ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΣΧΟΛΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΠΜΣ
« Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία »

" ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO_2) ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ "

Ι. Τσελές (ΜΝΣΝΔ – 21056)

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην ΄Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία'

Πειραιάς

ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμούτης δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρατκτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπόcopyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α΄: κ. ΠΕΛΑΓΙΔΗΣ Θεόδωρος

ΜΕΛΟΣ Β΄: κ. ΓΑΛΑΝΗΣ Γεώργιος

ΜΕΛΟΣ Γ΄: κ. ΠΟΛΕΜΗΣ Διονύσιος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον κ ΠΕΛΑΓΙΔΗ Θεόδωρο, Καθηγητή Οικονομικής Ανάλυσης στο Πανεπιστήμιο Πειραιά που δέχθηκε με προθυμία να αναλάβει την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Οι επισημάνσεις του ήταν καίριες για την τελική μορφή της μελέτης. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες καθηγητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία» για τις γνώσειςπου μας παρείχαν, το εξαιρετικό ήθος και την άψογη εν γένει στάση τους, τηρώντας ψηλά το επίπεδο εκπαίδευσης του Μεταπτυχιακού Προγράμματος . Τίποτα από τα παραπάνω όμως δενθα είχαν αξία χωρίς την στήριξη της οικογένειάς μου που ήταν αμέριστη μέχρι ολοκλήρωσης του προγράμματος σπουδών. Τους αφιερώνω λοιπόν αυτήν την προσπάθεια και τους ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου για τη δύναμη που μου έδωσαν σε αυτή τη διαδρομή, μεπολλούς τρόπους. Τέλος, ως Λιμενικός, ευχαριστώ την Υπηρεσία (Λιμεναρχείο Ιτέας) και τους συναδέλφους μου που διευκόλυναν τη συμμετοχή μου στην παραπάνω εκπαιδευτική διαδικασία.

"Εις μνήμην της αγαπημένης μου αδελφής Αθηνάς
που τόσο ξαφνικά πέρασε στην αιωνιότητα αλλά δεν
έπαψε έστω από ψηλά να φωτίζει το μονοπάτι της
αρετής και της γνώσης !!!"

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε συνοπτικά, το υφιστάμενο Ευρωπαϊκό και Εθνικό θεσμικό πλαίσιο από το οποίο απορρέει η ανάπτυξη της διαδικασίας δέσμευσης, χρήσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα CO_2 - τεχνολογία CCUS (Capture Carbon Usage and Storage), σε μόνιμες υπόγειες αποθηκευτικές τοποθεσίες, στα πλαίσια της πολιτικής μείωσης των ρύπων του θερμοκηπίου. Μετά από μία γενικότερη περιγραφή της εν λόγω διαδικασίας και με τη βοήθεια της υπάρχουσας βιβλιογραφίας παρουσιάστηκαν οι τρόποι μεταφοράς του CO_2 (αγωγοί, πλοία, τρένα).

Στη συνέχεια αναλύθηκε ενδελεχώς η Ναυτιλία μεταφοράς CO_2, τα στάδιά αυτής, καθώς και τα απαιτούμενα κόστη για την ενεργοποίησή της (π.χ. τα κεφαλαιακά κόστη, κόστη μεταφοράς του αναφερόμενου φορτίου, οι συνθήκες μεταφοράς του). Εκτιμήθηκε τελικώς μέσω συγκρίσεων και με τη βοήθεια των απαιτούμενων πινάκων και διαγραμμάτων της βιβλιογραφίας εάν η ναυτιλία αποτελεί συμφέροντα τρόπο μεταφοράς, σήμερα και μελλοντικά για το εξεταζόμενο φορτίο.

Αναφέρθηκαν επίσης αποτελέσματα περαιτέρω σύγκρισης της Ναυτιλίας μεταφοράς με εκείνη των αγωγών και έγινε αντιληπτό εάν τελικά αξίζει τον κόπο σήμερα μία ναυτιλιακή εταιρία να επενδύσει στρατηγικά στον ανερχόμενο τομέα ή όχι, λαμβάνοντας υπόψιν τα σημερινά δεδομένα αλλά και του κοντινού παρελθόντος.

Επιπρόσθετα διαπιστώθηκε ότι η ναυτιλία μεταφοράς CO_2 μπορεί να συμβάλλει μελλοντικά στην μείωση εκπεμπόμενων ρύπων του θερμοκηπίου εφόσον μπορεί ευέλικτα να μεταφέρει προς αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς, μεγάλους όγκους ρύπων διανύοντας μεγάλες αποστάσεις.

Επίσης αναδείχθηκαν οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν στο μέλλον, για να ξεκινήσει η σταθερά αναπτυσσόμενη πορεία του νέου τομέα της Ναυτιλίας, (όπως οι διατάξεις του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου, η έλλειψη εμπειρίας σε μεγάλης κλίμακας έργων μεταφοράς CO_2 κ.α), με σκοπό αυτή να καταστεί κερδοφόρα.

Τέλος αναφέρθηκαν οι ευκαιρίες τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο που θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν τον ανερχόμενο τομέα ναυτιλίας ώστε να γίνει αποδοτικότερος τόσο για τους επενδυτές του όσο και για την στρατηγική αντιμετώπισης των ρύπων του

θερμοκηπίου, εφόσον μόνο από το βόρειο ημισφαίριο του πλανήτη μας, εκπέμπεται το 85% των ρύπων παγκοσμίως, το οποίο το 2020 εκτιμήθηκε στους 36 δις τόνων. Με τη συνεχή ερευνητική προσπάθεια χωρών όπως η Νορβηγία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Κίνα και η Νότιος Κορέα, τα αποτελέσματα δείχνουν ελπιδοφόρα.

Λέξεις – Κλειδιά: «ΔΕΣΜΕΥΣΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, ΑΝΘΡΑΚΑΣ, ΝΑΥΤΙΛΙΑ, ΚΟΣΤΟΣ»

Abstract

In this work, the existing European and National institutional framework was briefly presented, from which the development of the process of capturing, using and storing carbon dioxide CO_2 - CCUS technology (Capture Carbon Utilization and Storage) - derives, in permanent underground storage locations, under the frameworks of the policy reducing the greenhouse gases.

After a more general description of the process in question, and with the help of the existing literature, the ways of transporting CO_2 (pipelines, ships, trains) were presented. Then Maritime Transport of CO_2 was thoroughly analyzed, to its stages, as well as the required costs for its activation (e.g. capital costs, transport costs of the mentioned load,its transport conditions). It was finally assessed through comparisons the case that Maritime Transport of CO_2 is an advantageous mode of transport, today and in the future for the considered cargo. The results of a further comparison with the medium of pipelines were alsoreported and it was realized whether it is ultimately worthwhile for a shipping company to invest strategically in the emerging sector or not, taking into account today's data as well as the recent past.

In addition, it was found that CO_2 Maritime Transport can contribute in the future to the reduction of greenhouse gas emissions since it can flexibly transport large volumes of pollutants over long distances for storage in geological formations.

The major challenges that must be faced in the future, were highlighted, in order to start a steady developing course for the new Shipping sector, (such as the provisions of the London Protocol, the lack of experience in large-scale CO_2 transport projects, etc.) , by making it profitable.

Finally, the opportunities were mentioned, both at the national and international level that could feed the emerging shipping sector so that it becomes more efficient both for its investors and for the strategy dealing with greenhouse pollutants, since only from the northern hemisphere of our planet , 85% of pollutants are emitted worldwide. In 2020 pollutants were estimated at 36 billion tons. With the continued research effort of countries such as Norway, the United Kingdom, China and South Korea, the results look promising.

Keywords: «CAPTURE, STORAGE, CARBON, MARITIME, COST».

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 1

1.1. Η ΣΥΜΒΑΣΗ - ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΗΝΩΜΕΝΩΝ ΕΘΝΩΝ 1
1.2. ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ 2
1.1.1. ΟΔΗΓΙΑ 2009/31/ΕΚ «ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO_2 ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ» 4
1.3. ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ 2050 4
1.4. ΕΘΝΙΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ 5
1.5. Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ 6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 7

2.1. ΜΕΤΑΦΟΡΑ 8
2.2.1. ΑΓΩΓΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ CO_2 9
2.2.2. Η ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑ CO_2 11
2.2.2.1 ΠΛΟΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ CO_2 12
2.3. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO_2 15
2.3.1. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΕΝΕΡΓΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ (EOR) 17
2.3.2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΕΞΑΝΤΛΗΜΕΝΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ/ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ 18
2.3.3. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΑΛΑΤΟΥΧΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥΣ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ 19
2.3.4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ μΗ ΕΞΟΡΥΓΜΕΝΟΥ ΓΑΙΑΘΡΑΚΑ (ECBMR) 21
2.3.5. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΩΚΕΑΝΟΥΣ 22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 24

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 24
3.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΕΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΆΝΘΡΑΚΑ (CO_2) 24
3.2.1. ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ 26
3.2.2. ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO_2 29
3.2.3. ΥΛΙΚΑ ΣΧΗΜΑ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ 30
3.2.4. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO_2 31
3.2.5. ΣΤΑΔΙΟ ΦΟΡΤΩΣΗΣ 33
3.3. ΠΛΟΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ CO_2 - ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΧΡΙ ΣΗΜΕΡΑ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ 34
3.3.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΟΙΟΥ 34
3.3.1.1. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ 34
3.3.1.2. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ 36
3.3.1.2. ΠΙΕΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΑ ΠΛΟΙΑ 39
3.4. ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΥΓΡΑΕΡΙΟΥ - ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ 39
3.4.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ CO_2 40
3.5. ΕΚΦΟΡΤΩΣΗ CO_2 41
3.6. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ 42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 45

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 45
4.2. ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ 45
4.3. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ 46

4.4. ΦΟΡΤΩΣΗ 47

4.5. ΈΞΟΔΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΠΛΟΙΟ 48

4.5.2. ΠΑΓΙΟ ΟΡΕΧ 50
4.5.3. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ 51
4.5.4. ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΤΕΛΗ 52
4.5.5. ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΠΛΟΙΩΝ 53
4.6. ΕΚΦΟΡΤΩΣΗ 54

4.7. ΚΟΣΤΟΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ 55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 57

5.1.2. ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΡΟΗΣ 64
5.1.3 . ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ 65
5.1.4. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ 66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 69

6.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΜΕΓΑΛΗΣ 69
ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 70
6.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ CO_2 ΜΕΤΑΞΥ ΑΓΩΓΟΥ ΚΑΙ ΠΛΟΙΟΥ 73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 77

7.1. ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΑ ΕΜΠΟΔΙΑ 77
7.2. ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ CO_2 81
7.3. ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ 83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 85

8.1. ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΓΑΣΙΑ 87

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ 89

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1. 110

ΕΡΓΑ ΣΕ ΕΞΕΛΙΞΗ (IOGP) 110

..... 111

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.2.1.1: Όγκοι και διαδρομές μεταφοράς CO_2 στην Ευρώπη 10
Σχήμα 2 3.1: Επισκόπηση των επιλογών αποθήκευσης CO_2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς 16
Σχήμα 2.3.1.1: Βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου χρησιμοποιώντας CO_2 17
Σχήμα 2.3.3.1: Αποθήκευση CO_2 στον αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα..... 20
Σχήμα 2.3.4.1: Αποθήκευση CO_2 σε κοιτάσματα άνθρακα και ενίσχυση ανάκτησης CH_4 21
Σχήμα 2.3.5.1: Επισκόπηση των επιλογών αποθήκευσης CO_2 σε ωκεανό..... 23
Σχήμα 3.2.1. : Στοιχεία της ναυτιλιακής αλυσίδας CO_2..... 25
Σχήμα 3.2.2.: Βασικές επιλογές σχεδίασης-εξαρτημάτων της αλυσίδας αποστολής CO2 26
Σχήμα 3. 2. 1.1. : Διάγραμμα φάσης CO_2 και πυκνότητα υγρού και αερίου CO 2 σε διαφορετικές πιέσεις..... 27
Σχήμα 3.2.1.2. Απαίτηση ισχύος για τη μονάδα υγροποίησης ενός έργου 1 Mtpa 29
Σχήμα 3.2.4.1: Φόρτωση και εκφόρτωση υγρού CO_2 με ταυτόχρονη εκφόρτιση και φόρτιση ατμών αντίστοιχα 32
Σχήμα 3.3.1.1.1: Προτεινόμενα σχέδια πλοίων για μεταφορά χαμηλής πίεσης 35
Σχήμα 3.3.1.1.2: Σχεδιασμός πλοίου που προτείνεται από για ένα πλοίο 12.310 tCO 2 (αριστερά) και για ένα πλοίο 105.000 tCO_2 (δεξιά) 36
Σχήμα 3.3.1.2.1. Κορυφή: Πλοίο που προτείνεται από (Brevik, 2017) 37
Σχήμα 3.3.1.2.2.: Έννοιες σχεδιασμού πλοίων για το Νορβηγικό Έργο Επίδειξης CCS… 38
Σχήμα 4.5.1.1: Τιμές CAPEX του πλοίου που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία 49
Σχήμα 4.5.2.1.: Ναυτιλιακή μεταφορά σταθερών τιμών OPEX που βρίσκονται στη βιβλιογραφία 50
Σχήμα 4.5.4.1. : Λιμενικά τέλη που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, ανά ταξίδι μετ' επιστροφής 52
Σχήμα 5.1.1 . Γραφική αναπαράσταση σύγκρισης κόστους στα ναυτιλιακά έργα CO_2..... 60
Σχήμα 5.1.2 . : Στοιχεία κόστους μεταφοράς CO_2 61
Σχήμα 5.1.3 . : Στοιχεία συνολικού κόστους μεταφοράς CO_2 61
Σχήμα 5.1.4. Τυπικά κόστη μεταφοράς σε Νότια Κορέα και Ιαπωνία σύμφωνα με Kang et al. and Tokimatsu et al 63
Σχήμα 5.1.1.1 . : Επίδραση της πίεσης μεταφοράς και της αρχικής πίεσης στο μοναδιαίο κόστος αποστολής CO_2 επιστροφής 64
Σχήμα 5.1.2.1 : Επίπτωση του ρυθμού ροής στο μοναδιαίο κόστος μεταφοράς CO_2..... 65
Σχήμα 5.1.3.1.: Επίπτωση του μεγέθους του πλοίου στο μοναδιαίο κόστος αποστολής CO 2 1 Mtpa.....66

Σχήμα 5.1.4.1.: Διακύμανση των εκπομπών από τη μεταφορά CO_2. 67
Σχήμα 6.1.1.: Κόστος και χωρητικότητα για εναλλακτικές μεταφορές στα 250 km..... 69
Σχήμα Σχήμα 6.3.1.1.: Ανάλυση κόστους μεταφοράς CO_2 με εκτίμηση απόστασης (d in km) και ετήσιου όγκου (V in $MtCO_2$/year) όταν μεταφέρεται καθαρό CO_2 μεταξύ δύο λιμένων με πλοίο με πίεση μεταφοράς στα 7 bar.....73
Σχήμα 6.3.1.2. Ανάλυση κόστους μεταφοράς CO_2 με εκτίμηση απόστασης (d in km) και ετήσιου όγκου (V in $MtCO_2$/year) όταν μεταφέρεται καθαρό CO_2 μεταξύ δύο δύο δημείων στην ενδοχώρα, με χρήση αγωγού..... 74
Σχήμα Σχήμα 6.3.2.1.: Ανάλυση κόστους μεταφοράς CO_2 με εκτίμηση απόστασης (d in km) και ετήσιου όγκου (V in $MtCO_2$/year) όταν μεταφέρεται καθαρό CO_2 μεταξύ στεριάς και υπεράκτιου σημείου με πίεση μεταφοράς στα 7 bar 75
Σχήμα 6.3.1.2. Ανάλυση κόστους μεταφοράς CO_2 με εκτίμηση απόστασης (d in km) και ετήσιου όγκου (V in $MtCO_2$/year) όταν μεταφέρεται καθαρό CO_2 μεταξύ στεριάς και υπεράκτιου σημείου, με χρήση αγωγού..... 75
Σχήμα 7.1. : Επισκόπηση της κατάστασης επικύρωσης Συμβαλλομένων Μερών από τον Μάρτιο του 2019. 78
Σχήμα 7.3.1. Πιθανοί σχηματισμοί αποθήκευσης CO_2 και πηγές εκπομπών CO_2 στην Ευρώπη..... 83

Πίνακες

Πίνακας 2.1.: Παγκόσμια χωρητικότητα γεωλογικών ταμιευτήρων για αποθήκευση CO_2 16
Πίνακας 3.1: Πυκνότητα υγρού και αερίου CO_2 σε διαφορετικές πιέσεις και θερμοκρασίες που λαμβάνονται υπόψη για τη μεταφορά 27
Πίνακας 4.1: Εκτιμήσεις κόστους ρευστοποίησης από τη βιβλιογραφία..... 46
Πίνακας 4.2. : Εκτιμήσεις κόστους αποθήκευσης από τη βιβλιογραφία αποθήκευση ... 47
Πίνακας 4.3.: Εκτιμήσεις κόστους φόρτωσης από τη βιβλιογραφία 48
Πίνακας 4.4: Το CAPEX του πλοίου σε συνάρτηση της χωρητικότητας του, με τιμές μελέτης Element Energy Limited για 7 και 15 bar πίεση μεταφοράς 51
Πίνακας 4.5: Λειτουργικές παράμετροι ναυτιλίας-βιβλιογραφία 51
Πίνακας 4.6. Η κατανάλωση καυσίμων, με τιμές μελέτης Element Energy Ltd για 7 και 15 bar πίεση μεταφοράς 53
Πίνακας 4.6.2.1: Εκτιμήσεις κόστους εκφόρτωσης ανοικτής θάλασσας που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία..... 54
Πίνακας 4.7.1.1: Εκτιμήσεις κόστους αεριοποίησης που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία ... 55
Πίνακας 4.7.2.1: Υποθέσεις κόστους υπεράκτιας αεριοποίησης 56
Πίνακας 5.1. Περίληψη και σύγκριση κόστους των ναυτιλιακών έργων CO_2 όπως έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία 58-59
Πίνακας 6.1. Εναλλακτικές λύσεις μεταφοράς διοξειδίου του άνθρακα.....70
Πίνακας 7.2. Παράμετροι πλοίου CO_2 στην βιβλιογραφία..... 79
Πίνακας 7.3. Εκτιμώμενες βιομηχανικές εκπομπές από βασικούς βιομηχανικούς κόμβους..... 83

Συντμήσεις

CAPEX	Capital Expenditure
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Usage
CH4	Μεθάνιο
CNG	Compressed Natural Gas
CO2	Διοξείδιο του άνθρακα
DRI	Direct Reduced Iron
EU	EUROPEAN UNION
ETS	Emissions Trading System
ETC	Energy Transition Commisions
HB	ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ
IOGP	The International Association of Oil & Gas Producers
GHG	Greenhouse Gas
LNG	Liquified Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
LCO_2	Liquid carbon dioxide
NG	Natural Gas
NOX	Nitrogen oxides
OPEX	Operational Expenditure
PPA	Power Purchase Agreement
RDFP	R&D Framework Program
TEN-E	Trans-European Networks for Energy regulation

Κεφάλαιο 1

Η πολιτική για την Κλιματική Αλλαγή

1.1. Η Σύμβαση - Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών

Η Σύμβαση - Πλαίσιο των Η.Ε. για τις κλιματικές αλλαγές υπεγράφη από 154 χώρες και την Ευρωπαϊκή Ένωση τον Ιούνιο του 1992 στο Ρίο, κατά τη διάρκεια της Συνόδου Κορυφής για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη. Η σύμβαση δεν έθεσε νομικά δεσμευτικές υποχρεώσεις αλλά τις βάσεις για περαιτέρω δράση στο μέλλον. Την εποχή που επικρατούσαν πολλές αμφισβητήσεις για την επιστημονική στήριξη της ανάγκης υιοθέτησης μέτρων, η σύμβαση έθεσε τις γενικές αρχές και τη διαδικασία για τη μετέπειτα υιοθέτηση δεσμεύσεων, κυρίως μέσω των τακτικών συνόδων των Κρατών Μερών της.
Η Σύμβαση προβλέπει για όλα τα Κράτη, αναγνωρίζοντας κοινές αλλά διαφοροποιημένες υποχρεώσεις και την ύπαρξη εθνικών αναπτυξιακών προτεραιοτήτων, τα εξής:

1. Την ανάπτυξη, τακτική ενημέρωση και δημοσιοποίηση εθνικών απογραφών των ανθρωπογενών εκπομπών βάσει συγκρίσιμων μεθοδολογιών.
2. Τη δημοσίευση, αναθεώρηση και εφαρμογή εθνικών προγραμμάτων για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών.
3. Την υιοθέτηση πολιτικών και μέτρων με στόχο την επαναφορά των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στα επίπεδα του έτους 1990 μέχρι το 2000 για τα Κράτη που περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Ι της Σύμβασης (ανεπτυγμένα κράτη). Η σύμβαση δίνει τη δυνατότητα ο στόχος αυτός να επιτευχθεί από κάθε κράτος ξεχωριστά ή από κοινού με άλλα.

Η Διάσκεψη των Συμβαλλομένων Μερών (Conference of the Parties-COP) είναι το «ανώτατο σώμα» (supreme body) της Σύμβασης, δηλαδή η υψηλότερη αρχή της λήψης αποφάσεων. Στη Διάσκεψη μετέχουν όλες οι χώρες που είναι συμβαλλόμενα μέρη της σύμβασης.
Η Ευρωπαϊκή Ένωση με δήλωσή της, που κατετέθη ταυτόχρονα με το έγγραφο επικύρωσης της Σύμβασης, έθεσε σαν συνολικό στόχο της (για όλα τα κράτη-μέλη από κοινού) τη

σταθεροποίηση των εκπομπών της διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το έτος 2000 στα επίπεδα του 1990. Η Ελλάδα επικύρωσε την Σύμβαση με τον Νόμο 2205/1994 (ΦΕΚ 60/Α/15-4-1994), (ΥΠΕΚΑ, 2009).

1.2. Ευρωπαϊκή Πολιτική

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Μαρτίου 2007, επεσήμανε ότι, για να επιτευχθεί ο στόχος της Σύμβασης, η σταθεροποίηση δηλαδή των συγκεντρώσεων των αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε επίπεδα τα οποία αποτρέπουν την επικίνδυνη ανθρωπογενή παρεμβολή στο κλιματικό σύστημα, η συνολική ετήσια μέση αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πλανήτη δεν θα πρέπει να υπερβεί τους 2°C σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικής εποχής επίπεδα. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται να μειωθούν οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου μέχρι το 2050 σε ποσοστό τουλάχιστον 50% έναντι των επιπέδων του 1990.
Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο ενέκρινε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την κλιματική και ενεργειακή πολιτική με στόχο την καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος και την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας της ΕΕ, ενισχύοντας παράλληλα την ανταγωνιστικότητα της και την μετατροπή της σε μια ιδιαίτερα αποδοτική από ενεργειακή άποψη οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα.
Οι απαιτήσεις που υιοθετήθηκαν από τους αρχηγούς κρατών και κυβερνήσεων αφορούσαν:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% κάτω από τα επίπεδα του 1990.
- 20% της κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.
- Μείωση κατά 20% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας σε σύγκριση με τα προβλεπόμενα επίπεδα μέσω τη βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.

<u>Οι παραπάνω απαιτήσεις είναι γνωστές ως στόχοι 20-20-20.</u>
Τον Ιανουάριο του 2008 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε δεσμευτική νομοθεσία για την υλοποίηση των στόχων 20-20-20. Η γνωστή ως «δέσμη για το κλίμα και την ενέργεια», η οποία συμφωνήθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο τον Δεκέμβριο του 2008 και έγινε νόμος τον Ιούνιο του 2009, περιλαμβάνει τα παρακάτω νομοθετήματα:

1. Την Οδηγία 2009/29/ΕΚ «για τροποποίηση της οδηγίας 2003/87/ΕΚ με στόχο τη βελτίωση και την επέκταση του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου της Κοινότητας».

2. Την απόφαση 406/2009/ΕΚ «περί των προσπαθειών των κρατών μελών να μειώσουν τις οικείες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, ώστε να τηρηθούν οι δεσμεύσεις της Κοινότητας για μείωση των εκπομπών αυτών μέχρι το 2020». Για να συμφέρει οικονομικά η επιδιωκόμενη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20% έναντι των επιπέδων του 1990 μέχρι το 2020, θα πρέπει να συμβάλουν στις μειώσεις των εκπομπών όλοι οι τομείς της οικονομίας. Συνεπώς, τα κράτη μέλη θα πρέπει να εφαρμόσουν πρόσθετες πολιτικές και μέτρα σε μια προσπάθεια περαιτέρω περιορισμού των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από πηγές που δεν καλύπτει ηοδηγία 2003/87/ΕΚ. Η απόφαση αφορά τον επιμερισμό της προσπάθειας των Κ-Μ γιαμείωση των εκπομπών από τομείς που δεν καλύπτονται από το σύστημα εμπορίας, όπως οι μεταφορές, ο οικιακός τομέας, η γεωργία και τα απόβλητα.

3. Οδηγία 2009/28/ΕΚ «σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές». Δεσμευτικοί εθνικοί στόχοι αποβλέπουν σε συμμετοχή των ΑΠΕ κατά 20% στην ενεργειακή κατανάλωση σε επίπεδο ΕΕ. Οι στόχοι θα συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης της ΕΕ από τις εισαγωγές ενέργειας και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

4. Οδηγία 2009/31/ΕΚ «σχετικά με την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς». **Ένα νομικό πλαίσιο για την προώθηση της ανάπτυξης και την ασφαλή χρήση της δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS). Η ΕΕ είχε σκοπό να δημιουργηθεί ένα δίκτυο μονάδων επίδειξης CCS το 2015 για να δοκιμάσει τη βιωσιμότητά της όπως και έγινε (Νορβηγία), με σκοπό την εμπορική εφαρμογή της μετά το 2020 .**

5. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης γίνεται μέσω του σχεδίου δράσης για την ενεργειακή απόδοση της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η Επιτροπή αναλαμβάνει πρωτοβουλίες για να κινητοποιήσει την κοινή γνώμη, τους φορείς λήψης αποφάσεων και των φορέων της αγοράς και θεσπίζει ελάχιστα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης και κανόνες για την επισήμανση των προϊόντων, υπηρεσιών και υποδομών (ΥΠΕΚΑ, 2009 – νυν ΥΠ.ΕΝ).

1.1.1. Οδηγία 2009/31/ΕΚ «αποθήκευση CO_2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς»

Ο στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) με την Οδηγία 2009/31/ΕΚ «σχετικά με την αποθήκευση CO_2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2009 ήταν η θέσπιση ενός νομικού πλαισίου για την περιβαλλοντικά ασφαλή αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς ως συμβολή στην καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος. Συνοπτικά τα σημαντικότερα σημεία της οδηγίας είναι τα παρακάτω:

- Η οδηγία εφαρμόζεται στην αποθήκευση CO_2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς εντός της επικράτειας των κρατών μελών, εντός των αποκλειστικών οικονομικών ζωνών τους και στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα τους.
- Η οδηγία δεν εφαρμόζεται στην αποθήκευση CO_2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς με αποθηκευτική ικανότητα κάτω των 100 χιλιοτόνων.
- Δεν επιτρέπεται η αποθήκευση CO_2 στη στήλη ύδατος ή σε τόπο αποθήκευσης με συγκρότημα αποθήκευσης που εκτείνεται πέραν της επικράτειας, των αποκλειστικών οικονομικών ζωνών ή της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας των κρατών μελών.
- Επιλογή και εξερεύνηση των τόπων αποθήκευσης

Ένας γεωλογικός σχηματισμός επιλέγεται ως τόπος αποθήκευσης μόνον εάν, υπό τις προτεινόμενες προϋποθέσεις χρήσης, δεν υφίσταται σημαντικός κίνδυνος διαρροών, ούτε σημαντικός κίνδυνος για το περιβάλλον ή την υγεία. Η καταλληλότητα ενός γεωλογικού σχηματισμού για χρήση του ως τόπου αποθήκευσης κρίνεται κατόπιν χαρακτηρισμού και αξιολόγησης του δυνητικού συγκροτήματος αποθήκευσης και τηςγύρω περιοχής κατ' εφαρμογή των κριτηρίων που ορίζονται στο παράρτημα Ι της οδηγίας.

1.3. Ευρωπαϊκός Ενεργειακός Χάρτης Πορείας για το 2050

Στον ενεργειακό χάρτη πορείας για το 2050 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή διερευνά τις προκλήσεις που θέτει η επίτευξη του στόχου της ΕΕ για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού και την ανταγωνιστικότητα. Τα σενάρια που παρουσιάζονται στον ενεργειακό χάρτη πορείας για το 2050 διερευνούν διαδρομές προς την απαλλαγή του ενεργειακού συστήματος από τις ανθρακούχες εκπομπές. Όλα τα σενάρια συνεπάγονται σημαντικές αλλαγές, για παράδειγμα,

στις τιμές του διοξειδίου άνθρακα, την τεχνολογία και τα δίκτυα. Συνοπτικά, οι δέκα διαρθρωτικές αλλαγές για τον μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος είναι:

1. Η απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές είναι δυνατή και μπορεί μακροπρόθεσμα να είναι λιγότερο δαπανηρή από τις τρέχουσες πολιτικές.
2. Υψηλότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες και χαμηλότερο κόστος καυσίμων.
3. Η ηλεκτρική ενέργεια διαδραματίζει σπουδαιότερο ρόλο.
4. Οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας θα αυξάνονται έως το 2030 και ακολούθως θα φθίνουν.
5. Οι δαπάνες των νοικοκυριών θα αυξηθούν.
6. Είναι απαραίτητη η εξοικονόμηση ενέργειας σε ολόκληρο το σύστημα.
7. Σημαντική αύξηση των ΑΠΕ.
8. **Η δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα θα διαδραματίσει καίριο ρόλο στο μετασχηματισμό του συστήματος.**
9. Σημαντικό το μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας.
10. Εντεινόμενη αλληλεπίδραση μεταξύ αποκεντρωμένων και κεντρικών συστημάτων.

1.4. Εθνική Πολιτική

Η Ελλάδα υπέγραψε το Πρωτόκολλο Κιότο τον Απρίλιο του 1998, παράλληλα με ταυπόλοιπα Κράτη Μέλη της Ε.Ε. και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Όλα τα Κ-Μ της ΕΕ κύρωσαν το Πρωτόκολλο τον Μάιο 2002. Η Ελλάδα το κύρωσε με το Νόμο 3017/2002 (ΦΕΚ Α'117). Η Ελλάδα σύμφωνα με την απόφαση αυτή, δεσμεύεται να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών της στο +25% για το διάστημα 2008-2012, προκειμένου να συνεισφέρει στο κοινόστόχο της ΕΕ για 8% μείωση των εκπομπών της για το αυτό διάστημα. Προκειμένου η Ελλάδα να ανταποκριθεί στις υποχρεώσεις που απορρέουν από την κύρωση τουΠρωτοκόλλου του Κιότο (ΦΕΚ 117/Α/30-5-02) και την αντίστοιχη κοινοτική συμφωνία, τοΥ.Π.Ε.Κ.Α. προχώρησε στην εκπόνηση Εθνικού Προγράμματος μείωσης εκπομπών αερίων φαινομένου θερμοκηπίου για την περίοδο 2000-2010.

Το Πρόγραμμα αυτό συντονίζει τις δραστηριότητες του ιδιωτικού και δημόσιου τομέα με στόχο τον περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου και περιλαμβάνει δυνατές επεμβάσεις μείωσης εκπομπών, με μέτρα στους παρακάτω τομείς: οικιακό και τριτογενή τομέα, μεταφορές, βιομηχανία, ηλεκτροπαραγωγή, διαχείριση απορριμμάτων, γεωργία, βιομηχανικέςδιεργασίες. Η

υλοποίηση του Εθνικού Προγράμματος μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την περίοδο 2000-2010, το οποίο εγκρίθηκε από το Υπουργικό Συμβούλιο με την πράξη του 5/27.2.2003 (ΦΕΚ 58Α/5.3.03), εξαρτάται από τις επί μέρους δράσεις των εμπλεκομένων Υπουργείων και την μεταξύ τους συνεργασία.

Το Υ.Π.Ε.Κ.Α. (νυν ΥΠ.ΕΝ) είναι αρμόδιο βάσει του κυρωτικού νόμου του Πρωτοκόλλου του Κιότο για την εφαρμογή του και την παρακολούθηση της εφαρμογής του Εθνικού Προγράμματος. (ΥΠΕΚΑ, 2009).

1.5. Η Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων

Η **Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων (ΕΔΕΥΕΠ)** είναι αρμόδια εθνική αρχή για την εκμετάλλευση υδρογονανθράκων, των αποθηκών δέσμευσης άνθρακα, των πλωτών αιολικών πάρκων και των αποθηκών φυσικού αερίου. Στο χαρτοφυλάκιό της περιλαμβάνονται τα μεγάλα ενεργειακά έργα που ανήκουν στη **ΔΕΠΑ International** της οποίας κατέχει το **65%.**

Ιδρύθηκε το 2011 ως **Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων Α.Ε. (ΕΔΕΥ Α.Ε.)** και εδρεύει στην Αθήνα. Πλέον μετονομάστηκε σε ΕΔΕΥΕΠ και έχει ως μοναδικό μέτοχο το **Ελληνικό Δημόσιο (100%)** . Διαχειρίζεται τα δικαιώματα του Ελληνικού Δημοσίου σχετικά με την έρευνα και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων ανά την Ελληνική Επικράτεια αλλά και γενικότερα των Ενεργειακών Πόρων. Έχει τη νομική μορφή Ανώνυμης Εταιρείας (Α.Ε.) και λειτουργεί με βάση τα εταιρικά πρότυπα του ιδιωτικού τομέα.

Η ΕΔΕΥΕΠ είναι από τις 15 Απριλίου, η **αρμόδια εθνική αρχή** για την **αδειοδότηση και την παρακολούθηση έργων αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS)** καθώς και έργων αποθήκευσης άλλων αερίων και υγρών στοιχείων. Αυτό προβλέπει η τροπολογία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας που ψηφίστηκε στη Βουλή. Ειδικότερα, με το νομοσχέδιο του Υπουργείου Οικονομικών (Νόμος υπ' αριθμ. 4920/2022, ΦΕΚ Α' 74/ 15.04.2002), ψηφίστηκε στη Βουλή τροπολογία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Κεφάλαιο Β', άρθρο 228), με την οποία διευρύνεται ο σκοπός της ΕΔΕΥ Α.Ε. και αλλάζει ο ιδρυτικός της νόμος (ΕΔΕΥΕΠ-www.hydrocarbons.gr).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μεταφορά και Αποθήκευση CO_2

Εισαγωγή

Το CO_2 είναι ένα αδρανές αέριο οπότε η διαχείρισή του είναι σχετικά εύκολη. Η μεταφορά του ήδη πραγματοποιείται σε αρκετές περιπτώσεις, με σκοπό την ενίσχυση της ανάκτησης (Enhanced Oil Recovery - EOR) του πετρελαίου σε πετρελαιοπηγές.

Η μεταφορά του CO_2 είναι δυνατή με διάφορους τρόπους:

- Ως αέριο.
- Ως υγρό.
- Ως μίγμα υγρού και αερίου.
- Ως υψηλής πυκνότητας αέριο σε υψηλή πίεση (Skovholt, 1993).

Αν η δέσμευση και η αποθήκευση του CO_2 εφαρμοστεί ευρέως, το πιθανότερο είναι η μεταφορά του να γίνεται με δίκτυο αγωγών. Άλλο μέσο μεταφοράς του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα είναι με πλοία, των οποίων ο σχεδιασμός βασίζεται σε αυτά που ήδη χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του υγραερίου (LPG). Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται ψύξη του CO_2 για μείωση της πίεσης (IEA, 2002).

Μερικά βασικά κριτήρια που θα πρέπει να πληρεί μια επιλογή αποθήκευσης είναι τα παρακάτω:

- Η περίοδος αποθήκευσης θα πρέπει να είναι μακρά, κατά προτίμηση εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια.
- Το κόστος της αποθήκευσης, το οποίο συμπεριλαμβάνει το κόστος μεταφοράς απότην πηγή εκπομπής στον τόπο αποθήκευσης, να είναι ελάχιστο.
- Ο κίνδυνος ατυχήματος θα πρέπει να εξαλειφθεί.
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές.
- Η μέθοδος αποθήκευσης δεν θα πρέπει να παραβιάζει εθνικούς ή διεθνείς νόμους και κανονισμούς.

Οι σημαντικότεροι χώροι αποθήκευσης είναι, κατάλληλοι γεωλογικοί σχηματισμοί και τα μεγάλα βάθη των ωκεανών. Η γεωλογική αποθήκευση μπορεί να γίνει σε βαθύς αλατούχους σχηματισμούς (ηπειρωτικούς και θαλάσσιους), σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίουκαι

φυσικού αερίου, σε κοιτάσματα πετρελαίου για βελτίωση της ανάκτησής του και σε μη αξιοποιήσιμα κοιτάσματα άνθρακα. Η αποθήκευση στα βάθη των ωκεανών περιλαμβάνει, απευθείας έγχυση του υγρού διοξειδίου του άνθρακα στην στήλη του νερού σε ενδιάμεσα βάθη (π.χ. 3.000m) ή σε βάθη μεγαλύτερα των 3.000m, όπου το υγρό CO_2 γίνεται βαρύτερο από το νερό της θάλασσας, με αποτέλεσμα να καταβυθίζεται στον πυθμένα.

Τέλος, το δεσμευμένο CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για τη χημική βιομηχανία (Herzog *and* Golomb, 2004).

2.1. Μεταφορά του CO_2

Μετά τη δέσμευση του CO_2 στις πηγές των εκπομπών του, θα πρέπει να μεταφερθεί στους χώρους αποθήκευσης. Λόγω των μεγάλων όγκων του CO_2 η μεταφορά του απαιτεί υποδομές μεγάλης κλίμακας. Τα υφιστάμενα συστήματα μεταφοράς CO_2, μεταφέρουν ετησίως εκατομμύρια τόνους σε μεγάλες αποστάσεις στην ξηρά -κυρίως στις ΗΠΑ- με **αγωγούς** υψηλής πίεσης. Ο σκοπός της μεταφοράς είναι για χρήση στη βιομηχανία ανάκτησης πετρελαίου (EOR). Η χρήση CO_2 σε EOR διαδικασίες, έχει το πλεονέκτημα ότι το CO_2 αποκτά προστιθέμενη αξία. Για παράδειγμα, πετρελαιοπαραγωγοί στις ΗΠΑ προθυμοποιούνται να πληρώνουν πάνω από 15$/t CO_2 που τους παραδίδεται προς χρήση σε EOR εγκαταστάσεις.

Άλλα μέσα μεταφοράς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι:

1.Φορτηγά μεγάλης χωρητικότητας. Αποτελούν την πιο κοινή εναλλακτική λύση για μεταφορά προϊόντων με βάρος λιγότερο των πέντε τόνων, εξαιτίας της αξιοπιστίας, της προσαρμογής και της ευελιξίας που παρέχει ο τρόπος αυτός.

2.Τραίνα με ειδικά προσαρμοσμένα βαγόνια μπορούν να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες CO_2 σε μεγάλες αποστάσεις.

3.Αεριοφόρα πλοία τα οποία αποτελούν τον πιο κατάλληλο τρόπο για θαλάσσια μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Το πλεονέκτημα του τρόπου αυτού, είναι η δυνατότητα μεταφοράς πολύ μεγάλων ποσότητων CO_2 (Κούκουζας *κ.α.*, 2005).

Εκτός από τους αγωγούς, οι εφαρμογές των άλλων μέσων μεταφοράς CO_2 συναντώνται κυρίως στον τομέα των τροφίμων και των αναψυκτικών. Οι μεταφερόμενοι όμως όγκοι είναι της τάξης των 100.000 τόνων CO_2 ετησίως, δηλαδή ποσότητες πολύ μικρότερες από αυτές που αφορούν τη CCS.

Οι συνθήκες μεταφοράς του CO_2 έχουν πολλές ομοιότητες με εκείνες που αφορούν σεμεταφορά υγραερίου (LPG), το οποίο μεταφέρεται με ειδικά κατασκευασμένα πλοία, τρένα και φορτηγά. Ως εκ τούτου, η εμπειρία που υπάρχει από τη μεταφορά LPG, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία υποδομών μεταφοράς CO_2 σε μεγάλη κλίμακα.
Στο κεφάλαιο 6, από την παρουσίαση στοιχείων της βιβλιογραφίας και σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελετών προκύπτει ότι, μόνο τρεις εναλλακτικές επιλογές θα μπορούσαν να έχουν εφαρμογή στην τάξη μεγέθους που ερευνάται:

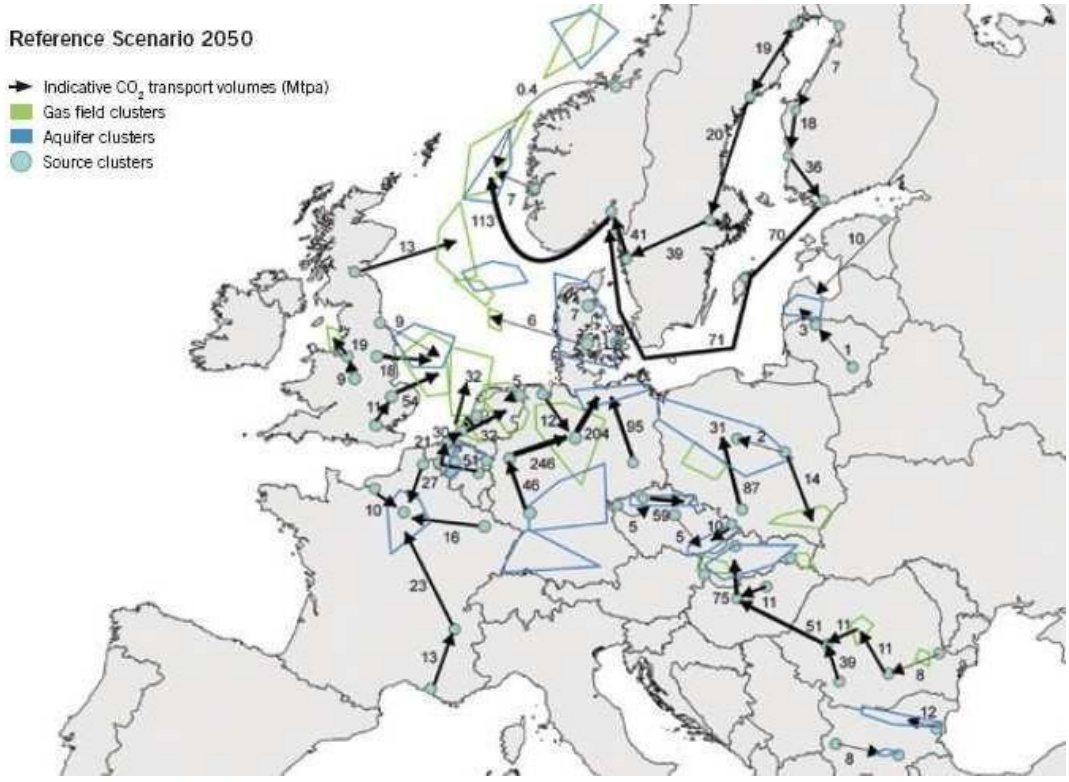
1. Αγωγοί για χερσαία και θαλάσσια μεταφορά (on και off-shore pipelines).
2. Μεταφορά με πλοία (off-shore).
3. Συνδυασμός των παραπάνω επιλογών (Svensson et al., 2004).

2.2.1. Αγωγοί μεταφοράς CO_2

Οι αγωγοί είναι και πιθανόν θα συνεχίσουν να είναι, η κύρια μέθοδος μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων CO_2 από εφαρμογές CCS. Η μεταφορά μέσω αγωγών είναι γενικά μια καθιερωμένη πρακτική, τόσο στην ξηρά όσο και υποθαλάσσια. Στις Ηνωμένες Πολιτείες μόνο, υπάρχουν περίπου 800.000km αγωγών μεταφοράς επικίνδυνων υγρών και φυσικού αερίου, από τα 3 εκατομμύρια χιλιόμετρα αγωγών ορυκτών αερίων που υπάρχουν, που βρίσκονται κυρίως σε βιομηχανικές περιοχές στην Ασία, την Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική (Hydrogen Analysis Resource Center, 2016). Σε λειτουργία βρίσκονται περισσότερα από 6.000km αγωγών που μεταφέρουν CO_2, η πλειοψηφία των οποίων βρίσκεται στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το δίκτυο αυτό μεταφέρει περίπου 50Mtpa εκπομπών CO_2 και έχει αναπτυχθεί τα τελευταία 50 χρόνια. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, το μέγεθος της υποδομής των αγωγών που απαιτούνται για την πλήρη ανάπτυξη και καθιέρωση της διαδικασίας CCS στις Ηνωμένες Πολιτείες θα εκτείνεται περίπου έως 58.000km μέχρι το 2050.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα CO_2 Europipe (χρηματοδοτήθηκε από την Ε.Ε. στα πλαίσια του 7^{ου} Προγράμματος Πλαισίου), το συνολικό μήκος των αγωγών που θα απαιτηθεί για την ανάπτυξη της CCS στην ΕΕ και τη Νορβηγία για θαλάσσια και χερσαία αποθήκευση ήταν περίπου 2.300km μέχρι το 2020, θα είναι 15.000km μέχρι το 2030 και 22.000km μέχρι το 2050 (Σχήμα 5.2.1.1, Global CCS Institute, 2011). Οι εκτιμήσεις αυτές δεν περιλαμβάνουν το μήκος των αγωγών που απαιτούνται για τη σύνδεση μεμονωμένων έργων με το κύριο δίκτυο αγωγών. Οι χώρες με το μεγαλύτερο μήκος αγωγών που θα πρέπει να κατασκευαστεί είναι η Γερμανία, η

Νορβηγία και η Πολωνία, κυρίως λόγω των μεγάλων ποσοτήτων CO_2 που θα μεταφέρονται, απαιτώντας σε κάποιες περιπτώσεις παράλληλα δίκτυα. Η Γαλλία, οι χώρες γύρω από τη Βαλτική Θάλασσα, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ρουμανία θα πρέπει να διαθέτουν δίκτυο αγωγών μεταφοράς CO_2 σε λειτουργία έως το 2030. Στην πραγματικότητα, για πολλά κράτη μέλη της Ε.Ε. η μεγαλύτερη προσπάθεια για την κατασκευή αγωγών απαιτείται μεταξύ των ετών 2020 έως 2030, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου θα πρέπει να λειτουργεί μέχρι το 2030. Για επιτευχθεί τέτοιου είδους ανάπτυξη, ο ρυθμός κατασκευής των αγωγών θα κυμαίνεται περίπου από 1.200 έως 1.500km το χρόνο. Όπως και οι Ηνωμένες Πολιτείες έτσι και η Ευρώπη μπορεί να καλύψει τους στόχους κατασκευής των απαιτούμενων αγωγών.



Σχήμα 2.2.1.1: Όγκοι και διαδρομές μεταφοράς CO_2 στην Ευρώπη (Σενάριο αναφοράς: CO_2 Europipe 2050)
(Πηγή: Global CCS Institute, 2011)

Η υλοποίηση των πρώτων έργων το πιθανότερο είναι να στηριχθεί κυρίως ή αποκλειστικά, σε μεταφορές από σημείο σε σημείο μέσω μεμονωμένων αγωγών. Οι εκτιμήσεις σχετικά με τη μελλοντική δυναμικότητα μεταφοράς CO_2 λαμβάνουν υπόψη την ανάπτυξη δικτύων και κόμβων.

2.2.2. Η Ναυτιλία στην μεταφορά CO_2

Οι Κάτω Χώρες και η Νορβηγία, και ειδικότερα η Northen Lights, η SINTEF και η STATOIL [64] , έχουν ξεκινήσει έργα στην Ευρώπη, ενώ στην Άπω Ανατολή –κυρίωςΙαπωνία και Κορέα – μια σειρά έργων σημαίνει ότι αυτές οι χώρες έχουν γίνει βασικοίπαίκτες στην E&A σε μεγάλες κλίμακα αποστολής διοξειδίου του άνθρακα [48] , [57] , [65] . Από το 2015, το 60% της βιβλιογραφίας σχετικά με τη ναυτιλία CO_2 δημοσιεύτηκε στην Ευρώπη, ενώ το 35% της βιβλιογραφίας προερχόταναπό την Άπω Ανατολή [54] . Ωστόσο, η μεταφορά CO_2 με βάση τους μεταφορείς έχει δημιουργήσει διαφορετικές απόψεις από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων τα τελευταία χρόνια. Από το 2012, η μεταφορά CO_2 μέσω πλοίων θεωρήθηκε από το τότε

«Υπουργείο Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής» στο Ηνωμένο Βασίλειο ότι απαιτούσε βραχυπρόθεσμη έρευνα και ανάπτυξη προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι μεταφορές [66] . Ωστόσο, πιο πρόσφατα, η έκθεση «Ο ρόλος του CCUS στο σενάριο κάτω των 2 μοιρών» [62] πρότεινε ότι η εγγύς μελλοντική εφαρμογή του CCUS θα απαιτήσει έως και 600 θαλάσσια πλοία και θα δημιουργήσει έως και 10.000 θέσεις εργασίας, με τις νορβηγικές εταιρείες να είναι οι περισσότερες είναι πιθανό να επωφεληθούν από τέτοιες ευκαιρίες. Ομοίως, η βρετανική κυβέρνηση διαπίστωσε ότι ηυποδομή μεταφορών CO_2 , η οποία περιλαμβάνει τη ναυτιλία, είναι απαραίτητη για τηνυποστήριξη της ανάπτυξης του CCUS στο Ηνωμένο Βασίλειο [38] .

Ένα αντίθετο μοτίβο παρατηρείται στη Βόρεια Αμερική, όπου το εκτεταμένο δίκτυο αγωγών και η παρουσία χερσαίων τοποθεσιών EOR περιορίζουν την εστίαση της E&Aστη ναυτιλία CO_2, ευνοώντας έτσι την υλοποίηση αγωγών [34] . Η ναυτιλία έχει χρησιμοποιηθεί την τελευταία δεκαετία για τη μεταφορά σχετικά μικρών ποσοτήτων υγρού CO_2 ποιότητας τροφίμων στα 1,5–2 MPa και 243K [8] , [36] , [38] , [56] , [61] . Ωστόσο, για να γίνει επιλογή για μεταφορά μεγαλύτερων όγκων, η βιβλιογραφία προτείνει ότι οι πραγματικές συνθήκες πρέπει ναείναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο τριπλό σημείο (~0,7 MPa και 223K) [36] , [38] ,[41] , [51] , [56] , [67] , [68] , [69] , [70] .

Η ναυτιλία έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει σημαντική δυνατότητα απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές για έναν ευρύτερο αριθμό μικρών βιομηχανιών λόγω της υψηλής ευελιξίας της στην αντιστοίχιση πηγής-βύθισης [13] , και να επεκτείνει τα

οφέλη του CCUS σε εκείνες τις χώρες όπου η εφαρμογή ενός δικτύου μεταφορών που βασίζεται σε αγωγούς είναι ουσιαστικά ανέφικτη λόγω της τάσης για φυσικές καταστροφές (π.χ. σεισμούς) όπως η Κορέα και η Ιαπωνία [37] , [59] . Επιπλέον, οι φορείς CO_2 βρέθηκαν να είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι λόγω της αυξημένης χρήσης υπεράκτιων τοποθεσιών καταβόθρων, όπως οι υδροφοροι ορίζοντες άλατος ή οι περιοχές με εξάντληση υδρογονανθράκων [59] .

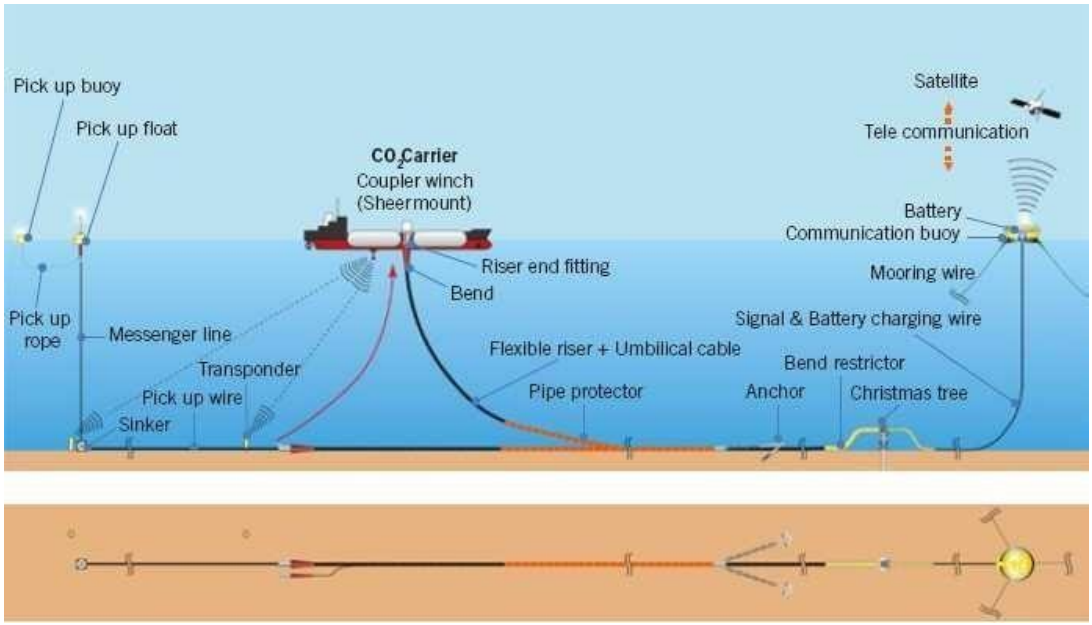
Στη Νορβηγία, ένας σημαντικός αριθμός πηγών βρίσκεται πάνω ή κοντά στην ακτή καιμια ήδη καθιερωμένη ναυτική παράδοση έχει δημιουργήσει ένα κατάλληλο περιβάλλονγια τη ναυτιλία CO_2 [56] . Στο Ηνωμένο Βασίλειο, το Υπουργείο Επιχειρήσεων, Ενέργειας και Βιομηχανικής Στρατηγικής διερευνά ενεργά την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε σχέση με τοποθεσίες που απομονώνονται από υποδομές μεταφοράς καιαποθήκευσης CO_2 στη Βρετανική Βόρεια Θάλασσα [30] .

Συνοπτικά, με το CCUS να γίνεται αντιληπτό ως κίνδυνος λόγω οικονομικής αβεβαιότητας, η μεταφορά πλοίων προσφέρει ευελιξία όσον αφορά τις πηγές και τους προορισμούς για την υλοποίηση της σύλληψης, τις διακυμάνσεις των διαδρομών του CO_2 που μεταφέρεται, τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των πλοίων και επίσης σύντομη εγκατάσταση φορές [50] . Αντίθετα, η υψηλή επένδυση κεφαλαίου των αγωγών αντιπροσωπεύει ένα μειωμένο κόστος με λίγες ευκαιρίες για επαναχρησιμοποίηση τέτοιων υποδομών. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν επί του παρόντος έργα επίδειξης που να χρησιμοποιούν τη ναυτιλία για τη μεταφορά CO_2 [61] ,αν και ένα έργο (Northen Lights), επίδειξης πλήρους κλίμακας CCUS που αναπτύσσει πλοία για μεταφορά διοξειδίου του άνθρακα που ξεκίνησε από τη Νορβηγία έχει εισέλθει σύντομα στο στάδιο υλοποίησης [71] .

2.2.2.1 Πλοία μεταφοράς CO_2

Αν και η πλειοψηφία των δικτύων μεταφοράς CO_2 αναμένεται να χρησιμοποιεί αγωγούς, για κάποιες περιπτώσεις η μεταφορά με πλοία θα μπορούσε να αποτελεί εναλλακτική επιλογή. Η μεταφορά CO_2 εφαρμόζεται ήδη, αλλά σε πολύ μικρή κλίμακα. Προς το παρόν, τέσσερα μικρά πλοία μεταφέρουν CO_2 (περίπου 1.000tn) για χρήση στη βιομηχανία τροφίμων, από τα σημεία που παράγεται, σε παράκτια

κέντρα διανομής στην Ευρώπη. Η χρήση πλοίων για μεταφορά μεγάλων όγκων CO_2 έχει πολλά κοινά σημεία με τη μεταφορά υγραερίου (LPG), αντικείμενο στο οποίο υπάρχει τεχνογνωσία για περισσότερο από 70 χρόνια. Ο σχεδιασμός πλοίων που θα είναι ικανά να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες CO_2, βρίσκεται σε εξέλιξη στη Νορβηγία και την Ιαπωνία. Τα πλοία αυτά, αναμένεται να έχουν παρόμοιο σχεδιασμόμε τα πλοία ψυγεία που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά LPG σε θερμοκρασίες των -50°C περίπου. Η δυναμικότητα μεταφοράς τέτοιων πλοίων θα κυμαίνεται από 10.000 έως 40.000m^3 και σχέδιά τους παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3. Στο σχήμα 2.2.2.1.1 παρουσιάζεται απλοποιημένη η απόθεση CO_2 από πλοίο.



Σχήμα 2.2.2.1.1: Απόθεση CO_2 από πλοίο
(Πηγή: Global CCS Institute, 2011)

Το πρόγραμμα CO_2 Europipe, εξέτασε τα σχετικά πλεονεκτήματα των αγωγών σε σχέση με τα πλοία για τη μεταφορά του CO_2 και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ναυτιλία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε δύο περιπτώσεις:

1. Κατά την έναρξη λειτουργίας των εφαρμογών CCS και όσο χρόνο απαιτείταιγια το σχεδιασμό και την κατασκευή των αγωγών. Όταν οι αγωγοί παραδοθούν

προς χρήση, τα πλοία, θα μετασκευαστούν για να χρησιμοποιηθούν σε άλλες εμπορικέςδραστηριότητες ή θα λειτουργούν συμπληρωματικά ως προς τους αγωγούς διασφαλίζοντας την ασφάλεια λειτουργίας των έργων ή θα χρησιμοποιηθούν για την αξιοποίηση χώρων αποθήκευσης μικρότερης δυναμικότητας.

2. Για έργα αποθήκευσης στα οποία η τροφοδότηση με CO_2 μέσω πλοίων είναι η πιο αποδοτική λύση.

Η θέση μιας πηγής εκπομπής είναι σημαντικός παράγοντας για το εάν οι θαλάσσιες μεταφορές μπορούν να συνεισφέρουν στη μεταφορά CO_2 από την συγκεκριμένη πηγή.Οι πηγές θα πρέπει να είναι κοντά:

- Στην ακτή, έτσι ώστε οι εκπομπές του CO_2 να μπορούν να υγροποιούνται αμέσως πριν από την αποθήκευση και τη φόρτωση στα πλοία .
- Σε άλλες πηγές εκπομπών CO_2, αυξάνοντας την ποσότητα παροχής CO_2 και μειώνοντας τον κίνδυνο τα πλοία να τίθενται σε αδράνεια.
- Σε σημαντική θαλάσσια διαδρομή, όπου πηγές με χαμηλότερες εκπομπές CO_2 που βρίσκονται σε κοντινά νησιά, θα τροφοδοτούν το κυρίως σημείο φόρτωσηςτων πλοίων με μικρότερα πλοία.

Στα επόμενα κεφάλαια, θα δούμε πως συγκρίνοντας το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς CO_2 μεταξύ πλοίων και αγωγών, φαίνεται ότι οι αγωγοί είναι η πιο οικονομική λύση, όταν οι πηγές και οι χώροι αποθήκευσης βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Με την αύξηση της απόστασης, το κόστος των αγωγών (κυρίως κεφαλαιουχικέςδαπάνες) αυξάνει σταδιακά και μπορεί να κάνει τη μεταφορά με πλοία μια πιο ανταγωνιστική επιλογή. Επίσης, η μεταφορά με πλοία αποτελεί μια πιο ευέλικτη λύση,διότι μπορεί να εξυπηρετήσει πολλές διαφορετικές πηγές ή/και διαφορετικούςχώρους αποθήκευσης. Στην Ευρώπη η μεταφορά CO_2 με πλοία είναι σημαντική διότι ένα μεγάλο μέρος των χώρων αποθήκευσης είναι παράκτιο, όπως τα σημεία εξόρυξης πετρελαίουκαι φυσικού αερίου στη Βόρεια Θάλασσα και θα μπορούσε να συνδυάζεται με τη χρήση του CO_2 για EOR διαδικασίες.

Ενώ ένα μεγάλο μέρος της αποθηκευτικής ικανότητας της δυτικής Ευρώπης είναι υπεράκτιο, υπάρχει ήδη ένα εκτεταμένο δίκτυο αγωγών πετρελαίου και αερίου στη Βόρεια Θάλασσα, μέρος του οποίου μπορεί στο μέλλον, να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά CO_2. Έτσι, ενώ η ναυτιλία μπορεί να διαδραματίσει τελικά σημαντικό ρόλο

στον τομέα των μεταφορών CO_2, το πιθανότερο είναι οι αγωγοί να αποτελούν την πρώτη επιλογή στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι αγωγοί όμως, δεν είναι δυνατό να αποτελούν επιλογή σε πολλές χώρες που έχουν σημαντικές πηγές κοντά στην ακτή, αλλά δεν έχουν μεγάλες δυνατότητες αποθήκευσησε περιοχές κοντά στη θάλασσα. Γιαπαράδειγμα για την Ιαπωνία, η μεταφορά CO_2 με πλοία μπορεί να είναι η καλύτερη επιλογή. (Global CCS Institute, 2011).

2.3. Αποθήκευση CO_2

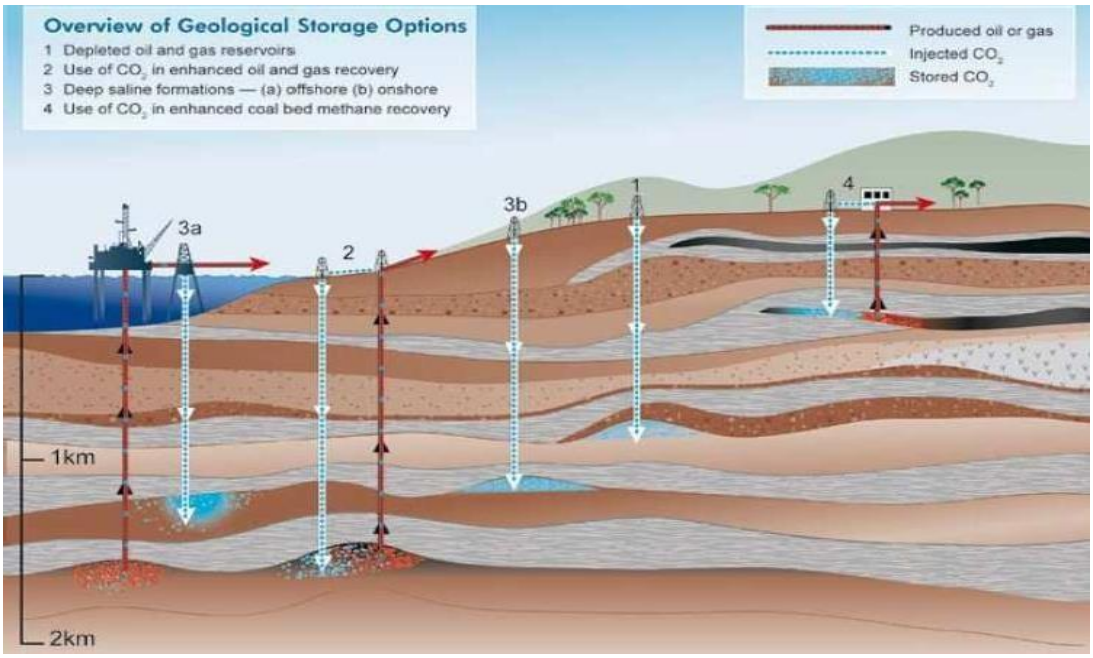
Σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, η αποθήκευση του δεσμευμένου CO_2 είναι εφικτή σε ωκεανούς ή υπόγειες φυσικές δεξαμενές και μάλιστα με την υπάρχουσα τεχνολογία. Αυτό το στάδιο της διεργασίας θα είναι σε κάθε περίπτωση πολύ πιο οικονομικό από αυτό της δέσμευσης από το καυσαέριο. Ωστόσο, όλες οι δυνατές επιλογές αποθήκευσης εξαρτώνται σημαντικά από τη γεωγραφική περιοχή καιείναι αρκετές οι αβεβαιότητες προς τοπαρόν, σχετικά με τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Γενικά ισχύει, ότι οι επιλογές αποθήκευσης είναι ανεξάρτητες από το είδοςτου σταθμού από τον οποίο προέρχεται το CO_2 καθώς και από το είδος της τεχνολογίαςδέσμευσης. Για την αποθήκευση απαιτούνται μεγάλες δεξαμενές, γεγονός που αυτόματα στρέφει την προσοχή στη χρήση των φυσικών δεξαμενών (Riemer *and* Ormerod, 1995).

Όπως έχει αναφερθεί, οι σημαντικότερες επιλογές αποθήκευσης (βλ. σχήμα 2.3.1) είναι:

- Αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου (EOR).
- Αποθήκευση σε ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου που ήδη έχουνεκκενωθεί και σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους.
- Αποθήκευση σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα (ECBMR).
- Αποθήκευση σε ωκεανούς μέσω αγωγού ή μέσω πλοίου.
- Αποθήκευση μέσω ορυκτοποίησης (mineralization).

Η χωρητικότητα αυτών των ταμιευτήρων παγκοσμίως έχει εκτιμηθεί με κατάλληλες προσομοιώσεις από διάφορα ινστιτούτα και επιστημονικά εργαστήρια. Έτσι υπολογίστηκε η χωρητικότητα για τους υδροφόρους ορίζοντες περίπου στους 400- 10.000Gt CO_2, για τους ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου περίπου στους

473-1.152Gt CO_2, ενώ για τα στρώματα κοιτασμάτων μη εξορυγμένου γαιάνθρακαπερίπου στους 5-267Gt CO_2. (Κούκουζας *κ.α.*, 2005).



Σχήμα 2.3.1: Επισκόπηση των επιλογών αποθήκευσης CO_2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς
(Πηγή: IPCC, 2005)

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η χωρητικότητα των επιλογών αποθήκευσης του CO_2 σε παγκόσμιο επίπεδο. Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα με τις ετήσιες εκπομπές του CO_2 από την καύση ορυκτών καυσίμων στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής -περίπου 24Gt CO_2/y για το έτος 2001, (Κούκουζας *κ.α.*, 2005) η αποθήκευση εμφανίζεται να αποτελεί διαθέσιμηεπιλογή με ευρύ χρονικό ορίζοντα.

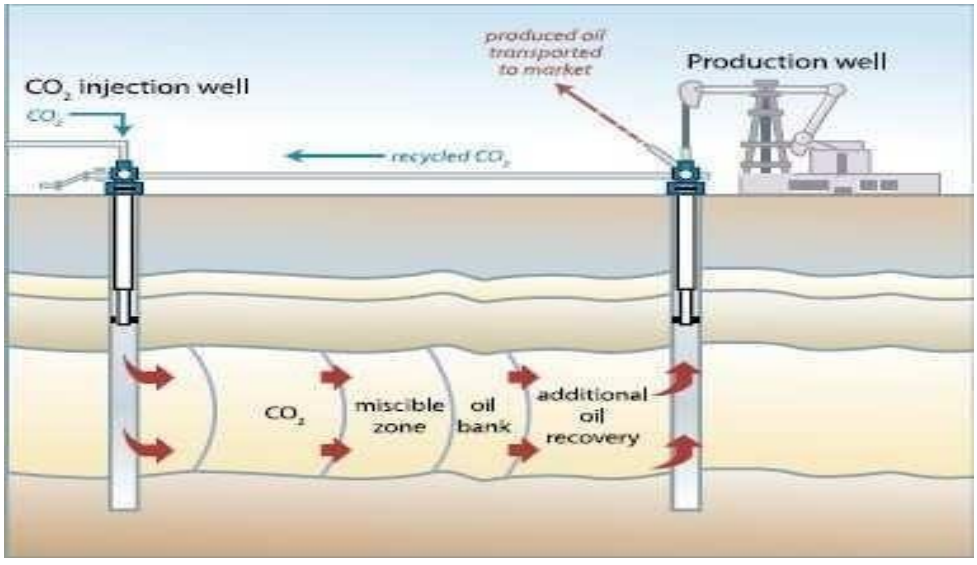
	Turkenburg 1999	Hendriks 1994	IPCC 2001/ ARC 2000	Stevens 2000	ECOFYS, TNO 2004
Κοιτάσματα πετρελαίου	500-1800	385	370	126	242
Κοιτάσματα φυσικού αερίου		1500	1500	800	910
ECBM	na	na	150	na	267
Υδροφόροι ορίζοντες	na	200	4000	na	247

Πίνακας 2.1.: Παγκόσμια χωρητικότητα γεωλογικών ταμιευτήρων για αποθήκευση CO_2
(Πηγή: Κούκουζας κ.α., 2005)

Το μεγάλο εύρος που παρατηρείται στις εκτιμήσεις της χωρητικότητας της κάθε επιλογής αποθήκευσης, αποτελεί έναν ακόμη λόγο για περαιτέρω έρευνα ώστε να μειωθεί η αβεβαιότητα και να καθοριστούν οι αντίστοιχες χωρητικότητες με μεγαλύτερη ακρίβεια. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι είναι τελικά δυνατή η εκτίμηση του ποσοστού στο οποίο μπορεί να γίνει εκμετάλλευση της κάθε μιας από τις επιλογές (Herzog *et al.*, 1997).

2.3.1. Αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου (EOR)

Η τεχνική της βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery) χρησιμοποιείται σε ταμιευτήρες που έχουν σχεδόν εκκενωθεί ή σε ταμιευτήρες πετρελαίου υψηλού ιξώδους. Αυτή η τεχνική έχει την δυνατότητα όχι μόνο να αυξάνει την ανάκτηση του πετρελαίου, αλλά να αποθηκεύει στον ταμιευτήρα και την ποσότητα του CO_2 που χρησιμοποιείται.
Πρόκειται για εισαγωγή του CO_2 σε υπερκρίσιμη κατάσταση (P >7.38MPa και T >-60°C) σε ενεργούς ταμιευτήρες η οποία προκαλεί αύξηση της κινητικότητας του πετρελαίου και έχει



Σχήμα 2.3.1.1: Βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου χρησιμοποιώντας CO_2
(Πηγή: IPCC, 2005)

ως αποτέλεσμα την πιο εύκολη ανάκτηση του. Ένα ποσοστό του εισαγόμενου CO_2 θαανακτηθεί πάλι μαζί με το πετρέλαιο, θα διαχωριστεί απ' αυτό με την κατάλληλη διεργασία και θα εισαχθεί και πάλι στον ταμιευτήρα. Υπάρχουν διεργασίες EOR όπου το CO_2 μπορεί να είναι αναμίξιμο ή όχι. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την πίεση με την οποία το CO_2 θα εισαχθεί στον ταμιευτήρα. Με τη μέθοδο αυτή (CO_2 EOR) η οποία ονομάζεται τριτογενής εξόρυξη, μπορεί να αυξηθεί η παραγωγή του πετρελαίου 10% με 15% κατά προσέγγιση (Κούκουζας *κ.α.*,2005).

2.3.2. Αποθήκευση σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου

Οι ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου που ήδη έχουν εκκενωθεί παρουσιάζονται ως η πιο ελπιδοφόρα επιλογή αποθήκευσης στο προσεχές μέλλον. Αυτό γιατί οι ταμιευτήρες αυτοί έχουν αποδείξει την ικανότητα τους να διατηρούν υγρά ή αέρια σε υψηλές πιέσεις για μεγάλα διαστήματα χρόνου (Κούκουζας *κ.α.*, 2005). Επίσης, το κόστος εξερεύνησής τους είναι αρκετά χαμηλό, η γεωλογία τους είναι γνωστή και υπάρχει η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τμήματος του εξοπλισμού της παραγωγής υδρογονανθράκων για τη μεταφορά και την έκχυση του CO_2. (Freund *and* Ormerod, 1997). Ουσιαστικά εξασφαλίζεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό η ασφάλεια της αποθήκευσης που θα πραγματοποιηθεί.

Οι εξαντλημένες πηγές αερίων αποτελούν αξιόλογη επιλογή αποθήκευσης αφού η πρωταρχική ανάκτηση συμβαίνει σε ποσοστό περίπου 95% και οι περισσότερες είναι κλειστές. Η περίπτωση

των ταμιευτήρων πετρελαίου δεν είναι ακριβώς ίδια με αυτή των ταμιευτήρων φυσικού αερίου. Συχνά δεν είναι εξαντλημένοι, αλλά μόνο μέρος του περιεχόμενου πετρελαίου έχει ανακτηθεί (ποτέ δε συμβαίνει σε τόσο μεγάλα ποσοστά όσο η ανάκτηση αερίων και μπορεί να είναι από 5% ως και 75%) με αποτέλεσμα να παραμένει αρκετά μεγάλη η ποσότητα πετρελαίου. Συνήθως η απόρριψη του CO_2 σε εξαντλημένες πηγές πετρελαίου σχετίζεται με διεργασίες ανάκτησης πετρελαίου (CO_2 EOR).

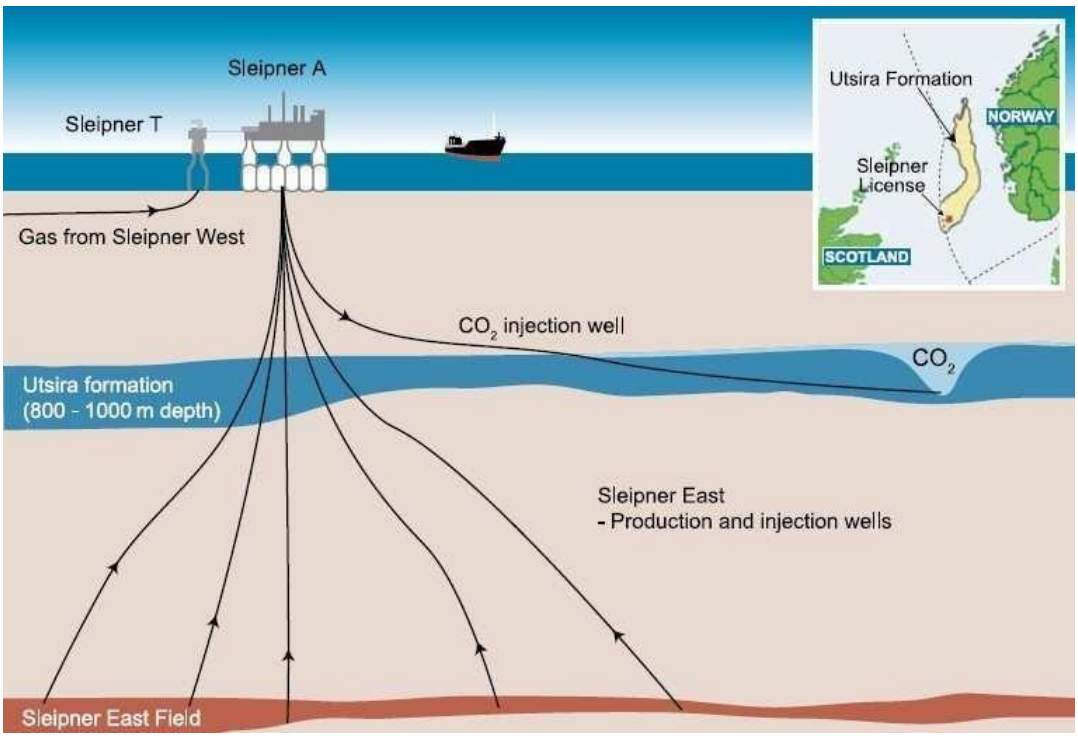
Αρκετές είναι οι μελέτες που πραγματοποιούνται με σκοπό να γίνει εκτίμησητης πιθανότητας να υπάρξει διαρροή σε ένα τέτοιο έργο, αλλά και των επιπτώσεων που θα είχε αυτό αν συνέβαινε (Herzog *and* Golomb, 2004).

2.3.3. Αποθήκευση σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες

Η βασική αρχή που σχετίζεται με όλες τις επιλογές υπόγειας αποθήκευσης CO_2 είναι ότι πραγματοποιείται αποθήκευσή του σε κάποια γεωλογική δομή όπου αυτό παγιδεύεται και με τον τρόπο αυτό αποτρέπεται η ελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα. Η δομή στην οποία θα γίνειη αποθήκευση πρέπει να αποτελείται από ένα διαπερατό στρώμα, ώστε να επιτρέπεται ηείσοδος του CO_2 και ένα μη διαπερατό ώστε να αποτρέπεται στη συνέχεια η διαφυγή τουστην ατμόσφαιρα.

Οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες αποτελούν ιζηματογενείς λεκάνες όπου περιέχονται ανθρακικές ενώσεις και σχηματισμοί αμμόλιθων. Το πορώδες του ορυκτού καθορίζει και τη χωρητικότητα αποθήκευσης της κλίνης (IEA, 2001a).

Οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες έχουν τη μέγιστη δυνατότητα αποθήκευσης του CO_2,αφού οι ταμιευτήρες αυτοί είναι οι πιο διαδεδομένοι και έχουν την μεγαλύτερη χωρητικότητα (Κούκουζας *κ.α.*, 2005). Η υπόγεια αποθήκευση CO_2 σε αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα, εφαρμόστηκε από την εταιρεία Statoil (νυν Equinor) στη Βόρεια Θάλασσα, περίπου 250Km από τις ακτές της Νορβηγίας. Το έργο Sleipneraποτελεί την πρώτη μεγάλης κλίμακας εμπορική εφαρμογή αποθήκευσης CO_2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς, εξακολουθεί από το 1993 έως και σήμερα και παρουσιάζεται απλοποιημένα στο σχήμα 2.3.3.1.



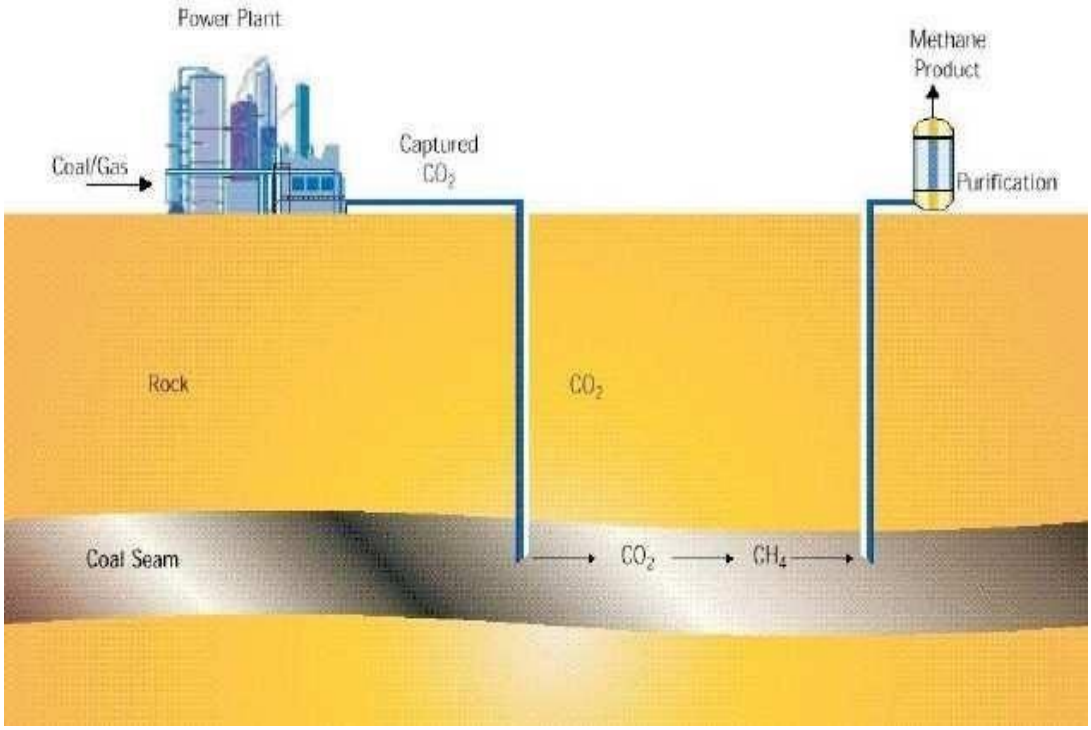
Σχήμα 2.3.3.1: Αποθήκευση CO_2 στον αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα μεγάλου βάθους Utsira

(Πηγή: IPCC, 2005)

Κατάλληλες περιπτώσεις τέτοιων ταμιευτήρων είναι αυτές που παρουσιάζουν μια σχετικά μικρή πιθανότητα διαρροής λόγω της ύπαρξης μη διαπερατού τοιχώματος. Η έκχυση θα πρέπει να πραγματοποιείται σε βάθος μεγαλύτερο των 800m ώστε να είναι σε πυκνή φάση. Η έγχυση του CO_2 σε τέτοιες περιπτώσεις πραγματοποιείται όπως ακριβώς και στην περίπτωση των εξαντλημένων πηγών φυσικού αερίου και πετρελαίου. Η εμπειρία σε έκχυση CO_2 από τις εφαρμογές ανάκτησης πετρελαίου (EOR), είναι αρκετή ώστε να θεωρείται η επιλογή της αποθήκευσης σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες πραγματοποιήσιμη. Παρόλο που τέτοιοι σχηματισμοί παρουσιάζονται σχεδόν παντού, πληροφορίες υπάρχουν μόνο για εκείνους που περιέχουν υδρογονάνθρακες ή όπου έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες εξαγωγής πετρελαίου ή φυσικού αερίου (IEA, 2001b). Ο χρόνος αποθήκευσης σε τέτοιους σχηματισμούς είναι της τάξης εκατομμυρίων ετών .

2.3.4. Αποθήκευση σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάθρακα (ECBMR)

Η διαδικασία αφορά την αποθήκευση του CO_2 σε κοιτάσματα άνθρακα τα οποία δεν είναι εκμεταλλεύσιμα εμπορικά. Το CO_2 εισάγεται στα κοιτάσματα, απορροφάται στις επιφάνειες των στρωμάτων άνθρακα ελευθερώνοντας μεθάνιο, το οποίο μπορεί να ανακτηθεί έπειτα σαν αέριο. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποθήκευσης παρουσιάζεται απλοποιημένα στο σχήμα 2.3.4.1.



Σχήμα 2.3.4.1: Αποθήκευση CO_2 σε κοιτάσματα άνθρακα και ενίσχυση ανάκτησης CH_4

(Πηγή: IEA, 2001a)

Ουσιαστικά πρόκειται για αντικατάσταση του μεθανίου που υπάρχει στον άνθρακα. Η διαδικασία εξόρυξης μεθανίου με αποσυμπίεση, εφαρμόζεται αρκετά χρόνια με απόδοση περίπου 50% σε σχέση με το μεθάνιο που υπάρχει στο κοιτάσμα του άνθρακα.

Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι τα κοιτάσματα αυτά μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες CO_2 από τον ισοδύναμο όγκο ενός συμβατικού ταμιευτήρα λόγω του ότι ο άνθρακας έχει μεγαλύτερες περιοχές επιφάνειας.

Κατάλληλοι σχηματισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπάρχουν παγκοσμίως. Αρκετά

είναι τα ορυχεία άνθρακα στην Αυστραλία, τη Ρωσία, την Κίνα, την Ινδία και άλλες χώρες, τα οποία εκτιμάται ότι παρουσιάζουν καλές προοπτικές για την δημιουργία μονάδων αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, και ανάκτησης μεθανίου (Herzog *and* Golomb, 2004).

2.3.5. Αποθήκευση σε ωκεανούς

Το CO_2 είναι περισσότερο διαλυτό στο θαλασσινό νερό από ότι στο γλυκό διότι έχει υψηλότερο pH (6-8), ώστε να αποκαθίσταται ισορροπία. Στο θαλασσινό νερό μόνο 1% του CO_2 παραμένει ως μοριακό ενώ περισσότερο από 90% εμφανίζεται με μορφή δισανθρακικού ιόντος. Το δισανθρακικό με το ανθρακικό ιόν και το ανθρακικό οξύ αποτελούν το διαλυμένο ανόργανο άνθρακα.

Το θερμό νερό της επιφάνειας είναι κορεσμένο σε CO_2 αλλά των βαθύτερων στρωμάτων είναι ακόρεστο και έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα για διάλυση με αποτέλεσμα να υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης επιπλέον CO_2.

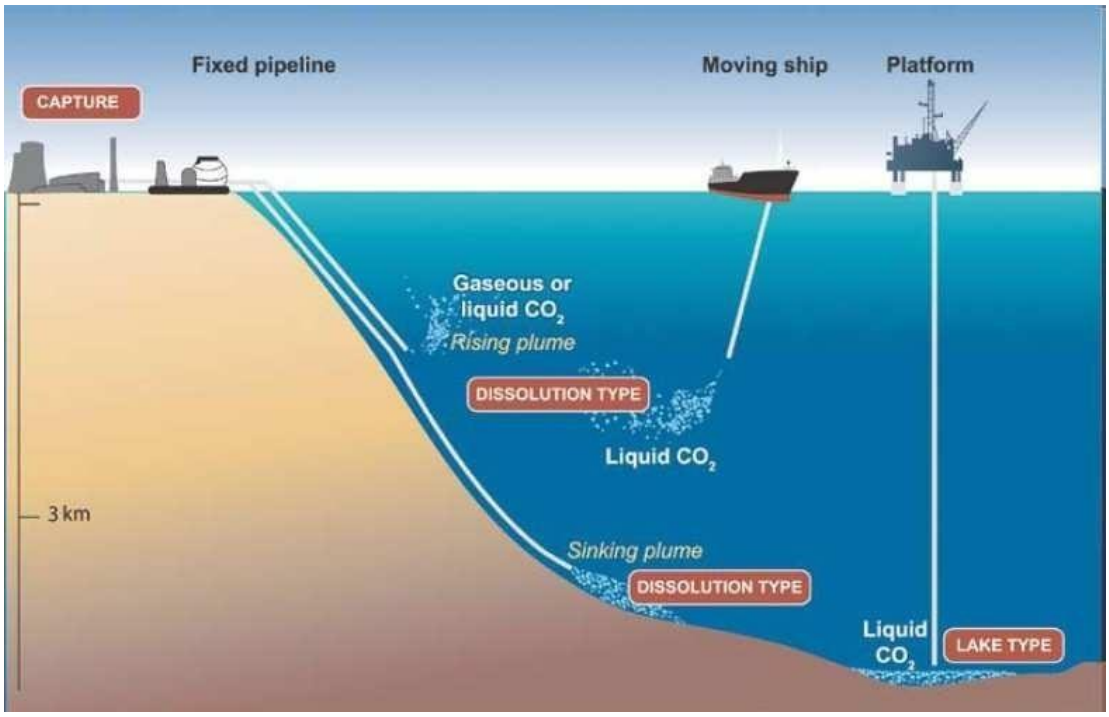
Η μεταφορά του CO_2 από την ατμόσφαιρα στα βάθη των ωκεανών γίνεται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος σχετίζεται με τη διαλυτότητα όπου η διαφορά τιμής οδηγεί σε μετακίνηση μαζών, ενώ ο δεύτερος με τις διεργασίες ανάπτυξης και αναπαραγωγής του φυτοπλαγκτόν που χρησιμοποιεί για τη φωτοσύνθεση το διαλυμένο στην επιφάνεια CO_2. Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός κύκλου διεργασίας για κάθε έναν από τους δύο αυτούς μηχανισμούς μεταφοράς, είναι περίπου 1.000 χρόνια.

Η διαδικασία μετακίνησης από το βάθος ωκεανών στην ατμόσφαιρα είναι επίσης αργή, οπότε το CO_2 μπορεί να μείνει αποθηκευμένο για μεγάλα χρονικά διαστήματα (IEA, 2002).

Για την απόθεση του CO_2 στους ωκεανούς οι σημαντικότερες επιλογές που μελετώνται είναι:

- Διάχυση του CO_2 ενδιάμεσα βάθη από 1.000 έως 2.000m.
- Έκχυση του CO_2 σε βάθος μεγαλύτερο των 3.000m.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι επιλογές απόθεσης του CO_2 στους ωκεανούς καθώς και οι τεχνικές που μπορούν να το επιτύχουν.



Σχήμα 2.3.5.1: Επισκόπηση των επιλογών αποθήκευσης CO_2 σε ωκεανό (Πηγή: IPCC, 2005)

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την απόρριψη CO_2 σε ωκεανούς σχετίζονται κυρίως με τη μεταβολή του pH. Το CO_2 υπάρχει φυσικά στους ωκεανούς, αλλά με επιπλέον προσθήκη του, μειώνεται το pH λόγω σχηματισμού ανθρακικών και δισανθρακικών ιόντων. Η μεταβολή του pH επηρεάζει έμμεσα το μεταβολισμό των θαλάσσιων οργανισμών. Η βιολογική επίδραση της απόρριψης CO_2 σε ωκεανούς δεν είναι πλήρως γνωστή. Επειδή η πελαγική βιομάζα μειώνεται αρκετά σε μεγάλα βάθη, η έκχυση CO_2 σε βάθη μεγαλύτερα των 1000m, είναι περισσότερο αποδεκτή (Herzog *and* Golomb, 2004).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ναυτιλία Μεταφοράς Δειοξειδίου του Άνθρακα (CO_2).

3.1. Εισαγωγή

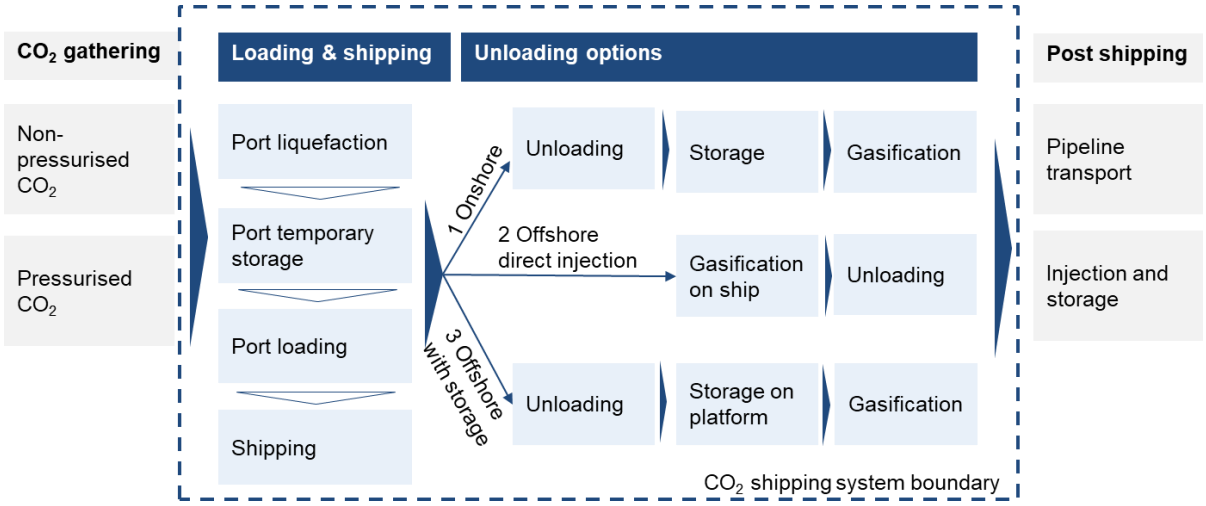
Είναι γεγονός ότι υπάρχουν χώρες στο παγκόσμιο στερέωμα, οι οποίες στοχεύουν στην ευρύτερη ανάπτυξη υποδομών δέσμευσης, χρήσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS) ώστε να είναι πλήρως λειτουργικές έως το 2030. Στον ευρωπαϊκό χώρο, δραστηριοποιούνται πιο ενεργά χώρες όπως η Ολλανδία, η Νορβηγία, το Ηνωμένο Βασίλειο αναπτύσσοντας έργα επίδειξης και περαιτέρω μέλετης της αλυσίδας μεταφοράς και αποθήκευσης CO_2, από τα οποία έχουν προκύψει χρήσιμα δεδομένα και συμπεράσματα που μπορούν όπως διαφαίνεται από την μέχρι σήμερα διαμορφωμένη βιβλιογραφία, να αποτελέσουν τη βάση της δημιουργίας ενός νέου επικερδή ναυτιλιακού τομέα.

Έτσι λοιπόν όπως και με τις υποδομές μεταφοράς φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας, οι λειτουργίες μεταφοράς και αποθήκευσης CO_2 (T&S) θα μπορούσαν να ωφεληθούν από τη σημαντική μείωση του μοναδιαίου κόστους μεταφοράς CO_2, εντάσσοντας στην αλυσίδα τους την ναυτιλία, είτε ως βασικό στοιχείο, είτε ως συμπληρωματικό.

Η ναυτιλία CO_2 μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα να συνδέσει διαφορετικά γωγραφικά σημεία από τα οποία δεν είναι δυνατόν να διέλθουν αγωγοί μεταφοράς CO_2, λόγω του υγρού στοιχείου που τα διαχωρίζει (θάλασσα), μπορεί να μεταφέρει φορτίο σε μεγάλες αποστάσεις όπου η εγκατάσταση αγωγού/ών θα απαιτούσε πολύ υψηλά κεφαλαιακά κόστη (CAPEX) και όλα αυτά φυσικά με σχετικά χαμηλό μοναδιαίο κόστος, συμβάλοντας τελικά στη διαμόρφωση των απαιτούμενων οικονομιών κλίμακας .

3.2. Στοιχεία Υποδομής Ναυτιλίας μεταφοράς Δειοξειδίου του Άνθρακα (CO_2)

Σύμφωνα με έρευνα της εταιρείας ElementEnergy (Cambridge 2018) για λογαριασμό της Βρετανικής Κυβέρνησης, κατά την μελέτη της ναυτιλίας μεταφοράς CO_2 ως σύστημα, προσδιόρισε τα στοιχεία της αλυσίδας μεταφοράς όπως αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα



Σχήμα 3. 2. 1. : Στοιχεία της ναυτιλιακής αλυσίδας CO 2
(Πηγή: ElementEnergy ltd, 2018)

Αρχικά το CO_2 συγκεντρώνεται όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο από τις εταιρείες που το εκπέμπουν και στη συνέχεια προκειμένου να φορτωθεί σε πλοίο, υγροποιείται μετά την άφιξή του στη μονάδα υγροποίησης, είτε υπό πίεση είτε χωρίς πίεση. Αποθηκεύεται σε υγρή μορφή σε δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης. Από τις δεξαμενές φορτώνεται στο πλοίο μεταφοράς μέσω συστήματος διαχείρισης φορτίου και στη συνέχεια μεταφέρεται με πλοίο στον καθορισμένο προορισμό.

Όπου το έργο περιλαμβάνει ναυτιλία από λιμάνι σε λιμάνι, το CO_2 εκφορτώνεται από το πλοίο στην στεριά, (σε υγρή μορφή) σε δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα διαχείρισης φορτίου όπως στο λιμάνι εκκίνησης.

Μετά από αυτό, το CO_2 αντλείται και θερμαίνεται σε κατάλληλες συνθήκες για μεταφορά με αγωγό σε χώρο μακροπρόθεσμης αποθήκευσης .

Εκτός από τη ναυτιλία από λιμάνι σε λιμάνι, συμπεριλήφθηκε η ναυτιλία από λιμάνι σε αποθήκη. Δύο επιλογές εκφόρτωσης ανοικτής θάλασσας συμπεριλαμβάνονται στο διαμορφωμένο σύστημα, η απευθείας έγχυση ή σε πλατφόρμα με αποθήκευση, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Στην περίπτωση άμεσης έγχυσης, το CO_2 αντλείται και θερμαίνεται επί του πλοίου και μεταφέρεται μέσω ενός υπεράκτιου συστήματος εκφόρτωσης στο φρεάτιο έγχυσης μιας υπεράκτιας τοποθεσίας αποθήκευσης.

Η δεύτερη επιλογή υπεράκτιας εκφόρτωσης είναι η μεταφορά του CO_2 σε υγρή μορφή σε

μια υπεράκτια πλατφόρμα, όπου αποθηκεύεταιπροσωρινά και τελικά αντλείται και θερμαίνεται σε συνθήκες κατάλληλες για έγχυση σε υπεράκτιο χώρο αποθήκευσης. Αυτή η ενότητα περιγράφει τα διάφορα στοιχεία υποδομής της μεταφοράς CO_2 με βάση τη βιβλιογραφία που ανασκοπήθηκε.

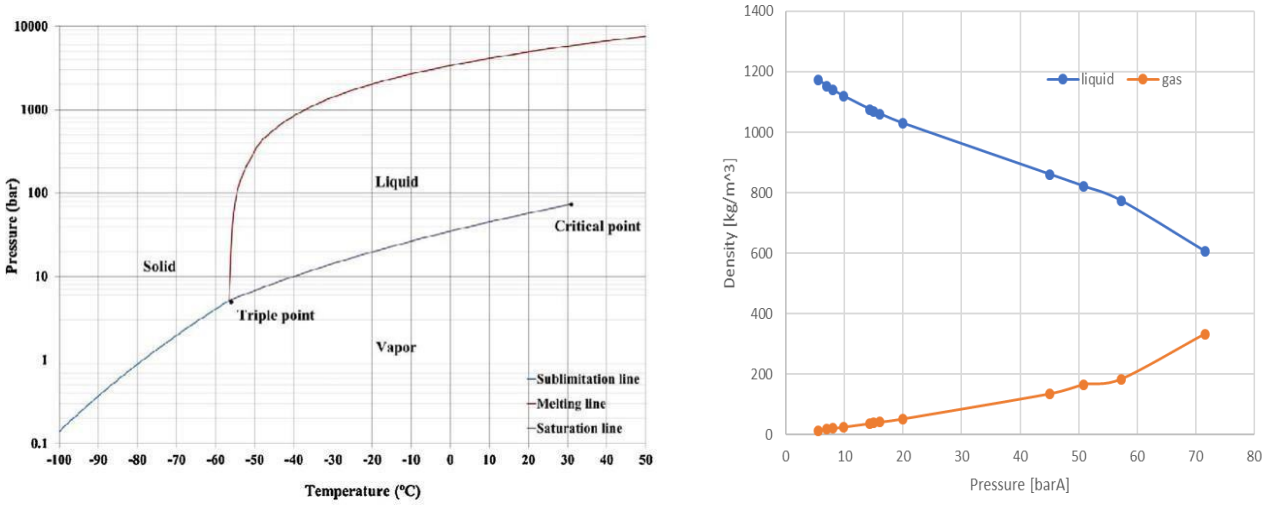
Κάθε στοιχείο της ναυτιλιακής αλυσίδας επιτρέπει συγκεκριμένες επιλογές σχεδιασμού *(Σχήμα 3.2.2.).*

Process step	Key design options / *description*	Key variables
Port: Liquefication	• CO_2 transport pressure	• CO_2 flow rate, initial CO_2 pressure • Energy requirement • Electricity prices
Port: Temporary storage	• CO_2 transport pressure	• CO_2 flow rate • Ship capacity, fleet size • Trip time
Port: Loading	• *Cryogenic hoses* • *Articulated loading arm*	• Loading speed/Loading time • Port entry/exit time
Shipping	• CO_2 transport pressure • Storage tanks/capacity	• CO_2 flow rate, trip time • Construction/fuel/crew costs, ship speed, lifetime
Unloading opt. 1: port	• *Includes offloading, temporary storage, gasification* • CO_2 transport pressure	• Same as loading and temporary storage • CO_2 injection condition
Unloading opt. 2: offshore	• Gasification on ship; or temporary storage on platform (option)	• Water depth • Sea environment • CO_2 injection condition

Σχήμα 3. 2. 2. :Βασικές επιλογές σχεδίασης και παράμετροι εξαρτημάτων της αλυσίδας αποστολής CO_2 (Πηγή: ElementEnergy ltd, 2018)

3.2.1. Υγροποίηση

Για τη μεταφορά με αγωγούς, καθώς και για την ναυτιλία, το CO_2 θα πρέπει να είναι σε πυκνή μορφή, όχι αέριο, για να είναι οικονομικά αποδοτικό. Ενώ για τη μεταφορά LNG, το φυσικό αέριο υγροποιείται ψύχοντάς το σε θερμοκρασία κάτω των -160°C και στη συνέχεια μεταφέρεται σε δεξαμενές υπό ατμοσφαιρική πίεση, αυτό δεν αποτελεί επιλογή για το CO_2, καθώς υπάρχει μόνο σε αέρια ή στερεά μορφή υπό ατμοσφαιρική πίεση (βλ. Σχήμα 3.2.1.1).



Σχήμα 3. 2. 1.1. : Διάγραμμα φάσης CO_2 και πυκνότητα υγρού και αερίου CO_2 σε διαφορετικές πιέσεις (δεξιά, πηγή: (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016)) (αριστερά, πηγή: (Seo, 2016))

Η μεταφορά σε αέρια μορφή δεν είναι οικονομική λόγω της χαμηλής πυκνότητας του αερίου, ενώ η μεταφορά σε στερεή μορφή είναι αντιοικονομική λόγω της σημαντικής προσπάθειας που απαιτείται για τη φόρτωση και εκφόρτωση (Geske 2015). Επομένως, το CO_2 μεταφέρεται στο όριο ή πάνω από το όριο μεταξύ της υγρής και τηςαέριας φάσης σε πιέσεις υψηλότερες από την ατμοσφαιρική πίεση (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016).

Η πυκνότητα του υγρού και αερίου CO_2 με μεταβαλλόμενη θερμοκρασία και πίεση φαίνε-ται στον παρακάτω πίνακα:

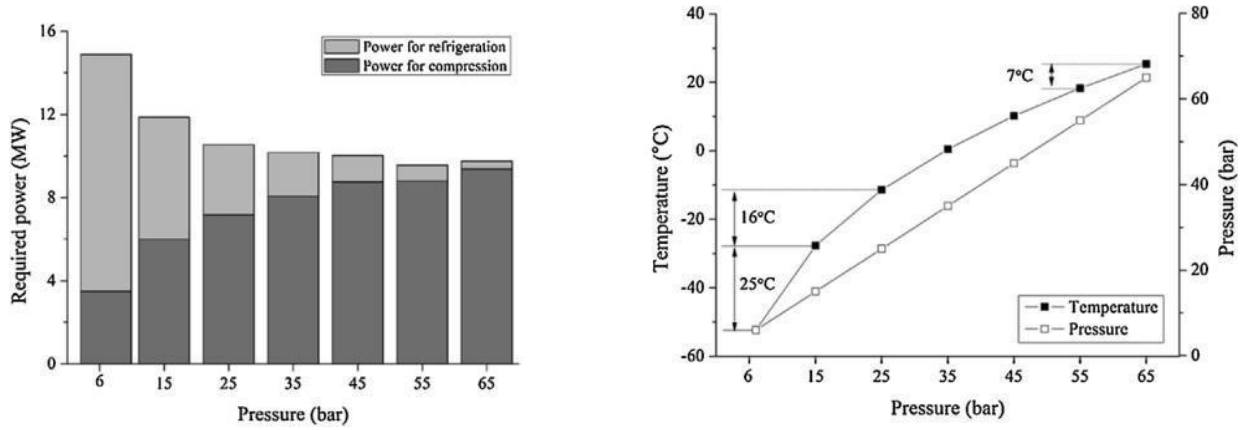
Pressure range	Temperature	Pressure	Density liquid (kg/m^3)	Density gas (kg/m^3)
High pressure	30	72	607	333
	10	45	861	135
Medium pressure	-19.5	20	1,029	53
	-30	14	1,076	37
Low pressure	-41	9.8	1,119	25
	-55	5.5	1,173	15

Πίνακας 3.1.: Πυκνότητα υγρού και αερίου CO_2 σε διαφορετικές πιέσεις και θερμοκρασίες που λαμβάνονται υπόψη για τη μεταφορά . Πηγή: (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016)

Μια σχεδιαστική επιλογή που έχει σημαντικές επιπτώσεις για όλα τα μέρη της ναυτιλιακής αλυσίδας είναι η πίεση μεταφοράς CO_2 . Στη βιβλιογραφία που ανασκοπήθηκε, συζητούνται 3 διακριτές περιοχές πίεσης για τη μεταφορά υγρού CO_2 , δηλαδή χαμηλή πίεση, μέση πίεση και υψηλή πίεση (όπως φαίνεται παραπάνω). Σε όλη την αναφορά θα χρησιμοποιήσουμε την ορολογία μεταφοράς χαμηλής πίεσης, μέσης πίεσης και υψηλής πίεσης για να αναφερθούμε στις περιοχές πίεσης όπως καθορίζονται παραπάνω .

Στη βιβλιογραφία προτείνονται αρκετές διαδικασίες υγροποίησης . Το κόστος υγροποίησης κυριαρχείται από το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη και συμπίεση. Η απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/tCO_2) εξαρτάται από την αρχική συνθήκη εισόδου (θερμοκρασία και πίεση) του CO_2 και την επιθυμητή τελική κατάσταση. Δεδομένου ότι το πρώτο βήμα των διεργασιών υγροποίησης συνίσταται συνήθως στη συμπίεση του CO_2 , η ενεργειακή απαίτηση μειώνεται σημαντικά εάν το CO_2 εισόδου είναι προσυμπιεσμένο και όχι σε ατμοσφαιρική πίεση όταν φθάνει στη μονάδα υγροποίησης. Αυτό συμβαίνει εάν το CO_2 εισέλθει στο εργοστάσιο μέσω ενός χερσαίου αγωγού καθώς θα ήταν υπό πίεση περίπου 100 bar για μεταφορά με αγωγούς. Οι τυπικές πιέσεις που συζητούνται στη βιβλιογραφία είναι 1-2 barγια είσοδο CO_2 χωρίς πίεση και 70-100 bar για προσυμπιεσμένο CO_2.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια μελέτη παρακολούθησης, η οποία συγκρίνει το συνολικό κόστος των συστημάτων αποστολής CO_2 για 7 διαφορετικές πιέσεις μεταφοράς CO_2 (Seo, 2016): 6 bar, 15 bar, 25 bar, 35 bar, 45 bar, 55 bar και 65 bar. Η απαίτηση ισχύος της μονάδας υγροποίησης για τις διαφορετικές πιέσεις μεταφοράς φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1.2 (αριστερά). Η απαίτηση ισχύος για την ψύξη μειώνεται με την αύξηση της πίεσης καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία υγροποίησης. Η απαίτηση ψύξης μειώνεται σημαντικά όταν μετακινείται από πίεση μεταφοράς 6 bar σε α πίεση μεταφοράς 15 bar, καθώς η θερμοκρασία του υγροποιημένου CO_2 στα 15 bar είναι σχεδόν 25°C υψηλότερη από ό,τι στα 6 bar (Πίνακας 2). Λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό κόστος μεταφοράς, η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η συνθήκη των 15 bar ήταν η βέλτιστη ισορροπία του κόστους υγροποίησης έναντι του κόστους πλοίου και αποθήκευσης .



Σχήμα 3.2.1.2. Απαίτηση ισχύος για τη μονάδα υγροποίησης ενός έργου 1 Mtpa για διαφορετικές πιέσεις μεταφοράς (αριστερά) και θερμοκρασίες (και πιέσεις) για πιέσεις μεταφοράς.

Πηγή: (Seo et al., 2016)

Αρκετοί σχεδιασμοί διεργασιών υγροποίησης προσομοιώθηκαν στη βιβλιογραφία χρησιμοποιώντας εξωτερική καθώς και ολοκληρωμένη ψύξη και συγκρίθηκαν το κόστος τους (Oi, 2016). Μια διαδικασία που χρησιμοποιεί *εξωτερική ψύξη* βρέθηκε να είναι βέλτιστη από πλευράς κόστους ενώ, διαπιστώθηκε ότι το κόστος του συμπιεστή κυριαρχεί στις κεφαλαιουχικές καθώς και στις λειτουργικές δαπάνες (ενέργεια για συμπίεση).

Η υγροποίηση λειτουργεί ήδη σήμερα για τη μεταφορά CO_2. Η κύρια ζήτηση για CO_2 είναι στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών. Ωστόσο, αυτά τα έργα είναι πολύ μικρότερης κλίμακας και χρησιμοποιούν μικρότερα πλοία, που μεταφέρουν λιγότερο από 2.000 tCO_2, ενώ ένα πλοίο με 10.000 tCO_2 χρειάζεταιγια ένα έργο με μέτρια ροή 1 Mtpa (Megaton per annum).

3.2.2. Προσωρινή αποθήκευση CO_2.

Ενώ η ροή του CO_2 από μια πηγή όπως ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας και η επακόλουθη υγροποίηση είναι συνεχής, η μεταφορά πραγματοποιείται σε διακριτές διαδρομές και είναι μια διαδικασία παρτίδας. Χρειάζεται επομένως μια ενδιάμεση αποθήκευση του υπό μεταφορά CO_2, όταν δεν υπάρχει πλοίο στο λιμάνι. Αυτή η αποθήκευση ελαχιστοποιεί επίσης τον χρόνο φόρτωσης του πλοίου επιτρέποντας ταχύτερο ρυθμό μεταφοράς από τον ρυθμό ροής της πηγής CO_2 και διασφαλίζει ότι τα πλοία χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά.

Για να καταστεί δυνατή η γρήγορη φόρτωση του πλοίου, η αποθήκευση θα πρέπει να έχει τουλάχιστον τη χωρητικότητα του πλοίου σε τόνους CO_2 . Αντίθετα, εάν η αποθήκευση δεν

είναι επαρκής ώστε να μην ανταποκρίνεται στη χωρητικότητα του πλοίου, αυτό μπορεί να επιφέρει τη διακοπή της δέσμευσης CO_2 και την επακόλουθη υγροποίηση και κατά συνέπεια την καθυστέρηση του πλοίου. Για να επιτραπεί η λειτουργική ευελιξία, στη βιβλιογραφία συζητούνται διαφορετικά περιθώρια ασφαλείας. Η χωρητικότητα ποσοτικοποιείται σε πολλαπλάσια της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου CO_2 . Ενώ αρκετές αναφορέςεπιλέγουν χωρητικότητα αποθήκευσης 100% της χωρητικότητας του πλοίου (ZEP, 2011),(Seo, 2016)), μεγέθη έως και 150% του πλοίου, προτείνεται ως χωρητικότητα προσωρινήςαποθήκευσης (Berger, 2004). Ο Yoo (2013) προτείνει έναν συντελεστή 120% με βάση τηνεμπειρία στη ναυτιλία LNG και για να εξισορροπήσει την ευελιξία και την αποδοτικότητακόστους. Συνήθως θεωρείται ότι ο σχεδιασμός και οι προδιαγραφές των δεξαμενών αποθή- κευσης στο πλοίο είναι παρόμοιες ή ταυτόσημες με εκείνες των δεξαμενών που είναι χρησιμοποιείται για την προσωρινή αποθήκευση (buffer) στην ξηρά (Vermeulen, 2011), (Seo, 2016). Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της γης κοντά στο λιμάνι εξαγωγής CO_2 , το υγροποιημένο CO_2 θα μπορούσε να αποθηκευτεί είτε στην ξηρά είτε σε μια πλωτή φορτηγίδα, που είναι κοινάστα συστήματα μεταφοράς υδρογονανθράκων. Ο Yoo (2013) περιγράφει διαφορετικά εννοιολογικά σχέδια για πλωτές φορτηγίδες αποθήκευσης ανάλογα με την ικανότητα αποθήκευσης. Για μικρότερες χωρητικότητες περίπου 28.000 m3, οι κυλινδρικές δεξαμενές αποθήκευσης είναι διατεταγμένες οριζόντια στο πλοίο, ενώ για μεγάλες χωρητικότητες περί- που 110.000 m3, οι δεξαμενές θα πρέπει να είναι διατεταγμένες κατακόρυφα στο πλοίο,γεγονός που επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τη διάταξη των δεξαμενών στοεσωτερικό του πλοίου και στη συνέχεια την επιλογή των διαστάσεων του πλοίου .

3.2.3. Υλικά, σχήμα δεξαμενών πλοίου και μέγιστο μέγεθος

Για τις δεξαμενές αποθήκευσης χρησιμοποιούνται διάφορες κατηγορίες χάλυβα, ανάλογα με την πίεση και τη θερμοκρασία του CO_2 που περιέχεται. Για τις συνθήκες υψηλής πίεσης, που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (περίπου 10°C), χρησιμοποιείται σφυρήλατος ανθρακούχος χάλυβας. Ο ανθρακούχος χάλυβας χρησιμοποιείται για συνθήκες μέσης πίεσης σε συνδυασμό είτε με μόνωση αφρού είτε με μόνωση κενού διπλού τοιχώματος (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016). Η κατάσταση χαμηλής θερμοκρασίας απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένων χαμηλής θερμοκρασίας υλικών, με ανθρακούχο χάλυβα μαγγανίου, ανοξείδωτο χάλυβα και ποιότητες χάλυβα χαμηλής θερμοκρασίας που προτείνονται στη βιβλιογραφία (Yoo BC, 2013), (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016) και (Seo, 2016).

Το υλικό και ο εξοπλισμός της δεξαμενής αποθήκευσης απαιτείται να είναι ικανά να αντέχουν μια σειρά από πιέσεις και θερμοκρασίες του CO_2 σε διαφορετικές τιμές πουθα ποικίλλουν κατά τη διαδικασία της μεταφοράς (π.χ. λόγω μερικής εξάτμισης του CO_2 και επακόλουθης αύξησης της πίεσης (Vermeulen, 2011).

Κυλινδρικά καθώς και σφαιρικά σχήματα δεξαμενών αποθήκευσης CO_2 είναι εφικτά. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του σφαιρικού σχήματος δεξαμενής εξετάζονται στη βιβλιογραφία και οι περισσότερες μελέτες προτείνουν κυλινδρικά σχήματα δεξαμενών (Vermeulen 2011). Το μέγιστο μέγεθος των κυλινδρικών δεξαμενών αποθήκευσης CO_2 ποικίλλει ανάλογα με την επιλεγμένη πίεση μεταφοράς .

Το πάχος του τοιχώματος αυξάνεται όσο αυξάνεται και η πίεση αποθήκευσης του αερίου CO_2 στη δεξαμενή του πλοίου, σε σχέση πάντα με τον όγκο του και μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις οδηγίες του Εγχειριδίου Δοχείου Πίεσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πάχος του τοιχώματος ποικίλλει επίσης ανάλογα με τις διαστάσεις του πλοίου, καθώς τα μεγαλύτερα πλοία συνήθως έχουν μικρότερες επιταχύνσεις. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη πρόσθετη πίεση («δυναμική πίεση») στις δεξαμενές λόγω τέτοιων επιταχύνσεων και κατά συνέπεια μικρότερο απαιτούμενο πάχος .

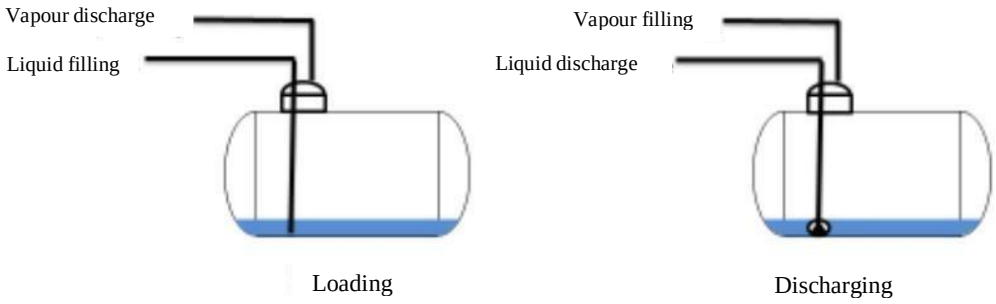
Ο Διεθνής Κώδικας Κατασκευής και Εξοπλισμού Πλοίων που Μεταφέρουν Υγροποιημένα Αέρια Χύδην (Κώδικας IGC) συνιστά μέγιστο πάχος τοιχώματος 40 mm , το οποίο ισοδυναμεί με μια δεξαμενή μέσης πίεσης. Το μέγιστο μέγεθος μιας δεξαμενής αποθήκευσης, μειώνεται με την αύξηση του πάχους του τοιχώματος. Αυτό οδηγεί σε λιγότερο ευνοϊκά οικο-νομικά δεδομένα αποθήκευσης για υψηλότερη πίεση μεταφοράς, αφού πρέπει να κατασκευαστούν περισσότερες δεξαμενές για τη μεταφορά του ίδιου όγκου CO_2 (Seo, 2016). Ο Brevik (2017) αναφέρει πάχος τοιχώματος 53 – 55 mm και πάχος μόνωσης 120 mm για τηνκατάσταση μέσης πίεσης. Αυτό είναι εκτός της περιοχής όπου ισχύουν οι συνήθεις κανόνες σχεδιασμού και συνεπάγεται κόστος και κίνδυνο 6 .

3.2.4. Λειτουργία Αποθήκευσης CO_2

Το CO_2 θα υπάρχει στις δεξαμενές σε υγρή αλλά και σε αέρια μορφή. Στον πυθμένα της δεξαμενής υπάρχει υγρό CO_2 στη δεδομένη πίεση και θερμοκρασία. Πάνω από το υγρό υπάρχει αέριο στην ίδια πίεση και θερμοκρασία (Knutsen OAS Shipping, 2016, σελ. 20). Στην πραγματικότητα, οι δεξαμενές αποθήκευσης δεν γεμίζουν αρχικά από κάτω προς τα πάνω με

υγρό CO_2 , αλλά ένα συγκεκριμένο μερίδιο του όγκου αφήνεται σκόπιμα για την αέρια φάση, για να αποφευχθεί το υδραυλικό κλείδωμα. Το υδραυλικό κλείδωμα μπορεί να προκληθεί λόγω εισόδου θερμότητας και μπορεί να προκαλέσει γρήγορες παροδικές αιχμές πίεσης της τάξης των 10.000 bar που μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα καταστροφική βλάβη του εξοπλισμού. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο (Yara, Larvik Shipping , Polarkonsult, 2016). Τα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα φόρτωσης (σε ποσοστό επί τοις εκατό (%), του όγκου της δεξαμενής) κυμαίνονται από 98 % σε συνθήκες χαμηλής πίεσης έως 72% σε συνθήκες υψηλής πίεσης (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016).

Καθώς οι δεξαμενές γεμίζουν με υγρό CO_2, η πίεση αυξάνεται στην αέρια φάση πάνω από την υγρή φάση. Για να αποφευχθεί η υπερβολική πίεση στις δεξαμενές, αφαιρείται ο ατμόςCO_2 (επίσης αναφέρεται ως αέριο βρασμού, BOG [7]). Αντίθετα, όταν οι δεξαμενές αδειάζουν,αυτό οδηγεί σε πτώση της πίεσης εντός των δεξαμενών, η οποία μπορεί να οδηγήσει σεστερεοποίηση του περιεχομένου της δεξαμενής. Για να αποφευχθεί αυτό, προστίθεται ατμόςCO_2 στις δεξαμενές κατά την εκκένωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.4.1. Επομένως, εκτόςαπό τη σύνδεση που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση ή την εκκένωση του υγρού CO_2 , οιδεξαμενές αποθήκευσης έχουν μια σύνδεση που χρησιμοποιείται για την προσθήκη ή τηναφαίρεση αερίου CO_2 (Σχήμα 3.2.4.1). Όταν το CO_2 μεταφέρεται από την στεριά στιςδεξαμενές του πλοίου, το αέριο βρασμού στις δεξαμενές του, επιστρέφει στις δεξαμενέςεκκένωσης στην ξηρά (Vermeulen, 2011) .



Σχήμα 3.2.4.1: Φόρτωση και εκφόρτωση υγρού CO_2 με ταυτόχρονη εκφόρτιση και φόρτιση ατμών αντίστοιχα. πηγή: (Knutsen OAS Shipping, 2016)

3.2.5. Στάδιο Φόρτωσης

Η φόρτωση του CO_2 , από την εγκατάσταση προσωρινής αποθήκευσης στη στεριά στο πλοίο μεταφοράς, μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση συμβατικών αρθρωτών βραχιόνων φόρτωσης, που έχουν αναπτυχθεί για άλλα κρυογονικά υγρά όπως το LPG και το LNG. Το υγρό μεταφέρεται μέσω ενός μονωμένου αγωγού, που καθορίζεται για την επιλεγμένη πίεση και θερμοκρασία, από την αποθήκευση στον βραχίονα φόρτωσης και στο πλοίο, χρησιμοποιώντας αντλίες που βρίσκονται κοντά στο χώρο αποθήκευσης. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.2.4, μια δεύτερη γραμμή επιστρέφει αέριο από τις δεξαμενές του πλοίου είτε στις χερσαίες δεξαμενές αποθήκευσης είτε στη μονάδα υγροποίησης.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκαμπτοι σωλήνες αντί των βραχιώνων φόρτωσης ως εναλλακτική λύση στη φόρτωση αλλά αυτοί μπορεί να είναι λιγότερο αξιόπιστοι, γεγονός που καθιστά τους βραχίονες φόρτωσης την προτιμώμενη λύση (Vermeulen, 2011).

Από τον συνολικό χρόνο ταξιδιού του πλοίου τα σημαντικότερα τμήματα είναι ο χρόνος φόρτωσης, η διάρκεια του ταξιδιού και ο χρόνος εκφόρτωσης.

Ο συνολικός χρόνος ταξιδιού καθορίζει το χρονοδιάγραμμα του πλοίου και τελικά τον αριθμό των πλοίων που απαιτούνται για την μεταφορά του συμφωνημένου όγκου μεταφοράς .

Ενώ το κόστος φόρτωσης αποτελεί τη δεύτερη στη σειρά συνιστώσα κόστους του συνολικού κόστους αποστολής, ο αντίκτυπος του χρόνου φόρτωσης είναι σημαντικός και επομένως ο χρόνος φόρτωσης θα πρέπει να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Με την αύξηση του μεγέθους του πλοίου, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αρκετοί βραχίονες φόρτωσης παράλληλα για να αποφευχθεί η αύξηση του χρόνου φόρτωσης. Ως εκ τούτου, αρκετές μελέτεςυποθέτουν χρόνο φόρτωσης ανεξάρτητο από τη χωρητικότητα του πλοίου (Geske, 2015) χρησιμοποιώντας υψηλούς ρυθμούς φόρτωσης όπου είναι απαραίτητο. Για παράδειγμα, ο Vermeulen (2011) προτείνει ταχύτητα φόρτωσης 2.500 m3 ανά ώρα, που αντιστοιχεί σε 2.875 t/h 8 . Αυτό θα επέτρεπε τη φόρτωση ενός πλοίου 30.000 m 3 σε 12 ώρες. Το υψηλό ποσοστό φόρτωσης για τη φόρτωση. Οι βραχίονες απαιτούν ένα σύστημα έκτακτης ανάγκης - διακοπής λειτουργίας (ESD) για την αποφυγή διαρροής σημαντικών ποσοτήτων CO_2 σε περίπτωση αστοχίας του βραχίονα φόρτωσης ή ακούσιας αποσύνδεσης από το φορέα (Vermeulen, 2011).

3.3. Πλοίο μεταφοράς CO_2 - Εμπειρία από την μέχρι σήμερα χρήση του.

Η μεταφορά CO_2 πραγματοποιείται εδώ και 30 χρόνια, με την κύρια ζήτηση να προέρχεται από τη βιομηχανία τροφίμων και ποτών . Το πρώτο αποκλειστικό δεξαμενόπλοιο CO_2 δρομολογήθηκε το 1988 στη Νορβηγία (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016). Ωστόσο, η κλίμακα των ετήσιων εμπορικών ροών CO_2 , και επομένως τα μεγέθη των πλοίων, είναι πολύ μικρότερα από αυτά που απαιτούνται για τα έργα CCS. Επί του παρόντος , τα πλοία CO_2 έχουν συνήθως μεταφορική ικανότητα περίπου 1.000 m^3 (ZEP, 2011) δηλαδή 1.060 τόνους CO_2 (9) και η συνολική ευρωπαϊκή εμπορική ροή CO_2 είναι περίπου 3 Mtpa (Brownsort, 2015). Ο προμηθευτής βιομηχανικού αερίου Praxair διαθέτει τέσσερα (04) δεξαμενόπλοια μεταφοράς υγρού CO_2 που εκμεταλλεύεται η Larvik Shipping, τα οποία έχουν επισκευαστεί για μεταφορά CO_2 από γενικές μεταφορές φορτίου/χύδην.

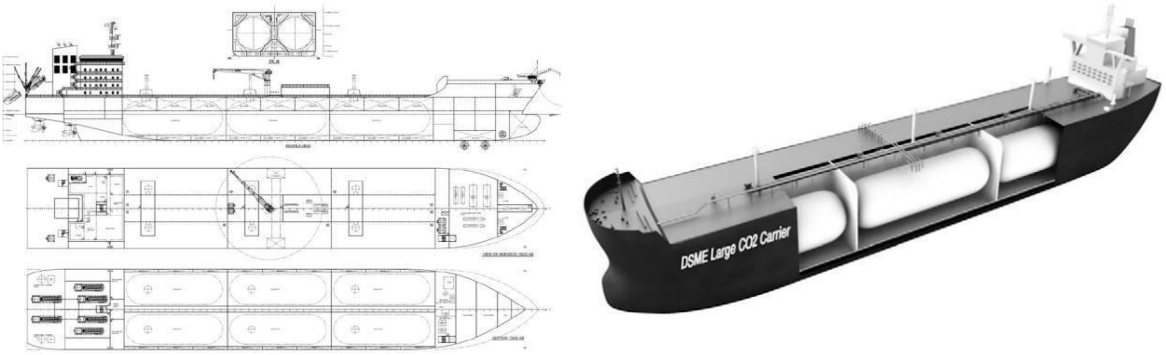
Έχουν ικανότητα μεταφοράς μεταξύ 1.200 – 1.800 tCO_2 (10) . Αυτά τα πλοία αξιολογούνται για μεταφορά μέσης πίεσης, στα 16 – 21 bar και περίπου στους -30°C .

Η ναυτιλιακή εταιρεία *IM Skaugen* διαθέτει έξι (06) πλοία 10.000 m 3 που είναι νηολογημένα να μεταφέρουν υγρό CO_2, ωστόσο το κανονικό τους φορτίο είναι LPG και δεν είναι σαφές εάν τα πλοία χρησιμοποιούνται για μεταφορά CO_2 ακόμη (Brownsort, 2015).

3.3.1. Σχεδιασμός πλοίου

3.3.1.1. Κατάσταση χαμηλής πίεσης

Οι περισσότερες δημοσιεύσεις που επικεντρώνονται στις συνθήκες μεταφοράς χαμηλής πίεσης προτείνουν τη χρήση είτε υφιστάμενων σχεδίων πλοίων υγραερίου ημιψυγείου είτε τροποποιήσεων αυτών. Όταν χρησιμοποιείται ένας συμβατικός σχεδιασμός δεξαμενόπλοιων υγραερίου, συνήθως προτείνεται η χρήση ενός μικρού αριθμού κυλινδρικών δεξαμενών (λιγότερες από δέκα), διατεταγμένες σε ζεύγη οριζόντια. Οι Vermeulen (2011) και Yoo (2013) πρότειναν ένα σχέδιο που χρησιμοποιεί έξι (06) δεξαμενές χωρητικότητας 3.833 m 3 και 5.000 m 3 αντίστοιχα (*Σχήμα 3.3.1.1.1*), οι οποίες καταλήγουν σε συνολική χωρητικότητα 23.000 m^3 και 30.000 m^3 ή 26, και 34.500 t CO 2 αντίστοιχα . Τα εναλλακτικά σχέδια που προτεί - νονται διαφέρουν ως προς το σχήμα των δεξαμενών ή/και τη διάταξη από αυτό που περιγρά- φεται παραπάνω. Ο Vermeulen (2011) παρουσιάζει ένα σχέδιο πλοίου, που



Σχήμα 3.3.1.1.1: Προτεινόμενα σχέδια πλοίων για μεταφορά χαμηλής πίεσης με βάση τα σχέδια πλοίων για υγραέριο σε μέση κατάσταση ψύξης.
Αριστερά: (Vermeulen, 2011), δεξιά: (Yoo B. C., 2013)

ονομάζεται X-bow, όπου μια μικρότερη κυλινδρική δεξαμενή τοποθετείται πάνω από δύο (02) μεγαλύτερες. Αυτό το σχέδιο πλοίου μπορεί να μεταφέρει τον ίδιο όγκο αερίου με την παραλλαγή που βασίζεται σε ένα συμβατικό δεξαμενόπλοιο LPG, δηλαδή 30.000 m3 , αλλά είναι πολύ πιο συμπαγές (μικρότερο σε μήκος) και επομένως απαιτεί λιγότερο χάλυβα, με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Ωστόσο, αυτά τα οφέλη αντισταθμίζονται από τα λειτουργικά μειονεκτήματα του σχεδιασμού X-bow. Ειδικότερα, η ικανότητα ελιγμών κατά την εκφόρτωση ανοικτής θαλάσσης μειώνεται, καθώς βρίσκεται η γέφυρα και το κατάλυμα στο τμήμα της πλώρης, το οποίο απαιτεί από το πλοίο να πλησιάσει τον πύργο εκφόρτωσης με την πρύμνη του (Vermeulen, 2011).

Ένας περαιτέρω εναλλακτικός σχεδιασμός για ένα πολύ μεγάλο πλοίο τοποθετεί δεξαμενές 91 x 1000 m 3 κάθετα για συνολική χωρητικότητα πλοίου 91.000 m 3 (*Σχήμα 3.3.1.1.2*, δεξιά). Αυτός ο σχεδιασμός προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη διάταξη των δεξαμενών και έτσι μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα σε ένα δεδομένο μέγεθος πλοίου (Yoo BC, 2013). Ένα δεύτερο στρώμα ζευγών κυλινδρικών δεξαμενών μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από ένα χαμηλότερο (Seo, 2016), για ένα πλοίο χωρητικότητας 12.310 t CO_2 και λαμβάνονται υπόψη οι διάφορες πιέσεις μεταφοράς (*Σχήμα 3.3.1.1.2,* αριστερά). Τα εναλλακτικά σχήματα των δεξαμενών που προτείνονται περιλαμβάνουν αυτά με διατομή με δύο λοβούς (Chiyoda Corporation and Global CCS Institute, 2011) ως καθώς και σφαιρικές δεξαμενές (Brownsort, 2015).

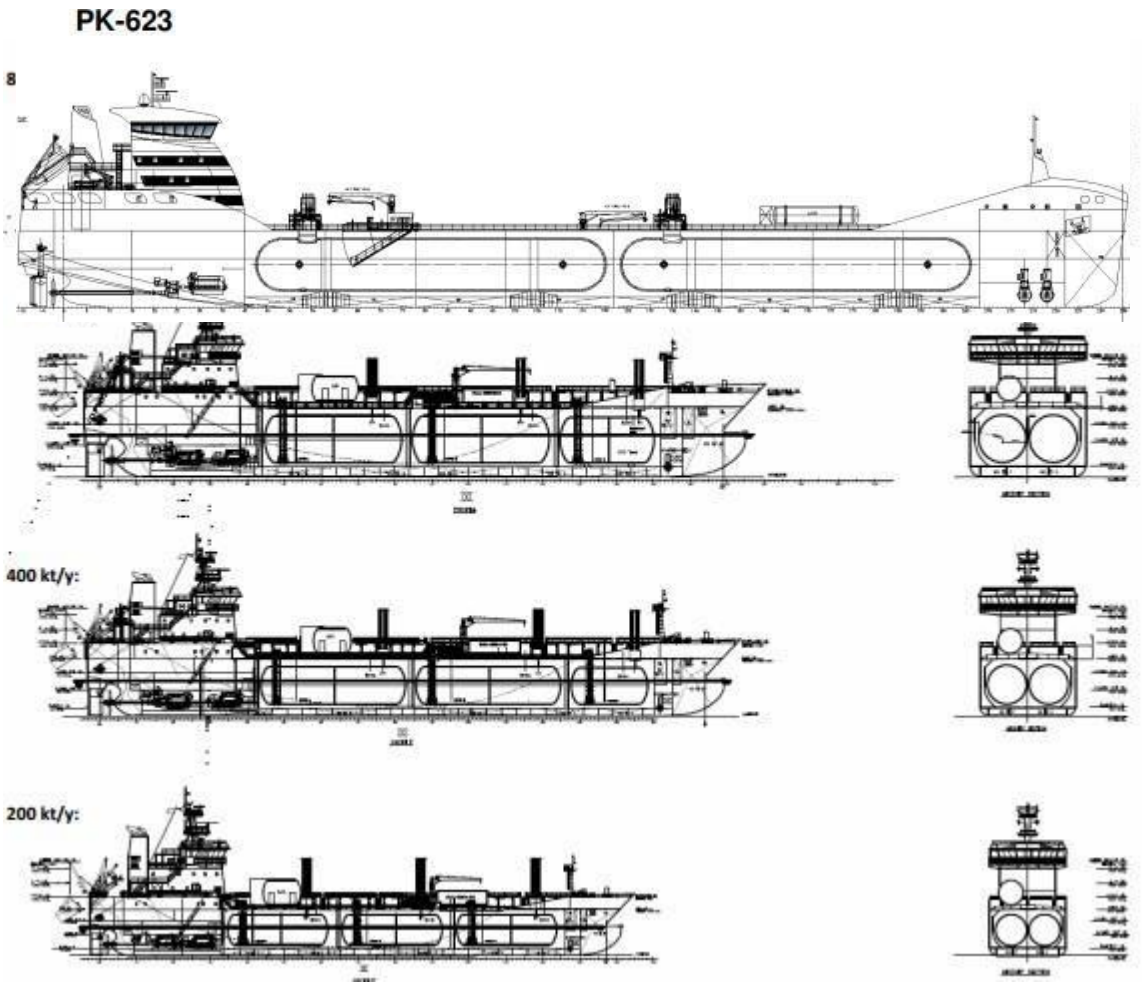
Σχήμα 3.3.1.1.2: Σχεδιασμός πλοίου που προτείνεται από για ένα πλοίο 12.310 tCO_2 (αριστερά) και για ένα πλοίο 105.000 tCO_2 (δεξιά).
Πηγή: αριστερά: (Seo, 2016), δεξιά: (Yoo B. C., 2013)

Για την υπεράκτια εκφόρτωση, το πλοίο θα απαιτήσει ένα σύστημα δυναμικού εντοπισμού θέσης (DPS) αποτελούμενο από αυτόματα ελεγχόμενους προωθητές για τη διατήρηση της θέσης του πλοίου στην υπεράκτια θέση αποθήκευσης (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016),(Tel - Tek, 2014).

3.3.1.2. Κατάσταση μέσης και υψηλής πίεσης

Οι περισσότερες μελέτες που επικεντρώθηκαν στη μεταφορά χαμηλής πίεσης δεν συζητούν λεπτομερώς τις συγκεκριμένες επιλογές υλικών και εξοπλισμού, αλλά παραμένουν σε αρκετά υψηλό επίπεδο, υποθέτοντας ότι οι σχεδιαστικές επιλογές θα είναι πολύ παρόμοιες με αυτές των πλοίων LPG. Λεπτομερείς μελέτες σχεδιασμού πλοίων έχουν ανατεθεί τα τελευταία χρόνια από τη νορβηγική κρατική εταιρεία φυσικού αερίου Gassco ((Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult,2016),(Brevik,2017)). Αυτές οι αναφορές αναπτύσσουν ιδέες για τη συνθήκη μεταφοράς μέσης πίεσης. Για διαφορετικούς ρυθμούς ροής από 0,2 έως 1.6 Mtpa στο Brevik αναπτύσσουν μια ιδέα πλοίου, βασισμένη στο σχεδιασμό ενός υπάρχοντος τύπου πλοίου. Εκτιμήσεις κόστους παρέχονται για τα προτεινόμενα σχέδια, ενημερωμένα από εισροές, πιθανούς πωλητές εξοπλισμού καιεμπειρία από το κόστος του ναυπηγείου. Αναπτύσσονται τέσσερις (04) τύποι πλοίων, με κατά αντιστοιχία χωρητικότητα 2.315 tCO_2, 4.534 tCO_2, 7.017 tCO_2 και 9.787 tCO_2, σε ρυθμούς ροής 0,2 Mtpa, 0,4 Mtpa, 0,6 Mtpa και 0,8 Mtpa, με χρήση σε έργα υψηλότερων ρυθμών ροής. Οι δεξαμενές των πλοίων

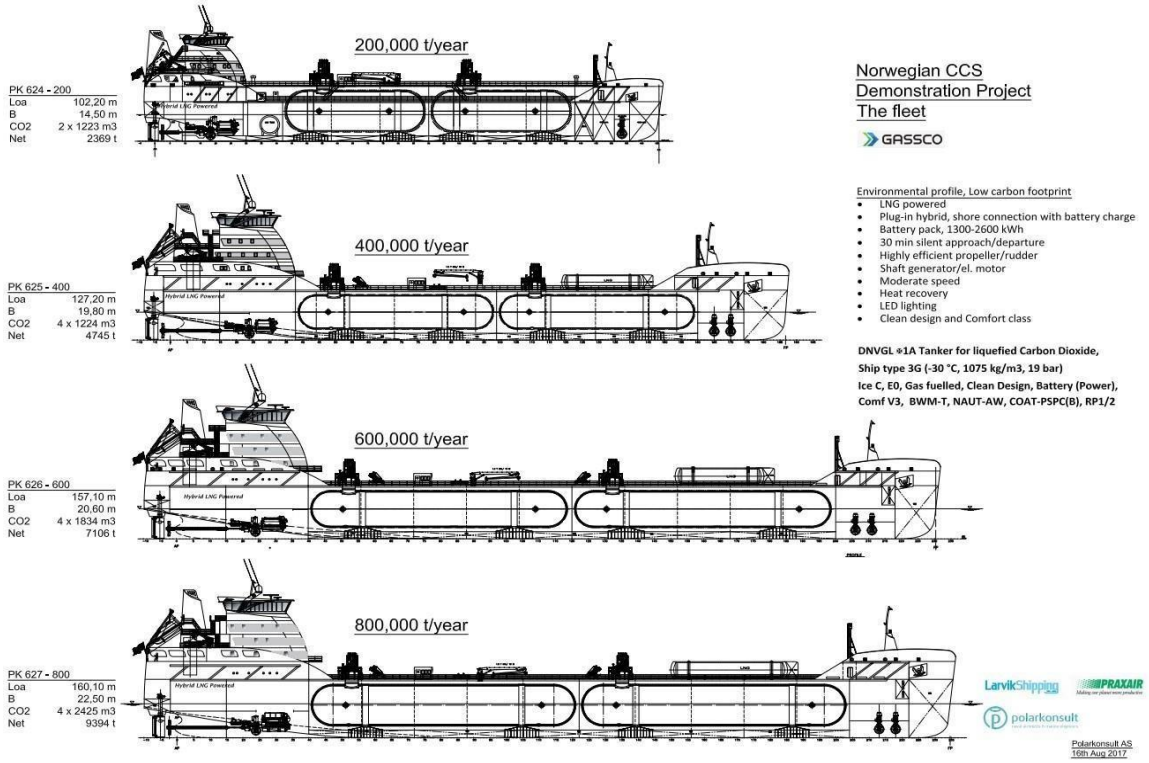
προβλέπεται να λειτουργούν σε θερμοκρασία -23°C και πίεση 14 - 19 bar. Όλοιοι προτεινόμενοι τύποι πλοίων φέρουν 5 κυλινδρικές δεξαμενές, 1 τοποθετημένη στην πλώρη του πλοίου, μπροστά από 4 επιπλέον δεξαμενές διατεταγμένες 2 επί 2 οριζόντια. Σχέδια για αυτές τις έννοιες πλοίων απεικονίζονται στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 3.3.1.2.1. Κορυφή: Πλοίο που προτείνεται από (Brevik, 2017).
Κάτω: Σχέδια πλοίου που προτείνονται από (Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016)

Ομοίως, η κοινή έκθεση του παραγωγού λιπασμάτων Yara, της ναυτιλιακής εταιρείας Larvik και της συμβουλευτικής εταιρείας Polarkonsult, αναπτύσσει μια αποκλειστική ιδέα πλοίου για τις συνθήκες μέσης πίεσης. Αυτό παρέχει εκτιμήσεις κόστους με βάση τους δείκτες ναυπήγησης πλοίων, τις τιμές του προϋπολογισμού των κύριων συστημάτων και τη δική τους πρόσφατη εμπειρία έργων από την κατασκευή νέων καθώς και τη λειτουργία υφιστάμενων πλοίων. Εξετάστηκαν έργα με ρυθμούς ροής 0,3 – 1,3 Mtpa και προτάθηκαν, ένα μικρό

πλοίο που μεταφέρει μια κυλινδρική δεξαμενή 1.850 m 3 όγκου και ένα μεγαλύτεροπλοίο που μεταφέρει 4 δεξαμενές όγκου 1.850 m 3 , τοποθετημένες 2 επί 2 οριζόντια στο εσωτερικό του πλοίου. Αυτές οι δεξαμενές φορτίου αντιστοιχούν σε χωρητικότητα CO_2 1.776 t και 7.104 t αντίστοιχα για την προβλεπόμενη κατάσταση μεταφοράς -25°C και 16 bar. Μια μελέτη παρακολούθησης (Polarkonsult, Praxair, Larvik Shipping, 2017) εξέτασεσχέδια πλοίων για συνθήκες μέσης πίεσης, με χωρητικότητα μεταφοράς CO_2 2.369 t CO_2,4.745 tCO 2 , 7.107 t CO_2και 9.394 t CO_2 . Οι διαστάσεις των δεξαμενών που ελήφθησαν υπόψη για τους διαφορετικούς τύπους πλοίων διέφεραν σημαντικά ανάλογα μήκηδεξαμενής που κυμαίνονται από 27m έως 51m.



Σχήμα 3.3.1.2.2.: Έννοιες σχεδιασμού πλοίων για το Νορβηγικό Έργο Επίδειξης CCS. Πηγή (Polarkonsult, Praxair, Larvik Shipping, 2017)

Ο Seo (2016) ανέπτυξε σχέδια πλοίων για ένα πλοίο με χωρητικότητα CO_2 12.310t (για έργο μεταφοράς 1Mtpa) και 7 διαφορετικές πιέσεις μεταφοράς. Υπολογίζουν τον απαιτούμενο όγκο συγκράτησης φορτίου του πλοίου για τις διαφορετικές πιέσεις . Καθώς η πίεση αυξάνεται, η πυκνότητα του υγρού CO_2 μειώνεται, επομένως ο απαιτούμενος όγκος αυξάνεται. Ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει είναι ότι το μέγιστο μέγεθος της

δεξαμενής μειώνεται καθώς αυξάνεται η πίεση, επομένως απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός δεξαμενών. Οι δεξαμενές πρέπει επίσης να είναι διατηρούνται σε μια ορισμένη απόσταση μεταξύ τους για να επιτρέπονται επιθεωρήσεις. Επομένως, ο απαιτούμενος όγκος αποθήκευσης φορτίου αυξάνεται για έναν αυξανόμενο αριθμό δεξαμενών. Έτσι , ενώ ο απαιτούμενος όγκος του 12.310 tCO_2 είναι 34% υψηλότερος για την κατάσταση υψηλής πίεσης (45 bar) λόγω της μειωμένης πυκνότητας σε σύγκριση με την κατάσταση χαμηλής πίεσης (6 bar), ο απαιτούμενος όγκος συγκράτησης αυξάνεται κατά 122%.

3.3.1.2. Πίεση μεταφοράς για μεγάλα πλοία

Ενώ η συνθήκη μέσης πίεσης είναι η πιο αποδεκτή μορφή μεταφοράς υγρού CO_2 ,δεν θεωρείται πρακτική για μεγέθη πλοίων άνω των 10.000 tCO_2 . Ο λόγος για αυτό είναι τόσο εμπορικής όσο και τεχνικής φύσης: οι διαστάσεις και οι απαιτήσεις για πλοία έως 10.000t CO_2 είναι εντός του τυπικού εύρους για πλοία με υγραέριο πλήρους πίεσης και επομένως τα σχέδια μεταφοράς είναι άμεσα διαθέσιμα. Για υψηλότερη χωρητικότητα, απαιτούνται νέα σχέδια προσθέτοντας ένα σημαντικό ασφάλιστρο και ο σχεδιασμός τέτοιων μεγαλύτερων πλοίων είναι πρόκληση. Οι δεξαμενές για συνθήκες μέσης πίεσης έχουν μέγιστη διάμετρο περίπου 9 m, κάτι που επιτρέπει μια διάταξη 2 επί 2 στον πυθμένα του πλοίου, διατηρώντας παράλληλα τις τυπικές αναλογίες των διαθέσιμων σχεδίων πλοίων. Ανάλογα με το σχήμα του πλοίου, η μεταφορά περισσότερων από 10.000 t CO_2 μπορεί να απαιτεί διάταξη των δεξαμενών με την μία πάνω στην άλλη, οδηγώντας στην αύξηση του μήκους των δεξαμενών και του πλοίου, με αποτέλεσμα την κατασκευή ενός μακρόστενου πλοίου , το οποίο δεν είναι κατάλληλο για το απαιτούμενο περιβάλλον .

3.4. Επαναχρησιμοποίηση πλοίων υγραερίου - εκμετάλλευση πλοίων πολλαπλών αερίων.

Υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευαστούν νέα πλοία CO_2 με παρόμοια σχεδιαστικά στοιχεία των LPG πλοίων, αλλά προτείνεται επίσης ότι ένα υπάρχον πλοίο υγραερίου θα μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί για τη ναυτιλία CO_2 . Ακόμα τα πλοία θα μπορούσαν να κατασκευαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να λειτουργούν ως πλοία πολλαπλών αερίων, που μεταφέρουν CO_2 καθώς και υγραέριο (LPG). Αντίθετα, τα πλοία CO_2 θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν για μεταφορά υγραερίου, γεγονός που θα πρόσφερε

μείωση του κινδύνου για τους πιθανούς επενδυτές, εάν το πλοίο καταστεί περιττό για το εμπόριο CO_2 ((Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult, 2016), (ZEP, 2011), (Equinor, 2018).
Ωστόσο, η οικονομική σκοπιμότητα μιας τέτοιας μετατροπής ή μιας λειτουργίας πολλαπλών αερίων δεν έχει ακόμη αποδειχθεί. Η χρεοκοπημένη νορβηγική ναυτιλιακή εταιρεία *IM Skaugen* διέθετε έξι πλοία LPG 10.000 m^3 τα οποία είχαν επίσης εγκριθεί για τη μεταφορά CO_2 , αλλά δεν φαινόταν να έχουν χρησιμοποιηθεί για μεταφορά CO_2 (Brownsort, 2015). Επιπλέον, συνεντεύξεις με εταιρείες διαχείρισης ναυτιλίας και συμβούλους έχουν επισημάνει προκλήσεις και σημαντικές προσπάθειες για την επαναχρησιμο ποίηση του υγραερίου σε πλοία CO_2 . Ένα επιπλέον εμπόδιο για τη μετατροπή ενός πλοίου LPG σε πλοίο CO_2 είναι η διαφορά στις πυκνότητες. Το LPG έχει περίπου τη μισή πυκνότητα του υγρού CO_2 (LCO_2) στο εξεταζόμενο εύρος πίεσης. Επομένως, ένα πλοίο που έχει σχεδιαστεί γιανα μεταφέρει έναν ορισμένο όγκο (σε m^3) LPG, ενδέχεται να μην μπορεί να μεταφέρει τον ίδιο όγκο LCO_2 λόγω του μεγαλύτερου βάρους του CO_2 . Ακολούθως ο δομικός σχε -διασμός του πλοίου μπορεί να είναι κατώτερος για τη μεταφορά LCO_2 .
Τέλος, η μετασκευή πλοίων LPG δεν θα είχε σημαντική εξοικονόμηση κόστους, καθώς το CAPEX του πλοίου δεν είναι το πιο σημαντικό στοιχείο κόστους στη συνολική αλυσίδα εφοδιασμού ναυτιλίας (~14% εκτιμάται όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 5).

3.4.1. Σύγκριση πίεσης μεταφοράς CO_2.

Η πυκνότητα του υγρού CO_2 μειώνεται και το κόστος των δεξαμενών αποθήκευσης αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης (Ενότητα 3.2.). Ως εκ τούτου, είναι ***πιο αποδοτικό να μεταφέρεται CO_2 σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία***. Οι περισσότερες μελέτες υποθέτουν μια συνθήκη μεταφοράς κοντά στο τριπλό σημείο (5,2 bar, -56,6°C) , όπου το CO_2 συνυπάρχει σε αέρια, υγρή και στερεή μορφή, για τη μεταφορά του κυρίως φορτίου (Σχήμα 3. 2. 1.1.). Συνήθως η συνθήκη μεταφοράς επιλέγεται με ένα επαρκές περιθώριο μεταξύ του τριπλού σημείου για τη μείωση του κινδύνου σχηματισμού στερεών υπό κανονικές κλίμακες πίεσης λειτουργίας και θερμοκρασίας. Ωστόσο, το κόστος της υγροποίησης αποτελεί σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους μεταφοράς CO_2 με πλοίο και είναι υψηλότερο για χαμηλότερη πίεση μεταφοράς, επομένως το κόστος αυτό συμπεριλαμβάνεται κατά την αξιολόγηση της βέλτιστης από πλευράς κόστους συνθήκης του CO_2 .

3.5. Εκφόρτωση CO_2

Το CO_2 μπορεί είτε να εκφορτωθεί στην ξηρά σε λιμάνι (αποστολή από λιμάνι σε λιμάνι) από όπου θα μεταφερόταν περαιτέρω με αγωγό ή υπεράκτια σε χώρο μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Ενώ οι μεταφορές από λιμάνι σε λιμάνι δοκιμάζονται και δοκιμάζονται μέσω της εμπειρίας στους τομείς τροφίμων και ποτών καθώς και αμμωνίας, η υπεράκτια εκφόρτωση CO_2 δεν έχει ακόμη αποδειχθεί. Ωστόσο, υπάρχει σημαντική εμπειρία από τη μεταφορά υδρογονανθράκων και προτείνεται ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη υποδομής για την υπεράκτια εκφόρτωση CO_2 .

Όταν αναφερόμαστε στην υποδομή εκφόρτωσης, εννοούμε τη φυσική σύνδεση μεταξύ:

- του πλοίου και την προσωρινή αποθήκευση στο λιμάνι σε περίπτωση εκφόρτωσης στην ξηρά
- του πλοίου και το φρεάτιο της θέσης μακροπρόθεσμης αποθήκευσης σε περίπτωση εκφόρτωσης ανοικτής θάλασσας .

Η υποδομή που απαιτείται για να φέρει το CO_2 σε συνθήκες κατάλληλες για μεταφορά με αγωγό χώρο μακροπρόθεσμης αποθήκευσης αναφέρεται ως υποδομή αεριοποίησης και περι - γράφεται στην Ενότητα 3.6. .

Σε περίπτωση χερσαίας εκφόρτωσης σε λιμάνι, το CO_2 μεταφέρεται από το πλοίο σε προσωρινή αποθήκευση στο λιμάνι, χρησιμοποιώντας την ίδια υποδομή όπως και για τη φόρτωση: αντλίες, βραχίονες φόρτωσης και αγωγούς. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με αυτό το στοιχείο υποδομής έχουν ήδη περιγραφεί στην Ενότητα 3.3. .

Σε περίπτωση υπεράκτιας εκφόρτωσης, προτείνονται πολλά συστήματα μεταφοράς υδρογο – νανθράκων για χρήση που συνδέουν το πλοίο με το φρεάτιο έγχυσης, χωρίς σαφή συναίνεση σχετικά με το ποια είναι η καταλληλότερη λύση για το CO_2 . Η υπεράκτια εκφόρτωσηCO_2 είναι ακόμη ανώριμη και μη δοκιμασμένη ως ιδέα . Ο Vermeulen (2011) θεωρεί 4 διαφορετικά λεγόμενα συστήματα Single Point Mooring (SPM) που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μεταξύ πλοίου και κεφαλής φρέατος:

- Ένα βυθισμένο σύστημα φόρτωσης (SLS)
- Ένα σταθερό σύστημαπρόσδεσηςπύργου (FTSPM) που αναφέρεται επίσης ως Σύστημα πρόσδεσης πύργου (TMS)
- Σύστημα αγκυροβόλησης με ένα πόδι άγκυρας (SALM)
- Ένα συμβατικό σύστημα πρόσδεσης σημαδούρων (CBM)

Αυτά τα συστήματα διαφέρουν ως προς τα βάθη των υδάτων στα οποία μπορούν να αναπτυχθούν και την προσβασιμότητά τους . Περισσότερες πληροφορίες για αυτά τα συστήματα μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία, τόσο σε επισκόπηση (Brownsort, 2015), όσο και σε λεπτομερή περιγραφή (Vermeulen, 2011).

Τα συστήματα μεταφοράς μπορούν να διαφοροποιηθούν ως προς το εάν το CO_2 εκκενώνεται:

- απευθείας στο πηγάδι μέσω κάποιας υποθαλάσσιας σύνδεσης (άμεση έγχυση) . ή
- μέσω πλατφόρμας (όπως FTSPM ή Πλωτό Αποθηκευτικό Σκάφος), που επιτρέπει την εγκατάσταση εξοπλισμού επεξεργασίας σε αυτό.

Το CO_2 πρέπει να μεταφερθεί από την κατάσταση μεταφοράς του πλοίου σε κατάσταση κατάλληλη για έγχυση στο φρεάτιο, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του χώρου αποθήκευσης (περισσότερες λεπτομέρειες για αυτό στην Ενότητα 3.6) . Στην περίπτωση άμεσης έγχυσης, αυτή η προετοιμασία του CO_2 πρέπει να εκτελείται εξ' ολοκλήρου στο πλοίο. Στην περίπτωση εκφόρτωσης μέσω μιαςπλατφόρμας, μπορεί να εκτελεστεί εν μέρει στο πλοίο, εν μέρει στην πλατφόρμα .

Αυτές οι δύο επιλογές εκφόρτωσης ανοικτής θάλασσας συζητούνται λεπτομερώς στην βιβλιογραφία (TNO, 2016), με συζήτηση για το εάν η πλατφόρμα διαθέτει προσωρινή αποθήκευση ή όχι. Η χρήση πλατφόρμας με προσωρινή αποθήκευση επιτρέπει την απόρριψη του CO_2 σε υγρή μορφή από το πλοίο στην πλατφόρμα, γεγονός που μειώνει σημαντικά τον χρόνο εκφόρτωσης. Για την επιλογή άμεσης έγχυσης, χρησιμοποιείται ένα σύστημα SALM, για την επιλογή μιας πλατφόρμας χωρίς αποθήκευση, χρησιμοποιείται ένα σύστημα FTSPM και για την επιλογή πλατφόρμας με αποθηκευτικό χώρο, χρησιμοποιείται πλωτό σκάφος αποθήκευσης. Το TNO (2016) είναι η μόνη μελέτη που αναθεωρήθηκε η οποία παρέχει λεπτομερή ανάλυση σχεδιασμού για την εκφόρτωση ανοικτής θάλασσας καθώς και εκτιμή – σεις κόστους για τα μελετημένα σχέδια.

3.6. Αεριοποίηση

Για την έγχυση σε χώρο αποθήκευσης, οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης CO_2 πρέπει να είναι κατάλληλες για τη δεξαμενή που χρησιμοποιείται για μακροχρόνια αποθήκευση. Αναφερόμαστε στη διαδικασία επίτευξης αυτής της απαιτούμενης συνθήκης ως αεριοποίηση. Οι συνθήκες CO_2 κατάλληλες για ένεση εξαρτώνται από διάφορα χαρακτηριστικά του χώρου

αποθήκευσης. Οι περισσότερες μελέτες για τη ναυτιλία CO_2 θεωρούν ότι η έγχυση είναι εκτός του πεδίου της μελέτης .

Ωστόσο, οι συνθήκες έγχυσης καθορίζουν όχι μόνο τις απαιτήσεις αεριοποίησης και την κατάλληλη τεχνολογία εκφόρτωσης, αλλά και τον πιθανό ρυθμό ροής, καθώς οι χώροι αποθήκευσης έχουν μέγιστους επιτεύξιμους ρυθμούς έγχυσης από άποψη kg /s. Επομέ-νως, ο ρυθμός ροής οποιουδήποτε έργου που χρησιμοποιεί μια ενιαία θέση αποθήκευσης περιορίζεται από τον ρυθμό έγχυσης του χώρου αποθήκευσης. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί προσεκτική προσοχή στην αύξηση και προς τα κάτω της έγχυσης του CO 2 καθώς μια ξαφνικήδιακοπή της έγχυσης (π.χ. όταν ένα πλοίο έχει εκφορτιστεί πλήρως με άμεση έγχυση) μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό ξηρού πάγου και υδρίτη (Vermeulen , 2011).

Μια λεπτομερής ανάλυση των τεχνικών απαιτήσεων της έγχυσης δίνεται στο Vermeulen (2011), μια επισκόπηση δίνεται στο Brownsort (2015). Το TNO (2016) περιγράφει τις συνθήκες έγχυσης για 2 διαφορετικούς τύπους αλατούχων υδροφορέων και 2 διαφορετικούς τύπους εξαντλημένων πεδίων αερίου, το καθένα σε τέσσερα διαφορετικά βάθη (1000 m, 2000 m, 3000 m, και 4000 m).

Μαζί, αυτοί οι 16 διαφορετικοί τύποι υπογείων χώρων αποθήκευσης καλύπτουν το εύρος των τυπικών συνθηκών των τοποθεσιών αποθήκευσης στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας .

Ο χώρος αποθήκευσης επιβάλλει, μεταξύ άλλων, τους ακόλουθους περιορισμούς στις κατάλληλες για έγχυση συνθήκες CO_2 :

- Η πίεση CO_2 στον πυθμένα-οπή του φρεατίου (είσοδος δεξαμενής) πρέπει να υπερνικήσει την πίεση του ρεζερβουάρ. Αυτή η πίεση εξαρτάται από το επίπεδο πλήρωσης της δεξαμενής και επομένως μεταβάλλεται με την ωριμότητα του έργου. Η απαίτηση πίεσης στην οπή του πυθμένα μεταφράζεται σε απαίτηση στην κεφαλή του φρεατίου και συζητούνται πιέσεις κεφαλής φρέατος 50 – 400 bar .
- Για να αποφευχθεί ο σχηματισμός υδρατμών και ξηρού πάγου, που μπορεί να προκαλέσουν μπλοκαρίσματα, η θερμοκρασία στην κάτω οπή του φρεατίου (είσοδος δεξαμενής) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 15°C. Αυτό μεταφράζεται σε μια απαιτούμενη θερμοκρασία από -15°C έως +20°C στην κεφαλή του φρεατίου ανάλογα με την απαίτηση πίεσης.

Για να φέρει το CO_2 από την κατάσταση μεταφοράς στην απαιτούμενη κατάσταση κεφαλής φρέατος, αντλείται στην κατάλληλη πίεση και θερμαίνεται στην κατάλληλη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας έναν εναλλάκτη θερμότητας. Ο Vermeulen (2011) προτείνει να

εγκατασταθεί μια μικρή μονάδα ατμοποιητή στο πλοίο για να διατηρείται η πίεση στις δεξαμενές του πλοίου όταν το υγρό CO_2 εκκενώνεται. Η συμπίεση υγρού CO_2 με τη χρήση αντλιών απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια από τη συμπίεση αερίου CO_2 με χρήση συμπιεστών λόγω του σημαντικά μικρότερου ειδικού όγκου υγρού CO_2 (Alabdulkarem, 2012). Οι ενεργειακές απαιτήσεις για την άντληση και τη θέρμανση CO_2 ποικίλλουν ανάλογα με την κατάσταση έγχυσης καθώς και την κατάσταση μεταφοράς. Συνήθως θεωρείται ότι το θαλασσινό νερό χρησιμοποιείται στον εναλλάκτη θερμότητας για τη θέρμανση του CO_2 . Ανάλογα με την απαιτούμενη θερμοκρασία κεφαλής φρέατος και την θερμοκρασία του θαλασσινού νερού, μπορεί να είναι απαραίτητο να προθερμανθεί το θαλασσινό νερό που χρησιμοποιείται στον εναλλάκτη θερμότητας. Η θερμότητα που απαιτείται για αυτό μπορεί να παρέχεται από την απορριπτόμενη θερμότητα της μηχανής του πλοίου ή από τη διαθέσιμη απορριπτόμενη θερμότητα από την πλατφόρμα έγχυσης, εάν μια πλατφόρμα χρησιμοποιείται για εκφόρτωση. Εάν δεν υπάρχει επαρκής διαθέσιμη απορριπτόμενη θερμότητα, μπορεί να απαιτηθεί ένα σύστημα θέρμανσης με καύσιμο το οποίο μπορεί να έχει επιπτώσεις στο κόστος και τις πρόσθετες εκπομπές (Brownsort, 2015).

Στην περίπτωση της χερσαίας εκφόρτωσης, η αεριοποίηση γίνεται στην ξηρά μετά την εκφόρτωση από το πλοίο στην προσωρινή αποθήκευση . Εκτός από την απαίτηση πίεσης στον χώρο αποθήκευσης, το CO_2 πρέπει να αντλείται σε επαρκή πίεση για να υπερνικηθεί η πίεση του αγωγού. Ο Seo (2016) υποθέτει την εκφόρτωση στην στεριά στη μελέτη του και περιγράφει τον απαραίτητο εξοπλισμό για να φέρει το CO_2 από τις διάφορες συνθήκες μεταφοράς πλοίων από 6 έως 65 bar σε έναν αγωγό πίεση 100 bar . Στο σχεδιασμό της διεργασίας του, το CO_2 αρχικά φέρεται στην κατάλληλη πίεση και στη συνέχεια θερμαίνεται στην κατάλληλη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας τον εναλλάκτη θερμότητας. Αναφέρουν ότι για την πίεση μεταφοράς των 65 bar δεν χρειάζεται πλέον εναλλάκτης θερμότητας αφού η θερμοκρασία του CO_2 στην πίεση μεταφοράς είναι ήδη πάνω από 15°C.

Για την υπεράκτια εκφόρτωση, οι περισσότερες μελέτες προτείνουν ότι το CO_2 αντλείται και θερμαίνεται είτε εξ ολοκλήρου στο πλοίο είτε σε κάποιο βαθμό στο πλοίο και σε κάποιο βαθμό στην πλατφόρμα. Για άμεση έγχυση από το πλοίο, όλη η άντληση και η θέρμανση πρέπει να πραγματοποιούνται επί του πλοίου. Ο Vermeulen (2011) περιγράφει μια ιδέα για ένα σύστημα αεριοποίησης επί του πλοίου το οποίο αντλεί το CO_2 στην απαιτούμενη πίεση (154-400 bar) σε δύο (02) στάδια, με τη θέρμανση να εφαρμόζεται στο CO_2 μετά το πρώτο στάδιο άντλη - σης . Η TNO (2016) εξέτασε λεπτομερείς έννοιες σχεδιασμού του εξοπλισμού άντλησης και θέρμανσης που απαιτείται για τις επιλογές εκφόρτωσης που εξετάζουν όπως άμεση έγχυση ή

εκφόρτωση μέσω πλατφόρμας (με ή χωρίς αποθήκευση). Εκτελούν επίσης προσομοιώσεις διαδικασίας της αεριοποίησης και παρέχουν εκτιμήσεις κόστους για τον εξοπλισμό, καθώς και ενεργειακές απαιτήσεις για άντληση και θέρμανση και για τους 16 τύπους δεξαμενών της Βόρειας Θάλασσας που εξετάζονται .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Επισκόπηση Κόστους στην Ναυτιλία Μεταφοράς (CO_2)

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα θα ακολουθήσει μία σύντομη οικονομική εκτίμηση των στοιχείων της αλυσίδας μεταφοράς CO_2, σε τιμές που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία και στις οποίες βασίστηκαν οι έρευνες της elementenergy ltd (2018), καθώς και των Simon Roussanaly and Haibo Zhai

4.2. Υγροποίηση

Το κόστος υγροποίησης αποτελείται από το CAPEX και το σταθερό OPEX της μονάδας υγροποίησης καθώς και από το μεταβλητό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ετήσιος ρυθμός ροής CO_2 καθορίζει την ποσότητα ανά ώρα που πρέπει να παράγει η μονάδα υγροποίησης και επομένως η μονάδα υγροποίησης κλιμακώνεται με την παροχή του έργου.

Ο Πίνακας 3. δείχνει τις τιμές CAPEX και OPEX της υγροποίησης που βρίσκονται στη βιβλιογραφία καθώς και τις τιμές της απαίτησης ενέργειας υγροποίησης σε kWh ανά t CO_2. Το κόστος μετατράπηκε σε € 2017 με βάση τις συναλλαγματικές ισοτιμίες λίρας Ηνωμένου Βασιλείου .

Αναφορά	Πίεση μεταφοράς	Πίεση εισόδου (bar)	Ρυθμός ροής (Mtpa)	Συγκεκριμένο CAPEX (€/(tCO 2 /a))	Ενέργεια (kWh/tCO 2)
Oi et al, 2016 - 1	Low P	2	1.1	18.99	80.3
Oi et al, 2016 - 2	Low P	2	1.1	19.67	80.2
Oi et al, 2016 - 3	Low P	2	1.1	23.85	143.2
Oi et al, 2016 - 4	Low P	2	1.1	23.29	87.0
Seo et al, 2016 - 1	Low P	1.8	1	24.08	130.5
Seo et al, 2016 -2	Med P	1.8	1	18.77	104
Seo et al, 2016 - 3	High P	1.8	1	11.98	88
Yoo et al, 2013 - 1	Low P	1	10	N/A	106.3
TelTek, 2014 - 1	Low P	7	0.8	7.9	N/A
TelTek, 2014 - 2	Low P	7	0.8	8.93	N/A
CO_2Europipe, 2011	Low P	7.5	3	10.28	42
Yoo et al, 2013 - 2	Low P	10.0	10	N/A	17.3

Πίνακας 4.1.: Εκτιμήσεις κόστους ρευστοποίησης από τη βιβλιογραφία

4.3. Αποθήκευση

Το κόστος της προσωρινής χερσαίας αποθήκευσης εξαρτάται γραμμικά από τη χωρητικότητα αποθήκευσης. Η χωρητικότητα αποθήκευσης θεωρείται ότι είναι το 120% της συνδυασμένηςχωρητικότητας CO_2 του στόλου πλοίων, δηλαδή ένας στόλος δύο πλοίων των 10.000 tCO2 απαιτεί χωρητικότητα αποθήκευσης 24.000 t CO_2. Αυτό το πολλαπλάσιο βασίζεται στηβιβλιογραφία (Yoo BC, 2013), παρέχοντας έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ της λειτουργικής ευελιξίας και της αποδοτικότητας κόστους.

Οι τιμές για το ειδικό κόστος της προσωρινής αποθήκευσης (δηλ. κόστος ανά τόνο χωρητικότητας αποθήκευσης CO_2) όπως βρίσκονται στη βιβλιογραφία απεικονίζονται στον πίνακα 4.2. Για τις συνθήκες μέσης και υψηλής πίεσης, χρησιμοποιείται το συγκεκριμένο CAPEX από (Seo, 2016), η μόνη αναθεωρημένη δημοσίευση που καθορίζει το κόστος για

μεταφορά χαμηλής πίεσης και υψηλής πίεσης. Για την κατάσταση χαμηλής πίεσης, λαμβάνουμε υπόψη μόνο τις συγκεκριμένες τιμές CAPEX των 2 νεότερων δημοσιεύσεων (Seo, 2016) και (Tel-Tek, 2014) και επιπλέον μόνο την τιμή NOAK (Nth of a kind) της τελευταίας. Οι τιμές OPEX αποθήκευσης (σε % του CAPEX, κυρίως συντήρηση και επισκευή) λαμβάνονται από (Seo et al., 2016).

Στην περίπτωση της χερσαίας εκφόρτωσης ή της υπεράκτιας εκφόρτωσης σε μια πλατφόρμα, θεωρείται ότι θα κατασκευαστεί χώρος αποθήκευσης του ίδιου μεγέθους με εκείνο της φόρτωσης στον τερματικό σταθμό ή την πλατφόρμα προορισμού. Στην περίπτωση υπεράκτιας εκφόρτωσης με άμεση έγχυση, δεν θεωρείται ότι θα κατασκευαστεί χώρος αποθήκευσης για το χώρο εκφόρτωσης .

Αναφορά σημείου δεδομένων	**Πίεση με ταφοράς**	**Χωρητικ ότητα (tCO2)**	**CAPEX (€ εκ.)**	**Συγκεκριμένο CAPEX (€/tCO 2)**	**OPEX/y (% του CAPEX)**
Seo et al., 2016 - 1	Low P	12,310	7.1	577	5%
Seo et al., 2016 - 2	Med P	12,310	11.7	951.7	5%
Seo et al., 2016 - 3	High P	12,310	45.25	3.68	5%
TelTek, 2014 - 1	Low P	14,285	14,72	658.40	5%

Πίνακας 4.2: Εκτιμήσεις κόστους αποθήκευσης από τη βιβλιογραφία

4.4. Φόρτωση

Η υποδομή φόρτωσης στο λιμάνι αποτελείται από αντλίες και αγωγούς, μέσω των οποίων το CO_2 διοχετεύεται από την προσωρινή αποθήκευση στο πλοίο. Ο χρόνος φόρτωσης θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του πλοίου λόγω του συλλογισμού στην Ενότητα 3.3 και ο χρόνος φόρτωσης είναι 15 ώρες (Cato, 2016), που αντιπροσωπεύει μια κεντρική τιμή σε σύγκριση με περαιτέρω τιμές που καθορίζονται στη βιβλιογραφία.

Υποτίθεται ότι το CAPEX για την υποδομή φόρτωσης στο λιμάνι εξαρτάται γραμμικά απότον ρυθμό ροής του έργου, καθώς πρέπει να αναπτυχθεί περισσότερη υποδομή φόρτωσης για υψηλότερους ρυθμούς ροής ώστε να διατηρείται σταθερός ο χρόνος φόρτωσης . Οι τιμές κόστους των CAPEX και OPEX της υποδομής φόρτωσης που βρίσκονται στη

βιβλιογραφία εμφανίζονται στον Πίνακα 4.3.

Αναφορά σημείου δεδομένων	**Ρυθμός ροής (Mtpa)**	**CAPEX (€ εκ.)**	**Συγκεκριμένο CAPEX (€/(tCO 2 /a))**	**OPEX/a (% του CAPEX)**
CO2 Ευρώπη, 2011	3	8.4	2.80	2%
Kuljanpää, 2011	3	2.6	0.88	1%
TelTEK, 2014 - 1	0.8	0.9	1.07	5%
TelTEK, 2014 - 2	0.8	1.3	1.68	4%

Πίνακας 4.3: Εκτιμήσεις κόστους φόρτωσης από τη βιβλιογραφία

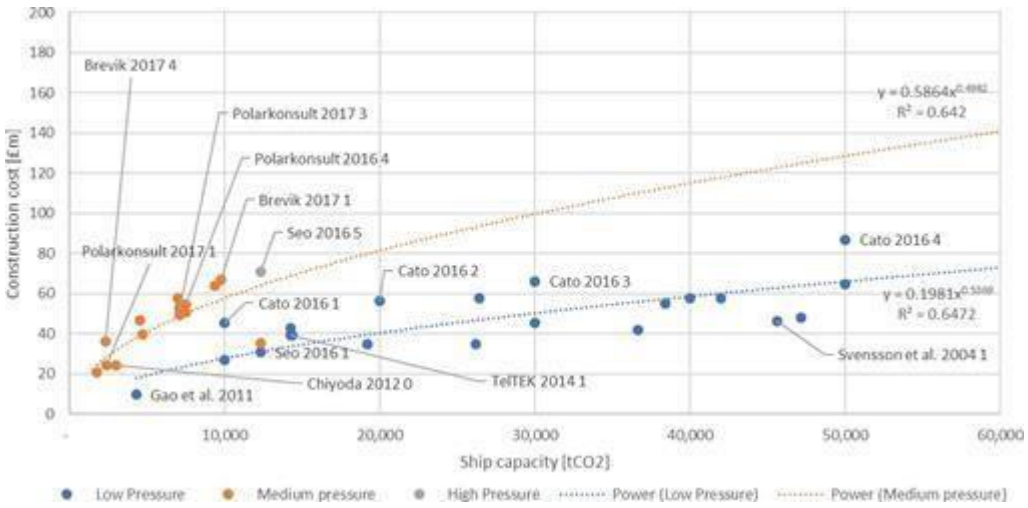
4.5. Έξοδα μεταφοράς με πλοίο.

Το κόστος μεταφοράς των πλοίων διαμορφώνεται ως αποτελούμενο από το κεφαλαιακό κόστος του πλοίου (CAPEX) και του λειτουργικού του κόστους (OPEX), όπου το OPEX αναλύεται παρακάτω σε σταθερό OPEX, λιμενικά τέλη και κόστος καυσίμων .

4.5.1. Κεφαλαιακό κόστος πλοίου CAPEX

Το κεφαλαιακό κόστος του πλοίου (CAPEX) που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, κυ - ρίως από το μέγεθος του και αριθμό των πλοίων που χρειάζονται. Για δεδομένο ρυθμό ροής, απόσταση και μέγεθος πλοίου, υπολογίζεται ο αριθμός των πλοίων που απαιτούνται χρησιμο - ποιώντας τη συνολική διάρκεια μετ' επιστροφής. Αυτή η διάρκεια αποτελείται από το χρόνο φόρτωσης, τον χρόνο ταξιδιού (από και προς τον προορισμό, ανάλογα με την απόσταση και την ταχύτητα), τον χρόνο ελιγμών και εκφόρτωσης στο λιμάνι. Μια ταχύτητα πλοίου 15 κόμβων (knots) θεωρείται η μέση ταχύτητα των χημικών δεξαμενόπλοι- ων (Seo, 2016) σύμφωνα πάντα με τις τιμές που βρέθηκαν στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας (κυρίως μεταξύ 13 – 16 κόμβων). Η διαίρεση των συνολικών ωρών λειτουργίας ενός πλοίου ανά έτος με αυτόν τον συνολικό χρόνο ταξιδιού αποδίδει τον συνολικό αριθμό τα-

ξιδιών που μπορεί να πραγματοποιήσει ένα πλοίο ανά έτος και επομένως την ποσότητα CO2 που μπορεί να μεταφερθεί ανά πλοίο ανά έτος. Διαίρεση του ρυθμού ροής με την ποσότητα του CO_2 που μεταφέρεται ανά πλοίο, ανά έτος, δίνει τον αριθμό των πλοίων που χρειάζονται για ένα έργο. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις τιμές του πλοίου CAPEX, δηλαδή το κόστος κατασκευής, που βρίσκονται στη βιβλιογραφία. Για τις συνθήκες μεταφοράς χαμηλήςκαι μέσης πίεσης, χρησιμοποιούνται καμπύλες παλινδρόμησης ισχύος για την εκτίμηση των τιμών.

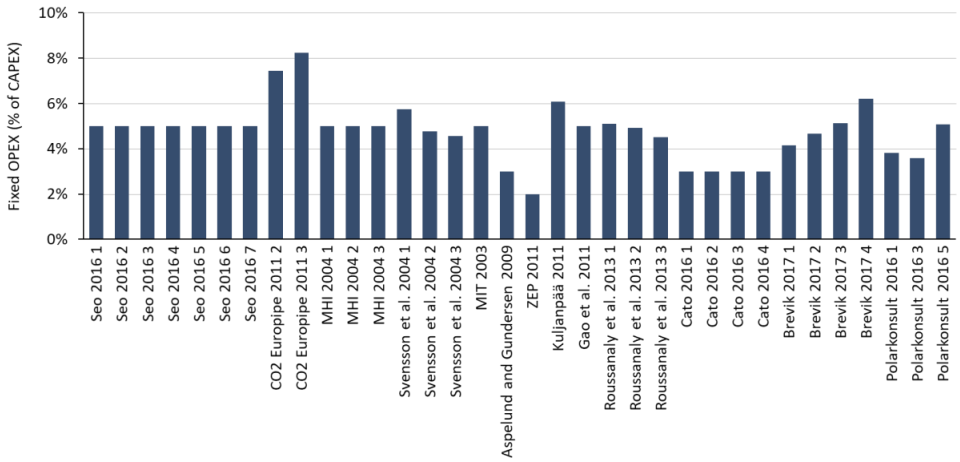


Σχήμα 4.5.1.1: Τιμές CAPEX του πλοίου που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία

Οι τιμές για μεταφορά χαμηλής και μέσης πίεσης βασίζονται στις καμπύλες παλινδρόμησης όπως εμφανίζονται στο παραπάνω διάγραμμα. Οι τιμές υψηλής πίεσης προκύπτουν με την κλιμάκωση της καμπύλης παλινδρόμησης της συνθήκης μεταφοράς μέσης πίεσης έτσι ώστε να διασχίζει το σημείο δεδομένων που βρέθηκε για μεταφορά υψηλής πίεσης. Για μεγέθη πλοίων άνω των 10kt CO_2 θεωρείται ότι μόνο η μεταφορά χαμηλής πίεσης είναι βιώσιμη.

4.5.2. Πάγιο OPEX

Το πάγιο – σταθερό λειτουργικό κόστος (OPEX) του πλοίου αποτελείται από τα έξοδα πληρώματος, συντήρησης και επισκευής καθώς και έξοδα διαχείρισης και ασφάλισης. Οι τιμές για αυτά τα κόστη σε ποσοστό (%) επί του CAPEX πλοίου εμφανίζονται στο Σχήμα 4.5.2.1 . Με βάση αυτά, θεωρείται προσεγγιστικά ότι το 5% του CAPEX του πλοίου, αποτελεί την τιμή του σταθερού OPEX, την πιο κοινή τιμή που προσδιορίζεται στη βιβλιογραφία .



Σχήμα 4.5.2.1.: Ναυτιλιακή μεταφορά σταθερών τιμών OPEX που βρίσκονται στη βιβλιογραφία

Τηρώντας τα μεγέθη που αναφέρθηκαν σε αυτήν την παράγραφο καθώς και στην 4.5.1., οι οι Jan Kjärstad et al. (2016), συνέταξαν τον παρακάτω πίνακα που είναι ενδεικτικός αναφορικά με το ύψος κόστους CAPEX και OPEX πλοίων αναλόγως μεταφορικής ικανότητας (Ship Capacity), λαμβάνοντας υπόψιν χαμηλή πίεση (7bar, 15 bar) μεταφοράς αερίου. Οι τιμέςπου αναφέρονται, εφόσον συνυπολογιστούν με έναν πληθωρισμό της τάξης του 19,6% από το2016 μέχρι σήμερα μπορούν να επαναπροσδιοριστούν με ακρίβεια στα σημερινά δεδομένα (https://www.in2013dollars.com/europe/inflation/).

	CAPEX		Fixed OPEX	
Ship Capacity				
	7 Bar	**15 Bar**	**7 Bar**	**15 Bar**
ktCO$_2$/Ship	**M€/Ship**	**M€/Ship**	**M€/Ship/year**	**M€/Ship/year**
2.5	16.2	35.4	0.81	1.77
5	23.5	50	1.18	2.5
7.5	29.2	61.2	1.46	3.06
10	34.1	70.6	1.71	3.53
12.5	38.4	78.9	1.92	3.95
15	42.4	86.4	2.12	4.32
20	49.4	99.7	2.47	4.99
25	55.7	111.5	2.79	5.58
30	61.5	122.1	3.08	6.11
35	66.8	131.8	3.34	6.59
40	71.7	140.9	3.59	7.05
45	76.4	149.4	3.82	7.47
50	80.9	157.5	4.05	7.88
60	89.2	172.4	4.46	8.62
70	96.9	186.2	4.85	9.31
80	104.1	199	5.21	9.95
90	110.9	211	5.55	10.6
100	117.3	222.4	5.87	11.1

Πίνακας 4.4. Το CAPEX του πλοίου σε συνάρτηση της χωρητικότητας του, με τιμές μελέτης Element Energy Limited για 7 και 15 bar πίεση μεταφοράς Λήφθηκε υπόψιν ετήσιο OPEX 5% του CAPEX του πλοίου.Πηγή: Simon Roussanaly et al. (08/2021)

4.5.3. Λειτουργικές παράμετροι ναυτιλίας

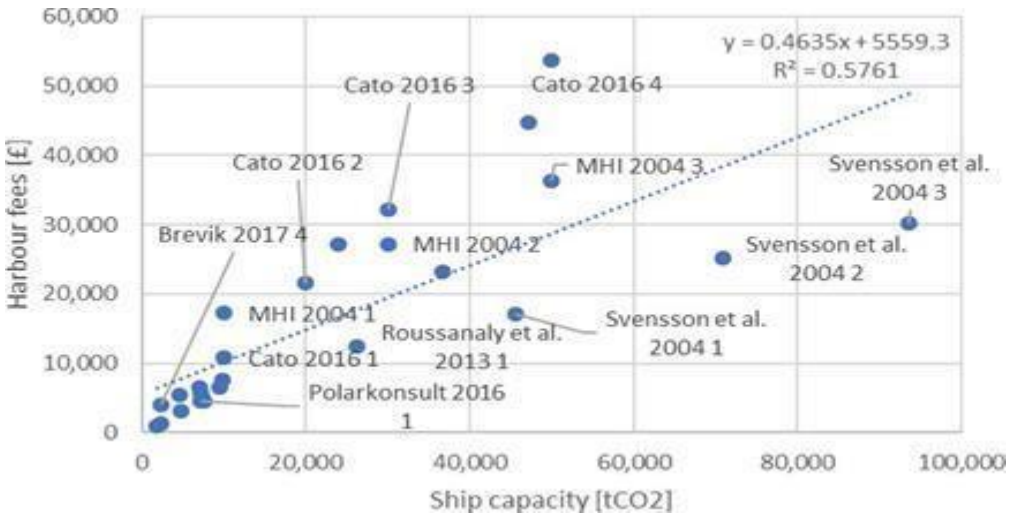
Σημαντικούς παράγοντες που διαμορφώνουν το λειτουργικό κόστος του πλοίου μεταφοράς CO_2 αποτελούν επίσης και οι επιμέρους κινήσεις του (π.χ. είσοδος – έξοδος από λιμένα), η ταχύτητά του (κατανάλωση καυσίμου), οι ώρες λειτουργίας και άλλες όπως απαρατίθενται στον παρακάτω πίνακα

Παράμετρος	Μονάδα	Αξία	Πηγή
Χρόνος φόρτωσης/εκφόρτωσης στην ξηρά	h	15	Cato 2016
Χρόνος εκφόρτωσης ανοικτής θάλασσας	h	36	Cato 2016
Είσοδος/Έξοδος λιμένα	h	2	Seo et al., 2016
Υπεράκτια σύνδεση	h	4	TelTek, 2014
Ετήσιες ώρες λειτουργίας	h	8,322	Roussanaly et al, 2014
Ταχύτητα πλοίου (μεγάλα πλοία)	nm/h	15	Seo et al., 2016

Πίνακας 4.5 : Λειτουργικές παράμετροι ναυτιλίας-βιβλιογραφία.

4.5.4. Λιμενικά τέλη

Ένα επιπλέον στοιχείο OPEX κόστους του πλοίου είναι τα λιμενικά τέλη, τα οποία αυξάνοντα με το μέγεθος, δηλαδή τη χωρητικότητα, του πλοίου. Μια παλινδρόμηση που βασίζεται στα δεδομένα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται παρακάτω. Τα προκύπτοντα τέλη ποικίλλουν φυσικά μεταξύ των λιμανιών και οι λεπτομερείς μελέτες σκοπιμότητας για κάθε συγκεκριμένο έργο θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα τέλη όλων των λιμανιών στη δια-δρομή του πλοίου .



Σχήμα 4.5.4.1. : Λιμενικά τέλη που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, ανά ταξίδι μετ' επιστροφής.

Το ετήσιο λειτουργικό κόστος ενός πλοίου ορίζεται στο 5% του πλοίου CAPEX ενώ και τα λιμενικά τέλη 1,1 € /τόνοCO_2 σε κάθε λιμάνι. Τέλος, για πλοία που χρησιμοποιούνται ως τερματικοί σταθμοί υποδοχής στην περίπτωση μεταφοράς CO_2 σε μια υπεράκτια τοποθε - σία, το κόστος τους υποτίθεται ότι είναι 20% υψηλότερα από αυτά για ένα τυπικό πλοίο. Αυτή η αύξηση οφείλεται στις απαιτήσεις κατασκευής και εγκατάστασης που προστατεύουν από δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες, την ανάγκη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την επισκευή, καθώς και την τοπική υποδομή στην υπεράκτια τοποθεσία.

4.5.5. Κόστος καυσίμων πλοίων

Το κόστος καυσίμου εξαρτάται από την κατανάλωση καυσίμου του πλοίου και το μέγεθος του πλοίου (σε tCO_2). Οι τιμές κατανάλωσης καυσίμου που βρίσκονται στη βιβλιογραφία για διάφορα μεγέθη πλοίων εμφανίζονται στον πίνακα 4.6.

	CAPEX	**Fixed OPEX**	
Ship Capacity	**7 Bar**	**7 Bar**	**Specific Fuel Consumption**
$ktCO_2$/Ship	**M€/Ship**	**M€/Ship/year**	**fuel/tCO_2/km**
2.5	16.2	0.81	**7.07**
5	23.5	1.18	**6.97**
7.5	29.2	1.46	**6.87**
10	34.1	1.71	**6.77**
12.5	38.4	1.92	**6.67**
15	42.4	2.12	**6.58**
20	49.4	2.47	**6.38**
25	55.7	2.79	**6.18**
30	61.5	3.08	**5.98**
35	66.8	3.34	**5.78**
40	71.7	3.59	**5.59**
45	76.4	3.82	**5.39**
50	80.9	4.05	**5.19**
60	89.2	4.46	**4.79**
70	96.9	4.85	**4.40**
80	104.1	5.21	**4.00**
90	110.9	5.55	**3.61**
100	117.3	5.87	**3.21**

Πίνακας 4.6. Η κατανάλωση καυσίμων, με τιμές μελέτης Element Energy Limited για 7 και 15 bar πίεση μεταφοράς Λήφθηκε υπόψιν ετήσιο OPEX 5% του CAPEX του πλοίου.Πηγή: Simon Roussanaly et al. (08/2021)

Το καύσιμο πλοίου είναι συνήθως το MDO (Marine Diesel Oil). Η κατανάλωση καυσίμου σε τόνους/ημέρα πολλαπλασιάζεται με τον συνολικό χρόνο ταξιδιού ενός πλοίου ανά έτος και τον αριθμό των πλοίων, για να ληφθεί η συνολική κατανάλωση καυσίμου του στόλου ανά έτος . Τέλος, αυτή η κατανάλωση πολλαπλασιάζεται με τις υποτιθέμενες τιμές καυσίμου MDO. Το μεταβλητό κόστος λειτουργίας υπολογίζεται με βάση το κόστος του καυσίμου σε 325 € / τόνο (2018).

4.6. Εκφόρτωση

4.6.1 Εκφόρτωση στην ξηρά

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ίδιο κόστος με τη φόρτωση θεωρείται ότι προκύπτουν στην περίπτωση της χερσαίας εκφόρτωσης, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται η ίδια υποδομή . Επομένως, αυτά τα κόστη μοντελοποιούνται με τον ίδιο τρόπο όπως τα κόστη φόρτωσης .

4.6.2. Εκφόρτωση ανοικτής θάλασσας

Για την υπεράκτια εκφόρτωση υπάρχουν τρεις διαθέσιμες επιλογές :

- Άμεση έγχυση
- Έγχυση μέσω νέας πλατφόρμας με αποθήκευση
- Έγχυση μέσω υπάρχουσας πλατφόρμας με αποθήκευση

Οι εκτιμήσεις κόστους βασίζονται στο (TNO, 2016), το οποίο διερευνά την επιλογή υπεράκτιας εκφόρτωσης με περισσότερες λεπτομέρειες μεταξύ της αναθεωρημένης βιβλιογραφίας και παρέχει εκτιμήσεις κόστους για την απαραίτητη υποδομή.
Οι εκτιμήσεις κόστους αυτής της υποδομής προσδιορίζονται στην παρούσα μελέτη μαζί με εκτιμήσεις από άλλες μελέτες, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα .

Αναφορά	Σχέδιο	Κατάσταση CO 2	Ρυθμός ροής CO 2 (Mtpa)	CAPEX (€ εκ.)	OPEX/έτος (% του CAPEX)
Cato, 2016	SALM	Low P	3.8	19.7	5%
Cato, 2016	TMS	Low P	3.8	44.5	5%
Cato, 2016	Platf. w/ stor.	Low P	3.8	108.8	5%
Petrofac, 2012	CALM	Low P	5	72.6	4%
TelTEK, 2014	STL NOAK	Low P	0.8	20.6	5%

Πίνακας 4.6.2.1: Εκτιμήσεις κόστους εκφόρτωσης ανοικτής θάλασσας που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία

Για την επιλογή άμεσης έγχυσης, το κόστος του καθορισμένου συστήματος SALM (Cato, 2016) θεωρείται ως σταθερό κόστος CAPEX, με το OPEX να θεωρείται ότι είναι 5% του CAPEX ετησίως. Η εκτίμηση CAPEX στο (TNO, 2016) για την πλατφόρμα με αποθήκευση περιλαμβάνει το κόστος ενός συστήματος αποθήκευσης 40.000 τόνων.

Το ετήσιο OPEX θεωρείται ότι είναι το 5% του CAPEX. Στην περίπτωση εκφόρτωσης σε υφιστάμενη πλατφόρμα με αποθηκευτικό χώρο, υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει CAPEX για την πλατφόρμα αλλά το ίδιο OPEX όπως στην περίπτωση εκφόρτωσης σε (νεόδμητη) πλατφόρμα. Το κόστος CAPEX της υπεράκτιας υποδομής εκφόρτωσης έχει θεωρηθεί ότι εί - ναι ένα σταθερό κόστος, ανεξάρτητο από το ρυθμό ροής, για να αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι η υπεράκτια υποδομή απαιτεί εξοπλισμό μεγάλης κλίμακας που διατίθεται σε τυποποιημένη μορφή και ότι η κατασκευή σε δύσκολες συνθήκες είναι δαπανηρή (TNO, 2016).

4.7. Κόστος αεριοποίησης

4.7.1 Αεριοποίηση στην ξηρά

Για την αεριοποίηση στην ξηρά, οι παραδοχές κόστους που λαμβάνονται από το (Seo, 2016) συνοψίζονται στον Πίνακα 4.7.1.1. Το CAPEX θεωρείται ότι κλιμακώνεται με τον ρυθμό ροής του έργου και το OPEX μοντελοποιείται ως κόστος ανά τόνο CO_2 συμπερι- λαμβανομένου του κόστους συντήρησης και καυσίμου της μονάδας .

Αναφορά	Πίεση μεταφοράς	CAPEX (€/(t/a))	OPEX (€/tCO 2)
Seo et al., 2016	Low P	0.83	0.33
Seo et al., 2016	Med P	0.78	0.31
Seo et al., 2016	High P	0.50	0.23

Πίνακας 4.7.1.1: Εκτιμήσεις κόστους αεριοποίησης που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία

4.7.2 Αεριοποίηση υπεράκτιων

Για την υπεράκτια αεριοποίηση, χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις κόστους που δίνονται στο (TNO, 2016), καθώς αυτή η μελέτη παρέχει το υψηλότερο επίπεδο λεπτομέρειας για την επιλογή υπεράκτιας εκφόρτωσης μεταξύ της αναθεωρημένης βιβλιογραφίας, ενώ παρέχει επίσης εκτιμήσεις κόστους . Οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Αναφορά	Επιλογή εκφόρτωσης	Πίεση μεταφοράς	CAPEX (€/(t/a))	Διορθώθηκε το OPEX (% του CAPEX)	Ενέργεια (kWh/$_{tCO2}$)
(TNO, 2016)	Απευθείας έγχ.	Low P	5.1	5%	6.8
(TNO, 2016)	Απευθείας έγχ.	Med P	5.1	5%	6.5
(TNO, 2016)	Απευθείας έγχ.	High P	5.1	5%	5.4
(TNO, 2016)	Platf. w/ st.	Low P	8.0	5%	10.3
(TNO, 2016)	Platf. w/ st.	Med P	8.0	5%	10.0
(TNO, 2016)	Platf. w/ st.	High P	8.0	5%	9.0

Πίνακας 4.7.2.1. Υποθέσεις κόστους υπεράκτιας αεριοποίησης TNO 2016

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για έναν δεδομένο ρυθμό ροής, η ενεργειακή απαίτηση για αεριοποίηση είναι υψηλότερη στην περίπτωση έγχυσης μέσω πλατφόρμας από ό,τι για άμεση έγχυση. Αυτό συμβαίνει επειδή η πίεση έγχυσης CO_2 είναι περίπου 200 bar στην περίπτωση άμεσης έγχυσης ενώ είναι 300 bar στην περίπτωση έγχυσης μέσω πλατφόρμας . Ωστόσο, η έγχυση στα 300 bar επιτρέπει επίσης υψηλότερο ρυθμό έγχυσης και άρα μικρότερος χρόνος εκφόρτωσης .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 . Κόστος μεταφοράς CO_2

5.1. Έργα Μεταφοράς CO_2

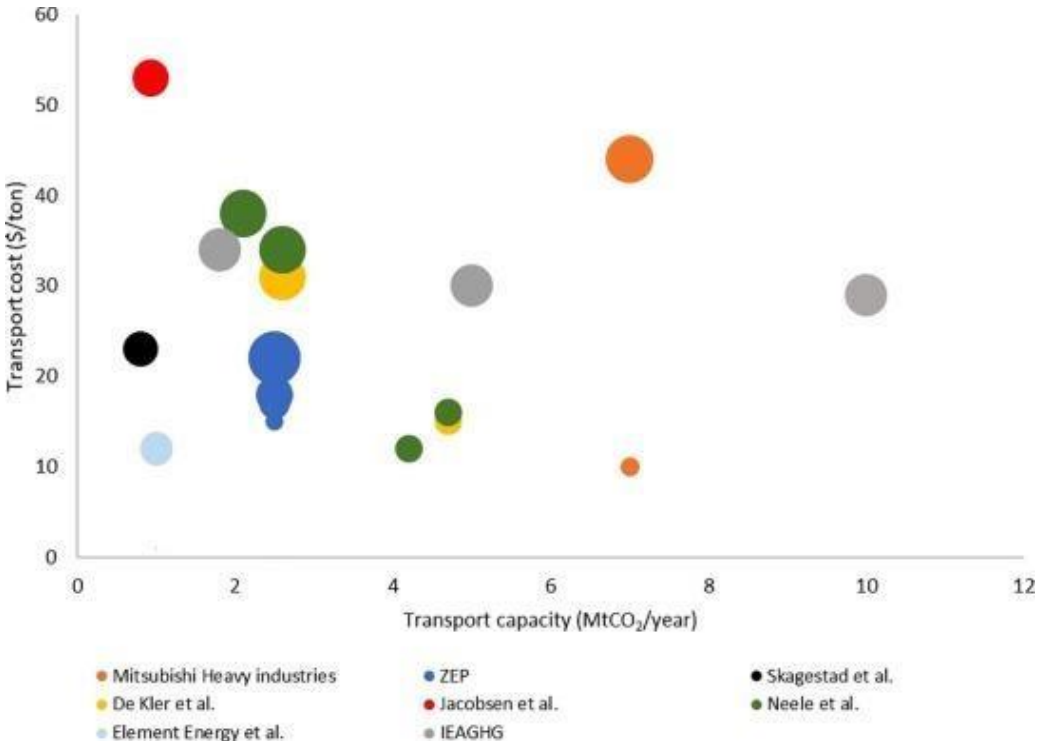
Ο προσδιορισμός του κόστους των έργων μεταφοράς με **πλοία,** είναι περίπλοκος και υπόκειται σε διάφορους οικονομικούς και υλικοτεχνικούς παράγοντες. Οι οικονομικές εκτιμήσεις για τα συστήματα μεταφορών δεν είναι γνωστές λεπτομερώς λόγω έλλειψης υλοποίησης **πλήθους** έργων CCUS. Οι οικονομίες κλίμακας αναμένεται να είναι καθοριστικές για τη μείωση του κόστους των μεταφορών που βασίζονται σε **πλοία** [34] , καθώς τα μεγαλύτερα πλοία φαίνεται να είναι σχετικά φθηνότερα στην κατασκευή από τα μικρότερα. Το κόστος που σχετίζεται με τα ναυτιλιακά έργα έχει εκτιμηθεί εκτενώς στη σχετική βιβλιογραφία – όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 5.1 και απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 5.1.1. – καλύπτοντας μια σειρά από γεωγραφικές τοποθεσίες, αποστάσεις και ποσά διάθεσης [36] , [45] , [56] ,[57] , [58] . Η βιβλιογραφία δείχνει σταθερά ότι η ναυτιλία με διοξείδιο του άνθρακα θα απαιτήσει σημαντικά χαμηλότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες σε σύγκριση με τη μεταφορά με αγωγούς [34] , [36] , [43] , [51] .

Πηγή	**Έτος**	**Σύστημα μεταφοράς**	**Ικανότητα**	**Μεταφορική ικανότητα**	**Τοποθεσία**	**Αποθήκευση**	**Κόστος μεταφοράς**	**Κεφαλαιουχικές Δαπάνες**	**Απόσταση**
Mitsubishi βαριές βιομηχανίες [48]	2004	Πλοίο 50.000 τόνων (5 δεξαμενές)	0,7 MPa, 223 K	7 $MtCO_2$ /έτος	Ιαπωνία	Σχηματισμός φυσιολογικού ορού ή πεδίο αερίου	a.10 \$/τόνο CO_2 b.44 \$/τόνο CO_2	150 M\$	a. 200 χλμ b. 1.200 χλμ
Οι Aspelund et al. [57]	2006	20.000 m^3 πλοίο	0,65 MPa, 221 K	2 $MtCO_2$ /έτος	Βόρεια Ευρώπη	Εξαντλημένο κοίτασμα πετρελαίου	20–30 \$/τόνο CO_2	N/A	Αποστάσεις Βόρειας Θάλασσας
ZEP [43]	2010	40.000 m^3 πλοίο	0,7 MPa, 223 K	2,5 $MtCO_2$ /έτος	Βόρεια Θάλασσα	Σχηματισμός φυσιολογικού ορού	a. 15 \$/τόνο CO_2 b. 17 \$/τόνο CO_2 c. 18 \$/τόνο CO_2 d. 22 \$/τόνο CO_2	a. 153 M\$ b. 174 M\$ c. 193 M\$ d. 237 M\$	a. 180 χλμ b. 500 χλμ c. 750 χλμ d. 1.500 χλμ
Οι Kokubun et al. [85]	2011	a. Πλοίο μεταφοράς δεξαμενών 2 × 1.500 m^3 b. Πλοίο μεταφοράς δεξαμενών 4 × 1.500 m^3	2,65 MPa, 263 K	1 $MtCO_2$ /έτος	Ιαπωνία	Γεωλογικός σχηματισμός υποβυθού	a. 106 \$/τόνο CO_2 b. 167 \$/τόνο CO_2	a. 91 M\$ b. 142 M\$	a. 200 χλμ b. 400–800 χλμ
Οι Skagestad et al. [56]	2014	13.000 m^3 πλοίο	0,7 MPa, 223 K	0,8 $MtCO_2$ /έτος	Νορβηγία	Σχηματισμός Johansen – αλατούχο υδροφόρος ορίζοντας	23 \$/τόνο CO_2	81 M\$	670 χλμ
Οι De Kler et al. [61]	2016	a. 2 × 50.000 τόνους πλοία b. Πλοία 3 × 30.000 τόνων	0,7 – 0,9 MPa, 218 K	a. 4,7 $MtCO_2$ /έτος b. 2,6 $MtCO_2$ /έτος	Βορειοδυτική Ευρώπη	Σχηματισμός φυσιολογικού ορού	a. 15 \$/τόνο CO_2 b. 31 \$/τόνο CO_2	a. 358 M\$ b. 394 M\$	a. 400 χλμ b. 1.200 χλμ
Jacobsen et al. [114]	2017	a. πλοίο 25.000 τόνων b. πλοίο 35.000 τόνων c. πλοίο 45.000 τόνων	0,65 MPa, 223 K	0,93 $MtCO_2$ /έτος	Νορβηγία	Εξαντλημένο πεδίο αερίου ή σχηματισμός φυσιολογικού ορού	53 \$/τόνο CO_2	44 M\$ (πλοίο) 52 M\$ (πλοίο) 60 M\$ (πλοίο)	300 – 730 χλμ

Neele et al. [50]	2017	a. Πλοία 5 × 10.000 τόνων	0,7 MPa, 218 K	4,2 $MtCO_2$ /έτος	Βόρεια Θάλασσα	Εξαντλημένο πεδίο αερίου ή σχηματισμός φυσιολογικού ορού	12 $/τόνο CO_2	348 M$	400 χλμ
		b. Πλοία 4 × 30.000 τόνων		2,1 $MtCO_2$ /έτος			38 $/τόνο CO_2	461 M$	1.200 χλμ
		c. Πλοία 6 × 10.000 τόνων		4,7 $MtCO_2$ /έτος			16 $/τόνο CO_2	393 M$	400 χλμ
		d. Πλοία 4 × 30.000 τόνων		2,6 $MtCO_2$ /έτος			34 $/τόνο CO_2	465 M$	1.200 χλμ
Element Energy et al. [38]	2018	10.000 τόνους	0,65 MPa, 223 K	1 $MtCO_2$ /έτος	Βόρεια Θάλασσα	Εξαντλημένο πεδίο αερίου ή σχηματισμός φυσιολογικού ορού	12 $/τόνο CO_2	N/A	600 χλμ
IEAGHG [63]	2020	Πλοίο 3 × 10.000 τόνων	0,8 MPa, 223 K	1,8 $MtCO_2$ /έτος	Βόρεια Θάλασσα	Υπεράκτια τοποθεσία μεσαίου βάθους	34 $/τόνο CO_2	124 M$ (πλοία + χερσαίο buffer)	1.000 χλμ
				5 $MtCO_2$ /έτος			30 $/τόνο CO_2		
				10 $MtCO_2$ /έτος			29 $/τόνο CO_2		

Πίνακας 5.1. Περίληψη και σύγκριση κόστους των ναυτιλιακών έργων CO_2 όπως έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία

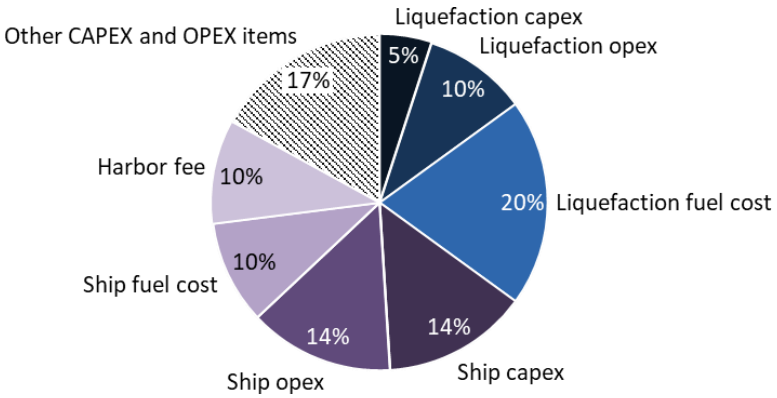
Συνεπώς, οι Aspelund et al. [57] και οι ElementEnergy (2018 UK) et al [38] βρήκαν ότι σε ένα σενάριο όπου έως και 3 Mt CO_2/έτος πρόκειται να μεταφερθεί πάνω από 600–1.500 km, μόνο το πλοίο και η υγροποίηση μπορούν να αποτελέσουν το 73–83% του ειδικού κόστους της αλυσίδας, με τις λειτουργικές δαπάνες να συμβάλλουν στο 54% του συνολικού κόστους. Τα συγκεκριμένα λειτουργικά και κεφαλαιουχικά κόστη που εμπλέκονται στη ναυτιλιακή αλυσίδα διαπιστώνεται ότι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταβλητές του έργου, συμπεριλαμβανομένου του ποσού εκφόρτωσης και της απόστασης.



Σχήμα 5.1.1 . Γραφική αναπαράσταση της σύγκρισης κόστους στα ναυτιλιακά έργα CO_2 (πίνακας 5.1) σε σχέση με τη μεταφορική ικανότητα. Οι περιοχές με φυσαλίδες είναι η σχετική αναπαράσταση της απόστασης μεταφοράς.

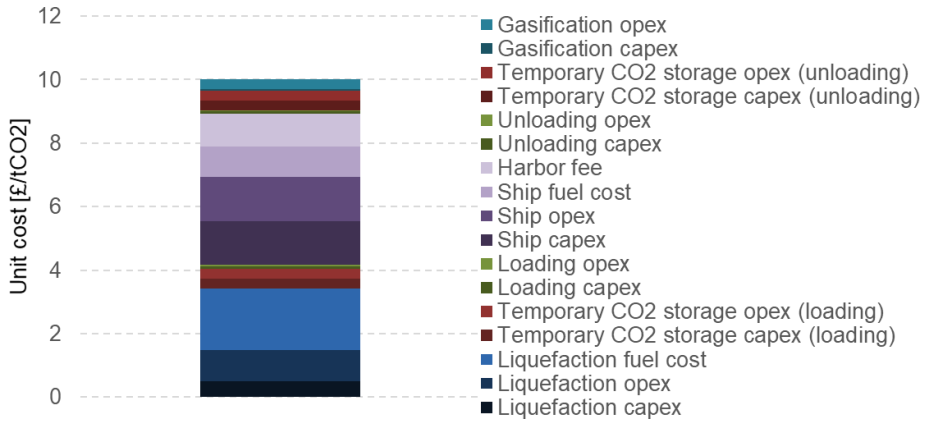
Ειδικότερα η ElementEnergy (2018) et al διαπιστώνει ότι το κόστος μεταφοράς και υγροποίησης, τόσο CAPEX όσο και OPEX, είναι τα ακριβότερα μέρη της μεταφοράς CO_2. Μαζί αποτελούν το 83% του κόστους. Το κόστος αποθήκευσης, φόρτωσης και αεριοποίησης είναι συγκριτικά χαμηλό.

Το κόστος υγροποίησης των πλοίων κυριαρχείται από το OPEX: το OPEX πλοίου και της υγροποίησης (συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων) αποτελούν το 54% του συνολικού κόστους .



Σχήμα 5.1.2 . : Στοιχεία κόστους μεταφοράς CO_2
Πηγή: ElementEnergy (2018)

Η δυνατότητα επίτευξης μείωσης του κόστους μέσω της επαναχρησιμοποίησης της υπάρχουσας υποδομής είναι μεγαλύτερη για τους αγωγούς, στους οποίους κυριαρχεί η CAPEX. Το κόστος αγωγών της αναφοράς, αφορά νέα κατασκευή αγωγών. Αν και μπορεί να είναι τεχνικά εφικτό να μετατραπεί ένα υπάρχον πλοίο Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) ή Υγροποιημένου Πετρελαίου (LPG) σε πλοίο CO_2 , η επαναχρησιμοποίηση ενός υπάρχοντος πλοίου θα επιφέρει μόνο αμελητέες μειώσεις κόστους καθώς η κεφαλαιοποίηση του πλοίου αντιστοιχεί σε περίπου 14 % του συνολικού κόστους μεταφοράς και ορισμένες επενδύσεις κεφαλαίου θα χρειαστούν για τη μετατροπή του πλοίου, το οποίο αναμένεται να είναι λιγότερο βελτιστοποιημένο σε σύγκριση με ένα νεότευκτο πλοίο. Σύμφωνα με το



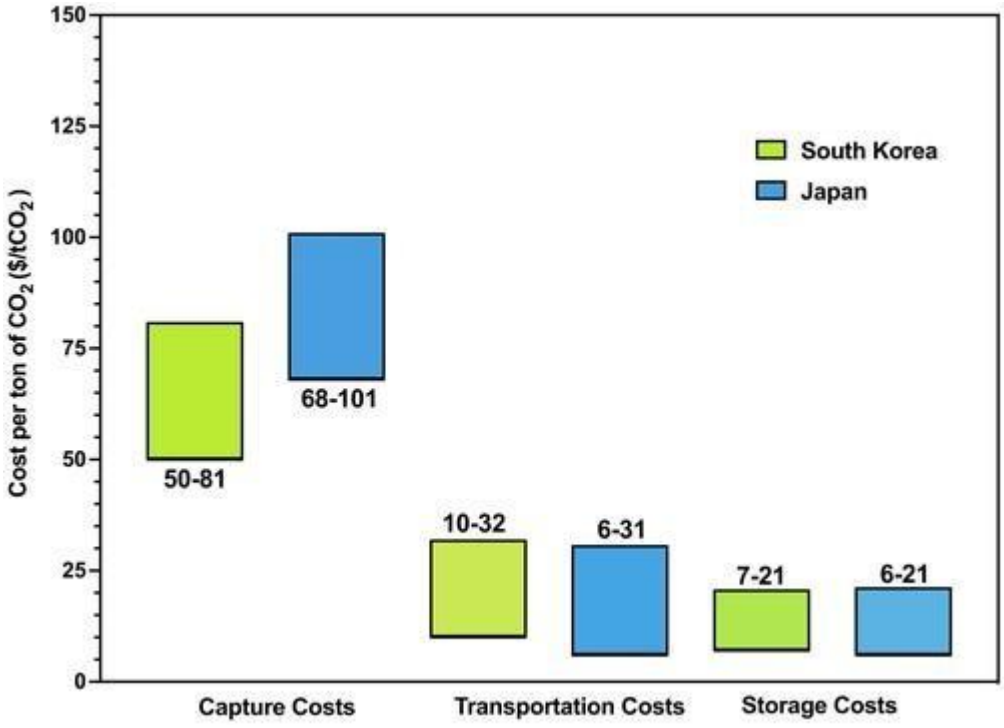
Σχήμα 5.1.3 . : Στοιχεία συνολικού κόστους μεταφοράς CO_2 (£/ tCO 2)
Πηγή: ElementEnergy (2018)

σχήμα 5.1.3. προκύπτει ότι το μέσο συνολικό κόστος μεταφοράς CO_2 άγγιζε το 2018 τις 85,2£/ton (τιμές), δηλαδή 95,73€/ton (σημερινή τιμή τα 114,5€/ton, με αθροιστικό πληθωρισμό 19,6%). Το κόστος της μεταφοράς από πλοίο, αντιστοιχεί σε μέσο κόστος τα 56 €/ton, περί το 48% του συνολικού κόστους.

Από την μελέτη περίπτωσης των Vegard Skonseng Bjerketvedt et al.(Optimal design and cost of ship-based CO2 transport under uncertainties and fluctuations 2020) στην οποία 0,4 Mt / έτος, μεταφέρονται σε 715 km από ένα εργοστάσιο τσιμέντου που βρίσκεται στο Brevik στο λιμάνιστο Kollsnes στη Νορβηγία, αποδείχθηκε ότι ένα ποσοστό μεταφοράς 99 % του διαθέσιμου CO2 (χωρητικότητα πλοίου) οδηγεί στο χαμηλότερο μέσο κόστος μεταφοράς στα 33,8 €/τόνο(σημερινή τιμή 38,19 €/ τόνο). Εάν υπάρχει απαίτηση φορτίου 100 %, το μέσο κόστος του τελευταίου 1 % αυξάνεται σε 41,9 €/τόνο (σημερινή τιμή 47,35 €/ τόνο), δηλαδή 24 % ακριβότερο από τη μέση τιμή μεταφοράς του πρώτου 99 %.

Το αναμενόμενο κόστος μεταφοράς στην ίδια μελέτη, αυξάνεται κατά 5% όταν η αβεβαιότητα στις καιρικές συνθήκες παραμελείται στις αποφάσεις σχεδιασμού της αλυσίδας αξίας και τέλος, οι κίνδυνοι υψηλότερων τιμών καυσίμων και βλαβών πλοίων εκτιμάται θα προκαλέσουν αύξηση της αξίας της χωρητικότητας αποθήκευσης buffer, με αποτέλεσμα την βέλτιστη επιλογή χωρητικότητας αποθήκευσης έως και 73 % μεγαλύτερη από το μέγεθος του πλοίου.

Στην μελέτη των Rafael De Leon & Ramanan Krishnamoorti (Advancing carbon management through the global commoditization of CO_2: the case for dual-use LNG-CO_2 shipping - 2020) διαπιστώθηκε ότι το συνολικό κόστος μεταφοράς (λαμβάνοντας υπόψιν όλη τα στοιχεία της αλυσίδας μεταφοράς όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω) ήταν για την υπόθεση της Ν. Κορέας σε 100,5$ / τόνο, εκ των οποίων 21$ / τόνο έξοδα μεταφοράς CO_2με πλοίο, και της Ιαπωνίας σε 118,5$ / τόνο, με 18,5 $ / τόνο CO_2 αντίστοιχα. Συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα μιας πιθανής χρήσης πλοίων μεταφοράς διπλού φορτίου (LNG και CO_2), με σκοπό την εξαγωγή CO_2 προς τις ΗΠΑ και εισαγωγή LNG από την ίδια χώρα αντίστροφα, υπολογίστηκε μειωμένο κόστος της εν γένει μεταφοράς σε 63,3 $ / τόνο και 2,7 $ / τόνο μόνο για CO_2 για την υπόθεση της Κορέας και 66,3 $ / τόνο και 2,5 $ / τόνο μόνο CO_2 για εκείνην της Ιαπωνίαςαντίστοιχα σε έργο μεταφοράς 1,8 Mtpa.

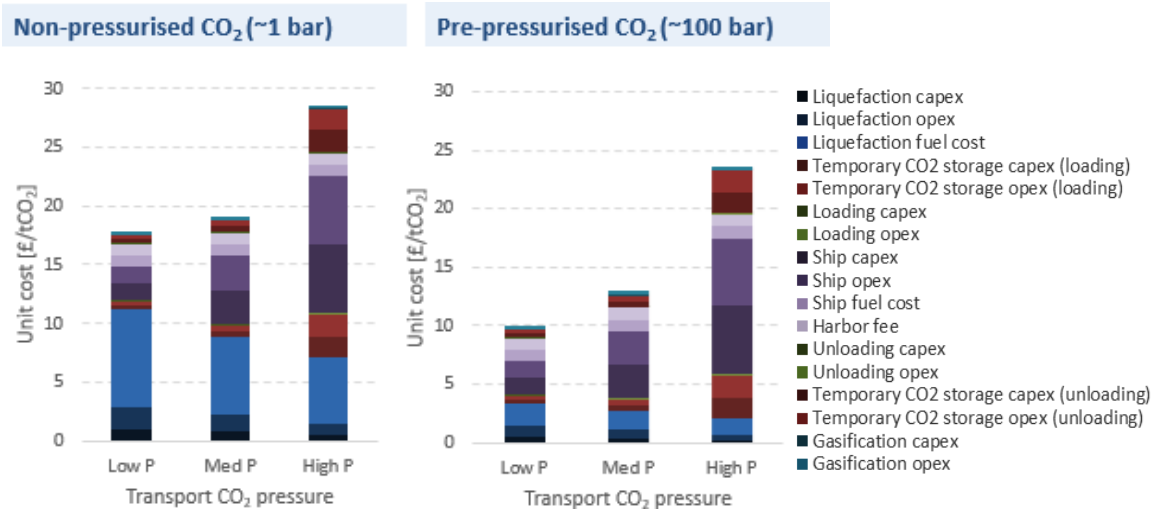


Σχήμα 5.1.4. Τυπικά κόστη σύλληψης, μεταφοράς και αποθήκευσης σε Νότια Κορέα και Ιαπωνία σύμφωνα με Kang et al. and Tokimatsu et al.

5.1.1. Η επίδραση της πίεσης

Τόσο η επιλεγμένη πίεση μεταφοράς όσο και η αρχική πίεση CO_2 πριν από την είσοδο στη μονάδα υγροποίησης έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος αποστολής. Το σχήμα 5.1.1.1. παρακάτω δείχνει το μοναδιαίο κόστος αποστολής για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις μεταφοράς, για το μη υπό πίεση CO_2 στην περίπτωση του αριστερού σχήματος, και γιατο CO_2 προσυμπίεσης, στην περίπτωση του δεξιού σχήματος. **Το κόστος της υγροποίησης μειώνεται με την αύξηση της πίεσης μεταφοράς λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής απαίτησης για την ψύξη. Ωστόσο, το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης αυξάνεται, οδηγώντας σε συνολική αύξηση του κόστους αποστολής.** Εάν το CO_2 είναι προσυμπιεσμένο (πράγμα που συμβαίνει εάν χρησιμοποιούνται χερσαίοι αγωγοί για τη μεταφορά CO_2 από το σχέδιο δέσμευσης στο λιμάνι), το κόστος είναι σημαντικά χαμηλότερο και στις τρεις περιπτώσεις, κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους καυσίμου υγροποίησης . Το κόστος των συνθηκών μεταφοράς χαμηλής και μέσης πίεσης είναι παρόμοιο στην περίπτωση του CO_2 χωρίς πίεση, καθώς η μείωση του κόστους υγροποίησης εξισορροπεί

αύξηση του κόστους πλοίου και αποθήκευσης. Στην περίπτωση του προσυμπιεσμένου CO_2, το κόστος υγροποίησης είναι μικρότερο συστατικό του συνολικού κόστους και επομένως, δεν μπορεί να εξισορροπήσει την αύξηση του κόστους αποστολής και αποθήκευσης με τον ίδιο τρόπο, :

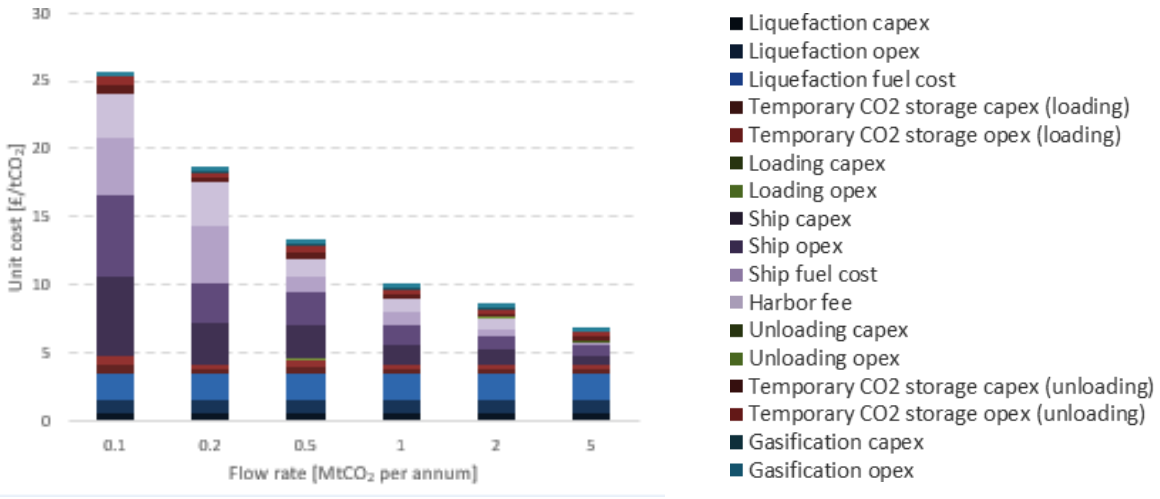


Σχήμα 5.1.1.1 . : Επίδραση της πίεσης μεταφοράς και της αρχικής πίεσης στο μοναδιαίο κόστος αποστολής CO 2

Πηγή: ElementEnergy (2018)

5.1.2. Επίπτωση του ρυθμού ροής

Τα στοιχεία κόστους που σχετίζονται με το πλοίο μειώνονται με υψηλότερους ρυθμούς ροής λόγω οικονομιών κλίμακας μεταφοράς. Το CAPEX ανά tCO 2 μειώνεται, καθώς μειώνονται τα έξοδα καυσίμων ταξιδίου και τα λιμενικά τέλη αφού χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα πλοία (50 kt στην περίπτωση των 5 Mtpa). Αντίθετα, το κόστος μονάδας υγροποίησης δεν μειώνεται καθώς η υποδομή υγροποίησης κλιμακώνεται με το ρυθμό ροής και κυριαρχείται επιπλέον από το OPEX. ElementEnergy (2018 UK).

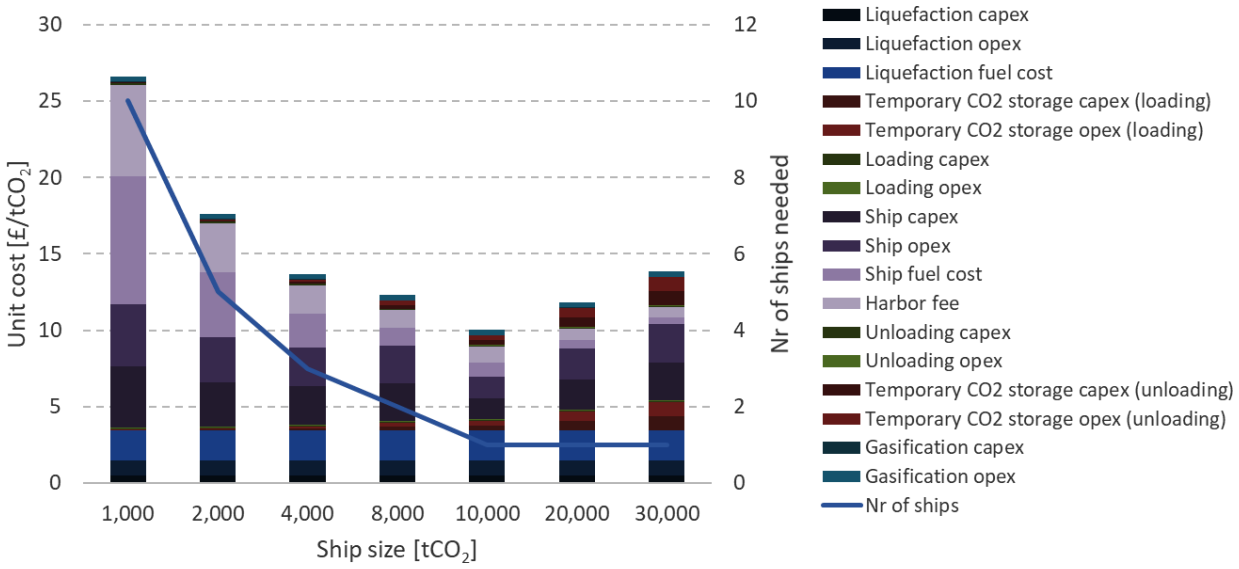


Σχήμα 5.1.2.1 : Επίπτωση του ρυθμού ροής στο μοναδιαίο κόστος αποστολής CO 2 (£/tCO 2), χωρίς έκπτωση

Το Σχήμα 5.1.2.1 δείχνει το μοναδιαίο κόστος αποστολής CO_2 για διαφορετικούς ρυθμούς ροής ενώ όλες οι άλλες παράμετροι διατηρούνται στις ίδιες τιμές (παραγρ. 5.1).

5.1.3. Επίπτωση του μεγέθους του πλοίου

Το σχήμα 5.1.3.1. παρακάτω δείχνει τον αντίκτυπο της επιλογής διαφορετικών μεγεθών πλοίων. Ενώ όλες οι άλλες παράμετροι διατηρούνται σύμφωνα με (παραγρ.5.1), το μέγεθος του πλοίου ποικίλλει από 1.000 tCO 2 έως 30.000 tCO_2 . **Η αύξηση του μεγέθους του πλοίου μειώνει τον αριθμό των πλοίων που χρειάζονται καθώς και τον συνολικό αριθμό ταξιδιών, με αποτέλεσμα να μειώνονται τα λιμενικά τέλη και το κόστος καυσίμων**. Το πλοίο CAPEX μειώνεται επίσης, λόγω οικονομιών κλίμακας στη ναυπήγηση. Για πλοία μεγαλύτερα από 10.000 tCO 2 , ο αριθμός των πλοίων δεν μειώνεται πλέον, επομένως το κόστος μεταφοράς αυξάνεται καθώς το πλοίο γίνεται μεγαλύτερο όπως και το κόστος αποθήκευσης, ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου .



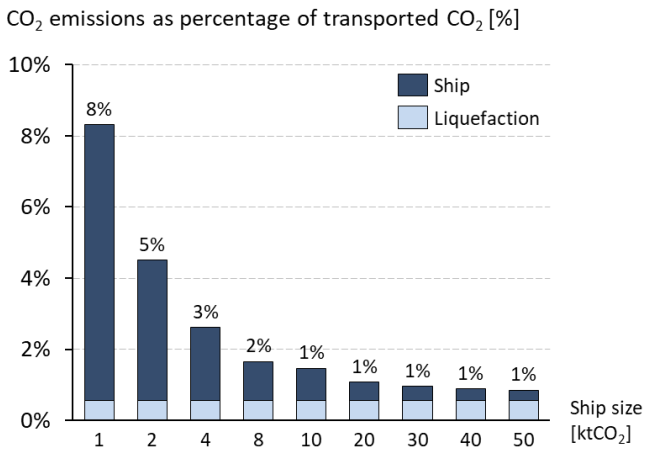
Σχήμα 5.1.3.1.: Επίπτωση του μεγέθους του πλοίου στο μοναδιαίο κόστος αποστολής CO_2 1 Mtpa (Πηγή ElementEnergy (2018 UK))

5.1.4. Εκπομπές από τη ναυτιλία

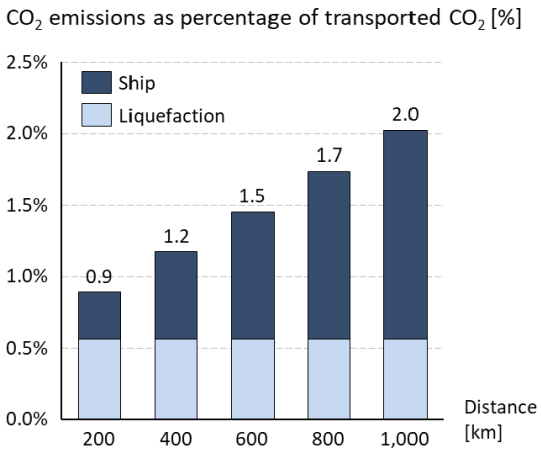
Οι εκπομπές από την κατανάλωση του καυσίμου πλοίου και η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για υγροποίηση εκτιμούνται σε ποσοστό επί του μεταφερόμενου CO_2 για έργο μεταφοράς 1 Mtpa για όλες τα μεγέθη πλοίων.

Στο σχήμα 5.1.4.1 α) απεικονίζονται οι εκπομπές CO_2 για απόσταση 600 km και διάφορα μεγέθη πλοίων και β) απεικονίζονται οι εκπομπές για ένα 10kt CO_2 πλοίο και διάφορες αποστάσεις.

α) Μέγεθος πλοίου



β) Απόσταση μεταφοράς



Σχήμα 5.1.4.1.: Διακύμανση των εκπομπών από τη μεταφορά CO 2 με α) μέγεθος πλοίου και β) απόσταση αποστολής (Πηγή ElementEnergy (2018 UK))

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι εκπομπές παραμένουν κάτω από το 2% της μεταφερόμενης ποσότητας CO_2. Ωστόσο, η χρήση ενός πολύ μικρού πλοίου (π.χ. 1000 tCO_2) οδηγεί σε εκπομπές υψηλότερες από το 8% του μεταφερόμενου CO_2 λόγω του μεγαλύτερου αριθμού ταξιδιών . Το κόστος μεταφοράς υπολογίζεται ανά tCO_2 που μεταφέρεται. Όταν χρησιμοποιείται ένα αρκετά μεγάλο πλοίο, το μοναδιαίο κόστος ανά μειωμένο tCO_2 δεν θα διέφερε σημαντικά από το μοναδιαίο κόστος ανά μεταφερόμενο tCO_2.

Ωστόσο, εάν επιλεγεί ένα πολύ μικρό πλοίο (<2000 $ktCO_2$), το μοναδιαίο κόστος ανά μειωμένο tCO_2 μειωμένο tCO_2 θα είναι σημαντικά υψηλότερο από το μοναδιαίο κόστος ανά μεταφερόμενο tCO_2, επομένως θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές ναυτιλίας. Ενώ πλοία αυτού του μεγέθους χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για τη μεταφορά CO_2 στον τομέα των τροφίμων και ποτών, δεν θα ήταν κατάλληλα για ένα έργο CCUS.

Η Det Norske Veritas και η Process Systems Enterprise (PSE) περιέγραψαν μια διαδικασία για τη σύλληψη των εκπομπών CO_2 επί των πλοίων. Τα δημόσια διαθέσιμα αποτελέσματα εκτιμούν ότι η ικανότητα της διαδικασίας στη μείωση των εκπομπών άνθρακα είναι της τάξης του 65% [214] . Η ιδέα αποτελείται από έναν καθαριστή SO_2 και ένα CO_2διαδικασία σύλληψης χρησιμοποιώντας έναν διαλύτη αμίνης. Έχει προταθεί μια διαδικασία στερεοποίησης για την αποθήκευση επί των πλοίων για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της αναπόφευκτης κίνησης που προκαλείται από τα κύματα του ωκεανού [213] . Το CO_2 που

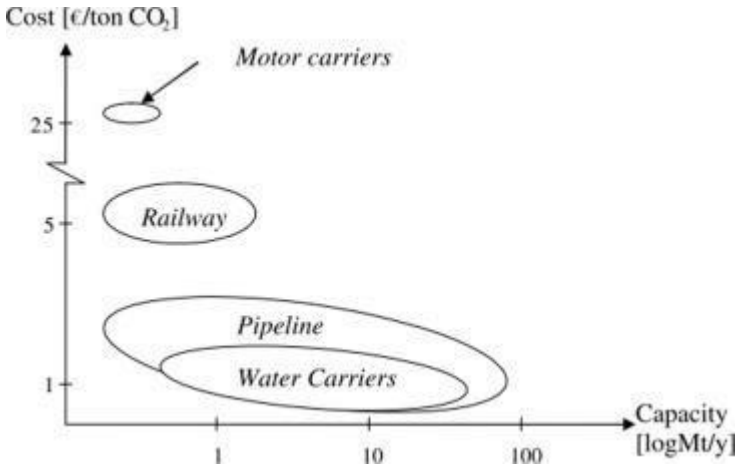
εκπέμπεται σχηματίζει μια σταθερή ένωση, καταβυθισμένο ανθρακικό ασβέστιο , που αποθηκεύεται με ασφάλεια επί του σκάφους ή εκφορτώνεται ενώ βρίσκεται στην ξηρά. Μια άλλη διαδικασία που βασίζεται σε διαλύτες αναπτύχθηκε από τους Luo και Wang [215] για τη σύλληψη των εκπομπών CO_2 από ένα φορτηγό πλοίο μεσαίου μεγέθους. Το επίπεδο σύλληψης που επιτεύχθηκε ήταν 73% χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες υπηρεσίες κοινής ωφέλειας επί του σκάφους. Ένας αεριοστρόβιλος προστέθηκε για να αυξηθεί το επίπεδο σύλληψης στο 90%. Πραγματοποιήθηκε μια μελέτη σε σκάφος με καύσιμο LNG για τη δέσμευση CO_2 από τις εκπομπές καυσαερίων, το μήκος του σκάφους αυξήθηκε κατά 6 μέτρα για να φιλοξενήσει τον πρόσθετο εξοπλισμό διαχωρισμού [216] . Μια μελέτη αξιολόγησε επίσης τη χρήση υδατικής αμμωνίας για τη συνδυασμένη αφαίρεση CO_2 και SO_2 επί του σκάφους για πλοία με καύσιμα HFO και μόνο την αφαίρεση CO_2 για πλοία με καύσιμο LNG [147] , [148] . Η θερμική ενέργειατων καυσαερίων χρησιμοποιήθηκε για την αναγέννηση του διαλύτη για την ελαχιστοποίηση του κόστους χρήσης. Ένα πλοίο εσωτερικής ναυσιπλοΐας και ένα φορτηγό πλοίο που τροφοδοτείται είτε με LNG είτε με ντίζελ διερευνήθηκε επίσης για να αναλυθεί η επίδραση μιας πιθανής ολοκλήρωσης συστήματος σύλληψης χρησιμοποιώντας πιπεραζίνη και υδατικό διαλύτη μονοαιθανολαμίνης (MEA).
[217] . Συνήχθη το συμπέρασμα ότι η πιπεραζίνη προσέφερε χαμηλότερο κόστος δέσμευσης CO_2 σε σύγκριση με το MEA, λόγω της υψηλότερης πίεσης εκρόφησης και για τα δύο δοχεία. Το κόστος σύλληψης εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου, το χρησιμοποιούμενο καύσιμο και τον επιλεγμένο ρυθμό σύλληψης και τεχνολογία [217] . Η ενσωμάτωση ενός συστήματος CCUS επί του πλοίου απαιτεί επιπλέον κόστος κεφαλαίου και επέκταση λόγω μετασκευής, αν και αυτό θα μπορούσε να μειωθεί εάν το δεσμευμένο CO_2 μπορεί να πωληθεί για να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκήπια ή στις βιομηχανίες τροφίμων [218] . Λόγω ενός κενού βιβλιογραφίας, υπάρχει ανάγκη να κατανοηθεί η επίδραση της ολοκλήρωσης του συστήματος σύλληψης σε ένα πλοίο για μείωση του CO_2 όσον αφορά το κόστος και άλλα λειτουργικά μέτρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σύγκριση συστημάτων μεταφοράς CO_2

6.1. Εκτίμηση χρησιμότητας συστημάτων μεταφοράς για μεταφορές μεγάλης κλίμακας.

Η μεταφορά CO_2 για δέσμευση απαιτεί την εφαρμογή ενός συντονισμένου και αποτελεσματικού δικτύου μεταφοράς, καθώς τέτοιοι αγωγοί είναι η πιο προφανής λύση, ιδιαίτερα όπου απαιτείται σταθερή ροή από τις τοποθεσίες δέσμευσης CO_2. Όπου οι οικονομίες κλίμακας δεν δικαιολογούν τους αγωγούς ως τη μέθοδο μεταφοράς σε ένα έργο CCUS, άλλες λύσεις περιλαμβάνουν πλοία, σιδηροδρομικές γραμμές και φορτηγά. Αυτά είναι οικονομικά βιώσιμα όταν οι εταιρείες - εκπομποί δεν έχουν άμεση πρόσβαση σε κατάλληλο αγωγό ή όταν οι δεσμευμένες ποσότητες είναι ανεπαρκείς για να δικαιολογήσουν την κατασκευή αγωγών. Η πρόσβαση σε επαρκείς εγκαταστάσεις θαλάσσιων λιμένων ή η εγγύτητα στο θαλάσσιο ή σιδηροδρομικό σύστημα είναι μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Μεταφορά CO_2 με αγωγό και πλοίο, βρέθηκε ότι είναι συγκρίσιμο σε κόστος για παρόμοιες χωρητικότητες όταν λαμβάνονται υπόψη αποστάσεις 250 km ή περισσότερες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1.1. [26] . Παρά το γεγονός ότι είναι μια μελέτη πρώιμου σταδίου, αυτή η σύγκριση έχει αποδειχθεί χρήσιμη για τον προσδιορισμό των αγωγών και των μεταφορέων νερού ως τις κύριες λύσεις μεταφοράς για το CCUS.



Σχήμα 6.1.1 . Κόστος και χωρητικότητα για εναλλακτικές μεταφορές στα 250 km [26] .

6.2. Σύγκριση συστημάτων μεταφοράς για μεταφορές μεγάλης κλίμακας σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Το δυναμικό της σιδηροδρομικής μεταφοράς CO_2 έχει αξιολογηθεί από τους Roussanaly et al. [27] οι οποίοι συνέκριναν το κόστος προετοιμασίας και μεταφοράς αγωγών και σιδηροδρομικών μεταφορών σε σχέση με την απόσταση για διαφορετικές περιόδους σεναρίων έργων. Σε αντίθεση με το έργο των Svensson et al. [26], αυτή η μελέτη έδειξε ότι, όπου υπάρχει υπάρχουσα υποδομή, η μεταφορά μέσω σιδηροδρομικού συστήματος θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη επιλογή για αγωγούς για μεγάλες αποστάσεις, κυρίως λόγω των χαμηλότερων οικονομικών κινδύνων. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην πράξη οι σιδηροδρομικοί και μηχανοκίνητοι μεταφορείς σπάνια έχουν εξεταστεί για έργα CCUS και έχουν περιορισμούς στην επιλογή διαδρομής λόγω μεταφοράς επικίνδυνων ουσιών και πιθανής ενόχλησης για τους τοπικούς πληθυσμούς ως μερικούς από τους βασικούς περιορισμούς [13] , 28] , [29] , [30] .

Μια περίληψη λύσεων μεταφοράς CO_2 με βάση τις εκτιμώμενες μεταφορικές ικανότητες και συνθήκες υπογραμμίζει τα βασικά ζητήματα που σχετίζονται με κάθε σύστημα (βλ. Πίνακα 1). Έτσι, οι Roussanaly et al. [31] πραγματοποίησε μια ολοκληρωμένη πολυκριτηριακή ανάλυση του αγωγού και της ναυτιλίας ως τεχνολογίες μεταφοράς για 10 Mt CO_2/έτος από βιομηχανικό σύμπλεγμα για τον εντοπισμό των καταλληλότερων λύσεων μεταφοράς. Η τεχνολογία αγωγών έδειξε τους καλύτερους δείκτες απόδοσης όσον αφορά το λειτουργικό κόστος και την κατανάλωση των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, **με τη ναυτιλία να είναι πιο συμφέρουσα μόνο σε σχέση με τις απαιτούμενες κεφαλαιουχικές δαπάνες**. Για το λόγο αυτό, η ναυτιλία θεωρήθηκε ως μια προσωρινή λύση για τις πρώτες αναπτύξεις CCUS, προκειμένου να περιοριστεί το αρχικό κόστος και ο επενδυτικός κίνδυνος, πριν από τη μετάβαση στην υποδομή αγωγών όταν καταστούν διαθέσιμες μεγαλύτερες ποσότητες δέσμευσης. Οι συγγραφείς έδωσαν επίσης έμφαση στο γεγονός ότι οι αγωγοί παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με τη ναυτιλία όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου, ηλεκτρικής ενέργειας και νερού στην αλυσίδα, δημιουργώντας ένα σύστημα μεταφοράς με συνολικά χαμηλότερο αποτύπωμα εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Η αξία αυτής της μελέτης για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων εκτείνεται πέρα από οικονομικές εκτιμήσεις, αναγνωρίζοντας τη σημασία της αξιολόγησης του κύκλου ζωής στην επιλογή των καλύτερων

εναλλακτικών λύσεων μεταφοράς.

Τρόπος μεταφοράς	**Συνθήκες**	**Φάση**	**Χωρητικότητα**	**Παρατηρήσεις**
Σωληνώσεις	4,8–20 MPa, 283–307 K [32] , [33] , [34]	Ατμοί, πυκνή φάση	~100 Mt CO_2 /έτος [26] 6500 km μεταφοράς με αγωγό σε λειτουργία [27]	• Μεγαλύτερο κόστος κεφαλαίου, χαμηλότερο λειτουργικό κόστος • Το σύστημα σωληνώσεων χαμηλής πίεσης είναι 20% πιο ακριβό από τη μετάδοση πυκνής φάσης. • Καλά καθιερωμένο για ΧΡΗΣΗ EOR.
Πλοία	0,65–4,5 MPa, 221–283 K [35] , [36] , [37] , [38]	Υγρό	>70 Mt CO_2 /έτος [26]	• Μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος, χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου • Επί του παρόντος εφαρμόζεται στη βιομηχανία τροφίμων και ζυθοποιίας για μικρότερες ποσότητες και διαφορετικές συνθήκες. • Βελτιωμένη αντιστοίχιση πηγής - σημείου εναπόθεσης
Φορτηγά	1,7–2 MPa, 243–253 K [39] , [40]	Υγρό	>1 Mt CO_2 /έτος [26]	• 2–30 τόνοι ανά παρτίδα • Δεν είναι οικονομικό για έργα CCUS μεγάλης κλίμακας • Το αέριο βρασμού εκπέμπει το 10% του φορτίου [39]
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ	0,65–2,6 MPa, 223–253 K [27] , [39] , [40]	Υγρό	>3 Mt CO_2 /έτος [26]	• Δεν υπάρχουν συστήματα μεγάλης κλίμακας • Απαιτείται υποδομή φόρτωσης/εκφόρτωσης και αποθήκευσης • Εφικτό μόνο με υπάρχουσα σιδηροδρομική γραμμή (Wong, 2005) • Πιο πλεονεκτικό σε μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις

Πίνακας 6.1. *Εναλλακτικές λύσεις μεταφοράς διοξειδίου του άνθρακα.*

Οι Knoope et al. [41] πρότεινε ότι η ευελιξία της ναυτιλιακής αλυσίδας δεν μετατοπίζει απαραίτητα την επενδυτική απόφαση από τον αγωγό στα πλοία, ακόμη και όταν εξετάζονται επιλογές όπως η εγκατάλειψη του έργου, η προσωρινή παύση της διαδικασίας δέσμευσης και η μετάβαση σε διαφορετική δεξαμενή αποθήκευσης .

Ο λόγος είναι ότι εξαρτήματα όπως η μονάδα υγροποίησης και η ενδιάμεση αποθήκευση

αντιπροσωπεύουν το 80% του κόστους και θεωρούνται ως πάγια κόστη παρόμοια με τους αγωγούς.

Το έργο COCATE διαπίστωσε ότι το κόστος μεταφοράς 13,1 Mt CO_2/έτος για 450–600 km σε μια υπεράκτια τοποθεσία αποθήκευσης στη Βόρεια Θάλασσα είναι οριακά υψηλότερο από τον χερσαίο αγωγό σε σύγκριση με τα πλοία, με το τελευταίο να έχει ως αποτέλεσμα 5% χαμηλότερο κόστος . 12] . Fimbres Weihs et al. [42] πρότεινε ότι η αποστολή CO_2 είναι οικονομικά συμφέρουσα σε σχέση με τους αγωγούς για αποστάσεις μεγαλύτερες από 700 km και ποσότητες της τάξης των 6 Mt CO_2/έτος. Η Πλατφόρμα Μηδενικών Εκπομπών [43] διερεύνησε το κόστος μεταφοράς CO_2 σε συνδέσεις από σημείο σε σημείο για έργα επίδειξης CCUS με τυπική ικανότητα μετάδοσης 2,5 Mt CO_2/έτος; Η έκθεση διαπίστωσε ότι το κόστος μεταφοράς ανά τόνο CO_2 είναι 45% χαμηλότερο στους υπεράκτιους αγωγούς σε σύγκριση με τη ναυτιλία με βάση μια απόσταση 180 km.

Η τάση ωστόσο αντιστρέφεται όταν λαμβάνονται υπόψη αποστάσεις μεταφοράς 500 – –1500 km, όπου το κόστος αποστολής ανά τόνο CO_2 γίνεται 27–62% χαμηλότερο από αυτό των υπεράκτιων αγωγών. Η IEAGHG διερεύνησε το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς αγωγών και πλοίων για διαφορετικούς ρυθμούς ροής 0,5–10 MtCO_2/έτος και απόσταση μεταφοράς 1000 km. Τα ευρήματα δείχνουν ότι η ναυτιλία είναι 64% λιγότερο δαπανηρή για την εκφόρτωση 0,5 MtCO_2/έτος, με αυτό το οικονομικό χάσμα να μειώνεται σταδιακά με την αύξηση των ρυθμών ροής. εδώ η μεταφορά θαλάσσιων σκαφών 2 MtCO_2/έτος είναι μόνο 10% φθηνότερη από τον αγωγό και με 5 MtCO_2Η μεταφορά με αγωγούς /έτος είναι 24% οικονομικά συμφέρουσα. Συνολικά, μεγαλύτερες ποσότητες απόρριψης γενικά μετατοπίζουν τις εξισορροπημένες αποστάσεις προς μεγαλύτερες αποστάσεις για τη μεταφορά πλοίων, καθιστώντας αυτή την επιλογή συμφέρουσα [34] , [44] . Αρκετές ακόμη μεταβλητές του έργου, όπως η γεωγραφική θέση, η ασφάλεια, η διάταξη των τερματικών λιμανιών και η σταθερότητα του βυθού επηρεάζουν τις αποστάσεις άνοδος μετά τις οποίες τα πλοία γίνονται πιο οικονομικά από τους αγωγούς.

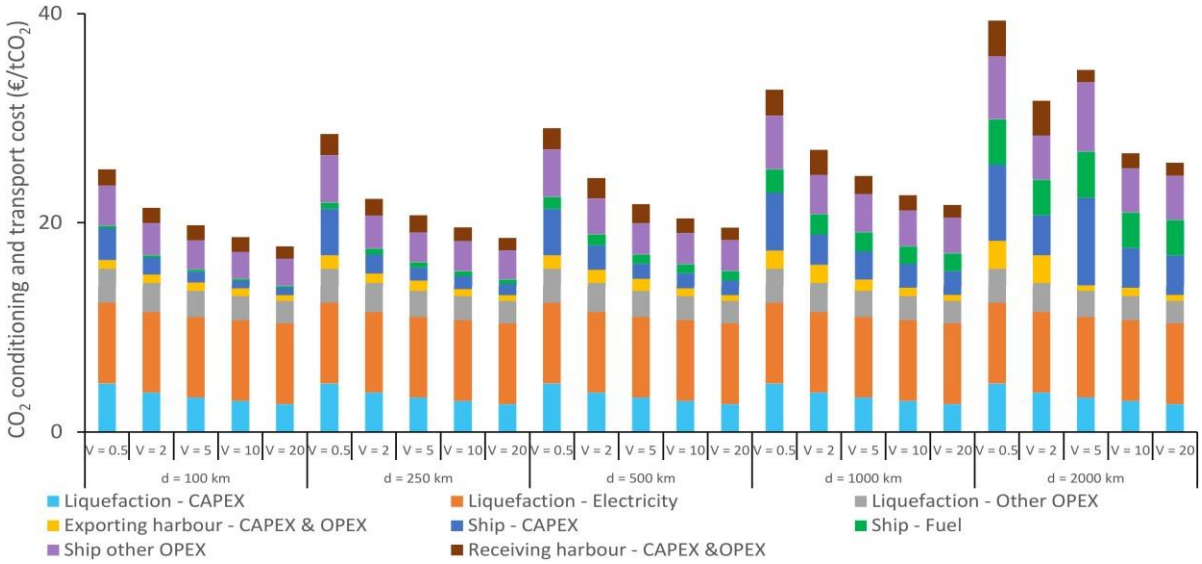
Οι Roussanaly et al. [45] , [46] πραγματοποίησαν λεπτομερείς συγκρίσεις αξιολόγησης των οικονομικών, τεχνικών και κλιματικών επιπτώσεων μεταξύ αγωγού και ναυτιλίας όταν εξεταζόταν η μεταφορά που συνδέει δύο χερσαίες και δύο υπεράκτιες περιοχές. Σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες, αυτοί οι συγγραφείς εξετάζουν μια σειρά αποστάσεων και ποσών. Σύμφωνα με άλλες μελέτες, διαπίστωσαν ότι για μια σταθερή απόδοση, ένας αγωγός προτιμάται για την εκκένωση CO_2 σε μικρότερες αποστάσεις. Ωστόσο, η μελέτη τόνισε επίσης ότι παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση, οι περιφερειακές διακυμάνσεις του κόστους

των αγωγών, οι πρώτες στο είδος προκλήσεις και οι ρυθμίσεις ιδιοκτησίας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την επιλογή του συστήματος μεταφοράς. Αντίθετα, μεταβλητές του έργου, όπως η διακύμανση της ηλεκτρικής ενέργειας και η τιμή των καυσίμων της ναυτιλίας δεν φαίνεται να έχουν βαθύ αντίκτυπο. Ωστόσο, τα πολύπλοκα δίκτυα μεταφορών σε αντίθεση με την υποδομή ενός συστήματος αναμένεται να παρουσιάσουν διαφορετικές τάσεις και θα απαιτήσουν πρόσθετη εργασία για την αξιολόγησή τους.

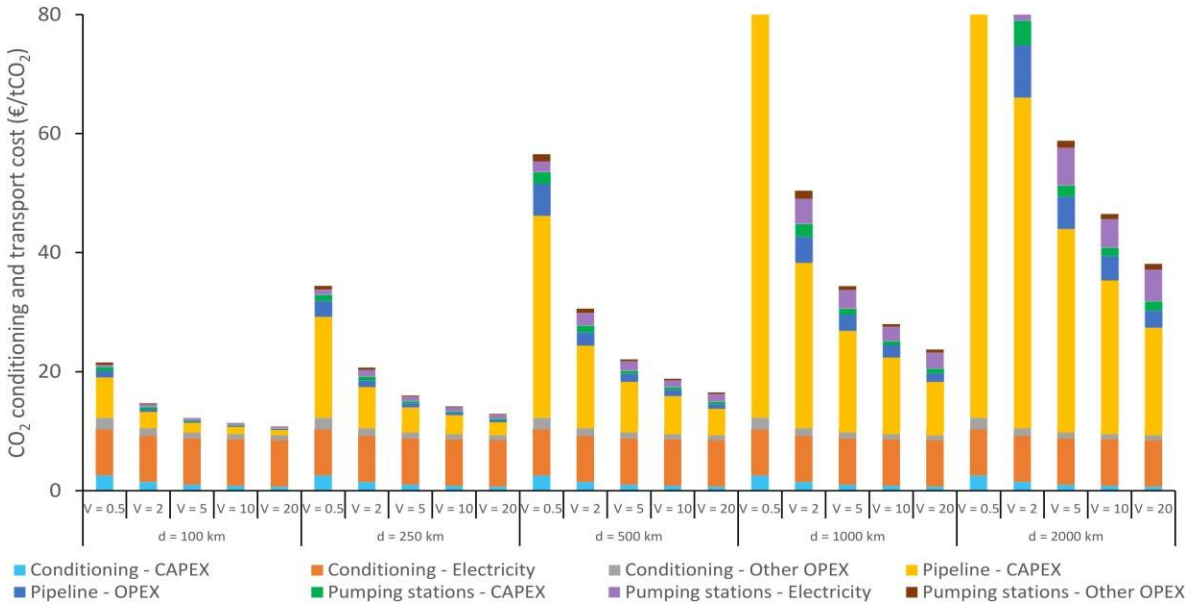
6.3. Σύγκριση κόστους μεταφοράς CO_2 μεταξύ αγωγού και πλοίου.

6.3.1. Σύγκριση κόστους μεταφοράς με πλοίο από λιμάνι σε λιμάνι και με αγωγό από σημείο σε σημείο στην ενδοχώρα .

Σύμφωνα με τους Simon Roussanaly et al. (*At what Pressure Shall CO2 Be Transported by Ship? Anin-Depth Cost Comparison of 7 and 15 Barg Shipping* - 08/2021) η ναυτιλία μεταφοράς CO2 μεταξύ λιμένων, θεωρείται ιδιαίτερα ελκυστική για τις αποστάσεις άνω των 1000 χιλιομέτρων αλλά είναι συμφερότερη σε αποστάσεις των 2.000 χιλιομέτρων από χωρητικότητες 0.5 Mtpa έως 20 Mtpa, από ότι η μεταφορά με αγωγό στην ενδοχώρα, μεταξύ δύο σημείων, όπως προκύπτει από τη σύγκριση των δύο παρακάτω διαγραμμάτων.



Σχήμα 6.3.1.1. Ανάλυση κόστους μεταφοράς CO_2 με εκτίμηση απόστασης (d in km) και ετήσιου όγκου (V in MtCO_2/year) όταν μεταφέρεται καθαρό CO_2 μεταξύ δύο λιμένων με πλοίο με πίεση μεταφοράς στα 7 bar.
Πηγή: Simon Roussanaly et al. (08/2021)



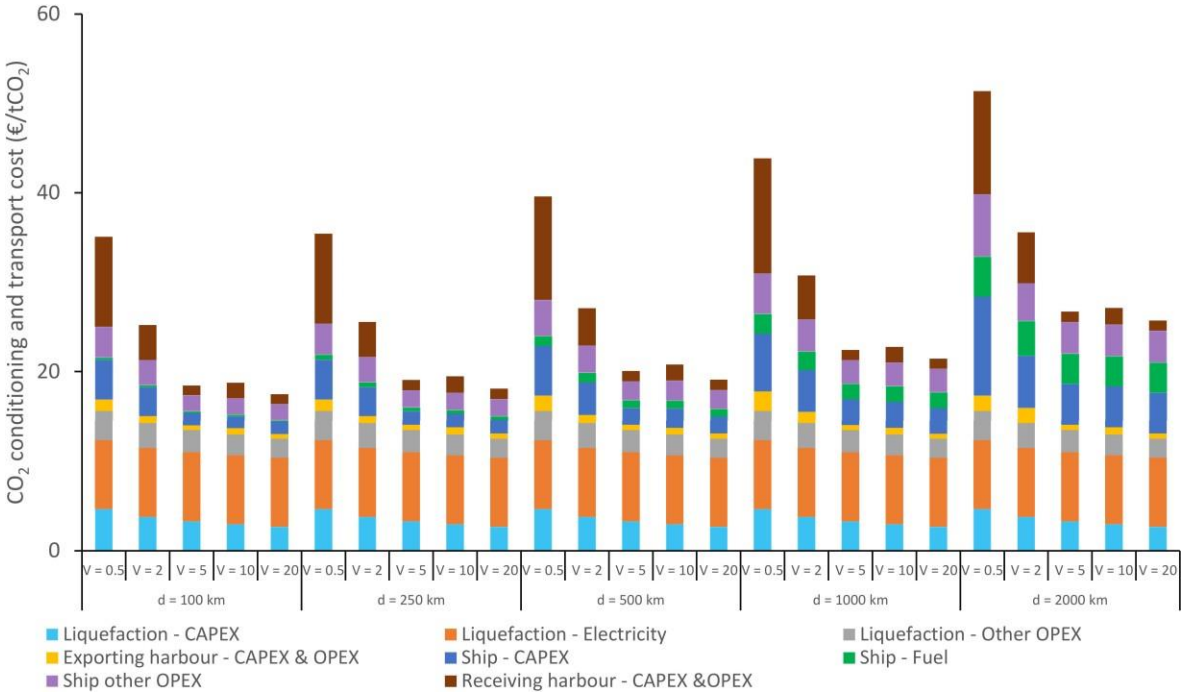
Σχήμα 6.3.1.2. Ανάλυση κόστους μεταφοράς CO_2 με εκτίμηση απόστασης (d in km) και ετήσιου όγκου (V in $MtCO_2$/year) όταν μεταφέρεται καθαρό CO_2 μεταξύ δύο δύο δημείων στην ενδοχώρα, με χρήση αγωγού (άξονας y-περιορίζεται στα 80 €/tCO_2, που σημαίνει ότι κάποιες τιμές κόστους δεν συμπεριλήφθηκαν).

Πηγή: Simon Roussanaly et al. (08/2021)

Παρατηρώντας τα δύο διαγράμματα, γίνεται αντιληπτή η διαφορά κόστους μεταφοράς μεταξύ πλοίου και αγωγού στις μικρές αποστάσεις. Οι αγωγοί έχουν μικρό κόστος εγκατάστασης, ενώ τα λειτουργικά κόστη για την μεταφορά του αερίου μειώνονται όσο ο μεταφερόμενος όγκος αυξάνεται, λόγω δημιουργίας οικονομιών κλίμακας. Το αντίστροφο ισχύει για τις μεγάλες αποστάσεις όταν η μεταφορά γίνεται με πλοίο.

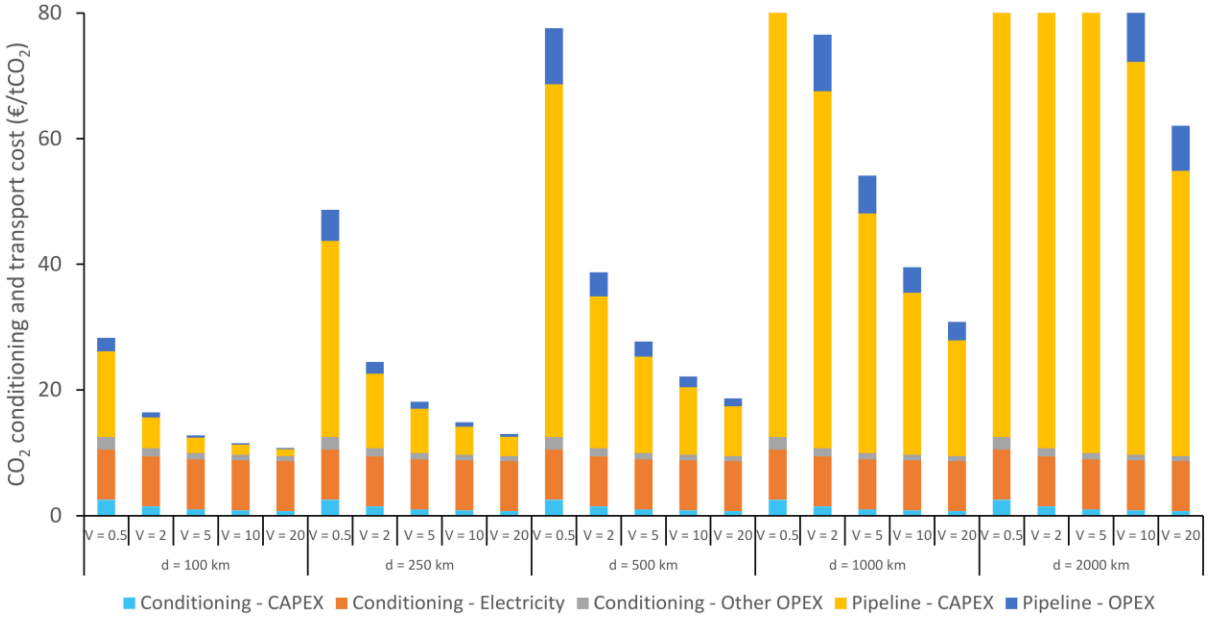
6.3.2. Σύγκριση μεταφοράς με αγωγό και πλοίο από λιμάνι σε υπεράκτιο σημείο.

Στην ίδια μελέτη των Simon Roussanaly et al. (08/2021), περιλαμβάνονται τα παρακάτω διαγράμματα όπου διατυπώνεται ξεκάθαρα ότι η ναυτιλία μεταφοράς CO_2 μεταξύ στεριάς και υπεράκτιου σημείου έγχυσης, θεωρείται συμφερότερη για τις αποστάσεις άνω των 1000 χιλιομέτρων από χωρητικότητες 0.5 Mtpa έως 20 Mtpa, συγκρίνοντας την με την μεταφορά υποθαλάσσιου αγωγού από την ενδοχώρα.



Σχήμα 6.3.2.1. Ανάλυση κόστους μεταφοράς CO_2 με εκτίμηση απόστασης (d in km) και ετήσιου όγκου (V in MtCO_2/year) όταν μεταφέρεται μεταξύ στεριάς και υπεράκτιου σημείου καθαρό CO_2 ν με πλοίο και πίεση μεταφοράς στα 7 bar.

Πηγή: Simon Roussanaly et al. (08/2021)



Σχήμα 6.3.2.2.. Ανάλυση κόστους μεταφοράς CO_2 με εκτίμηση απόστασης (d in km) και ετήσιου όγκου (V in MtCO_2/year) όταν μεταφέρεται μεταξύ στεριάς και υπεράκτιου σημείου καθαρό CO_2 ν με υποθαλάσσιο αγωγό

(άξονας y-περιορίζεται στα 80 €/tCO_2, που σημαίνει ότι κάποιες τιμές κόστους δεν συμπεριλήφθηκαν).

Πηγή: Simon Roussanaly et al. (08/2021)

Ομοίως και εδώ γίνεται αντιληπτή η διαφορά κόστους μεταφοράς μεταξύ στεριάς και υπεράκτιου σημείου στις μικρές αποστάσεις. Οι αγωγοί έχουν μικρό κόστος εγκατάστασης σε έργο μικρής απόστασης, ενώ τα λειτουργικά κόστη για την μεταφορά του αερίου μειώνονται όσο ο μεταφερόμενος όγκος αυξάνεται, λόγω δημιουργίας οικονομιών κλίμακας. Το αντίστροφο ισχύει για τις μεγάλες αποστάσεις όταν η μεταφορά επιβάλεται να γίνει με πλοίο, διότι αναπτύσσονται τεράστια κεφαλαιακά κόστη για την εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Προκλήσεις και Ευκαρίες στην Ναυτιλία Μεταφοράς (CO_2)

7.1. Ρυθμιστικά εμπόδια

Το CO_2 μεταφέρεται με πλοίο ως εμπόρευμα μεταξύ διαφόρων ευρωπαϊκών χωρών εδώ και πολλά χρόνια . Ωστόσο, η μεταφορά CO_2 για τους σκοπούς της υπεράκτιας αποθήκευσης εκτίθεται σε διαφορετικά διεθνή ρυθμιστικά πλαίσια που θα επηρεάσουν την ανάπτυξη και τις απαιτήσεις για τη ναυτιλία CO_2 .

Αυτές περιλαμβάνουν περιβαλλοντική νομοθεσία, οδηγίες παρακολούθησης και υποβολής εκθέσεων , ασφάλεια διαδικασίες και κανονισμούς αποθήκευσης CO_2 . Μια σύνοψη αυτών των κανονιστικών πλαισίων και η συνάφειά τους με τις εθνικές και διεθνείς μεταφορές με πλοίο παρέχεται σε αυτήν την ενότητα.

7.1.1. Πρωτόκολλο του Λονδίνου – Άρθρο 6 για τη διασυνοριακή μεταφορά CO_2 .

Η *«Σύμβαση για την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης απότην απόρριψη αποβλήτων και άλλων υλικών 1972»* η «Σύμβαση του Λονδίνου» για συντομία, είναι μία από τις πρώτες παγκόσμιες συμβάσεις για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος από ανθρώπινες δραστηριότητες και ισχύει από το 1975 (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας, 2011). Στόχος του είναι να προωθήσει τον αποτελεσματικό έλεγχο όλων των πηγών θαλάσσιας ρύπανσης και να λάβει όλα τα πρακτικά μέτρα για την πρόληψη της ρύπανσης της θάλασσας από την απόρριψη αποβλήτων και άλλων υλικών (Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, 2018).

Το 1996, συμφωνήθηκε το « Πρωτόκολλο του Λονδίνου » (LP) για τον περαιτέρω εκσυγχρονισμό της Σύμβασης και, τελικά, την αντικατάστασή της (Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, 2006). Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, απαγορεύεται κάθε απόρριψη αποβλήτων , εκτός από τα ονομαζόμενα πιθανά αποδεκτά απόβλητα στον λεγόμενο "αντίστροφο κατάλογο", που

παρατίθεται στο παράρτημα Ι του πρωτοκόλλου. Το πρωτόκολλο τέθηκε σε ισχύ στις 24 Μαρτίου 2006 και υπάρχουν επί του παρόντος 53 μέρη (Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, 2018).

Το άρθρο 6 του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου, μια παγκόσμια σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης της θάλασσας από απόρριψη αποβλήτων και άλλων υλικών, ορίζει ότι *«τα συμβαλλόμενα μέρη δεν επιτρέπουν την εξαγωγή αποβλήτων και άλλων υλικών σε άλλες χώρες*

Επικυρώθηκε	**κράτη μέλη της ΕΕ, δεν έχουν επικυρωθεί**	**Άλλες χώρες, μη επικυρωμένες αλλά με ενδιαφέρον για την CCS**	**Άλλες χώρες, που δεν έχουν επικυρωθεί**
Η.Β., Ολλανδία, Φινλανδία, Ιράν, Εσθονία, Νορβηγία	Δανία, Γερμανία, Σουηδία, Γαλλία, Βέλγιο, Ιρλανδία, Ισπανία, Ιταλία, Λουξεμβούργο, Σλοβενία, Βουλγαρία, Κροατία, Κύπρος	Νότια Αφρική, Καναδάς, Αυστραλία, Σαουδική Αραβία, Κίνα, Ιαπωνία, Μεξικό, Νότια Κορέα, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, Ομάν	Βανουάτου, Τρινιντάντ και Τομπάγκο, Γεωργία, Ελβετία, Νέα Ζηλανδία, Αγκόλα, Τόνγκα, Αίγυπτος, Σεντ Κιτς & Νέβις, Μπαρμπάντος, Σουρινάμ, Κένυα, Σιέρα Λεόνε, Νησιά Μάρσαλ , Γκάνα, Νιγηρία, Υεμένη, Χιλή, Φιλιππίνες, Ουρουγουάη, Κογκό, Περού, Ισλανδία

Σχήμα 7.1. : Επισκόπηση της κατάστασης επικύρωσης Συμβαλλομένων Μερών από τον Μάρτιο του 2019

Πηγή: IOGP - The potential for CCSand CCU in Europe(05/2019)

για απόρριψη ή αποτέφρωση στη θάλασσα». Μια τροποποίηση που εξαιρεί την εξαγωγή CO_2 για σκοπούς αποθήκευσης από αυτόν τον περιορισμό συμφωνήθηκε το 2009, αλλά η έναρξη ισχύος της απαιτεί τα δύο τρίτα (35 από τα 53) των Συμβαλλόμενων Μερών να επικυρώσουν την τροποποίηση. Από τον Μάρτιο του 2019, μόνο έξι χώρες έχουν επικυρώσει.

Μια πιθανή προσωρινή λύση που θα επιτρέπει την ανάπτυξη πρώιμων έργων διασυνοριακών μεταφορών CO_2 θα μπορούσε να είναι η προκαταρκτική έναρξη μεταφοράς μεταξύ των σημερινών συμβαλλομένων μερών που έχουν επικυρώσει. Για τη διευκόλυνση της διασυνοριακής μεταφοράς CO_2 , η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θα πρέπει να ενθαρρύνει

περαιτέρω τα συμβαλλόμενα μέρη να δώσουν προτεραιότητα στην επικύρωση ή να υποστηρίξουν προτεινόμενες προσωρινές λύσεις έως ότου επιτευχθεί το πλήρες όριο επικύρωσης .

7.1.2. Σύνδεση και επιδότηση έργων μεταφοράς CCUS από τα EU ETS.

Το EU ETS είναι ένας μηχανισμός που θα μπορούσε να υποστηρίξει την εμπορική βιωσιμότητα των νέων τεχνολογιών CCS και CCU , αλλά στην τρέχουσα μορφή του δεν επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους. Το ETS θα μπορούσε περαιτέρω να υποστηρίξει την ανάπτυξη CCS στην Ευρώπη αναγνωρίζοντας και επιβραβεύονταςτη μεταφορά CO_2 με πλοίο, τρένα ή φορτηγά, με παρόμοιο τρόπο που υπάρχει σήμερα για μεταφορά μέσω αγωγών. Την 13-03-2023 μόλις, εισήχθηκε στο Ευρωκοινοβούλιο ως θέμα συζήτησης, μέρος των σημαντικών εσόδων από το **σύστημα εμπορίας ρύπων** της ΕΕ (**EU ETS**) στη **ναυτιλία**, θα πρέπει να δοθεί σε επενδύσεις για την απαλλαγή από τον άνθρακα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο – Ολομέλεια) .

7.1.3. Βιώσιμη χρηματοδότηση

Η χρηματοδότηση έργων φυσικού αερίου, όπως τα combined cycle gas turbine (CCGT) έργα, που είναι συμβατά με CCS, θα πρέπει να αναγνωρίζονται βάσει της ταξινόμησης της ΕΕ. Η Ε.Ε. θα πρέπει επίσης να αναγνωρίζει το CCS καιτο CCU με κατάλληλη λογιστική για τον άνθρακα, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς και αποθήκευσης CO_2 ως βασικές δραστηριότητες μετριασμού του κλίματος .

7.1.4. Περιορισμοί λιμένα

Η χρήση υπαρχόντων λιμένων για έργα ναυτιλίας CO_2 είναι οικονομικά αποδοτική λόγω της διαθεσιμότητας υπηρεσιών και υποδομής π.χ. για ελλιμενισμό καθώς και αποθήκευση και φόρτωση CO_2 . Τα υπάρχοντα λιμάνια μπορούν να επιβάλλουν περιορισμούς σε έργα ναυτιλίας CO_2 , συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων **μήκους πλοίου, βύθισης πλοίου,**

διαθεσιμότητας αγκυροβόλησης και **αποθηκευτικού χώρου** . Για παράδειγμα, πολύ μεγάλα πλοία CO_2 (π.χ. >30 kt CO_2) ενδέχεται να μην είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις συγκεκριμένες απαιτήσεις μέγιστου μήκους και βυθίσματος ορισμένων λιμένων.

Ο Πίνακας 7.2. δείχνει το εκτιμώμενο μέγεθος των πλοίων CO_2 στη βιβλιογραφία.

ΠΗΓΗ	Πίεση μεταφοράς CO 2	Μέγεθοςπλοίου (tCO 2)	Μήκος πλοίου (m)	Βύθισμα πλοίου (m)
Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult 2016	Med P	1,700-7,500	94-160	5-7
Polarkonsult, Praxair, Larvik Shipping, 2016	Med P	2,400-9,400	102-160	5-7
Δελτίο 2017	Med P	2,300-10,000	103-150	5-8
Petrofac 2012	Low P	30,000	210	11

Πίνακας 7.2. Παράμετροι πλοίου CO_2 στην βιβλιογραφία.

Ενώ οι παράμετροι του λιμένα μπορεί να επιβάλλουν περιορισμούς στον σχεδιασμό του πλοίου στα πρώτα έργα, μακροπρόθεσμα μπορεί να εγκατασταθεί ειδική υποδομή .

7.1.5. Περιορισμένη εμπειρία στη μεταφορά CO_2 μεγάλης κλίμακας

Ο ναυτιλιακός κλάδος είναι συντηρητικός και αποστρέφεται τον κίνδυνο όσον αφορά τους νέουςεπιχειρηματικούς τομείς. Η μεταφορά CO_2 μεγάλης κλίμακας θεωρείται τεχνικά εφικτή, αλλά μπορεί να χρειαστεί ένα έργο επίδειξης σημαντικού μεγέθους για να δημιουργηθεί εμπιστοσύνη στο επενδυτικό περιβάλλον. Το ασφάλιστρο κινδύνου μιας νέας τεχνολογίας είναιπιθανό να μειωθεί γρήγορα. Για παράδειγμα, το κόστος των πλοίων που κινούνται με LNG έχειμειωθεί σημαντικά μετά τα πρώτα 3 - 5 πλοία. Το νορβηγικό έργο CCUS (Northen Lights) έχει ξεκινήσει με ένα ναυτιλιακό έργο μικρής κλίμακας, αλλά για τη δεύτερη φάση έχει τεθεί στόχοςπαροχής 1,5 MtCO 2 /έτος με σκοπό να κλιμακωθεί σε 4 MtCO 2 /έτος σχετικά γρήγορα. Μακροπρόθεσμα, μια σταθερή αλυσίδα εφοδιασμού και η αγορά για τη ναυτιλία CO_2

πρέπει να αναπτυχθεί, για να διασφαλιστεί η συνεχής δυναμική, οι επενδύσεις και η καινοτομία.

7.1.6. Έλλειψη βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων.

Οι ναυτιλιακές εταιρείες αναμένουν ότι το επιχειρηματικό μοντέλο της ναυτιλίας CO_2 θα διαφέρει ουσιαστικά από τη ναυτιλία LNG/LPG. Ενώ η αλυσίδα αξίας LNG/LPG είναι σε μεγάλο βαθμό κατανεμημένη και κατακερματισμένη, η ναυτιλιακή αλυσίδα CO_2 αναμένεται ναανήκει/διαχειρίζεται μια οντότητα, ώστε να καταστεί δυνατή η ευκολότερη διαχείριση. Οι κοινέςεπιχειρήσεις είναι πιθανό να αποτελούν κοινή πρακτική και ήδη εξετάζονται από τις ναυτιλιακέςεταιρείες και τις εταιρείες υποδομής. Η κύρια διαφορά μεταξύ των φορτίων είναι ότι το LNG/LPG προσφέρει αξία, ενώ το CO 2 είναι απόβλητο. Επομένως, εκτός από την Ενισχυμένη Ανάκτηση Πετρελαίου (EOR), η αποστολή CO_2 απαιτεί τη διαθεσιμότητα κινήτρου ή κρατικής υποστήριξης, για τη δημιουργία ενός μοντέλου εσόδων. Τα επιχειρηματικά μοντέλα θα εξαρτηθούν από τις μελλοντικές συνθήκες της αγοράς. Η δημιουργία δυναμικής και εμπιστοσύνης με την υλοποίηση ενός έργου αρχικής επίδειξης θα πρέπει να δώσει έμφαση προτεραιότητα στην αρχική φάση, ενώ αργότερα τα επιχειρηματικά μοντέλα μπορούν να αναπτυχθούν και να τελειο ποιηθούν σε μεταγενέστερο στάδιο .

7.2. Ευκαιρίες για την ναυτιλία μεταφοράς CO_2.

Το προηγούμενο κεφάλαιο έδειξε ξεκάθαρα ότι η μεταφορά CO_2 μπορεί να είναι πιο οικονομική σε σύγκριση με τους αγωγούς CO_2 υπό ορισμένες συνθήκες. Συνεπώς, η ναυτιλία μεταφοράς CO_2 , εκτός από τη δυνατότητα οικονομικής ευημερίας, παρουσιάζει ευκαιρίες για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές της Ε.Ε. καθώς και για την καθαρή οικονομική ανάπτυξη των δραστηριοποιούμενων φορέων - κρατών. Ωστόσο, τα σημερινά εμπόδια στη ναυτιλία CO_2 πρέπει να ληφθούν υπόψη και να ξεπεραστούν για να αναπτυχθεί αποτελεσματικά αυτή η αναδυόμενη βιομηχανία.

7.2.1. Εγχώριες Ευκαιρίες

Ειδικότερα, με το νομοσχέδιο του Υπουργείου Οικονομικών (Νόμος υπ' αριθμ. 4920/2022, ΦΕΚ Α' 74/ 15.04.2002), ψηφίστηκε στη Βουλή τροπολογία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Κεφάλαιο Β', άρθρο 228), με την οποία διευρύνεται ο σκοπός της ΕΔΕΥ Α.Ε. και αλλάζει ο ιδρυτικός της νόμος. Όπως αναφέρεται στην εν λόγω διάταξη, η ΕΔΕΥ Α.Ε. ορίζεται ως η αρμόδια αρχή «για την χορήγηση αδειών εξερεύνησης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς και την εν γένει διαχείριση των δικαιωμάτων του Ελληνικού Δημοσίου σχετικά με την εκμετάλλευση γεωλογικών σχηματισμών για την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων ή υγρών στοιχείων και ενώσεων, συμπεριλαμβανομένης της σύναψης και της παρακολούθησης της εκτέλεσης των σχετικών συμβάσεων». Στους σκοπούς της ΕΔΕΥ προστίθεται η παρακολούθηση της ασφαλούς λειτουργίας των σχετικών έργων, καθώς και η εισήγηση προς τους αρμόδιους Υπουργούς για την έκδοση των προβλεπόμενων κανονιστικών διατάξεων.

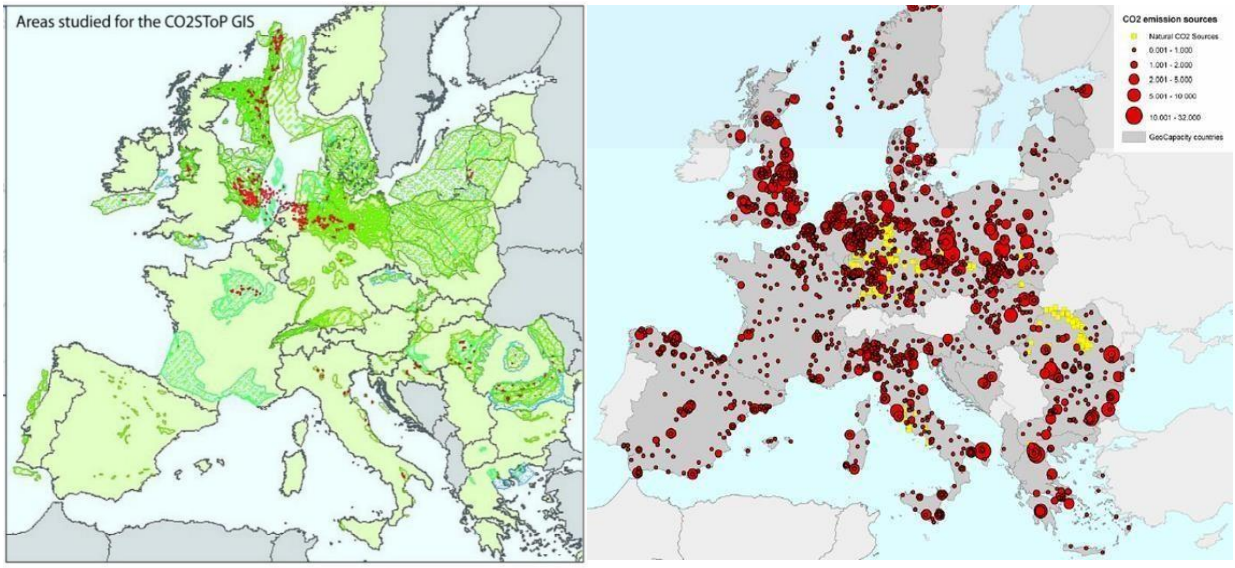
Η τροποποίηση αυτή στο συστατικό νόμο της ΕΔΕΥ Α.Ε. αποτελεί ορόσημο για τη λειτουργία της Εταιρείας και ενισχύει το ρόλο της στην επίτευξη των στόχων της Ελλάδας για την ενεργειακή μετάβαση. Η αποθήκευση CO_2 είναι μια τεχνολογία μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, καθώς επιτρέπει τη μείωση των εκπομπών CO_2 και πρόκειται να διαδραματίσει βασικό ρόλο στην αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. *Το CCS περιλαμβάνει μια διαδικασία τριών σταδίων: (1) δέσμευση CO_2 από βιομηχανικές δραστηριότητες όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή τσιμέντου, χάλυβα και αλουμινίου, πετροχημικών, κ.α., (2) μεταφορά του δεσμευμένου CO_2 μέσω πλοίου ή αγωγού σε καθορισμένη περιοχή αποθήκευσης και (3) τη μόνιμη αποθήκευση του CO_2 σε συγκεκριμένους γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι τεχνολογίες CCS μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν την απομάκρυνση του υπάρχοντος CO_2 από την ατμόσφαιρα* (ΕΔΕΥ Α.Ε.).

Ήδη η εταιρεία Energean, ανεξάρτητη εταιρεία έρευνας και παραγωγής υδρογονανθράκων με έδρα στο Λονδίνο, έχει σχεδιάσει το πρώτο έργο αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στην Ελλάδα, στον Πρίνο. Το έργο προωθείται μέσω του «Ελλάδα 2.0» ώστε να αξιοποιηθεί ο χώρος από το πετρελαϊκό κοίτασμα του Πρίνου και να εξελιχθεί σε αποθήκη CO_2, για 10 χρόνια, αρχής γενομένης από το 2025. Σύμφωνα με τη μελέτη που εκπόνησε η εταιρεία Halliburton για λογαριασμό της Energean θα ήταν δυνατό να ξεκινήσει να λειτουργεί με δυναμικότητα περί το 1 εκατ. τόνους CO_2 ετησίως με την επένδυση να υπολογίζεται αρχικά σε 500 εκατ. ευρώ και να φτάσει σταδιακά στο 1 δισ. ευρώ όσο θα αυξάνεται η δυναμικότητα

της αποθήκης, η οποία μπορεί σε πλήρη ανάπτυξη να «υποδέχεται» 6 εκατ. τόνους. Το έργο έχει χαρακτηριστεί καταρχήν επιλέξιμο από το Ταμείο Ανάκαμψης για 400 εκατ. ευρώ.
Τέλος, Ο Έλληνας εφοπλιστής Παναγιώτης (Πέτρου) Λιβανός, ανακοίνωσε την 06-05-2022, επένδυση στη «βιομηχανία» του Carbon Capture Utilization and Storage – CCUS εν όψει του στόχου για μηδενικές εκπομπές έως το 2050. Σύμφωνα με ανακοίνωση της νεοσύστατης εταιρείας ECOLOG, που υποστηρίζεται από την Ceres Shipping την 06-05-2022 δηλώθηκε ότι θα επενδύσει σε 60 πλοία και τους απαραίτητους τερματικούς σταθμούς για τη μεταφορά50 εκατομμυρίων τόνων CO_2 ετησίως (50 Mtpa) έως το 2035.

7.3. Διεθνείς ευκαιρίες.

Η ναυτιλία CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ενδιαφερόμενες χώρες ως **διασυνοριακή μεταφορά μεγάλων** αποστάσεων και μπορεί να συνδέσει με πλοία, τα λιμάνια χωρών όπως του Ηνωμένου Βασιλείου της Νορβηγίας και της Ολλανδίας και άλλους βασικούς βιομηχανικούς κόμβους με περιορισμένηυπεράκτια δυνατότητα αποθήκευσης CO2 , όπως η Γαλλία και η Γερμανία. Το σχήμα 7.3.1. δείχνει πιθανές τοποθεσίες αποθήκευσης CO2(Poulsen, 2014) και βασικέςπηγές εκπομπών (ΕΕ Επιτροπή, 2012). Η εγγύτητα πολλών τοποθεσιών αποθήκευσης στο ΗΒ και το χαμηλότερο δυναμικό αποθήκευσης ορισμένων άλλων ευρωπαϊκών κομητειών, καθιστούν το Ηνωμένο Βασίλειο καλά να χρησιμοποιεί τους φυσικούς μας πόρους.



Σχήμα 7.3.1. Πιθανοί σχηματισμοί αποθήκευσης CO_2 και πηγές εκπομπών CO_2 στην Ευρώπη (Πηγή: Global CCS Institute, 2011)

Η κατανομή αυτής της ικανότητας αποθήκευσης σε ολόκληρη την Ευρώπη θα επηρεάσει σημαντικά τις μελλοντικές επιλογές πολιτικής, με ορισμένα κράτη μέλη όπως η Ιταλία, η Ισπανία και η Γαλλία να εξαρτώνται ιδιαίτερα από τοποθεσίες αποθήκευσης στην ξηρά. Τα ολοκληρωμένα δίκτυα μεταφορών και οι διασυνοριακές συμφωνίες CCUS προσφέρουν ομοίως οφέλη στις περισσότερες χώρες, αλλά θα είναι ιδιαίτερα σημαντικά όταν η χωρητικότητα αποθήκευσης είναι περιορισμένη, π.χ. μειωμένη χωρητικότητα στην ξηρά ή περιορισμένη διαθεσιμότητα τοποθεσίας. Οι εκπομπές από τα βασικά βιομηχανικά συμπλέγματα γύρω από τη Βόρεια Θάλασσα φαίνονται παρακάτω.

Βασικοί βιομηχανικοί κόμβοι κοντά στο Ηνωμένο Βασίλειο	**Εκπομπές MtCO 2 /έτος**
Ρότερνταμ (Ολλανδία)	~20
Αμβέρσα (Βέλγιο)	~20
Ρουρ (Γερμανία)	~35
Χάβρη (Γαλλία)	~15

Πίνακας 7.3. Εκτιμώμενες βιομηχανικές εκπομπές από βασικούς βιομηχανικούς κόμβους

Εκτός από τις ευκαιρίες στην ίδια τη ναυτιλία CO_2, η διασυνοριακή μεταφορά CO_2 θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του ανάπτυξη περιουσιακών στοιχείων υπεράκτιων μεταφορών και αποθήκευσης εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτό έχει αρχίσει σταδιακά και διαφαίνεται μέσω ορισμένων έργων CCS που εξελίσσονται στην Ευρώπη και στοχεύουν στη μεταφορά CO_2 από τη μια χώρα στην άλλη για αποθήκευση. Δύο τέτοια έργα που ακολουθούν αυτή την προσέγγιση είναι το Northern Lights της Νορβηγίας (https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/northern-lights)και το έργο Teesside στο Ηνωμένο Βασίλειο (https://www.netzeroteesside.co.uk/).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα και συστάσεις για μελλοντική εργασία

Η δέσμευση, χρήση και αποθήκευση άνθρακα (Carbone Capture Utillization Storage) είναι η διαδικασία που αναπτύσσεται δυναμικά στην βιομηχανία και καθιερώνει το ρόλο της ως σημαντική τεχνολογία μείωσης του άνθρακα.

Η ναυτιλία CO_2 πιθανότατα θα έχει βασικό ρόλο στην υποστήριξη της εκτέλεσής της παγκοσμίως, λόγω του διαμορφούμενου κόστους της που μπορεί να συγκριθεί με εκείνο των αγωγών.

Χαρακτηριστικά στην εργασία αυτή είδαμε, ότι το κόστος της μεταφοράς CO_2 από πλοίο σε μεγάλη κλίμακα, μπορεί να αποτελεί 48% του συνολικού κόστους μεταφοράς, όπως προσδιορίστηκε βάση της έρευνας της EnergyElements UK Ltd (2018) για λογαριασμό της Βρετανικής Κυβέρνησης, (στα 56 €/ton από το συνολικό κόστος μεταφοράς αξίας 114,5 €/ton (σε σημερινές τιμές). Σε άλλο έργο στην Νορβηγία (2020), προσδιορίστηκε το βέλτιστο κόστος μεταφοράς με πλοίο στα 33,8 €/τόνο (σημερινή τιμή 38,19 €/ τόνο) για το 99% της χωρητικότητας του πλοίου ενώ στην Ν. Κορέα το συνολικό κόστος μεταφοράς προσδιορίστηκε (2020) σε 100,5$ / τόνο, εκ των οποίων 21$ / τόνο έξοδα μεταφοράς CO_2 με πλοίο, και της Ιαπωνίας σε 118,5$ / τόνο, με 18,5 $ / τόνο CO_2 αντίστοιχα.

Έγινε επίσης αντιληπτό ότι η ναυτιλία μεταφοράς CO_2 είναι συμφερότερη από ότι εκείνη με αγωγούς, όταν αυτή εκτελείται για αποστάσεις άνω των 2000km, για όλες τις πιέσεις αποθήκευσης στο πλοίο. Άρα, η μεταφορά διοξειδίου του άνθρακα με πλοίο, έχει συχνά χαμηλότερο κόστος από το αντίστοιχο έργο αγωγού, ανάλογα με το μέγεθος, τη θέση και τη διάρκεια του έργου. Επίσης στα παραδείγματα λήφθηκαν υπόψιν οι αποστάσεις μεταφοράς, οι προδιαγραφές πίεσης, η αξία του πλοίου και το κόστος της υγροποίησης που κυριαρχούν στο συνολικό κόστος.

Δεν έχουν επισημανθεί σημαντικά μειονεκτήματα στη βιβλιογραφία σε σχέση με την εφαρμογή της ναυτιλιακής μεταφοράς CO_2 , αν και απαιτούνται περισσότερα έργα επίδειξης για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης στην αλυσίδα εφοδιασμού και την καθιέρωση συνεχούς δραστηριοποίησης. Επιπλέον, η χρήση ευέλικτων πλοίων μεταφοράς μπορεί να μετατρέψει την μεταφορά και αποθήκευση CO_2 σε μια κερδοφόρα βιομηχανία για χώρες που έχουν σημαντικά υψηλότερες αποθηκευτικές ικανότητες από αυτές που απαιτούν, ιδίως μετά την κατάργηση των περιορισμών που έθετε προηγουμένως το Πρωτόκολλο του Λονδίνου.

Η ρευστοποίηση και το κόστος μεταφοράς (CAPEX και OPEX) βρέθηκε ότι είναι οι μεγαλύτερες συνιστώσες κόστους της μεταφοράς CO_2 (δηλαδή πάνω από 70%, έως και 83%). Το κόστος μεταφοράς κυριαρχείται από το λειτουργικό κόστος και το κόστος καυσίμων, σε αντίθεση με τους αγωγούς, στους οποίους κυριαρχεί το κόστος εγκατάστασης (CAPEX). Η σχέση κόστους - αποτελεσματικότητας των εξόδων μεταφοράς εξαρτάται από τις συνθήκες αρχικής και πίεσης μεταφοράς.

Ωστόσο, χαρακτηρίζεται από υψηλές λειτουργικές δαπάνες, υψηλό κόστος καυσίμων και, ως εκ τούτου, η ναυτιλία μεταφοράς διοξείδιου του άνθρακα, εμφανίζει τις ευνοϊκές οικονομικές δυνατότητές της σε σχέση με τους αγωγούς, όταν εξετάζονται έργα μικρής χρονικής διάρκειας που χαρακτηρίζονται από χαμηλές ροές και μεγαλύτερες αποστάσεις.

Η ενσωμάτωση ενός συστήματος CCUS επί του σκάφους απαιτεί επιπλέον κόστος κεφαλαίου και επέκταση λόγω μετασκευής, αν και αυτό θα μπορούσε να μειωθεί εάν το δεσμευμένο CO_2 μπορεί να πωληθεί για να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκήπια ή στις βιομηχανίες τροφίμων. Λόγω κενού της βιβλιογραφίας, υπάρχει ανάγκη να κατανοηθεί η επίδραση της ολοκλήρωσης του συστήματος σύλληψης σε ένα πλοίο για μείωση του CO_2 όσον αφορά το κόστος και άλλα λειτουργικά μέτρα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ναυτιλία μεταφοράς CO_2 μπορεί στο μέλλον να αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα, στα πλαίσια του CCUS λόγω του μεγάλου εν δυνάμει προσφερόμενου όγκου εκπομπών CO_2 που ήδη υφίσταται, πλην όμως σήμερα αυτό δεν μπορεί να συμβεί για του λόγους που εξηγήθηκαν στο κεφάλαιο 7. Για τον λόγο αυτό, τη στιγμή που γράφεται η παρούσα, μία επένδυση ναυτιλιακής εταιρείας σε ναυτιλία μεταφοράς CO_2 θα χαρακτηριζόταν υψηλού ρίσκου και καλό θα ήταν να αποφευχθεί μέχρι να αρχίζουν να δημιουργούνται υποδομές φορτοεκφόρτωσης, λιμάνια, να προτυποποιείται ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός στα επιμέρους στάδια της αλυσίδας μεταφοράς CO_2 και φυσικά να προκύψει ενεργός ζήτηση.

Οι βασικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι κυρίως λειτουργικές και περιλαμβάνουν την τροποποίηση των υφιστάμενων κανονισμών, κυρίως του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου – και τη δημιουργία ενός βιώσιμου επιχειρηματικού μοντέλου. Ωστόσο, λόγω της έλλειψης εμπειρίας με τη ναυτιλία μεταφοράς διοξείδιου του άνθρακα στην απαιτούμενη κλίμακα, τα έργα επίδειξης θα απαιτηθεί να ανταποκρίνονται και στους περιορισμούς των λιμένων ως προετοιμασία για την υλοποίηση οποιασδήποτε ειδικής υποδομής μακροπρόθεσμα. Αναμένεται ότι τα όποια κυβερνητικά κίνητρα (επιδοτήσεις) και οι οικονομικές στρατηγικές της Ε.Ε. θα είναι απαραίτητα για την οικοδόμηση της δυναμικής

στη ναυτιλιακή βιομηχανία CO_2 , ειδικά επειδή, σε αντίθεση με τα πεδία LNG και LPG, το διοξείδιο του άνθρακα θεωρείται απόβλητο και όχι πολύτιμο προϊόν.

Η ναυτιλία CO_2 έχει τη δυνατότητα να επεκτείνει την απαλλαγή από τον άνθρακα σε εκείνες τις χώρες και τις βιομηχανίες όπου το CCUS είναι ουσιαστικά ανέφικτο λόγω γεωγραφικών ή λόγων έλλειψης υποδομής και να μειώσει το κόστος των πρώιμων έργων. Παρά τις όποιες τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, η εφαρμογή της ναυτιλίας μεταφοράς CO_2 μπορεί να διευκολύνει την έγκαιρη αφαίρεση του άνθρακα σε πολλές χώρες και βιομηχανίες του Βορείου Ημισφαιρίου όπου εκπέμπεται το 85% των ρύπων παγκοσμίως. Το 2020 εκπέμφθηκαν 36,3 δισεκατομμύρια τόννοι CO_2 στην γη. (Wikipedia-2020). Ο Kim Bye Bruun, διευθυντής επικοινωνίας και κυβερνητικών σχέσεων της ομόρρυθμης εταιρείας Northern Lights JV DA, η οποία ανήκει στις Equinor, Shell και TotalEnergies ανέφερε την 06-04-2021 ότι, «*10 γιγατόνοι ετησίως (Gtpa) CO_2 πρέπει να δεσμεύονται έως το 2070*» και ότι «*οι μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις στην Ευρώπη εκπέμπουν περίπου 1,3 Gtpa, ενώ η ναυτιλία μπορεί να μεταφέρει ετησίως 11 γιγατόνους ετησίως*». Άρα η γεωλογική αποθήκευση CO_2 εκ των πραγμάτων δείχνει ότι μπορεί να αποτελέσει δραστηριότητα αποφασιστικής σημασίας, αιχμή στην μείωση των εκπεμόμενων ρύπων παγκοσμίως και οικονομικά ελκυστική δραστηριότητα.

Με χώρες όπως η Ιαπωνία, η Νορβηγία και το Ηνωμένο Βασίλειο να επιδιώκουν τώρα ενεργά να ενεργοποιήσουν μεγάλης κλίμακας ναυτιλία CO_2 ως μέρος των στρατηγικών τους για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές, οι μελλοντικές εξελίξεις φαίνεται να είναι ελπιδοφόρες και πιο προσοδοφόρες.

8.1. Συστάσεις για περαιτέρω εργασία

Αυτή η μελέτη παρουσίασε το θεσμικό πλαίσιο της ανάπτυξης του CCUS σε γεωλογικούς σχηματισμούς, τους τρόπους που υλοποιείται σήμερα καθώς και μια ανασκόπιση του κόστους, του κόστους της μεταφοράς CO_2 από πλοίο, σε σχέση με την μεταφορά του από αγωγούς, αναδεικνύοντας κατά πόσο συμφέρει. Τέλος παρουσιάστηκε μια επισκόπηση των ευκαιριών και των εμποδίων που σχετίζονται με την ανάπτυξη της ναυτιλίας CO_2 στα επόμενα χρόνια. Θα πρέπει να ολοκληρωθούν πρόσθετες μελέτες ή έρευνες για τη διερεύνηση πιο λεπτομερών πτυχών της εφοδιαστικής αλυσίδας και της παγκόσμιας αγοράς. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις επιπτώσεις των νεότερων επιχειρηματικών μοντέλων ναυτιλίας CO_2 για τη βιομηχανία, τους

καταναλωτές, την κοινωνία και το περιβάλλον γενικότερα.

Μερικές προτάσεις για περαιτέρω εργασία δίνονται παρακάτω :

1. Λεπτομερέστερη αξιολόγηση πιθανών **λιμένων/τερματικών σταθμών καταρχήν εντός Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ναυτιλία CO_2**. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει προσδιορισμό κατάλληλων τοποθεσιών, μελέτες σκοπιμότητας για συγκεκριμένες τοποθεσίες και προσδιορισμό περιορισμών για συγκεκριμένο χώρο. Ησυζήτηση με πιθανές ομάδες δέσμευσης άνθρακα στην Ε.Ε. μπορεί να είναι ευεργετική.
2. Συμπερίληψη **της υποδομής αποθήκευσης CO_2** (π.χ. αγωγοί, πηγάδια, κ.λπ.) στο μοντέλο κόστους μεταφοράς CO_2 για να κατανοηθούν οι οικονομικές επιπτώσεις της ναυτιλίας από λιμάνι σε χώρους απευθείας αποθήκευσης. Λεπτομερής αξιολόγηση των διαφορετικών **επιλογών από λιμάνι σε χώρους απευθείας αποθήκευση** , συμπεριλαμβανομένης της πιθανής επίδρασής τους στο κόστος αποθήκευσης CO2, π.χ. λόγω της πιθανής επίδρασής τους στην έγχυση.
3. Λεπτομερής αξιολόγηση του **δυναμικού της αγοράς για εισαγωγή CO_2** από άλλεσμη ευρωπαϊκές χώρες και της σχετικής αξίας του στην Ε.Ε. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει οικονομική μοντελοποίηση για τον αντίκτυπο στην απασχόληση, και τις πιθανές πρόσθετες επενδύσεις.
4. Δραστηριότητες για την προώθηση της επικύρωσης της **προτεινόμενης τροποποίησης του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου** από περισσότερα κράτη μέλη για να καταστεί δυνατή η διασυνοριακή μεταφορά CO_2 . Θα πρέπει να διεξαχθεί έρευνα για την κατανόηση των υφιστάμενων φραγμών στην επικύρωση από τις υπόλοιπες χώρες και για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων όπου χρειάζεται.
5. Η Ε.Ε. μπορεί επίσης να αποκτήσει γνώση, από οποιαδήποτε προγράμματα επίδειξης όπως αυτά που αναπτύσσονται επί του παρόντος στη Νορβηγία και στο Ηνωμένο Βασίλειο.
6. Αξιολόγηση **βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων για τη ναυτιλία μεταφοράς CO_2**, συμπεριλαμβανομένων μηχανισμών κινήτρων, ιδιοκτησιακής δομής (π.χ. ποιες οντότητες είναι πιθανό να κατέχουν λιμάνι έναντι πλοίου), στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου και χρηματοδότηση κεφαλαίου. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας αυτών των μηχανισμών, καθώς και η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα τυχόν πολιτικών που εφαρμόζονται όσον αφορά την ανάπτυξη της αγοράς .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ:

[1]
C. Quéré , R. Andrew , P. Friedlingstein , S. Sitch , J. Hauck , J. Pongratz , *et al.*
Παγκόσμιος προϋπολογισμός άνθρακα 2018
Earth Syst Sci Data , 10 (2018) , σελ. 2141 - 2194

[2]
J. Logan , J. Venezia , K. Larsen
McQuale (Εικονογράφηση) Γ. Ευκαιρίες και προκλήσεις για τη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα
WRI Issue Br Carbon Capture Sequestration (2007) , σελ. 1 - 8

[3]
Bui M, Adjiman CS, Bardow A, Anthony EJ, Boston A, Brown S, et al. Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS): Ο δρόμος προς τα εμπρός. Energy Environ Sci 2018; 11:1062–176.

[4]
IEA
Προοπτικές Ενεργειακής Τεχνολογίας 2020 - Ειδική Έκθεση για τη δέσμευση άνθρακα και την αποθήκευση
Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας , Παρίσι, Γαλλία (2020)

[5]
IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Συμβολή των ομάδων εργασίας I, II και III στην πέμπτη έκθεση αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Ομάδας για την Κλιματική Αλλαγή. 2014.

[6]
IPCC. Περίληψη για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής: Υπερθέρμανση του πλανήτη κατά 1,5°C. Ειδική Έκθεση της IPCC για τις επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Διεθνής Ομάδα για την Κλιματική Αλλαγή. 2018.
Μελετητής Google
[7]
GCCSI. Παγκόσμια κατάσταση του CCS 2020. Παγκόσμιο Ινστιτούτο αποθήκευσης δέσμευσης άνθρακα. 2020.

[8]
F. Neele , HA Haugen , R. Skagestad
Μεταφορά CO_2 με πλοίο - Σπάζοντας το αδιέξοδο CO_2 -EOR
Energy Procedia , 63 (2014) , σελ. 2638 - 2644

[9]
G. Hegerland , T. Jørgensen , JO Pande
Υγροποίηση και χειρισμός μεγάλων ποσοτήτων CO_2 για EOR
Greenh Gas Control Technol (2005) , σελ. 2541 - 2544

[10]
Z. Zhang , S. Pan , H. Li , J. Cai , A. Ghani , E. John , *et al.*
Πρόσφατες εξελίξεις στη χρήση διοξειδίου του άνθρακα
Renew Sustain Energy Rev , 125 (2020) , σελ. 109799

[11]
IEA. Προοπτικές της IEA Energy Technology 2010-σενάρια και στρατηγικές έως το 2050. Παρίσι, Γαλλία. Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας.

[12]
Coussy P, Roussanaly S, Bureau–Cauchois G, Wildenborg T. Οικονομικό μοντέλο βελτιστοποίησης δικτύου CO2 COCATE European Project (2010-2013). GHGT-11 2013; 37:2923-31.

[13]
DNV. Αναφορά Δραστηριότητας 5: Μεταφορά CO2. 2012. Αριθμός αναφοράς/Αριθμός μητρώου DNV: 2012-0076/ 13REPT4-2 - Det Norske Veritas.

[14]
Y. Seo , C. Huh , S. Lee , D. Chang
Σύγκριση των πιέσεων υγροποίησης CO $_2$ για την αλυσίδα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) με βάση το πλοίο
Int J Greenh Gas Control , 52 (2016) , σελ. 1 - 12

[15]
Emma N. Οι μεγάλες τράπεζες θέτουν νέα πρότυπα δανεισμού για τη ναυτιλιακή βιομηχανία για να μειώσουν τις εκπομπές CO2. CNBC; 2019. https://www.cnbc.com/2019/06/17/major-banks-set-new-lending-standards-for-shipping-industry-to-cut-co2-emissions.html (πρόσβαση στις 3 Ιουλίου, 2020).

[16]
Smith T, Jalkanen JP, Anderson BA, Corbett JJ, Faber J, Hanayama S., et al. Third IMO GHG Study 2014. International Maritime Organisation; 2014.

[17]
IMO. Τέταρτη Μελέτη GHG του IMO 2020. Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός. 2020.

K. Andersson , S. Brynolf , J. Lindgren , M. Wilewska-Bien
Η ναυτιλία και το περιβάλλον της-Βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης στις θαλάσσιες μεταφορές
Springer (2016)

[19]
J. Tournadre
Ανθρωπογενής πίεση στον ανοιχτό ωκεανό: Η αύξηση της κυκλοφορίας των πλοίων που αποκαλύπτεται από την ανάλυση υψομετρικών δεδομένων
Geophys Res Lett , 41 (2014) , σελ. 7924 - 7932

[20]
MAN B&W. Έλεγχος εκπομπών MAN B & W Δίχρονοι κινητήρες Diesel. Κοπεγχάγη, Δανία: 1997.

[21]
P. Balcombe , J. Brierley , C. Lewis , L. Skatvedt , J. Speirs , A. Hawkes , *et al.*
Τρόπος απαλλαγής από τον άνθρακα της διεθνούς ναυτιλίας: Επιλογές για καύσιμα, τεχνολογίες και πολιτικές
Energy Convers Manag , 182 (2019) , σελ. 72 - 88

[22]
H. Wang , P. Zhou , Z. Wang
Κριτικές σχετικά με τις τρέχουσες τεχνολογίες και έργα μείωσης εκπομπών άνθρακα και τις δυνατότητές τους σε πλοία
J Mar Sci Appl (2017) , σελ. 129 - 136
Your institution provides access to this article.

[23]
Liang HL. Τι πρέπει να γνωρίζετε: Ο κανονισμός του IMO για το θείο καυσίμων του 2020. Seatrade Maritime News. Διαθέσιμο στο: www.seatrade-maritime.com . Πρόσβαση στις 16 Απριλίου 2020.

[24]
IMO. Πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία. Int Marit Organ
Λονδίνο; 2017. http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/%0APages/Air-Pollution.aspx (πρόσβαση στις 20 Απριλίου 2020).

[25]
Lloyd's Register. Κατανόηση συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων. Οδηγίες για πλοιοκτήτες και χειριστές. 2012.

[26]
R. Svensson , M. Odenberger , F. Johnsson , L. Strömberg

Συστήματα μεταφοράς CO_2 - Εφαρμογή στη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα
Energy Convers Manag , 45 (2004) , σελ. 2343 - 2353

[27]
S. Roussanaly , G. Skaugen , A. Aasen , J. Jakobsen , L. Vesely
Τεχνοοικονομική αξιολόγηση της μεταφοράς CO_2 από μονάδα IGCC με καύση λιγνίτη στην Τσεχική Δημοκρατία
Int J Greenh Gas Control , 65 (2017) , σελ. 235 - 250

[28]
GCCSI. Strategic Analysis of the Global Status of Carbon Capture and Storage – Economic Assessment of Carbon Capture and Storage Technologies. Παγκόσμιο Ινστιτούτο δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα. 2009.

[29]
WorleyParsons. Εκμάθηση CCS από τον τομέα LNG - Μια αναφορά για το Παγκόσμιο Ινστιτούτο CCS. Αριθμός αναφοράς: 401010-01060 – 00-PM-REP-0001. Παγκόσμιο Ινστιτούτο δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα. 2013.

[30]
Ενέργεια Στοιχείων. Ανάπτυξη CCS σε διάσπαρτες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Τμήμα Επιχειρηματικής Ενέργειας και Βιομηχανικής Στρατηγικής. Αριθμός ερευνητικής εργασίας 2020/030; 2020.

[31]
S. Roussanaly , ES Hognes , JP Jakobsen
Πολυκριτηριακή ανάλυση δύο τεχνολογιών μεταφοράς CO_2
Energy Procedia , 37 (2013) , σελ. 2981 - 2988

[32]
K. Patchigolla , JE Oakey
Επισκόπηση σχεδίασης της μεταφοράς αγωγού CO 2 πυκνής φάσης υψηλής πίεσης σε λειτουργία ροής Energy Procedia , 37 (2013) , σελ. 3123 - 3130

[33]
B. Prah , R. Yun
Ανασκόπηση της κατάστασης της τεχνολογίας της μεταφοράς του αγωγού δεσμευμένου CO_2
Korean Soc Mech Eng (2016) , σελ. 215 - 216
[34]
Doctor R, Palmer A, Coleman D, Davison J, Hendriks C, Kaarstad O, et al. Κεφάλαιο 4: Μεταφορά CO2. IPCC Spec Rep Carbon Dioxide Capture Storage 181 2005:179–94.

[35]
Υπουργείο Πετρελαίου και Ενέργειας N, Gassco, Gassnova. Μελέτη σκοπιμότητας για CCS πλήρους κλίμακας στη Νορβηγία. 2016. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://ccsnorway.com/wp-content/uploads/sites/6/2019/09/feasibilitystudy_fullscale_ccs_norway_2016.pdf .

[36]
Vermeulen TN. Αναφορά ανταλλαγής γνώσεων – Έννοια αποστολής υγρών μεταφορών CO2 (LLSC): Συνολική Βελτιστοποίηση Εφοδιαστικής Αλυσίδας 2011:143. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/knowledge-sharing-report-co2-liquid-logistics-shipping-concept-business-model/ .

[37]
M. Ozaki , T. Ohsumi , R. Kajiyama
Πλοία Offshore CCS με πλοία μεταφοράς CO_2 εξοπλισμένα με εγκαταστάσεις έγχυσης
Energy Procedia , 37 (2013) , σελ. 3184 - 3190

[38]
Element Energy, TNO, Engineering Brevik, SINTEF, Polarkonsult. Μελέτη εκτίμησης κόστους αποστολής

H.B. 2018. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/761762/BEIS_Shipping_CO2.pdf .

[39]
Wong S. Συμπίεση & μεταφορά CO2 στη δεξαμενή αποθήκευσης. Στο: Building Capacity for CO2 Capture and Storage in the APEC Region, APEC Energy Working Group Project EWG 03/2004T, Γραμματεία APEC, Σιγκαπούρη, Μάιος, 2005.

[40]
IPCC. Ειδική έκθεση της IPCC για τη δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα, που εκπονήθηκε από την ομάδα εργασίας III της Διεθνούς Ομάδας για την Κλιματική Αλλαγή. 2005.

[41]
MMJ Knoope , A. Ramírez , APC Faaij
Επένδυση σε υποδομές μεταφοράς CO2 υπό αβεβαιότητα: Σύγκριση μεταξύ πλοίων και αγωγών
Int J Greenh Gas Control , 41 (2015) , σελ. 174 - 193

[42]
GA Fimbres Weihs , K. Kumar , DE Wiley
Κατανόηση της οικονομικής σκοπιμότητας της μεταφοράς πλοίων CO_2 εντός της αλυσίδας CCS
Energy Procedia , 63 (2014) , σελ. 2630 - 2637

[43]
ΖΕΠ. Το κόστος μεταφοράς CO2 μετά την επίδειξη CCS στην ΕΕ. Ευρωπαϊκή Τεχνολογική Πλατφόρμα για Μηδενικές Εκπομπές Ορυκτών Καυσίμων, Πλατφόρμα Μηδενικών Εκπομπών. 2011. Διαθέσιμο στη διεύθυνση https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/the-costs-of-co2-transport-post-demonstration-ccs-in-the-eu/ .

[44]
S. Decarre , J. Berthiaud , N. Butin , JL Guillaume-Combecave
CO_2 θαλάσσιες μεταφορές
Int J Greenh Gas Control , 4 (2010) , σελ . 857-864

[45]
S. Roussanaly , JP Jakobsen , EH Hognes , AL Brunsvold
Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών μεταφοράς CO_2 : Μέρος I — Χερσαίος αγωγός και ναυτιλία μεταξύ δύο χερσαίων περιοχών
Int J Greenh Gas Control , 19 (2013) , σελ. 584 - 594

[46]
S. Roussanaly , AL Brunsvold , ES Hognes
Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών μεταφοράς CO_2 : Μέρος II - Υπεράκτιος αγωγός και αποστολή σε υπεράκτια τοποθεσία
Int J Greenh Gas Control , 28 (2014) , σελ. 283 - 299

[47]
VE Onyebuchi , A. Kolios , DP Hanak , C. Biliyok , V. Manovic
Μια συστηματική ανασκόπηση των βασικών προκλήσεων της μεταφοράς CO_2 μέσω αγωγών
Renew Sustain Energy Rev (2017) , σελ. 1 - 21

[48]
Mitsubishi Heavy Industries. Έκθεση σχετικά με τη μεταφορά CO_2 με πλοίο . Πρόγραμμα E&A του ΔΟΕ για τα αέρια θερμοκηπίου. 2004.

[49]
BY Yoo , DK Choi , HJ Kim , YS Moon , HS Na , SG Lee
Ανάπτυξη τερματικού CO_2 και φορέα CO_2 για μελλοντική εμπορευματοποιημένη αγορά CCS
Int J Greenh Gas Control , 12 (2013) , σελ. 323 - 332

[50]
F. Neele , R. De Kler , M. Nienoord , P. Brownsort , J. Koornneef , S. Belfroid , *et al.*
CO 2 Μεταφορές με πλοίο: Ο δρόμος προς τα εμπρός στην Ευρώπη
Energy Procedia , 114 (2017) , σελ. 6824 - 6834

[51]
R. Svensson , M. Odenberger , F. Johnsson , L. Strömberg
Μεταφορική υποδομή για CCS - Εμπειρίες και αναμενόμενη ανάπτυξη
Greenh Gas Control Technol (2005) , σελ. 2531 - 2534

[52]
Σκωτσέζικη σύλληψη & αποθήκευση άνθρακα. Αποθήκευση CO 2 και ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου στη Βόρεια Θάλασσα: Εξασφάλιση ενός μέλλοντος χαμηλών εκπομπών άνθρακα για το Ηνωμένο Βασίλειο. 2015.

[53]
A. Aspelund , K. Jordal
Κλιματισμός αερίου—Η διεπαφή μεταξύ δέσμευσης και μεταφοράς CO 2
Int J Greenh Gas Control , 1 (2007) , σελ . 343-354

[54]
Brownsort P. Μεταφορά CO2 με πλοίο για Ενισχυμένη Ανάκτηση Πετρελαίου – Έρευνα Βιβλιογραφίας. Σκωτσέζικη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα. 2015.

[55]
JY Jung , C. Huh , SG Kang , Y. Seo , D. Chang
Στρατηγική μεταφοράς CO 2 και εκτίμηση κόστους για το υπεράκτιο CCS στην Κορέα
Energy Procedia , 111 (2013) , σελ. 1054 - 1060

[56]
Skagestad R, Eldrup N, Richard H, Belfroid S, Mathisen A, Lach A, et al. Μεταφορά CO2 με πλοίο - Κενά κατάστασης και τεχνολογίας. Αριθμός αναφοράς Tel-Tek 2214090; Έκθεση που ετοιμάστηκε για την Gassnova από την Tel-Tek. 2014: 1–52.

[57]
A. Aspelund , MJ Mølnvik , G. De Koeijer
Μεταφορά πλοίων CO 2 - Τεχνικές λύσεις και ανάλυση κόστους, ενεργειακή χρήση, ενεργειακή απόδοση και εκπομπές CO 2
Chem Eng Res Des , 84 (2006) , σελ. 847 - 855

[58]
Chiyoda Corporation, Παγκόσμιο Ινστιτούτο CCS. Προκαταρκτική μελέτη σκοπιμότητας για μεταφορέα CO 2 για CCS με βάση το πλοίο. Chiyoda: 91048/GCCSI: CON163; 2011.

[59]
H. Nam , T. Lee , J. Lee , J. Lee , H. Chung
Σχεδιασμός υπεράκτιου συστήματος CCS βασισμένου σε αερομεταφορέα: Θέση εγκατάστασης και εκχώρηση στόλου
Int J Greenh Gas Control , 12 (2013) , σελ. 220 - 230

[60]
M. Ozaki , T. Ohsumi
CCS από πολλαπλές πηγές σε συγκρότημα υπεράκτιων χώρων αποθήκευσης μέσω μεταφοράς πλοίων
Energy Procedia , 4 (2011) , σελ. 2992 - 2999

[61]
R. De Kler , F. Neele , M. Nienoord , P. Brownsort , J. Koornneef , S. Belfroid , *et al.*
Μεταφορά και εκφόρτωση CO2 με πλοίο - συγκριτική αξιολόγηση WP9 Final
Έκθεση (2016)

[62]
ΖΕΠ. Ο ρόλος του CCUS σε σενάριο κάτω των 2 μοιρών. Πλατφόρμα μηδενικών εκπομπών. 2018.

[63]
IEAGHG. Η κατάσταση και οι προκλήσεις των ναυτιλιακών υποδομών CO_2. Τεχνική Έκθεση IEAGHG 2020-10; 2020.

[64]
Yara, Larvik Shipping, Polarkonsult. Μελέτη μεταφοράς πλοίων CO2 για την υποστήριξη της πλήρους κλίμακας αξιολόγησης της αλυσίδας CCS στη Νορβηγία. 2016.

[65]
Chiyoda Corporation, Παγκόσμιο Ινστιτούτο CCS. Προκαταρκτική μελέτη σκοπιμότητας για φορέα CO2 για CCS με βάση τα πλοία (μη επανδρωμένη υπεράκτια εγκατάσταση Phase-2). 2012.
Μελετητής Google
[66]
Τμήμα Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. Οδικός χάρτης CCS. Υποστήριξη της ανάπτυξης δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα στο HB. 2012.

[67]
Koers P, Maarten de Looij. Μελέτη ασφάλειας για την έννοια της αποστολής υγρών Logistics.. Rotterdam, Det Norske Veritas BV; 2011. Αριθμός έκθεσης: 12TUIBY-3.

[68]
S. Roussanaly , G. Bureau-cauchois , J. Husebye
Σημείο αναφοράς κόστους των τεχνολογιών μεταφοράς CO 2 για μια ομάδα βιομηχανιών διαφόρων μεγεθών
Int J Greenh Gas Control , 12 (2013) , σελ. 341 - 350

[69]
P. Brownsort
Υπεράκτια εκφόρτωση CO_2 - Ανασκόπηση τύπων μονής πρόσδεσης και βιωσιμότητα
Σκωτσέζικη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (2015)

[70]
A. Aspelund , T. Gundersen
Μια αλυσίδα υγροποιημένης ενέργειας για μεταφορά και χρήση φυσικού αερίου για παραγωγή ενέργειας με δέσμευση και αποθήκευση CO2 - Μέρος 1
Appl Energy , 86 (2009) , σελ. 781 - 792

[71]
Brevik P. Το έργο CCS πλήρους κλίμακας στο Norcem Brevik - Μπορεί να πραγματοποιηθεί; Στο: Παρουσίαση Powerpoint, HeidelbergCement; 2017.

[72]
U. Zahid , J. An , CJ Lee , U. Lee , C. Han
Στρατηγική σχεδιασμού και λειτουργίας τερματικού CO_2
Ind Eng Chem Res , 54 (2015) , σελ. 2353 - 2365

[73]
Ενεργειακό Ινστιτούτο. Γενικές ιδιότητες και χρήσεις του διοξειδίου του άνθρακα, καλός σχεδιασμός και λειτουργία εγκαταστάσεων για χερσαίες εγκαταστάσεις δέσμευσης άνθρακα και χερσαίους αγωγούς - Έγγραφο καθοδήγησης συνιστώμενης πρακτικής. 2010.

[74]
Scottish Development International, Scottish Enterprise. Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα - Επιλογές μεταφοράς CO2 για τη Σκωτία. 2011.

[75]
Polarkonsult, Praxair, Larvik Shipping. Μελέτη ιδέας μεταφοράς CO2 με πλοίο, ως μέρος του Νορβηγικού Έργου Επίδειξης CCS. 2017.

[76]
HA Haugen , N. Eldrup , C. Bernstone , S. Liljemark , H. Pettersson , M. Noer , *et al.*
Επιλογές για τη μεταφορά CO 2 από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα Case Denmark
Energy Procedia , 1 (2009) , σελ. 1665 - 1672

[77]
Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Σύνοψη Έκθεσης GATEWAY – Ανάπτυξη πιλοτικής υπόθεσης με στόχο τη δημιουργία ενός ευρωπαϊκού έργου υποδομής για τη μεταφορά CO2. ID έργου: 657263; 2016.

[78]
GCCSI. The Global Status of CCS 2018. Global Carbon Capture Storage Institute; 2018.

[79]
J. Morbee , J. Serpa , E. Τζίμας
Βέλτιστος σχεδιασμός της υποδομής μεταφοράς CO 2 : Το εργαλείο JRC InfraCCS
Energy Procedia , 4 (2011) , σελ. 2772 - 2777

[80]
GCCSI. Transport & Storage Economics των Δικτύων CCS στην Ολλανδία. Παγκόσμιο Ινστιτούτο δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα. 2013.

[81]
R. Skagestad , A. Mathisen , NH Eldrup , HA Haugen
Μεταφορά CO 2 από τις πηγές στην αποθήκευση στην περιοχή Skagerrak/Kattegat
Energy Procedia , 4 (2011) , σελ. 3016 - 3023

[82]
J. Kjärstad , R. Skagestad , NH Eldrup , F. Johnsson
Μεταφορά πλοίων—Μια επιλογή μεταφοράς CO 2 χαμηλού κόστους και χαμηλού κινδύνου στις σκανδιναβικές χώρες
Int J Greenh Gas Control , 54 (2016) , σελ. 168 - 184

[83]
Equinor, Shell, Total. Northern Lights Περιγραφή έργου; 2020. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://northernlightsccs.com/en/about . Πρόσβαση στις 19 Νοεμβρίου 2020.

[84]
Ενέργεια Pale Blue Dot. Acorn CO2 SPLING Flyer έργου μεταφορών και υποδομών; 2018.

[85]
N. Kokubun , K. Ko , M. Ozaki
Συνθήκες φορτίου CO 2 σε μεταφορά με λεωφορείο με πλοίο
Energy Procedia , 37 (2013) , σελ. 3160 - 3167

[86]
Al-Siyabi I. Επίδραση ακαθαρσιών στις ιδιότητες ρεύματος CO 2 . Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Πετρελαίου, Πανεπιστήμιο Heriot-Watt; 2013.

[87]
J. Wang , D. Ryan , EJ Anthony , N. Wildgust , T. Aiken
Επιδράσεις των ακαθαρσιών στη μεταφορά, την έγχυση και την αποθήκευση CO 2
Energy Procedia , 4 (2011) , σελ. 3071 - 3078

[88]
ST Munkejord , M. Hammer , SW Løvseth Μεταφορά CO 2 : Δεδομένα και μοντέλα - Μια ανασκόπηση

Appl Energy , 169 (2016) , σελ. 499 - 523

[89]
A. Austegard , E. Solbraa , G. De Koeijer , MJ Mølnvik
Θερμοδυναμικά μοντέλα για τον υπολογισμό των αμοιβαίων διαλυτοτήτων σε μίγματα H 2 O–CO 2 – CH 4
Chem Eng Res Des , 84 (2006) , σελ. 781 - 794

[90]
Chapoy A, Burgass R, Tohidi B. Επίδραση κοινών προσμίξεων στη συμπεριφορά φάσης συστημάτων πλούσιων σε διοξείδιο του άνθρακα: Ελαχιστοποίηση του κινδύνου σχηματισμού υδρίτη και ροή δύο φάσεων. Offshore Eur. 8-11 Σεπτεμβρίου Aberdeen, UK, Society of Petroleum Engineers; 2011, σελ. 921–30.

[91]
B. Wetenhall , H. Aghajani , H. Chalmers , SD Benson , MC Ferrari , J. Li , *et al.*
Επίδραση της ακαθαρσίας CO 2 στη συμπίεση, την υγροποίηση και τη μεταφορά του CO 2
Energy Procedia , 63 (2014) , σελ. 2764 - 2778
Προβολή PDFΔείτε το άρθροΠροβολή στο ScopusΜελετητής Google
[92]
R. Span , J. Gernert , A. Jäger
Ακριβή μοντέλα θερμοδυναμικής ιδιότητας για μείγματα πλούσια σε CO 2
Energy Procedia , 37 (2013) , σελ. 2914 - 2922

[93]
SW Lovseth , G. Skaugen , HG Jacob Stang , JP Jakobsen , Ø. Wilhelmsen , R. Span , *et al.*
Έργο CO 2 Mix: Πειραματικός προσδιορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων μιγμάτων πλούσιων σε CO 2
Energy Procedia , 37 (2013) , σελ. 2888 - 2896

[94]
H. Li , JP Jakobsen , O. Wilhemsen , J. Yan
Ιδιότητες PV Txy μειγμάτων CO 2 που σχετίζονται με τη δέσμευση, τη μεταφορά και την αποθήκευση CO 2 : Ανασκόπηση διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών μοντέλων
Appl Energy , 88 (2011) , σελ. 3567 - 3579

[95]
F. Engel , A. Kather
Προετοιμασία ρεύματος CO 2 αγωγού για μεταφορά πλοίων από διάφορες πηγές CO 2
Energy Procedia , 114 (2017) , σελ. 6741 - 6751

[96]
CE Stouffer , SJ Kellerman , KR Hall , JC Holste , BE Gammon , KN Marsh
Πυκνότητες μιγμάτων διοξειδίου του άνθρακα + υδρόθειου από 220 K έως 450 K σε πιέσεις έως 25 MPa
J Chem Eng Data , 46 (2001) , σελ. 1309 - 1318

[97]
C. Rivas , ST Blanco , J. Fernández , M. Artal , I. Velasco
Επίδραση μεθανίου και μονοξειδίου του άνθρακα στην ογκομετρική συμπεριφορά του ανθρωπογενούς CO 2 : Πειραματικά δεδομένα και μοντελοποίηση στην κρίσιμη περιοχή
Int J Greenh Gas Control , 18 (2013) , σελ. 264 - 276

[98]
ST Blanco , C. Rivas , R. Bravo , J. Fernández , M. Artal , I. Velasco
Συζήτηση για την επίδραση του CO και του CH 4 στη μεταφορά, την έγχυση και την αποθήκευση CO 2 για την τεχνολογία CCS
Environ Sci Technol , 48 (2014) , σελ. 10984 - 10992

[99]
M. Ahmad , S. Gersen
Υδατοδιαλυτότητα σε μείγματα CO 2 : Πειραματική έρευνα και διερεύνηση μοντελοποίησης

Energy Procedia , 63 (2014) , σελ. 2402 - 2411

[100]
A. Chapoy , AH Mohammadi , A. Chareton , B. Tohidi , D. Richon
Μέτρηση και μοντελοποίηση της διαλυτότητας αερίων και βιβλιογραφική ανασκόπηση των ιδιοτήτων για το σύστημα διοξειδίου του άνθρακα-νερού
Ind Eng Chem Res , 43 (2004) , σελ. 1794 - 1802

[101]
KY Song , R. Kobayashi
Περιεκτικότητα σε νερό σε CO_2 σε ισορροπία με υγρό νερό ή/και ένυδρες ενώσεις
SPE Form Eval , 2 (1987) , σελ. 500 - 508

[102]
De Visser E, Hendriks C, de Koeijer G, Barrio M, Liljemark S, Austegard A, et al. Συστάσεις ποιότητας DYNAMIS CO2. Δυναμική; Αριθμός έργου: 019672; 2007.

[103]
G. Heggum , T. Weydahl , R. Mo , M. Mølnvik , A. Austegaard
CO_2 Κλιματισμός και Μεταφορά
Αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα Deep Geol Form (2005) , σελ. 925 - 936

[104]
Seiersten M. Επιλογή Υλικών για Διαχωρισμό, Μεταφορά και Διάθεση CO2. Corrosion 2001. Χιούστον, Τέξας: NACE International; 2001.

[105]
LMC Pereira , M. Kapateh , A. Chapoy
Επίδραση των ακαθαρσιών στις θερμοφυσικές ιδιότητες και τις απαιτήσεις αφυδάτωσης συστημάτων πλούσιων σε CO2 σε CCS. Εξαμηνιαία UKCCSRC , Συνάντηση Πανεπιστημίου του Κέμπριτζ , Κέιμπριτζ, Ηνωμένο Βασίλειο (2014)

[106]
SNC-Lavin Inc. Επίδραση ακαθαρσιών στη δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση CO2. Αριθμός αναφοράς PH4/32. Πρόγραμμα E&A του ΔΟΕ για τα αέρια θερμοκηπίου. 2004.

[107]
L. Ansaloni , B. Alcock , TA Peters
Επιδράσεις του CO_2 σε πολυμερή υλικά στην αλυσίδα μεταφοράς CO_2 : Μια ανασκόπηση
Int J Greenh Gas Control , 94 (2020) , σελ. 102930

[108]
A. Lilliestrale , MJ Mølnvik , G. Tangen , JP Jakobsen , ST Munkejord , A. Morin , *et al.*
Το έργο IMPACTS: Ο αντίκτυπος της ποιότητας του CO_2 στη συμπεριφορά μεταφοράς και αποθήκευσης
Energy Procedia , 51 (2013) , σελ. 402 - 410

[109]
S. Brown , S. Martynov , H. Mahgerefteh , M. Fairweather , RM Woolley , CJ Wareing , *et al.*
CO2QUEST: Τεχνοοικονομική αξιολόγηση της επίδρασης της ποιότητας του CO_2 στην αποθήκευση και μεταφορά του Energy Procedia , 63 (2014) , σελ. 2622 - 2629

[110]
NETL. Οδηγίες ποιότητας για μελέτες ενεργειακών συστημάτων - Παράμετροι σχεδίασης προσμίξεων CO2. Εθνικό Εργαστήριο Ενεργειακής Τεχνολογίας. 2012. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.osti.gov/biblio/1566771-quality-guidelines-energy-system-studies-co2-impurity-design-parameters .

[111]

F. Engel , A. Kather
Βελτιώσεις στην υγροποίηση ρεύματος CO 2 αγωγού για μεταφορά πλοίων
Int J Greenh Gas Control , 72 (2018) , σελ. 214 - 221

[112]
SE. Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα - Επιλογές μεταφοράς CO2 για τη Σκωτία. Scottish Enterprise; 2011. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.sccs.org.uk/images/expertise/misc/CO2-Transport-Options-for-Scotland.pdf .

[113]
K. Kang , Y. Seo , D. Chang , SG Kang , C. Huh
Εκτίμηση του κόστους μεταφοράς CO 2 στη Νότια Κορέα με χρήση τεχνοοικονομικού μοντέλου
Ενέργειες , 8 (2015) , σελ. 2176 - 2196

[114]
J. Jakobsen , S. Roussanaly , R. Anantharaman
Μια τεχνοοικονομική μελέτη περίπτωσης αλυσίδας δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης CO 2 από εργοστάσιο τσιμέντου στη Νορβηγία
J Clean Prod , 144 (2017)

[115]
BY Yoo , SG Lee , KP Rhee , HS Na , JM Park
Νέα ενοποίηση συστήματος CCS με φορέα CO 2 και διαδικασία υγροποίησης
Energy Procedia , 4 (2011) , σελ. 2308 - 2314

[116]
B. Γιου
Η ανάπτυξη και σύγκριση των διαδικασιών επαναρρευστοποίησης CO 2 BOG για φορείς CO 2 με καύσιμο LNG
Ενέργεια , 127 (2017) , σελ. 186 - 197

[117]
S. Roussanaly , G. Bureau-cauchois , J. Husebye
International Journal of Greenhouse Gas Control Costs σημείο αναφοράς των τεχνολογιών μεταφοράς CO 2 για μια ομάδα βιομηχανιών διαφόρων μεγεθών
Int J Greenh Gas Control , 12 (2013) , σελ. 341 - 350

[118]
J. Kemper , L. Sutherland , J. Watt , S. Santos
Αξιολόγηση και ανάλυση της απόδοσης των μονάδων αφυδάτωσης για δέσμευση CO 2
Energy Procedia , 63 (2014) , σελ. 7568 - 7584

[119]
Øi LE, Fazlagic M. Glycol dehydration of Capture Carbon Dioxide Using Aspen Hysys Simulation. Telemark Univerisry College, Τμήμα Διαδικασίας, Ενέργειας και Περιβαλλοντικής Τεχνολογίας. 2014.
Μελετητής Google
[120]
Y. Seo , H. You , S. Lee , C. Huh , D. Chang
Αξιολόγηση των διαδικασιών υγροποίησης CO 2 για δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα με βάση το πλοίο (CCS) ως προς το κόστος κύκλου ζωής (LCC) λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα
Int J Greenh Gas Control , 35 (2015) , σελ. 1 - 12
[121]
LE Øi , N. Eldrup , U. Adhikari , MH Bentsen , JL Badalge , S. Yang
Προσομοίωση και σύγκριση κόστους υγροποίησης CO 2
Energy Procedia , 86 (2016) , σελ. 500 - 510

[122]
A. Alabdulkarem , Y. Hwang , R. Radermacher

Ανάπτυξη κύκλων υγροποίησης CO2 για δέσμευση CO_2
Appl Therm Eng , 33 (2012) , σελ. 144 - 156

[123]
H. Deng , S. Roussanaly , G. Skaugen
Τεχνοοικονομικές αναλύσεις ρευστοποίησης CO2: Επίδραση της πίεσης του προϊόντος και των προσμίξεωνInt J Refrig , 103 (2019) , σελ. 301 - 315

[124]
Ung Lee , Seeyub Yang , Yeong Su Jeong , Youngsub Lim , *et al.*
Διαδικασία υγροποίησης διοξειδίου του άνθρακα για μεταφορά πλοίων
American Chemical Society , 51 (46) (2012) , σελ . 15122-15131 ,10.1021/ie300431z

[125]
A. Aspelund , TE Sandvik , H. Krogstad , G. De Koeijer Υγροποίηση του δεσμευμένου CO_2 για μεταφορά σε πλοίοGreenh Gas Control Technol (2005) , σελ. 2545 - 2549

[126]
Deng H, Roussanaly S, Skaugen G. Καλύτερη κατανόηση της υγροποίησης του CO2 (Προς τον εντοπισμόβέλτιστων συνθηκών μεταφοράς για CCS με βάση το πλοίο). Ιστολόγιο SINTEF; 2019. https://blog.sintef.com/sintefenergy/co2-liquefaction-transport-conditions-ship-based-ccs/ (Πρόσβαση στις 13 Σεπτεμβρίου 2019).

[127]
SG Lee , GB Choi , JM Lee
Βέλτιστη σχεδίαση και συνθήκες λειτουργίας της διαδικασίας υγροποίησης CO_2 , λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του νερού ψύξης
Ind Eng Chem Res , 54 (2015) , σελ. 12855 - 12866

[128]
HA Haugen , NH Eldrup , AM Fatnes , E. Leren
Εμπορική Δέσμευση και Μεταφορά CO_2 από Παραγωγή ΑμμωνίαςEnergy Procedia , 114 (2017) , σελ. 6133 - 6140

[129]
U. Lee , Y. Lim , S. Lee , J. Jung , C. Han Τερματικό αποθήκευσης CO_2 για τη μεταφορά πλοίων Ind Eng Chem Res , 51 (2012) , σελ. 389 - 397

[130]
Seo Y, Lee S Yeob, Kim J, Huh C, Chang D. Προσδιορισμός βέλτιστου όγκου δεξαμενών προσωρινής αποθήκευσης σε μια αλυσίδα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) με βάση το πλοίο χρησιμοποιώντας τοκόστος κύκλου ζωής (LCC) συμπεριλαμβανομένου του κόστους μη διαθεσιμότητας. Int J Greenh Gas Control 2017; 64:11–22.

[131]
J. Koornneef , A. Ramírez , W. Turkenburg , A. Faaij
Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των κινδύνων της δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσηςCO_2 - Αξιολόγηση της βάσης γνώσεων
Prog Energy Combust Sci , 38 (2012) , σελ. 62 - 86

[132]
M. Yamamoto , R. Wada , K. Kamizawa , K. TakagiΗ έννοια του FLT
Mar Syst Ocean Technol , 12 (2017) , σελ. 104 - 116

[133]
Y. Liu , Q. Ye , M. Shen , J. Shi , J. Chen , H. Pan , *et al.*
Σύλληψη διοξειδίου του άνθρακα με λειτουργικά στερεά αμινο ροφητικά με προσομοιωμένες συνθήκες

καυσαερίωνEnviron Sci Technol , 45 (2011) , σελ. 5710 - 5716

[134]
Skagestad R, Eldrup N, Richard H, Belfroid S, Mathisen A, Lach A, et al. Μεταφορά CO2 με πλοίο – Κενάκατάστασης και τεχνολογίας. Gassnova; 2014. Έκθεση TelTek αρ. [2214090].

[135]
A. Witkowski , M. Majkut
Γενικές Φυσικές Ιδιότητες του CO_2 στις Διαδικασίες Συμπίεσης και Μεταφοράς
Πρόοδοι στις διαδικασίες συμπίεσης διοξειδίου του άνθρακα και μεταφοράς αγωγών. SpringerBriefs in AppliedSciences and Technology , Springer , Cham (2015)

[136]
Liane S, Billingham M, Barraclough C, Lee CH, Milanovic D, Peralta-Solario D, et al. Διάβρωση και επιλογήυλικών για δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα. 2010. Έκθεση IEAGHG: 2010/03.

[137]
Y.-Σ. Choi , S. Nesic
Προσδιορισμός του διαβρωτικού δυναμικού του αγωγού μεταφοράς CO_2 σε περιβάλλοντα με υψηλό pCO_2 - νερόInt J Greenh Gas Control , 5 (2011) , σελ. 788 - 797
Προβολή PDFΔείτε το άρθροΠροβολή στο ScopusΜελετητής
Google[138]
Norsok. Προσόντα μη μεταλλικών στεγανοποιητικών υλικών και κατασκευαστών. 1994. Αριθμός έκθεσης: M-CR-710.

[139]
Ho E. Ελαστομερείς σφραγίδες για εφαρμογές ταχείας αποσυμπίεσης αερίων σε υπηρεσίες υψηλής πίεσης. ΥγείαΑσφάλεια Executive? BHR Gr Limited, Res Rep No 485 2006:1–74.

[140]
MMF Hasan , AM Zheng , IA Karimi
Ελαχιστοποίηση των απωλειών βρασμού στη μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίουInd Eng Chem Res , 48 (2009) , σελ. 9571 - 9580

[141]
Gerdsmeyer KD, Isalski W. Ενσωματωμένη ρευστοποίηση για πλοία LNG. Tractebel Gas Engineering; 2005.

[142]
SH Jeon , YU Choi , MS Kim
Ανασκόπηση σχετικά με το σύστημα εκ νέου υγροποίησης Boil-Off Gas (BOG) του πλοίου μεταφοράςυγροποιημένου CO2 για δέσμευση και δέσμευση άνθρακα (CCS)
Int J Air-Conditioning Refrig , 24 (2016) , σελ. 1 - 10

[143]
B. Chu , D. Chang , H. Chung
Βέλτιστο κλάσμα ρευστοποίησης για σύστημα αναρρόφησης αερίου βρασμού ημι-συμπιεσμένων υγρών φορέωνCO_2 με βάση οικονομική αξιολόγηση
Int J Greenh Gas Control , 10 (2012) , σελ. 46 - 55

[144]
Βαρτσίλα. Διακίνηση αερίου βρασμού σε πλοία με καύσιμο LNG. 2021. Διαθέσιμο στη

διεύθυνση: https://www.wartsila.com/search-results?indexCatalogue=global&searchQuery=Boil%2DOff+Gas+handling+onboard+LNG+fueled+ships&wordsMode=0 (πρόσβαση 1 Φεβρουαρίου 2021).

[145]
Hamworthy Ltd. Ψύξη και Reliquefaction LPG; Μπροσούρα Hamworthy. Asker, Νορβηγία; 2007.

[146]
Gómez JR, Gómez MR, Garcia RF, Catoira a DM. Επί του σκάφους τεχνολογία υγροποίησης LNG: μια συγκριτική μελέτη. Polish Marit Res 2014; 21:77–88.

[147]
A. Awoyomi , K. Patchigolla , EJ Anthony
Μείωση εκπομπών CO_2 / SO_2 στη ναυτιλιακή υποδομή CO_2
Int J Greenh Gas Control , 88 (2019) , σελ. 57 - 70

[148]
A. Awoyomi , K. Patchigolla , EJ Anthony
Διαδικασία και οικονομική αξιολόγηση ενός ενσωματωμένου συστήματος δέσμευσης για μεταφορείς CO_2 με καύσιμο LNG
Ind Eng Chem Res , 59 (2020) , σελ. 6951 - 6960

[149]
JP Ciferno , P. DiPietro , T. Tarka
Μια μελέτη οικονομικού εύρους για τη δέσμευση CO_2 με χρήση υδατικής αμμωνίας
National Energy Technology Lab US Dep Energy , Pittsburgh, PA (2005)

[150]
H. Li , JP Jakobsen , J. Stang
Σχηματισμός υδρίτη κατά τη μεταφορά CO_2 : Πρόβλεψη της περιεκτικότητας σε νερό στη ρευστή φάση σε ισορροπία με το ένυδρο CO_2
Int J Greenh Gas Control , 5 (2011) , σελ. 549 - 554

[151]
EI, Ανάλυση κινδύνου για υπεράκτιες πλατφόρμες δέσμευσης άνθρακα και υπεράκτιους αγωγούς. Ενεργειακό Ινστιτούτο; 2013.

[152]
Martin Trusler JP. Εξίσωση κατάστασης για Στερεά Φάση I Διοξειδίου του Άνθρακα Ισχύει για Θερμοκρασίες έως 800 K και Πιέσεις έως 12 GPa. J Phys Chem Ref Data 2011;40.

[153]
P. Harper , J. Wilday , M. Bilio
Εκτίμηση του κύριου δυναμικού κινδύνου του διοξειδίου του άνθρακα
Υγεία και Ασφάλεια Executive (2015)

[154]
H. Noh , K. Kang , C. Huh , SG Kang , Y. Seo
Προσδιορισμός πιθανών επικίνδυνων συμβάντων του συστήματος εκφόρτωσης και των δεξαμενών αποθήκευσης CO_2 ενός ενδιάμεσου τερματικού αποθήκευσης για το έργο αποθήκευσης καθαρού άνθρακα της Κορέας 2025
Int J Saf Secur Eng , 8 (2018) , σελ. 258 - 265

[155]
DNV. Σχεδιασμός και Λειτουργία Αγωγών CO2. Det Net Norske; 2010.

[156]
A. Brown , C. Eickhoff , JEA Reinders , I. Raben , M. Spruijt , F. Neele

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ: Πλαίσιο για την αξιολόγηση κινδύνου υποδομής μεταφοράς και αποθήκευσης CO_2
Energy Procedia , 114 (2017) , σελ. 6501 - 6513

[157]
SH Han , D. Chang , J. Kim , W. Chang
Πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών ροής της απόρριψης σε φορέα CO_2
Process Saf Environ Prot , 92 (2014) , σελ. 60 - 69

[158]
Pursell M. Πειραματική διερεύνηση της απελευθέρωσης CO2 υγρού υψηλής πίεσης. IChemE 2012; Κίνδυνος XXI:164–71.

[159]
M. Li , Z. Liu , Y. Zhou , Y. Zhao , X. Li , D. Zhang
Μια μικρής κλίμακας πειραματική μελέτη σχετικά με την αρχική έκρηξη και την ετερογενή διαδικασία εξέλιξης πριν από το CO_2 BLEVE
J Hazard Mater , 342 (2018) , σελ. 634 - 642

[160]
S. Tosse , K. Vaagsaether , D. Bjerketvedt
Μια πειραματική διερεύνηση του γρήγορου βρασμού του CO_2
Shock Waves , 25 (2015) , σελ. 277 - 282
This article is free to access.

[161]
MM Van der Voort , RMM van Wees , JM Ham , MPN Spruijt , AC van den Berg , PCJ de Bruijn , *et al.*
Μια πειραματική μελέτη για την εξάρτηση από τη θερμοκρασία της εξάτμισης εκρηκτικών CO_2
J Loss Prev Process Ind , 26 (2013) , σελ. 830 - 838
Προβολή PDFΔείτε το άρθροΠροβολή στο ScopusΜελετητής Google
[162]
D. Bjerketvedt , K. Egeberg , W. Ke , A. Gaathaug , K. Vaagsaether , SH Nilsen
Έκρηξη διογκούμενου ατμού βρασμού υγρού σε πειράματα μικρής κλίμακας CO_2
Energy Procedia , 4 (2011) , σελ. 2285 - 2292

[163]
Lippmann M. Environmental Toxicants: Human Exposures and their Health Effects, 3rd Edition. Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή και Ιστορικό. Wiley & Sons; 2009.

[164]
Έρευνα Αγοράς Διαφάνειας. Αγορά καυσίμων καυσίμων - Ανάλυση κλάδου, Μέγεθος, Μερίδιο, Ανάπτυξη, Πρόβλεψη. 2020. http://www.transparencymarketresearch.com/bunker-fuel-market.html (πρόσβαση στις 13 Μαΐου 2020).

[165]
Olmer N, Comer B, Roy B, Mao X, Rutherford D. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την παγκόσμια ναυτιλία, 2013-2015. Το Διεθνές Συμβούλιο για τις Καθαρές Μεταφορές. 2017. https://www.theicct.org/ .
Μελετητής Google
[166]
IEA. Προοπτικές Ενεργειακής Τεχνολογίας. Παρίσι, Γαλλία; Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας; 2017.

[167]
H. Liu , ZH Meng , ZF Lv , XT Wang , FY Deng , Y. Liu , *et al.*
Εκπομπές και επιπτώσεις στην υγεία από την παγκόσμια ναυτιλία που ενσωματώνονται στο διμερές εμπόριο ΗΠΑ-Κίνας
Nat Sustain , 2 (2019) , σελ. 1027 - 1033

[168]

EA Bouman , E. Lindstad , AI Rialland , AH Strømman
Σύγχρονες τεχνολογίες, μέτρα και δυνατότητες για τη μείωση των εκπομπών GHG από τη ναυτιλία – Μια ανασκόπηση
Transp Res Part D Transp Environ , 52 (2017) , σελ. 408 - 421
[169]
ICCT. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία. Διεθνές Συμβούλιο για τις Καθαρές Μεταφορές, Ουάσιγκτον DC; 2011.

[170]
Buhaug Ø, Corbett J., Endresen Ø, Eyring V, Faber J, Hanayama S, et al. Δεύτερη μελέτη GHG του IMO. Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός; 2009.

[171]
E. Veronika , SAI Ivar , T. Berntsen , WJ Collins , JJ Corbett , E. Oyvind , *et al.*
Επιπτώσεις των μεταφορών στην ατμόσφαιρα και το κλίμα: Ναυτιλία
Atmos Environ , 44 (2010) , σελ. 4735 - 4771

[172]
ΠΟΥ
Επιβάρυνση ασθενειών από τις κοινές επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης των νοικοκυριών και του περιβάλλοντος για το 2012
Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας , Γενεύη (2014)

[173]
H. Liu , M. Fu , X. Jin , Y. Shang , D. Shindell , G. Faluvegi , *et al.*
Επιπτώσεις στην υγεία και το κλίμα των ποντοπόρων πλοίων στην Ανατολική Ασία
Nat Clim Chang , 6 (2016) , σελ. 1037 - 1041

[174]
JA Thornton , KS Virts , RH Holzworth , TP Mitchell
Βελτίωση κεραυνών σε μεγάλες θαλάσσιες λωρίδες θαλάσσιων μεταφορών
Geophys Res Lett , 44 (2017) , σελ. 9102 - 9111

[175]
IMO. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός; 2018. http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/GHG-Emissions.aspx (πρόσβαση στις 16 Ιουνίου 2019).

[176]
JJ Corbett , HW Koehler
Ενημερωμένες εκπομπές από τη ναυτιλία των ωκεανών
J Geophys Res , 108 (2003) , σελ. 4650

[177]
IMO. Οξείδια του θείου (SOx) και σωματίδια (PM) – Κανονισμός 14. Int Marit Organ; 2018. http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-Regulation-14.aspx (πρόσβαση στις 16 Ιουνίου 2020).

[178]
DNV GL. Αξιολόγηση Επιλεγμένων Εναλλακτικών Καυσίμων και Τεχνολογιών. Det Norske Veritas; 2018.

[179]
Brynolf S. Environmental Assessment of Present and Future Marine Fuels. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Ναυτιλίας και Ναυτιλιακής Τεχνολογίας. Chalmers University of Technology; 2014.

[180]
C. Han
Στρατηγικές για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη ναυτιλιακή βιομηχανία
Asian J Shipp Logist , 26 (2010) , σελ. 7 - 29

[181]
Rynbach A Van, Briers KE, Delgatto NJ. Ανάλυση εναλλακτικών καυσίμων για εμπορικά πλοία στην εποχή του ECA. Προετοιμάστηκε από Herbert Engineering Corp. 2018.

[182]
Gerd W. Εναλλακτικά καύσιμα στη ναυτιλία. Det Norske Veritas 2018:1–33.

[183]
IMO. Μέτρα Ενεργειακής
Απόδοσης; 2020. http://www.imo.org/en/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/technical-and-operational-measures.aspx (πρόσβαση στις 25 Σεπτεμβρίου 2020).

[184]
Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Πρόταση κανονισμού του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2015/757 προκειμένου να ληφθεί δεόντως υπόψη το παγκόσμιο σύστημα συλλογής δεδομένων για τα δεδομένα κατανάλωσης μαζούτ πλοίων. τόμ. 0017; 2019.

[185]
Jasper F, Haifeng W, Dagmar N, Bruce R, David SA. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από πλοία: Οριακό κόστος μείωσης και κόστους-αποτελεσματικότητα των μέτρων ενεργειακής απόδοσης. τόμ. MEPC 62η; 2011.

[186]
Latarche M. Εξήγηση των τύπων καυσίμων που χρησιμοποιούνται στα
πλοία. ShipInsight; 2017. https://shipinsight.com/articles/explaining-the-types-of-fuel-used-on-ships (πρόσβαση στις 5 Αυγούστου 2019).

[187]
S. Wang , T. Notteboom
Η υιοθέτηση του υγροποιημένου φυσικού αερίου ως καυσίμου πλοίων: μια συστηματική ανασκόπηση των προοπτικών και των προκλήσεων
Transp Rev , 34 (2014) , σελ. 749 - 774

[188]
S. Bengtsson
Αξιολόγηση του κύκλου ζωής των σημερινών και μελλοντικών ναυτιλιακών καυσίμων
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ. Τμήμα Ναυτιλίας και Ναυτιλιακής Τεχνολογίας , Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Chalmers , Γκέτεμπεργκ, Σουηδία (2011)

[189]
S. Jafarzadeh , N. Paltrinieri , IB Utne , H. Ellingsen
Αλιευτικά σκάφη με καύσιμα LNG: Μια προσέγγιση μηχανικής συστημάτων
Transp Res Part D Transp Environ , 50 (2017) , σελ. 202 - 222

[190]
Oliver S, Benjamin R, Hengstler J, Whitehouse S, Lena Z. Ένταση Φυσικού Αερίου Θερμοκηπίου. 2017. Natural & Bio Ga Vehicle Association (NGVA), Ευρώπη. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.biognv.bzh/wp-content/uploads/1705-NGVA_Greenhouse-Gas-Intensity-of-Natural-Gas.pdf .

[191]
Lowell D, Bradley MJ. Εκτίμηση του αντίκτυπου του κύκλου καυσίμου του υγροποιημένου φυσικού αερίου όπως χρησιμοποιείται στη διεθνή ναυτιλία. Διεθνές Συμβούλιο Καθαρές Μεταφορές. 2013.

[192]
Nilsen OV. Ρυθμιστική ενημέρωση LNG «Το καλύτερο καύσιμο του μέλλοντος». Det Norske Veritas; 2018.

[193]
F. Burel , R. Taccani , N. Zuliani
Βελτίωση της βιωσιμότητας των θαλάσσιων μεταφορών μέσω της χρήσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) για πρόωση
Ενέργεια , 57 (2013) , σελ. 412 - 420

[194]
IS Seddiek , MM Elgohary
Φιλική προς το περιβάλλον επιλογή στρατηγικών μείωσης των εκπομπών των πλοίων με έμφαση στις εκπομπές SOx και NOx
Int J Nav Archit Ocean Eng , 6 (2014)

[195]
S. Bengtsson , E. Fridell , K. Andersson
Περιβαλλοντική εκτίμηση δύο οδών προς τη χρήση βιοκαυσίμων στη ναυτιλία
Ενεργειακή Πολιτική , 44 (2012) , σελ. 451 - 463

[196]
VS Sikarwar , M. Zhao , PS Fennell , N. Shah , EJ Anthony
Πρόοδος στην παραγωγή βιοκαυσίμων από αεριοποίηση
Prog Energy Combust Sci , 61 (2017) , σελ. 189 - 248

[197]
Florentinus A, Hamelinck C, Bos A van den, Winkel R, Maarten C. Δυνατότητα βιοκαυσίμων για τη ναυτιλία. ECOFYS τόμ. 31; 2012.

[198]
C.-WC Hsieh , C. Felby
Βιοκαύσιμα για τον τομέα της θαλάσσιας ναυτιλίας – επισκόπηση και ανάλυση των υποδομών του κλάδου, των τεχνολογιών καυσίμων και των κανονισμών
IEA Bioenergy (2017)

[199]
P. Gilbert , A. Bows-Larkin , S. Mander , C. Walsh
Τεχνολογίες για την ανοιχτή θάλασσα: Αντιμετώπιση της κλιματικής πρόκλησης
Carbon Manag , 5 (2014) , σελ. 447 - 461
This article is free to access.

[200]
Winkel R, Bos A van den, Weddige U. Τεχνολογίες ενεργειακής απόδοσης για πλοία. Ευρωπαϊκή Επιτροπή; 2015. Αριθμός έκθεσης: CLIMA.B3/ETU/2014/0023r.

[201]
Lindstad H. Στρατηγικές και μέτρα για τη μείωση των εκπομπών CO2 στη θάλασσα. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Ναυτιλιακών Μηχανικών. Νορβηγικό Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας, Trondheium, Νορβηγία; 2013.

[202]
Π. Καρίου
Είναι το αργό ατμό ένα βιώσιμο μέσο για τη μείωση των εκπομπών CO $_2$ από τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων;
Transp Res Part D Transp Environ , 16 (2011) , σελ . 260-264

[203]
S. Mander
Αργός ατμός και μια νέα αυγή για την αιολική πρόωση: Μια ανάλυση πολλαπλών επιπέδων δύο μεταβάσεων μεταφοράς χαμηλών εκπομπών άνθρακα

Mar Policy , 75 (2017) , σελ. 210 - 216

[204]
Π. Καρίου , Α. Χαΐτου
Η αποτελεσματικότητα ενός ευρωπαϊκού ορίου ταχύτητας έναντι μιας διεθνούς εισφοράς καυσίμων για τη μείωση των εκπομπών CO_2 από τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων
Transp Res Part D Transp Environ , 17 (2012) , σελ. 116 - 123

[205]
CD Μπίνα
Πράσινη ναυτιλία - μια πληθώρα επιχειρηματικών ευκαιριών για οικοεπιχειρηματίες
Int J Civ Eng Technol , 8 (2017) , σελ. 189 - 198

[206]
Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Ναυτιλιακού Εξοπλισμού. Βιβλίο Green Ship Technology: Existing Technology by thr marine εξοπλισμός βιομηχανία: συμβολή στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ναυτιλίας. 2η έκδ. Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Ναυτιλιακού Εξοπλισμού· 2010.

[207]
MR McCord , Y.-K. Lee , HK Lo
Δρομολόγηση πλοίων μέσω ωκεάνιων ρευμάτων που προέρχονται από την υψομετρία
J Transp Sci , 33 (1999) , σελ. 49 - 67

[208]
M. Traut , C. Walsh , P. Stansby , P. Gilbert , A. Filippone , A. Bows , *et al.*
Συνεισφορά προωστικής ισχύος ενός χαρταετού και ενός ρότορα Flettner σε επιλεγμένες διαδρομές
Appl Energy , 113 (2014) , σελ. 362 - 372

[209]
Η Marinova B. Nissan παρουσιάζει ένα φιλικό προς το περιβάλλον αυτοκίνητο μεταφοράς. Ανανεώσιμες πηγές τώρα. 2012. https://renewablesnow.com/news/nissan-introduces-eco-friendly-car-carrier-177169/ (πρόσβαση στις 22 Μαρτίου 2019).

[210]
Wärtsilä. Boosting Energy efficiency 2009. Energy Efficiency Catalogue, Ship Power Research and Development.

[211]
Biello D. Το πρώτο πλοίο με κυψέλες καυσίμου στον κόσμο αποβάθρα στην Κοπεγχάγη – Scientific American. Sci Am; 2009. https://www.scientificamerican.com/article/worlds-first-fuel-cell-ship/ (πρόσβαση στις 22 Μαρτίου 2019).

[212]
Y. Wang , L. Zhao , A. Otto , M. Robinius , D. Stolten
Μια ανασκόπηση των τεχνολογιών δέσμευσης CO 2 μετά την καύση από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακαEnergy Procedia , 114 (2017) , σελ. 650 - 665

[213]
P. Zhou , H. Wang
Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα - Στερεοποίηση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται στα πλοία
Ocean Eng , 91 (2014) , σελ. 172 - 180

[214]
DNV και PSE. Ειδήσεις - Δελτία τύπου - Έκθεση DNV-PSE CCS; 2013. https://www.psenterprise.com/news/news-press-releases-dnv-pse-ccs-report (πρόσβαση στις 16 Οκτωβρίου 2020).

[215]
X. Luo , M. Wang

Μελέτη δέσμευσης άνθρακα με βάση διαλύτες για φορτηγά πλοία μέσω μοντελοποίησης και προσομοίωσης διεργασιών
Appl Energy , 195 (2017) , σελ. 402 - 413

[216]
Van den Akker J. Carbon Capture Onboard FNG Fueled Vessels - Μια μελέτη σκοπιμότητας. Τμήμα Ναυτιλιακών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας του Ντελφτ; 2017.

[217]
M. Feenstra , J. Monteiro , JT van den Akker , MRM Abu-Zahra , E. Gilling , E. Goetheer
Σύλληψη άνθρακα με βάση τα πλοία σε πλοία με ντίζελ ή LNG
Int J Greenh Gas Control , 85 (2019) , σελ. 1 - 10

[218]
Monteiro J. CO2 ASTS – δέσμευση, αποθήκευση και μεταφορά άνθρακα στη ναυτιλία, μελέτη τεχνικής και οικονομικής σκοπιμότητας: δημόσια συνοπτική έκθεση. 2020.

[219]
IMO. IMO. Ειδικές Περιοχές υπό τη MARPOL. Int Marit Organ
Λονδίνο; 2020. http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/SpecialAreasUnderMARPOL/Pages/Default.%0Aaspx (πρόσβαση στις 30 Μαρτίου 2020).

[220]
EPCEU. Οδηγία 2012/33/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 21ης Νοεμβρίου 2012, για την τροποποίηση της οδηγίας 1999/32/ΕΚ του Συμβουλίου σχετικά με την περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων πλοίων. Βρυξέλλες; 2012.

[221]
R. Bergqvist , M. Turesson , A. Weddmark
Περιοχές ελέγχου εκπομπών θείου και στρατηγικές μεταφορών – η περίπτωση της Σουηδίας και της δασικής βιομηχανίας
Eur Transp Res Rev , 7 (2015) , σελ. 1 - 15
[222]
HE Lindstad , CF Rehn , GS Eskeland
Μείωση του θείου παγκοσμίως στη θαλάσσια ναυτιλία
Transp Res Part D , 57 (2017) , σελ. 303 - 313

[223]
Faber J, Maarten SA, Dagmar H, Nelissen D. Assessment of Fuel Oil Availability. CE Delft; 2016.

[224]
Βαρτσίλα. Εγκαταστάθηκε πλυντήριο καυσαερίων στο MT "Suula" Δημόσια τελική έκθεση. 2010.

[225]
IMO. Ψήφισμα MEPC 259(68), 2015 Κατευθυντήριες γραμμές για συστήματα καθαρισμού καυσαερίων. Εγκρίθηκε στις 15 Μαΐου 2015. Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός. 2015.

[226]
Boer E Den, Hoen M. Scrubbers – Μια οικονομική και οικολογική αξιολόγηση. CE Delft; 2015. Κωδικός δημοσίευσης: 15.4F41.20.

[227]
Kjølholt J, Aakre S, Jürgensen C, Lauridsen J. Εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων των εκκενώσεων νερού πλύσης στο θαλάσσιο περιβάλλον. 2012. Υπουργείο Περιβάλλοντος της Δανίας, Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος. 2012. Αριθμ. Περιβαλλοντικού Έργου 1431.

[228]
H. Lindstad , I. Sandaas , AH Strømman

Εκτίμηση του κόστους ως συνάρτηση των επιλογών μείωσης σε περιοχές ελέγχου των θαλάσσιων εκπομπών Transp Res Part D Transp Environ , 38 (2015) , σελ. 41 - 48

[229]
P. Campling , L. Janssen , K. Vanherle , J. Cofala , C. Heyes , R. Sander
Ειδική αξιολόγηση των εκπομπών από τη ναυτιλία, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης για τη δημιουργία πιθανών νέων περιοχών ελέγχου εκπομπών στις ευρωπαϊκές θάλασσες
Όραμα για την τεχνολογία, Βέλγιο, Γερμανία (2013)

[230]
Ship & Bunker News Team. Η Hyundai επενδύει βαριά σε Scrubbers. Αποθήκη πλοίων; 2019. https://shipandbunker.com/news/apac/904559-hyundai-invests-heavily-in-scrubbers (πρόσβαση στις 3 Σεπτεμβρίου 2020).

[231]
Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Ασφάλεια στη Θάλασσα. Η απαίτηση 0,1% σε θείο σε καύσιμα από την 1η Ιανουαρίου 2015 στις SECAs – Αξιολόγηση των διαθέσιμων μελετών επιπτώσεων εναλλακτικά μέσα συμμόρφωσης. 2010.

[232]
Βαρτσίλα. Ανεβάζοντας στο επόμενο επίπεδο τους κινητήρες πλοίων διπλού καυσίμου. Wartsila, Energy Intelligence Efficiency; 2014. https://www.wartsila.com/twentyfour7/energy/taking-dual-fuel-marine-engines-to-the-next-level (πρόσβαση στις 25 Μαρτίου 2019).

[233]
Συγγραφείς Ν προσωπικό. Η Ιαπωνία προσδοκά να πρωτοπορήσει στη θαλάσσια μεταφορά άνθρακα. Nikkei Asian Rev; 2018.

[234]
YHV Lun , KW Pang , PM Panayides
Οργανωτική ανάπτυξη και εταιρική απόδοση στη διεθνή ναυτιλιακή βιομηχανία εμπορευματοκιβωτίων
Int J Shipp Transp Logist , 2 (2010) , σελ. 206 - 223

[235]
L. Shimin , W. Yilk
Στρατηγικές μετριασμού των αερίων θερμοκηπίου για τη βιομηχανία εμπορευματοκιβωτίων
Am J Eng Appl Sci , 5 (2012) , σελ. 310 - 317

[236]
MS Eide , Ø. Endresen , R. Skjong , T. Longva , S. Alvik
Αξιολόγηση κόστους-αποτελεσματικότητας των μέτρων μείωσης του CO_2 στη ναυτιλία
Marit Policy Manag , 36 (2009) , σελ . 367-384

Z. Wan , A. el Makhloufi , Y. Chen , J. Tang
Απαλλαγή από τον άνθρακα της διεθνούς ναυτιλιακής βιομηχανίας: Λύσεις και συστάσεις πολιτικής
Mar Pollut Bull , 126 (2018) , σελ. 428 - 435

[238]
MS Eide , T. Longva , P. Hoffmann , Ø. Endresen , SB Dalsøren
Μελλοντικά σενάρια κόστους για τη μείωση των εκπομπών CO_2 των πλοίων Marit Policy Manag , 38 (2011) , σελ. 11 - 37

[239]
P. Gilbert

Από τον αναγωγισμό στη σκέψη των συστημάτων: Πώς ο ναυτιλιακός τομέας μπορεί να αντιμετωπίσει τη ρύθμιση του θείου και να αντιμετωπίσει την κλιματική αλλαγή
Mar Policy , 43 (2014) , σελ. 376 - 378

[240]
Will C. Χιλιάδες πλοία έχουν «απατεώνες» που εκτρέπουν δηλητηριώδη απόβλητα στη θάλασσα | Ο ανεξάρτητος. Ανεξάρτητη Καθημερινή
Έκδοση; 2019. https://edition.independent.co.uk/editions/uk.co.independent.issue.300919/data/9124751/index.html (πρόσβαση στις 2 Οκτωβρίου 2019).

[241]
IGE. Άμστερνταμ | Ολοκληρωμένες Λύσεις Πράσινης Ενέργειας. Ολοκληρωμένη Λύση Πράσινης Ενέργειας. 2019. https://www.igesolutions.org/amsterdam/ (πρόσβαση στις 29 Μαρτίου 2019).

[242]
Ηνωμένα Έθνη. Τροφοδοσία πλοίων με πλαστικό στο Άμστερνταμ. Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το περιβάλλον; 2018.

[243]
K. Ouchi , K. Uzawa , A. Kanai , M. Katori
"Wind Challenger" το υβριδικό ιστιοπλοϊκό σκάφος επόμενης γενιάς
Third Int Symp Mar Propulsors (2013) , σελ. 562 - 567

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ:

Θεοτοκάς, Ι. (2019). *Οργάνωση και Διοίκηση Ναυτιλιακών Επιχειρήσεων (γ΄έκδοση).* *Εκδόσεις Αλεξάνδρεια.*

ΥΝΑΝΠ. (2021). *Ελληνική Στρατηγική για την εφαρμογή του κώδικα εφαρμογής των μέσων του ΙΜΟ (CODE III).*

ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ:

ΕΔΕΥΕΠ - www.hydrocarbons.gr

ΥΠ.ΕΝ - ypen.gov.gr/

CCS Institute: www.globalccsinstitute.com

Northern Lights (Νορβηγίας): https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/northern-lights

Teesside (Ηνωμένο Βασίλειο): https:// www.netzeroteesside.co.uk/.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.

ΕΡΓΑ ΣΕ ΕΞΕΛΙΞΗ (IOGP)

LOCATION	PROJECT NAME	PROJECT TYPE	DESCRIPTION	CO_2 CAPTURED/YEAR	STARTING DATE (OPERATION)	STATUS OF THE PROJECT	PARTICIPANTS	IOGP MEMBERS INVOLVED
Belgium	Leilac	Industrial Capture	Cement plant carbon capture (pilot project)	N/A	2018-2020	2-year CO_2 capture test	HeidelbergCement, Calix	
France	Lacq	Capture Storage (Oxy fuel combustion)	CCS Oxy fuel combustion CO_2 captured and storage in depleted natural gas field at Rousse (Pyrenees)	Approx. total 50,000 tonnes	2009	Capture and storage phase ended on 15/03/2013	Total	Total
The Netherlands	Port of Rotterdam CO_2 Transport Hub & Offshore Storage	Industrial Capture	CCS-equipped industrial cluster, CO_2 transportation and storage in the North Sea	Approx. 5 Mtpa	2020	Feasibility study	Gasunie, the Port Authority and EBN	BP, Shell
	Magnum	Natural Gas-to-H2 (pre-combustion)	CCS-equipped production of hydrogen for power generation, CO_2 transportation and storage in the North Sea	Approx. 4 Mtpa	N/A	Feasibility study	Equinor, Vattenfall, Gasunie, MHPS	Equinor
Norway	Sleipner CO_2 Storage	Industrial Capture	CCS-equipped natural gas production, CO_2 directly injected into North Sea reservoirs	Approx. 1 Mtpa, and over 17 million tonnes has been injected since inception to date.	1996	Operational	Equinor (operator) ExxonMobil Total	Equinor (operator) ExxonMobil, Total
	Snøhvit CO_2 Storage	Industrial Capture	CCS-equipped LNG facility, CO_2 transportation and storage in the Barents Sea	0.70 Mtpa	2008	Operational	Equinor (operator) Petoro, Total, Engie, Norsk Hydro, Hess Norge	Equinor, Total, Hess
	Northern Lights	Industrial Capture	CCS-equipped industrial capture, CO_2 transportation and storage in the North Sea	0.8 Mtpa from possible 2 industrial plants: cement and waste to energy	2023-2024	Feasibility study	Shell, Equinor, Total	Shell, Equinor, Total
Republic of Ireland	ERVIA	Power & Capture (post-combustion)	CCS-equipped CCGTs and refinery, CO_2 transportation and storage in the Celtic Sea	2 Mtpa	2028	Feasibility study	ERVIA	
Sweden	Preem CCS	Industrial Capture	CCS-equipped refinery, CO_2 transportation and storage in the North Sea (pilot study)	N/A	N/A	Pre-study	Sintef, Preem AB, Gassnova, Chalmers University of Technology	
UK	Acorn	Industrial Capture	CCS-equipped natural gas processing plant, CO_2 transportation and storage in the North Sea	The Reference Case assumes a flat rate of 200,000T/yr can be captured from one of the gas terminals at St Fergus	2022	Feasibility Study	Pale Blue Dot Energy (Project leader) along with University of Aberdeen, University of Edinburgh, University of Liverpool, Heriot Watt University, Scottish Carbon Capture & Storage (SCCS), Radboud University and The Bellona Foundation	
	Caledonia Clean Energy	Power & Capture (post-combustion)	CCS-equipped natural gas power plant, CO_2 transportation and storage in the North Sea	3 Mtpa	2023	Feasibility Study	Summit Power	
	H21 North of England	Natural Gas-to-H2 (pre-combustion)	Natural gas-to-hydrogen conversion with CCS, CO_2 tranportation and storage in the North Sea and salt caverns	Approx. 3 Mtpa	2020s	Feasibility study	Northern Gas Networks, Cadent and Equinor	Equinor
	Liverpool-Manchester Hydrogen Cluster	Natural Gas-to-H2 (pre-combustion)	Natural gas-to-hydrogen conversion with CCS, CO_2 transportation and storage in the North Sea	1.5 Mtpa (10% H2) - 9.5 Mtpa (100% H2)	2020s	Feasibility study	CADENT	
	Teesside Collective	Industrial Capture	CCS-equipped industrial cluster, CO_2 transportation and storage in the North Sea	0.8 Mtpa (phase 1) - 10 Mtpa (fully operational)	N/A	Feasibility study	Tees Valley Combined Authority, Sembcorp Utilities UK, BOC, CF Fertilisers, Lotte, NEPIC, SABIC, The Department of Business, Energy and Industrial Strategy	
	OGCI Clean Gas Project	Power & Capture (post-combustion)	CCS-equipped natural gas power plant, CO_2 transportation and storage in the North Sea	5 Mtpa	2026	Technical evaluation and business model options	OGCI	ENI, Repsol, Shell, Equinor, Total

International Association of Oil & Gas Producers
Registered Office: City Tower, 40 Basinghall Street, 14th Floor, London, EC2V 5DE, United Kingdom
Brussels Office: Bd du Souverain,165, 4th Floor, B-1160 Brussels, Belgium
Houston Office: 19219 Katy Freeway, Suite 175, Houston, TX 77094, USA
T +44 (0)20 3763 9700
T +32 (0)2 566 9150
T +1 (713) 261 0411
reception@iogp.org
www.iogp.org