την μόλυνση υδροφορέων από CO₂, καθώς κατ'επέκταση θα επιφέρει δευτερογενείς επιδράσεις στον άνθρωπο (πχ. μόλυνση πόσιμου νερού, διατάραξη οικοσυστήματος περιοχής κοκ). Συνεπώς, η μέριμνα ώστε να μην υπάρχει κοντά σε ένα πεδίο αποθήκευσης πηγή πόσιμου νερού είναι μια καθοριστικής σημασίας παράμετρος για την επιλογή ενός χώρου.

Σχετικά με την Διαχείριση του κινδύνου συμπεραίνονται τα εξής:

- Η διαρροή του CO₂ αποτιμάται ως ένας υψηλός κίνδυνος (λόγω του ότι καταλύει τον σκοπό του έργου αποθήκευσης, ο οποίος είναι η μόνιμη απομόνωση του CO₂

στο υπέδαφος) μπορεί όμως να διατηρηθεί βάσει τεκμηριωμένης απόφασης πρώτον διότι, όπως ήδη αναφέρθηκε, το CO₂ δεν αποτελεί μια τοξική ουσία, και δεύτερον διότι υπάρχουν τα εργαλεία να παρακολουθηθεί η πιθανότητα εμφάνισής της, να εντοπιστεί έγκαιρα και να ληφθούν μέτρα για τον μετριασμό και αποκατάστασή της.

- Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η διαχείριση δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς την ζωτικής σημασίας συμβολή της παρακολούθησης δεδομένου ότι η διαδικασία αυτή λειτουργεί ως βάση επανεξέτασης ολόκληρου του πλαισίου της διαχείρισης του κινδύνου.
- Η επαλήθευση είναι ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία, τόσο για τον φορέα εκμετάλλευσης (ώστε να συνεχίζει απρόσκοπτα το έργο, να μην επιβαρυνθεί κάποιο χρηματικό πρόστιμο, ούτε να χάσει την εγγύηση που το κανονιστικό πλαίσιο του επιβάλλει) και για την ρυθμιστική αρχή (ώστε να ελέγχει τον φορέα εκμετάλλευσης και να επιβεβαιώνει ότι οι κίνδυνοι είναι και θα παραμείνουν χαμηλοί και μετά την μεταφορά ευθύνης του έργου).
- οι λόγοι γαι τους οποίους είναι απαραίτητη η εφαρμογή της παρακολούθησης ποικίλουν και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: (α) **λειτουργικοί**: αφορούν την συλλογή επαρκών δεδομένων για την επιλογή ενός κατάλληλου αποθηκευτικού χώρου και μετέπειτα τον έλεγχο και την βελτιστοποίηση της διαδικασίας εισπίεσης, (β) **ασφάλειας και περιβαλλοντικοί**: ελαχιστοποιείται ή παρεμποδίζεται κάθε επίπτωση που μπορεί να εμφανιστεί στον άνθρωπο, οικοσυστήματα κοκ, (γ) **κοινωνικοί**: παρέχονται στο κοινό οι αναγκαίες πληροφορίες για την κατανόηση της ασφάλειας της θέσης της αποθήκευσης και στηρίζεται η απόκτηση της δημόσιας εμπιστοσύνης, (δ) **οικονομικοί**: χτίζεται η εμπιστοσύνη της αγοράς σχετικά με την τεχνολογία CCS και επαληθεύονται οι αποθηκευμένοι όγκοι ώστε να μπορούν να πιστωθούν ως «εκπομπές που αποφεύχθηκαν».
- Η παρακολούθηση εφαρμόζεται μέσω των γεωτρήσεων παρατήρησης, στην ατμόσφαιρα, κοντά στην επιφάνεια (ή βυθό σε θαλάσσια συστήματα) και στο υπέδαφος. Υπάρχει μια πολύ μεγάλη ποικιλία τεχνικών παρακολούθησης, από τις οποίες πολλές είναι δοκιμασμένες και αποδοτικές σε βιομηχανικά ανάλογα έργα και στην πλειοψηφία τους μπορούν να εφαρμοστούν και σε έργα CCS, χωρίς ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις. Από αυτές, οι σεισμικές έρευνες αναδεικνύονται ως η σημαντικότερη τεχνολογία, λόγω της ευρείας εφαρμογής τους και της υψηλής αποτελεσματικότητάς τους σε σημαντικά έργα όπως το Sleipner και το Weyburn.

- Στην επιλογή των τεχνολογιών παρακολούθησης, βασικό ρόλο έχει και το ποια σενάρια διαρροής είναι περισσότερο πιθανά να εμφανιστούν σε ένα χώρο αποθήκευσης. Αυτά τα σενάρια μπορούν να προσδιοριστούν μέσω των ποιοτικών μεθόδων/εργαλείων χαρακτηρισμού στο στάδιο της εκτίμησης του κινδύνου. Ως πιθανότερα σενάρια καταγράφονται, η απευθείας απελευθέρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα, στην στήλη νερού πάνω από τον πυθμένα (σε θαλάσσια περιβάλλοντα) και σε έναν υδροφόρο που αποτελεί πηγή πόσιμου νερού, μέσω μιας γεώτρησης ή μέσω ρηγμάτων/ρωγματώσεων.
- Η δημιουργία του πλάνου έκτακτης ανάγκης είναι ένας τρόπος αντιμετώπισης του κινδύνου, (όπως η διαρροή CO₂ και η συγκέντρωση του σε μεγάλες ποσότητες πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (αέρια εδάφους)) ο οποίος έχει διατηρηθεί με τεκμηριωμένη απόφαση. Περιλαμβάνει τον εντοπισμό του σημείου πηγής μιας διαρροής ή υψηλών συγκεντρώσεων CO₂, και μέτρα αποκατάστασης/μετριασμού που θα εφαρμοστούν αφού ο κίνδυνος αποτελέσει ένα πραγματικό γεγονός με δυσμενείς επιπτώσεις ως προς τους στόχους του έργου, το περιβάλλον κοκ. Αυτά τα μέτρα συνίστανται κυρίως στην ελάττωση της πίεσης εισπίεσης, στην επισκευή των γεωτρήσεων από όπου διαρρέει το CO₂, σε τεχνικές καθαρισμού του εδάφους ή του νερού από τις υψηλές συγκεντρώσεις CO₂, έως και στην απόφαση εγκατάλειψης ενός χώρου αποθήκευσης σε ακραίες περιπτώσεις.
- Το κόστος της αποκατάστασης δεν είναι μεγάλο σε σχέση με το συνολικό κόστος των τεχνολογιών CCS και μπορεί να κυμαίνεται , ενδεικτικά, μεταξύ \$30.000 και \$50.000 για την αποκατάσταση μιας γεώτρησης όπου υπάρχει διαρροή CO₂ ως \$100.000 ανά τετρ. μίλι για μια 3D σεισμική έρευνα για τον εντοπισμό του σημείου μιας διαρροής.

Συμπερασματικά επίσης θα μπορούσαν να καταγραφούν τα εξής σχετικά με την Εκτίμηση και τη Διαχείριση του Κινδύνου σε έργα γεωλογικής αποθήκευσης CO₂:

- Η εκτίμηση και η διαχείριση του κινδύνου θα πρέπει να αναπτύσσεται και να ξεκινά από τα πρώιμα στάδια ενός τέτοιου έργου,
- Η διαχείριση του κινδύνου γίνεται με βάση της πληροφορίες σχετικά με αυτόν οι οποίες εξασφαλίζονται κατά την εκτίμησή του,
- Θα πρέπει να μπορεί να έχει πρόσβαση σε δεδομένα, πηγές αλλά και ειδικούς επιστήμονες καθ' όλη τη διάρκεια τους,
- Θα βελτιώνονται όσα περισσότερα δεδομένα συλλέγονται,

- Θα πρέπει να αποτελούν διάφανες διαδικασίες προς όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη,
- Θα πρέπει να υπάρχει σαφές κανονιστικό/νομοθετικό πλαίσιο στο οποίο θα βασίζονται.
- υπάρχει η ανάγκη τυποποίησης (θέσπιση ενός πλαισίου από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO)) των διαδικασιών Εκτίμησης και Διαχείρισης του κινδύνου σε έργα CCS.
- πρέπει να καθιερωθεί η χρήση κοινής ορολογίας και κοινών κατευθυντήριων γραμμών ως προς τις διαδικασίες αυτές (ανάγκη που καλύπτεται από τη δημιουργία ISO), ώστε να είναι δυνατή η ανταλλαγή απόψεων και γνώσεων πάνω στο θέμα του κινδύνου σε παρόμοια έργα.

Ολοκληρώνοντας, όπως αναφέρεται και στο 2^ο κεφάλαιο, αν και υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον σχετικά με την ανάπτυξη των εφαρμογών CCS (75 έργα μεγάλης κλίμακας παγκοσμίως ως το 2012), εντούτοις πολλά έργα βρίσκονται ακόμα στο στάδιο του σχεδιασμού ή έχουν «παγώσει» λόγω, κυρίως, έλλειψης χρηματοδότησης, πολιτικής στήριξης ή λόγω έντονων κοινωνικών αντιδράσεων (είτε λόγω συνδυασμού των παραπάνω παραμέτρων).

Συμπερασματικά, η κοινωνική αποδοχή, ίσως έχει το σημαντικότερο ρόλο στον καθορισμό της μοίρας αυτών των έργων. Παρά την ευαισθητοποίηση περί της κλιματικής αλλαγής και την αναγνώριση ότι χρειάζονται άμεσα και δραστικά μέτρα αντιμετώπισης, η κοινή γνώμη εναντιώνεται ακόμη στα έργα CCS. Πρέπει να προβληθούν τα έργα μεγάλης κλίμακας που υπάρχουν μέχρι σήμερα και να υπάρξει καλύτερη επικοινωνία με τις τοπικές αρχές και τις οικολογικές οργανώσεις. Εάν αντιστραφεί το κλίμα και τα έργα αυτά γίνουν ένα θεμιτό μέσο καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής στη συνείδηση του κοινού, τότε αυτό μπορεί να λειτουργήσει σαν μοχλός άσκησης πίεσης στις κυβερνήσεις και τις βιομηχανίες ώστε να άρουν τα όποια άλλα εμπόδια πολιτικά, οικονομικά και νομοθετικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) Σ., Σταματάκη, Γ., Αυλωνίτης, (2004). “Μηχανική Πετρελαίων”. Σημειώσεις πανεπιστημιακών παραδόσεων Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- (2) Ν., Ιεροδιακόνου. Κλάδος Ευρωπαϊκών Θεμάτων Γ.Τ.Π., “Κλιματική αλλαγή και καταστροφή του περιβάλλοντος: Πώς μπορούμε να σώσουμε τον πλανήτη”.
- (3) Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/31/ΕΚ σχετικά με την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς.
- (4) Semere Solomon, The Bellona Foundation, (2006). “Carbon Dioxide Storage: Geological Security and Environmental Issues-Case Study on the Sleipner Gas Field in Norway”
- (5) Global CCS Institute, (2012). “The Global Status of CCS 2012”
- (6) Global CCS Institute, (2010). “The Global Status of CCS 2010”
- (7) Survey AXA/IPSOS, (2012). “ Individual perceptions of climate risks”
- (8) McKinsey, (2008). “CCS Assessing the economics”
- (9) S., Bachu, (2008). “CO₂ storage in geological media: Role, means, status, and barriers to deployment”. Science Direct, Volume 34, Issue 2
- (10) H., Koide et al., (1992). “Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs”. Science Direct, Volume 33, Issue 5-8.
- (11) Sarah M. Forbes, P.Verma et al , World Resources Institute, (2008). “Guidelines for Carbon Dioxide Capture, Transport and Storage.
- (12) Heleen de Coninck, Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), (2011). “Mitigation Theme Report: Encouraging Carbon Dioxide Capture and Storage”.
- (13) J.M., Nordbotten, M.A. Celia, S. Bachu, (2005). “Injection and Storage of CO₂ in Deep Saline Aquifers: Analytical Solution for CO₂ Plume Evolution During Injection”.
- (14) Dr., C. Sinayuc, (2012) Middle East Technical University Petroleum Research Center. “Deep Saline Formations: The Largest Potential Volumes for Geological Storage of CO₂”.
- (15) V., Shrivastana, L., Nghiem, B., Kohse, C., Yang, (2009). “Understanding Trapping Mechanisms in CO₂ Sequestration by Reservoir Simulation”.

- (16) R., Martinez et al., (2008). "The EU Geocapacity Project- Saline aquifers storage capacity in Group South countries". Science Direct, Volume 1, Issue1.
- (17) Intergovernmental Panel in Climate Change (IPCC) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, (2005).
- (18) VGB PowerTech, (2004). "CO₂ Capture and Storage: VGB Report on the State of the Art".
- (19) Y., Le Gallo, A., Lecomte, Geogreen, (2011). " Global Industrial CCS Technology Roadmap".
- (20) International Energy Agency (IEA) , (2008). "CO₂ Capture and Storage".
- (21) M., Fishedick et al., (2007). "CO₂ Capture and Geological Storage as a Climate Option". Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.
- (22) International Energy Agency for Greenhouse Gases Programme (IEA GHG), (2011, Report 2011/04). "Effects of impurities on geological storage of CO₂".
- (23) European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, (2012). "The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage".
- (24) M. Kanniche et al., (2010). "Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture". Elsevier
- (25) National Energy Technology Laboratory (NETL), (2012). "CO₂ Impurity Design Parameters".
- (26) K., Damen, A., Faaij, W., Turkenburg, (2006). "Health, Safety, and Environmental Risks of Underground CO₂ Storage- Overview of Mechanisms and Current Knowledge".
- (27) Preben Randhol et al. ,(2007). "Ensuring well integrity in connection with CO₂ injection".
- (28) Birkholzer et al., (2012). Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). "Brine flow up a well caused by pressure perturbation from geologic carbon sequestration: static and dynamic evaluations".
- (29) S., Lombardi, GeoNet, (2007). "Could CO₂ leak from a storage reservoir and what might be the effects on humans and ecosystems". Workshop, Paris
- (30) Carbon Sequestration Leadership Forum ,(2009). PHASE I (2009) & PHASE 2 (2012) Final Report from CSLF Risk Assessment Task Force.
- (31) Jason J., Heinrich, Howard J., Herzog, David M., Reiner (MIT). "Environmental Assessment of Geological Storage of CO₂".
- (32) Birkholzer et al., (2010). Lawrence Berkeley National Laboratory. "Understanding groundwater quality changes in case of CO₂ intrusion by numerical modeling".

- (33) D., Gunter, S., Bachu, S., Benson, (1993). "The role of hydrogeological and geochemical trapping in sedimentary basins for secure geological storage of carbon dioxide".
- (34) S., Benson et al., (2002). "Lesson learned from Natural and Industrial Analogues for storage of carbon dioxide in deep geological formations".
- (35) C.M., Oldenburg, (2012). "Health Safety and Environmental Risks from energy production"
- (36) F., Yavuz, T., Tilburg, P., David, M., Spruijt, T., Wildenborg, (2009). "Second Generation CO₂ FEP Analysis: CASSIF-Carbon Storage Scenario Identification Framework".
- (37) National Energy Technology Laboratory, (2011). "Best Practices for: Risk Analysis and Simulation for Geologic Storage of CO₂".
- (38) National Energy Technology Laboratory, (2010). "Best Practices for: Site screening, Site selection and Initial Characterization for Storage of CO₂ in Deep Geologic Formations".
- (39) National Energy Technology Laboratory, (2013). "Best Practices for: Carbon Storage Systems and Well Management Activities".
- (40) Risk Assessment and Management Framework for CO₂ Sequestration in Sub-seabed Geological Structures. OSPAR Guidelines.
- (41) Det Norske Veritas, (2012). "Geological Storage of Carbon Dioxide". DNV-RP-J203.
- (42) Det Norske Veritas, (2010). "CO₂QUALSTORE- Guideline for Selection and Qualification of Sites and Projects for Geological Storage of CO₂". DNV Report No.: 2009-1425.
- (43) U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), (2008). "Vulnerability Evaluation Framework for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide".
- (44) Anna Korre, Sevket Durucan, (2009). "A review of the international state of the art in risk assessment guidelines and proposed terminology for use in CO₂ geological storage". IEA GHG R&D Programme, Imperial College, London.
- (45) ISO 31000, Risk management – Principles and guidelines. ISO 31010 Risk management – Risk assessment techniques
- (46) G., Singleton, H., Herzog, S., Ansolabehere, (2008). "Public risk perspectives on the geologic storage of carbon dioxide". Elsevier
- (47) S., Holloway, British Geological Survey. "Storage capacity and containment issues for carbon dioxide capture and geological storage on the UK Continental Shelf".

- (48) S., Bachu, CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) Task Force, US DOE (US Department of Energy) Capacity and Fairways Subgroup of the Regional Carbon Sequestration Partnerships Program, (2008). "Comparison between Methodologies Recommended for Estimation of CO₂ Storage Capacity in Geological Media".
- (49) J. Kaldi, (2012). "Storage 2- Containment: Keeping CO₂ in the Subsurface". Presentation, IEA GHG, China.
- (50) P., H., Stauffer, H., S., Viswanthan, R., J., Pawar, M., L., Klasky, G., D., Guthrie, Los Alamos National Laboratory. "CO₂-PENS: A CO₂ Sequestration System Model Supporting Risk-based Decisions".
- (51) S. Benson, (2003). "Risk assessment and Remediation options for Geological storage of CO₂"
- (52) International Energy Agency, (IEA), (2007). "Remediation of seepage from CO₂ storage formations".
- (53) Vello A. Kuuskra, (2007). "Overview of mitigation and remediation options for geological storage of CO₂". California Institute for Energy and Environment, University of California.
- (54) S., Benson, (2004). "Monitoring Protocols and Life - Cycle costs for geological storage of CO₂".
- (55) Dr. Lee H. Spangler, Big Sky Carbon Sequestration Partnership. "Measurement, Monitoring & Verification". Montana State University.
- (56) J. Pearce, British Geological Survey. "Assessing technical risks in the geological storage of CO₂".
- (57) Chadwick et al, (2008). "Best Practice for the storage of CO₂ in Saline Aquifers".
- (58) International Energy Agency (IEA), (2008). "Energy Efficiency Indicators for Public Electricity Production from Fossil Fuels".
- (59) A., Paulley, P., Maul, R., Metcalfe, Quintessa, (2010). Project RISCs (Research into Impacts and Safety in CO₂ Storage) – "Scenarios for Potential Impacts from Hypothetical Leakage from Geological Storage Facilities for Carbon Dioxide".
- (60) National Energy Technology Laboratory (NETL), (2009). "Best Practices for: Monitoring Verification and Accounting of CO₂ storage in deep geological formations".
- (61) International Energy Agency for Greenhouse Gases (IEA GHG), (2012). "Quantification techniques for CO₂ leakage".

- (62) C., Cooper et al., CO₂ Capture Project, (2009). "A Technical Basis for Carbon Dioxide Storage".
- (63) L., Burke, (2011), U.S. Geological Survey. "Carbon Dioxide Fluid - Flow Modeling and Injectivity Calculations". Scientific Investigations Report 2011-5083.

Άρθρα

- (64) Richard K. Morse (2012), "Καθαρίζοντας το κάρβουνο: από την κλιματική ενοχή στην λύση"
- (65) Science Daily (2012), "First Standard for Geological Storage of Carbon Dioxide"
- (66) International Energy Agency, (2013), "CCS is a necessity for a world hooked on fossil fuels".
- (67) Greenbusiness, (2013), "Αποχώρησαν Ρωσία, Ιαπωνία, Καναδάς από Πρωτόκολλο του Κυότο".
- (68) P., DiPietro, P., Balash, M., Wallace, (2012). "A Note on Sources of CO₂ Supply for Enhanced Oil-Recovery Operations".
- (69) Carbon Capture Journal, (June, 2012). "Can CCS cause seismic events?"
- (70) C., Kolstad, D., Young, (2010). "Cost Analysis of Carbon Capture and Storage for the Latrobe Valley".

Ιστοσελίδες

- (71) www.climatechange.gr.wordpress.com
- (72) www.bbc.co.uk
- (73) www.econews.gr
- (74) www.ypeka.gr
- (75) www.moi.gov.cy
- (76) www.axa.com
- (77) www.europa.eu
- (78) www.enet.gr
- (79) www.greenbusiness.gr
- (80) www.unfccc.int

- (81) www.greece.lrq.com
- (82) www.innovateuk.org
- (83) www.carbon350.co.uk
- (84) www.iea.org
- (85) www.csmnews.gr
- (86) www.carboncapturejournal.com
- (87) www.opengov.gr/minenv/?p=4680
- (88) www.ner300.com
- (89) www.energypress.gr
- (90) www.ipac-co2.com
- (91) www.co2captureproject.org
- (92) www.esru.strath.ac.uk
- (93) www.netl.doe.gov
- (94) www.energy.gov
- (95) www.nma.org
- (96) www.ccsnetwork.eu
- (97) www.ccs101.ca
- (98) www.bgs.ac.uk
- (99) www.co2geonet.com
- (100) www.esd.lbl.gov
- (101) www.co2now.org
- (102) www.globalccsinstitute.com
- (103) www.sequestration.mit.edu
- (104) www.epa.gov
- (105) www.prtr.ec.europa.eu
- (106) www.bp.com

- (107) www.pubs.usgs.gov
- (108) www.connectedwaters.unsw.edu.au
- (109) www.ieaghg.org
- (110) www.slb.com
- (111) www.link.springer.com
- (112) www.bgr.bund.de
- (113) www.goldsim.com
- (114) www.accessscience.com
- (115) www.unstats.un.org
- (116) www.statoil.com
- (117) www.canadiangeographic.ca
- (118) www.spec2000.net
- (119) www.geology.cz
- (120) www.co2crc.com.au