



**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ»**

3^{ος} Κύκλος σπουδών

Ακαδημαϊκό Έτος 2019-2020

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ
«ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ CO₂ »**

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΟΥΝΕΡΙΔΗΣ ΑΕΜ: 31

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2021



Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο το Underground Gas Storage και το CO₂ Sequestration. Δύο τομείς δηλαδή που (προς το παρόν) στη χώρα μας δεν έχουν αναπτυχθεί καθόλου. Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής αυτών των τεχνικών είναι πολλά και μάλιστα τα οφέλη αφορούν πολλούς τομείς.

Με την υπόγεια αποθήκευση Φυσικού Αερίου υπάρχει το πλεονέκτημα της απρόσκοπτης προσφοράς του στους καταναλωτές σε περιόδους αυξημένης ζήτησης κι αυτό είναι πολύ σημαντικό αν αναλογιστεί κανείς την ολοένα κι αυξανόμενη ζήτηση του, λόγω του χαμηλότερου κόστους αγοράς του, αλλά και λόγω του ότι είναι περιβαλλοντικά πιο φιλικό απέναντι στην πιο «παραδοσιακή» επιλογή, το πετρέλαιο. Εκτός αυτού το φυσικό αέριο μπορεί να εισπιαστεί εντός ενός ταμιευτήρα προκειμένου να ανακτηθεί η μέγιστη ποσότητα υδρογονανθράκων που δύναται να ανακτηθεί. Οπότε ο ρόλος της υπόγειας αποθήκευσης είναι διττός.

Από την άλλη πλευρά, η υπόγεια αποθήκευση του CO₂, εκτός του ότι εξυπηρετεί στην περαιτέρω ανάκτηση των υδρογονανθράκων εντός ενός κοιτάσματος, συνεισφέρει και στην μείωση των εκπεμπόμενων ποσοτήτων CO₂ στην ατμόσφαιρα, με προφανή περιβαλλοντικά οφέλη. Μάλιστα, όπως θα ειπωθεί στο σχετικό κεφάλαιο της εργασίας, μπορεί η τεχνική να εφαρμόζεται ακόμη και για εκατοντάδες χρόνια. Κάτι τέτοιο φυσικά αποκλείεται να συμβεί: οι ΑΠΕ στις επόμενες δεκαετίες θα φροντίσουν ώστε οι παραγόμενες ποσότητες CO₂ να μειωθούν κατά πολύ. Λόγω λοιπόν της αναγκαιότητας για μείωση της συγκέντρωσης αυτού του ανθρωπογενούς ρύπου στην ατμόσφαιρα (που μάλιστα είναι ο κύριος ρύπος που ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου), κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή της τεχνολογίας CCS – Carbon Capture and Storage.

Όλα αυτά λοιπόν θα αναλυθούν περαιτέρω στην συνέχεια στα αντίστοιχα κεφάλαια.



ABSTRACT

Underground Gas Storage and CO₂ Sequestration are the main objectives of this diploma thesis. That is, two sectors that (at present) in our country, Greece, have not been developed at all. The advantages of applying these techniques are many and in fact the benefits concern many areas.

With underground gas storage there is the advantage of uninterrupted supply to consumers in times of increased demand and this is very important considering its growing demand, due to its lower purchase costs, but also because it is more environmentally friendly versus the more "traditional" option, oil. In addition, natural gas can be pumped into a reservoir to recover the maximum amount of hydrocarbons that can be recovered. So, the role of underground storage is two-fold.

On the other hand, the underground storage of CO₂, in addition to serving the further recovery of hydrocarbons in a deposit, also contributes to the reduction of CO₂ emissions into the atmosphere, with obvious environmental benefits. In fact, as will be seen in the relevant chapter of the diploma thesis, the technique can be applied even for hundreds of years. This, of course, is unlikely to happen; Renewable Energy in the coming decades will ensure that the amount of CO₂ produced is greatly reduced. Therefore, due to the need to reduce the concentration of this anthropogenic pollutant in the atmosphere (which is the main pollutant responsible for the greenhouse effect), it is necessary to apply CCS - Carbon Capture and Storage technology.

All this will be further analyzed later in the respective chapters.



Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου κ. Ανδρέα Γεωργακόπουλο. Χωρίς τη βοήθεια του, η διεκπεραίωση της εργασίας μου θα ήταν ένα τρομερά δύσκολο έργο. Οι συμβουλές του κατά τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας ήταν καθοριστικές. Όπως ήταν καθοριστικές από την αρχή της φοίτησης μου στο ΔΠΜΣ ‘Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων’, ένα ταξίδι που ξεκίνησε για μένα στα τέλη του 2017 κι αισίως ολοκληρώνεται.

Η συμβολή των καθηγητών της τριμελούς μου επιτροπής, του κ. Γαγάνη Βασίλειου και του κ. Βαφείδη Αντώνιου ήταν επίσης βαρύνουσας σημασίας. Οι συμβουλές κι οι επισημάνσεις τους (και φυσικά ο κόπος τους για να μου τα προτείνουν αυτά), με βοήθησαν στο να παραδώσω εν τέλει μια βελτιωμένη εκδοχή της εργασίας μου. Τους ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου και με στήριξε με κάθε πιθανό τρόπο καθ’όλη τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας σε αυτήν την δύσκολη περίοδο που διανύουμε.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	5
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2 Υπόγεια Αποθήκευση ΦΑ – Underground Gas Storage.....	12
2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	12
2.2 Η μηχανική πίσω από την υπόγεια αποθήκευση του φυσικού αερίου.....	13
2.3 Εξαντλημένοι ταμιευτήρες – Depleted Reservoirs.....	16
2.4 Υδροφόροι ορίζοντες.....	18
2.5 Σπηλαιώσεις άλατος.....	20
2.6 Η περίπτωση της Ελλάδας.....	23
3 CO ₂ Sequestration.....	25
3.1 Διεθνείς συμφωνίες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.....	26
3.1.1 Συμφωνία των Παρισίων (Paris Agreement).....	29
3.2. Δέσμευση, Μεταφορά κι Αποθήκευση του CO ₂ – Carbon Capture Storage (CCS).....	30
3.2.1. Δέσμευση του CO ₂	31
3.2.1.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΤΟΥ CO ₂	33
3.2.1.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΤΟΥ CO ₂	37
3.2.2 Μεταφορά του CO ₂	40
3.2.2.1 Μεταφορά μέσω αγωγών – Pipeline Transportation.....	41



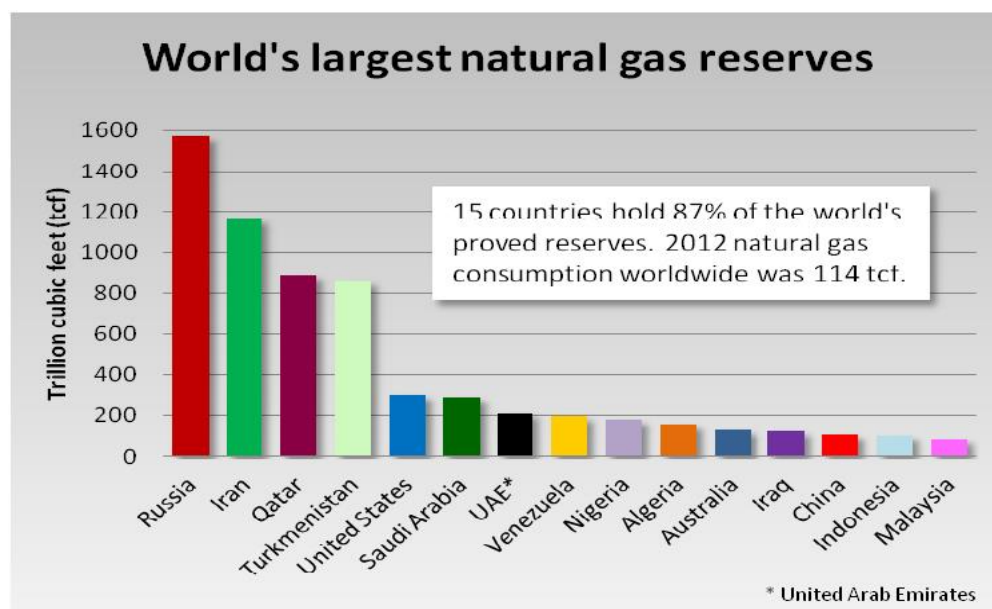
3.2.2.1.1. Σχεδιασμός των αγωγών – Design.....	42
3.2.2.1.2. Παρακολούθηση της αποθηκευτικής δομής – Monitoring.....	44
3.2.2.1.3. Παραδείγματα από τον διεθνή χώρο	45
3.2.2.2. Μεταφορά μέσω πλοίων – Marine Transportation System.....	46
3.2.3 Γεωλογική αποθήκευση του CO ₂	47
3.2.3.1 Αλατώδεις υδροφόροι ορίζοντες.....	48
3.2.3.2 Εξαντλημένα reservoirs πετρελαίου και φυσικού αερίου.....	50
3.2.3.3 Ανεκμετάλλευτες φλέβες γαιάνθρακα.....	51
3.2.3.4. Άλλοι πιθανοί σχηματισμοί για αποθήκευση CO ₂	52
3.3. CO ₂ – Υπερκρίσιμη (Supercritical) κατάσταση της ύλης.....	54
3.4. Παραδείγματα αποθήκευσης CO ₂ σε παγκόσμιο επίπεδο	55
3.4.1. Το project Sleipner.....	56
3.4.2 Το project Weyburn.....	58
3.5. Η περίπτωση της Ελλάδας – Πιθανοί χώροι αποθήκευσης CO ₂	60
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	62

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κόσμος αλλάζει ραγδαία και μαζί του αλλάζουν οι ενεργειακές αλλά και οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις, μεταξύ άλλων. Οι αναδυόμενες οικονομίες του πλανήτη (Κίνα, Ινδία κ.ά) αναπτύσσονται με γοργούς ρυθμούς και συνεπώς οι ενεργειακές τους ανάγκες αυξάνονται αναλογικά.

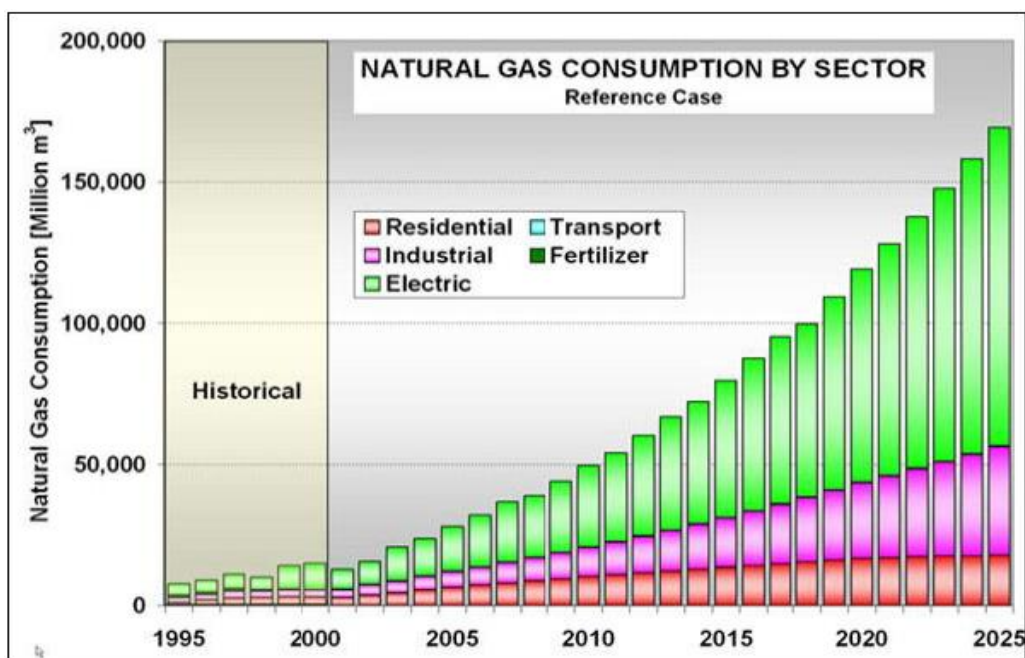
Το φυσικό αέριο κερδίζει διαρκώς έδαφος και στις αναδυόμενες οικονομίες του πλανήτη, πέραν φυσικά των ανεπτυγμένων κρατών της Δ. Ευρώπης και της Β. Αμερικής (των οποίων η ζήτηση είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα). Κι αυτό δεν είναι τυχαίο. Το φυσικό αέριο είναι πιο οικολογικό ως καύσιμο από το πετρέλαιο κι επίσης χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για την ηλεκτροπαραγωγή.

Τα βεβαιωμένα αποθέματα μέχρι το 2013 τουλάχιστον, ανέρχονταν σε 187,3 Tm³ με την Ρωσία να διαθέτει τα μεγαλύτερα αποθέματα παγκοσμίως (26%) και τις χώρες του OPEC να διαθέτουν μαζί περίπου το 50% των Proven Reserves.



Εικόνα 1: Τα μεγαλύτερα αποθέματα Φυσικού Αερίου παγκοσμίως.

Ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης του Φυσικού Αερίου, λοιπόν, αυξάνεται σταθερά τα τελευταία χρόνια, γιατί εκτός του προφανούς ρόλου του ως καυσίμου, χρησιμοποιείται επίσης και στα διυλιστήρια καθώς και στη βιομηχανία πετροχημικών ως πρώτη ύλη. Όμως και στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένο, διότι σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ρεύματος είναι πολύ πιο οικολογικό, με πολύ χαμηλότερες εκπομπές CO₂, χαμηλότερες εκπομπές SO₂ και NO_x, καθώς επίσης και μηδενικές εκπομπές Τέφρας κι άλλων ιπτάμενων σωματιδίων. Η αυξημένη ζήτηση του φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:

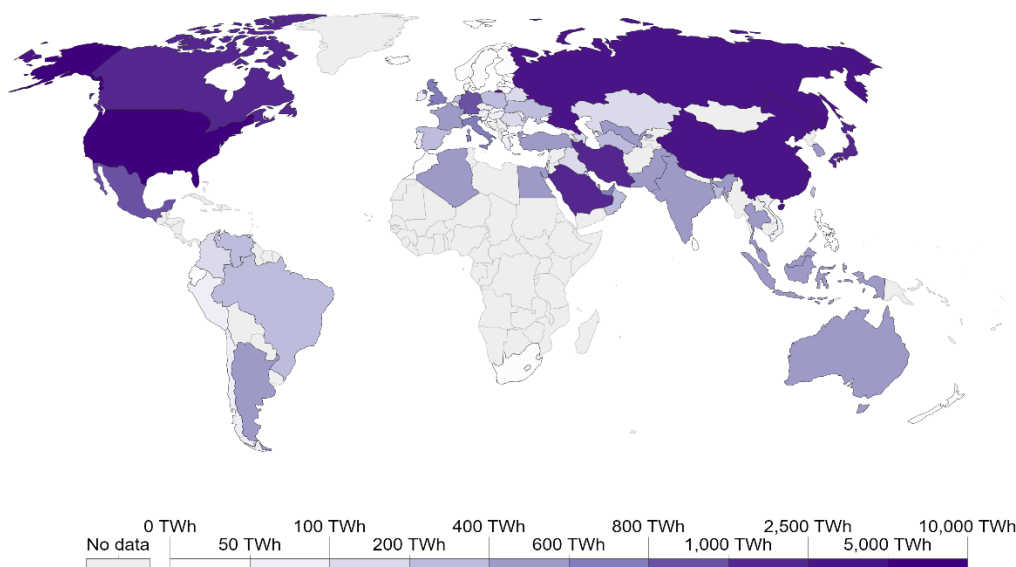


Εικόνα 2: Ζήτηση Φυσικού Αερίου ανά τομέα.

Είναι προφανές, λοιπόν, ότι προτιμάται σε ολοένα και περισσότερους τομείς σε όλο τον κόσμο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατεθεί κι η κατανάλωση ανά χώρα:

Gas consumption, 2019

Natural gas consumption is measured in terawatt-hour (TWh) equivalents per year.



Source: BP Statistical Review of Global Energy

OurWorldInData.org/fossil-fuels • CC BY

Εικόνα 3: Κατανάλωση Φυσικού Αερίου ανά χώρα (2019) (<https://ourworldindata.org/grapher/gas-consumption-by-country>).

Η Β. Αμερική παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης κυρίως λόγω των Η.Π.Α, κάτι που δεν είναι περίεργο αν αναλογιστεί κανείς, ότι, είναι η χώρα με την μεγαλύτερη κατανάλωση πετρελαίου παγκοσμίως.

Όμως, εκτός της χρήσης του, εξίσου σημαντική είναι κι η αποθήκευση του Φυσικού Αερίου (ΦΑ).

- Αυτή γίνεται με διάφορους τρόπους. Ευρέως διαδεδομένη πρακτική είναι η αποθήκευσή του σε υπέργειους σταθμούς αποθήκευσης ΦΑ, όπου αποθηκεύεται σε υγροποιημένη μορφή (LNG-Liquefied natural gas). Μάλιστα, εδώ στην Ελλάδα υπάρχει ένας τέτοιος σταθμός (ένας από τους 28 που λειτουργούν αυτήν τη στιγμή σε Μεσόγειο Θάλασσα κι Ευρώπη) στην Ρεβυθούσα. Από αυτούς τους σταθμούς μεταφέρονται ποσότητες που διατίθενται είτε σε εργοστάσια είτε στο οικιακό δίκτυο.



Εικόνα 4: Τερματικός σταθμός Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου - ΥΦΑ (LNG) στη Ρεβυθούσα

<https://www.desfa.gr/press-center/press-releases/diagwnismos-gia-thn-kataskeyh-sta8moy-fortwshs-bytioforwn-lng-sth-reby8oysa-apo-ton-desfa>.

- Μία άλλη αναδύομενη πρακτική, είναι τα Clusters ΦΑ. Τα clusters ουσιαστικά, είναι σημεία εισόδου του ΦΑ στο εκάστοτε εθνικό δίκτυο αερίου (<https://www.depa.gr/ethniko-nomothetiko-ke-rythmistiko-plesio/>). Κατόπιν Ευρωπαϊκής ντιρεκτίβας κι από το 2015 αποφασίστηκε ότι το ΦΑ πρέπει να γίνει διαθέσιμο προς κατανάλωση ακόμα και στις πιο απομακρυσμένες περιοχές της Ε.Ε. Και για αυτόν τον λόγο, ήδη, άρχισε να δημιουργείται ένα δίκτυο από σταθμούς αποθήκευσης, καθώς και μεταφοράς του με φορτηγά οχήματα σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν μπορούν να εγκατασταθούν αγωγοί μεταφοράς ΦΑ.
- Και τέλος, μία άλλη προσέγγιση είναι η υπόγεια αποθήκευση του ΦΑ. Αξίζει να σημειωθεί πως, όταν λέμε υπόγεια, δεν πρόκειται για ειδικές εγκαταστάσεις λίγα μέτρα κάτω από την γη, αλλά σε ταμιευτήρες με εξαντλημένα κοιτάσματα. Αυτή η πρακτική, πέραν του ότι είναι εξαιρετική από άποψη σύλληψης, έχει και μια σειρά πλεονεκτημάτων, τα οποία θα αναλυθούν περαιτέρω σε αυτή την εργασία.

2. Υπόγεια Αποθήκευση ΦΑ – Underground Gas Storage

2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η υπεδαφική αποθήκευση του ΦΑ εφαρμόστηκε μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν οι ανάγκες ήταν ιδιαίτερα αυξημένες. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η εποχική ζήτηση είναι πάντα ένας πολύ σημαντικός παράγοντας (διαχρονικά) στην αγορά του ΦΑ. Έτσι, λοιπόν, και τότε οι εταιρείες διανομής του διαπίστωσαν πως η αυξημένη εποχική ζήτηση κατά περιόδους δεν μπορούσε να καλυφθεί μόνο με το δίκτυο αγωγών. Ένας τρόπος με τον οποίο θα αντιμετωπιζόταν σήμερα το πρόβλημα αυτό, θα ήταν με την αύξηση της δυναμικότητας μεταφοράς των αγωγών, τουτέστιν αύξηση του μεγέθους τους. Όμως, τότε, η τεχνολογία που απαιτείτο δεν ήταν διαθέσιμη κι έτσι η υπόγεια αποθήκευσή του ήταν μονόδρομος.

Η πρώτη αποθήκευση φυσικού αερίου σε υπόγειο σχηματισμό (πιο συγκεκριμένα ταμιευτήρα) πραγματοποιήθηκε στον Καναδά και συγκεκριμένα στο Οντάριο, το 1915. Πραγματοποιήθηκε σε εξαντλημένο κοίτασμα φυσικού αερίου. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι Η.Π.Α την επόμενη κιόλας χρονιά υιοθέτησαν αυτήν την πρακτική κι έτσι στο Buffalo και συγκεκριμένα στο κοίτασμα Zoar έγινε για δεύτερη φορά παγκοσμίως αποθήκευση (Wheeler & Eckard 1952). Το εκπληκτικό είναι ότι το Zoar χρησιμοποιείται ακόμη, 104 χρόνια μετά (Evans & Chadwick 2009). Στην Ευρώπη αυτό συνέβη αρκετά χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα στην Πολωνία το 1954.

Σε υδροφόρο ορίζοντα, έγινε πρώτη φορά στις Η.Π.Α το 1946 και συγκεκριμένα στο Kentucky. Στην Ευρώπη εφαρμόστηκε αργότερα, το 1953, στη Γερμανία όταν και ξεκίνησε τη λειτουργία του ο Engelborstel υδροφόρος ορίζοντας.

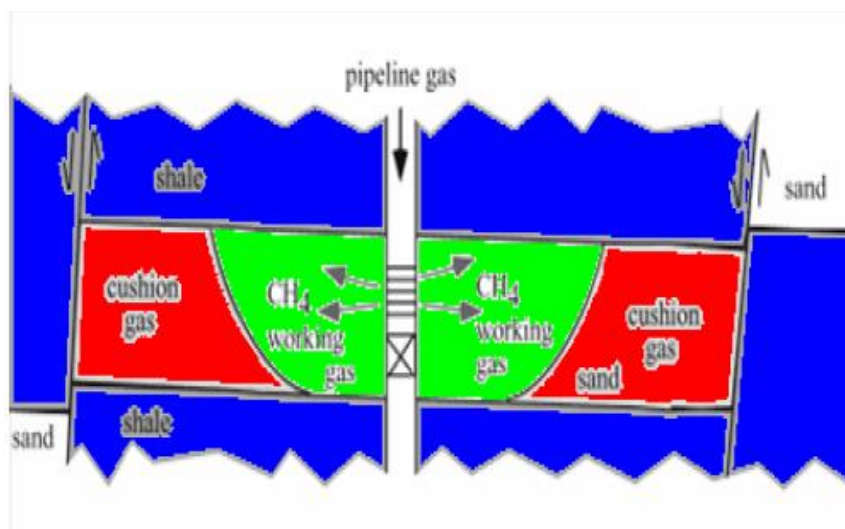
Τέλος, οι σπηλαιώσεις άλατος χρησιμοποιήθηκαν μεταγενέστερα ως αποθηκευτικοί γεωλογικοί σχηματισμοί. Στο Michigan των Η.Π.Α το 1961 πραγματοποιήθηκε αποθήκευση φυσικού αερίου για πρώτη φορά και εν συνεχεία στον Καναδά το 1964. Στην Ευρώπη η τεχνική εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1970 στο Tersanne της Γαλλίας.

2.2 Η μηχανική πίσω από την υπόγεια αποθήκευση του φυσικού αερίου

Αρχικά, είναι σκόπιμο να αναφερθούν κάποιες βασικές αρχές της τεχνικής αυτής. Όταν αποθηκεύεται το αέριο, ουσιαστικά εισπνέζεται μέσα στο σχηματισμό, με άμεσο συνεπακόλουθο την σταδιακή αύξηση της πίεσης. Έτσι, ο σχηματισμός συμπεριφέρεται σαν ένα δοχείο πεπιεσμένου ΦΑ. Για τη λειτουργία του υπόγειου αποθηκευτικού χώρου είναι απαραίτητη η συνεχής παραμονή όγκου αερίου μέσα στην εγκατάσταση, ώστε να εξασφαλίσουμε την ελάχιστη απαιτούμενη πίεση για την παροχή των γεωτρήσεων παραγωγής.

Το αέριο αυτό ονομάζεται αέριο βάσης (cushion gas). Να σημειωθεί πως δεν υπολογίζεται στις ποσότητες που δύναται να αντληθούν.

Από την άλλη πλευρά, έχουμε το ωφέλιμο αέριο (working gas). Είναι ουσιαστικά ο ωφέλιμος όγκος του ΦΑ που υπάρχει στον υπόγειο σχηματισμό κι είναι διαθέσιμος ανά πάσα στιγμή για παραγωγή, όταν η εγκατάσταση αποθήκευσης λειτουργεί κανονικά. Επίσης, πρόκειται για το αέριο που δύναται να εξαχθεί εκτός του ότι αποθηκεύεται. Όταν γίνεται αναφορά στη χωρητικότητα των εγκαταστάσεων αποθήκευσης, αυτό σημαίνει τη χωρητικότητα του working gas.



Εικόνα 5: Αέριο βάσης (cushion gas) κι ωφέλιμο αέριο (working gas) (Sunjay 2019).

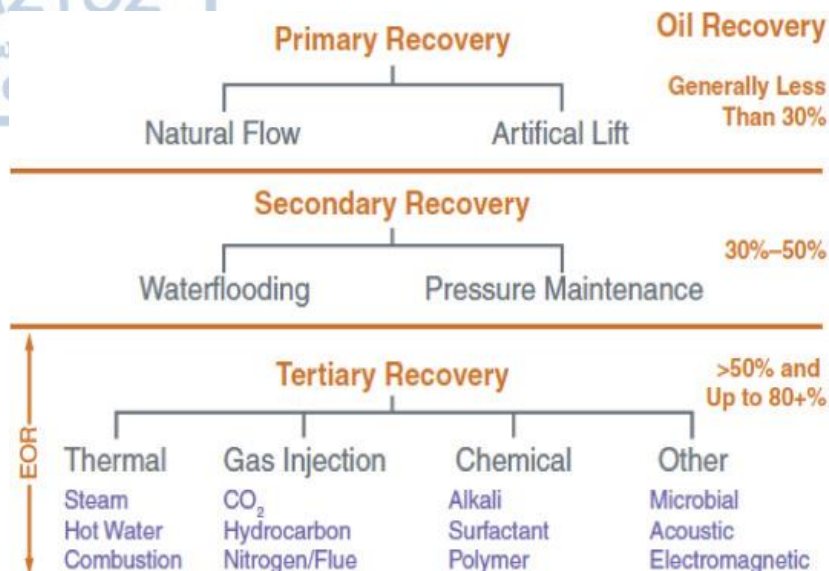
Όταν ξεκινάει η άντληση, η πίεση του εσωτερικού της εγκατάστασης είναι υψηλή. Καθώς, όμως, προχωράει η άντληση, ο όγκος του αερίου μειώνεται κι έτσι πέφτει κι η πίεση άρα κι η δυναμικότητα μεταφοράς. Έπειτα από επανεκτίμηση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων, μπορεί μέρος του working gas να μετατραπεί σε cushion gas προκειμένου να διατηρηθεί η πίεση σε επιθυμητά επίπεδα (Παναγιωτίδου 2012).

Η Υπόγεια αποθήκευση ΦΑ είναι πολύ σημαντική λόγω της περιβαλλοντικά φιλικής της φύσης (Eren & Polat 2019). Εκτός αυτού συνεισφέρει και στην περαιτέρω ανάκτηση του πετρελαίου κατά τη γεώτρηση. Συγκεκριμένα είναι μέθοδος τριτογενούς ανάκτησης υδρογονανθράκων.

Όπως είναι γνωστό, υπάρχουν 3 τύποι ανάκτησης των in situ ποσοτήτων υδρογονανθράκων ή αλλιώς Original Oil In Place (OOIP) :

1. Πρωτογενής ανάκτηση (Primary Recovery)
2. Δευτερογενής ανάκτηση (Secondary Recovery)
3. Τριτογενής ανάκτηση (Tertiary Recovery)

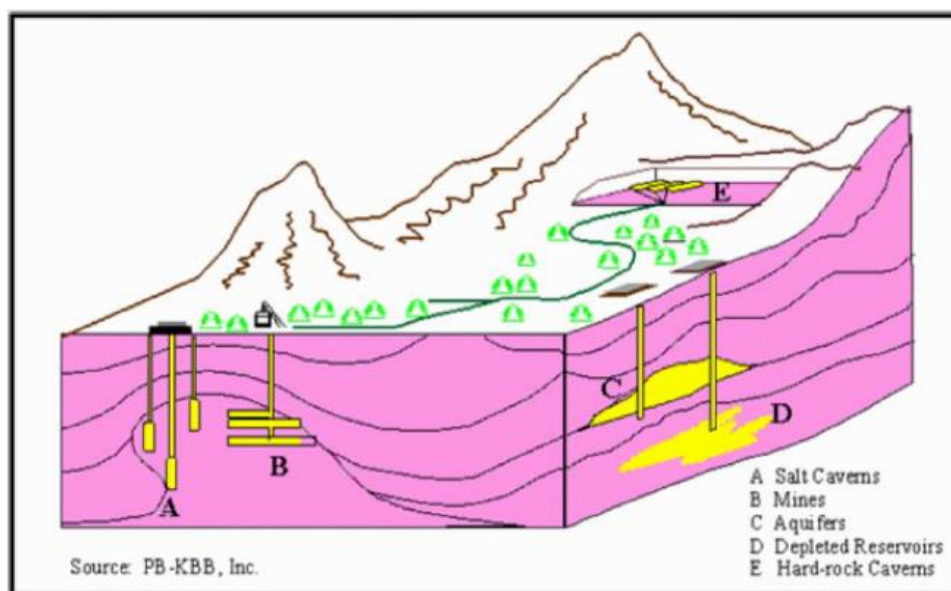
Κατόπιν ερευνών έχει διαπιστωθεί ότι με την πρωτογενή δύναται να ανακτηθεί ένα ποσοστό λίγο μικρότερο από το 30% των ποσοτήτων, που υπάρχουν στον ταμειυτήρα (Στη διεθνή ορολογία το ποσοστό ή συντελεστής αποληψιμότητας ονομάζεται Recovery Factor). Προφανώς, όμως, κάτι τέτοιο θα ήταν οικονομικά ασύμφορο για την Πετρελαϊκή Βιομηχανία. Οπότε, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της Δευτερογενούς Ανάκτησης το ποσοστό αυτό ανεβαίνει μέχρι και το 50%. Εν συνεχεία και προκειμένου να διασφαλιστεί η μέγιστη αποληψιμότητα (Enhanced Oil Recovery), χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι της Τριτογενούς Ανάκτησης κι έτσι το ποσοστό αυξάνεται πάνω από 50% και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει ακόμα και το 80%. Παρακάτω παρατίθεται ένα σχεδιάγραμμα της ανάκτησης των ποσοτήτων υδρογονανθράκων:



Εικόνα 5: Στάδια Ανάκτησης υδρογονανθράκων και EOR (Alagorni et al 2015, De Kok & Clemens 2008).

Παγκοσμίως υπάρχουν 3 κατηγορίες γεωλογικών δομών που μπορούν να μετατραπούν σε χώρους αποθήκευσης ΦΑ (Mokhatab et al 2019):

1. Εξαντλημένοι ταμιευτήρες ΦΑ και Πετρελαίου
2. Υδροφόροι Ορίζοντες (Aquifers)
3. Σπηλαιώσεις άλατος (Salt Caverns)



Εικόνα 6: Τύποι Underground Hydrocarbon Storage. Για το φυσικό αέριο χρησιμοποιούνται οι τύποι A,C και D. (Τσίτσης 2013).

2.3. Εξαντλημένοι ταμιευτήρες – Depleted Reservoirs

Η πιο κοινή μορφή υπόγειας αποθήκευσης. Αφού εξαντληθούν τα ρευστά τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση αερίου. Είναι μια πολύ ελκυστική επιλογή, καθώς πρόκειται για σχηματισμούς που έχουν ήδη μελετηθεί ως προς τα γεωλογικά και φυσικά τους χαρακτηριστικά από γεωλόγους και μηχανικούς πετρελαίου. Ως γνωστόν, αυτό που χαρακτηρίζει έναν ταμιευτήρα είναι οι πετροφυσικές του ιδιότητες. Οι πιο σημαντικές από αυτές εν προκειμένω είναι το πορώδες (porosity) κι η διαπερατότητα (permeability). Οι εξαντλημένοι ταμιευτήρες έχουν σίγουρα καλές τιμές και για τις δύο ιδιότητες, καθώς κρίθηκαν οικονομικά βιώσιμοι για γεωτρήσεις. Το πορώδες ουσιαστικά καθορίζει την ποσότητα του αερίου που θα μπορέσει να αποθηκευτεί.

Το αέριο που αποθηκεύεται σε αυτού του είδους τον σχηματισμό, εισπιέζεται με πίεση υψηλότερη αυτής του reservoir. Έτσι, μπορεί να ανακτηθεί, όταν η ζήτηση για αυτό αυξηθεί. Ο ρυθμός με τον οποίον επιστρέφει το αέριο εξαρτάται από τον σχεδιασμό αλλά και τις αρχικές διαστάσεις των γεωτρήσεων παραγωγής κι επίσης από τις ιδιότητες του reservoir. Για να αυξηθεί, λοιπόν, τα πηγάδια συνεχίζουν να υφίστανται διάτρηση με τέτοιον τρόπο, ώστε το κατώτερο τμήμα τους να οριζοντιωθεί κατά μήκος του αποθηκευτικού σχηματισμού.

Έτσι, εξασφαλίζεται μια σημαντικά μεγαλύτερη έκταση για να ρεύσει το αέριο με αυξημένο ρυθμό. Ακόμη, αυξάνονται οι ρυθμοί έγχυσης κι ανάκτησης. Πρέπει να τεθεί υπόψη ότι, όταν τα εξαντλημένα κοιτάσματα χρησιμοποιούνται για αποθήκευση φυσικού αερίου, υπάρχει η πιθανότητα της μίξης της υπολειπόμενης ποσότητας αερίου (μετά την εκμετάλλευση) με το εισπιεζόμενο αέριο. Οπότε, είναι σημαντικό να ληφθούν μέτρα, ώστε να αποφευχθεί το εν λόγω πρόβλημα, πάντα με γνώμονα τις διαφορές στη σύνθεσή του προς αποθήκευση αερίου με το αέριο του σχηματισμού.

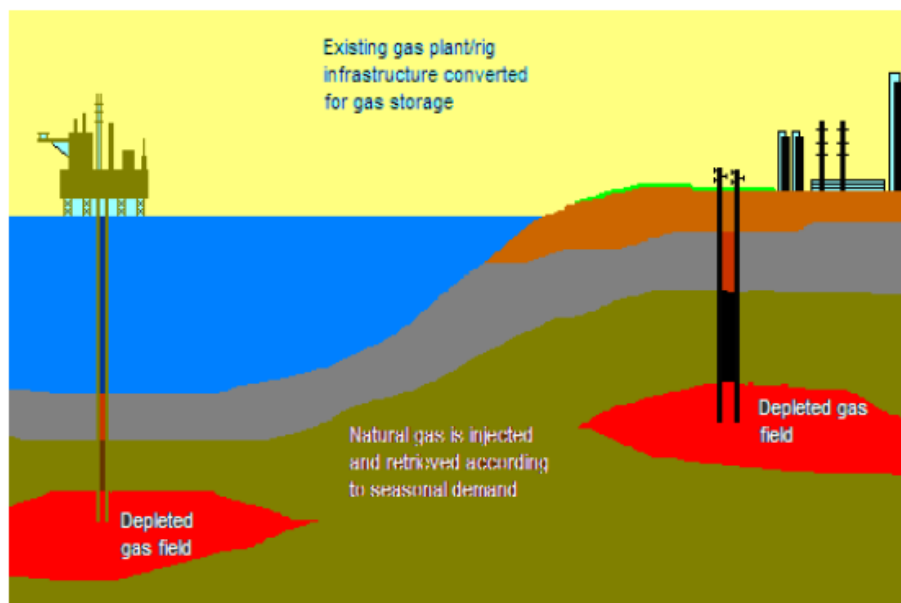
Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι υπάρχουν προκλήσεις οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν επιτυχώς από τους μηχανικούς. Αυτές είναι οι κάτωθι:

- Μετανάστευση του εισπνεζόμενου αερίου μετά από μια μεγάλη χρονική περίοδο
- Αξιόπιστος έλεγχος της ακριβούς θέσης του αερίου
- Και τέλος έλεγχος ζωνών πάνω από τα Cap Rocks προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές διαρροές αερίου.

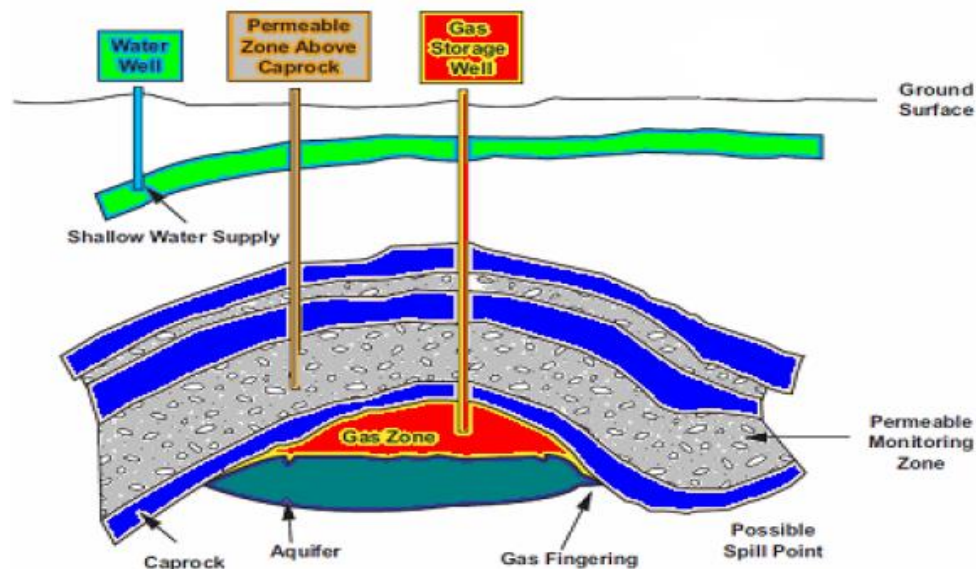
Η επιλογή της τοποθεσίας παίζει σημαντικό ρόλο στο να αποτραπούν οι διαρροές και πολύ προσοχή πρέπει να δίνεται στην συνοχή του πετρώματος-καλύμματος. Πάντως, συνήθως το φαινόμενο της διαρροής είναι πιο συχνό στους υδροφόρους ορίζοντες παρά στους εξαντλημένους ταμιευτήρες.

Συνήθως, πέριξ των σχηματισμών αυτών εγκαθίσταται και χρησιμοποιείται ένα εκτεταμένο δίκτυο αγωγών προκειμένου να πραγματοποιηθεί η έγχυση (Injection) κι η ανάκτηση (Withdrawal) του αερίου. Ο ρυθμός της έγχυσης και της ανάκτησης καθορίζεται ουσιαστικά από τη διαπερατότητα, αφού η τελευταία δείχνει το ρυθμό με τον οποίο ρέει εντός του σχηματισμού το αέριο.

Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι η αποθήκευση ΦΑ σε εξαντλημένα reservoirs είναι πιο οικονομική από τις άλλες 2 μεθόδους όσον αφορά την ανάπτυξη, τη λειτουργία καθώς και τη συντήρηση.



Εικόνα 7: Αριστερά: εξαντλημένο offshore κοιτάσμα. Δεξιά: εξαντλημένο onshore κοιτάσμα (Sunjay 2019).



Εικόνα 8: Αποθήκευση Φυσικού Αερίου σε υδροφόρους ορίζοντες υψηλής διαπερατότητας (Sunjay 2019).

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι υδροφόροι ορίζοντες απαιτούν πολύ περισσότερο αέριο βάσης (cushion gas) από ότι τα reservoirs. Αυτό είναι φυσικό καθώς δεν υπήρχε από πριν αέριο εντός του σχηματισμού. Έτσι, ποσότητα φυσικού αερίου που θα εισπνεστεί εντός του δεν θα μπορέσει να ανακτηθεί εν τέλει. Σε τέτοιου είδους σχηματισμούς το cushion gas αποτελεί το 80% του συνολικού όγκου αερίου.

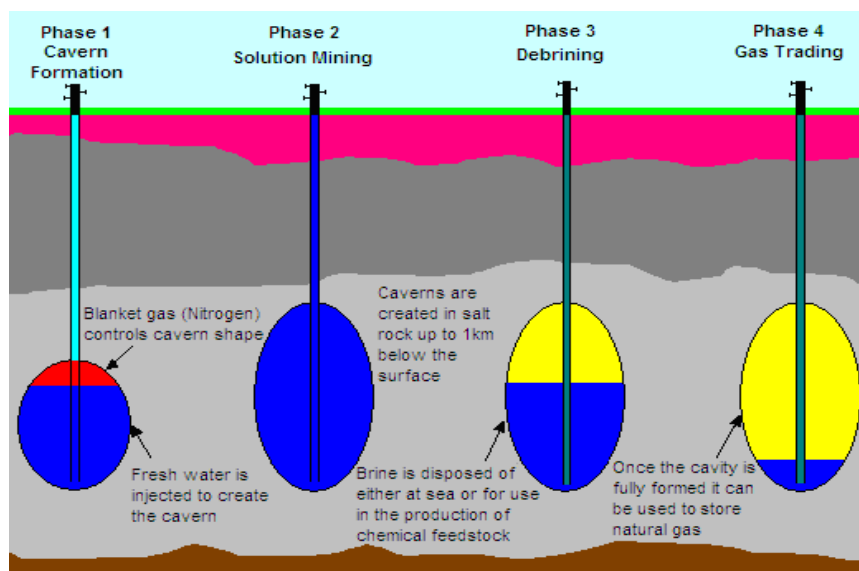
Σε περίπτωση που επιχειρηθεί από τους μηχανικούς ανάκτηση του αερίου βάσης, τότε σε αντίθεση με τους ταμιευτήρες θα υπάρξουν αρνητικά αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα η ζημιά που θα προκληθεί στο σχηματισμό. Έτσι, το μεγαλύτερο μέρος της ποσότητάς του θα παραμείνει εντός του υδροφορέα ακόμα και μετά το κλείσιμο της αποθηκευτικής εγκατάστασης.

Οι υδροφόροι ορίζοντες απαιτούν μεγάλα κόστη όχι μόνο για την έρευνα των γεωλογικών χαρακτηριστικών τους, αλλά και κατά την αρχική φάση λειτουργίας τους ως αποθηκευτικά μέσα. Η συνεχής παρακολούθηση της διεπαφής αερίου-νερού (GWC – Gas Water Contact) κι οι αυστηρές προδιαγραφές της μακροχρόνιας εύρυθμης λειτουργίας μπορούν να συγκριθούν με αυτές ενός εξαντλημένου ταμιευτήρα αερίου. Παρόλα αυτά, όπως ήδη αναφέρθηκε, οι υδροφόροι ορίζοντες εξυπηρετούν ως η μόνη εναπομείνουσα λύση για υπόγεια αποθηκευτική δομή σε μια αποδεκτή απόσταση από τους αγωγούς αερίου.

Έχουν μικρό αντίκτυπο στο περιβάλλον από τη στιγμή που δεν απαιτούν την εισπίεση γλυκού νερού, ή την απόθεση αλατόνευρου. Αναλόγως της αποθηκευτικής τους ικανότητας, οι υδροφόροι ορίζοντες εξυπηρετούν για την εποχική εξισορρόπηση της παροχής φυσικού αερίου.

2.5. Σπηλαιώσεις άλατος

Πρόκειται για σχηματισμούς που δημιουργήθηκαν από ήδη υπάρχουσες εναποθέσεις αλάτων στον πυθμένα της θάλασσας. Οι περισσότερες μεγάλες σπηλαιώσεις άλατος βρίσκονται στους δόμους άλατος (Salt Domes) κατά μήκος της Ακτής του Κόλπου των Η.Π.Α. Η σπηλαιώση δημιουργείται κατά τη γεώτρηση σε έναν σχηματισμό και κατόπιν ανάκτησης του νερού εντός του. Έτσι, διαλύεται το αλάτι εντός του και ανεβαίνει στην επιφάνεια ως αλατόνευρο. Τα τοιχώματα της είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά έναντι της αποδόμησης του ταμιευτήρα. Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί κατά κάποιο τρόπο ως ένα «ανοικτό δοχείο» κι αυτή ακριβώς η μορφολογία του επιτρέπει να έχει υψηλά ποσοστά αποληψιμότητας κι επίσης υψηλούς ρυθμούς ροής (Flow Rates). Οπότε, χρησιμοποιείται περισσότερο για πώληση ποσοτήτων ΦΑ σε μικρό χρονικό διάστημα παρά για τη μακροχρόνια αποθήκευσή του. Να σημειωθεί πως οι εγκαταστάσεις αυτές είναι μικρότερες σε μέγεθος από αυτές των άλλων 2 κατηγοριών.



Εικόνα 9: Αποθήκευση φυσικού αερίου σε Σπηλαιώση Άλατος (Sunjay 2019).

Όσον αφορά το μέγεθος του σχηματισμού, είναι μικρότεροι από ότι οι υδροφόροι ορίζοντες κι οι ταμειυτήρες. Όμως, συνήθως ο ρυθμός απόληψης είναι υψηλότερος των άλλων δύο κατηγοριών. Έτσι, το φυσικό αέριο που εισπνέζεται εντός μιας σπηλαιώσης άλατος μπορεί να εγχυθεί και να ανακτηθεί γρηγορότερα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή σε περιπτώσεις που η ζήτηση είναι απρόσμενα υψηλή.

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι τα τοιχώματα ενός τέτοιου σχηματισμού είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, διότι δεν επιτρέπουν τη διαρροή του εισπνέζόμενου αερίου, εκτός από μικρές ποσότητες. Τα τοιχώματα είναι ισχυρά και ουσιαστικά αδιαπέρατα στο φυσικό αέριο καθ'όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης αποθήκευσης.

Οι σπηλαιώσεις άλατος σχηματίζονται από υπάρχουσες αποθέσεις άλατος. Αυτές οι υπόγειες αποθέσεις μπορεί να έχουν δύο μορφές:

- Δόμοι Άλατος (Salt Domes)
- Στρώματα/ενστρώσεις αλάτων (Salt Beds)

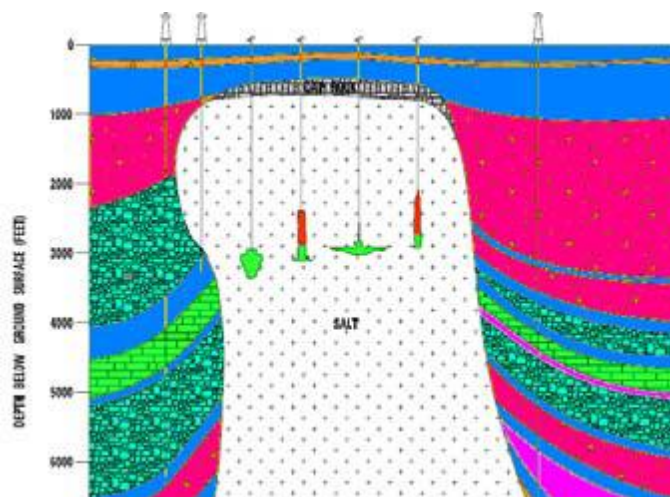
Οι δόμοι άλατος είναι παχιοί σχηματισμοί που δημιουργήθηκαν από φυσικές αποθέσεις άλατος, οι οποίες με την πάροδο του χρόνου δημιουργούν ιζηματογενή στρώματα που ουσιαστικά δημιουργούν τα Salt Domes. Πρόκειται για μεγάλους σε μέγεθος σχηματισμούς· μπορούν να έχουν διάμετρο πάνω από 1,5 χιλιόμετρο και ύψος έως και 30.000 πόδια. Συνήθως, οι δόμοι άλατος που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αερίου βρίσκονται σε βάθος που κυμαίνεται από 1.500 έως και 6.000 πόδια κάτω από την επιφάνεια, αν κι υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες βρίσκονται σε μικρότερο βάθος.

Από την άλλη, τα στρώματα αλάτων είναι πιο λεπτοί σχηματισμοί και βρίσκονται σε μικρότερα βάθη. Το ύψος τους φτάνει έως 1.000 πόδια. Επειδή είναι φαρδιοί και λεπτοί σχηματισμοί, επιδεινώνονται πιο εύκολα με την είσοδο μιας σπηλαιώσης άλατος και μπορεί επίσης να είναι πιο ακριβοί στη μετατροπή τους σε εγκατάσταση αποθήκευσης.

Όταν, λοιπόν, ανακαλύπτεται ένας κατάλληλος δόμος άλατος ή ένα στρώμα άλατος και αξιολογούνται ως κατάλληλα για αποθήκευση φυσικού αερίου, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια κοιλότητα άλατος εντός του σχηματισμού. Ουσιαστικά, αυτό

πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας νερό για να διαλυθεί και να απομακρυνθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα άλατος. Έτσι, δημιουργείται ένας μεγάλος κενός χώρος εντός του σχηματισμού. Αυτό γίνεται με την όρυξη μιας γεώτρησης μέσα στο σχηματισμό και με την επαναλαμβανόμενη έγχυση κι ανάκτηση νερού εντός της. Έτσι, θα δημιουργηθεί ένας μεγάλος κενός χώρος· απομακρύνοντας στην ουσία το αλάτι που τον καταλάμβανε προηγουμένως. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται στη διεθνή ορολογία «salt cavern leaching».

Χρησιμοποιείται προς τη δημιουργία σπηλαιώσεων και στις δύο μορφές των αποθέσεων άλατος και μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβή διαδικασία. Παρόλα αυτά, μετά το πέρας της, έχει δημιουργηθεί μια αποθηκευτική δομή με πολύ υψηλή αποληψιμότητα. Να σημειωθεί, επιπροσθέτως, πως οι απαιτήσεις σε αέριο βάσης είναι οι χαμηλότερες σε σύγκριση με τις άλλες δύο κατηγορίες (συγκεκριμένα γύρω στο 33% του συνολικού αερίου).



Εικόνα 10: Υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου σε σπηλαιώση άλατος (Sunjay 2019).

Χάρη στις ιδιότητές τους, οι salt caverns (αποληψιμότητα, υψηλοί ρυθμοί ροής), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βραχυπρόθεσμη εμπορία φυσικού αερίου. Πριν ακόμη ολοκληρωθεί η διαδικασία salt cavern leaching, το ανώτερο τμήμα της σπηλαιώσης μπορεί

να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση. Με τη χρήση της τεχνολογίας Lined Rock Cavem (LRC) είναι εφικτή η δημιουργία αποθηκευτικών εγκαταστάσεων σε χώρες όπου το υπέδαφος δεν έχει τα επιθυμητά γεωλογικά χαρακτηριστικά για άλλο είδος υπόγειας δομής αποθήκευσης (Sunjay et al 2019).

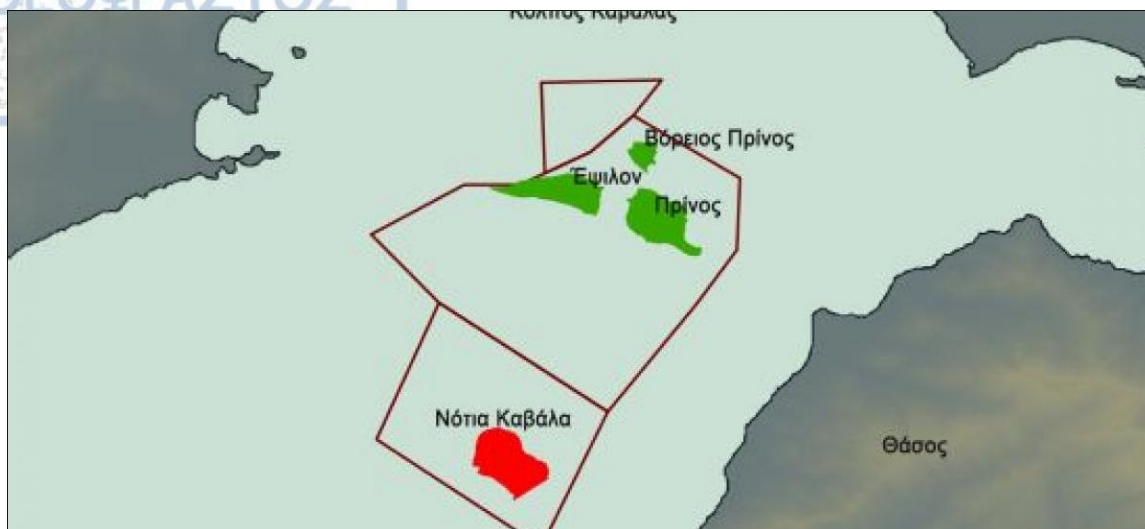
Η αποθήκευση του ΦΑ, λοιπόν, παρέχει ασφάλεια διανομής του σε περιπτώσεις που υπάρξουν κωλύματα της παραγωγής ή της μεταφοράς του. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί για πολιτικοοικονομικούς λόγους, όπως κατά τη διαπραγμάτευση των τιμών του, για αμιγώς πολιτικά ζητήματα ή ακόμα και λόγω της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου που διανύεται, καθώς η ζήτηση την καλοκαιρινή περίοδο είναι μικρότερη από αυτήν της χειμερινής.

2.6 Η περίπτωση της Ελλάδας

Στην Ελλάδα, δυστυχώς δεν υπάρχουν (προς το παρόν) projects υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου. Κάτι το οποίο, εκτός από την απρόσκοπτη και συνεχή ροή του αερίου στους καταναλωτές σε περιόδους διακοπής της ροής από τους αγωγούς για οποιοδήποτε λόγο, θα αναβάθμιζε γεωπολιτικά το ρόλο της χώρας μας στο Ευρωπαϊκό γίγνεσθαι. Επίσης, θα ενίσχυε τον τομέα της απασχόλησης των επιστημόνων της χώρας μας, εμποδίζοντας έτσι το brain drain. Τέλος, θα ενίσχυε τις προοπτικές της περαιτέρω ανάπτυξης της τεχνικής αυτής στη χώρα μας· κάτι που μόνο θετικό αντίκτυπο θα είχε για τους καταναλωτές.

Παρόλα αυτά, στο άμεσο μέλλον, σχεδιάζεται από την πολιτεία η πρώτη πανελλαδικά εφαρμογή της εν λόγω τεχνολογίας, συγκεκριμένα στο κοιτάσμα «Νότια Καβάλα», ενός κοιτάσματος που σχεδόν εξαντλήθηκε.

Το κοιτάσμα αυτό βρίσκεται στον κόλπο της Καβάλας, έχει έκταση 5km², είναι σε βάθος 1700m και βρίσκεται 11 km νοτίως του κοιτάσματος του Πρίνου.



Εικόνα 11: Τοποθεσία του κοιτάσματος ‘Νότια Καβάλα’, καθώς και των κοιτασμάτων ‘Εψιλον’, ‘Πρίνος’, ‘Βόρειος Πρίνος’ (<https://www.insider.gr/epiheiriseis/energeia/142707/paratasi-ekdilosis-endiaferontos-gia-koitasma-fysikoy-aerioy-notia>).

Το κοιτάσμα έχει χωρητικότητα περίπου 1 bcm (δix κυβικά μέτρα). Η μέγιστη ημερήσια δυναμικότητα απόληψης φυσικού αερίου εκτιμάται σε 4 εκατ. Nm³/d κι η μέγιστη ημερήσια δυναμικότητα εισπύσεως της Υπόγειας Αποθήκης με Φυσικό Αέριο, εκτιμάται σε 5 εκατ. Nm³/d (<https://www.hradf.com/portfolio/view/26/south-kavala-natural-gas-storage?acceptall>).

Το project είναι κομβικής σημασίας για τη συνέχιση της παραγωγής υδρογονανθράκων στην περιοχή καθώς και για τη διασφάλιση των ήδη υφιστάμενων θέσεων εργασίας (<https://www.tovima.gr/2020/10/19/finance/kleidosan-oi-symmaxies-gia-ti-diekdikisi-tis-ypogeias-apothikis-fysikou-aeriou-kavalas>).

Εκτός της υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου, σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, δύναται να αποθηκευτεί και το Διοξείδιο του Άνθρακα. Εντελώς περιληπτικά, υπάρχουν δύο λόγοι που εφαρμόζεται αυτή η τεχνική. Ο πρώτος δεν είναι άλλος από την ‘απομόνωση’ του από τον αέρα έτσι ώστε να περιοριστεί η ατμοσφαιρική ρύπανση κι έτσι το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Gale 2004). Ο δεύτερος λόγος είναι η συμβολή του στην Enhanced Oil Recovery του πετρελαίου (ως μέθοδος τριτογενούς ανάκτησης), καθώς και στην Enhanced Gas Recovery (EGR) του φυσικού αερίου. Είναι δηλαδή – υπό προϋποθέσεις – μέσο για την περαιτέρω ανάκτηση τους. Αξίζει να σημειωθεί πως η EGR είναι μια τεχνολογία που βρίσκεται στα πρωταρχικά στάδια της ακόμα, οπότε δεν χρησιμοποιείται ευρέως (Αμβράζης 2017).

Η EGR λειτουργεί όπως η EOR, αντί του πετρελαίου όμως, εδώ χρησιμοποιείται CO₂. Όταν ορυχθούν οι ποσότητες υδρογονανθράκων που δύνανται να ορυχθούν με τις μεθόδους πρωτογενούς και δευτερογενούς ανάκτησης, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος. Σε ταμειυτήρες χαμηλής πίεσης, μάλιστα, η παραγωγή αυξήθηκε έως και 14% με τη χρήση της EGR (Amer et al 2018).

Όσον αφορά την υπόγεια αποθήκευση CO₂, αυτή δεν πρόκειται για μια απλή διαδικασία. Είναι, μάλιστα, αρκετά δαπανηρή. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί όλη η διαδικασία που ακολουθείται και θα αναφερθούν παραδείγματα αποθήκευσης του CO₂ (ενός ανθρωπογενούς ρύπου) σε διάφορους σχηματισμούς. Θα αναφερθούν, επίσης, παραδείγματα αποθήκευσης από τον διεθνή χώρο.

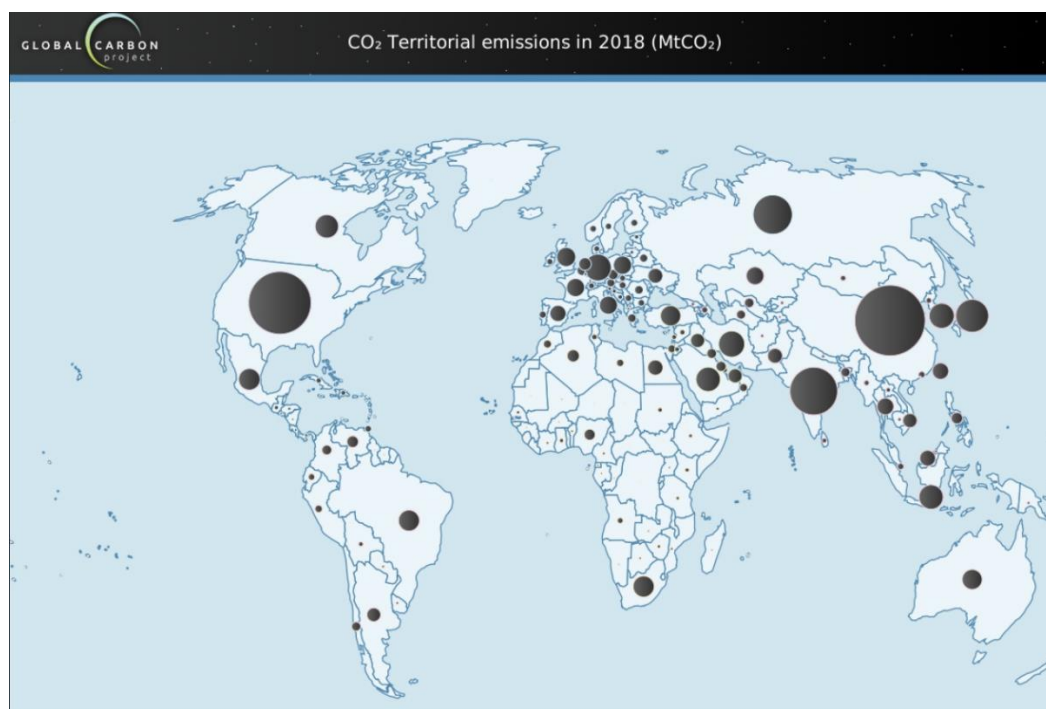
Όμως, πρωτίστως, είναι σκόπιμο να αναφερθούν οι κατηγορίες των γεωλογικών δομών που είναι κατάλληλες για να αποθηκεύσουν το CO₂. Αυτές είναι οι κάτωθι:

- Εξαντλημένα reservoirs πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες
- Ανεκμετάλλευτες φλέβες άνθρακα (Deep Unminable Coal Seams)

Σκόπιμη κρίνεται κι η αναφορά στις εκπεμπόμενες ποσότητες του CO₂ ανά χώρα καθώς και στις διεθνείς συμφωνίες για τον περιορισμό των εκπομπών αυτών.

3.1 Διεθνείς συμφωνίες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής

Είναι, πλέον, αναμφισβήτητο στις μέρες μας, ότι η κλιματική αλλαγή είναι κάτι το υπαρκτό και απειλεί τις ζωές μας καθώς και το οικοσύστημα. Η αλλαγή αυτή, λοιπόν, είναι ανθρωπογενής παράγοντας και οφείλεται σε διάφορα εκπεμπόμενα αέρια (αποκαλούμενα ως αέρια του θερμοκηπίου) κι εκεί η υπόγεια αποθήκευση του CO₂ μπορεί να περιορίσει – σημαντικά – τον κίνδυνο αυτόν.

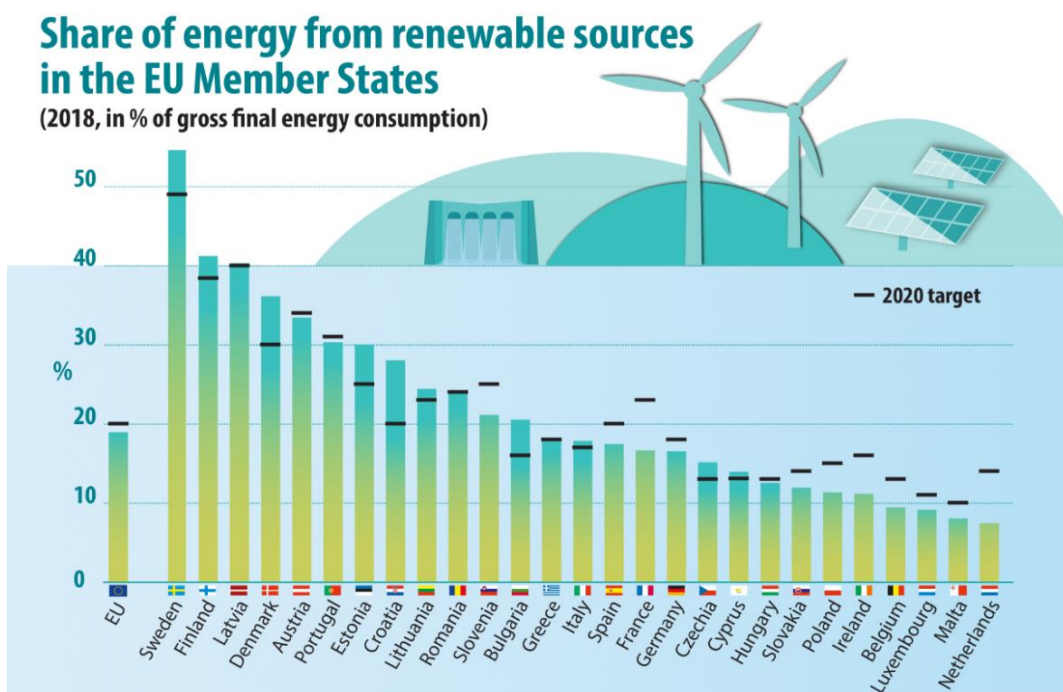


Εικόνα 12: Εκπομπές διοξειδίου του Άνθρακα ανά χώρα – 2018 (<http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>)

Συνολικά το 2018 εκπέμφθηκαν 36573 Mt CO₂, ένα τεράστιο, δηλαδή, νούμερο. Ο μεγαλύτερος ρυπαντής CO₂ παγκοσμίως είναι η Κίνα με 10065 Mt, ενώ ακολουθούν οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με 5416 Mt. Είναι σκόπιμο να αναφερθούν κι οι

εκπομπές της χώρας μας. Η Ελλάδα εξέπεμψε το 2018 (σύμφωνα με την ίδια έρευνα) 73,89 Mt CO₂ και καθαρά για λόγους σύγκρισης, μια άλλη χώρα ίδιου πληθυσμού και παρόμοιας οικονομίας με τη δική μας, η Πορτογαλία εξέπεμψε σημαντικά μικρότερες ποσότητες, συγκεκριμένα 50.93 Mt. Αυτό μας δείχνει ότι η Ιβηρική χώρα είναι πιο μπροστά από την Ελλάδα όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η Ελλάδα στο συγκεκριμένο τομέα αντιπροσωπεύει το μέσο όρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, που ακολουθεί, ξεπερνάει πολλές ευρωπαϊκές χώρες, αλλά δυστυχώς υπολείπεται άλλων σημαντικά.



Εικόνα 13: Ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ανά χώρα στην Ε.Ε – 2018
(https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/f/f3/Share_of_energy_from_renewable_sources_2018_infograph.jpg).

Η χώρα μας, παρόλο που δεν είναι πρωτοπόρος, δεν τα πάει καθόλου άσχημα σε αυτόν το νευραλγικό τομέα της εποχής μας και μάλιστα έχει πιάσει ακριβώς τον απαιτούμενο στόχο. Ο στόχος του 2020 είναι ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επί της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Οι κυβερνήσεις της Ελλάδας εδώ και αρκετά χρόνια πραγματοποιούν σημαντικές επενδύσεις σε αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκά καθώς και σε φιλικότερες προς το περιβάλλον μονάδες ηλεκτροπαραγωγής

από Λιγνίτη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας μονάδας είναι η (υπό κατασκευή εν έτει 2020) Πτολεμαΐδα V η οποία θα αντικαταστήσει παλαιότερη (και πιο ρυπογόνα) μονάδα στην περιοχή.

Είναι, λοιπόν, ξεκάθαρες οι προσπάθειες των κρατών αλλά και των υπερκρατικών δομών (όπως της Ε.Ε) για μείωση των ποσοτήτων CO₂ αλλά και των υπολοίπων αερίων του θερμοκηπίου προς τη δημιουργία ενός πιο πράσινου κόσμου. Σε αυτό το πλαίσιο, χρόνια πριν, ξεκίνησαν οι πρώτες συντονισμένες ενέργειες κρατών για μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Όλα ξεκίνησαν με τη Σύμβαση - Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC) εν έτει 1992. Αυτή η συμφωνία μετεξελίχθηκε στο Πρωτόκολλο του Κιότο το οποίο και τέθηκε σε ισχύ αργότερα, συγκεκριμένα το 2005 με (αρχική) ισχύ έως το 2012. Η υποχρέωση που ανέλαβαν τα κράτη ήταν να περιορίσουν τους ρύπους τους σε ένα χαμηλότερο επίπεδο που ουσιαστικά θα ελαχιστοποιούσε την επιδείνωση του περιβάλλοντος εξαιτίας των ανθρωπογενών ρύπων. Τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου είναι τα εξής (<https://unfccc.int>):

- Το διοξείδιο του άνθρακα
- Το μεθάνιο
- Το υποξείδιο του αζώτου (N₂O)
- Οι υδροφθοράνθρακες (HFCs)
- Οι υπερφθοράνθρακες (PFCs)
- Το εξαφθοριούχο θείο (SF₆)

Η αρχική συμφωνία έγινε ανάμεσα σε 15 κράτη – μέλη της Ε.Ε και φυσικά με το πέρας των ετών υπέγραψαν κι οι 27 χώρες. Μάλιστα, τη συμφωνία υπέγραψαν κι άλλες χώρες εκτός Ευρώπης. Η διαφορά του Πρωτοκόλλου του Κιότο και της UNFCCC είναι ότι ουσιαστικά το πρώτο έχει δεσμευτικό χαρακτήρα κι έτσι οι δεσμεύσεις των κρατών αυτών πρέπει να τηρηθούν. Μετά από χρόνιες διαπραγματεύσεις και παρόλη την καλή διάθεση μεταξύ των (περισσότερων) εμπλεκόμενων κρατών οι διαπραγματεύσεις

ναυάγησαν, καθώς κάποιες χώρες, ανάμεσα στις οποίες οι Η.Π.Α και η Ρωσία, αθέτησαν τις προηγούμενες υποχρεώσεις που είχαν αναλάβει και δεν ανέλαβαν καινούριες.

Είναι σημαντικό να τονιστεί στο συγκεκριμένο σημείο πως η συμφωνία αυτή αφορούσε τις ανεπτυγμένες χώρες. Αναπτυσσόμενες χώρες, όπως η Κίνα και η Ινδία (από τους μεγαλύτερους ρυπαντές παγκοσμίως) αρνήθηκαν να το επικυρώσουν. Επίσης, οι Η.Π.Α αρνήθηκαν να το επικυρώσουν για τους δικούς τους λόγους.

Έτσι, η ιδέα μιας δεσμευτικής συνθήκης για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής ουσιαστικά εγκαταλείφθηκε, παρόλο που ήταν αναγκαία.

3.1.1 Συμφωνία των Παρισίων (Paris Agreement)

Στις 12 Δεκεμβρίου του 2015 υπογράφεται η ιστορική Συμφωνία των Παρισίων. Είναι ιστορική καθώς για πρώτη φορά στην ιστορία υπήρξε μια τόσο συντονισμένη προσπάθεια μεταξύ τόσων πολλών κρατών, συγκεκριμένα 195. Το σχέδιο της χρηματοδότησης λειτουργεί ως εξής: οι ανεπτυγμένες χώρες, οι οποίες μπορούν να σηκώσουν το βάρος, δεσμεύονται να υποστηρίξουν οικονομικά τις αναπτυσσόμενες για να πετύχουν τους στόχους τους, οι οποίοι δεν είναι άλλοι από το να αυξήσουν το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα, η Ε.Ε έχει θέσει ως στόχο να διαθέσει κονδύλι 100 δις Δολαρίων ετησίως στις οικονομικά ασθενέστερες χώρες μετά το 2020. (<https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>). Η συνολική οικονομική συνεισφορά των κρατών μελών της Ε.Ε το έτος 2016 ανήλθε στα 20,2 δις ευρώ, το έτος 2017 στα 20,4 δισεκατομμύρια ευρώ και το 2018 στα 21,7 δισεκατομμύρια ευρώ. Οπότε, φαίνεται η αυξητική τάση στα συνολικά ποσά που δαπανούνται. Να σημειωθεί εδώ πως τα ανεπτυγμένα κράτη οφείλουν, στα πλαίσια της διαφάνειας, να παρέχουν πληροφόρηση όσον αφορά τη χρηματοδότηση που παρέχουν στα αναπτυσσόμενα.

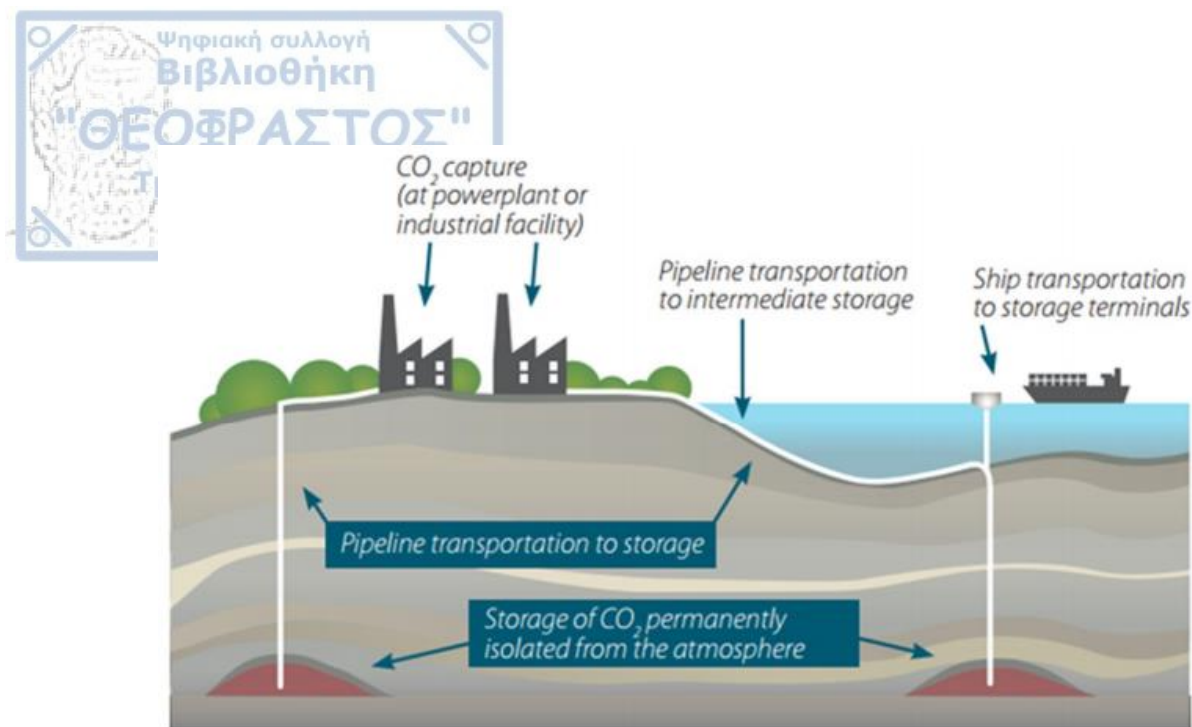
Η συμφωνία έχει θέσει ως στόχο τον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της γης κάτω από τους 2 °C. Μάλιστα, μακροπρόθεσμα, υπάρχει ο στόχος να φτάσει η αύξηση αυτή στον 1,5 °C, θερμοκρασία, δηλαδή, που θα μετριάσει κατά πολύ τις επιπτώσεις και τους κινδύνους που προκύπτουν από την κλιματική αλλαγή. Τα κράτη

έδωσαν υποσχέσεις για το πως θα χειριστούν το ζήτημα των εκπομπών τους. Μάλιστα, θα δώσουν εκ νέου υποσχέσεις μετά από 5 χρόνια, οι οποίες θα είναι βελτιωμένες σε σχέση με τις προηγούμενες και φυσικά, αν δεν τηρηθούν, τότε τα κράτη αυτά θα είναι υπόλογα στα υπόλοιπα. Τέλος, να σημειωθεί πως το 2023 προγραμματίζεται συνάντηση στην οποία θα αξιολογηθεί η πρόοδος που σημειώθηκε και τα κράτη θα ορίσουν τους επόμενους στόχους τους.

3.2. Δέσμευση, Μεταφορά κι Αποθήκευση του CO₂ – Carbon Capture Storage (CCS)

Ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, ο οποίος εφαρμόζεται εδώ και δεκαετίες στην πετρελαϊκή βιομηχανία είναι η υπόγεια αποθήκευση του CO₂ σε βαθείς υπόγειους σχηματισμούς. Πρέπει να τονιστεί εδώ πως η δέσμευση του γίνεται από μεγάλες, σταθερές πηγές κι όχι από μικρές, καθότι θα ήταν οικονομικά μη βιώσιμη λύση κι εκτός αυτού θα ήταν πολύ δύσκολη στην υλοποίηση της. Οι πηγές αυτές μπορούν να είναι εργοστάσια (τσιμέντου, μετάλλων κλπ.), διυλιστήρια καθώς και μονάδες παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη ορυκτά καύσιμα.

Οι διάφορες τεχνολογίες CCS ουσιαστικά δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα από τις πηγές, που προαναφέρθηκαν, πριν και μετά την καύση του. Στη συνέχεια, οι ποσότητες αυτές μεταφέρονται είτε με πλοία, είτε με αγωγούς σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς και τέλος αποθηκεύονται εκεί (αφού διασφαλιστεί η ασφάλεια της αποθήκευσης) για πολλά χρόνια, ακόμα και χιλιάδες.



Εικόνα 14: Τρόπος λειτουργίας της τεχνολογίας CCS (Choudhary 2016).

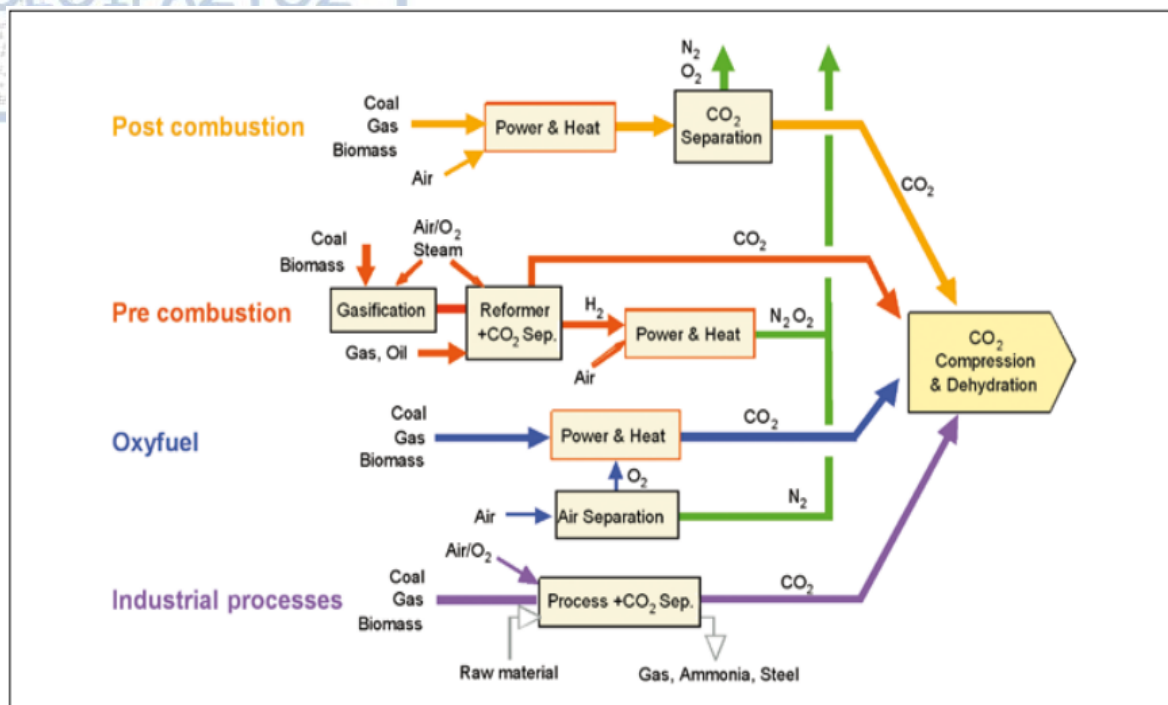
Οπότε θα παρατεθεί αναλυτικά το κάθε στάδιο της διαδικασίας αυτής.

3.2.1. Δέσμευση του CO₂

Για να πραγματοποιηθεί μια εφαρμογή CCS είναι απαραίτητο να δεσμευτεί μια ποσότητα διοξειδίου προς δημιουργία ενός ρεύματος σε ικανοποιητική πίεση ούτως ώστε να μπορεί να μεταφερθεί στο σχηματισμό αποθήκευσης (Ράπτη 2013). Υπάρχουν 4 κατηγορίες δέσμευσης του. Αυτές συνοπτικά είναι οι κάτωθι:

1. Pre – Combustion Capture (Δέσμευση πριν την καύση)
2. Post – Combustion Capture (Δέσμευση μετά την καύση)
3. Oxy – fuel Combustion (Δέσμευση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου)
4. Capture from Industrial Process Streams (Δέσμευση από ροές βιομηχανικών διαδικασιών).

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθενται συνοπτικά όλοι οι τρόποι δέσμευσης του CO₂.



Εικόνα 15: Όλα τα συστήματα δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα (Metz et al 2005).

Το ποιο είδος δέσμευσης θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά σχετίζεται με τους εξής παράγοντες:

- Το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται στη διεργασία (υγρό ή στερεό)
- Τη συγκέντρωση του CO₂ στο προαναφερθέν ρεύμα
- Την πίεση του αέριου ρεύματος

Οπότε, θα γίνει μια πιο εκτενής αναφορά στα συστήματα της δέσμευσης.

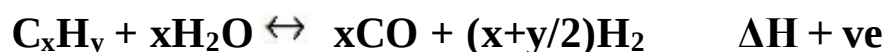
3.2.1.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΤΟΥ CO₂

1. Pre – Combustion Capture

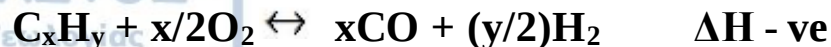
Σε αυτό το είδος δέσμευσης ουσιαστικά, το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα διαχωρίζεται από το βασικό καύσιμο πριν την καύση. Το αρχικό καύσιμο αντιδρά με οξυγόνο ή με αέρα ή με ατμό κι εν συνεχεία παράγεται ένας τύπος αερίου, το Syngas ή Synthesis Gas. Επίσης, το Syngas αναφέρεται κι ως Fuel Gas. Αυτό αποτελείται κυρίως από Υδρογόνο κι από μονοξείδιο του άνθρακα. Επίσης, σε μικρότερες ποσότητες περιέχεται CO₂, καθώς επίσης και μικροποσότητες άλλων αέριων συστατικών, όπως το μεθάνιο (<https://www.energy.gov/fe/science-innovation/carbon-capture-and-storage-research/carbon-capture-rd/pre-combustion-carbon#:~:text=Pre%2Dcombustion%20capture%20refers%20to,presure%20to%20fom%20synthesis%20gas>).

Το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με ατμό σε έναν καταλυτικό αντιδραστήρα (στη διεθνή ορολογία ονομάζεται Shift Converter), προς δημιουργία CO₂ και περισσότερου υδρογόνου. Το CO₂ διαχωρίζεται με μια διαδικασία φυσικής ή χημικής προσρόφησης, παράγοντας έτσι ένα καύσιμο πλούσιο σε υδρογόνο που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, όπως σε κινητήρες ή κυψέλες καυσίμου, ενώ το παραγόμενο CO₂ μπορεί να μεταφερθεί για αποθήκευση. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται αναγράφονται στη συνέχεια.

Το Syngas παράγεται κυρίως με 2 τρόπους. Ο πρώτος είναι η αναμόρφωση αερίων κι ελαφριών υδρογονανθράκων με χρήση ατμού. Η γενική αντίδραση που πραγματοποιείται εντός του αντιδραστήρα (που είναι ενδόθερμη) είναι η κάτωθι:



Ο δεύτερος τρόπος είναι η μερική οξείδωση αερίων κι ελαφριών υδρογονανθράκων. Εδώ αντί για ατμό, εισάγεται οξυγόνο κι η αντίδραση που πραγματοποιείται (που είναι εξώθερμη) είναι η εξής:



Να σημειωθεί εδώ ότι η άνωθεν διεργασία ονομάζεται μερική οξείδωση, όταν τα αρχικά καύσιμα είναι υγρά ή αέρια. Όταν, όμως, είναι στερεά, τότε η διεργασία ονομάζεται εξαερίωση.

Στη συνέχεια, το μονοξείδιο έρχεται σε επαφή με ατμό κι έτσι παράγεται το διοξείδιο του άνθρακα και περισσότερο υδρογόνο. Η κάτωθεν αντίδραση λέγεται Water Gas Shift Reaction.



Η αναμόρφωση κι η οξείδωση αερίων είναι οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για Pre-Combustion Capture.

2. Post – Combustion Capture

Μετά την καύση ορυκτών καυσίμων ή και βιομάζας ακολουθεί η απελευθέρωση των απαερίων ή αλλιώς flue gases στον αέρα. Ως Flue Gas (αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία κι ως Exhaust Gas και Stack Gas) ορίζεται το αέριο που εκπέμπεται από εργοστάσια καύσης και περιέχει τα προϊόντα αντίδρασης του καυσίμου και του αέρα καύσης (combustion air).

Περιέχει ουσίες, όπως σκόνη, μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου (NO_x) κι οξείδια του θείου (SO_x). Επίσης, όταν γίνεται καύση του άνθρακα ή αποβλήτων, το flue gas περιέχει υδροχλώριο (HCl), υδροφθόριο (HF) καθώς και παράγωγα υδρογονανθράκων και βαρέων μετάλλων. Σε πολλές χώρες υπάρχουν αυστηροί περιβαλλοντικοί περιορισμοί όσον αφορά το stack gas, την εκπεμπόμενη σκόνη, το θείο, τα NO_x και το CO . Οι περιορισμοί αυτοί είναι ένα κομμάτι ενός ευρύτερου εθνικού προγράμματος περιβαλλοντικής προστασίας. Έτσι, για να πετύχουν τα κράτη τους στόχους, που τίθενται,

τοποθετούν στα εργοστάσια αυτά συστήματα καθαρισμού των απαερίων, όπως φίλτρα σκόνης και καθαριστικά αερίων (Speight 2019).

Η δέσμευση, λοιπόν, του CO_2 από τα flue gases που παράγονται από την καύση των ορυκτών καυσίμων ή και της βιομάζας ονομάζεται post-combustion capture. Το flue gas αντί για να αφεθεί ελεύθερο στην ατμόσφαιρα, μεταφέρεται σε ειδικό εξοπλισμό προκειμένου να διαχωριστεί το μεγαλύτερο ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα. Το CO_2 μπορεί να μεταφερθεί για αποθήκευση σε κατάλληλο γεωλογικό σχηματισμό, ενώ το εναπομείναν exhaust gas απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Στην συνέχεια, θα γίνει η περιγραφή της διαδικασίας, που ακολουθείται, προκειμένου να διαχωριστεί το CO_2 . Η μέθοδος, που ακολουθείται, είναι κι η μόνη που τεχνολογικά είναι ώριμη, μιας και που παρόλο που έχουν προταθεί κι άλλες λύσεις, αυτές είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης.

3. Oxy-Fuel Combustion

Σε αυτόν τον τύπο παγίδευσης του CO_2 , χρησιμοποιείται καθαρό O_2 πολύ υψηλής καθαρότητας, με το οποίο γίνεται κι η καύση. Το οξυγόνο αυτό, προέρχεται συνήθως από μια τεχνική που ονομάζεται Cryogenic Separation κι ουσιαστικά το διαχωρίζει από τον αέρα σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών. Εκτός, βέβαια, από την άνωθι διεργασία, χρησιμοποιούνται και νέες τεχνικές διαχωρισμού του οξυγόνου, όπως με μεμβράνες και με κύκλους Chemical Looping.

Τα προϊόντα της καύσης (τα απαέρια δηλαδή) περιέχουν CO_2 και νερό. Αν το αρχικό καύσιμο υποστεί καύση με καθαρό οξυγόνο, τότε η θερμοκρασία της φλόγας θα είναι πολύ υψηλή. Όμως, τα flue gases που έχουν υψηλή περιεκτικότητα στα παραπάνω συστατικά, μπορούν να βοηθήσουν στην ψύξη, όταν τεθούν υπό καθεστώς ψύξης στο θάλαμο καύσης.

Το αποτέλεσμα της διεργασίας είναι η εξάλειψη του αζώτου από τα flue gases καίγοντας καύσιμα που περιέχουν άνθρακα. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση καθαρού

οξυγόνου, είτε με τη χρήση ενός μείγματος που περιέχει καθαρό οξυγόνο και απαέρια με υψηλή περιεκτικότητα σε CO₂. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την καύση με καθαρό οξυγόνο, φτάνουν ακόμα και τους 3500°C, θερμοκρασία απαγορευτική για την εύρυθμη λειτουργία του εξοπλισμού των εργοστασίων. Όμως, με τη χρήση είτε ενός τυπικού κυκλικού στρόβιλου, είτε ενός λέβητα που καίει άνθρακα, η θερμοκρασία μειώνεται αισθητά, στους 1300°C-1400°C και στους 1900°C αντίστοιχα.

4. Capture from Industrial Process Streams

Το μεγαλύτερο ποσοστό CO₂ που δεσμεύεται από βιομηχανικές ροές, διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα λόγω έλλειψης κινήτρων για την αποθήκευση του. Εντούτοις, ένα ποσοστό όντως αποθηκεύεται και μάλιστα για σχεδόν 100 χρόνια (Kohl & Nielsen 1997).

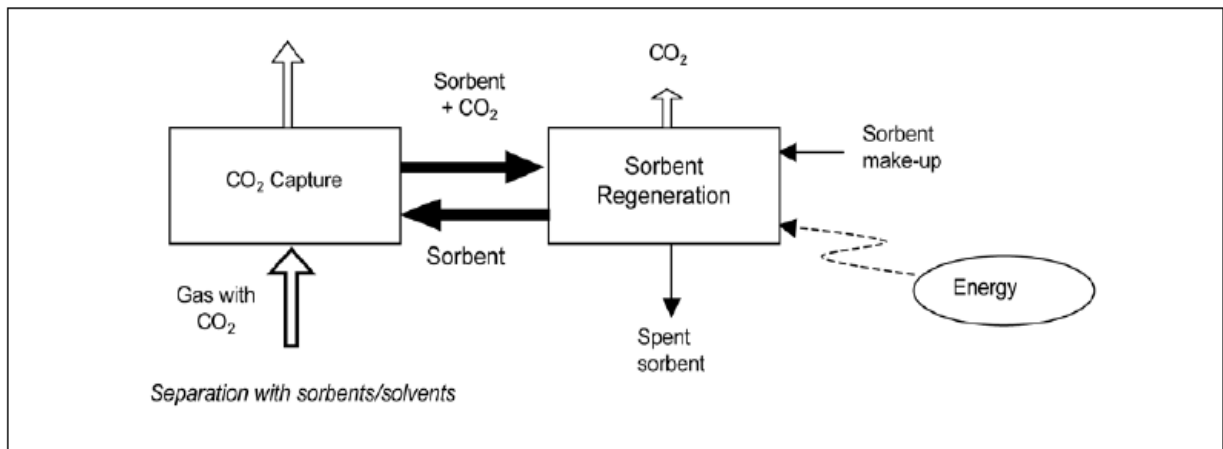
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα δέσμευσης του CO₂ από ροές βιομηχανικών διεργασιών είναι ο καθαρισμός (purification) του φυσικού αερίου προς παραγωγή ενός Syngas που περιέχει υδρογόνο. Έτσι, μπορούν να παρασκευαστούν η αμμωνία, οι αλκοόλες καθώς και συνθετικά υγρά καύσιμα.

Από την άλλη υπάρχουν παραδείγματα ροών όπου δεν πραγματοποιείται δέσμευση του CO₂ αν και θα μπορούσε με όλα τα πιθανά συστήματα που είναι διαθέσιμα. Τέτοια είναι οι ροές στη βιομηχανία παραγωγής χάλυβα, τη βιομηχανία τσιμέντου καθώς και τη βιομηχανία ποτών και τροφών.

3.2.1.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΤΟΥ CO₂

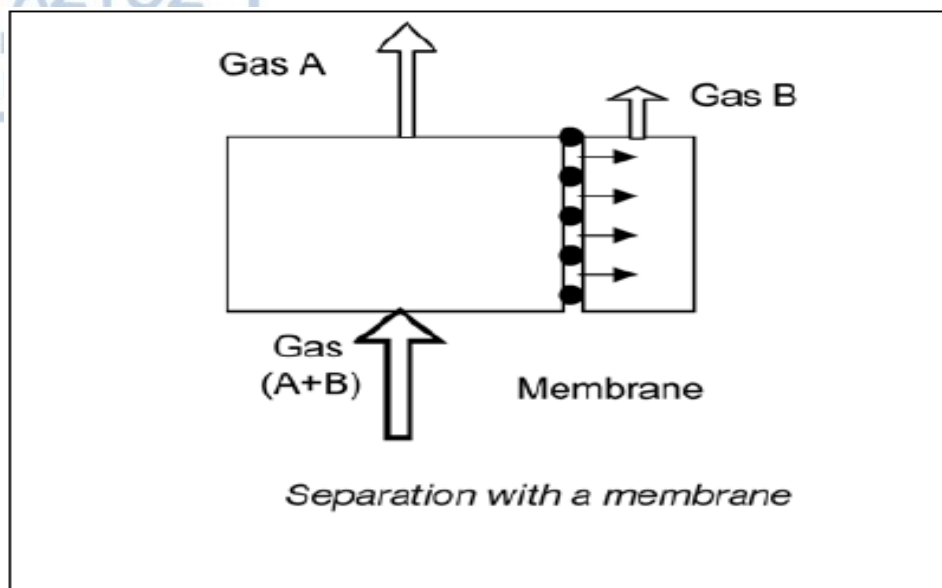
1. Διαχωρισμός με χρήση ροφητικών ουσιών / διαλυτών

Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται, όταν το αέριο, που περιέχει το CO₂, έρχεται σε επαφή με μια υγρή απορροφητική ουσία ή μια στερεή ροφητική ουσία, οι οποίες πρέπει να δύνανται να παγιδεύουν το CO₂. Στην επόμενη εικόνα περιγράφεται σχηματικά η διαδικασία που ακολουθείται.



Εικόνα 16: Διαδικασία διαχωρισμού του CO₂ με χρήση ροφητικών ουσιών/διαλυτών (Metz et al 2005).

Αφού ο διαλύτης ή η ροφητική ουσία έλθει σε επαφή με το αέριο που περιέχει το CO₂, μεταφέρεται σε ένα άλλο δοχείο όπου ουσιαστικά διαχωρίζεται κι απελευθερώνεται το CO₂. Το στάδιο αυτό ονομάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Regeneration. Αυτό πραγματοποιείται με αύξηση της θερμοκρασίας στο δεύτερο δοχείο, πτώση της πίεσης ή με κάποια άλλη κατάλληλη αλλαγή στις ιδιότητες του διαλύτη ή της ροφητικής ουσίας. Μετά το Regeneration, η ουσία επιστρέφει στο πρώτο δοχείο, για να παγιδεύσει περισσότερο CO₂ κι εν συνεχεία επιστρέφει ξανά στο δεύτερο δοχείο. Η διαδικασία που ακολουθείται λοιπόν, είναι κυκλική. Σε περίπτωση που η ουσία μας είναι στερεή, δεν υπάρχει κυκλοφορία ανάμεσα στα δοχεία κι έτσι η διαδικασία πραγματοποιείται μέσα στο δοχείο όπου ήταν προηγουμένως η ουσία.

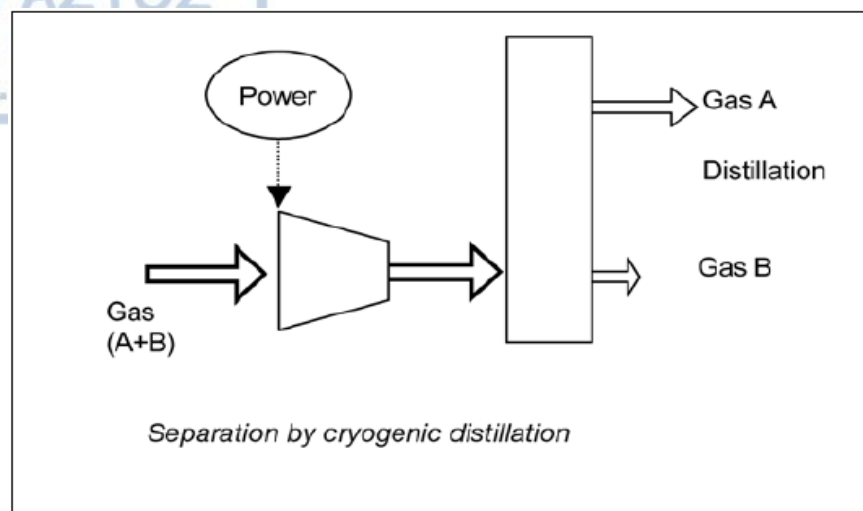


Εικόνα 17: Διαχωρισμός αερίων (πιθανώς και CO₂ μελλοντικά) με χρήση μεμβρανών (Metz et al 2005).

3. Διαχωρισμός με χρήση κρυογονικής απόσταξης (Cryogenic Distillation)

Μια ακόμη μέθοδος διαχωρισμού του CO₂ είναι ο διαχωρισμός με χρήση κρυογονικής απόσταξης (στη διεθνή ορολογία Distillation of a liquefied gas stream and refrigerated separation). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαχωρισμό ακαθαρσιών από ροές πλούσιες σε CO₂. Επίσης, είναι δυνατή η χρήση της στην Oxy-Fuel Combustion, στην Pre-Combustion Capture, καθώς και στην απομάκρυνση του CO₂ από το φυσικό αέριο κι ακόμα, από το Syngas.

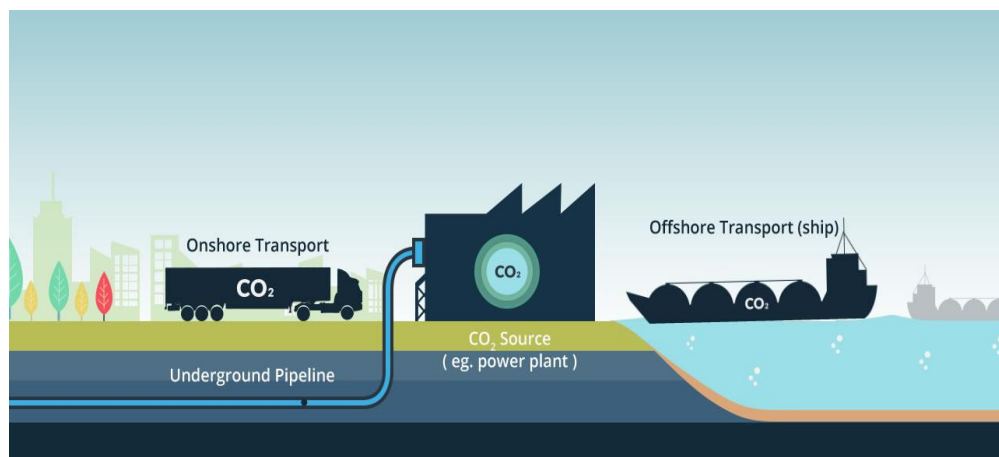
Ένα αέριο μετατρέπεται σε υγρό με αλλαγή των ιδιοτήτων του, όπως είναι η αλλαγή στην πίεσή του ή/και στη θερμοκρασία του. Εν συνεχεία, υγρό πλέον, τα αέρια συστατικά με τη χρήση μίας στήλης απόσταξης διαχωρίζονται. Επί παραδείγματι, μπορεί να διαχωριστεί το οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα κι έπειτα να χρησιμοποιηθεί σε κάποιο από τα συστήματα δέσμευσης του CO₂. Μάλιστα, ήδη πραγματοποιείται η εν λόγω διεργασία εμπορικά. Στην παρακάτω εικόνα περιγράφεται σχηματικά η διαδικασία που ακολουθείται.



Εικόνα 18: Διαχωρισμός με χρήση της Cryogenic Distillation (Metz et al 2005).

3.2.2 Μεταφορά του CO₂

Μετά την παγίδευση του CO₂, το επόμενο στάδιο σε μια εφαρμογή CCS είναι η μεταφορά του. Είναι το στάδιο που ουσιαστικά συνδέει την πηγή από την οποία παρήχθη το CO₂ με τους γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι είναι κατάλληλοι για να το αποθηκεύσουν. Είναι αναγκαίο να είναι αποτελεσματικό, ασφαλές και φυσικά οικονομικό. Η μεταφορά του CO₂, διέπεται από ένα κανονιστικό πλαίσιο, το οποίο δίνει ιδιαίτερη σημασία στην ασφάλεια των πολιτών. Παγκοσμίως, εφαρμόζονται 3 τρόποι μεταφοράς: με αγωγούς, μέσω ειδικών πλοίων και μέσω βυτίων.



Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση όλων των τρόπων μεταφοράς του CO₂
(<https://co2degrees.com/sites/default/files/downloads/CO2%20Transport.jpg>)

Είναι σημαντικό να ειπωθεί, πως το CO₂ κατά τη μεταφορά του, συνήθως, βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση, αν και δύναται να μεταφερθεί και στη στερεά κατάσταση, ως dry ice. Επίσης, μεταφέρεται υπό αυξημένη πίεση, καθότι, αν μεταφερόταν σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, ο όγκος του θα ήταν δραματικά μεγαλύτερος, κάτι που θα είχε αντίκτυπο κυρίως στη μεταφορά του, αλλά και στο μέγεθος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας του. Εκτός της αύξησης της πίεσης, υπάρχει επίσης κι η επιλογή της υγροποίησης του, κατά τα πρότυπα υγροποίησης του LNG (Liquified Natural Gas) και του LPG (Liquified Petroleum Gas). Ακόμη, ο όγκος μειώνεται και με τη στερεοποίηση, αν και πρόκειται για μια μέθοδο δαπανηρή, λόγω των αυξημένων ποσοτήτων ενέργειας που απαιτεί.

3.2.2.1 Μεταφορά μέσω αγωγών – Pipeline Transportation

Σε περιπτώσεις όπου το CO₂ πρέπει να μεταφερθεί καλύπτοντας μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιούνται αγωγοί οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες. Αυτό γενικά ισχύει όχι μόνο για το CO₂, αλλά και για το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και το νερό και φυσικά οι αποστάσεις που καλύπτονται, φτάνουν ακόμα και χιλιάδες χιλιόμετρα, είτε πρόκειται για onshore είτε για offshore αγωγούς. Οι αγωγοί μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε (από κατοικημένες περιοχές έως και σε ερήμους) και φτάνουν σε βάθος άνω των 2000 μέτρων.

Φυσικά, δεν πρόκειται για νέα τεχνολογία, καθώς εφαρμόζεται για πολλά χρόνια. Το CO₂ μπορεί, όπως ειπώθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, να αποθηκευτεί ή να χρησιμοποιηθεί για EOR, ως τριτογενής μέθοδος ανάκτησης του πετρελαίου. Έτσι, μπορεί να φτάσουμε σε ποσοστά ανάκτησης ακόμα και στο 80%. Στις Η.Π.Α οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται για EOR φτάνουν σε συνολικό μήκος τα 5000 km και χωρίς προβλήματα στη λειτουργία τους (Cole et al 2011). Το πιο συνηθισμένο πρόβλημα που θα μπορούσε να προκύψει σε έναν τέτοιο αγωγό είναι η διάβρωση. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, η ροή του CO₂ πρέπει να ξηραίνεται και να απομακρύνεται το H₂S, ουσία υπεύθυνη για τη διάβρωση των αγωγών. Όταν ξηραίνεται το CO₂, δεν είναι σε θέση να

διαβρώσει τους χάλυβες που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του. Να σημειωθεί πως οι χάλυβες αυτοί είναι συνήθως κράματα σιδήρου-μαγγανίου (Fe-Mn). Μια ακόμη παράμετρος είναι κι η σχετική υγρασία η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει το 60% (Rogers & Mayhew 1980) και φυσικά αυτό ισχύει ακόμα και στην περίπτωση ύπαρξης ποσοτήτων NO_x , SO_x και N_2 .

Κρίνεται ιδιαίτερος σημαντική η σωστή σχεδίαση τέτοιων αγωγών, ειδικά όταν διέρχονται κατοικημένες περιοχές. Δηλαδή, πρέπει να αντέχουν στις υπερπτήσεις, καθώς και να υπάρχει ένα σύστημα παρακολούθησης ενδεχόμενων διαρροών του CO_2 . Η φιλοσοφία της σχεδίασης δεν είναι πολύ διαφορετική από την αντίστοιχη αγωγών που προορίζονται να μεταφέρουν LNG και LPG.



Εικόνα 20: Αγωγός μεταφοράς CO_2 στο Wyoming των Η.Π.Α (<https://www.club-co2.fr/en/content/co2-transport>).

3.2.2.1.1. Σχεδιασμός των αγωγών - Design

Αρχικά, πρέπει να καθοριστούν όλοι οι παράγοντες που έχουν σχέση με την κοινωνία, το περιβάλλον κι επίσης το Design των αγωγών έτσι ώστε να είναι κατάλληλοι για κάθε τύπο υπεδάφους. Πρέπει να καθοριστεί η διαδρομή που θα ακολουθήσει ο αγωγός

(άρα και το μήκος του) και φυσικά τα υλικά κατασκευής του έτσι ώστε να υπάρχει μια πρόωμη εκτίμηση του κόστους. Εν συνεχεία, πρέπει να καθοριστούν η διάμετρος των αγωγών καθώς κι οι πιέσεις στις οποίες αυτοί θα λειτουργούν. Όχι μόνο αυτό, αλλά επίσης τα υλικά κατασκευής (το κράμα του χάλυβα δηλαδή) που θα χρησιμοποιηθούν είναι πρωτεύουσας σημασίας προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωση. Ακόμη, πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή των υπόλοιπων μηχανικών μερών ενός τέτοιου συστήματος, όπως είναι οι βαλβίδες, οι αντλίες κι οι υπερσυμπιεστές.

Φυσικά η τοπογραφία της διαδρομής που θα ακολουθήσει ο αγωγός είναι ένας ακόμα παράγοντας βαρύνουσας σημασίας. Υπάρχουν μεγάλες προκλήσεις στον τομέα αυτόν, καθώς ένας onshore αγωγός μπορεί να διέρχεται από βουνά, από ερήμους ή και ποταμούς. Στους offshore αγωγούς το πρόβλημα έγκειται στο βάθος της υδάτινης στήλης κι επίσης στην ανομοιομορφία του πυθμένα της θάλασσας. Επιπροσθέτως, και στις δύο περιπτώσεις είναι σημαντικό να καθοριστεί και το είδος του εδάφους καθώς και των υποκείμενων γεωλογικών στρωμάτων. Οι γεωτεχνικές μελέτες, λοιπόν, είναι απαραίτητες. Και φυσικά οι τελευταίες δεν περιορίζονται εκεί, καθώς πρέπει, προ κατασκευής, να συλλεχθούν δεδομένα για την μέση θερμοκρασία (ιδιαίτερα σημαντικό κατά την περίοδο της λειτουργίας), το αν υπάρχουν πλαγιές με μεγάλη κλίση, την πιθανότητα παγετού αλλά και τη σεισμική δραστηριότητα (για την περίοδο της κατασκευής).

Επίσης, σε offshore κατασκευές, εκτός από το βάθος της υδάτινης στήλης, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν τα διάφορα θαλάσσια ρεύματα, η ύπαρξη ή όχι του Permafrost, (δηλαδή του μόνιμα παγωμένου υπεδάφους), η χλωρίδα κι η πανίδα της περιοχής, οι υδροφόροι ορίζοντες και διάφοροι άλλοι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, όπως επί παραδείγματι τα προστατευμένα βάσει διεθνών συνθηκών περιβάλλοντα (π.χ περιοχές Natura).

Το πολυεπίπεδο πλάνο για τον σχεδιασμό των αγωγών φυσικά δεν σταματάει εδώ. Πρέπει να καθοριστεί το αν ο προς μελέτη αγωγός είναι κατάλληλος για να συνυπάρξει με ήδη υπάρχουσες υποδομές, όπως δρόμους, σιδηρόδρομους, ένα ήδη υπάρχον δίκτυο αγωγών καθώς και να μην έρχεται σε σύγκρουση με στρατιωτικούς περιορισμούς που ισχύουν για μια συγκεκριμένη περιοχή. Είναι σημαντικό, επίσης, να μην αποτελέσει εμπόδιο σε άλλες δραστηριότητες και να συμμορφώνεται με αλιευτικούς κανονισμούς και

σε δρομολόγια πλοίων για παράδειγμα. Και φυσικά αφού όλες οι παραπάνω προϋποθέσεις ικανοποιηθούν, πρέπει να διασφαλιστεί η ασφάλεια των αγωγών.

Η ασφάλεια είναι προτεραιότητα μιας τέτοιας κατασκευής. Κυρίως σχετίζεται με την αποτροπή της διάβρωσης του αγωγού αλλά και με άλλους παράγοντες. Το CO_2 , γενικά, δεν είναι ικανό να προκαλέσει έκρηξη ή ανάφλεξη. Εντούτοις, η παρουσία προσμίξεων όπως είναι το H_2S και το SO_2 , αυξάνει την πιθανότητα διαρροής του αγωγού έπειτα από διάβρωση, καταστροφή ή και αστοχία των βαλβίδων του αγωγού.

Έτσι, κρίνεται απαραίτητη η παρουσία ενός συστήματος monitoring για τους αγωγούς κι όλα τα εξαρτήματα τους, προκειμένου να είναι εφικτή η πρόληψη ενός ατυχήματος. Από τη διεθνή εμπειρία, πάντως, δεν υπήρξε ποτέ κάποιος τραυματισμός που να οφειλόταν σε αγωγό μεταφοράς CO_2 . Ακόμη, αυτοί οι αγωγοί παρουσιάζουν λιγότερες διαρροές σε σχέση με άλλους που είναι επιφορτισμένοι με τη μεταφορά φυσικού αερίου.

3.2.2.1.2. Παρακολούθηση της αποθηκευτικής δομής – Monitoring

Το monitoring είναι απαραίτητο σε μια εφαρμογή CCS. Επίσης, εφαρμόζεται σε παραπάνω από μια θέσεις της αποθηκευτικής δομής.

Είναι πρωτίστης σημασίας να παρακολουθείται ο θύσανος του CO_2 (δηλαδή η χωρική κατανομή του supercritical CO_2 μέσα στις ενότητες των πετρωμάτων). Με τη συνεχή του παρακολούθηση μπορούμε να ελέγχουμε τα διάφορα σχετικά λογισμικά για την ακρίβεια τους στο να προβλέψουν τη μελλοντική κατανομή του CO_2 στην προς αποθήκευση θέση. Πολύ σημαντική είναι η παρακολούθηση των Cap Rocks, ως προς την ακεραιότητα τους, καθότι, ελλείψει αυτής, το CO_2 (λόγω του ότι είναι αέριο) είναι πιθανό να μεταναστεύσει προς την επιφάνεια. Εάν παρόλα αυτά, συμβεί η μετανάστευση, τότε είναι απαραίτητη η παρακολούθηση των υπερκείμενων στρωμάτων. Εάν υπάρξει διαρροή του CO_2 προς την επιφάνεια, τότε με χρήση κατάλληλων τεχνικών, όπως της τηλεπισκόπησης και διάφορων γεωχημικών μεθόδων, μετρίεται η συγκέντρωση του CO_2 στην ατμόσφαιρα, το θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά κι η κατανομή του στο έδαφος. Σημαντική κρίνεται η παρακολούθηση της ακεραιότητας της ίδιας της γεώτρησης, διότι οι γεωτρήσεις κι ειδικά αυτές που γίνονται σε μεγάλα βάθη, μπορούν να προκαλέσουν

διαφυγή του CO₂. Ακόμη, πέραν της δεδομένης μέτρησης της ποσότητας του εγχέομενου CO₂ στη κεφαλή της γεώτρησης, πρέπει να ποσοτικοποιηθεί η ίδια ποσότητα εντός του σχηματισμού, μια διαδικασία που δεν είναι εύκολη. Αν δε, συμβεί κάποια διαρροή, τότε πρέπει η διαρρέουσα ποσότητα να συμπεριληφθεί στους ρύπους του θερμοκηπίου του εκάστοτε κράτους. Τέλος, επειδή λόγω της έγχυσης του CO₂, αυξάνεται η πίεση του σχηματισμού, υπάρχει το ενδεχόμενο της εμφάνισης ενός ειδικού φαινομένου, της μικροσεισμικότητας. Έτσι προκαλείται μια μικρή εδαφική μετατόπιση (σε σπάνιες περιπτώσεις βέβαια). Οπότε, είναι σημαντικό να παρατηρούνται όποιες τέτοιες πιθανές μετατοπίσεις, ακόμα και πολύ μικρής κλίμακας κι αυτό καθίσταται εφικτό με παρατήρηση από αεροπλάνα και δορυφόρους (Μπριντάκης, 2016).

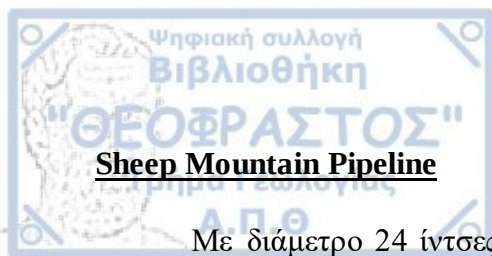
3.2.2.1.3. Παραδείγματα από τον διεθνή χώρο

Canyon Reef

Πρόκειται για τον πρώτο αγωγό με μεγάλη μεταφορική ικανότητα. Κατασκευάστηκε το 1970, στο Texas των Η.Π.Α. Ο αγωγός έχει διάμετρο 16 ίντσες (https://www.kindermorgan.com/pages/business/co2/pipelines/transport_canyon_reef.aspx), μήκος 352 km και μπορεί να μεταφέρει 12.000 τόνους CO₂ ημερησίως (δηλαδή 4,4 Mt ανά έτος). Αυτό το ανθρωπογενώς παραγόμενο CO₂ παράγεται από εργοστάσια επεξεργασίας αερίου της Shell. Τέλος, ο αγωγός ανήκει στην Αμερικάνικη εταιρία Kinder Morgan.

Bravo Dome Pipeline

Το Bravo Dome unit καλύπτει μια έκταση 1.400 τετραγωνικών μιλίων (https://www.kindermorgan.com/pages/business/co2/supply/supply_bravo.aspx). Ο αγωγός έχει διάμετρο 20 ίντσες, φέρουσα ικανότητα 7,3 Mt CO₂ ετησίως και ανήκει στην BP.



Με διάμετρο 24 ίντσες και μήκος 772 km, ο αγωγός Sheep Mountain έχει την ικανότητα να μεταφέρει 9,2 Mt CO₂ ετησίως κι ανήκει στην Kinder Morgan.

Υπάρχουν κι άλλα παραδείγματα από τις Η.Π.Α αλλά κι άλλες χώρες. Αγωγοί όπως ο Cortez, ο Val Verde κι ο Weyburn είναι κάποια από τα παραδείγματα αυτά και να σημειωθεί πως όλοι αυτοί είναι αγωγοί μεγάλου μήκους. Τέλος, άξιο αναφοράς είναι ότι υπάρχει ένας αγωγός μεγάλου μήκους στη γειτονική μας Τουρκία, ο Bati Raman. Βρίσκεται στα Ν.Α της χώρας κι έχει μήκος 90 km με φέρουσα ικανότητα 1,1 Mt CO₂ ανά έτος.

3.2.2.2. Μεταφορά μέσω πλοίων – Marine Transportation System

Εκτός από την μεταφορά του CO₂ μέσω αγωγών, υπάρχει κι η θαλάσσια μεταφορά του μέσω ειδικά κατασκευασμένων τάνκερ για αυτόν τον σκοπό. Αυτό το είδος της μεταφοράς είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο· για την ακρίβεια μόνο λίγα μικρά πλοία μεταφέρουν το CO₂ από την πηγή (όπως εργοστάσια) στο σημείο όπου θα αποθηκευτεί.

Υπάρχουν 3 τύποι τέτοιων πλοίων, βάσει των συνθηκών που επικρατούν στον αποθηκευτικό τους χώρο για το CO₂. Όλοι τους μεταφέρουν το CO₂ σε υγρή μορφή. Είναι τα πλοία που λειτουργούν υπό πίεση, τα πλοία που λειτουργούν υπό χαμηλή θερμοκρασία και τέλος τα semi-refrigerated πλοία.

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά την κατασκευή τέτοιων πλοίων είναι παρόμοια με αυτή των πλοίων που μεταφέρουν LNG και CNG. Για την ακρίβεια δύνανται να κατασκευαστούν από τα ίδια ναυπηγεία και μάλιστα στον ίδιο χρόνο, 1 με 2 χρόνια, κάτι που εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου. Επειδή, λοιπόν, οι ομοιότητες είναι πολλές, η φέρουσα ικανότητα των πλοίων για μεταφορά CO₂ μπορεί να φτάσει ακόμα και τους 230kt.



Εικόνα 21: Το δεξαμενόπλοιο Gijon Knutsen. (<http://www.tradenewswire.net/norway-examines-feasibility-of-co2-shipping/>)

3.2.3 Γεωλογική αποθήκευση του CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ο κύριος ανθρωπογενής ρύπος-παράγοντας του φαινομένου του θερμοκηπίου, δηλαδή της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Baines & Worden 2004). Ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου αυτού, είναι ο περιορισμός των ρύπων αυτών στην ατμόσφαιρα και φυσικά η αποθήκευση του CO₂ σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, κατάλληλους για αυτόν το σκοπό. Είναι μια τεχνολογία που πέρα από την αρτιότητα της, συμβάλλει τα μέγιστα στο σκοπό αυτό. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δύνανται να κρατήσουν αποθηκευμένο το CO₂ για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμα και για γεωλογικό χρόνο, είναι οι παρακάτω:

- ❖ Εξαντλημένα reservoirs φυσικού αερίου και πετρελαίου
- ❖ Υδροφόροι ορίζοντες
- ❖ Ανεκμετάλλευτες φλέβες γαιάνθρακα

Η αλλαγή του κλίματος είναι ήδη αποδεκτή από την πλειοψηφία της επιστημονικής κοινότητας, η οποία κρούει τον κώδωνα του κινδύνου χρόνια τώρα. Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (International Panel on Climate Change – IPCC) ο

κίνδυνος είναι υπαρκτός κι οι επιπτώσεις του πρέπει να μετριάστούν. Κι αυτό είναι απόλυτα λογικό, αν αναλογιστεί κανείς ότι η μέση θερμοκρασία της γης αυξήθηκε κατά 0,6 °C μέσα στον 20^ο αιώνα (Hulme & Jenkins 1998).

Το CO₂ αντιπροσωπεύει το 62.5% επί τη συνολική ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται σε παγκόσμιο επίπεδο (IPCC 1995). Οπότε, είναι επιβεβλημένη η απομάκρυνσή του κι η υπόγεια αποθήκευση του σε μεγάλες ποσότητες.

Εκτός από αυτόν τον λόγο, γίνεται υπόγεια αποθήκευση και για να επιτευχθεί η Enhanced Oil Recovery (EOR). Η τεχνική αυτή ανήκει στις μεθόδους τριτογενούς ανάκτησης του πετρελαίου.

Στη συνέχεια, λοιπόν, θα αναλυθούν οι κατηγορίες των κατάλληλων σχηματισμών.

3.2.3.1 Αλατώδεις υδροφόροι ορίζοντες

Οι υδροφόροι ορίζοντες, είναι ιζηματογενή πετρώματα, που, όπως ειπώθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, είναι πορώδεις και διαπερατοί σχηματισμοί, οι οποίοι λειτουργούν ως reservoirs νερού. Εντοπίζονται σε μεγάλο βάθος και βρίσκονται σε αφθονία στη φύση.

Οι σχηματισμοί αυτοί, παρόλο που περιέχουν μεγάλες ποσότητες νερού, αυτό δεν είναι σε καμία περίπτωση πόσιμο. Το δυναμικό αποθήκευσης ενός υδροφόρου ορίζοντα είναι πραγματικά τεράστιο (Holloway 1997, Gunter et al 1998). Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπολογίζεται πως οι ποσότητες CO₂ που μπορούν να αποθηκευτούν σε υδροφόρους ορίζοντες είναι ανάμεσα στο 20% - 500% των ποσοτήτων CO₂ που θα εκπεμφθούν έως το 2050 (Davidson et al 2001).

Μόνο στις Η.Π.Α, υπολογίζεται, σύμφωνα με έρευνες, ότι υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης (στους εν λόγω γεωλογικούς σχηματισμούς) για πάνω από 1.600 Gt CO₂ (Wright et al 2012). Μάλιστα, το νούμερο αυτό ανεβαίνει έως τους 20.000 Gt στο πιο αισιόδοξο σενάριο (η συνολική χωρητικότητα δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί ακριβώς ή

έστω με σφάλμα, οπότε γίνονται τέτοιου είδους εκτιμήσεις· ειδικά όταν μιλάμε για τέτοια γιγαντιαία νούμερα). Αυτό σημαίνει ότι με τους ρύπους που παράγουν οι Η.Π.Α (περίπου 3 Gt ανά χρόνο – εκπομπές 2011) έχουν τη δυνατότητα για τα επόμενα 530-6660 χρόνια να εφαρμόζουν αυτή τη πρακτική με μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (σε όρους CO₂).

Στο Η.Β οι εκτιμήσεις δείχνουν συνολικό αποθηκευτικό δυναμικό 78 Gt για αποθήκευση CO₂ κι οι υδροφόροι ορίζοντες έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτή τη μεγάλη αποθηκευτική δυνατότητα (Bentham et al 2014).

Οι υδροφόροι, όπως επίσης κι οι άλλοι σχηματισμοί, πρέπει να ικανοποιούν κάποια κριτήρια προκειμένου να αξιολογηθούν ως κατάλληλοι προς αποθήκευση του CO₂ (Celia et al 2015). Αυτά είναι τα εξής:

- i. Χωρητικότητα (Capacity)
- ii. Εισπνεσιμότητα (Injectivity)
- iii. Συγκράτηση (Containment)

Φυσικά, όσον αφορά τη χωρητικότητα, δεν τίθεται ερώτημα για τους υδροφόρους καθότι έχουν πολύ μεγάλη αποθηκευτική δυνατότητα. Όσον αφορά την εισπνεσιμότητα, δηλαδή την ικανότητα του σχηματισμού να δέχεται τις προς αποθήκευση ποσότητες CO₂ σε συγκεκριμένο (κι επιθυμητό) ρυθμό, σημαντικό ρόλο παίζει η διαπερατότητα του σχηματισμού. Κάτι όμως που δεν αποτελεί πρόβλημα για τους υδροφόρους, γιατί ως ιζηματογενείς σχηματισμοί έχουν καλές τιμές των πετροφυσικών τους ιδιοτήτων (δεν πρόκειται δηλαδή για κρυσταλλικά ή μεταμορφωμένα πετρώματα που έχουν χαμηλή διαπερατότητα και πορώδες).

Η συγκράτηση του CO₂ εντός του σχηματισμού έγκειται κυρίως στην ύπαρξη ενός cap rock, τόσο για τους υδροφόρους όσο και για τα εξαντλημένα reservoirs. Κι αυτό επειδή το CO₂ μετακινείται εντός του σχηματισμού πολύ εύκολα κι έχει τάσεις άνωσης. Οπότε, ένα πέτρωμα-κάλυμμα είναι απαραίτητο για τη διατήρηση του CO₂ εντός του σχηματισμού. Το πέτρωμα αυτό πρέπει να μην έχει ρηγματωθεί ή/και να μην έχει διαρραγεί τουλάχιστον σε τέτοιο βαθμό που να μπορεί το CO₂ να διαφύγει.



Εικόνα 22: Υδροφόροι ορίζοντες (με μπλε χρώμα) στη Β.Αμερική (Wright et al 2012).

3.2.3.2 Εξαντλημένα reservoirs πετρελαίου και φυσικού αερίου

Πρόκειται για σχηματισμούς που μπορούν να αποθηκεύσουν εντός τους το CO_2 , όπως και το φυσικό αέριο. Φυσικά, όσον αφορά τις πετροφυσικές τους ιδιότητες, αυτές έχουν ήδη αξιολογηθεί κατά το στάδιο των ερευνών για την εκμετάλλευση των υδρογονανθράκων. Ακόμη, η δομή παγίδευσης είναι ικανή να αποθηκεύσει και να διατηρήσει το CO_2 εντός ακόμα και για γεωλογικό χρόνο, κάτι που είναι δεδομένο (κι αποδεδειγμένο κατόπιν ερευνών) καθότι ήταν ικανή να διατηρήσει τις ποσότητες των υδρογονανθράκων για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα με ασφάλεια και χωρίς διαρροές, χάρη στην ύπαρξη ενός αδιαπέρατου seal rock.

Ακόμη, το CO_2 μπορεί να εγχυθεί εντός του ταμειυτήρα, για εφαρμογές EOR (Baines & Worden 2004). Για την ακρίβεια περίπου 32 Mt CO_2 εγχέονται για τέτοιου είδους εφαρμογές ετησίως και μόνο στις Η.Π.Α. Οπότε, μια εφαρμογή εισπίεσης CO_2 είναι σε θέση να αποδώσει κέρδος, συγκεκριμένα ποσότητες πετρελαίου και φυσικού αερίου που θα ήταν αδύνατο να ορυχθούν. Επιπροσθέτως, ένας ακόμη τρόπος που μπορεί το CO_2

να αποφέρει κέρδος είναι κατά την εισπίεσή του κατά τη γεώτρηση προκειμένου να συμβάλλει στη διατήρηση πίεσης του σχηματισμού.

Το δυναμικό αποθήκευσης των ταμιευτήρων είναι μεγάλο, αλλά ακόμα δεν πραγματοποιήθηκαν έρευνες σε παγκόσμιο επίπεδο, έτσι ώστε να υπάρξει μια ικανοποιητική εκτίμηση. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει δυνατότητα για αποθήκευση CO₂ εντός των reservoirs για πολλά χρόνια. Σε πρόσφατη έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τον Καναδά και τις Η.Π.Α (Moghanloo et al 2017), έγινε η εκτίμηση για τουλάχιστον 1,85 τρισεκατομμύριο τόνους αποθηκευτική ικανότητα, που μάλιστα στο πιο αισιόδοξο σενάριο, η εκτίμηση είναι 20,5 τρις τόνοι.

Είναι σαφές πως (σε περίπτωση που επαληθευτούν αυτά τα γιγαντιαία νούμερα) ουσιαστικά, υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης του ανθρωπογενούς αυτού ρύπου στους εν λόγω σχηματισμούς για πολλούς αιώνες, βάσει των σημερινών εκπομπών CO₂.

3.2.3.3 Ανεκμετάλλευτες φλέβες γαιάνθρακα

Πρόκειται για σχηματισμούς, οι οποίοι είναι αρκετά ρωγματωμένοι από τη φύση τους κι έτσι καθίστανται περατοί (Ράπτη 2013). Ένας μεγάλος αριθμός μικροπόρων υπάρχει ανάμεσα στις ρωγματώσεις αυτές. Έτσι, η μήτρα του πετρώματος είναι σε θέση να προσροφήσει μόρια αερίων που βρίσκονται μέσα στον κενό χώρο. Υπάρχει μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα στους μικροπόρους, που στην περίπτωση του CH₄ μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 25m³ ανά τόνο γαιάνθρακα. Όμως, το CO₂ προσροφάται ακόμα πιο εύκολα από το μεθάνιο κι η ογκομετρική αναλογία διαφέρει ανάλογα με το είδος του γαιάνθρακα. Σε ώριμους γαιάνθρακες, όπως είναι ο ανθρακίτης, η αναλογία CO₂ : CH₄ φτάνει το 1:1, ενώ σε νεότερους γαιάνθρακες, όπως τον λιγνίτη, μπορεί να ξεπεράσει το 10:1.

Έτσι, το CO₂ μπορεί να αποθηκευτεί με τρεις τρόπους στις φλέβες γαιάνθρακα (Ibrahim & Nasr-El-Din 2015):

- i. Ως ελεύθερο αέριο στους πόρους ή στις ρωγματώσεις του πετρώματος
- ii. Προσροφημένο από την οργανική επιφάνεια του γαιάνθρακα
- iii. Και τέλος διαλυμένο στα υπόγεια ύδατα του γαιάνθρακα

Εκτός από την αποθήκευση του CO₂, είναι επίσης δυνατή η αύξηση της αποληψιμότητας του μεθανίου από τον γαιάνθρακα, μια διαδικασία που ονομάζεται ECBM (Enhanced Coal Bed Methane recovery). Η διαδικασία ECBM, ουσιαστικά είναι αντίστοιχη της EOR, αλλά για φλέβες γαιάνθρακα, όπου το CO₂ που εισπνέζεται εντός του σχηματισμού, φέρνει προς την επιφάνεια το φυσικό αέριο αντί του άνθρακα (<https://www.e-education.psu.edu/earth104/node/705>).

3.2.3.4. Άλλοι πιθανοί σχηματισμοί για αποθήκευση CO₂

Πρόκειται για 4 κατηγορίες σχηματισμών:

- Βασάλτες
- Shales πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Εγκαταλελειμμένα ορυχεία
- Σπηλαιώσεις άλατος

Προς το παρόν, αυτοί οι σχηματισμοί δεν έχουν αποδείξει (ακόμα) ότι είναι κατάλληλοι για αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα. Κι αυτό, καθότι στην περίπτωση των βασαλτών που βρίσκονται σε αφθονία στη φύση (Mcgrail et al 2003), δεν έχουμε καλές τιμές των πετροφυσικών ιδιοτήτων (υπάρχει δηλαδή χαμηλό πορώδες και χαμηλή διαπερατότητα). Καλές τιμές διαπερατότητας μπορούν να συνδεθούν με ρωγματώσεις στο πέτρωμα, κάτι, όμως, που συνδέεται επίσης και με την διαφυγή του CO₂. Παρόλα αυτά, το mineral trapping ίσως να καθίσταται δυνατό, αφού το εισπνιζόμενο CO₂ μπορεί να αντιδράσει με τα πυριτικά ορυκτά του βασάλτη προς δημιουργία ανθρακικών ορυκτών.

Οι σχίστες είναι μια άλλη τέτοια κατηγορία πετρωμάτων. Ωστόσο, το γεγονός ότι έχει διεξαχθεί ελάχιστη έρευνα όσον αφορά την αποθηκευτική τους ικανότητα, δεν τους

καθιστά προς το παρόν μια αξιόλογη εναλλακτική. Το ενθαρρυντικό γεγονός, όμως, είναι ότι βρίσκονται σε αφθονία στη φύση κι ακόμη ότι έχουν παρόμοιο μηχανισμό παγίδευσης με τους γαιάνθρακες.

Τα ορυχεία πρέπει να έχουν ικανοποιητική στεγανοποίηση των πετρωμάτων τους προκειμένου να καταστούν κατάλληλα για αποθήκευση του CO₂. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα αλάτια και το ανθρακικό κάλιο. Το πλεονέκτημα των ανθρακορυχείων είναι ότι μπορούν να προσροφήσουν τον εναπομείναντα άνθρακα (Piessens & Dusar 2004). Το πρόβλημα έγκειται στα υπερκείμενα στρώματα που παρουσιάζουν πολλές ρωγματώσεις αυξάνοντας τις πιθανότητες για διαρροή του CO₂. Από την άλλη, ρωγματωμένα πετρώματα, όπως τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα, είναι ακατάλληλα για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Στην περίπτωση της αποθήκευσης CO₂ εντός των σπηλαιώσεων άλατος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ίδια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου και πετρελαιοειδών σε δόμους άλατος και ενστρώσεις αλάτων, κάτι που ήδη πραγματοποιήθηκε στον δυτικό Καναδά και στον κόλπο του Μεξικό. Πλεονέκτημα της εφαρμογής αποθήκευσης CO₂ σε τέτοιου είδους σχηματισμούς είναι η υψηλή εισπιδεσιμότητα κι επίσης η μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα ανά μονάδα όγκου. Όμως, οι σπηλαιώσεις έχουν σχετικά μικρό όγκο (άρα και περιορισμένη αποθηκευτική ικανότητα) κι επίσης σε περίπτωση αστοχίας του συστήματος λειτουργίας της αποθηκευτικής δομής υπάρχει ο κίνδυνος για διαρροή του CO₂. Ακόμη, μπορούν να προκύψουν περιβαλλοντικά προβλήματα με την απόθεση αλατόνερου.

3.3. CO₂ – Υπερκρίσιμη (Supercritical) κατάσταση της ύλης

Είναι σκόπιμο να αναφερθεί η κατάσταση της ύλης όπου βρίσκεται το CO₂ εντός των σχηματισμών που ενδείκνυνται για αποθήκευση. Το CO₂ σε βάθη μεγαλύτερα των 800m συνήθως βρίσκεται στη λεγόμενη υπερκρίσιμη κατάσταση της ύλης (Metz et al 2005). Και συνήθως, καθότι μπορεί, αναλόγως της λεκάνης, να είναι ακόμα κι υγρό. Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες η διανομή της πίεσης σε μια λεκάνη είναι υδροστατική κι αυξάνεται (προσεγγιστικά) κατά 1 MPa/100m (Δημάδης 2009). Λαμβάνοντας υπόψη και τις μέσες γεωθερμικές κλίσεις των 25 °C/km, οι ειδικοί του χώρου καθόρισαν τα 800m ως το ελάχιστο βάθος-όριο για την εισπίεση και αποθήκευση CO₂ σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Παρόλα αυτά, οι ιδιότητες κάθε λεκάνης είναι διαφορετικές, οπότε στην πραγματικότητα δεν ισχύουν καθολικά για όλες τις λεκάνες στον κόσμο τα παραπάνω.

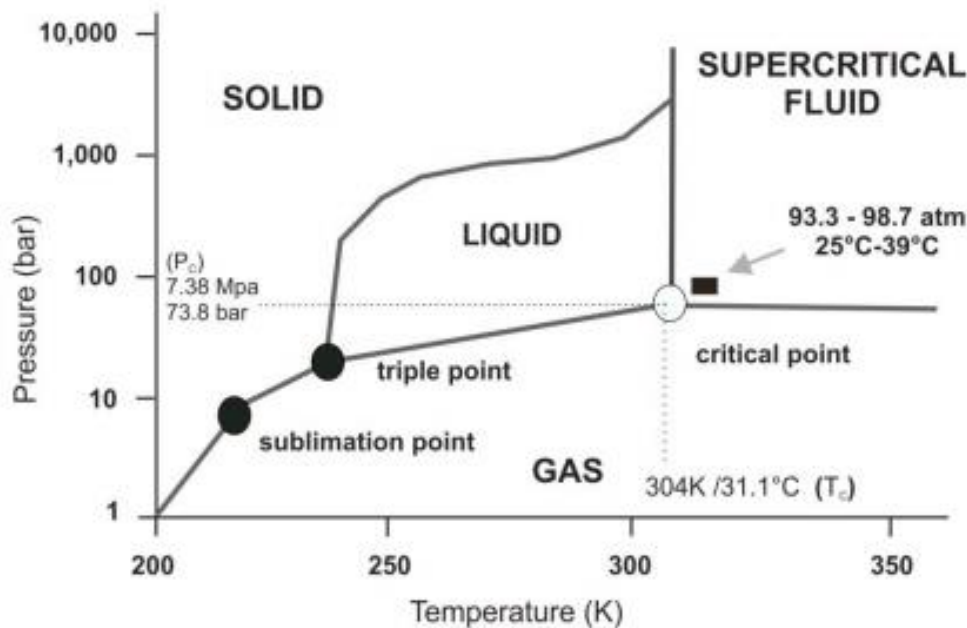
Όταν ένα ρευστό περιέρχεται στην υπερκρίσιμη κατάσταση, οι ιδιότητές του αποτελούν συνδυασμό υγρών κι αερίων. Πρέπει να εκτεθεί σε θερμοκρασίες και πιέσεις μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες κρίσιμες τιμές που ορίζουν το κρίσιμο σημείο του διαγράμματος φάσεων.

Οι τιμές των εν λόγω ιδιοτήτων για το CO₂ είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία: 31,1 °C
- Πίεση: 72,9 atm

Στη συγκεκριμένη κατάσταση της ύλης, το ρευστό συμπεριφέρεται ως άριστος διαλύτης κι η διαλυτική του ικανότητα εξαρτάται από την πίεση, κάτι που δεν ισχύει για τους υγρούς διαλύτες. Τέλος, έχει υψηλή διεισδυτικότητα εντός των πόρων (ενός πετρώματος λ.χ.) κάτι που οφείλεται στην ικανότητα διάχυσής του στο χώρο, χάρη στο πολύ μικρό ιξώδες.

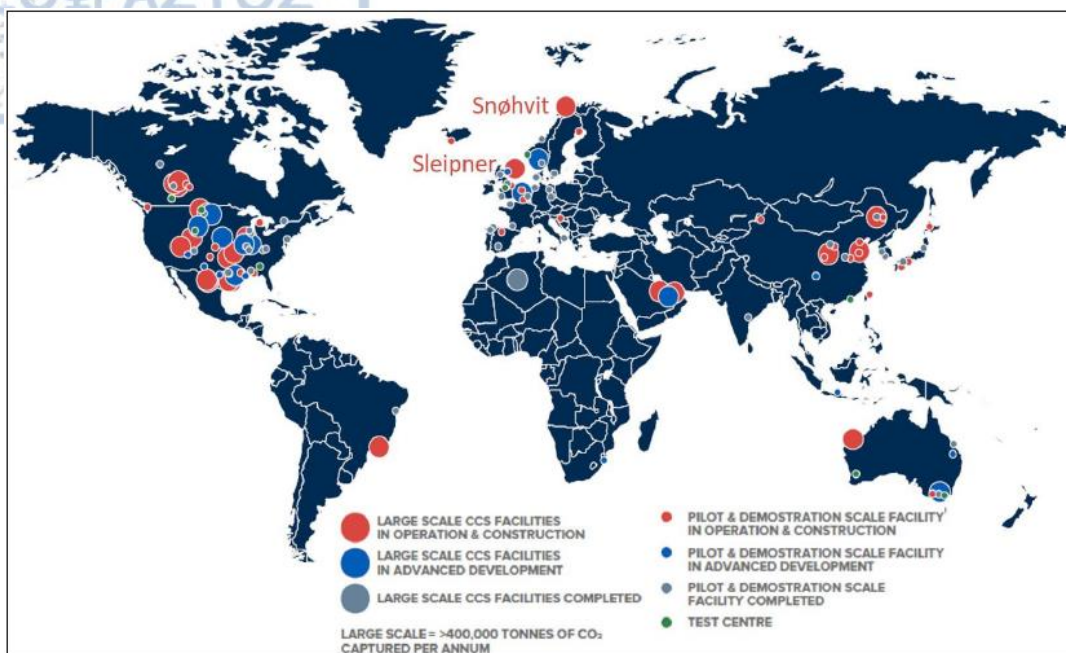
Οπότε, στις περισσότερες περιπτώσεις αποθήκευσης του CO₂ εντός των ταμιευτήρων, των υδροφόρων αλλά και των φλεβών γαιάνθρακα, αυτό βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση, δεδομένου και του μεγάλου βάθους όπου βρίσκονται οι εν λόγω σχηματισμοί.



Εικόνα 23: Διάγραμμα φάσεων CO₂ (Budisa & Schulze-Makuch 2014).

3.4. Παραδείγματα αποθήκευσης CO₂ σε παγκόσμιο επίπεδο

Η τεχνολογία CCS, είναι μια ασφαλής και δοκιμασμένη μέθοδος για να επιτευχθεί ο περιορισμός του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς και για εφαρμογές EOR. Μάλιστα, χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία για 45 χρόνια με θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, φυσικά για τις χώρες όπου εφαρμόστηκε (Κτενάς et al 2020). Παγκοσμίως, υπάρχουν 51 έργα CCS, εκ των οποίων τα 19 είναι ήδη λειτουργικά. Από τα υπόλοιπα, τα 18 είναι σε πρώιμη ανάπτυξη, τα 10 σε προηγμένη ανάπτυξη και τα 4 υπό κατασκευή. Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζονται όλα τα έργα CCS ανά τον κόσμο. (<https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>)



Εικόνα 24: Έργα CCS ανά τον κόσμο. Το Sleipner project όπως και το Snøhvit, βρίσκονται στη Νορβηγία κι είναι από τα μεγαλύτερα παγκοσμίως (Global CCS Institute, 2019).

Τα εν λειτουργία έργα μαζί με αυτά που κατασκευάζονται, έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύσουν 40Mt/έτος και μάλιστα μέχρι το τέλος του 2021, θα φτάσουν τους 41 Mt. Στην Ευρώπη, οι ηγέτιδες χώρες σε εφαρμογές CCS είναι η Μ. Βρετανία, η Νορβηγία, η Ολλανδία κι η Γερμανία.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δε γίνεται απλά αποθήκευση του CO₂, αλλά το τελευταίο μπορεί να μετατραπεί για παράδειγμα σε βιοκαύσιμα. Σε υδροφόρους ορίζοντες, αποθηκεύεται το 23% περίπου του CO₂, ενώ σε reservoirs περίπου το 15%.

3.4.1. To project Sleipner

Πρόκειται για την πρώτη offshore εφαρμογή CCS σε παγκόσμιο επίπεδο και βρίσκεται στη Νορβηγία (Furre et al 2016). Οι ποσότητες φυσικού αερίου στο κοίτασμα Sleipner Vest ανακαλύφθηκαν το 1974 κι η παραγωγή άρχισε το 1996, σε συνδυασμό με

το Sleipner Øst κοιτάσμα συμπυκνωμάτων αερίου. Σημαντική πρόκληση αποτέλεσε το γεγονός ότι η περιεκτικότητα των κοιτασμάτων σε CO₂, ήταν υψηλή (συγκεκριμένα 9%).

Η Equinor (τότε Statoil) μαζί με τις συνεργάτιδες εταιρίες, αποφάσισαν να αποθηκεύσουν το CO₂ στον κοντινό αλατούχο και πορώδη υδροφόρο ορίζοντα Utsira που βρίσκεται πολύ κοντά στο κοιτάσμα Sleipner Øst. Οι λόγοι που προέβησαν σε αυτήν την ενέργεια είναι επιβεβλημένοι για τη βιομηχανία γενικότερα. Σεβασμός στο περιβάλλον, υπόγεια αποθήκευση CO₂ και φυσικά ο Νορβηγικός φόρος άνθρακα (Norwegian CO₂ emissions tax) ανάγκασαν τη Νορβηγική πετρελαϊκή να ξεκινήσει την έγχυση του CO₂ το 1996. Πέραν από κάποια μικρά προβλήματα στην αρχή, τα οποία κι αντιμετωπίστηκαν τον επόμενο κιόλας χρόνο, η ροή έκτοτε έχει σταθεροποιηθεί. Μέχρι το 2014 η ροή ήταν 0,9 Mt CO₂/έτος, η οποία έκτοτε έχει μειωθεί ελαφρώς λόγω και της μειωμένης ροής του φυσικού αερίου. Από το 1996 έως και σήμερα ο υδροφόρος Utsira έχει αποθηκεύσει επιτυχώς περίπου 16 Mt CO₂. Να σημειωθεί επίσης, πως η χωρητικότητα του Utsira υπολογίζεται πως είναι 1-10 Gt, είναι ψαμμιτικό πέτρωμα και το υπερκείμενο Cap Rock είναι ένα στρώμα Αργίλου που θεωρήθηκε ικανοποιητικό, καθότι είναι παχύ και αδιαπέρατο, αποτρέποντας έτσι την πιθανή διαφυγή του CO₂.

Η σπουδαιότητα το όλου εγχειρήματος έγκειται στο γεγονός ότι ήταν ένα από τα πρώτα project αυτού του είδους· και μάλιστα μεγάλης κλίμακας. Τα διδάγματα που αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια λειτουργίας των εγκαταστάσεων αυτών, συνέβαλαν στο να δημιουργηθούν κατευθυντήριες για την παρακολούθηση άλλων παρόμοιων projects CCS στο μέλλον.



Εικόνα 25: Η τοποθεσία του κοιτάσματος Sleipner (Furre et al 2016)

Το project αυτό (πρόκειται για onshore εφαρμογή) βρίσκεται στην επαρχία Σασκάτσουαν στον Καναδά. Το 1998, η канаδική εταιρία PanCanadian Petroleum Limited (νυν EnCana Corporation, θυγατρική της Αμερικανικής Ovintiv), ανακοίνωσε σχέδιο για την εφαρμογή EOR σε ένα κοίτασμα πετρελαίου κοντά στην κωμόπολη Weyburn (ieaghg.org/docs/general_publications/weyburn.pdf). Έτσι, θα αποκτηθεί μεγάλη εμπειρία σε παρόμοια projects στο μέλλον. Το CO₂ προέρχεται από ένα κοντινό εργοστάσιο αεριοποίησης άνθρακα (coal gasification), της διαδικασίας δηλαδή που παράγει το Syngas.

Το κοίτασμα πετρελαίου βρίσκεται ΒΔ της λεκάνης Williston, 16 km ΝΔ του Weyburn. Η παραγωγή του εν λόγω κοιτάσματος ξεκίνησε το 1954 κι η μέση παραγωγή είναι στα 18.200 bbl/day. Επειδή, η παραγωγή έχει ήδη ξεκινήσει να μειώνεται λόγω του ότι πάνω από το 25% των απολήψιμων ποσοτήτων έχει ήδη ορυχθεί, ξεκίνησε η έγχυση CO₂, το 2000.

Πρέπει να σημειωθεί, πως στο συγκεκριμένο σημείο, ικανοποιούνται όλες οι απαιτούμενες προϋποθέσεις για CO₂ Sequestration. Ο σχηματισμός είναι reservoir πετρελαίου, ικανό για μακροχρόνια αποθήκευση (άρα και Seal Rock με κατάλληλες ιδιότητες), κι επίσης υπάρχει η πηγή του CO₂ κοντά στο σχηματισμό. Τέλος, όντας μερικώς εξαντλημένο το reservoir, η εφαρμογή EOR, μεγιστοποιεί το κέρδος (εκτός φυσικά από τα προφανή περιβαλλοντικά οφέλη). Στα τέλη του 2000, ο ρυθμός έγχυσης του CO₂ ήταν γύρω στους 5000t/ημέρα, ενώ το 2002 αυξήθηκε στους 6300t/ημέρα. Μέχρι την επόμενη κιόλας χρονιά, οι συνολικές ποσότητες CO₂ που αποθηκεύτηκαν εντός του σχηματισμού έφτασαν τους 3,5Mt, ενώ υπολογίζεται ότι μέχρι το τέλος της διάρκειας ζωής του έργου (περίπου το 2023) θα έχουν αποθηκευτεί περίπου 20 Mt CO₂.

Η πρωτοτυπία στο εν λόγω εγχείρημα, ήταν ότι η πηγή του CO₂ βρίσκεται στις Η.Π.Α και συγκεκριμένα στη Β. Ντακότα, ενώ ο χώρος αποθήκευσης στον Καναδά. Το project, λοιπόν, αποτελεί την πρώτη διακρατική προσπάθεια για τη μείωση των ανθρωπογενώς εκπεμπόμενων ρύπων. Ένας αγωγός μήκους 325km φροντίζει για τη μεταφορά του CO₂ εξασφαλίζοντας μεγαλύτερο κέρδος, ενώ, ταυτόχρονα, αποθηκεύονται

μεγάλες ποσότητες του κύριου ανθρωπογενούς ρύπου με ασφάλεια εντός του υποκείμενου γεωλογικού σχηματισμού.



Εικόνα 26: Τοποθεσία του κοιτάσματος Weyburn, της πηγής CO₂ και του αγωγού που το μεταφέρει από τη Β. Ντακότα (ieaghg.org/docs/general_publications/weyburn.pdf)

Φυσικά, υπάρχει πλειάδα άλλων παρόμοιων projects ανά τον κόσμο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα με μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα, αποτελούν τα K12B στην Ολλανδία και το In Salah στην Αλγερία. Μικρότερα projects (από άποψη αποθηκευτικών δυνατοτήτων), είναι τα:

- Frio στις Η.Π.Α
- FennBig Alley στον Καναδά
- Quinshui Basin στην Κίνα
- Yubari στην Ιαπωνία

3.5. Η περίπτωση της Ελλάδας – Πιθανοί χώροι αποθήκευσης CO₂

Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες Ευρωπαϊκές χώρες, η Ελλάδα είναι μια χώρα όπου δυστυχώς δεν έχουν (ακόμα) γίνει βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση. Παρόλο που γίνονται επενδύσεις δισεκατομμυρίων ευρώ μακροπρόθεσμα για ΑΠΕ, εντούτοις, όσον αφορά την τεχνολογία CCS, η Ελλάδα είναι πολύ πίσω από τις υπόλοιπες ανεπτυγμένες κοινωνίες.

Αυτό είναι οξύμωρο, αν αναλογιστεί κανείς πως η χώρα μας κατατάσσεται 2^η ευρωπαϊκά και 6^η παγκοσμίως στην παραγωγή λιγνίτη (άρα οι εκπομπές CO₂ είναι υψηλές, λαμβάνοντας υπόψη και το πληθυσμιακό μέγεθος). Το 56% της ηλεκτρικής ενέργειας που έχει ανάγκη η χώρα μας παράγεται από τους 8 σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής της ΔΕΗ (ΔΕΗ Α.Ε., 2020)· έτσι, οι εκπομπές CO₂ είναι υψηλές και δεν μειώνονται. Οι εκπομπές CO₂ από την περιοχή της Πτολεμαΐδας αντιστοιχούν σε 22,5 Mt, ενώ στην Πελοπόννησο εκπέμπονται περίπου 5 Mt. Στις μεγάλες αστικές περιοχές των Αθηνών και της Θεσσαλονίκης οι εκπομπές είναι 5 Mt και 1,6 Mt αντίστοιχα (Khan 2006). Οπότε, κρίνεται αναγκαίο για την Ελλάδα να αποθηκεύσει τις ποσότητες CO₂ που παράγει με την ασφαλή μέθοδο της υπόγειας γεωλογικής αποθήκευσης.

Η αλήθεια είναι πως οι επιστήμονες του κλάδου έχουν δημοσιεύσει κάποιες έρευνες για πιθανές θέσεις για εφαρμογή υπόγειας γεωλογικής αποθήκευσης του CO₂, οι οποίες παρατίθενται συνοπτικά στον κάτωθι πίνακα, που πάρθηκε από το νέο (εν έτει 2020) technical report της ΕΔΕΥ (Κτενάς et al 2020).

Πιθανές περιοχές αποθήκευσης CO ₂	Δημοσιεύσεις
Πρίνος, Καβάλα, Β. Ελλάδα	Tasianas et al., 2016
Μεσοελληνική Αύλακα, Πεντάλοφος και Επταχώριο	Tasianas et al., 2016
Μεσοελληνική Αύλακα, Πεντάλοφος και Τσοτύλιο, Δ. Θεσσαλονίκη	Koukouzas et al., 2018 Hatziyannis, 2009

Πίνακας 1: Συνοπτική λίστα επιστημονικών εργασιών σχετικά με πιθανές περιοχές γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ (Κτενάς et al 2020).

Οι μακροχρόνιες έρευνες σε μια χώρα που, δυστυχώς, δε διακρίνεται για την πετρελαϊκή έρευνά της, είναι απαραίτητες προκειμένου να εντοπιστούν κατάλληλοι σχηματισμοί προς αποθήκευση του CO₂. Φυσικά, πέρα από τη θέληση της επιστημονικής κοινότητας, αναγκαία είναι κι η συνδρομή της πολιτείας στο εν λόγω εγχείρημα, αφού, αν δεν υπάρχει πολιτική βούληση, οποιαδήποτε προσπάθεια των επιστημόνων ή/και βούληση των αρμόδιων φορέων για τα εν λόγω ζητήματα θα αποβεί ατελέσφορη.

Οι δυνατότητες και πάνω από όλα τα πλεονεκτήματα των εφαρμογών CCS πρέπει να καταστούν γνωστά στον πολιτικό κόσμο της χώρας, αλλά και στους πολίτες. Στην προσπάθεια που γίνεται για έναν πιο πράσινο κόσμο, η υπόγεια αποθήκευση του CO₂ μπορεί να παίξει έναν σημαντικό ρόλο στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου, ενώ ταυτόχρονα το μερίδιο των ΑΠΕ ολοένα και θα μεγαθύνεται. Είναι κάτι παραπάνω από προφανή τα οφέλη σε περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο.

Η Γερμανία, είναι μια από τις ευρωπαϊκές χώρες που δείχνουν το δρόμο προς αυτήν την κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, εν έτει 2009, κατασκευάστηκε ο πρώτος (πυλοτικός) θερμοηλεκτρικός σταθμός, έξω από την κομόπολη Spremberg της πρώην Ανατολικής Γερμανίας, ο οποίος καίει λιγνίτη και δεν εκπέμπει CO₂ στην ατμόσφαιρα, χάρη στην τεχνολογία CCS. Τα εκπεμπόμενα αέρια (περίπου 10t CO₂/h), δεσμεύονται κι υγροποιούνται κατόπιν συμπίεσης. Έπειτα, μεταφέρονται στη βόρεια Γερμανία όπου κι αποτίθενται σε εξαντλημένο ταμιευτήρα και φυσικά υφίσταται διαρκές monitoring προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια της υπεδαφικής αποθήκευσης (Μπριντάκης, 2016).



Wheeler, H.P., Eckard W.E., 1952. Underground Storage of Natural Gas in Coal-mining Areas, United States.

Evans, D. J., Chadwick R. A., 2009. Underground Gas Storage: Worldwide Experiences and Future Development in the UK and Europe, The Geological Society, London.

Eren, T., Polat, C., 2019. Natural gas underground storage and oil recovery with horizontal wells, *Journal of Petroleum Science and Engineering*.

Alagorni, A.H., Yaacob, Z., Bin Nour A.H., 2015. An overview of oil production stages: enhanced oil recovery techniques and nitrogen injection *Int. J. Environ. Sustain. Dev*.

De Kok, J.H., Clemens T., 2008. Combined underground gas storage and enhanced oil recovery in a fractured reservoir, Reitbrook, *International Petroleum Technology Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia.

Mokhatab, S., Poe, W.A., Mak, J.Y., 2019. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing (Fourth Edition).

Sunjay, S. et al, 2019. Geological Storage: Underground Gas Storage, Hyderabad.

Gale, J.J., 2004. Using Coal Seams for CO₂ Sequestration.

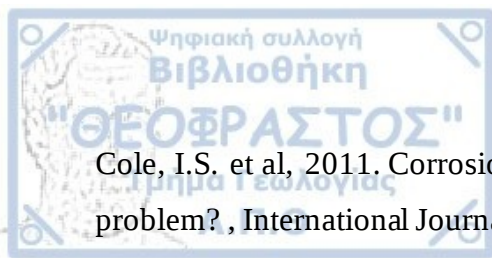
Amer, M.A. et al, 2018. Enhanced Gas Recovery by CO₂ Injection Method in Depleted Gas Reservoirs.

Choudhary, P., 2016. Carbon Capture and Storage Program (CCSP) Final report.

Metz et al, 2005. Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, pp. 105-267.

Speight, J.G., 2019. Natural Gas (Second Edition): A Basic Handbook, Gulf Professional Publishing .

Kohl, A., Nielsen, R., 1997. Gas purification, Houston, Gulf Professional Publishing.



Cole, I.S. et al, 2011. Corrosion of pipelines used for CO₂ transport in CCS: is it a real problem? , International Journal of Greenhouse Gas Control.

Rogers, G.F.C, Mayhew, Y.R, 1980. Engineering thermodynamics and heat transfer, New York.

Baines, S.J., Worden, R.H., 2004. Geological storage of carbon dioxide, London, The Geological Society of London.

Hulme, M., Jenkins, G.J, 1998. Climate Change Scenarios for the U.K.: Scientific Report, Norwich.

IPCC, 1995: The Science of Climate Change, Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report.

Holloway, S., 1997. An overview of the Joule II project: The underground disposal of carbon dioxide.

Gunter et al, 1998. Large CO₂ sinks: Their role in the mitigation of greenhouse gases from an international, national (Canadian) and provincial (Alberta) perspective.

Davidson et al, 2001. Putting Carbon Back in the Ground.

Wright et al, 2012. The First North American Carbon Storage Atlas, Energy Procedia.

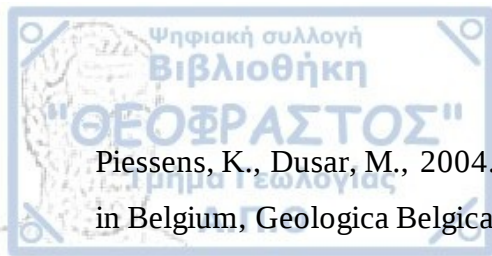
Bentham et al, 2014. CO₂ STORage Evaluation Database (CO₂ Stored). The UK's online storage atlas, Energy Procedia.

Celia et al, 2015. Status of CO₂ storage in deep saline aquifers with emphasis on modeling approaches and practical simulations.

Moghanloo, R.G. et al, 2017. Challenges Associated with CO₂ Sequestration and Hydrocarbon Recovery.

Ibrahim, A.F., Nasr-El-Din, H.A., 2015. CO₂ Sequestration in Unmineable Coal Seams, Society of Petroleum Engineers.

McGrail, B.P. et al, 2003. Use and features of basalt formations for geologic sequestration, Kyoto.



Piessens, K., Duser, M., 2004. Feasibility of CO₂ sequestration in abandoned coal mines in Belgium, *Geologica Belgica*.

Budisa, N., Schulze-Makuch, D., 2014. Supercritical Carbon Dioxide and Its Potential as a Life-Sustaining Solvent in a Planetary Environment, MDPI.

Furre A.K. et al, 2016. 20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner', Lausanne, *Energy Procedia*.

Khan I., 2006. CO₂ Storage Technologies Overview, RWE Power International.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

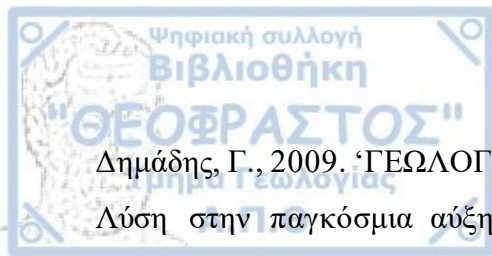
Παναγιωτίδου, Γ., 2012. 'Η αγορά του φυσικού αερίου - Δυνατότητες υπεδafικής αποθήκευσης', *Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών*, Αθήνα.

Τσίτσης, Γ., 2013. 'Διερεύνηση ανάπτυξης υπόγειων αποθηκευτικών υποδομών υδρογονανθράκων στη Κύπρο', *Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών*, Αθήνα.

Αμβράζης, Μ., 2017. 'Αποθήκευση CO₂ σε υπόγειους ταμιευτήρες σαν μέσο για την απομείωση των ανθρωπογενώς παραγόμενων αερίων θερμοκηπίου', *Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., ΔΠΜΣ Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων*, Θεσσαλονίκη.

Ράπτη, Χ., 2013. 'Τεχνικές Παρακολούθησης Αποθήκευσης CO₂ Σε Γεωλογικούς Σχηματισμούς Και Διαχείριση Κίνδυνων', *Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών*, Αθήνα.

Μπριντάκης, Ι., 2016. 'ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ', *Διπλωματική Εργασία, τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων*, Χανιά.

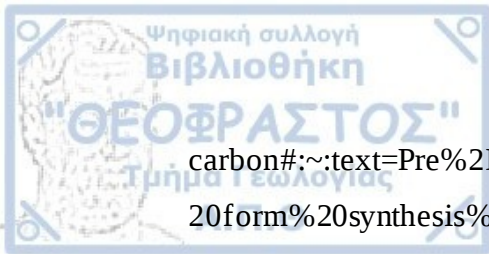


Δημάδης, Γ., 2009. 'ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΟΥ CO₂ - Η Λύση στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας;', *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη.

Κτενάς, Δ., Κοσμίδου, Β., Σπίνος, Σ., 2020. 'Υπόγεια Γεωλογική Αποθήκευση CO₂ και Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα', Ε.Δ.Ε.Υ, Αθήνα.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- <https://ourworldindata.org/grapher/gas-consumption-by-country>
- <https://www.desfa.gr/press-center/press-releases/diagwnismos-gia-thn-kataskeyh-sta8moy-fortwshs-bytioforwn-lng-sth-reby8oysa-apo-ton-desfa>
- <https://www.depa.gr/ethniko-nomothetiko-ke-rythmistiko-plesio/>
- <https://primis.phmsa.dot.gov/comm/NGStorageTypes.htm?nocache=2070>
- <https://www.insider.gr/epiheiriseis/energeia/142707/paratasi-ekdilosis-endiaferontos-gia-koitasma-fysikoy-aerioy-notia>
- <https://www.hradf.com/portfolio/view/26/south-kavala-natural-gas-storage?acceptall>
- <https://www.tovima.gr/2020/10/19/finance/kleidosan-oi-symmaxies-gia-ti-diekdikisi-tis-ypogeias-apothikis-fysikou-aeriou-kavalas/>
- <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/f/f3/Share_of_energy_from_renewable_sources_2018_infograph.jpg
- <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/kyoto-protocol-targets-for-the-first-commitment-period>
- <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>
- <https://www.energy.gov/fe/science-innovation/carbon-capture-and-storage-research/carbon-capture-rd/pre-combustion->



carbon#:~:text=Pre%2Dcombustion%20capture%20refers%20to,pressure%20to%20form%20synthesis%20gas.

- <https://co2degrees.com/sites/default/files/downloads/CO2%20Transport.jpg>
- <https://www.club-co2.fr/en/content/co2-transport>
- https://www.kindermorgan.com/pages/business/co2/pipelines/transport_canyon_reef.aspx
- https://www.kindermorgan.com/pages/business/co2/supply/supply_bravo.aspx
- <http://www.tradenewswire.net/norway-examines-feasibility-of-co2-shipping/>
- <https://www.e-education.psu.edu/earth104/node/705>
- <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>
- Global CCS Institute, 2019. Διαθέσιμο από: <https://www.globalccsinstitute.com/>
- ieaghg.org/docs/general_publications/weyburn.pdf
- ΔΕΗ Α.Ε., 2020. Διαθέσιμο από: <https://www.dei.gr/el>