



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

«Μελέτη Σκοπιμότητας Δρομολόγησης Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου CO₂»

Διπλωματική Εργασία

Παπαδάκης Γ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων Καθηγητής : Δημήτριος Β. Λυρίδης

Σεπτέμβριος 2023

ΑΘΗΝΑ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις εκ βάθους καρδιάς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας κ. Λυρίδη Δημήτριο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου το παρών θέμα, καθώς και για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Πέρα από τα παραπάνω, τον ευχαριστώ για όλες τις γνώσεις που μου προσέφερε απλόχερα μέσω των μαθημάτων που διδάσκει στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τον πατέρα μου Γιώργο, την μητέρα μου Αγγελική, την αδελφή μου Ραφαέλλα και την σύντροφο μου Μαρία Εμμανουέλα, που αποτελούν πρότυπα για εμένα και πέρα από την αδιάληπτη στήριξη που μου παρέχουν σε κάθε βήμα της ζωής μου, με ωθούν συνεχώς να είμαι ένας εποικοδομητικός και καλύτερος άνθρωπος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους, Νίκο, Βαγγέλη, Τάσο και Ηλία, για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των φοιτητικών μας χρόνων και που παραμένουν μέχρι σήμερα δίπλα μου.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	6
Κατάλογος Εικόνων	7
Κατάλογος Πινάκων.....	8
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	11
Περίληψη	14
Abstract	15
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	16
Κεφάλαιο 2 Επίδραση θαλασσιών μεταφορών στην κλιματική αλλαγή και ο ρόλος της ναυτιλίας στο εγχείρημα της δέσμευσης του CO ₂	18
2.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου	18
2.1.1 Φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου	19
2.1.2 Αέρια του θερμοκηπίου.....	19
2.1.2.1 Υδρατμοί (H ₂ O)	20
2.1.2.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂).....	20
2.1.2.3 Μεθάνιο (CH ₄)	22
2.1.2.4 Υποξείδιο του αζώτου (N ₂ O)	23
2.1.2.5 Φθοροχλωράνθρακες (CFCs,HFCs) , Εξαφθοριούχο θείο (SF ₆) & όζον (O ₃).....	24
2.2 Πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.....	24
2.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση από τις θαλάσσιες μεταφορές και οι επιπτώσεις της	26
2.4 Δράσεις της ναυτιλιακής κοινότητας ως προς την μείωση των εκπομπών αερίων.....	29
2.4.1 Παράρτημα VI της MARPOL.....	29
2.4.2 Περιοχές ελέγχου εκπομπών αερίων (ECAs).....	30
2.4.3 Δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας (EEDI)	32
2.4.4 Σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (Ship energy efficiency management plan)	34
2.5 Ο μελλοντικός ρόλος και η συμβολή της ναυτιλίας στο εγχείρημα της δέσμευσης CO ₂	35
Κεφάλαιο 3 Μέθοδοι δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης του CO ₂	36
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Συμφωνία του Παρισιού.....	37
3.3 Ευρωπαϊκή οδηγία 2009/31/EK	38
3.4 Μέθοδοι δέσμευσης	39

3.4.1 Δέσμευση του CO ₂ πριν την καύση (pre-combustion capture).....	40
3.4.2 Δέσμευση του CO ₂ μετά την καύση (post-combustion capture).....	41
3.4.3 Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (Oxyfuel combustion).....	43
3.5 Μέθοδοι μεταφοράς.....	44
3.5.1 Μεταφορά CO ₂ μέσω αγωγών.....	46
3.5.2 Μεταφορά CO ₂ μέσω πλοίου.....	48
3.6 Μέθοδοι αποθήκευσης.....	51
3.6.1 Αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery).....	52
3.6.2 Αποθήκευση σε κενούς ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου.....	54
3.6.3 Αποθήκευση σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους.....	55
3.6.4 Αποθήκευση σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα.....	56
3.6.5 Αποθήκευση στους ωκεανούς.....	57
3.7 Επισκόπηση των εγκαταστάσεων CCS παγκοσμίως.....	58
Κεφάλαιο 4 Δέσμευση και αξιοποίηση του CO ₂ – Τεχνολογία CCU.....	60
4.1 Εισαγωγή.....	60
4.2 Επαναχρησιμοποίηση του δεσμευμένου CO ₂	62
4.2.1 Παραγωγή ουρίας.....	62
4.2.2 Παραγωγή πολυμερών.....	62
4.2.3 Χρήση του CO ₂ στην καλλιέργεια φυκιών.....	63
4.2.4 Χρήση του CO ₂ σε ενανθράκωση ορυκτών και σε δομικά υλικά.....	63
4.2.5 Χρήση του CO ₂ στην παραγωγή υγρών καυσίμων.....	64
Κεφάλαιο 5 Τεχνικά χαρακτηριστικά των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου CO ₂ και υπάρχουσα εμπειρία από τα LNG/LPG.....	64
5.1 Πλοία μεταφοράς αερίων (Gas Carriers).....	64
5.1.1 Πλοία μεταφοράς αερίων υπό πλήρη πίεση (Fully pressurized gas carriers).....	65
5.1.2 Πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση ημιπίεσης/ημιψύξης (semi-pressurized/semi- refrigerated gas carriers).....	66
5.1.3 Πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση πλήρους ψύξης (fully refrigerated gas carriers)	67
5.2 Πλοία μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG Carriers).....	68
5.3 Πλοία μεταφοράς αερίων προϊόντων του πετρελαίου (LPG Carriers).....	70
5.4 Κανονισμοί που διέπουν την λειτουργία των πλοίων μεταφοράς αερίων.....	71
5.5 Συστήματα δεξαμενών.....	72

5.5.1 Δεξαμενές τύπου «Α»	73
5.5.2 Δεξαμενές τύπου «Β».....	74
5.5.3 Δεξαμενές τύπου «C».....	76
5.5.4 Δεξαμενές μεμβρανικού τύπου	77
5.5.4.1 Σύστημα GTT No.96.....	78
5.5.4.2 Σύστημα GTT-Mark III.....	79
5.5.4.3 Σύστημα GTT-CS1	80
5.6 Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO ₂ (LCO ₂ Carriers).....	81
5.6.1 Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO ₂ σε υπηρεσία	82
5.6.2 Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO ₂ υπό κατασκευή	85
Κεφάλαιο 6 Μελέτη σκοπιμότητας δρομολόγησης πλοίου υγροποιημένου CO ₂	88
6.1 Εισαγωγή.....	88
6.2 Κριτήρια αξιολόγησης επενδύσεων	88
6.2.1 Ορισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV).....	88
6.2.2 Ορισμός Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR).....	89
6.2.3 Περίοδος αποπληρωμής (Payback Period).....	89
6.2.4 Απαιτούμενος Ναύλος (Required Freight Rate-RFR).....	90
6.3 Επισκόπηση της μελέτης.....	90
6.4 Σενάριο ταξιδιού & παραδοχές	94
6.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για πλοίο χαμηλής πίεσης (7bar,-50°C).....	97
6.5.1 Πρώτο σενάριο: 0% Δάνειο, 100% Ίδια κεφάλαια	97
6.5.2 Δεύτερο Σενάριο: 30% Δάνειο, 70% Ίδια κεφάλαια	101
6.5.3 Τρίτο Σενάριο: 50% Δάνειο, 50% Ίδια κεφάλαια	104
6.5.4 Τέταρτο Σενάριο: 70% Δάνειο, 30% Ίδια κεφάλαια.....	107
6.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 2 πλοία μέσης πίεσης (15bar,-30°C).....	111
6.6.1 Πρώτο Σενάριο: 0% Δάνειο, 100% Ίδια κεφάλαια	111
6.6.2 Δεύτερο Σενάριο: 30% Δάνειο, 70% Ίδια κεφάλαια	114
6.6.3 Τρίτο Σενάριο: 50% Δάνειο, 50% Ίδια κεφάλαια	117
6.6.4 Τέταρτο Σενάριο: 70% Δάνειο, 30% Ίδια κεφάλαια.....	120
6.7 Ανάλυση ευαισθησίας	124
6.7.1 Πρώτο Σενάριο: 0% Δάνειο, 100% Ίδια κεφάλαια (7bar, -50°C).....	124
6.7.2 Δεύτερο Σενάριο: 30% Δάνειο, 70% Ίδια κεφάλαια (7bar, -50°C).....	127

6.7.3 Τρίτο Σενάριο: 50% Δάνειο, 50% Ίδια κεφάλαια (7bar, -50°C).....	130
6.7.4 Τέταρτο Σενάριο: 70% Δάνειο, 30% Ίδια κεφάλαια (7bar, -50°C).....	133
6.7.5 Πρώτο Σενάριο: 0% Δάνειο, 100% Ίδια κεφάλαια (15bar, -30°C).....	137
6.7.6 Δεύτερο Σενάριο: 30% Δάνειο, 70% Ίδια κεφάλαια (15bar, -30°C).....	140
6.7.7 Τρίτο Σενάριο: 50% Δάνειο, 50% Ίδια κεφάλαια (15bar, -30°C).....	143
6.7.8 Τέταρτο Σενάριο: 70% Δάνειο, 30% Ίδια κεφάλαια (15bar, -30°C).....	146
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	149
7.1 Συμπεράσματα	149
7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	150
Βιβλιογραφία.....	152
Παράρτημα I	161
Παράρτημα II.....	164
Παράρτημα III.....	165
Παράρτημα IV.....	167

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Εκπομπές CO ₂ από ανθρωπογενείς παράγοντες το έτος 2019 (Yoro,Daramola,2020)	25
Σχήμα 2: Είσοδος και έξοδος ενός ναυτικού κινητήρα Diesel (Δεδομένα για τις ποσότητες αέρα, καυσίμου, λιπαντικού, τη σύνθεση του καυσίμου και του λαδιού και τη σύσταση των καυσαερίων από MAN&Diesel,2014). Πηγή: (Κοτρίκλα,2015)	27
Σχήμα 3: Επισκόπηση των πιθανών χρήσεων του CO ₂ στο πλαίσιο της τεχνολογίας CCUS. Πηγή: (Valluri, Claremboux, & Kawatra, 2022).....	165

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Παγκόσμια κατανομή και διακύμανση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Το κόκκινο χρώμα παρουσιάζει την αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ (NASA,2023)	21
Εικόνα 2: Γεωγραφική κατανομή των συνολικών εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5 απο την ναυτιλία το έτος 2015. Οι δορυφορικές εικόνες παρέχονται απο την NASA. Πηγή: (Johansson,Jalkanen & Kukkonen,2017)	28
Εικόνα 3: Γεωγραφική κατανομή των συνολικών εκπομπών οξειδίων του θείου (SO _x), που εκλύθηκαν απο την ναυτιλία το έτος 2015. Πηγή:(Johansson, Jalkanen & Kukkonen,2017)	29
Εικόνα 4: Περιοχές ελέγχου εκπομπών αερίων (Fagerholt, Gausel, Rakke & Psaraftis,2014) .	32
Εικόνα 5: Σενάρια για τις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η μέση αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το 2100 θα εξακολουθήσει να υπερβαίνει το μέγιστο στόχο των 2°C που ορίζει η συμφωνία του Παρισιού, ακόμα και αν οι χώρες επιτύχουν τις τρέχουσες δεσμεύσεις. Πηγή: OurWorldinData.org (Ritchie, Roser,2022)	38
Εικόνα 6: Δέσμευση του CO ₂ πριν την καύση (pre-combustion capture). Πηγή: (Global CCS Institute,2022)	41
Εικόνα 7: Δέσμευση του CO ₂ μετά την καύση (post-combustion capture). (Πηγή: https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/)	43
Εικόνα 8: Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (Oxy-fuel combustion) (Πηγή: https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/)	44
Εικόνα 9: Επισκόπηση των τρόπων μεταφοράς του CO ₂ (Πηγή: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/12/Global-CCS-Institute-Fact-Sheet_Transporting-CO2-1.pdf)	46
Εικόνα 10: Μεταφορά του CO ₂ με πλοίο στην τεχνολογία CCS (Equinor ASA, Equinor.com)	51
Εικόνα 11: Αποθήκευση CO ₂ σε ενεργούς ταμειυτήρες πετρελαίου (Πηγή: https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/)	53
Εικόνα 12: Αποθήκευση του CO ₂ σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες-Spleipner Project (Smith, Billingham, Lee, & Milanovic, 2011)	56
Εικόνα 13: Αποθήκευση του CO ₂ σε κοιτάσματα άνθρακα (Πηγή: https://ieaghg.org/docs/general_publications/8.pdf)	57
Εικόνα 14: Επισκόπηση των μεθόδων έγχυσης & αποθήκευσης του CO ₂ στους ωκεανούς (IPCC,2005)	58
Εικόνα 15: Τεχνολογία CCUS (Πηγή: https://www.iogp.org/blog/news/developing-low-carbon-technologies/)	61
Εικόνα 16: Πλοίο μεταφοράς αερίων σε κατάσταση πλήρους πίεσης (fully pressurized gas carrier) (Bosneagu, Vasilache&Raiciu,2017)	66
Εικόνα 17: Πλοίο μεταφοράς αερίων σε κατάσταση ημπίεσης (semi-pressurized gas carrier) (Bosneagu, Vasilache & Raiciu,2017)	67
Εικόνα 18: Πλοίο μεταφοράς αερίων σε κατάσταση πλήρους ψήξης (fully refrigerated gas carrier) (Bosneagu, Vasilache & Raiciu, 2017)	68
Εικόνα 19: Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG Carrier). Ανακτήθηκε απο https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:712524/mmsi:538003212/imo:9337755/vessel:MOZAH	70
Εικόνα 20: Τυπική πρισματική δεξαμενή τύπου «Α» σε πλοίο μεταφοράς αερίων προϊόντων του πετρελαίου (LPG Carrier) (CCNR/OCIMF, 2010)	74
Εικόνα 21: Σφαιρική δεξαμενή (Moss type tank) τύπου «B» (Niotis,2022).....	75
Εικόνα 22: Πρισματική δεξαμενή τύπου «B» (IHI-SPB tank) (Niotis, 2022).....	76
Εικόνα 23: Δεξαμενές τύπου «C» κυλινδρικής διατομής (CCNR/OCIMF, 2010).....	77

Εικόνα 24: Δεξαμενές τύπου «C» διατομής τύπου «bi-lobe» (bi-lobe design) (Niotis, 2022).	77
Εικόνα 25: Σύστημα δεξαμενών «GTT-No.96» (Πηγή: https://gtt.fr/technologies/no96-systems)	79
Εικόνα 26: Σύστημα δεξαμενών «GTT-Mark III» (Πηγή: https://gtt.fr/technologies/markiii-systems)	80
Εικόνα 27: Σύστημα δεξαμενών «GTT-CS1» (Deybach, 2003).	81
Εικόνα 28: Πλοίο μεταφοράς υδροποιημένου CO ₂ , «M/T EMBLA» (Πηγή: https://www.larvik-shipping.no/embla/)	82
Εικόνα 29: Πλοίο μεταφοράς υδροποιημένου CO ₂ , «M/T FROYA» (Πηγή: https://www.larvik-shipping.no/froya/)	83
Εικόνα 30: Πλοίο μεταφοράς υδροποιημένου CO ₂ , «M/T GERDA»(Πηγή: https://www.larvik-shipping.no/gerda-2/)	83
Εικόνα 31: Πλοίο μεταφοράς υδροποιημένου CO ₂ , «M/T HELLE» (Πηγή: https://www.larvik-shipping.no/helle/)	84
Εικόνα 32: Υπό κατασκευή πλοία μεταφοράς υδροποιημένου CO ₂ , «Northern Lights» (Πηγή: https://norlights.com/news/northern-lights-awards-ship-management-contract-to-k-line/)	86
Εικόνα 33: LCO ₂ 64.000m ³ , που αναπτύχθηκε από την εταιρεία «Mitsui O.S.K. Lines» (Πηγή: https://www.marinelog.com/news/lco2-carrier-developments-set-to-pick-up-pace/)	87
Εικόνα 34: Εγκαταστάσεις ΕΛΠΕ Ασπροπύργου (Πηγή: https://www.reporter.gr/Periballon/411542-Tropoioyontai-oi-periballontikoi-oroi-gia-to-diylisthrio-twn-ELPE)	91
Εικόνα 35: Εγκαταστάσεις στο κοίτασμα του Πρίνου (Πηγή: https://energyexpress.gr/news)	91
Εικόνα 36: ΑΗΣ Λινοπεραμάτων-Ηράκλειο Κρήτης (Πηγή: https://www.nextplus.gr)	92
Εικόνα 37: Υπολογισμός απόστασης κυκλικού ταξιδιού (Πηγή: http://www.netpas.net)	95
Εικόνα 38: Επικαιροποιημένες παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ ανά τομέα το 2019. Πηγή: (Yoro & Daramola, 2020)	161
Εικόνα 39: Απεικόνιση των σταδίων μιας αλυσίδας CCS στην οποία το δεσμευμένο CO ₂ μεταφέρεται διά θαλάσσης. Πηγή: (Roussanaly, Deng, Skaugen, & Gundersen, 2021)	167
Εικόνα 40: Διάφορα προτεινόμενα σχέδια πλοίων υδροποιημένου CO ₂ . Πηγή: (Element Energy, 2018)	170
Εικόνα 41: Προτεινόμενα σχέδια πλοίων για μεταφορά υδροποιημένου CO ₂ σε χαμηλή πίεση, βάσει των σχεδίων υπαρχόντων LPG carriers. Πηγή: (Element Energy, 2018)	171
Εικόνα 42: Προτεινόμενοι σχεδιασμοί πλοίων για την μεταφορά υδροποιημένου CO ₂ , μεταφορική ικανότητα 12310 tCO ₂ (αριστερά) και 105.000 tCO ₂ (δεξιά). Πηγή: (Element Energy, 2018)	171

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κυριότερες πηγές εκπομπών CO ₂ σε δεκατομμύρια μετρικούς τόνους (Yoro, Daramola, 2020)	25
Πίνακας 2: Επιτρεπόμενα όρια εκπομπών SO _x κατά MARPOL. (Σπύρου, 2020)	31
Πίνακας 3: Συντελεστές συσχέτισης κόστους κατασκευής δικτύου αγωγών μεταφοράς CO ₂ , ανάλογα με το περιβάλλον ανάπτυξης του δικτύου (IEAGHG, 2010)	48
Πίνακας 4: Εκτιμήσεις κόστους για μεγάλης κλίμακας δίκτυα μεταφοράς (20Mt/έτος) CO ₂ (ZEP, 2011)	48
Πίνακας 5: Κυριότερα υπό κατασκευή έργα δέσμευσης και αποθήκευσης του CO ₂ παγκοσμίως (Global CCS Institute, 2021)	60

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας πλοίων LCO ₂ carriers σε υπηρεσία.....	84
Πίνακας 7: Υπολογισμένες ετήσιες εκπομπές ΑΗΣ Λινοπεραμάτων	92
Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη	96
Πίνακας 9: Αποτελέσματα υπολογισμού RFR για κάθε σενάριο & τύπο πλοίου.....	97
Πίνακας 10: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του πρώτου σεναρίου	98
Πίνακας 11: Cash Flow πρώτου σεναρίου.....	98
Πίνακας 12: Περίοδος αποπληρωμής πρώτου σεναρίου	99
Πίνακας 13: Τιμές του NPV για διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 1 ^ο	100
Πίνακας 14: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του δεύτερου σεναρίου	101
Πίνακας 15: Cash Flow δεύτερου σεναρίου	101
Πίνακας 16: Περίοδος αποπληρωμής δεύτερου σεναρίου.....	102
Πίνακας 17: Τιμές του NPV για διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 2 ^ο	104
Πίνακας 18: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του τρίτου σεναρίου	104
Πίνακας 19: Cash Flow τρίτου σεναρίου.....	105
Πίνακας 20: Περίοδος αποπληρωμής τρίτου σεναρίου	106
Πίνακας 21: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 3 ^ο	107
Πίνακας 22: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του τέταρτου σεναρίου.....	108
Πίνακας 23: Cash Flow τέταρτου σεναρίου	108
Πίνακας 24: Περίοδος αποπληρωμής τέταρτου σεναρίου	109
Πίνακας 25: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 4 ^ο 110	
Πίνακας 26: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του πρώτου σεναρίου	111
Πίνακας 27: Cash Flow πρώτου σεναρίου.....	111
Πίνακας 28: Περίοδος αποπληρωμής πρώτου σεναρίου	112
Πίνακας 29: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 1 ^ο	113
Πίνακας 30: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του δεύτερου σεναρίου	114
Πίνακας 31: Cash Flow δεύτερου σεναρίου	114
Πίνακας 32: Περίοδος αποπληρωμής δεύτερου σεναρίου.....	115
Πίνακας 33: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 2 ^ο	117
Πίνακας 34: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του τρίτου σεναρίου	117
Πίνακας 35: Cash Flow τρίτου σεναρίου.....	118
Πίνακας 36: Περίοδος αποπληρωμής τρίτου σεναρίου	119
Πίνακας 37: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 3 ^ο	120
Πίνακας 38: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του τέταρτου σεναρίου.....	121
Πίνακας 39: Cash Flow τέταρτου σεναρίου	121
Πίνακας 40: Περίοδος αποπληρωμής τέταρτου σεναρίου	122
Πίνακας 41: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 4 ^ο	123
Πίνακας 42: Κύριες πηγές εκπομπών CO ₂ και οι προληπτικές μέθοδοι τους. Πηγή: (Yoro & Daramola, 2020).....	161
Πίνακας 43: Συντελεστές μείωσης δείκτη EEDI. Πηγή: (Σπύρου, 2020)	162
Πίνακας 44: Συντελεστές γραμμής αναφοράς EEDI, Πηγή: (Σπύρου, 2020)	163
Πίνακας 45: Επιτρεπόμενα όρια εκπομπής SO _x κατά MARPOL. Πηγή: (Σπύρου, 2020)	163
Πίνακας 46: Συντελεστές συσχέτισης κόστους κατασκευής δικτύου αγωγών μεταφοράς CO ₂ , ανάλογα με το περιβάλλον ανάπτυξης του δικτύου. Πηγή: (IEAGHG, 2010)	164

Πίνακας 47: Κυριότερες χρήσεις του δεσμευμένου CO ₂ . Πηγή: (Koytsoumpa, Bergins, & Kakaras, 2018)	165
Πίνακας 48: Συγκεντρωτικός πίνακας του κόστους υγροποίησης 1 MtCO ₂ /έτος για διάφορα σενάρια καθαρότητας του CO ₂ . Στα παρακάτω κόστη θεωρήθηκε ότι το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος ανέρχεται σε 80€/MWh. Πηγή: (Roussanaly, Deng, Skaugen, & Gundersen, 2021)	167
Πίνακας 49: Οικονομικά στοιχεία που αφορούν στο CAPEX και OPEX, καθώς και η ειδική κατανάλωση καυσίμου, συναρτήσει της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου. Πηγή: (Roussanaly, Deng, Skaugen, & Gundersen, 2021)	168
Πίνακας 50: Κόστη υγροποίησης του δεσμευμένου CO ₂ . Πηγή: (Element Energy, 2018).....	168
Πίνακας 51: Κόστη για την αποθήκευση του υγροποιημένου CO ₂ , μετά από την υγροποίηση του. Πηγή: (Element Energy, 2018).....	169
Πίνακας 52: Κόστη για τις υποδομές που χρειάζονται για την φόρτωση του φορτίου. Πηγή: (Element Energy, 2018)	169
Πίνακας 53: OPEX συναρτήσει του CAPEX για την λειτουργία του LCO ₂ carrier, βάσει διάφορων μελετών. Πηγή: (Element Energy, 2018)	169

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Μηνιαία μέτρηση συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) (NASA,2023).....	20
Διάγραμμα 2: Ατμοσφαιρική συγκέντρωση υποξειδίου του αζώτου (N ₂ O) απο το 1978 (NOAA,2023).....	23
Διάγραμμα 3: Σχετικό μερίδιο των εκπομπών NO _x , SO _x , PM2.5 απο τις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές της διεθνούς ναυτιλίας. Πηγή: (Johansson, Jalkanen & Kukkonen,2017).....	29
Διάγραμμα 4: Επιτρεπόμενα όρια εκπομπών NO _x κατά MARPOL.(Σπύρου,2020).....	31
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα φάσεων του CO ₂ (Navarro,2021).....	45
Διάγραμμα 6: Εκτίμηση κόστους μεταφοράς CO ₂ σε απόσταση 250 χιλιομέτρων μέσω χερσαίων (onshore) και υποθαλάσσιων(offshore) αγωγών, συναρτήσει των μεταφερόμενων ποσοτήτων CO ₂ (IPCC,2005).....	47
Διάγραμμα 7: Εκτίμηση του κόστους μεταφοράς CO ₂ σε αέρια και σε υγρή μορφή σε \$/km/tCO ₂ , συναρτήσει των μεταφερόμενων ποσοτήτων CO ₂ (Global CCS Institute,2021).....	47
Διάγραμμα 8: Σύγκριση του κόστους μεταφοράς με πλοίο και με δίκτυο αγωγών σε €/tCO ₂ , συναρτήσει του ετήσιου όγκου μεταφοράς (0,5-2 Mt/έτος) και της απόστασης (Kjärstad,Skagestad,Eldrup & Johnsson,2016).....	50
Διάγραμμα 9: Σύγκριση του κόστους μεταφοράς με πλοίο και με δίκτυο αγωγών σε €/tCO ₂ , συναρτήσει του αυξανόμενου μεταφερόμενου όγκου CO ₂ (Kjärstad, Skagestad, Eldrup & Johnsson,2016).....	51
Διάγραμμα 10: Εκτίμηση της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV) (εκατομμύρια \$) του έργου σε βάθος χρόνου 25 ετών για τιμές πώλησης πετρελαίου από 30-70 \$/Barρέλι (Kwak,Kim,2017).....	54
Διάγραμμα 11: Κόστος κατασκευής πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ (LNG Carriers) και πλοίων μεταφοράς αργού πετρελαίου σε εκατομμύρια δολάρια ανά πλοίο (Kamalinejad,Sheykhbahae & Mazaheri, 2016).....	70
Διάγραμμα 12: Συστήματα δεξαμενών κατά IMO (Niotis,2022).....	73
Διάγραμμα 13: Cash Flow πρώτου σεναρίου.....	99
Διάγραμμα 14: Εξέλιξη αποπληρωμής πρώτου σεναρίου.....	100
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 1 ^ο	101
Διάγραμμα 16: Cash Flow δεύτερου σεναρίου.....	102
Διάγραμμα 17: Εξέλιξη αποπληρωμής δεύτερου σεναρίου.....	103
Διάγραμμα 18: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 2 ^ο	104
Διάγραμμα 19: Cash Flow τρίτου σεναρίου.....	105
Διάγραμμα 20: Εξέλιξη αποπληρωμής τρίτου σεναρίου.....	107
Διάγραμμα 21: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 3 ^ο	107
Διάγραμμα 22: Cash Flow τέταρτου σεναρίου.....	109
Διάγραμμα 23: Εξέλιξη αποπληρωμής τέταρτου σεναρίου.....	110
Διάγραμμα 24: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 4 ^ο	110
Διάγραμμα 25: Cash Flow πρώτου σεναρίου.....	112
Διάγραμμα 26: Εξέλιξη αποπληρωμής πρώτου σεναρίου.....	113
Διάγραμμα 27: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 1 ^ο	114
Διάγραμμα 28: Cash Flow δεύτερου σεναρίου.....	115
Διάγραμμα 29: Εξέλιξη αποπληρωμής δεύτερου σεναρίου.....	116
Διάγραμμα 30: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 2 ^ο	117
Διάγραμμα 31: Cash Flow τρίτου σεναρίου.....	118
Διάγραμμα 32: Εξέλιξη αποπληρωμής τρίτου σεναρίου.....	120
Διάγραμμα 33: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 3 ^ο	120

Διάγραμμα 34: Cash Flow τέταρτου σεναρίου	122
Διάγραμμα 35: Εξέλιξη αποπληρωμής τέταρτου σεναρίου	123
Διάγραμμα 36: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 4 ^ο	123
Διάγραμμα 37: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1 ^ο (i=8%)	124
Διάγραμμα 38: Ανάλυση ευαισθησίας IRR- Σενάριο 1 ^ο (i=8%)	125
Διάγραμμα 39: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1 ^ο (i=10%)	125
Διάγραμμα 40: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1 ^ο (i=10%)	126
Διάγραμμα 41: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1 ^ο (i=12%)	126
Διάγραμμα 42: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1 ^ο (i=12%)	127
Διάγραμμα 43: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2 ^ο (i=8%)	127
Διάγραμμα 44: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2 ^ο (i=8%)	128
Διάγραμμα 45: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2 ^ο (i=10%)	128
Διάγραμμα 46: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2 ^ο (i=10%)	129
Διάγραμμα 47: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2 ^ο (i=12%)	129
Διάγραμμα 48: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2 ^ο (i=12%)	130
Διάγραμμα 49: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3 ^ο (i=8%)	130
Διάγραμμα 50: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3 ^ο (i=8%)	131
Διάγραμμα 51: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3 ^ο (i=10%)	131
Διάγραμμα 52: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3 ^ο (i=10%)	132
Διάγραμμα 53: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3 ^ο (i=12%)	132
Διάγραμμα 54: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3 ^ο (i=12%)	133
Διάγραμμα 55: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4 ^ο (i=8%)	133
Διάγραμμα 56: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4 ^ο (i=8%)	134
Διάγραμμα 57: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4 ^ο (i=10%)	134
Διάγραμμα 58: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4 ^ο (i=10%)	135
Διάγραμμα 59: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4 ^ο (i=12%)	135
Διάγραμμα 60: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4 ^ο (i=12%)	136
Διάγραμμα 61: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1 ^ο (i=8%)	137
Διάγραμμα 62: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1 ^ο (i=8%)	137
Διάγραμμα 63: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1 ^ο (i=10%)	138
Διάγραμμα 64: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1 ^ο (i=10%)	138
Διάγραμμα 65: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1 ^ο (i=12%)	139
Διάγραμμα 66: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1 ^ο (i=12%)	139
Διάγραμμα 67: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2 ^ο (i=8%)	140
Διάγραμμα 68: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2 ^ο (i=8%)	140
Διάγραμμα 69: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2 ^ο (i=10%)	141
Διάγραμμα 70: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2 ^ο (i=10%)	141
Διάγραμμα 71: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2 ^ο (i=12%)	142
Διάγραμμα 72: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2 ^ο (i=12%)	142
Διάγραμμα 73: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3 ^ο (i=8%)	143
Διάγραμμα 74: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3 ^ο (i=8%)	143
Διάγραμμα 75: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3 ^ο (i=10%)	144
Διάγραμμα 76: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3 ^ο (i=10%)	144
Διάγραμμα 77: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3 ^ο (i=12%)	145
Διάγραμμα 78: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3 ^ο (i=12%)	145
Διάγραμμα 79: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4 ^ο (i=8%)	146
Διάγραμμα 80: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4 ^ο (i=8%)	146
Διάγραμμα 81: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4 ^ο (i=10%)	147
Διάγραμμα 82: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4 ^ο (i=10%)	147

Διάγραμμα 83: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4° (i=12%).....	148
Διάγραμμα 84: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4° (i=12%)	148
Διάγραμμα 85: Εκλύόμενες εκπομπές CO ₂ από την ναυτιλία, τη δεκαετία 1997-2007. Πηγή: (Σπύρου, 2020).....	162
Διάγραμμα 86: Παγκόσμιες καμπύλες οριακού κόστους (για την μεταφορά του CO ₂) για νέους αγωγούς το 2030 και νέους αγωγούς το 2050. Κάθε σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στη μεταφερόμενη ποσότητα CO ₂ για ένα σημείο εκπομπής που συνδέεται με ένα σημείο αποθήκευσης. Πηγή: (IEAGHG, 2010)	164
Διάγραμμα 87: Εκτίμηση των λιμενικών τελών ανά κυκλικό ταξίδι βάσει διαφόρων μελετών. Πηγή: (Element Energy, 2018)	170

Περίληψη

Η επιδίωξη μιας καθαρής κοινωνίας με μηδενικές εκπομπές άνθρακα έχει ωθήσει την παγκόσμια κοινότητα σε μια διαρκή αναζήτηση για νέες λύσεις που αφορούν στο περιβάλλον. Έτσι, η δέσμευση, η αποθήκευση, η χρήση του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η ανάπτυξη πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου CO₂ μονοπωλεί το ενδιαφέρον της παγκόσμιας κοινότητας. Τα LCO₂ carriers πρόκειται να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο κομμάτι της μεταφοράς του διοξειδίου του άνθρακα από τις πηγές εκπομπών προς χώρους αποθήκευσης ή επεξεργασίας του. Ως εκ τούτου, η αγορά παγκοσμίως θα στραφεί με το πέρασμα των χρόνων στην ανάπτυξη και δημιουργία τέτοιων πλοίων. Η υπάρχουσα τεχνογνωσία στο κομμάτι που αφορά στην διαχείριση αερίων, που χρησιμοποιείται στην ναυπήγηση LNG και LPG carriers, συμβάλλει στην ανάπτυξη ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, αλλά και στην αποθήκευση και διαχείριση των αποθεμάτων, στην επαναχρησιμοποίηση του CO₂ και στις ενέργειες για την διανομή του. Ο κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πρόταση ενός νέου πλοίου που θα μεταφέρει υγροποιημένο διοξείδιο του άνθρακα, η εκπόνηση της αντίστοιχης τεχνο-οικονομικής μελέτης σκοπιμότητας, αλλά και η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της τεχνο-οικονομικής μελέτης, ούτως ώστε να διερευνηθεί η προοπτική για την υλοποίηση του προτεινόμενου επιχειρηματικού πλάνου. Παράλληλα, πέρα από τα ζητήματα που αφορούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, στην παρούσα μελέτη διερευνώνται όλες οι νέες τεχνολογίες (CCS, CCUS), που συνδέονται στενά με την λειτουργία του υπό μελέτη πλοίου. Τέλος, εκτός από την οικονομική φύση του εγχειρήματος αυτού, προσεγγίζονται και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχουν τα πλοία αυτά, σύμφωνα με την προ υπάρχουσα εμπειρία, από πλοία μεταφοράς υγροποιημένων αερίων, αλλά και τα περιβαλλοντικά οφέλη που μπορεί να επιφέρει η λειτουργία τέτοιων πλοίων, αφού θα αποτελούν μέρος της προσπάθειας για την μετάβαση σε μια κοινωνία η οποία θα είναι απαλλαγμένη από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Λέξεις κλειδιά: CCS, CCUS, LCO₂ Carriers

Abstract

The pursuit of a clean, zero-carbon society has pushed the global community into a constant search for new solutions to the environment. Thus, the capture, storage, use of carbon dioxide as well as the development of liquefied CO₂ carriers monopolizes the interest of the global community. LCO₂ carriers are going to play an important role in transporting carbon dioxide from emission sources to storage or processing sites. Therefore, the global market will turn over the years to the development and creation of such ships. The existing know-how in the field of gas management, used in the construction of LNG and LPG carriers, contributes to the development of a liquefied CO₂ carrier, but also to the storage and management of reserves, the reuse of CO₂ and the actions for its distribution. The main objective of this diploma thesis is the proposal of a new ship that will carry liquefied carbon dioxide, the elaboration of the corresponding techno-economic feasibility study, but also the sensitivity analysis carried out in the context of the techno-economic study, in order to explore the prospect for the implementation of the proposed business plan. At the same time, apart from the issues related to the greenhouse effect, the present study explores all new technologies (CCS, CCUS), which are closely related to the operation of the ship under study. Finally, apart from the economic nature of this venture, the technical characteristics that these ships should have, according to the pre-existing experience, from liquefied gas carriers, are approached, as well as the environmental benefits that the operation of such ships can bring, since they will be part of the effort for the transition to a society that will be free of carbon dioxide emissions.

Keywords: CCS, CCUS, LCO₂ carriers

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Με την πάροδο των χρόνων η παγκόσμια κοινότητα έχει κατανοήσει ότι έχει περιέλθει σε ένα περιβαλλοντικό «αδιέξοδο». Έτσι, η ανθρωπότητα έχει στρέψει το βλέμμα της στην αναζήτηση νέων μεθόδων και τεχνολογιών που θα της εξασφαλίσουν ένα πράσινο και περιβαλλοντικά βιώσιμο μέλλον. Η κατασπατάληση του ορυκτού πλούτου του πλανήτη, σε συνδυασμό με την κάκιστη διαχείριση των ρύπων διαχρονικά έχει οξύνει το περιβαλλοντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια διαδικασία με την οποία η θερμική ακτινοβολία απορροφάται από κάποια αέρια της ατμόσφαιρας και στην συνέχεια επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Ένα μέρος από την θερμική ακτινοβολία επιστρέφει στην επιφάνεια και στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Τα τελευταία χρόνια όλο και συχνότερα γίνεται λόγος για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς συνδέεται με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Η ανθρώπινη δραστηριότητα ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς συμβάλλει στην αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και αποτελεί τον κύριο παράγοντα της περιβαλλοντικής κρίσης που βιώνει ο πλανήτης Γή.

Το διοξείδιο του άνθρακα με χημικό τύπο CO_2 , είναι αέριο συστατικό της γήινης ατμόσφαιρας, άχρωμο, άοσμο και άγευστο σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και αποτελεί ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου. Αποτελεί, υποπροϊόν όλων των καύσεων ορυκτών καυσίμων, καθώς και του ξύλου και των πλαστικών.

Ο κλάδος της ναυτιλίας προσπαθεί με την πάροδο των χρόνων να συμβάλλει στην μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, είτε υιοθετώντας νέες τεχνολογίες σε ότι αφορά τους ρύπους, είτε χρησιμοποιώντας φιλικότερα καύσιμα.

Αναλογιζόμενοι τη δυσκολία που ενέχει το εγχείρημα της αποθήκευσης, υγροποίησης και μεταφοράς του διοξειδίου του άνθρακα, μπορούμε να κατανοήσουμε τον ενεργό και σημαντικό ρόλο που μπορεί να διαδραματίσει η ναυτιλία στο κομμάτι της μεταφοράς του υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα. Οι δύο επικρατέστεροι τρόποι μεταφοράς του υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα είναι δια ξηράς μέσω αγωγών και δια θαλάσσης μέσω των πλοίων μεταφοράς LCO_2 carriers. Επιπροσθέτως, έχοντας κατά νου ότι οι ωκεανοί και οι θάλασσες καταλαμβάνουν το 73% της επιφάνειας της γης γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η μεταφορά προς την αποθήκευση του υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα δεν μπορεί να στηριχθεί εξ' ολοκλήρου στην μεταφορά μέσω αγωγών.

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην συμβολή της προσπάθειας περιορισμού της ρύπανσης του περιβάλλοντος από τους αέριους ρύπους και ειδικότερα από το διοξείδιο του άνθρακα. Έτσι, ο αντικειμενικός σκοπός της παρούσας μελέτης είναι ο προσδιορισμός της σκοπιμότητας και εφικτότητας της κατασκευής ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα. Το σημαντικότερο μέρος της παρούσας μελέτης αφορά σε μία τεchnο-οικονομική μελέτη για την κατασκευή ενός

πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, καθώς και στην δημιουργία των απαιτούμενων υποδομών αποθήκευσης και υγροποίησης του διοξειδίου του άνθρακα, με σκοπό την μεταφορά του μέσω του LCO₂ carrier στις εγκαταστάσεις υπόγειας γεωλογικής αποθήκευσης.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία σταδιακή εισαγωγή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ενώ γίνεται μια εκτενής αναφορά στις εκπομπές αερίων που προέρχονται από τις θαλάσσιες μεταφορές. Επιπλέον, γίνεται λόγος για τις δράσεις της ναυτιλιακής κοινότητας ως προς την μείωση των εκπομπών αερίων. Επίσης, παρουσιάζεται ο μελλοντικός ρόλος της ναυτιλίας, καθώς και η συμβολή της στο παγκόσμιο εγχείρημα της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα.

Το κεφάλαιο 3 πραγματεύεται τις μεθόδους δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης του υγροποιημένου CO₂. Στην φάση της δέσμευσης του CO₂, γίνεται διαχωρισμός από τα άλλα αέρια, στην φάση της μεταφοράς το CO₂ συμπιέζεται και μεταφέρεται μέσω αγωγών, φορτηγών, πλοίων ή άλλων μεθόδων σε κατάλληλο χώρο για την γεωλογική του αποθήκευση. Επίσης, γίνεται μια σύντομη επισκόπηση των έργων CCS παγκοσμίως. Τέλος, παρουσιάζονται οι Διεθνείς κανονισμοί και τα Διεθνή πρότυπα σχετικά με την γεωλογική αποθήκευση του CO₂.

Αντικείμενο του 4^{ου} κεφαλαίου αποτελεί η τεχνολογία της δέσμευσης και επαναχρησιμοποίησης του CO₂. Συγκεκριμένα, όπως και στην τεχνολογία CCS, στην φάση της δέσμευσης γίνεται διαχωρισμός του CO₂ από τα άλλα αέρια και έπειτα μεταφέρεται σε κατάλληλες εγκαταστάσεις με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή του.

Στο κεφάλαιο 5^ο γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης των τεχνικών χαρακτηριστικών που πρέπει να έχει ένα πλοίο LCO₂. Στην προσπάθεια αυτή, συμβάλλουν οι γνώσεις και η υπάρχουσα εμπειρία από πλοία μεταφοράς υγροποιημένων αερίων, όπως τα πλοία LPG και LNG. Επιπλέον, παρουσιάζεται η διεθνής νομοθεσία, οι βασικές συμβάσεις και οι κώδικες του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού που διέπουν την λειτουργία των πλοίων αυτών.

Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται μια τεchnο-οικονομική μελέτη ως προς την κατασκευή και λειτουργία ενός πλοίου υγροποιημένου CO₂. Ειδικότερα, ως περιοχή λειτουργίας του πλοίου ορίζεται το Ηράκλειο Κρήτης, καθώς η συγκεκριμένη πόλη είναι παραθαλάσσια και λειτουργεί εκεί μια από τις μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας με σημαντικό όγκο ετήσιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον, στο σενάριο ταξιδιού εμπεριέχονται και άλλες δύο μονάδες με σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ειδικότερα CO₂, αυτές είναι η μονάδα των ΕΛΠΕ στον Ασπρόπυργο και στην Θεσσαλονίκη αντίστοιχα. Επίσης, σύμφωνα με το σενάριο ταξιδιού, το δεσμευόμενο διοξείδιο του άνθρακα από τις παραπάνω βιομηχανικές μονάδες, καταλήγει για αποθήκευση στο κοίτασμα του Πρίνου. Τέλος, για τα 4 σενάρια που έχουν επιλεγεί παρουσιάζεται η οικονομοτεχνική ανάλυση και ακολουθεί μια ανάλυση ευαισθησίας.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης και οι προτάσεις για σχετικές μελλοντικές έρευνες.

Κεφάλαιο 2 Επίδραση θαλασσίων μεταφορών στην κλιματική αλλαγή και ο ρόλος της ναυτιλίας στο εγχείρημα της δέσμευσης του CO₂

2.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα της εποχής μας είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη. Γενικότερα, η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι απόρροια της επίδρασης στο κλίμα του πλανήτη των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Η εκτεταμένη αποψίλωση των δασών και η καύση των ορυκτών καυσίμων, δραστηριότητες οι οποίες έχουν αυξηθεί πάρα πολύ από την βιομηχανική επανάσταση μέχρι και σήμερα, οδηγούν στην απελευθέρωση περίπου 7 δισεκατομμυρίων τόνων άνθρακα με τη μορφή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο. (Houghton, 2005)

Η επιφάνεια της Γής θερμαίνεται και το κλίμα της καθορίζεται, από την ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο. Με την σειρά του, ο πλανήτης επαναακτινοβολεί προς το διάστημα μέρος αυτής της ενέργειας, η οποία απορροφάται και εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις από τα μόρια των αερίων του θερμοκηπίου που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, επιφέρει αύξηση της παγιδευμένης ενέργειας με αποτέλεσμα η ατμόσφαιρα της Γής να θερμαίνεται, οδηγώντας έτσι σε μεταβολές του κλίματος της. Η παραπάνω διαδικασία έχει χαρακτηριστεί ως φαινόμενο του θερμοκηπίου. (Sorokhtin, Chilingar, & Khilyuk, 2007)

Με την πάροδο των ετών, ο όρος φαινόμενο του θερμοκηπίου συνδέεται με αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Η αυξανόμενη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου επιταχύνει την κλιματική αλλαγή. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο, η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γής μπορεί να αυξηθεί από 1-4,5 °C τα επόμενα 50 χρόνια και 2,2-10 °C τον επόμενο αιώνα (United Nations, 1997). Η διαφαινόμενη αύξηση της θερμοκρασίας θα οδηγήσει σε φαινόμενα έντονης ξηρασίας και έντονων βροχοπτώσεων. Επιπλέον, πέρα από τα ακραία καιρικά φαινόμενα που ήδη παρατηρούνται παγκοσμίως, η κλιματική αλλαγή θα εντείνει το λιώσιμο των πάγων με αποτέλεσμα να υπάρξει άνοδος της στάθμης της θάλασσας, που είναι πιθανό να φτάσει έως και 0,6 μέτρα παγκοσμίως τα επόμενα 50 χρόνια. (Sorokhtin, Chilingar, & Khilyuk, 2007)

Βάσει των παραπάνω, η κλιματική αλλαγή θα επηρεάσει την ζωή των ανθρώπων στο μέλλον αλλάζοντας άρδην την καθημερινότητά τους. Έτσι, η ανθρωπότητα έχει κατανοήσει ότι είναι επιτακτική η ανάγκη για ενέργειες που στοχεύουν στην μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και ειδικότερα του διοξειδίου του άνθρακα.

2.1.1 Φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση του κλίματος του πλανήτη όπως το γνωρίζουμε, καθώς και για την ύπαρξη της ανθρώπινης ζωής. Το άζωτο και το οξυγόνο αποτελούν αέρια που συνθέτουν το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιρας και δεν απορροφούν ούτε εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Με την παρουσία μόνο αυτών των αερίων στην ατμόσφαιρα της Γής δεν θα υπήρχαν σύννεφα ή το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Έτσι, στην περίπτωση αυτή η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γής θα ήταν περίπου -6°C , ενώ στην πραγματικότητα είναι 15°C . Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά προκαλείται από την επίδραση του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου, δηλαδή από την πληθώρα των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (Houghton, 2005).

Ο πλανήτης λαμβάνει ηλιακή ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε ροή περίπου 1.966 W/m^2 . Ένα τμήμα της απορροφάται από το σύστημα Γής – ατμόσφαιρας, ενώ το υπόλοιπο διαφεύγει στο διάστημα. Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία αντανακλάται σε ποσοστό της τάξης του 30 %, ενώ η ατμόσφαιρα του πλανήτη αντανακλά 6% αυτής. Παράλληλα, 20% αντανακλάται από τα νέφη και 4% από την επιφάνεια της Γής. Επιπλέον, η ατμόσφαιρα της Γής (συμπεριλαμβανομένου και του στρατοσφαιρικού στρώματος του όζοντος) απορροφά 16% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα νέφη και η επιφάνεια της συμπεριλαμβανομένων των ωκεανών απορροφούν 3% και 51% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, λόγω της θερμοκρασίας της η Γή διαχέει επίσης θερμική ακτινοβολία, η οποία αντιστοιχεί σε μεγάλα μήκη κύματος, σε αντίθεση με την ηλιακή ακτινοβολία που είναι μικρού μήκους κύματος. Συγχρόνως, η ατμόσφαιρα της επανεκπέμπει θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, μέρος της οποίας απορροφάται από την επιφάνεια της Γής, η οποία θερμαίνεται ακόμη περισσότερο.

Ο μηχανισμός του φαινομένου ισοδυναμεί με την λειτουργία ενός πραγματικού θερμοκηπίου. Ωστόσο, η ταύτιση αυτή είναι εν μέρει σωστή, καθώς τα θερμοκήπια βασίζονται στην «απομόνωση» της θερμότητας και την απαλοιφή των φαινομένων μεταφοράς της.

Από τα προαναφερθέντα γίνεται αντιληπτό ότι ο πλανήτης έχει μηχανισμούς για την διατήρηση μιας βιώσιμης θερμοκρασίας και ενός φιλικού κλίματος για την άνθηση της ζωής.

2.1.2 Αέρια του θερμοκηπίου

Τα αέρια του θερμοκηπίου και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, συμβάλλουν ως ενδογενείς παράγοντες στην κλιματική αλλαγή. Με τον όρο αέρια του θερμοκηπίου, αναφέρονται τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας που απορροφούν και επανεκπέμπουν θερμική ακτινοβολία προκαλώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. (IPCC, 2007)

Τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου (Green House Gases –GHG) στην ατμόσφαιρα της Γής παρουσιάζονται παρακάτω:

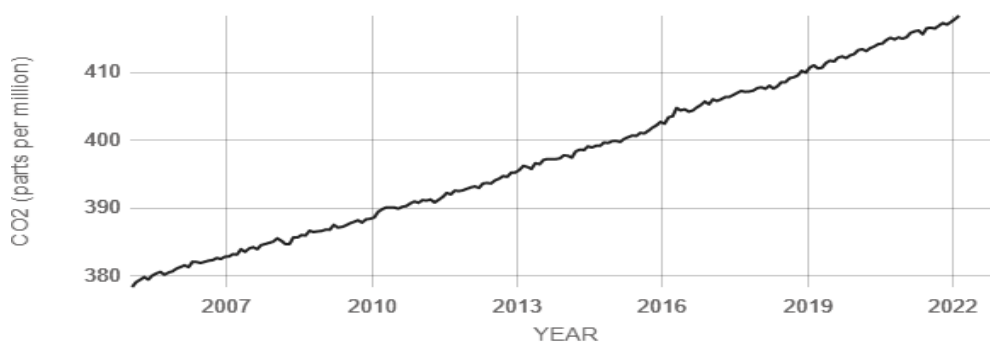
- Υδρατμοί (H₂O)
- Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)
- Μεθάνιο (CH₄)
- Υποξείδιο του αζώτου (N₂O)
- Όζον (O₃)
- Αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες (CFCs, HFCs), υδροφθοράνθρακες, πλήρως φθοριωμένοι υδρογονάνθρακες υπερφθοράνθρακες (PFCs) & εξαφθοριούχο θείο (SF₆)

2.1.2.1 Υδρατμοί (H₂O)

Ένα από τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί. Οι υδρατμοί εντοπίζονται στην ατμόσφαιρα σε μεγαλύτερη ποσότητα από τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου. Παράλληλα, οι ανθρώπινες δραστηριότητες δεν επηρεάζουν άμεσα τις συγκεντρώσεις υδρατμών. Έμμεσα, η ανθρώπινη δραστηριότητα αυξάνει την θερμοκρασία του πλανήτη, έχοντας ως επακόλουθο την αύξηση των συγκεντρώσεων υδρατμών, αφού όσο πιο θερμή είναι η ατμόσφαιρα τόσο περισσότερους υδρατμούς θα περιέχει.

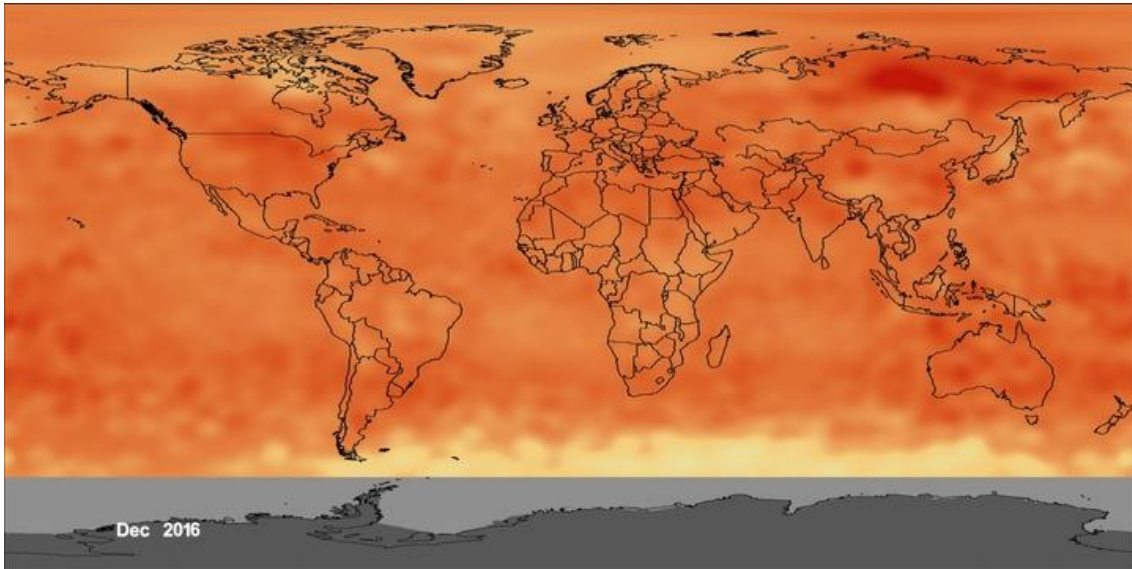
2.1.2.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποτελεί χημική ένωση με τη μορφή άχρωμου όξινου αερίου με κατά προσέγγιση 53% υψηλότερη συγκέντρωση από τον ξηρό αέρα, η οποία συγκροτείται από δύο άτομα οξυγόνου (O₂) ενωμένα με ομοιοπολικό δεσμό με ένα άτομο άνθρακα (C). Επιπλέον, εμφανίζεται φυσικά στην ατμόσφαιρα της Γής και η τρέχουσα συγκέντρωσή του είναι περίπου 0,04% κατ' όγκο (418 ppm), έχοντας ξεπεράσει τα προβιομηχανικά επίπεδα των 280 ppm (Eggleton, 2013) (NASA, 2023).



Source: climate.nasa.gov

Διάγραμμα 1: Μηνιαία μέτρηση συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) (NASA,2023)



Εικόνα 1: Παγκόσμια κατανομή και διακύμανση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Το κόκκινο χρώμα παρουσιάζει την αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ (NASA,2023)

Οι φυσικές πηγές εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα συμπεριλαμβάνουν τα ηφαίστεια, τις δασικές πυρκαγιές και τους θερμοπίδακες που απελευθερώνονται από ανθρακικά πετρώματα. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι υδατοδιαλυτό και συναντάται φυσικά στα υπόγεια ύδατα, τα ποτάμια, τις λίμνες, τους παγετώνες και στο θαλασσίνο νερό. Επιπροσθέτως, εμπεριέχεται σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Επίσης, έχει μια έντονη και όξινη οσμή, ενώ σε κανονικές συγκεντρώσεις είναι κυρίως άοσμο. Ακόμα, το CO₂ σχηματίζεται κατά την διαδικασία της αναπνοής των ζωντανών οργανισμών, της ζύμωσης των σακχάρων και κατά την αποικοδόμηση των ζωικών και φυτικών συστατικών (Spritzler, 2019) (Jansen, 2011).

Η ανθρώπινη δραστηριότητα έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με παλαιότερα έτη. Η εξόρυξη και η καύση των ορυκτών καυσίμων έχει ωθήσει σε μια ραγδαία αύξηση την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του CO₂ σε ποσοστό περίπου 50% από την αρχή της εκβιομηχάνισης έως και σήμερα (Friedlingstein, et al., 2019) (NOAA, 2023). Στις κυριότερες ανθρώπινες δραστηριότητες που εκλύουν CO₂ συγκαταλέγονται η καύση άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου και η παραγωγή τσιμέντου. Ταυτόχρονα, η ακραία αποψίλωση των δασών και η καύση βιομάζας ενισχύουν σημαντικά την συγκέντρωσή του. Οι ανθρώπινες εκπομπές CO₂ ξεπερνούν τους 30 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως, ενώ τα ηφαίστεια εκπέμπουν μόνο 0,2 – 0,3 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως (NOAA, 2023) (Gerlach, 1991). Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η αύξηση των συγκεντρώσεων του CO₂ στην ατμόσφαιρα δεν έχει παρατηρηθεί ξανά εδώ και εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια, έχοντας ως επακόλουθο το να μην καθίσταται δυνατή η απορρόφηση του από την βλάστηση ή τους ωκεανούς, με αποτέλεσμα το περιβαλλοντικό πρόβλημα να εντείνεται (NASA, 2015) (Fleur, 2015) (Ritter, 2015).

Οι αυξητικές τάσεις που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια στις συγκεντρώσεις CO₂, καθώς και άλλων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, όπως το μεθάνιο, το

υποξείδιο του αζώτου και το όζον, ενίσχυσαν την συγκέντρωση και την εκπομπή της υπέρυθρης ακτινοβολίας προκαλώντας την αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Από τα προαναφερθέντα αέρια, το διοξείδιο του άνθρακα προξενεί την μεγαλύτερη ανησυχία λόγω του ότι προκαλεί περισσότερη επίδραση στην θέρμανση του πλανήτη από όλα τα άλλα αέρια μαζί (NOAA, 2023).

Στους ωκεανούς το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται και υφίσταται δημιουργία ανθρακικού οξέος (H_2CO_3). Επιπλέον, το διαλυμένο CO_2 στους ωκεανούς ανέρχεται σε τιμές 50 φορές μεγαλύτερες από τις τιμές που υφίστανται στην ατμόσφαιρα του πλανήτη, καθιστώντας έτσι τις θάλασσες ως μια δεξαμενή άνθρακα που απορροφούν το 1/3 του διοξειδίου που παράγεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (Doney & Levine, 2006). Η αυξανόμενη συγκέντρωση CO_2 στην ατμόσφαιρα οδηγεί σε αυξανόμενη πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα από τους ωκεανούς, που έχει ως αποτέλεσμα την όξυνση των ωκεανών, δηλαδή μείωση του pH. Αυτή η μείωση προκαλεί σημαντικά προβλήματα στο οικοσύστημα, επηρεάζοντας όλους τους θαλάσσιους οργανισμούς (Nienhuis, Palmer, & Harley, 2010). Επίσης, η διαλυτότητα του CO_2 μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία των ωκεανών, με αποτέλεσμα να επέρχεται μείωση στον ρυθμό πρόσληψης του CO_2 από την ατμόσφαιρα (Duan & Sun, 2003). Συγχρόνως, οι αυξημένες συγκεντρώσεις του διοξειδίου στην ατμόσφαιρα τείνουν να μειώσουν την αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού, με ότι αυτό συνεπάγεται για το θαλάσσιο οικοσύστημα (Garrison, 2004).

Σύμφωνα με την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των ΗΠΑ (NOAA, 2008), η απορρόφηση περίπου του 50% του διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται από την καύση ορυκτών καυσίμων από τους ωκεανούς έχει συντελέσει στην μείωση του pH των θαλασσών. Αυτό, έχει οδηγήσει σε αύξηση της οξύτητας της τάξεως του 30% από την αρχή της βιομηχανικής εποχής. Επιπλέον, πολλές μελέτες έχουν αναδείξει τις επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί μείωση στον ρυθμό οικοδόμησης των υφάλων, ενώ η αναπαραγωγή πολλών ποικιλιών μεδουσών αυξάνεται. Επίσης, πιστεύεται ότι το ζωοπλαγκτόν και τα θαλάσσια φύκια επηρεάζονται με την σειρά τους από την μείωση του pH. Τέλος, παρατηρείται μείωση των πληθυσμών πολλών θαλάσσιων ειδών όπως των προνυμφών, των ψαριών και των οστρακοειδών.

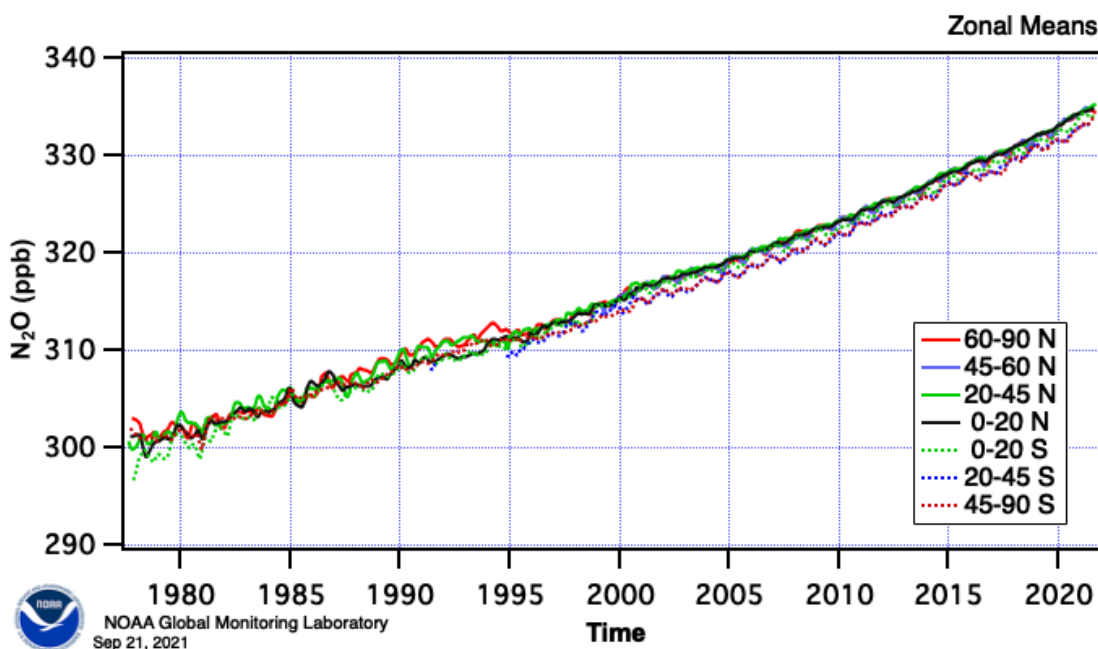
2.1.2.3 Μεθάνιο (CH_4)

Το μεθάνιο (CH_4) συγκαταλέγεται στα αέρια του θερμοκηπίου που είναι αναγκαίο να μετριάσουν ως προς τις εκπομπές αερίου, σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο. Αποτελεί, κύριο συστατικό του φυσικού αερίου σε ποσοστό 70-90% και εμπεριέχεται και στα υπόλοιπα καύσιμα (IPCC, 2007). Σύμφωνα με δεδομένα που έχουν αντλήσει οι επιστήμονες από την ανταρκτική, η συγκέντρωση μεθανίου στην ατμόσφαιρα της Γής ήταν περίπου 0,7 ppm και από τότε η συγκέντρωση του έχει υπερδιπλασιαστεί. Επιπλέον, σύμφωνα με μετρήσεις από το 1980 έως και το 2000 ο ρυθμός αύξησης στην συγκέντρωση μεθανίου στην ατμόσφαιρα κυμαινόταν από 5-10 ppb/έτος. Οι συγκεντρώσεις μεθανίου στην ατμόσφαιρα είναι μικρότερες από αυτές του διοξειδίου του άνθρακα, ωστόσο η συμμετοχή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και την

υπερθέρμανση του πλανήτη δεν είναι αμελητέα. Φυσικές πηγές μεθανίου αποτελούν τα ηφαίστεια, οι υγρότοποι και οι ωκεανοί. Επίσης, άλλες πηγές προκύπτουν άμεσα ή έμμεσα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες από τον βιομηχανικό τομέα, από διαρροές σε αγωγούς που μεταφέρουν φυσικό αέριο ή πετρελαιοπηγές και κατά την αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Houghton, 2005).

2.1.2.4 Υποξείδιο του αζώτου (N_2O)

Η συγκέντρωση του υποξειδίου του αζώτου (N_2O), ενός ακόμη αερίου που συνδέεται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα του πλανήτη, είναι 0,3 ppm και αυξάνεται με ρυθμό περίπου 0,25%/έτος. Κατά την προβιομηχανική εποχή η συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα ήταν κατά 16% λιγότερη. Οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου συνδέονται με τις ανθρώπινες δραστηριότητες λόγω της αυξανόμενης χρήσης λιπασμάτων, την καύση βιομάζας, καθώς και με ρύπους που προέρχονται από την χημική βιομηχανία. Επιπλέον, το υποξείδιο του αζώτου φέρεται να παραμένει στην ατμόσφαιρα για περίπου 120 χρόνια (Houghton, 2005). Ταυτόχρονα, σημαντικές θεωρούνται και οι επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, καθώς η έκθεση στο υποξείδιο του αζώτου προκαλεί βραχυπρόθεσμες μειώσεις στην νοητική απόδοση, την οπτικοακουστική ικανότητα και την χειρωνακτική επιδεξιότητα. Επίσης, βλάβες στο DNA, αναπνευστικά προβλήματα, έλλειψη βιταμίνης B12, και προβλήματα στην κύηση έχουν συσχετιστεί με μακροχρόνια έκθεση στο N_2O (Randhawa & Bodenham, 2016) (Wrońska-Nofer, et al., 2012) (Wrońska-Nofer, et al., 2009).



Διάγραμμα 2: Ατμοσφαιρική συγκέντρωση υποξειδίου του αζώτου (N_2O) από το 1978 (NOAA,2023)

2.1.2.5 Φθοροχλωράνθρακες (CFCs,HFCs) , Εξαφθοριούχο θείο (SF₆) & όζον (O₃)

Οι φθοροχλωράνθρακες (CFCs, HFCs) αποτελούν τεχνητές χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στα ψυγεία, δοχεία ψεκασμού, air-condition και την κατασκευή μονώσεων. Από την στιγμή που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μπορούν να παραμείνουν εκεί έως και 200 χρόνια. Η ευρεία χρήση τους από την δεκαετία του 80' και έπειτα φανέρωσε τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούν, αφού συνδέονται με την καταστροφή του όζοντος (O₃), του αερίου που βρίσκεται στην στρατόσφαιρα της Γής και απορροφά την ηλιακή υπεριώδη ακτινοβολία. Το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ το 1987, προέβλεπε σταδιακή κατάργηση των φθοροχλωρανθράκων επειδή πέρα από τα προβλήματα που επιφέρουν με την καταστροφή του όζοντος, εντείνουν το πρόβλημα του φαινομένου του θερμοκηπίου σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, σε σύγκριση με το διοξείδιο του άνθρακα. Οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), που άρχισαν να χρησιμοποιούνται μετά το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ λόγω της μη απαγόρευσης της χρήσης τους, δεν περιέχουν χλώριο ή βρώμιο και δεν καταστρέφουν το όζον. Επιπλέον, η συμμετοχή τους στην υπερθέρμανση του πλανήτη θεωρείται μικρότερη από αυτή των CFCs και έχουν μικρότερη διάρκεια παραμονής στην ατμόσφαιρα της Γής (Houghton, 2005). Το εξαφθοριούχο θείο (SF₆) είναι ένα από τα πιο ισχυρά αέρια του θερμοκηπίου και χρησιμοποιείται κυρίως εκεί που υπάρχουν υψηλές ηλεκτρικές τάσεις (Nikel, 2020) (Guetlein & Sebi, 2020). Οι συγκεντρώσεις SF₆ στην ατμόσφαιρα έφτασαν τα 10,66 ppt με ρυθμό ανάπτυξης 0,36 ppt/έτος (Lan, Thoning, & Dlugokencky, 2023). Τέλος, έχει εκτιμώμενη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα του πλανήτη περί τα 800-3200 χρόνια και έχει εκτιμηθεί ότι έχει 23.900 φορές μεγαλύτερο αντίκτυπο στην υπερθέρμανση του πλανήτη σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα (Ravishankara, Solomon, Turnipseed, & Warren, 1993).

2.2 Πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Με την πάροδο των χρόνων με την ευρεία ανάπτυξη του βιομηχανικού τομέα και με την ανάγκη παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, η παγκόσμια κοινότητα στράφηκε στην εξόρυξη και κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την ανάγκη για μετακινήσεις, την επέκταση του εμπορίου παγκοσμίως, καθώς και άλλοι ανθρωπογενής παράγοντες οδήγησαν σε μια αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε ποσοστό άνω του 70% την περίοδο 1970-2002. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι κυριότερες πηγές εκπομπών CO₂ (Yoro & Daramola, 2020).

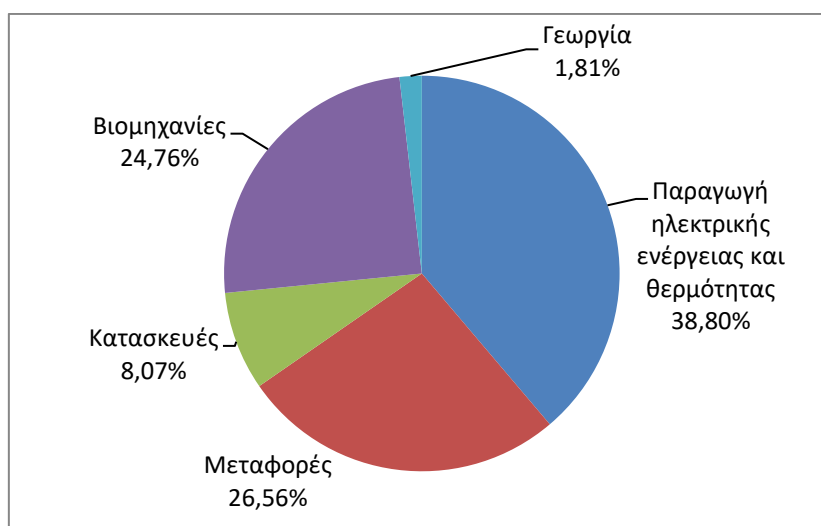
Πηγές Εκπομπών	Εκπομπές CO ₂ (δισεκατομμύρια Mt)
Ανθρωπογενείς Πηγές	
Μηχανές καύσης ορυκτών καυσίμων	392
Εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου	113
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα)	279
Μεταφορές	191
Βιομηχανίες	178
Αλλαγές στην χρήση γής	13
Φυσικές πηγές	
Αναπνόη φυτών, ζώων και ανθρώπων	7
Ανταλλαγή μεταξύ ωκεανών και ατμόσφαιρας	7
Αναπνοή και αποσύνθεση του εδάφους	1,54
Ηφαιστειακές εκρήξεις	0,15

Πίνακας 1: Κυριότερες πηγές εκπομπών CO₂ σε δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους (Yoro,Daramola,2020)

Οι κυριότερες πηγές εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες είναι οι εξής:

- 38,80% από παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας
- 26,56% από τις μεταφορές
- 24,76% από τον βιομηχανικό τομέα
- 8,07% από τις κατασκευές
- 1,81% από την γεωργία

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Εκπομπές CO₂ από ανθρωπογενείς παράγοντες το έτος 2019 (Yoro,Daramola,2020)

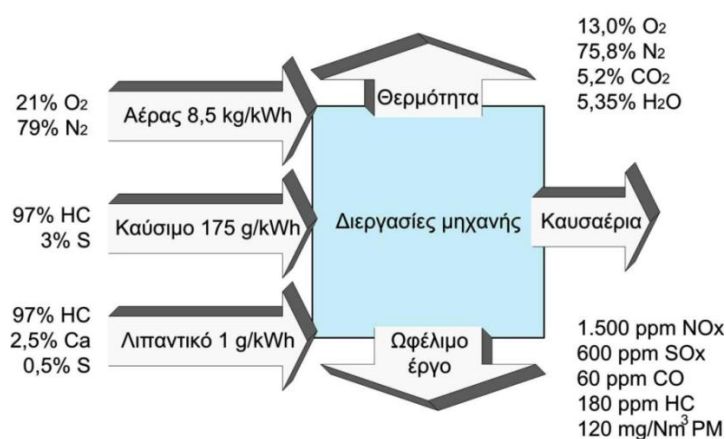
2.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση από τις θαλάσσιες μεταφορές και οι επιπτώσεις της

Ο κλάδος της ναυτιλίας συμβάλλει διαχρονικά στην μεταφορά φορτίων, καθώς και επιβατών σε παγκόσμια κλίμακα. Ειδικότερα, τα τρία τέταρτα του παγκόσμιου φορτίου, καθώς και σημαντικός αριθμός επιβατών μεταφέρονται από τα πλοία. (Gössling, Meyer-Habighorst, & Humpe, 2021). Επιπλέον, δίχως την συμβολή της ναυτιλίας το παγκόσμιο εμπόριο δεν θα ήταν σε θέση να μεταφέρει φορτία χύδην, όπως πρώτες ύλες, τρόφιμα και βιομηχανικά υλικά. Ακόμη, το θαλάσσιο εμπόριο αποτελεί πυλώνα στήριξης της παγκόσμιας οικονομίας και χάρη στην συνεχή επέκταση του αποφέρει οφέλη για τους καταναλωτές παγκοσμίως μέσω του ανταγωνιστικού κόστους μεταφοράς των αγαθών. Πράγματι, ο κλάδος της ναυτιλίας είναι από τους λίγους κλάδους σε παγκόσμιο επίπεδο που με την πάροδο των χρόνων έχει συνεχείς προοπτικές για περαιτέρω ανάπτυξη. Τα περίπου 50.000 εμπορικά πλοία που είναι νηολογημένα σε περισσότερα από 150 κράτη δημιουργούν θέσεις εργασίας για περισσότερους από ένα εκατομμύριο ανθρώπους σχεδόν κάθε εθνικότητας. Παράλληλα, σύμφωνα με την Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το εμπόριο και την ανάπτυξη (UNCTAD) εκτιμάται ότι μέσω της λειτουργίας των πλοίων αυτών εισρέουν στα ταμεία της παγκόσμιας οικονομίας περίπου 380 δισεκατομμύρια δολάρια σε ναύλους (International Chamber of Shipping, 2022).

Η συνεχής «άνθιση» του παγκόσμιου εμπορίου δια θαλάσσης και κατ' επέκταση του παγκόσμιου στόλου εντείνουν το περιβαλλοντικό πρόβλημα. Έτσι, ο κλάδος της ναυτιλίας συμμετέχει και αυτός με την σειρά του, όπως και άλλοι κλάδοι, στο παγκόσμιο πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Οι εκπομπές αερίων που εκλύονται από την λειτουργία του παγκόσμιου στόλου συμπεριλαμβάνουν αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα οξειδία του αζώτου (NO_x), τα οξειδία του θείου (SO_x), το μονοοξείδιο του άνθρακα (CO), καθώς και άκαυστους υδρογονάνθρακες (HC) και αέρια σωματίδια (PM_{2,5}, PM₁₀) που συντελούν στην μόλυνση του αέρα (Gössling, Meyer-Habighorst, & Humpe, 2021). Επιπλέον, αρκετές μελέτες έχουν αναδείξει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x), διοξειδίου του θείου (SO₂) και αναφέρουν ότι η εκπομπή CO₂, NO_x, SO₂ από τα πλοία αποτελούν το 2-3%, 10-15% και 4-9% των παγκόσμιων εκπομπών αντίστοιχα (Endresen, Eide, Dalsøren, Isaksen, & Sørsgård, 2008) (Corbett & Koehler, Updated emissions from ocean shipping, 2003) (Endresen, Sørsgård, Lee Behrens, Brett, & Isaksen, 2007) (Eyring, Köhler, Lauer, & Lemper, 2005). Επίσης, πιστεύεται ότι οι πληθυσμοί που ζουν κοντά σε λιμάνια μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία τους λόγω της έκθεσης τους σε υψηλά επίπεδα NO_x και στα αέρια σωματίδια PM_{2,5} (Gössling, Meyer-Habighorst, & Humpe, 2021). Παράλληλα, ο κλάδος της ναυτιλίας λόγω της αναμενόμενης ανάπτυξης του έχει ως στόχο την εξάλειψη των εκπομπών CO₂ μέχρι το 2050, παρά το γεγονός, ότι οι εκπομπές CO₂ που προέρχονται από τον κλάδο της ναυτιλίας είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με άλλους κλάδους (Gössling, Meyer-Habighorst, & Humpe, 2021).

Στους ναυτικούς κινητήρες τα ναυτιλιακά καύσιμα καίγονται με το οξυγόνο του αέρα και παράγεται η μηχανική ενέργεια που χρειάζεται για την πρόωση του πλοίου (Κοτρίκλα, 2015). Οι ναυτικοί κινητήρες diesel μπορούν να ρυθμιστούν σε λειτουργία με χαμηλής ποιότητας καύσιμα, τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του

κινητήρα (Κυρτάτος, 1993). Η περιεκτικότητα του ευρέως χρησιμοποιούμενου από τα πλοία, ναυτιλιακού πετρελαίου, σε άνθρακα κυμαίνεται από 84,9% έως 87,4%. Επιπλέον, η περιεκτικότητά τους σε θείο διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του καυσίμου (εάν είναι αποσταγματικό Marine Diesel Oil (MDO), Marine Gas Oil (MGO) ή υπολλειματικό καύσιμο Heavy Fuel Oil (HFO)). Τα αέρια που παράγονται από την καύση των ναυτιλιακών καυσίμων, περιέχουν κατά κύριο λόγο άζωτο (N_2), οξυγόνο (O_2), υδρατμούς (H_2O) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Επίσης, στα καυσαέρια συναντώνται σε μικρότερες ποσότητες οξειδία του αζώτου (NO_x), οξειδία του θείου (SO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), ακαύστοι υδρογονάνθρακες και αιωρούμενα σωματίδια (Κοτρίκλα, 2015)



Σχήμα 2: Είσοδος και έξοδος ενός ναυτικού κινητήρα Diesel (Δεδομένα για τις ποσότητες αέρα, καυσίμου, λιπαντικού, τη σύνθεση του καυσίμου και του λαδιού και τη σύσταση των καυσαερίων από MAN&Diesel,2014).
Πηγή: (Κοτρίκλα,2015)

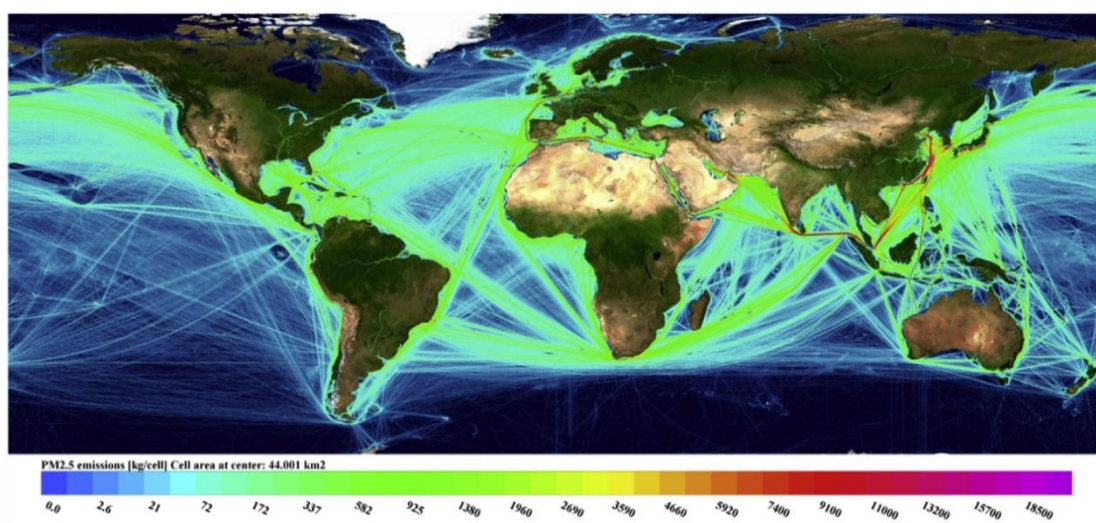
Το CO_2 και οι υδρατμοί δημιουργούνται από την τέλεια καύση του άνθρακα και του υδρογόνου αντίστοιχα που περιέχεται στο ναυτιλιακό καύσιμο. Απεναντίας, λόγω της ατελούς καύσης των καυσίμων μπορούν να εκλυθούν στην ατμόσφαιρα σωματίδια άνθρακα (αιθάλη), CO , άκαυστοι υδρογονάνθρακες ή μερικώς οξειδωμένοι υδρογονάνθρακες (Κοτρίκλα, 2015).

Οι εκπομπές SO_x από τα πλοία, προέρχονται από την υψηλή περιεκτικότητα των ναυτιλιακών καυσίμων σε θείο. Τα ναυτιλιακά καύσιμα έχουν περιεκτικότητα σε θείο περίπου 2,7% κ.β. ή 27.000 ppm. Το SO_2 που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα μετατρέπεται σε θειικό οξύ, συμβάλλοντας έτσι, στην δημιουργία της όξινης βροχής, η οποία με την σειρά της μπορεί να προκαλέσει βλάβες στην γλωρίδα, στο δέρμα, στο χαρτί, καθώς και να διαβρώσει μέταλλα και δομικά υλικά (Κοτρίκλα, 2015).

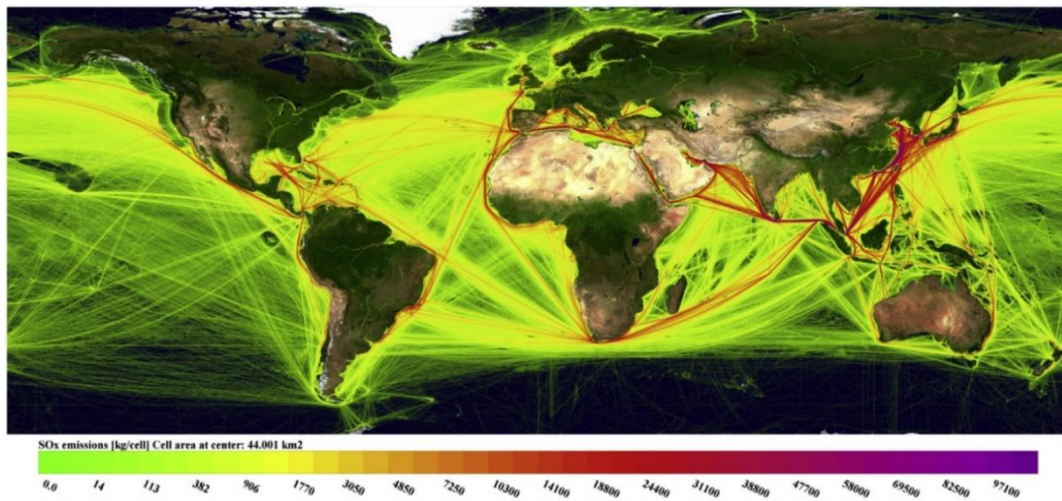
Τα NO_x σχηματίζονται κυρίως, λόγω της αντίδρασης του αζώτου με το οξυγόνο σε υψηλές θερμοκρασίες εντός του κινητήρα. Επιπλέον, σχηματίζονται από την καύση συστατικών των καυσίμων που περιέχουν άζωτο. Τα σημαντικότερα οξειδία του αζώτου που παράγονται κατά την καύση είναι το NO και το NO_2 . Η συνεισφορά τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μέσω της δημιουργίας φωτοχημικού νέφους στην ατμόσφαιρα των πόλεων. Τα NO_x και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, με μια σειρά χημικών αντιδράσεων καταλήγουν στην δημιουργία όζοντος (O_3), το οποίο αποτελεί

αέριο του θερμοκηπίου. Επίσης, το φωτοχημικό νέφος μπορεί να οδηγήσει σε ερεθισμό των ματιών και των πνευμόνων, καθώς και στην καταστροφή των φύλλων των φυτών (Κοτρίκλα, 2015).

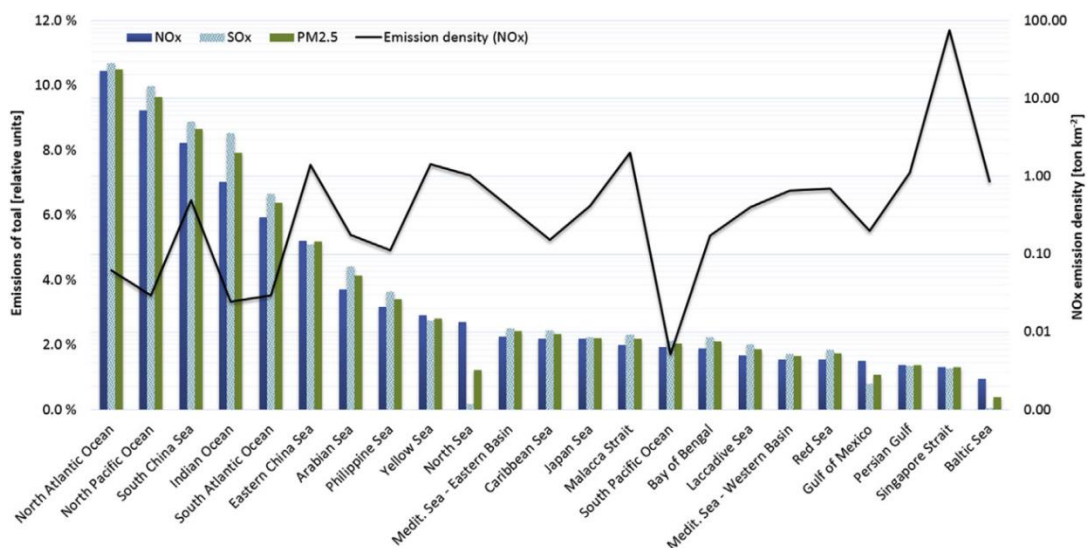
Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) είναι ένα πολύπλοκο μίγμα οργανικών και ανόργανων ουσιών, που εμπεριέχουν ατομικό άνθρακα, αιθάλη, στάχτη, πολύ μικρά σωματίδια καυσίμου που δεν κάηκε ή κάηκε ατελώς, άκαυστο λιπαντικό έλαιο, θειικά και υγρασία. Τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5}, δηλαδή τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2,5μm, μέσω της εισπνοής εισέρχονται στους πνεύμονες, από τους οποίους δύσκολα απομακρύνονται (Κοτρίκλα, 2015). Τα σωματίδια αυτά, προκαλούν προβλήματα στο καρδιοαναπνευστικό σύστημα των ανθρώπων και προκαλούν καρκίνο του πνεύμονα (Corbett, et al., 2007) (Gössling, Meyer-Habighorst, & Humpe, 2021). Επιπλέον, σύμφωνα με εκτιμήσεις, οι εκπομπές PM_{2.5} ευθύνονται για 14.500-37.500 θανάτους παγκοσμίως (Liu, et al., 2016) (Gössling, Meyer-Habighorst, & Humpe, 2021). Οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2,5} από την ναυτιλία το 2015, υπολογίζονται στους 1,49 Mt (Johansson, Jalkanen, & Kukkonen, 2017). Η τέταρτη μελέτη για τα αέρια του θερμοκηπίου του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) αναφέρει ότι το 2017 οι εκπομπές PM_{2.5} που προέρχονται από την ναυτιλία ανέρχονται σε 1,43 Mt. Τα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από τις εκπομπές αερίων της διεθνούς ναυτιλίας, αποτελούν περίπου το 2% των παγκόσμιων εκπομπών (Gössling, Meyer-Habighorst, & Humpe, 2021).



Εικόνα 2: Γεωγραφική κατανομή των συνολικών εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} από την ναυτιλία το έτος 2015. Οι δορυφορικές εικόνες παρέχονται από την NASA. Πηγή: (Johansson, Jalkanen & Kukkonen, 2017)



Εικόνα 3: Γεωγραφική κατανομή των συνολικών εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x), που εκλύθηκαν από τα ναυτιλία το έτος 2015. Πηγή: (Johansson, Jalkanen & Kukkonen, 2017)



Διάγραμμα 3: Σχετικό μερίδιο των εκπομπών NO_x, SO_x, PM_{2.5} από τις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές της διεθνούς ναυτιλίας. Πηγή: (Johansson, Jalkanen & Kukkonen, 2017)

2.4 Δράσεις της ναυτιλιακής κοινότητας ως προς την μείωση των εκπομπών αερίων

2.4.1 Παράρτημα VI της MARPOL

Η MARPOL αποτελεί μία από τις σημαντικότερες συμβάσεις του IMO και περιλαμβάνει κανονισμούς για την αποφυγή ρύπανσης από τα πλοία. Οι κανονισμοί της σύμβασης

συγκεντρώνονται σε 6 κεφάλαια ή προσαρτήματα (Annexes), τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- I. Κανονισμοί για την αποφυγή ρύπανσης από πετρελαιοειδή.
- II. Κανονισμοί για τον έλεγχο της ρύπανσης από επιβλαβείς υγρές ουσίες σε μορφή χύδην.
- III. Κανονισμός για την αποφυγή της ρύπανσης από επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται δια θαλάσσης σε συσκευασμένη μορφή.
- IV. Κανονισμοί για την αποφυγή της ρύπανσης από λύματα πλοίων.
- V. Κανονισμοί για την αποφυγή της ρύπανσης από απορρίμματα πλοίων.
- VI. Κανονισμοί για την αποφυγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία.

Το προσάρτημα VI έχει τεθεί σε ισχύ από το 2005. Αρχικά, οι κανονισμοί που συμπεριλαμβάνονται στο προσάρτημα αυτό, είχαν θέσει ως στόχο τον μετριασμό των εκπομπών προς την ατμόσφαιρα του πλανήτη, πτητικών οργανικών ενώσεων από τα φορτία των δεξαμενόπλοιων και θεικών οξειδίων από την καύση των βαρέων ναυτιλιακών καυσίμων, καθώς και νιτρικών οξειδίων που εκπέμπονται από τους ναυτικούς κινητήρες. Επιπλέον, από το προσάρτημα VI απαγορεύεται η εγκατάσταση συστημάτων που περιέχουν CFCs, καθώς καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος. Παράλληλα, από τον Ιούλιο του 2011 ο IMO υιοθέτησε αυστηρότερα μέτρα εντός του παραρτήματος VI, που ως κύριο στόχο έχουν το να μετριάσουν όσο το δυνατόν περισσότερο την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία (IMO, 1978) (Σπύρου, 2020).

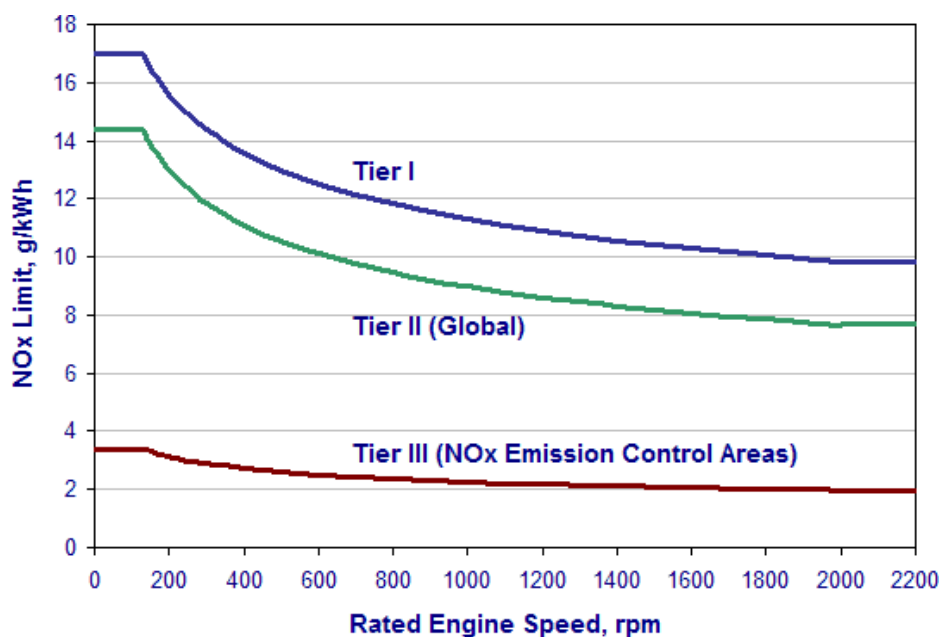
2.4.2 Περιοχές ελέγχου εκπομπών αερίων (ECAs)

Έπειτα από αναθεώρηση του παραρτήματος VI από την Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) που υιοθετήθηκε το 2008 και τέθηκε σε ισχύ το 2010, εισήχθησαν στο παράρτημα αλλαγές που αφορούσαν στην μείωση των εκπομπών των SO_x, NO_x και PM. Επιπλέον, εντός του αναθεωρημένου παραρτήματος VI ορίστηκαν ειδικές περιοχές ελέγχου εκπομπών αερίων (Emission Control Areas-ECAs), στις οποίες οι προαναφερθείσες εκπομπές έπρεπε να είναι σε ακόμη χαμηλότερα επίπεδα. Συγκεκριμένα, τέθηκε ένα άνω όριο στην περιεκτικότητα σε θείο του ναυτιλιακού πετρελαίου της τάξεως του 4,5% κ.β. Το 2012 και το 2020 τα όρια αυτά μειώθηκαν περαιτέρω σε 3,5% και 0,5% αντίστοιχα. Παράλληλα, ορίζονταν και ειδικές περιοχές στις οποίες τα όρια εκπομπών SO₂ είναι αυστηρότερα. Στις περιοχές αυτές το περιεχόμενο θείο των καυσίμων δεν έπρεπε να ξεπερνάει το 1,5% κ.β. , με περαιτέρω μείωση να σημειώνεται το 2010 στο 1% και το 2015 στο 0,1%. Η οριοθέτηση ειδικών περιοχών, καθώς και η διαρκής αυστηροποίηση των αποδεκτών ορίων ως προς τις εκπομπές, ωθεί την διεθνή ναυτιλία να μειώσει αισθητά την χρήση του HFO και να στραφεί είτε στην εναλλακτική λύση των MDO,MGO είτε στο LNG. Επίσης, πέρα από την χρήση εναλλακτικών καυσίμων, τα τελευταία χρόνια στα πλοία χρησιμοποιούνται συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων.

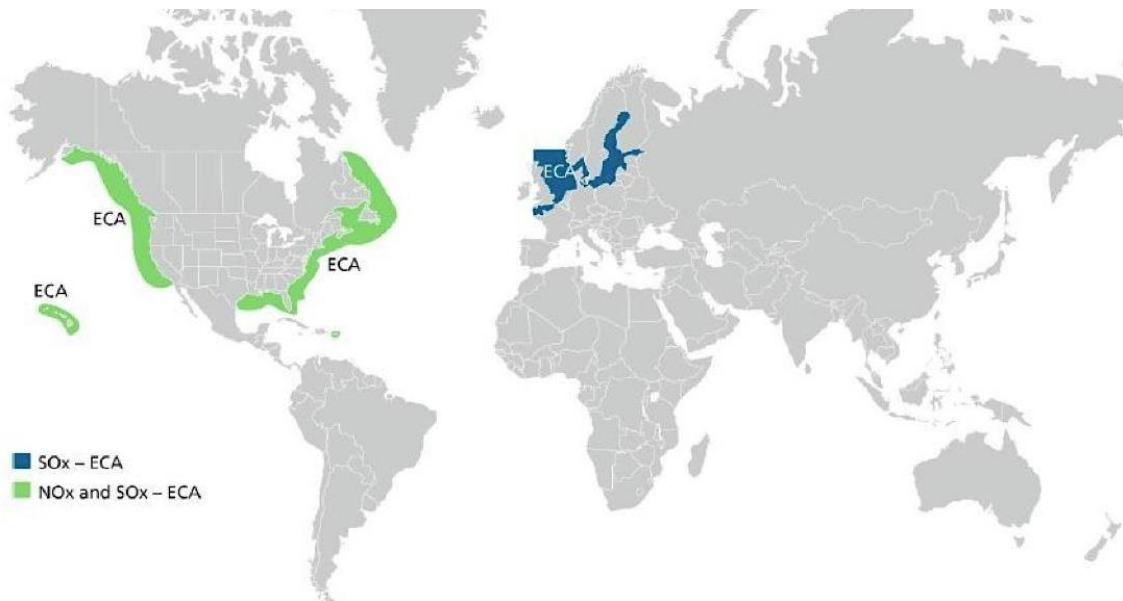
Έτος υποχρεωτικής εφαρμογής	Όριο περιεχομένου θείου στο ναυτιλιακό καύσιμο	
	SO _x εντός ECA (SECA)	SO _x παγκοσμίως
2000	1,5%	4,5%
2010	1,0%	
2012		3,5%
2015	0,1%	
2020		0,5%

Πίνακας 2: Επιτρεπόμενα όρια εκπομπών SO_x κατά MARPOL. (Σπύρου,2020)

Για τα όρια εκπομπής NO_x, γίνεται λόγος στον κανονισμό 13 του προσαρτήματος VI. Ο συγκεκριμένος κανονισμός καθορίζει τις ποσότητες των NO_x που επιτρέπεται να εκπέμπονται από ένα πλοίο ανά kWh. Τα επίπεδα εκπομπών είναι τρία, τα Tier I-III. Το επίπεδο 1 (Tier I) ισχύει για μηχανές εγκατεστημένες σε πλοία που κατασκευάστηκαν κατά ή μετά την 1/1/2020, το Tier II αφορά μηχανές εγκατεστημένες σε πλοία με ημερομηνία κατασκευής κατά ή μετά την 1/1/2011. Στο Tier III συναντώνται τα αυστηρότερα όρια και ισχύουν μόνο τις ειδικές περιοχές ελέγχου εκπομπής για τα NO_x (NECAs), αφορούν μηχανές που κατασκευάστηκαν κατά ή μετά την 1/1/2016 (Κοτρίκλα, 2015) (Σπύρου, 2020) (IMO, 1978).



Διάγραμμα 4: Επιτρεπόμενα όρια εκπομπών NO_x κατά MARPOL. (Σπύρου,2020)



Εικόνα 4: Περιοχές ελέγχου εκπομπών αερίων (Fagerholt, Gausel, Rakke & Psaraftis, 2014)

2.4.3 Δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας (EEDI)

Ο δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας αφορά τα νέα πλοία με ολική χωρητικότητα 400 GT και άνω. Στόχος της ναυτιλίας είναι να ελαττωθούν οι εκπομπές CO₂ μέσω της χρήσης του EEDI. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός είναι με την χρήση του δείκτη να βελτιωθεί η υδροδυναμική σχεδίαση γάστρας-έλικας για τις διάφορες κατηγορίες πλοίων, έτσι ώστε να εγκαθίστανται στα νεότευκτα πλοία λιγότερο ενεργοβόρες κύριες μηχανές και βοηθητικά μηχανήματα. Ο EEDI περιγράφει την παραγωγή CO₂ (σε γραμμάρια) ανά μονάδα μεταφορικής ικανότητας – απόστασης (σε τόνο-μίλια). Όσο μικρότερη είναι η τιμή του ενεργειακού δείκτη αποδοτικότητας, τόσο ενεργειακά αποδοτικότερο είναι το πλοίο (Κοτρίκλα, 2015) (Σπύρου, 2020) (IMO, 2014).

Αναλυτικότερα, ο δείκτης EEDI μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$EEDI = \frac{P \times SFOC \times C_F}{Capacity \times V_{ref}}$$

Όπου,

- P είναι η ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του πλοίου σε σταθερή ταχύτητα V.
- SFOC είναι ο ειδικός συντελεστής κατανάλωσης, δηλαδή η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται από την κύρια μηχανή ανά μονάδα ενέργειας που παράγει σε (g/kWh).

- C_F είναι αδιάστατος συντελεστής εκπομπής που βασίζεται στο περιεχόμενο του καυσίμου σε άνθρακα και αποδίδει την ποσότητα CO₂ σε γραμμάρια που εκπέμπεται από την καύση μιας ποσότητας καυσίμου.
- V_{ref} είναι η ταχύτητα αναφοράς του πλοίου (από τον σχεδιασμό του) σε κόμβους στην μέγιστη κατάσταση φόρτωσης.

Η πληρέστερη μορφή του EEDI, παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFOC_{ME(i)}) + (P_{AE} C_{FAE} SFOC_{AE})}{f_i \times f_c \times f_l \times Capacity \times Vref \times f_w} + \frac{\{(\prod_{j=1}^M f_j \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{AEff(i)}) C_{FAE} SFOC_{AE}\} - (\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFOC_{ME})}{f_i \times f_c \times f_l \times Capacity \times Vref \times f_w}$$

Όπου,

- $P_{ME(i)}$ είναι η ισχύς των κύριων μηχανών στο 75% του MCR. Στον κανονισμό αναφέρεται ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση του αξονικού κινητήρα στην ενίσχυση της προωστήριας ισχύος (Power Take In-PTI) και της αξονικής γεννήτριας στην απώλεια της προωστήριας ισχύος (Power Take Off-PTO).
- P_{AE} είναι η ισχύς των βοηθητικών μηχανών.
- $P_{PTI(i)}$ είναι το 75% της ισχύς κάθε εγκατεστημένου αξονικού κινητήρα.
- $P_{eff(i)}$ το 75% της μείωσης της μηχανικής ισχύς σε kW που οφείλεται σε τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας.
- $P_{AEff(i)}$ είναι το ποσό της μείωσης της ηλεκτρικής ισχύς σε kW από την εφαρμογή τεχνολογιών ηλεκτρικής ενεργειακής εξοικονόμησης.
- V_{ref} είναι η ταχύτητα αναφοράς του πλοίου σε κόμβους στην μέγιστη κατάσταση φόρτωσης.
- SFOC είναι ο ειδικός συντελεστής κατανάλωσης, δηλαδή η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται από την κύρια μηχανή ανά μονάδα ενέργειας που παράγει σε (g/kWh).
- C_F είναι αδιάστατος συντελεστής εκπομπής που βασίζεται στο περιεχόμενο του καυσίμου σε άνθρακα και αποδίδει την ποσότητα CO₂ σε γραμμάρια που εκπέμπεται από την καύση μιας ποσότητας καυσίμου.
- f_j είναι ένας διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα ειδικά σχεδιαστικά στοιχεία του πλοίου.
- f_w είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που υποδεικνύει τη μείωση της ταχύτητας σε συγκεκριμένο ύψος κύματος, συχνότητα κυματισμού και ταχύτητα ανέμου σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες θάλασσας.
- $f_{eff(i)}$ είναι ο παράγοντας διαθεσιμότητας κάθε νεάς τεχνολογίας ενεργειακής αποδοτικότητας.
- f_i είναι ο συντελεστής χωρητικότητας για οποιονδήποτε περιορισμό χωρητικότητας που επιβάλλεται από τεχνικούς ή ρυθμιστικούς περιορισμούς.

- f_c είναι ένας συντελεστής διόρθωσης που αφορά την χωρητικότητα σε κυβικά πόδια ή μέτρα.

2.4.4 Σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (Ship energy efficiency management plan)

Το σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (SEEMP) είναι ένα υποχρεωτικό λειτουργικό μέτρο που θεσπίστηκε από τον IMO και αφορά όλα τα πλοία με ολική χωρητικότητα άνω των 400 GT που εκτελούν διεθνείς πλόες. Το SEEMP απαιτείται από την 1/1/2013 για την έκδοση του διεθνούς πιστοποιητικού ενεργειακής αποδοτικότητας (International Energy Efficiency Certificate-IEEC). Αναλυτικότερα, ο στόχος ενός SEEMP είναι η δημιουργία ενός μηχανισμού για μια πλοιοκτήτρια εταιρεία που θα οδηγήσει στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου.

Τα τέσσερα κύρια σημεία του SEEMP είναι:

- Σχεδιασμός
- Υλοποίηση
- Παρακολούθηση
- Αυτοαξιολόγηση και βελτίωση

Τα παραπάνω, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για την συνεχή ανάγκη βελτίωσης και διαχείρισης της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου. Συγκεκριμένα, η φάση του σχεδιασμού αποτελεί ένα από τα κρισιμότερα στάδια του SEEMP, αφού μέσω του σχεδιασμού καθορίζεται η τρέχουσα ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, αλλά και η αναμενόμενη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μέσω των νέων μέτρων που θα εφαρμοστούν. Επομένως, χρειάζεται να δοθεί έμφαση στην φάση της σχεδίασης, ώστε να επιτευχθεί ένα κατάλληλο και αποτελεσματικό πλάνο.

Στην φάση της υλοποίησης του SEEMP, απαιτούνται συγκεκριμένες δράσεις ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες αλλαγές στα πλοία, τις λειτουργικές τους διαδικασίες και τον τρόπο διαχείρισής τους. Στο στάδιο αυτό, ανατίθενται αρμοδιότητες για κάθε στοιχείο του SEEMP, υλοποιούνται αλλαγές στις διαδικασίες και τον εξοπλισμό του πλοίου και το πλήρωμα του πλοίου εκπαιδεύεται κατάλληλα.

Κατά την παρακολούθηση, η ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου πρέπει να παρακολουθείται ποσοτικά με συγκεκριμένη μέθοδο που συμφωνεί με τα διεθνή πρότυπα. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ο δείκτης αποδοτικής ενεργειακής λειτουργίας του πλοίου (Energy Efficiency Operational Indicator-EEOI). Ο EEOI αποτελεί ένα διεθνώς καθιερωμένο εργαλείο για την εποπτεία της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός πλοίου ή στόλου. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος δείκτης δύναται να επηρεαστεί από αλλαγές στην λειτουργία των πλοίων, σε αντίθεση με τον EEDI που συνδέεται με τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Ακόμη, ο EEOI χρησιμοποιεί τις πραγματικές εκπομπές CO₂ και το πραγματικό μεταφορικό έργο του πλοίου κατά την διάρκεια ενός ταξιδιού.

Το τελικό στάδιο του SEEMP, είναι η αυτοαξιολόγηση και βελτίωση. Κατά το στάδιο αυτό, κρίνεται αναγκαίο να παράγεται ουσιαστική ανατροφοδότηση πληροφοριών για το επόμενο στάδιο, δηλαδή για το στάδιο του επανασχεδιασμού του επόμενου κύκλου βελτίωσης. Συγκεκριμένα, στο στάδιο αυτό αξιολογείται η αποτελεσματικότητα των σχεδιαζόμενων μέτρων και η εφαρμογή τους. Επίσης, η αυτοαξιολόγηση θα πρέπει να εφαρμόζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα με την χρήση δεδομένων που συλλέγονται στο στάδιο της παρακολούθησης (Κοτρίκλα, 2015) (IMO, 2012).

2.5 Ο μελλοντικός ρόλος και η συμβολή της ναυτιλίας στο εγχείρημα της δέσμευσης CO₂

Σύμφωνα με την έκθεση αξιολόγησης του 2021, της διακυβερνητικής επιτροπής για την κλιματική αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC), η ανθρώπινη δραστηριότητα αποτελεί την βασική αιτία για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Επιπλέον, στην έκθεση αναφέρεται ότι πιθανότατα η μέση θερμοκρασία του πλανήτη θα ξεπεράσει, κατά την διάρκεια του 21^{ου} αιώνα, την αρχική εκτίμηση του 1,5-2°C. Ακόμη, γίνεται λόγος για την ανάγκη ριζικών αλλαγών, στην μείωση και στην διαχείριση των ρύπων και ειδικά του CO₂. Επίσης, σύμφωνα με το προσχέδιο της συμφωνίας της Γλασκώβης, ο περιορισμός της υπερθέρμανσης του πλανήτη στους 1,5°C μέχρι το 2100 απαιτεί ταχεία και διαρκή μείωση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Det Norske Veritas, 2022).

Παλαιότερα, οι λύσεις που αναζητούνταν, αλλά και η κύρια θεματολογία των μελετών επικεντρώνονταν στις στρατηγικές για μείωση των εκπομπών αερίων, τα εναλλακτικά καύσιμα και στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια προκρίνεται όλο και περισσότερο το ζήτημα της γεωλογικής αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Capture&Storage-CCS). Η τεχνολογία της δέσμευσης και αποθήκευσης θα είναι απαραίτητη για την επίτευξη της μελλοντικής μείωσης των εκπομπών του CO₂. Σύμφωνα με τον Det Norske Veritas (DNV) σε μία μελέτη που κυκλοφόρησε, «Οι τεχνολογίες δέσμευσης και αφαίρεσης άνθρακα είναι απαραίτητες» για να υπάρχουν πιθανότητες να μην ξεπεραστεί το όριο των 1,5°C (Det Norske Veritas, 2022).

Το περιβαλλοντικό αδιέξοδο στο οποίο έχει περιέλθει ο πλανήτης και γενικότερα η ανθρωπότητα δεν βρίσκει την ναυτιλιακή κοινότητα αμέτοχη. Η γεωλογική αποθήκευση CO₂, κερδίζει συνεχώς «έδαφος» και η ναυτιλιακή κοινότητα καλείται να συμβάλλει σε ένα από τα βασικότερα προβλήματα που ενέχει η προσπάθεια αυτή. Η μεταφορά των μεγάλων ποσοτήτων CO₂ που θα πρέπει να προωθούνται από τον τόπο εκπομπής προς τον τόπο αποθήκευσης, αποτελεί ένα από τα κυριότερα προβλήματα αυτού του εγχειρήματος. Η μεταφορά του CO₂ δια θαλάσσης, προς την αποθήκευση στους χώρους γεωλογικής αποθήκευσης, φαίνεται να είναι η επικρατέστερη λύση σε τόπους που η μεταφορά μέσω αγωγών είναι ανέφικτη. Όπως παρατίθεται στο άρθρο των Cartwright, Sørhaug (2022), σύμφωνα με τον Erik Mathias Sørhaug, «η ναυτιλία προσφέρει ασφαλή, αξιόπιστη και ευέλικτη μεταφορά κατάλληλη για μικρότερες αποστάσεις και χαμηλούς έως μεσαίους όγκους». Επιπλέον, αναφέρει ότι «η κλιμάκωση της παγκόσμιας χωρητικότητας των CCS θα απαιτήσει στόλο εξειδικευμένων δεξαμενόπλοιων με

δυνατότητα συλλογής CO₂ από τις τοποθεσίες δέσμευσης που λειτουργούν σε πολλά διαφορετικά βιομηχανικά τμήματα».

Η κυβέρνηση της Νορβηγίας στις 15 Δεκεμβρίου του 2020, ανακοίνωσε την χρηματοδότηση ενός έργου με το όνομα «Longship». Το Longship θα επικεντρωθεί στην μεταφορά και την αποθήκευση του CO₂. Επιπλέον, για το εγχείρημα αυτό, θα κατασκευαστούν δύο πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO₂ με μέγεθος της τάξης των 7.500 κυβικών μέτρων (Det Norske Veritas, 2022). Παράλληλα, η Ιαπωνική Mitsubishi Heavy Industries, αναπτύσσει σχέδια για την δημιουργία ενός LCO₂ carrier έως το 2025, λόγω της ζήτησης που θα αναπτυχθεί από την αγορά, για την υποστήριξη των έργων γεωλογικής δέσμευσης του CO₂ (Jiang, 2021).

Κεφάλαιο 3 Μέθοδοι δέσμευσης, μεταφοράς και αποθήκευσης του CO₂

3.1 Εισαγωγή

Η ανάγκη των ανθρώπων για παραγωγή ενέργειας συνδέθηκε αναπόφευκτα με την χρήση ορυκτών καυσίμων. Η καύση των ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει στο κύριο περιβαλλοντικό πρόβλημα της εποχής μας, το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παράλληλα, η άνθιση του διεθνούς εμπορίου, καθώς και η ανάγκη των ανθρώπων για μετακινήσεις αυξάνουν με την σειρά τους τις συγκεντρώσεις των αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το κυριότερο από τα αέρια που συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το CO₂.

Με την πάροδο των χρόνων, η παγκόσμια κοινότητα προσπαθώντας να μειώσει την αυξανόμενη ποσότητα CO₂ στην ατμόσφαιρα του πλανήτη λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας, έχει στραφεί σε λύσεις όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ θεωρούνται ως μια αποδεκτή λύση για την αντιμετώπιση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα, αλλά κατά κύριο λόγο έχουν προκριθεί ως λύση στο αναμενόμενο πρόβλημα της εξάντλησης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, το

συνολικό μερίδιο των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα πρέπει να γνωρίσει ρυθμούς αύξησης έξι φορές μεγαλύτερους, προκειμένου να διατηρηθεί η άνοδος της μέσης θερμοκρασίας της Γής κάτω από 2°C μέχρι το 2100, σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα (Wikipedia contributors, 2023; IRENA, 2019).

Σύμφωνα με την ΙΕΑ, για να επιτευχθεί ο στόχος που τέθηκε από την συμφωνία του Παρισιού, απαιτείται να αποθηκεύεται τουλάχιστον 1 Gt CO₂ ετησίως έως το 2030. Επιπλέον, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή αναφέρει ότι η δέσμευση και η αποθήκευση του CO₂ αποτελεί μια τεχνολογία ικανή να συνεισφέρει στην εκπλήρωση των στόχων που έχουν τεθεί και αφορούν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (IPCC, 2018) (ΕΔΕΥ Α.Ε., 2020)

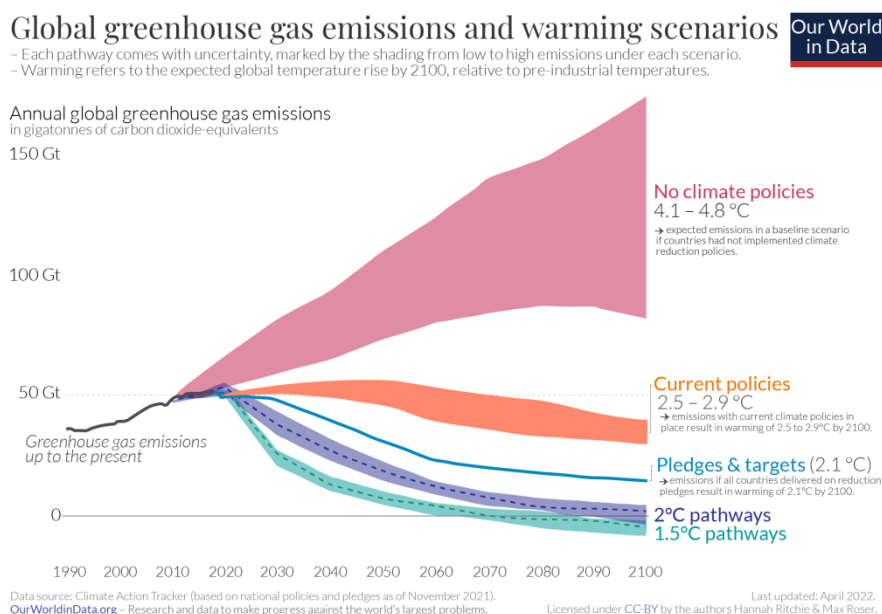
Η τεχνολογία της δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂ (Carbon capture and storage (CCS)), στοχεύει στον διαχωρισμό, τη μεταφορά και τη μόνιμη υπόγεια γεωλογική αποθήκευση του CO₂. Τα τελευταία χρόνια προκρίνεται ως η βασική ιδέα για την διαχείριση των αέριων εκπομπών του CO₂, ώστε να μπορέσει η ανθρωπότητα να βγει από το περιβαλλοντολογικό τέλμα στο οποίο έχει περιέλθει (Budinis, Krevor, Dowell, Brandon, & Hawkes, 2018). Η χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας αναμένεται να συνεχιστεί και τις επόμενες δεκαετίες. Έτσι, η τεχνολογία CCS μπορεί να εφαρμοστεί σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και μεγάλες βιομηχανικές μονάδες παγκοσμίως με στόχο την μείωση των συγκεντρώσεων CO₂ στην ατμόσφαιρα του πλανήτη (Scott, Gilfillan, Markusson, Chalmers, & Haszeldine, 2012). Κατά την τεχνολογία CCS, το CO₂ εξάγεται σε κάποιο σημείο της γραμμής παραγωγής και στην συνέχεια προετοιμάζεται για την μεταφορά στο χώρο της υπόγεια γεωλογικής αποθήκευσης, όπου αποθηκεύεται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται ή αποφεύγεται εξ' ολοκλήρου η διαφυγή του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Επομένως, η CCS μπορεί να επιτρέψει την μελλοντική χρήση των ορυκτών καυσίμων και παράλληλα να συμβάλλει στην συνεχή μείωση των εκπομπών CO₂ (Feron & Hendriks, 2005).

3.2 Συμφωνία του Παρισιού

Η συμφωνία του Παρισιού, αποτελεί μια διεθνή συνθήκη για την κλιματική αλλαγή που εγκρίθηκε το 2015 από 196 κράτη που συμμετείχαν στην συνδιάσκεψη αυτή. Στις 22 Απριλίου του 2016 σε τελετή που πραγματοποιήθηκε στην Νέα Υόρκη, η συμφωνία άνοιξε προς υπογραφή από τα κράτη που συμμετείχαν στην συνδιάσκεψη του 2015. Έπειτα από την υπογραφή της συμφωνίας από την ΕΕ, αρκετές χώρες προχώρησαν στην επικύρωση. Στις 4 Νοεμβρίου του 2016 η συμφωνία τέθηκε σε ισχύ αφού επικυρώθηκε από τουλάχιστον 55 κράτη που αντιπροσωπεύουν το 55% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Από τον Νοέμβριο του 2021, 193 μέλη της Σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) έχουν επικυρώσει την συμφωνία. Οι ΗΠΑ, το δεύτερο μεγαλύτερο κράτος σε παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου, αποχώρησαν από την συμφωνία το 2020 για οικονομικούς λόγους, αλλά εντάχθηκαν εκ νέου το 2021 (United Nations, 2015).

Η συμφωνία του Παρισιού έχει δομή «από κάτω προς τα πάνω» και έτσι διαφοροποιείται από τις περισσότερες διεθνείς συνθήκες περιβαλλοντικού δικαίου, οι οποίες έχουν δομή «από πάνω προς τα κάτω». Με τον τρόπο αυτό, δίνεται έμφαση στην οικοδόμηση συναίνεσης, επιτρέποντας στα κράτη μέλη να θέτουν εθνικά καθορισμένους στόχους σε ότι αφορά τις εκπομπές αερίων. Επομένως, οι συγκεκριμένοι στόχοι δεν είναι νομικά δεσμευτικοί, αλλά η αναφορά και η αναθεώρηση αυτών διέπεται από το διεθνές δίκαιο (United Nations, 2015).

Κύριος στόχος της συμφωνίας του Παρισιού είναι να διατηρηθεί η άνοδος της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη πολύ κάτω από τους 2°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα και με επιθυμητή προσέγγιση τους 1,5°C. Η συμφωνία αναγνωρίζει ότι η επίτευξη του στόχου των 1,5 °C θα μείωνε σημαντικά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Για να εκπληρωθεί ο στόχος που έχει τεθεί θα πρέπει να μειωθούν οι εκπομπές στο 50% έως το 2030. Επιπλέον, κάθε κράτος μέλος που έχει υπογράψει την συμφωνία πρέπει να καθορίζει και να αναφέρει τακτικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η συμφωνία δεν υποχρεώνει μια χώρα να θέτει συγκεκριμένους στόχους εκπομπών, αλλά είναι αναγκαίο κάθε νέος στόχος που τίθεται να μην υπερβαίνει τους παλαιότερους επιτευχθέντες στόχους (United Nations, 2015).



Εικόνα 5: Σενάρια για τις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η μέση αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το 2100 θα εξακολουθήσει να υπερβαίνει το μέγιστο στόχο των 2°C που ορίζει η συμφωνία του Παρισιού, ακόμα και αν οι χώρες επιτύχουν τις τρέχουσες δεσμεύσεις. Πηγή: OurWorldinData.org (Ritchie, Roser, 2022)

3.3 Ευρωπαϊκή οδηγία 2009/31/ΕΚ

Η οδηγία 2009/31/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, αναφέρεται στην αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Σύμφωνα με την οδηγία, εκτιμάται ότι η δέσμευση και η αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς αποτελεί μια τεχνολογία που

θα συμβάλλει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Επίσης, αναφέρεται πως η τεχνολογία CCS δεν θα πρέπει να αποτελέσει αφορμή για την αύξηση της παραγωγής των μονάδων που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, αλλά η ανάπτυξη της πρέπει σε συνεργασία με τις ΑΠΕ και άλλες αειφόρες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα να αποτελέσει εφελκυστήριο για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις για την παρούσα οδηγία αναφέρουν πως εάν η τεχνολογία CCS λάβει εθνική και κοινοτική στήριξη υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης 160 εκατομμυρίων τόνων CO₂ έως το 2030. Παράλληλα, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο τον Μάρτιο του 2007 ενθάρρυνε τα κράτη μέλη να εργασθούν με σκοπό να αναπτύξουν το αναγκαίο τεχνικό, οικονομικό και κανονιστικό πλαίσιο ώστε να καθιερωθεί η τεχνολογία CCS στους νέους σταθμούς παραγωγής ρεύματος που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα έως το 2020. Επιπροσθέτως, στην οδηγία καθορίζεται σαφώς ότι κάθε κράτος μέλος μπορεί να εφαρμόσει την CCS εντός της επικράτειας του, εντός των αποκλειστικών οικονομικών ζωνών του και στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, Συμβούλιο της ΕΕ, 2018).

Κύριος σκοπός της οδηγίας 2009/31/ΕΚ είναι η θέσπιση ενός νομικού πλαισίου για την αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς, με στόχο την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, εκτός από το αντικείμενο και το σκοπό, εντός της οδηγίας αναφέρεται το πεδίο εφαρμογής και απαγορεύσεις. Ακόμα, παρατίθεται σαφώς η μεθοδολογία επιλογής των τόπων αποθήκευσης του CO₂, καθώς και οι υποχρεώσεις των κρατών μελών κατά την περίοδο λειτουργίας των CCS και μετά το κλείσιμο αυτών (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, Συμβούλιο της ΕΕ, 2018).

3.4 Μέθοδοι δέσμευσης

Η δέσμευση του CO₂ μπορεί να εφαρμοστεί σε σημεία εκπομπών μεγάλης κλίμακας, όπως σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στα διυλιστήρια και στις βιομηχανίες παραγωγής λιπασμάτων. Επιπλέον, μπορεί να έχει εφαρμογή σε βιομηχανικούς τομείς όπως στην παραγωγή τσιμέντου, σιδήρου, χάλυβα κ.α. Η τεχνολογία CCS μπορεί να συνεισφέρει τα μέγιστα στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως, ειδικότερα εάν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε τόπους με έντονη βιομηχανική παραγωγή. Ακόμα, οι διάφορες τεχνολογίες διαχωρισμού και δέσμευσης του CO₂ λειτουργούν εδώ και δεκαετίες στις βιομηχανίες λιπασμάτων και φυσικού αερίου και πρόσφατα έχουν εισαχθεί στον τομέα της παραγωγής ενέργειας (Global CCS Institute, 2018).

Η ενέργεια που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα απελευθερώνεται κατά την διαδικασία της καύσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή CO₂ στην ατμόσφαιρα ως υποπροϊόν. Στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής όπου χρησιμοποιείται ο άνθρακας, κονιοποιείται σε σκόνη, έτσι το CO₂ πρέπει να διαχωρίζεται σε αραιωμένες συγκεντρώσεις από την ισορροπία των καυσαερίων της καύσης. Σε άλλα συστήματα, όπου ο άνθρακας μετατρέπεται σε χημικά, φυσικό αέριο ή υγρά, το CO₂ μπορεί να διαχωριστεί πιο εύκολα (Global CCS Institute, 2018).

Οι τρεις επικρατέστεροι τρόποι δέσμευσης του CO₂ είναι οι εξής:

- Δέσμευση του CO₂ πριν από την καύση (pre-combustion capture)
- Δέσμευση του CO₂ μετά από την καύση (post-combustion capture)
- Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (oxyfuel combustion)

Οι παραπάνω διαδικασίες δέσμευσης του CO₂ μπορούν να εφαρμοστούν σε εργοστάσια και βιομηχανίες όπου χρησιμοποιούνται τόσο τα ορυκτά καύσιμα όσο και η βιομάζα. Ωστόσο, οι λεπτομέρειες στον σχεδιασμό της κάθε διαδικασίας διαφέρει ανάλογα με τον τύπο καύσιμου και τον τύπο του εργοστασίου. Επίσης, ο σχεδιασμός, η λειτουργία και το κόστος των διαδικασιών δέσμευσης διαφέρει ανάλογα με την περιεκτικότητα του άνθρακα σε θείο (Feron & Hendriks, 2005).

3.4.1 Δέσμευση του CO₂ πριν την καύση (pre-combustion capture)

Στην δέσμευση πριν από την καύση πραγματοποιείται απανθρακοποίηση του πρωτογενούς καύσιμου, με σκοπό την μετατροπή του σε υδρογόνο (H₂) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO) για να σχηματιστεί ένα συνθετικό αέριο (Synthesis gas, syngas). Για την παραγωγή του συνθετικού αερίου, είτε προστίθεται ατμός στο πρωτεύον καύσιμο (αναμόρφωση με ατμό), είτε έχουμε την πρόσμιξη του πρωτεύοντος καύσιμου με οξυγόνο. Όταν η τελευταία περίπτωση εφαρμόζεται σε αέρια ή υγρά καύσιμα, η διαδικασία ονομάζεται «μερική οξείδωση». Στον αντίποδα, όταν εφαρμόζεται σε στερεό καύσιμο ονομάζεται «αεριοποίηση» (Jansen, Gazzani, Manzolini, van Dijk, & Carbo, 2015) (Basile, Gugliuzza, Iualianelli, & Morrone, 2011).

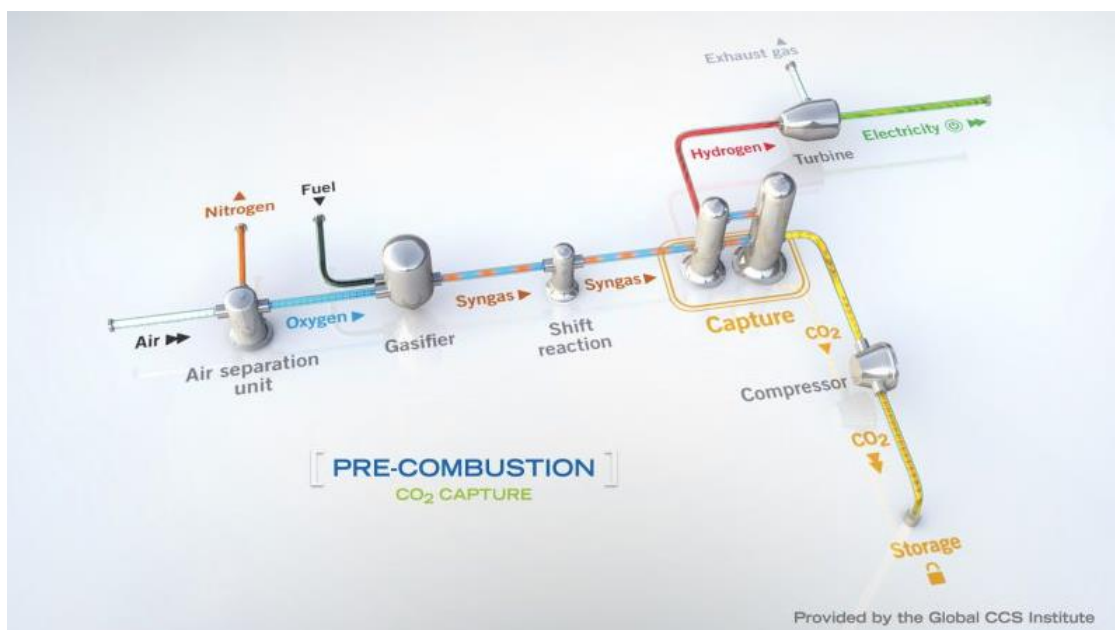
Το CO αντιδρά με ατμό σε έναν καταλυτικό αντιδραστήρα με σκοπό την μετατροπή του σε CO₂, σε μία διαδικασία που ονομάζεται «αντίδραση μετατόπισης» νερού – αερίου (Water-Gas shift (WGS)). Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, επιτυγχάνεται διαχωρισμός του CO₂ περίπου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος καθιστώντας έτσι εφικτή την αποθήκευσή του. Επιπλέον, το πλούσιο σε H₂ συνθετικό αέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα για την παραγωγή ενέργειας. Ο διαχωρισμός των CO₂-H₂ αποτελεί ευκολότερη διαδικασία σε σύγκριση με το διαχωρισμό των CO₂-N₂ που συναντάται στην δέσμευση μετά την καύση, λόγω της μεγαλύτερης διαφοράς στα μοριακά βάρη. Η συγκέντρωση του CO₂ κατά το στάδιο του διαχωρισμού CO₂-H₂ είναι της τάξης του 30% κατ' όγκο και η συνολική πίεση κυμαίνεται μεταξύ 20-70 bar. Η υψηλή αυτή πίεση καθιστούν την διαδικασία διαχωρισμού και συμπίεσης του CO₂ λιγότερο ενεργοβόρα, σε σχέση με την δέσμευση του CO₂ μετά την καύση όπου η συνολική πίεση και η συγκέντρωση του CO₂ συναντώνται σε μικρότερες τιμές. Ωστόσο, η ενεργειακή ζήτηση μεταξύ των δύο διαδικασιών εξισορροπείται, καθώς στην διαδικασία πριν την καύση υπάρχουν σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις που αφορούν στον διαχωρισμό του αέρα, την αεριοποίηση και τις απώλειες στην ανάκτηση ενέργειας κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας του συνθετικού αερίου (Jansen, Gazzani, Manzolini, van Dijk, & Carbo, 2015) (Rackley, 2010) (Borriάς, 2014).

Η διαδικασία παραμένει η ίδια για τον άνθρακα, το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο. Όμως, όταν χρησιμοποιείται ως πρωτογενές καύσιμο άνθρακα ή πετρέλαιο, κρίνεται αναγκαίο να προστεθούν και άλλα στάδια στην διαδικασία που αφορούν στην απομάκρυνση σωματιδίων τέφρας, ενώσεων θείου και άλλων ακαθαρσιών ή υπολειμμάτων (Jansen, Gazzani, Manzolini, van Dijk, & Carbo, 2015).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Αποτελεί τεχνολογία που συναντάται χρόνια σε διυλιστήρια.
- Επιτυγχάνεται 90-95 % δέσμευση στις εκπομπές του CO₂.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν ως πρωτογενές καύσιμο άνθρακα, φυσικό αέριο ή πετρέλαιο.
- Έχει χαμηλό τεχνολογικό κίνδυνο με δυνατότητα να αποτελέσει την πλέον αποτελεσματική μέθοδο στο μέλλον.

Ωστόσο, η δέσμευση πριν την καύση έχει μεγάλο επενδυτικό κόστος για αποκλειστική νεόδμητη μονάδα. Επιπλέον, απαιτείται η εγκατάσταση και συστημάτων scrubbers, λόγω των υψηλών εκπομπών NO_x. Τέλος, υπάρχει σαφές πρόβλημα που σχετίζεται με τον βαθμό απόδοσης του κύκλου, λόγω της χρήσης του πλούσιου σε υδρογόνο συνθετικού αερίου (Basile, Gugliuzza, Iualianelli, & Morrone, 2011) (Βορριάς, 2014).



Εικόνα 6: Δέσμευση του CO₂ πριν την καύση (pre-combustion capture). Πηγή: (Global CCS Institute, 2022)

3.4.2 Δέσμευση του CO₂ μετά την καύση (post-combustion capture)

Κατά την διαδικασία της δέσμευσης μετά την καύση το CO₂ διαχωρίζεται από τα καυσαέρια που δημιουργούνται από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Τα καυσαέρια,

αποτελούνται από CO₂, N, SO₂, NO₂ και O₂. Αρχικά, τα καυσαέρια υποβάλλονται σε επεξεργασία με στόχο την απομάκρυνση των σωματιδίων, των οξειδίων αζώτου και θείου. Έπειτα, το CO₂ μπορεί να διαχωριστεί από τα υπόλοιπα συστατικά του καυσαερίου. Για να επιτευχθεί ο διαχωρισμός του CO₂ υπάρχουν διάφορες τεχνικές όπως η απορρόφηση (χημική και φυσική), η προσρόφηση, η κρυογονική και η ώσμωση. Επιπλέον, οι ιδιότητες του καυσαερίου είναι αυτές που ορίζουν την επιλογή της κατάλληλης τεχνικής διαχωρισμού (Basile, Gugliuzza, Iualianelli, & Morrone, 2011) (Βορριάς, 2014).

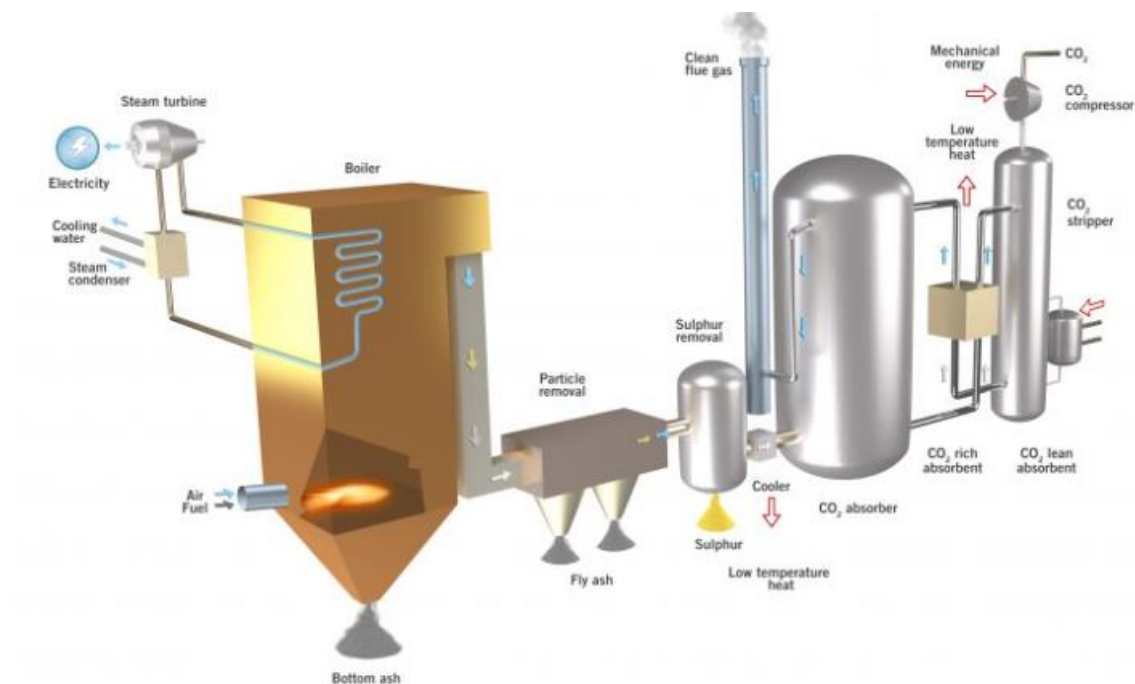
Μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική για τον διαχωρισμό και την δέσμευση του CO₂ είναι αυτή της χημικής απορρόφησης με την χρήση υγρού διαλύτη. Τα υδατικά διαλύματα αλκαλαμινών, όπως οι μονοαιθυλαμίνες, διαιθυλαμίνες, οι μεθυλοδιαιθανολαμίνες και οι επιβραδυντικές αμίνες, χρησιμοποιούνται στην διεργασία αυτή. Γενικά, τα υδατικά διαλύματα αλκαλαμινών απορροφούν επιλεκτικά το CO₂, δεσμεύοντας περισσότερο από το 85% και επιτρέποντας την απελευθέρωση του N και του O₂ στην ατμόσφαιρα (Basile, Gugliuzza, Iualianelli, & Morrone, 2011) (Βορριάς, 2014).

Η τεχνική της προσρόφησης είναι μια φυσική διαδικασία που περιλαμβάνει τη σύνδεση ενός αερίου ή υγρού σε μια στερεή επιφάνεια. Το προσροφητικό υλικό αναγεννάται είτε με την αύξηση της θερμοκρασίας είτε με την μείωση της πίεσης. Στα προσροφητικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δέσμευση του CO₂ περιλαμβάνονται ο ενεργός άνθρακας, αλουμίνα, μεταλλικά οξείδια και ο ζεόλιθος. Η προσρόφηση δεν εφαρμόζεται ακόμη σε μεγάλης κλίμακας επεξεργασία καυσαερίων κυρίως λόγω της χαμηλής ικανότητας προσρόφησης των περισσότερων διαθέσιμων προσροφητικών υλικών. Ακόμα, η απαιτούμενη ενέργεια για την διεργασία της αναγέννησης είναι αρκετά υψηλή (Wang, Lawal, Stephenson, Sidders, & Ramshaw, 2011).

Ο κρυογονικός διαχωρισμός διαχωρίζει το CO₂ από το ρεύμα καυσαερίων με συμπυκνωτή. Σε ατμοσφαιρική πίεση, το CO₂ συμπυκνώνεται στους -56,6 °C. Η διαδικασία του κρυογονικού διαχωρισμού είναι κατάλληλη για την επεξεργασία ρευμάτων καυσαερίων με υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ (συνήθως > 90%), λαμβάνοντας υπόψη το κόστος της ψύξης. Το συνολικό ενεργειακό και οικονομικό κόστος του κρυογονικού διαχωρισμού είναι 30% χαμηλότερο από τις περισσότερες τεχνικές διαχωρισμού μετά την καύση. Επιπλέον, στην μέθοδο αυτή δεν απαιτούνται χημικά απορροφητικά και μπορεί να λειτουργήσει σε ατμοσφαιρική πίεση. Ακόμα, η μέθοδος του κρυογονικού διαχωρισμού επιτυγχάνει την αποτελεσματική απομάκρυνση πολλών ρύπων όπως ο υδράργυρος (Hg), το υδροχλώριο (HCl), τα οξείδια του θείου (SO_x) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x) (Basile, Gugliuzza, Iualianelli, & Morrone, 2011) (Wang, Lawal, Stephenson, Sidders, & Ramshaw, 2011).

Μια εναλλακτική μέθοδος διαχωρισμού είναι η διαδικασία διαχωρισμού του CO₂ με την χρήση μεμβρανών. Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει αρκετές δυνατότητες δέσμευσης του CO₂ λόγω της εύκολης εφαρμογής, της αποτελεσματικότητας και της ικανότητας της να διατηρεί το διαχωρισμένο CO₂ σε υψηλή πίεση, καθώς και να εκτελεί τους διαχωρισμούς με χαμηλή ενεργειακή απαίτηση. Επιπρόσθετα, η χρήση μεμβρανών προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες τεχνικές διαχωρισμού, καθώς έχει απλό σχεδιασμό χωρίς κινούμενα μέρη και χρειάζεται ελάχιστη συντήρηση με χαμηλό κόστος (Basile, Gugliuzza, Iualianelli, & Morrone, 2011).

Μια ακόμη τεχνική που χρησιμοποιείται για την δέσμευση του CO₂ μετά την καύση είναι αυτή της φυσικής απορρόφησης. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την απορρόφηση του CO₂ σε έναν διαλύτη (διμεθυλαιθέρες πολυαιθυλενογλυκόλης, μεθανόλη) και στηρίζεται στον νόμο του Henry. Η αναγέννηση μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μείωση πίεσης, θερμότητα ή και τα δύο. Η απορρόφηση επιτυγχάνεται για υψηλές μερικές πιέσεις CO₂ (Wang, Lawal, Stephenson, Sidders, & Ramshaw, 2011).

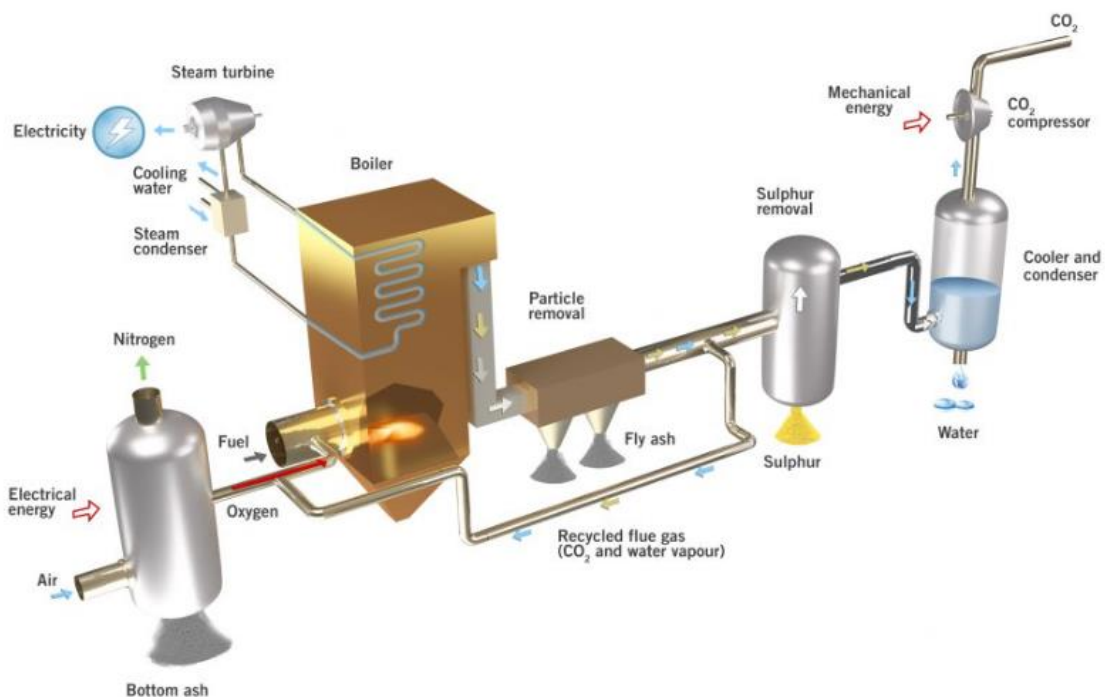


Εικόνα 7: Δέσμευση του CO₂ μετά την καύση (post-combustion capture). (Πηγή: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/>)

3.4.3 Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (Oxyfuel combustion)

Στην μέθοδο της καύσης σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου, το καύσιμο καίγεται παρουσία σχεδόν καθαρού οξυγόνου (περίπου 98%). Έτσι, διασφαλίζεται ότι τα προϊόντα της καύσης περιέχουν CO₂ και νερό με ίχνη μόνο άλλων αερίων. Η ανάκτηση του CO₂ επιτυγχάνεται μέσω συμπύκνωσης από ένα ρεύμα πλούσιο σε CO₂ και νερό, με αρκετά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε N₂ σε σύγκριση με την συμβατική καύση. Το βασικότερο πρόβλημα της μεθόδου είναι ο διαχωρισμός του οξυγόνου από τον αέρα. Ο διαχωρισμός αυτός συνήθως ολοκληρώνεται κρυογονικά, απαιτώντας έτσι, μεγάλη ποσότητα σε ενέργεια. Επιπλέον, το O₂ αναμιγνύεται με τα ανακυκλωμένα καυσαέρια με σκοπό την παραγωγή ενός αερίου εμπλουτισμένου με οξυγόνο για το οξειδωτικό μέσο. Η ανακύκλωση των καυσαερίων είναι απαραίτητη για το μετριασμό των υπερβολικά υψηλών θερμοκρασιών που θα προέκυπταν από την καύση με καθαρό οξυγόνο. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να συνδυαστεί με την χρήση πολλών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα, του φυσικού αερίου ή μιγμάτων βιομάζας και άνθρακα. Η τεχνολογία καύσης με καθαρό οξυγόνο και με ανακυκλοφορία καυσαερίου

αποτελεί μια εφικτή λύση, τόσο σε υπάρχουσες όσο και σε νέες μονάδες (Boot-Handford, et al., 2014)(Basile, Gugliuzza, Iualianelli, & Morrone, 2011) (Βορριάς, 2014).



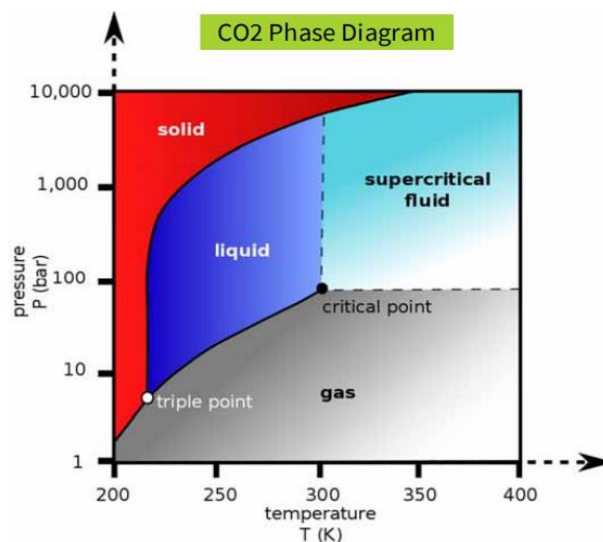
Εικόνα 8: Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (Oxy-fuel combustion) (Πηγή: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/>)

3.5 Μέθοδοι μεταφοράς

Το CO₂ μεταφέρεται συνήθως σε αέρια ή υγρή μορφή μέσω αγωγών και πλοίων σε ειδικά διαμορφωμένες δεξαμενές. Για την μεταφορά του σε αέρια μορφή κοντά σε ατμοσφαιρική πίεση χρειάζονται μεγάλες δεξαμενές και εγκαταστάσεις λόγω του μεγάλου όγκου που καταλαμβάνει. Στην αέρια κατάσταση είναι δυνατόν να καταλαμβάνει λιγότερο όγκο εάν είναι συμπιεσμένο. Επίσης, ο όγκος του μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με υγροποίηση, στερεοποίηση ή ενυδάτωση. Η υγροποίηση είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την μεταφορά αερίων με πλοίο όπως τα LPG (Liquefied Petroleum Gas) και LNG (Liquefied Natural Gas). Η υπάρχουσα τεχνολογία και η εμπειρία από την μεταφορά αερίων μέσω των πλοίων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και στην μεταφορά του CO₂ σε υγρή μορφή. Η τεχνολογία της στερεοποίησης είναι περισσότερο ενεργοβόρα σε σύγκριση με τις άλλες δύο επιλογές (IPCC, 2005).

Το CO₂ έχει τριπλό σημείο στους -54,4°C και σε πίεση 5 bar. Το κρίσιμο σημείο του είναι στους 31,1°C και σε πίεση της τάξης των 73,8bar. Επίσης, για να διατηρηθεί σε υγρή κατάσταση απαιτείται να είναι υπό πίεση πάνω από 5 bar. Για να είναι σε θέση να μεταφερθεί το CO₂ πρέπει να συμπιεστεί σε πίεση της τάξης του κρίσιμου σημείου (δηλ.

πάνω από 73bar) και σε θερμοκρασίες από -56,6°C έως 31,1°C. Επιπλέον, αναγκαία θεωρείται η αφύγρανση του για να αποφευχθούν φαινόμενα διάβρωσης (Borriάς, 2014) (Navarro, 2021).



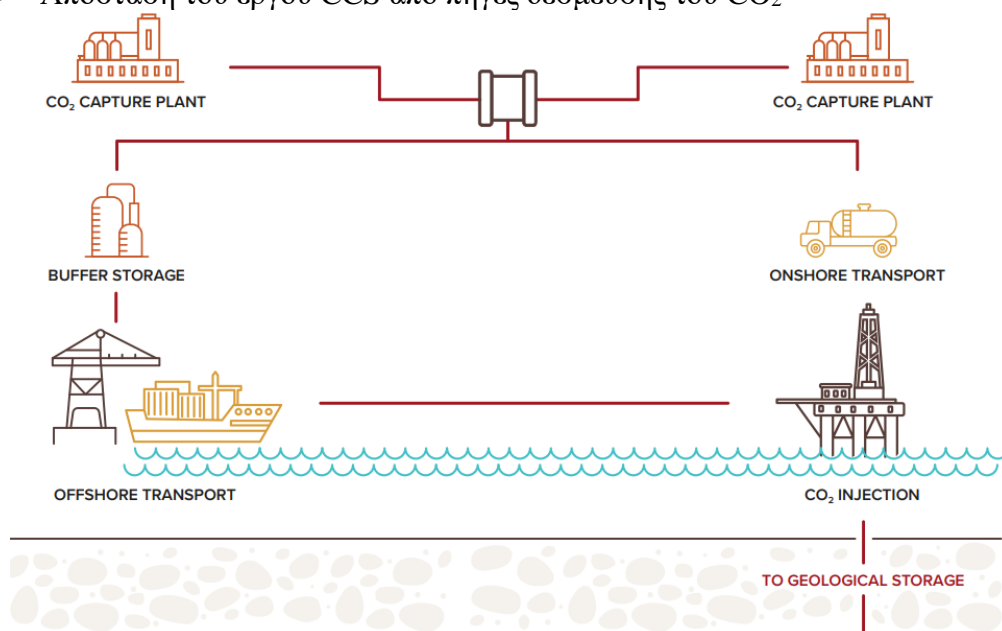
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα φάσεων του CO₂ (Navarro,2021)

Η μεταφορά μέσω αγωγών είναι η συνηθέστερη μέθοδος μεταφοράς πολύ μεγάλων ποσοτήτων CO₂ που αφορούν την τεχνολογία CCS. Παγκοσμίως υπάρχουν ήδη πολλά δίκτυα αγωγών που μεταφέρουν διάφορα αέρια, συμπεριλαμβανομένου και του CO₂. Επίσης, εφικτή θεωρείται η μεταφορά μικρών ποσοτήτων CO₂ με ειδικά διαμορφωμένα φορτηγά, καθώς και μέσω των σιδηροδρομικών δικτύων. Ωστόσο, οι δύο αυτοί τρόποι μεταφοράς είναι απίθανο να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην μεταφορά του CO₂ λόγω των μεγάλων ποσοτήτων που πρόκειται να δεσμευθούν μακροπρόθεσμα. Αντίθετα, η μεταφορά με πλοίο αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή για πολλές περιοχές παγκοσμίως, όπου είναι αδύνατη η μεταφορά μέσω αγωγών. Η μεγάλης κλίμακας μεταφορά CO₂ δια θαλάσσης με την χρήση ειδικά διαμορφωμένων πλοίων χωρητικότητας 10.000-40.000 m³, θεωρείται εφικτή εάν συμπεριλάβουμε και την υπάρχουσα τεχνογνωσία από τα πλοία LPG (Global CCS Institute, n.d.) (Borriάς, 2014) (Navarro, 2021).

Οι παραπάνω μέθοδοι διαθέτουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σύμφωνα με την μελέτη του (Carbon Sequestration Leadership Forum, 2017) για να γίνει σωστή επιλογή του τρόπου μεταφοράς πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω:

- Αριθμός των έργων που πρόκειται να εξυπηρετηθούν
- Πιθανές επιπτώσεις από την διακοπόμενη παροχή και έγχυση του CO₂
- Οικονομία κλίμακας
- Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των υφιστάμενων υποδομών (κυρίως αγωγοί)
- Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του έργου
- Απαιτούμενες ποσότητες CO₂
- Γεωγραφική τοποθεσία του έργου

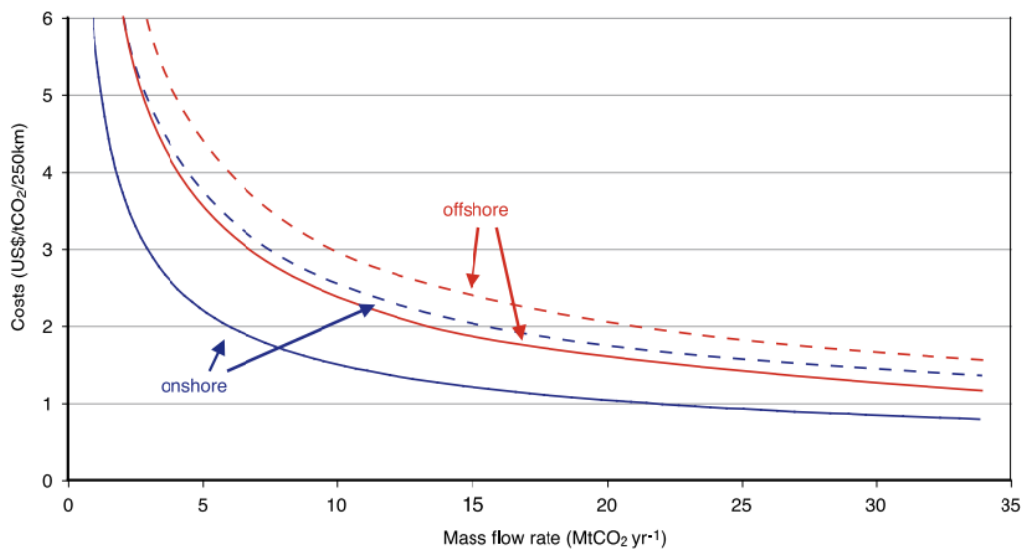
- Απόσταση του έργου CCS από πηγές δέσμευσης του CO₂



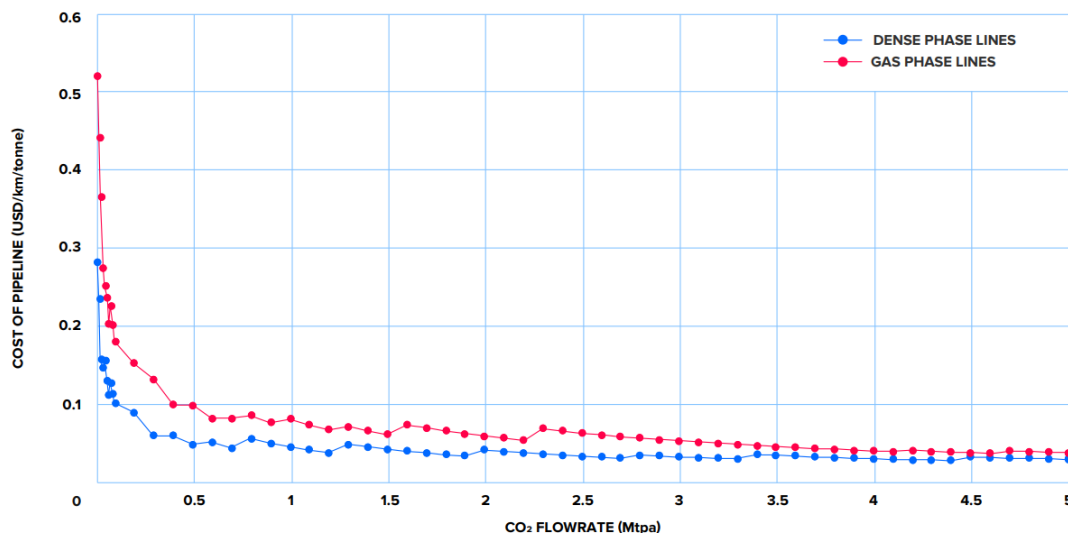
Εικόνα 9: Επισκόπηση των τρόπων μεταφοράς του CO₂ (Πηγή: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/12/Global-CCS-Institute-Fact-Sheet_Transporting-CO2-1.pdf)

3.5.1 Μεταφορά CO₂ μέσω αγωγών

Η μεταφορά ρευστών με την βοήθεια αγωγών αποτελεί μια πάγια τεχνική που χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες στην πετρελαϊκή βιομηχανία. Η πολυετής χρήση των αγωγών παγκοσμίως έχει αναδείξει τυχόν κινδύνους και τεχνικά ζητήματα που χρήζουν αντιμετώπισης. Σύμφωνα με την μελέτη του (Global CCS Institute, 2013), στις ΗΠΑ υπάρχει δίκτυο αγωγών για την μεταφορά του CO₂ που εκτείνεται σε 6.000 χιλιόμετρα. Η μεταφορά μέσω αγωγών δύναται να επεκταθεί εκτός από το χερσαίο περιβάλλον (onshore) και στο θαλάσσιο περιβάλλον (offshore). Το συνολικό κόστος μεταφοράς μέσω αγωγών επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων, όπως τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, το κόστος των εργατικών, το είδος χρήσης των περιοχών από τις οποίες περνάει ο αγωγός (κατοικήσιμες ή μη), φορολογικά δικαιώματα των περιοχών από τις οποίες διέρχεται ο αγωγός, η μορφολογία του εδάφους και η τοποθεσία του αγωγού (χερσαίος ή υποθαλάσσιος). Επιπλέον, το κόστος κατασκευής των χερσαίων αγωγών αυξάνεται κατά πολύ εάν ο αγωγός διέρχεται από πυκνοκατοικημένες περιοχές. Επίσης, η κατασκευή υποθαλάσσιου δικτύου αγωγών είναι κατά κανόνα πιο ακριβή κατά 40-70% από την κατασκευή των χερσαίων αγωγών που καλύπτουν ίδια χιλιομετρική απόσταση. Στο διάγραμμα 5 παρουσιάζεται μια εκτίμηση κόστους για την μεταφορά του CO₂ σε απόσταση 250 χιλιομέτρων μέσω χερσαίων (onshore) και υποθαλάσσιων αγωγών (offshore), συναρτήσει των μεταφερόμενων ποσοτήτων CO₂.



Διάγραμμα 6: Εκτίμηση κόστους μεταφοράς CO₂ σε απόσταση 250 χιλιομέτρων μέσω χερσαίων (onshore) και υποθαλάσσιων(offshore) αγωγών, συναρτήσει των μεταφερόμενων ποσοτήτων CO₂ (IPCC,2005)



Διάγραμμα 7: Εκτίμηση του κόστους μεταφοράς CO₂ σε αέρια και σε υγρή μορφή σε \$/km/tCO₂, συναρτήσει των μεταφερόμενων ποσοτήτων CO₂ (Global CCS Institute,2021)

Η μελέτη της IPCC θέτει ως συνιστώσα κόστους και κατασκευαστικό υλικό των αγωγών τον χάλυβα. Επιπροσθέτως, από τα διαγράμματα 5 και 6 είναι εμφανές ότι το κόστος για την μεταφορά του CO₂ μειώνεται όταν οι μεταφερόμενες ποσότητες αυξάνονται.

Σύμφωνα με την μελέτη της IEA (IEAGHG, 2010) το κόστος ενός δικτύου αγωγών επηρεάζεται σημαντικά από το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται το δίκτυο αγωγών. Έτσι, στην παραπάνω μελέτη παρουσιάζονται συντελεστές συσχέτισης κόστους κατασκευής ενός δικτύου αγωγών για την μεταφορά του CO₂. Οι συντελεστές συσχέτισης κόστους παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

Μορφολογία Εδάφους	Συντελεστής Κόστους
Πεδιάδες	1
Ορεινές περιοχές	2.5
Έρημος	1.3
Δασικές περιοχές	3
Υποθαλάσσια(<500m βάθος)	1.6
Υποθαλάσσια(>500m βάθος)	2.7

Πίνακας 3: Συντελεστές συσχέτισης κόστους κατασκευής δικτύου αγωγών μεταφοράς CO₂, ανάλογα με το περιβάλλον ανάπτυξης του δικτύου (IEAGHG,2010)

Το κόστος κατασκευής ενός δικτύου αγωγών σε ορεινές περιοχές θα ήταν 2,5 μεγαλύτερο σε σύγκριση με την ανάπτυξη του ίδιου δικτύου (υλικά κατασκευής, χιλιομετρική απόσταση) σε επίπεδα εδάφη όπως οι πεδιάδες. Σε δασικές εκτάσεις το κόστος τριπλασιάζεται συγκριτικά με τα επίπεδα εδάφη. Επιπλέον, για την ανάπτυξη ενός υποθαλάσσιου δικτύου το βάθος κατασκευής του δικτύου αγωγών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, καθώς σε βάθη μικρότερα των 500 μέτρων το συνολικό κόστος είναι 1,6 φορές μεγαλύτερο, ενώ σε βάθη μεγαλύτερα των 500 μέτρων το κόστος είναι 2,7 φορές μεγαλύτερο.

Σε μελέτη που διεξήχθη από την Zero Emissions Platform (ZEP, 2011) αναφέρεται ότι για να είναι εφικτή η ανάπτυξη της τεχνολογίας CCS που θα εξυπηρετεί έναν σταθμό παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος χρειάζονται όγκοι της τάξης των 10Mt/έτος. Επιπλέον, παρουσιάζεται το κόστος μεταφοράς του CO₂ (σε €/τόνο CO₂), για ένα εύρος αποστάσεων από 180-1500 χιλιόμετρα.

Απόσταση (km)	180	500	750	1500
Χερσαίο δίκτυο αγωγών (onshore)	1.5	3.7	5.3	-
Υποθαλάσσιο δίκτυο αγωγών (offshore)	3.4	6.0	8.2	16.3

Πίνακας 4: Εκτιμήσεις κόστους για μεγάλης κλίμακας δίκτυα μεταφοράς (20Mt/έτος) CO₂ (ZEP,2011)

Σύμφωνα με το Πίνακα 4, το κόστος μεταφοράς του CO₂ μέσω αγωγών, επηρεάζεται σημαντικά από το απαιτούμενο μήκος του δικτύου. Ακόμα, παρατηρείται ότι η αύξηση του κόστους λόγω της απόστασης αφορά και τα χερσαία αλλά και τα υποθαλάσσια δίκτυα αγωγών. Στην ίδια μελέτη εξετάζεται και το κόστος μεταφοράς του CO₂ για το ίδιο εύρος αποστάσεων, αλλά για μικρότερες ποσότητες ανά έτος. Τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι με την αύξηση των ετήσιων ποσοτήτων που διακινούνται από τα δίκτυα αγωγών επέρχεται μείωση του κόστους μεταφοράς, συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει και η μελέτη υπό την αιγίδα της IPCC η οποία αναφέρεται παραπάνω.

3.5.2 Μεταφορά CO₂ μέσω πλοίου

Η μεταφορά υγροποιημένων και υπό πίεση αερίων με πλοία είναι μια πρακτική που εφαρμόζεται για περισσότερο από 70 χρόνια. Τα πλοία μεταφοράς αερίων χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που μεταφέρουν το φορτίο: Υπό πίεση, σε κατάσταση ημι-ψύξης (Semi-Refrigerated) και σε κατάσταση πλήρους ψύξης (Fully-

Refrigerated). Επιπλέον, τα πλοία μεταφοράς αερίων διαχωρίζονται ανάλογα με τον τύπο αερίου που μεταφέρουν σε τρεις κατηγορίες:

1. Liquefied Petroleum Gas carriers (LPG) (μεταφέρουν κυρίως βουτάνιο, προπάνιο, αμμωνία στους -50°C)
2. Ethylene Carriers (μεταφέρουν φορτία αιθυλενίου και υγραερίου σε θερμοκρασίες έως -104°C)
3. Liquefied Natural Gas carriers (LNG) (μεταφέρουν φυσικό αέριο σε θερμοκρασίες έως -164°C)

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου CO_2 (LCO₂ carriers) θεωρείται παρόμοια με τα πλοία LPG. Επίσης, ο κώδικας IGC (International Gas Code) που έχει θεσπιστεί από τον IMO και αφορά στα πλοία μεταφοράς αερίων, καλύπτει και τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO_2 , επιτρέποντας κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις λόγω της άκαυστης φύσης του CO_2 σε σύγκριση με τα φορτία υδρογονανθράκων. Ως εκ τούτου, οι διεθνείς κανονισμοί για την μεταφορά CO_2 με πλοίο είναι καθιερωμένοι (ZEP, 2011).

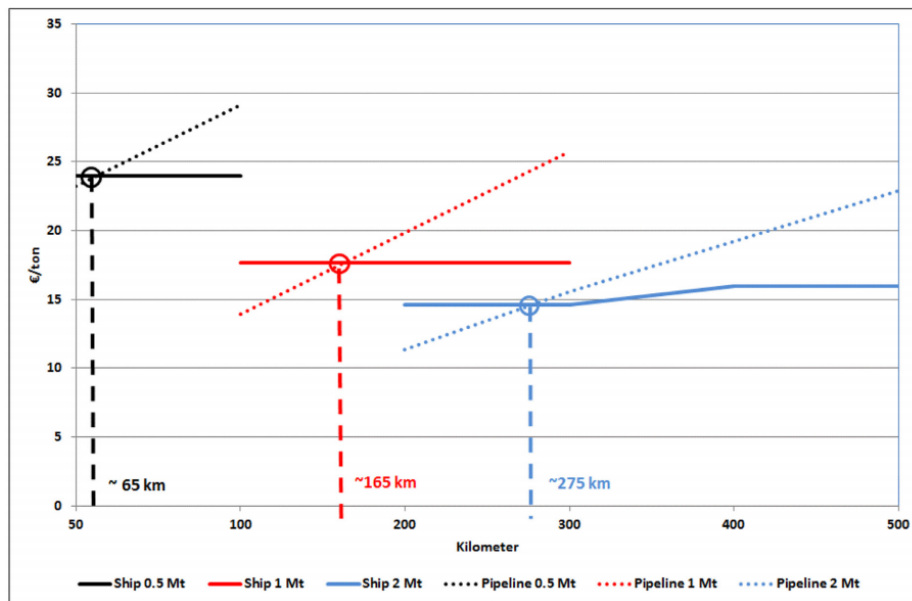
Το υγροποιημένο CO_2 πρέπει να μεταφέρεται σε πίεση άνω των 5,2 bar έτσι ώστε να αποφευχθεί η στερεοποίηση του σε ξηρό πάγο. Τα υπάρχοντα πλοία LCO₂ μεταφέρουν το φορτίο σε πίεση 15-20 bar και σε θερμοκρασία περίπου -30°C . Για τους μεγαλύτερους μεταφερόμενους όγκους CO_2 που θα απαιτηθούν για την τεχνολογία CCS, το CO_2 θα μεταφέρεται σε πίεση 7-9 bar και σε θερμοκρασία περίπου -55°C . Πρακτικά, οι καταστάσεις πίεσης και θερμοκρασίας που χρειάζονται για την μεταφορά του υγροποιημένου CO_2 συναντώνται στα ήδη υπάρχοντα LPG (ZEP, 2011).

Η μεταφορά του CO_2 μέσω πλοίου, πρέπει να προτιμάται όταν το CO_2 μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις και σε σχετικά μικρούς όγκους. Μια από τις βασικότερες διαφορές μεταξύ των δύο κυριότερων μεθόδων μεταφοράς του CO_2 (μεταφορά με πλοίο-μεταφορά με αγωγούς) είναι οι κεφαλαιουχικές δαπάνες που απαιτούνται για την έναρξη του έργου. Η μεταφορά με πλοίο απαιτεί λιγότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες σε σύγκριση με την κατασκευή ενός δικτύου αγωγών που θα καλύπτει μεγάλες χιλιομετρικές αποστάσεις. Ακόμα, το κόστος μεταφοράς του CO_2 μέσω του δικτύου αγωγών επηρεάζεται έντονα από την απόσταση που πρέπει να μεταφερθεί, εν αντιθέσει με την μεταφορά μέσω πλοίου όπου δεν επηρεάζεται σημαντικά (Loeve, et al., 2013).

Σύμφωνα με μελέτη της Zero Emissions Platform (ZEP, 2011), η μεταφορά του CO_2 σε υπεράκτια μονάδα αποθήκευσης μέσω υποθαλάσσιων αγωγών είναι οικονομικότερη επιλογή για αποστάσεις μικρότερες των 500 χιλιομέτρων. Για αποστάσεις άνω των 500 χιλιομέτρων, παρουσιάζεται ως οικονομικότερη επιλογή η μεταφορά μέσω πλοίων.

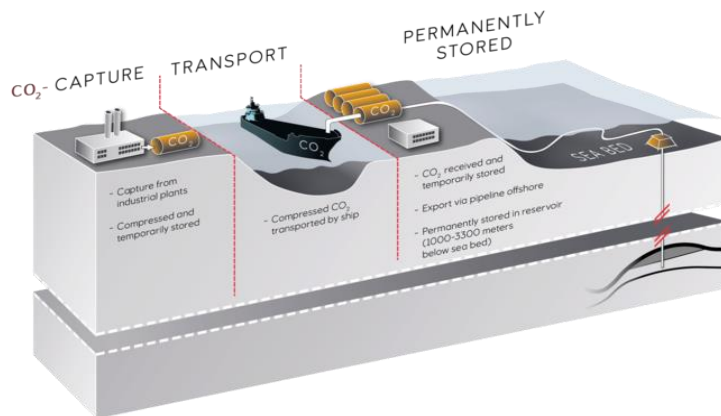
Στην μελέτη της IPCC αναφέρεται ότι για την μεταφορά 6 MtCO₂/έτος σε απόσταση 500 χιλιομέτρων το κόστος ανέρχεται σε 10 $\$/\text{tCO}_2 \cong 9,30 \text{ €/tCO}_2$. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων μεταφοράς (πλοίο-δίκτυο αγωγών), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η μεταφορά με πλοίο είναι η ενδεδειγμένη λύση για την μεταφορά του CO_2 σε μεγαλύτερες αποστάσεις, αφού το κόστος για την μεταφορά 6 MtCO₂/έτος σε απόσταση 1250 χιλιομέτρων θα κόστιζε περίπου 15 $\$/\text{tCO}_2 \cong 14 \text{ €/tCO}_2$. Ωστόσο, τονίζεται ότι για να γίνει επαρκής και σωστή σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες μεταβλητές πέρα από την απόσταση (IPCC, 2005).

Όπως παρατίθεται στην μελέτη των Kjärstad, Skagestad, Eldrup & Johnson (2016), η μεταφορά του CO₂ με πλοίο γίνεται λιγότερο δαπανηρή σε σύγκριση με την μεταφορά μέσω αγωγών, καθώς αυξάνεται η απόσταση και ο μεταφερόμενος όγκος του CO₂. Σύμφωνα με το διάγραμμα 6, το κόστος για την μεταφορά με πλοία αυξάνεται μέτρια συναρτήσει της αυξανόμενης απόστασης, ενώ η μεταφορά με δίκτυο αγωγών παρουσιάζει μια γραμμική αύξηση του κόστους.

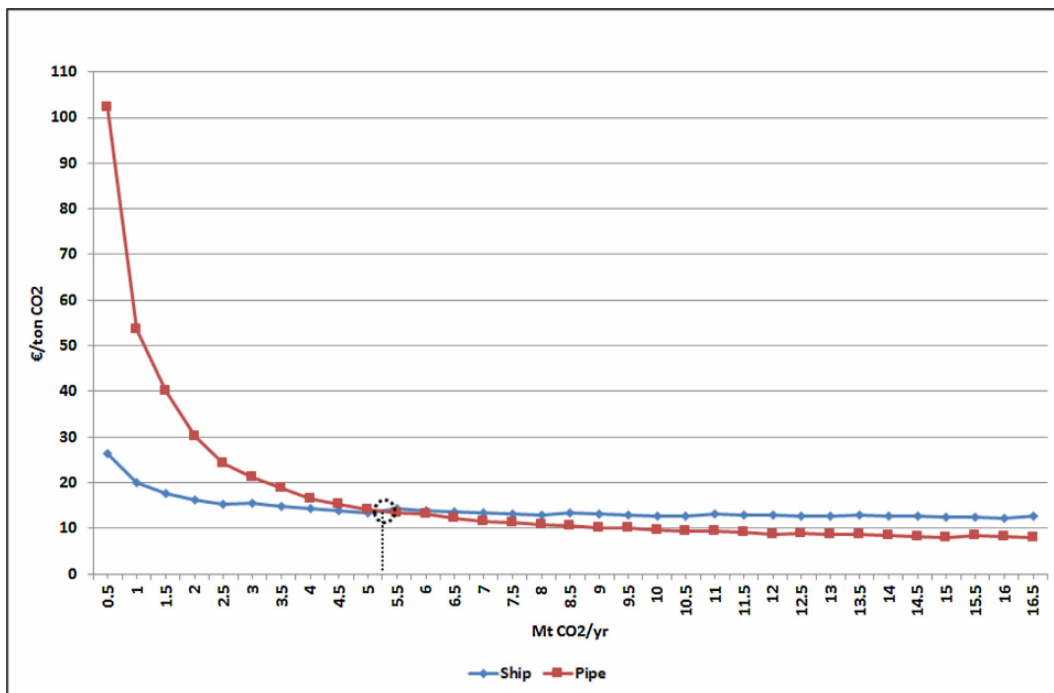


Διάγραμμα 8: Σύγκριση του κόστους μεταφοράς με πλοίο και με δίκτυο αγωγών σε €/tCO₂, συναρτήσει του ετήσιου όγκου μεταφοράς (0,5-2 Mt/έτος) και της απόστασης (Kjärstad, Skagestad, Eldrup & Johnson, 2016)

Επιπλέον, στο διάγραμμα 8 παρουσιάζεται μια σύγκριση του κόστους μεταφοράς του CO₂ σε συνάρτηση με τις διακινούμενες ποσότητες σε ετήσια βάση. Για διακινούμενες ποσότητες μικρότερες των 5,5 MtCO₂/έτος η μεταφορά με πλοίο προκρίνεται ως η οικονομικότερη επιλογή, ενώ, για ποσότητες μεγαλύτερες από αυτή, η μεταφορά μέσω αγωγών είναι η οικονομικότερη επιλογή.



Εικόνα 10: Μεταφορά του CO₂ με πλοίο στην τεχνολογία CCS (Equinor ASA, Equinor.com)



Διάγραμμα 9: Σύγκριση του κόστους μεταφοράς με πλοίο και με δίκτυο αγωγών σε €/tCO₂, συναρτήσει του αυξανόμενου μεταφερόμενου όγκου CO₂ (Kjärstad, Skagestad, Eldrup & Johnsson, 2016)

3.6 Μέθοδοι αποθήκευσης

Μετά τις διαδικασίες δέσμευσης και μεταφοράς του, το CO₂ χρειάζεται να αποθηκεύεται έτσι ώστε να αποφεύγεται η επανεκπομπή του στην ατμόσφαιρα του πλανήτη. Η μόνιμη και ασφαλής αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂ διαδραματίζει τον πλέον σημαντικό

ρόλο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας CCS. Επιπλέον, η αποθήκευση του CO₂ πρόκειται να απασχολήσει πολλές χώρες παγκοσμίως λόγω των απαιτήσεων για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η έγχυση του δεσμευμένου CO₂ σε διαπερατούς βραχώδεις σχηματισμούς (γεωλογική αποθήκευση), αποτελεί την κυριότερη μέθοδο αποθήκευσης του CO₂ που έχει εφαρμοστεί σε εμπορική κλίμακα μέχρι σήμερα (Wildenborg & Lokhorst, 2005) (Βορριάς, 2014) (Rackley, 2010).

Οι κυριότερες επιλογές για γεωλογική αποθήκευση είναι σε:

- Ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου (EOR-EGR)
- Κενούς ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου
- Βαθείς αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες
- Κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα (ECBM-ενισχυμένη ανάκτηση μεθανίου από στρώματα άνθρακα)
- Κενά ανθρακορυχεία
- Βάθη ωκεανών

Οι παραπάνω επιλογές αποθήκευσης βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης. Η τεχνολογία EOR (Enhanced Oil Recovery) με έγχυση του CO₂ σε κοιτάσματα πετρελαίου εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια στις ΗΠΑ ως εμπορική τριτογενής τεχνική ανάκτησης, ενώ η πρώτη εμπορική εφαρμογή αποθήκευσης CO₂ σε υπεράκτιο υδροφόρο ορίζοντα λειτουργεί με επιτυχία από το 1996 στο κοιτάσμα αερίου Spleirner στην Νορβηγία (Wildenborg & Lokhorst, 2005).

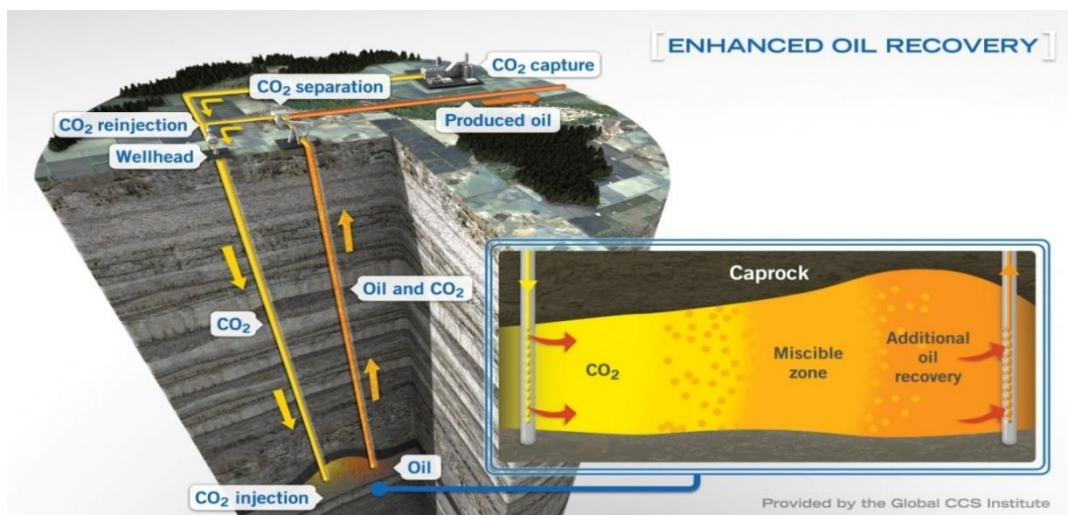
Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα για την αποθήκευση του CO₂ είναι η εκτίμηση της χωρητικότητας της εκάστοτε γεωλογικής αποθήκευσης. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές μελέτες για την χαρτογράφηση των διαθέσιμων επιλογών αποθήκευσης. Μια από τις σημαντικότερες ήταν η μελέτη με το όνομα «GESTCO Project» που υποστηρίχθηκε από την ΕΕ, καθώς και από μεγάλες εταιρείες και οργανισμούς συμπεριλαμβανομένων της ΔΕΗ και του Ινστιτούτου Γεωλογικών Μεταλλευτικών Ερευνών και Μελετών (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών). Σύμφωνα με το «GESTCO Project», η χωρητικότητα αποθήκευσης δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την επέκταση και λειτουργία των τεχνολογιών CCS. Επιπλέον, περισσότερα από 40 Gt CO₂ μπορούν να αποθηκευτούν σε κενούς ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου στην Δυτική Ευρώπη και 150-1500 Gt CO₂ εκτιμώνται ότι μπορούν να εναποτεθούν σε βαθείς αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες (Wildenborg & Lokhorst, 2005).

3.6.1 Αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery)

Μετά το πέρας της πρωτογενούς και δευτερογενούς ανάκτησης του πετρελαίου από τους ταμιευτήρες, η διαδικασία της ανάκτησης του μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την εφαρμογή μεθόδων τριτογενούς ή ενισχυμένης ανάκτησης (EOR). Οι συνηθέστερες εφαρμοζόμενες μέθοδοι στο στάδιο της τριτογενούς φάσης είναι η έγχυση ατμού ή έγχυση CO₂. Κατά την τριτογενή φάση, οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι έγχυσης στοχεύουν,

εκτός από την αποκατάσταση της πίεσης του ταμιευτήρα και στην αλλαγή των ιδιοτήτων του ρευστού εντός του ταμιευτήρα με στόχο την βελτίωση της κινητικότητας του. Η αρχή της τριτογενούς φάσης αποφασίζεται από την εταιρεία που διαχειρίζεται το έργο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ένας από τους κυριότερους παράγοντες είναι η προσδοκώμενη ποσότητα πετρελαίου που πρόκειται να ανακτηθεί, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι απαραίτητες κεφαλαιουχικές δαπάνες, καθώς και η παρούσα τιμή του πετρελαίου (Jelmert, et al., 2010) (Rackley, 2010).

Η τεχνολογία της έγχυσης CO₂ σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου εφαρμόζεται σε ταμιευτήρες με βάθος μεγαλύτερο των 800 μέτρων, όπου η πίεση φτάνει την κρίσιμη πίεση του CO₂ της τάξης των 70,38 bar και για αργό πετρέλαιο με πυκνότητα μικρότερη από 0,9 στους 15°C. Υπό αυτές τις συνθήκες, το CO₂ βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση και η διάλυση του αυξάνει την κινητικότητα του υπολειμματικού πετρελαίου στον ταμιευτήρα αυξάνοντας τον όγκο και τον κορεσμό του και μειώνοντας το ιξώδες του. Σε ότι αναφορά την τεχνολογία CCS, τα βάθη μεγαλύτερα των 800 μέτρων επιτρέπουν την αποθήκευση του CO₂ ως πυκνό υπερκρίσιμο ρευστό. Σε πιέσεις 10-15 MPa, ανάλογα με την σύνθεση και την θερμοκρασία του υπολειμματικού πετρελαίου, το CO₂ και το υπολειμματικό πετρέλαιο αναμειγνύονται πλήρως, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ροή του πετρελαίου και να ωθείται προς εξόρυξη (Rackley, 2010).

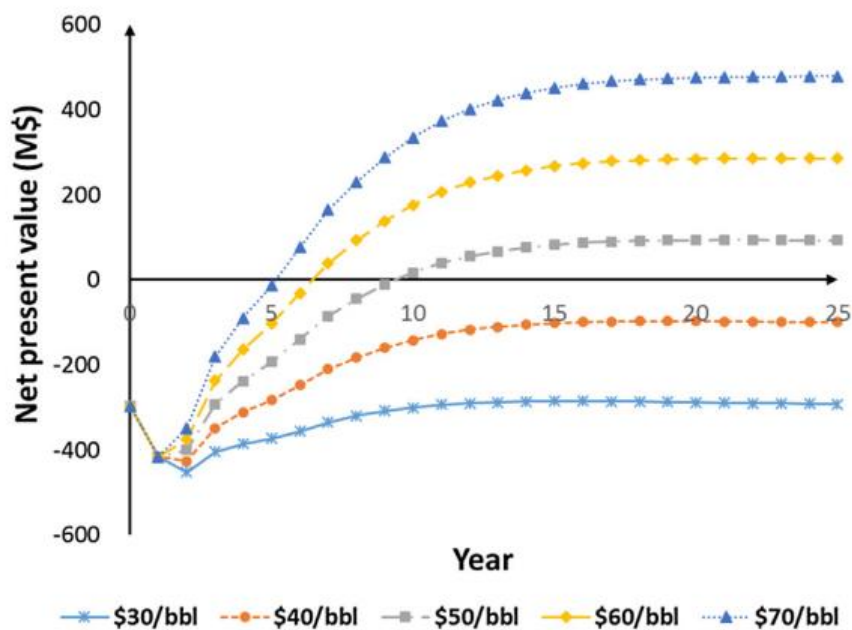


Εικόνα 11: Αποθήκευση CO₂ σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου (Πηγή: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/>)

Η ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR) με την έγχυση του δεσμευμένου CO₂ προσφέρει δυνητικό οικονομικό κέρδος από την παραγωγή του πετρελαίου. Κατά το στάδιο της τριτογενούς παραγωγής, επιτυγχάνεται σταδιακή ανάκτηση πετρελαίου που μπορεί να φτάσει σε ποσοότητες 7-23% της αρχικής φάσης εξόρυξης (πρωτογενής παραγωγή) (IPCC, 2005).

Τα έσοδα των έργων CO₂-EOR προέρχονται από την πώληση του πετρελαίου και από τυχόν κρατικές χρηματοδοτήσεις για την ανάπτυξη του έργου αποθήκευσης του CO₂ ή φοροελαφρύνσεις. Σύμφωνα με την μελέτη των Kwak & Kim (2017) η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value-NPV) επηρεάζεται σημαντικά από την εκάστοτε τιμή του

πετρελαίου. Στο έργο που μελετάται από την παραπάνω μελέτη, επιτεύχθηκε ανάκτηση 59,3 εκατομμυρίων βαρελιών πετρελαίου κατά την τριτογενή παραγωγή ενώ αγοράστηκαν 13,4 εκατομμύρια τόνοι CO₂ εκ των οποίων οι 9,7 αποθηκεύτηκαν μόνιμα εντός του ταμιευτήρα. Το κόστος για την αγορά του CO₂ ανήλθε σε 16,5 \$/τόνο ενώ το κόστος για την μεταφορά του ανήλθε σε 2,5\$/τόνο. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε η NPV του έργου για τιμές πώλησης του πετρελαίου από 30-70 \$/βαρέλι.



Διάγραμμα 10: Εκτίμηση της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV) (εκατομμύρια \$) του έργου σε βάθος χρόνου 25 ετών για τιμές πώλησης πετρελαίου από 30-70 \$/Βαρέλι (Kwak, Kim, 2017)

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 10, κατά τα 5 πρώτα έτη η τιμή της NPV είναι αρνητική, αυτό οφείλεται στο ότι τα πρώτα χρόνια γίνεται η απόσβεση των κεφαλαιουχικών δαπανών που χρειάστηκαν για το υπό μελέτη έργο. Ακόμη, συνυπολογίζεται και το κόστος για την αγορά των ποσοτήτων CO₂ που χρειάζονται για την εισπίεση. Από τον 6^ο χρόνο και μετά και για τιμές πετρελαίου που ανέρχονται σε 50-70 \$/βαρέλι, η NPV αρχίζει να παίρνει θετικές τιμές καθιστώντας έτσι την επένδυση επικερδή και συμφέρουσα. Για τιμές πετρελαίου από 30-40\$/βαρέλι το έργο κρίνεται ως ζημιολόγο. Επομένως, η μεταβολή στις τιμές της NPV αφορά κατά πολύ το εκάστοτε κόστος του πετρελαίου και το κόστος απόκτησης του CO₂.

3.6.2 Αποθήκευση σε κενούς ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου

Η εναπόθεση του CO₂ σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου αποτελεί μία από τις κυριότερες μεθόδους αποθήκευσης για την τεχνολογία CCS. Αρχικά, οι κενοί ταμιευτήρες έχουν ήδη τον απαραίτητο εξοπλισμό εγκατεστημένο στην επιφάνεια και στο υπέδαφος της περιοχής δράσης τους, ο οποίος θα μπορούσε με μικρές μόνο τροποποιήσεις να επαναχρησιμοποιηθεί με σκοπό την αποθήκευση του CO₂. Επιπλέον, οι εγκαταστάσεις αυτές είναι κατάλληλες αφού κατακρατούσαν τους

υδρογονάνθρακες για πολλά εκατομμύρια χρόνια. Ακόμα, η ποιότητα και η ακεραιότητα του υπερκείμενου πετρώματος (caprock) είναι εγγυημένες και έχουν ελεγχθεί εκτενώς κατά την διαδικασία της εξερεύνησης και της εξόρυξης των υδρογονανθράκων. Οι ταμιευτήρες που περιείχαν φυσικό αέριο είναι ευνοϊκότεροι ως προς την αποθήκευση του CO₂ συγκριτικά με τους ταμιευτήρες πετρελαίου, επειδή έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης ανά όγκο πόρων λόγω της υψηλότερης τελικής ανάκτησης και συμπίεστικότητας του φυσικού αερίου (IPCC, 2005) (Cao, et al., 2020).

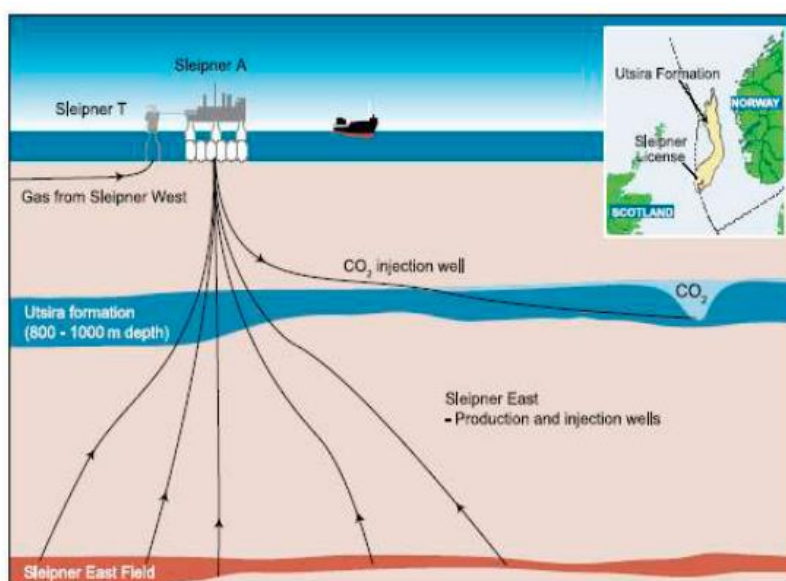
Υπολογίζεται ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα εγκαταλελειμμένων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων στις ΗΠΑ ανέρχεται σε 25-30 Gt. Για την καλύτερη κατανόηση αυτών των μεγεθών, εάν δεσμευόταν το 100% των εκπομπών CO₂ των ΗΠΑ οι εγκαταστάσεις αυτές θα ήταν σε θέση να τις αποθηκεύουν για 15 με 20 χρόνια με ετήσιο ρυθμό εκπομπών 1,6 Gt CO₂/έτος. Το κόστος αποθήκευσης στις εγκαταστάσεις αυτές μπορεί να κυμαίνεται από 5\$/t CO₂ έως 70 \$/t CO₂ (Anderson & Newell, 2004).

Το έργο «CO₂CRC Otway» που ξεκίνησε το 2008 στην Αυστραλία, είναι ένα από τα πιο γνωστά έργα αποθήκευσης CO₂ που έχουν εφαρμοστεί σε εξαντλημένους ταμιευτήρες φυσικού αερίου. Στον ένα χρόνο εφαρμογής του, η συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης που επετεύχθη ήταν της τάξεως των 65.000 τόνων CO₂. Το συγκεκριμένο έργο αποσκοπούσε πέρα από το να δείξει την εφικτότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος, να ευαισθητοποιήσει την κοινή γνώμη και να βοηθήσει στην αύξηση της αποδοχής της τεχνολογίας CCS. Η εμπειρία και η ανατροφοδότηση πληροφοριών που παρείχε το έργο απέδειξε ότι η εναπόθεση του CO₂ σε εξαντλημένα πεδία υδρογονανθράκων είναι μια εφικτή λύση και μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια (Cao, et al., 2020).

3.6.3 Αποθήκευση σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους

Οι αλατούχοι σχηματισμοί είναι βαθιά ιζηματογενή πετρώματα κορεσμένα με νερά ή άλμη και περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένων αλάτων. Οι σχηματισμοί αυτοί περιέχουν μεγάλες ποσότητες νερού το οποίο είναι ακατάλληλο για χρήση στην γεωργία ή ανθρώπινη κατανάλωση. Γενικά, περιοχές με καλό γεωθερμικό δυναμικό είναι λιγότερο ευνοϊκές ως προς την επέκταση αποθήκευσης του CO₂ λόγω του μεγάλου βαθμού ρηγμάτων και της απότομης αύξησης της θερμοκρασίας σε βάθος. Η συγκεκριμένη επιλογή αποθήκευσης του δεσμευμένου CO₂ είναι μία από τις πιο σημαντικές διότι προσφέρει τεράστιες χωρητικότητες για την αποθήκευση του CO₂. Εκτιμάται ότι έτσι μπορεί να αποθηκευτούν περισσότεροι από 10.000 Gt CO₂ για τουλάχιστον 100 χρόνια. Σε σύγκριση με άλλες επιλογές αποθήκευσης, οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες έχουν συνήθως ευρύτερη κατανομή. Επομένως, είναι πιθανότερο να βρίσκονται κοντά σε πηγές εκπομπών CO₂, γεγονός που θα μείωνε αισθητά τα κόστη μεταφοράς του υγροποιημένου CO₂. Ένα από τα κυριότερα ζητήματα της μεθόδου είναι η συσσώρευση πίεσης που δημιουργείται στον σχηματισμό, η οποία έχει την δυνατότητα να οδηγήσει σε διάσπαση του σχηματισμού και στην ενεργοποίηση γειτονικών ρηγμάτων με αποτέλεσμα την διαρροή του CO₂ (IPCC, 2005) (Cao, et al., 2020).

Στην Δυτική Ευρώπη δύναται να αποθηκευτούν με την μέθοδο αυτή από 150-1.500 Gt CO₂. Ένα από τα πρώτα μεγάλα έργα αποθήκευσης CO₂ σε υδροφόρους ορίζοντες ήταν το έργο Spleirner στην Βόρεια Θάλασσα. Περίπου 1MtCO₂ δεσμεύεται από την άντληση του φυσικού αερίου στο πεδίο Spleirner και στην συνέχεια αποθηκεύεται σε έναν περιφερειακό αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα εντός του σχηματισμού Utsira Sand. Από το 1996 έως το 2018 έχουν αποθηκευτεί περίπου 18 εκατομμύρια τόνοι CO₂. Το έργο αποτελεί μια τεχνική και οικονομική επιτυχία και έχει αναδείξει μέσω της γεωφυσικής παρακολούθησης ότι το αποθηκευμένο CO₂ παραμένει με ασφάλεια στην μονάδα αποθήκευσης (IPCC, 2005) (Cao, et al., 2020) (Furre, Eiken, Alnes, Vevatne, & Kiær, 2017).

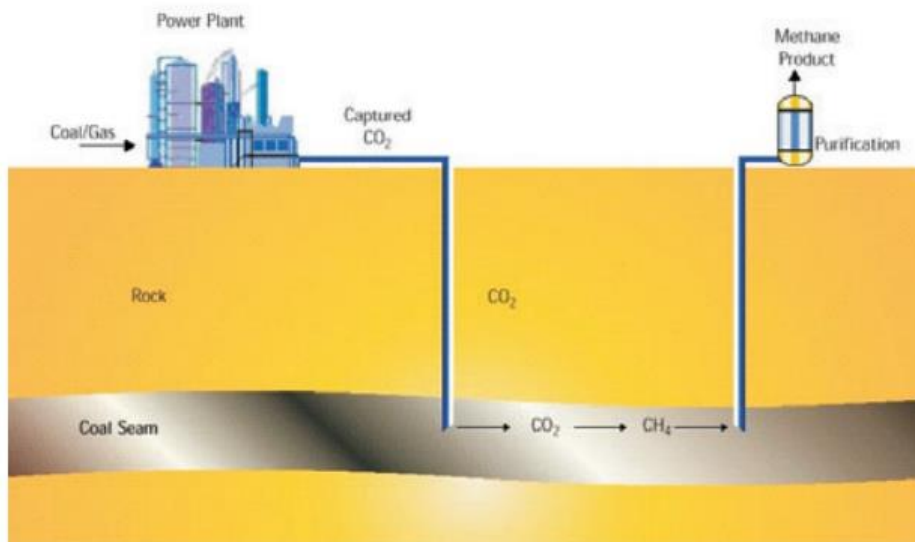


Εικόνα 12: Αποθήκευση του CO₂ σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες-Spleirner Project (Smith, Billingham, Lee, & Milanovic, 2011)

3.6.4 Αποθήκευση σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα

Η έγχυση του δεσμευμένου CO₂ σε στρώματα άνθρακα αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο για την αποθήκευση του. Τα περισσότερα στρώματα άνθρακα που είναι κατάλληλα για την αποθήκευση του CO₂ βρίσκονται σε βάθος από 300 έως 900 μέτρα (Bachu, 2007). Ένα από τα ισχυρά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου αποθήκευσης είναι ότι τα κοιτάσματα άνθρακα που ίσως είναι κατάλληλα για την αποθήκευση του CO₂ βρίσκονται κοντά σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες με αποτέλεσμα να μειώνονται σημαντικά τα κόστη μεταφοράς. Ωστόσο, η αποθήκευση σε κοιτάσματα άνθρακα είναι μια μέθοδος που βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και έχουν πραγματοποιηθεί ορισμένες μόνο πιλοτικές μελέτες σχετικά με την καταλληλότητα και την αποθηκευτική ικανότητα (Cao, et al., 2020). Αξίζει να αναφερθεί, ότι το CO₂ που εγχέεται στα κοιτάσματα άνθρακα μπορεί να βοηθήσει στην ανάκτηση του μεθανίου που βρίσκεται στα βάθη αυτά, παρόμοια με την τεχνολογία EOR. Το Ερευνητικό Συμβούλιο της Αλμπέρτα στον Καναδά, ηγείται μιας πολυεθνικής ομάδας για την διερεύνηση

τεχνολογιών που αφορούν στην ενισχυμένη ανάκτηση μεθανίου από κοιτάσματα άνθρακα. Η αποθήκευση CO₂ σε κοιτάσματα άνθρακα και η ενισχυμένη ανάκτηση του μεθανίου θα μπορούσε να αποφέρει καθαρά οφέλη της τάξεως των 20 \$/t CO₂ (Anderson & Newell, 2004).

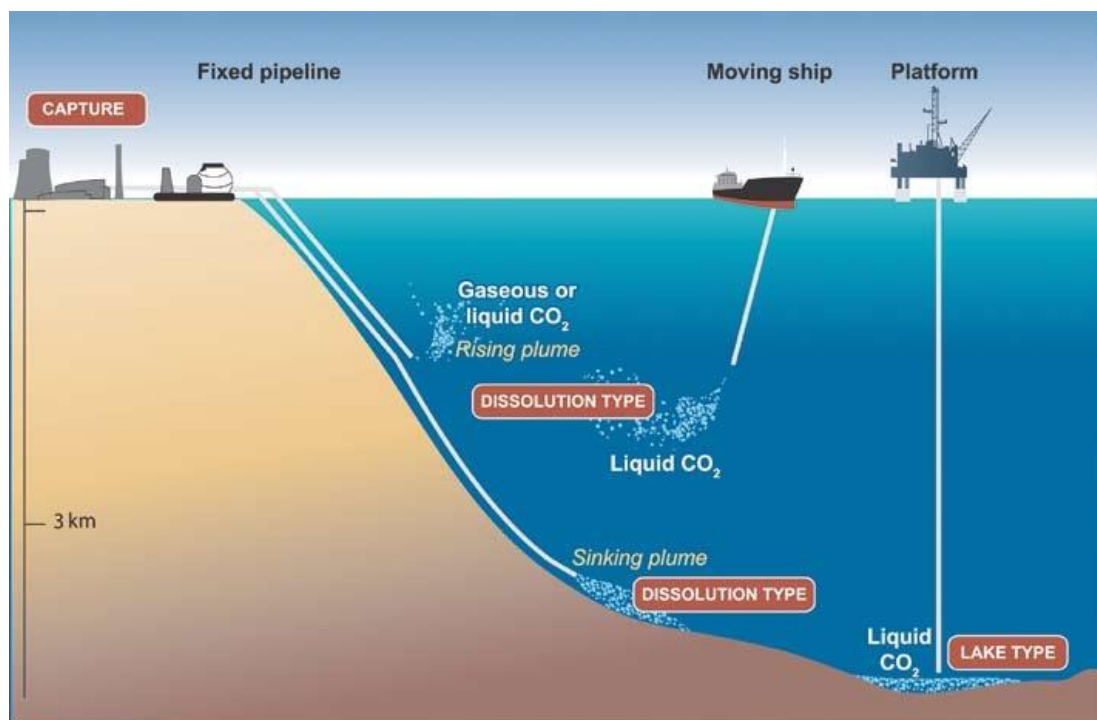


Εικόνα 13: Αποθήκευση του CO₂ σε κοιτάσματα άνθρακα (Πηγή: https://ieaghg.org/docs/general_publications/8.pdf)

3.6.5 Αποθήκευση στους ωκεανούς

Η επιλογή της αποθήκευσης στους ωκεανούς πραγματοποιείται την σκόπιμη έγχυση του δεσμευμένου CO₂ σε μεγάλο βάθος, όπου το μεγαλύτερο μέρος του θα παρέμενε απομονωμένο από την ατμόσφαιρα για αιώνες. Η έγχυση του CO₂ μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας από τα πλοία μεταφοράς ή μέσω αγωγών σε συγκεκριμένο βάθος ή ακόμα και στον πυθμένα (IPCC,2005). Δεδομένου ότι οι ωκεανοί λειτουργούν ήδη ως μια δεξαμενή άνθρακα και ανταλλάσσουν συνεχώς CO₂ με την ατμόσφαιρα, η έγχυση πρέπει να πραγματοποιηθεί σε μεγάλα βάθη προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει εκ νέου απελευθέρωση του στην ατμόσφαιρα (Rackley,2010).

Η μακροχρόνια αποθήκευση στους ωκεανούς μπορεί να επιτευχθεί με απευθείας έγχυση σε βάθος μεγαλύτερο των 2700 m. Σε τέτοιο βάθος το υγροποιημένο CO₂ θα βυθίζεται προς το πυθμένα της θάλασσας, επειδή στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στα βάθη αυτά το CO₂ έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το θαλασσινό νερό (Brewer, Friederich, Peltzer & Orr, 1999)(Fer, Haugan, 2003)(Levine et al., 2007)(Cao et al., 2020). Εναλλακτικά, το CO₂ μπορεί να εγχυθεί σε βάθος μεγαλύτερο των 3000 m ως λίμνη υπερκρίσιμου ρευστού και σε τοπολογία όπου παρέχεται πλευρική συγκράτηση ώστε να παραμένει εκεί μετά την έγχυση του (Rackley,2010).



Εικόνα 14: Επισκόπηση των μεθόδων έγχυσης & αποθήκευσης του CO₂ στους ωκεανούς (IPCC,2005)

Σύμφωνα με την μελέτη των Voormeij, Simandl (2004) έχουν εξεταστεί τρόποι για την λίπανση των ωκεανών με προσθήκη νιτρικών και φωσφορικών αλάτων ή σιδήρου, με σκοπό την αύξηση του βιολογικού υλικού με αποτέλεσμα να απορροφάται επιπλέον CO₂ από την διαδικασία της φωτοσύνθεσης του φυτοπλαγκτόν. Ωστόσο, δεν είναι σαφές κατά πόσο αυτή η διαδικασία θα πλήξει το θαλάσσιο οικοσύστημα (Ormerod, Freund, Smith, & Davison, 2002). Όπως παρατίθεται στην μελέτη της IPCC (2005), οι επιδράσεις του CO₂ στους θαλάσσιους οργανισμούς που ζουν κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας περιλαμβάνουν μειωμένους ρυθμούς αναπαραγωγής και ανάπτυξης, χαμηλή παροχή οξυγόνου στο κυκλοφορικό σύστημα και αυξημένη θνησιμότητα με την πάροδο του χρόνου. Σε ορισμένους οργανισμούς οι αντιδράσεις αυτές παρατηρούνται με μικρές προσθήκες CO₂. Επίσης, δεν είναι σαφές αν τα θαλάσσια είδη θα μπορέσουν να προσαρμοστούν σε μία διαρκή αύξηση των επιπέδων του CO₂. Επομένως, κοντά στα σημεία έγχυσης του CO₂ ίσως επέρχεται άμεση θνησιμότητα.

3.7 Επισκόπηση των εγκαταστάσεων CCS παγκοσμίως

Με την πάροδο των χρόνων η τεχνολογία CCS αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς, καθώς έγινε αντιληπτό παγκοσμίως το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής. Τα πρώτα έργα δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂ ξεκίνησαν την δεκαετία του 70'. Το 1972 στις ΗΠΑ ξεκίνησε την λειτουργία της η εγκατάσταση «Terrell Natural Gas Processing Plant», στην οποία το δεσμευμένο CO₂ (0.5 Mt/έτος) αποθηκεύεται σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου, με στόχο την ανάκτηση του πετρελαίου στο στάδιο της τριτογενούς παραγωγής. Στις ΗΠΑ και τον Καναδά δραστηριοποιούνται 16 μονάδες της

τεχνολογίας CCS που δεσμεύουν το CO₂ από διάφορες πηγές, όπως από την άντληση πετρελαίου και φυσικού αερίου, από βιομηχανίες παραγωγής λιπασμάτων κ.α.. Επιπλέον, οι 13 από αυτές τις εγκαταστάσεις αποθηκεύουν το δεσμευμένο CO₂ με την μέθοδο EOR. Η συνολική αποθήκευση των παραπάνω μονάδων σε ΗΠΑ και Καναδά ανέρχεται σε 23,74 Mt CO₂/έτος. Ακόμα, μέχρι τα μέσα της δεκαετίας αναμένεται να είναι έτοιμες για λειτουργία άλλες 56 εγκαταστάσεις αποκλειστικά στις ΗΠΑ. Στην Ευρώπη η εμπορικής κλίμακας εγκαταστάσεις ανέρχονται σε 3, με σημαντικότερη την εγκατάσταση που δραστηριοποιείται στο πεδίο άντλησης φυσικού αερίου «Spreirner» στην Νορβηγία. Η συνολική τους αποθηκευτική ικανότητα ανέρχεται σε 1,857 Mt CO₂/έτος. Επιπρόσθετα, 35 εγκαταστάσεις που θα δραστηριοποιούνται στην Εύρωπη, βρίσκονται ήδη σε διάφορα στάδια της κατασκευής τους και πιστεύεται ότι μέχρι το 2026 θα είναι σε πλήρη λειτουργία. Στην Κίνα η πρώτη μονάδα δέσμευσης, αποθήκευσης και επαναχρησιμοποίησης του CO₂, άρχισε την λειτουργία της το 2006. Από το 2018 οι εγκαταστάσεις που συμμετέχουν στην αποθήκευση του CO₂ είναι 3 με συνολική δυνατότητα αποθήκευσης της τάξεως των 0,82 Mt CO₂/έτος. Ιδιαίτερα, εκτιμάται ότι μέχρι το τέλος της τρέχουσας δεκαετίας οι εγκαταστάσεις δέσμευσης και αποθήκευσης στα εδάφη της Κίνας θα είναι 6 συνολικά (Global CCS Institute, 2021).

Η πλειοψηφία των παραπάνω εγκαταστάσεων αφορούν σε δέσμευση και αποθήκευση του CO₂ κοντά στους χώρους εκπομπής τους. Επιπλέον, η προτιμώμενη μέθοδος αποθήκευσης των περισσότερων εγκαταστάσεων σε λειτουργία είναι η μέθοδος EOR, έχοντας ως στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους. Μια νέα αναδυόμενη τάση είναι η ανάπτυξη δικτύων CCS που θα συγκεντρώνουν το CO₂ από πολλαπλές πηγές εκπομπής. Η δημιουργία τέτοιων δικτύων θα οδηγήσει στην περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας CCS, καθώς θα καταστεί εφικτή η κατασκευή έργων δέσμευσης και αποθήκευσης μικρότερης κλίμακας (με 0,2 Mt CO₂/έτος ή λιγότερο). Επιπρόσθετα, η δημιουργία τέτοιων έργων στην τεχνολογία της δέσμευσης και της αποθήκευσης του CO₂ θα ωθήσουν μικρότερης κλίμακας βιομηχανίες που δεν έχουν την δυνατότητα για ανάπτυξη τέτοιων τεχνολογιών, να αποθηκεύσουν το CO₂ που εκπέμπουν με πολύ μικρότερο κόστος. Ήδη πολλές κυβερνήσεις προχωρούν στην χορήγηση επιδοτήσεων με στόχο να στηρίξουν την τεχνολογία CCS ώστε να επιτευχθούν οι περιβαλλοντικοί στόχοι που έχουν τεθεί. Στις ΗΠΑ έχει θεσπιστεί μια επιστροφή φόρου για βιομηχανίες που προχωρούν στην δέσμευση και την μόνιμη αποθήκευση ενός σημαντικού μέρους των εκπομπών τους. Ακόμα, το 2020 το Κογκρέσο ενέκρινε προς διάθεση 218 εκατομμύρια δολάρια για την ανάπτυξη της τεχνολογίας CCS, ενώ το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ χορήγησε το ίδιο έτος περισσότερα από 270 εκατομμύρια δολάρια σε συμφωνίες συγχρηματοδότησης σε μελέτες για την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας CCS. Στην Ευρώπη η κυβέρνηση της Ολλανδίας έχει ανακοινώσει την χρηματοδότηση της τάξεως των 2,1 δισεκατομμυρίων ευρώ για την ανάπτυξη του «Porthos Network» στην Βόρεια Θάλασσα. Επίσης, η Νορβηγική κυβέρνηση προχώρησε το 2021 σε έγκριση του «Longship Project» σε σύμπραξη με την Equinor. Το συνολικό κόστος του έργου είναι 2,84 δισεκατομμύρια δολάρια και η κυβέρνηση θα συμβάλλει με χρηματοδότηση ύψους 1,9 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Τέλος, η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου ανακοίνωσε την δημιουργία ενός ταμείου υποδομής για την ανάπτυξη δικτύων CCS με συνολικά κεφάλαια 1 δισεκατομμυρίων λιρών (Global CCS Institute, 2021).

Μερικά από τα κυριότερα δίκτυα δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂ παγκοσμίως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Εγκατάσταση	Χωρητικότητα	Μέθοδος μεταφοράς CO ₂	Μέθοδος Αποθήκευσης CO ₂	Χώρα
Longship Project	1,5-5 Mt CO ₂ /έτος	Δίκτυο αγωγών/πλοίο	Έγχυση σε υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους	Νορβηγία
HyNet North West	4,5-10 Mt CO ₂ /έτος	Δίκτυο αγωγών	Έγχυση σε υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους	Ην.Βασίλειο
South Wales Cluster	9 Mt CO ₂ /έτος	Δίκτυο αγωγών/πλοίο	Έγχυση σε υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους	Ουαλία
Carbon Safe Illinois	2-15 Mt CO ₂ /έτος	Δίκτυο αγωγών	Έγχυση σε υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους	ΗΠΑ
Porthos Network	2-5 Mt CO ₂ /έτος	Δίκτυο αγωγών	Έγχυση σε κενούς ταμιευτήρες πετρελαίου	Ολλανδία
Zero Carbon Humber	18,3 Mt CO ₂ /έτος	Δίκτυο αγωγών	Έγχυση σε υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους	Ην.Βασίλειο

Πίνακας 5: Κυριότερα υπό κατασκευή έργα δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂ παγκοσμίως (Global CCS Institute,2021)

Κεφάλαιο 4 Δέσμευση και αξιοποίηση του CO₂ – Τεχνολογία CCU

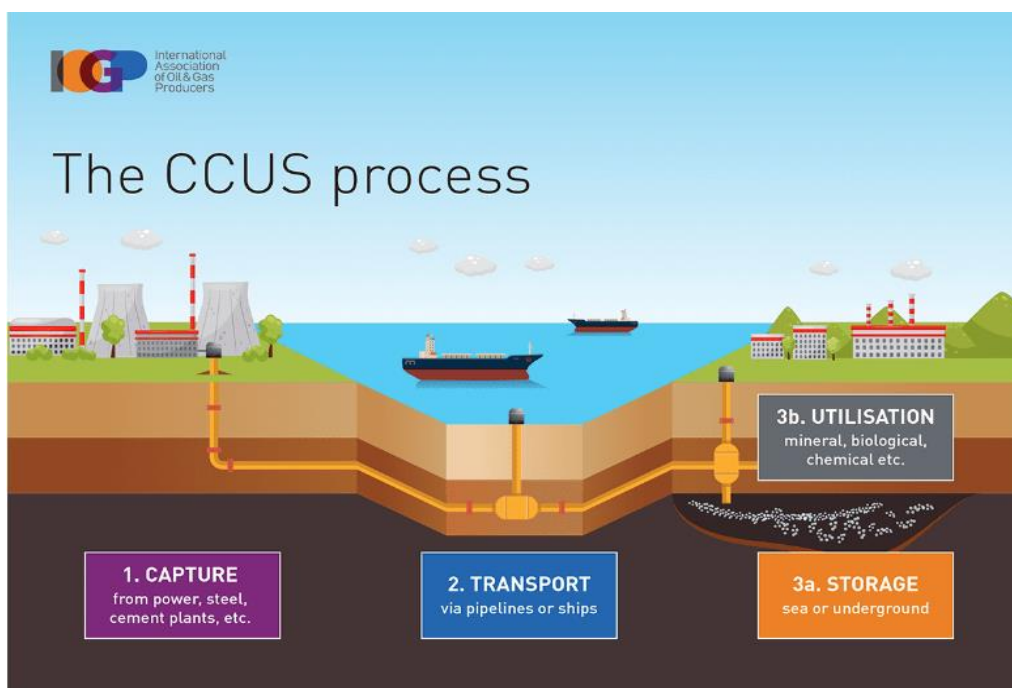
4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η προοπτική της ευρείας χρήσης του CO₂ συγκεντρώνει αυξημένο ενδιαφέρον από την διεθνή επιστημονική κοινότητα, εν μέρει λόγω της κλιματικής αλλαγής αλλά και επειδή η χρήση του CO₂ μπορεί να συνεισφέρει στην παραγωγική διαδικασία διάφορων προϊόντων (Herbourn, et al., 2019). Η τεχνολογία της δέσμευσης και χρήσης του CO₂ (CCU) και η τεχνολογία CCS αναμένεται να συνεισφέρουν τα μέγιστα στην προσπάθεια του μετριασμού των εκπομπών αερίων παγκοσμίως συμπληρώνοντας η μία την άλλη. Η τεχνολογία CCU επικεντρώνεται στην αποδοτικότητα των πόρων και έρχεται σε συμφωνία με την έννοια της Κυκλικής Οικονομίας (CE) που υποστηρίζεται κατά πολύ από την διεθνή κοινότητα (Mikulčić et al., 2019). Η διαφορά μεταξύ των τεχνολογιών CCU και CCS αφορά στην τελική χρήση του δεσμευμένου CO₂. Στην τεχνολογία CCS το δεσμευμένο CO₂ μεταφέρεται σε μία τοποθεσία που έχει σχεδιαστεί για την κατάλληλη αποθήκευση του με σκοπό την μόνιμη

απομάκρυνση του από την ατμόσφαιρα του πλανήτη. Στον αντίποδα, η τεχνολογία CCU, έπειτα από επεξεργασία, έχει ως στόχο να μετατρέψει το CO₂ από ρυπογόνο παράγοντα σε μία ουσία με ένα ευρύ φάσμα εμπορικών εφαρμογών. Η τεχνολογία CCU αναμένεται να είναι πιο ελκυστική επιλογή για περιοχές όπου η μόνιμη γεωλογική αποθήκευση του CO₂ είναι αδύνατη (Chauvy & De Weireld, 2020).

Η δέσμευση και η μεταφορά του CO₂ από μόνες τους αποτελούν δύο σημαντικά δαπανηρές διαδικασίες. Η τεχνολογία CCU, πέρα από το περιβαλλοντικό πρόβλημα, επιδιώκει να συνεισφέρει και στην μείωση του κόστους των παραπάνω διαδικασιών χρησιμοποιώντας το CO₂ ως μία ουσία με ευρείς χρήσεις. Τα τελευταία χρόνια διερευνώνται αρκετοί τρόποι για την επαναχρησιμοποίηση του CO₂, συμπεριλαμβανομένης της μετατροπής του σε χημικές ουσίες, καύσιμα ή με απευθείας χρήση του σε μία πληθώρα εργασιών. Συνήθως, γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των πιθανών χρήσεων του διοξειδίου σε άμεση και έμμεση χρήση. Στην άμεση χρήση το CO₂ χρησιμοποιείται ως έχει, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία σε άλλα προϊόντα. Οι ευρέως γνωστές άμεσες χρήσεις του CO₂ συμπεριλαμβάνουν την χρήση του σε τρόφιμα και ποτά, πυροσβεστήρες, δομικά υλικά και στην τεχνολογία EOR. Αντίθετα, στην έμμεση χρήση το CO₂ χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την δημιουργία ενός τελικού προϊόντος. Οι τεχνικές για την έμμεση χρήση του CO₂ περιλαμβάνουν την μετατροπή του σε χημικά και καύσιμα (Valluri, Claremboux, & Kawatra, 2022).

Τέλος, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι μέθοδοι δέσμευσης και μεταφοράς παραμένουν ίδιες στις τεχνολογίες CCU και CCS. Οι δύο τεχνολογίες μπορούν να συνυπάρχουν σε ένα ολοκληρωμένο δίκτυο CCUS με κοινό στόχο την απομάκρυνση του CO₂ από την ατμόσφαιρα και με κοινό όραμα την ευημερία του πλανήτη.



Εικόνα 15: Τεχνολογία CCUS (Πηγή: <https://www.iogp.org/blog/news/developing-low-carbon-technologies/>)

4.2 Επαναχρησιμοποίηση του δεσμευμένου CO₂

Η τεχνολογία CCU διερευνά πιθανές χρήσεις που μπορεί να έχει το CO₂ πέρα από την μόνιμη αποθήκευση του. Το δεσμευμένου CO₂ χρησιμοποιείται ήδη σε πολλούς τομείς και διεργασίες. Ένας τομέας που χρησιμοποιείται ευρέως το δεσμευμένο CO₂ είναι η τεχνολογία της ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου και φυσικού αερίου (EOR). Επιπλέον, ευρέως διαδεδομένη είναι η χρήση του στα αναψυκτικά, σε πυροσβεστήρες, στην αποκαφεΐνωση του καφέ κ.α. Ακόμα, το CO₂ βρίσκει πολλές εφαρμογές όπως το στεγνό καθάρισμα, πρόσθετες χρήσεις στην βιομηχανία τροφίμων και ποτών, μετατροπή του σε χρήσιμα βασικά υλικά, χημικά και καύσιμα χρησιμοποιώντας μηχανικές χημικές και βιολογικές διεργασίες. Στον πίνακα 47 αλλά και στο σχήμα 3 (βλ. Παράρτημα III) παρουσιάζονται οι κυριότερες λύσεις για την επαναχρησιμοποίηση του δεσμευμένου CO₂ (Chauvy & De Weireld, 2020) (Valluri, Claremboux, & Kawatra, 2022) (Koytsoumpa, Bergins, & Kakaras, 2018).

4.2.1 Παραγωγή ουρίας

Η ουρία (CO(NH₂)₂), αποτελεί μία άχρωμη κρυσταλλική ένωση που αντιπροσωπεύει περίπου το 50% της παγκόσμιας παραγωγής αζωτούχων λιπασμάτων. Παράγεται με συνδυασμό αμμωνίας (NH₃) και CO₂ σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Η παγκόσμια βιομηχανική παραγωγή της ουρίας υπερβαίνει τους 190 Mt/έτος και στην παραγωγική διαδικασία χρησιμοποιούνται περίπου 112-120 Mt CO₂/έτος ως πρώτη ύλη. Η συνθήκες των αντιδράσεων είναι περίπου στους 185°C και στα 150 bar. Η παραγωγή ουρίας θεωρείται επί του παρόντος μια ώριμη εφαρμοσμένη τεχνολογία παγκοσμίως. Επομένως, η τεχνολογία θεωρείται ευρέως αποδεκτή. Σύμφωνα με τους Jarvis & Samsatli (2018), για την παραγωγή ενός τόνου ουρίας χρειάζονται 0,74 τόνοι CO₂. Επίσης, στην ίδια μελέτη αναφέρεται ότι η τιμή της ουρίας κυμαίνεται στα 235€/t.

4.2.2 Παραγωγή πολυμερών

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια νέα προσέγγιση στην επεξεργασία των πολυμερών κατά την οποία συνδυάζονται οι παραδοσιακές πρώτες ύλες με το CO₂ με στόχο την σύνθεση πολυμερών και χημικών υψηλής αξίας. Με κατάλληλες διαδικασίες το CO₂ μετατρέπεται σε πολυανθρακικά, όπως το πολυπροπυλένιο και το ανθρακικό πολυαιθυλένιο με την χρήση ενός καταλύτη με βάση τον ψευδάργυρο σε μία αντίδραση με μόρια εποξειδίου. Η εταιρεία Novomer χρησιμοποιεί το CO₂ ως πρώτη ύλη για την σύνθεση χημικών και υλικών που χρησιμοποιούνται καθημερινά, όπως επιστρώσεις πολυμερών, πλαστικές σακούλες, ιατρικά εξαρτήματα και εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα πλαστικά που παράγονται από την Novomer κατασκευάζονται κατά 50% από το CO₂. Επιπλέον, για κάθε έναν τόνο παραγωγής πλαστικών χρησιμοποιείται περίπου μισός τόνος CO₂. Μέχρι το 2050 εκτιμάται ότι θα χρησιμοποιούνται από 10-50 Mt CO₂ για την παραγωγή πολυμερών. Εκτός από την

Novomer, άλλες εταιρείες που επενδύουν στην παραγωγή πολυμερών είναι η Bayer και η BASF. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και έχει εφαρμοστεί κατά κύριο λόγο πειραματικά (Global CCS Institute, Parsons & Brinckerhoff, 2011) (Hepburn, et al., 2019)

4.2.3 Χρήση του CO₂ στην καλλιέργεια φυκιών

Το CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις καλλιέργειες φυκιών με στόχο την αυξημένη παραγωγή βιοκαυσίμων. Η βιομηχανία παραγωγής φυκιών αγοράζει το CO₂ για τις ανάγκες της παραγωγής, αλλά οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται είναι σχετικά μικρές σε σχέση με τις εκπομπές CO₂ ενός εργοστασίου. Κάθε χρόνο παράγονται λιγότεροι από 20.000 τόνοι φυκιών, κυρίως για χρήση ως συμπληρώματα διατροφής. Επιπλέον, τα παραγόμενα φύκια μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία με κύριο στόχο το οικονομικό κέρδος. Συνήθως, το λάδι που παράγεται από τα φύκια χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαύσιμου, σε προϊόντα διατροφής και σε χημικά ή φαρμακευτικά προϊόντα. Περίπου 1,8 τόνοι CO₂ χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενός τόνου φυκιών, αλλά αυτό ποικίλει ανάλογα με το είδος που βρίσκεται σε παραγωγή. Αν και δεν υπάρχουν ευρείας κλίμακας καλλιέργειες φυκιών για την παραγωγή βιομάζας/βιοκαυσίμων, πολλές εταιρείες παγκοσμίως συμπεριλαμβανομένων BP, Chevron, Virgin και Shell έχουν χρηματοδοτήσει έρευνες και εκτελούν μελέτες σκοπιμότητας με στόχο την ανάπτυξη του κλάδου. Τέλος, η παραγωγή φυκιών μελετάται παγκοσμίως όχι μόνο για την παραγωγή βιοκαυσίμων, αλλά και λόγω των μεγάλων ποσοτήτων CO₂ που χρειάζονται για την παραγωγή. Εκτιμάται ότι έως το 2050 μπορεί να χρησιμοποιούνται από 0,2-0,9 Gt CO₂ σε καλλιέργειες φυκιών (Global CCS Institute, Parsons & Brinckerhoff, 2011)(Hepburn, et al., 2019) (Laumb, et al., 2013).

4.2.4 Χρήση του CO₂ σε ενανθράκωση ορυκτών και σε δομικά υλικά

Η ανθράκωση ορυκτών αποτελεί μια χημική διαδικασία κατά την οποία το CO₂ αντιδρά με ένα οξείδιο μετάλλου, όπως τα οξείδια του ασβεστίου (CaO) ή τα οξείδια του μαγνησίου (MgO) και μετατρέπεται σε ανθρακικά άλατα. Τα CaO και MgO συναντώνται στην φύση με την μορφή πυριτικών πετρωμάτων, όπως η σερπεντίνη και η ολιβίνη. Μετά την χημική αντίδραση παράγονται ενώσεις, όπως το ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO₃) και το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃). Τα παραγόμενα προϊόντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η παραγωγή τσιμέντου, η σκλήρυνση σκυροδέματος κ.α. Επιπλέον, το CO₂ μπορεί να βρει άμεση χρήση στην κατασκευή οικοδομικών υλικών χρησιμοποιούμενο για την σκλήρυνση του σκυροδέματος με στόχο την βελτίωση της απόδοσης των υλικών. Η διαδικασία της ενανθράκωσης μπορεί να έχει θετικές και αρνητικές επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα και την αντοχή ενός υλικού. Ωστόσο, οι εταιρείες που θα εντάξουν το CO₂ στην παραγωγή τους πρόκειται να επωφεληθούν από τις μειώσεις ενέργειας και χρήσης νερού με αποτέλεσμα να μειωθεί το κόστος παραγωγής (Global CCS Institute, Parsons & Brinckerhoff, 2011) (Chauvy & De Weireld, 2020) (Valluri, Claremboux, & Kawatra,

2022). Όπως παρατίθεται στην μελέτη των Herburn et al. (2019), η χρήση του CO₂ σε δομική υλικά εκτιμάται ότι μακροπρόθεσμα θα φτάσει τους 0,1-1,4 Gt CO₂/έτος.

4.2.5 Χρήση του CO₂ στην παραγωγή υγρών καυσίμων

Το δεσμευμένο CO₂ μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υγρών καυσίμων μετά από την μετατροπή του σε διάφορα εναλλακτικά προϊόντα καυσίμου, όπως το μυρμηκικό οξύ (CH₂O₂), η μεθανόλη (CH₃OH), ο δυμεθυλαιθέρας (C₂H₆O), η αιθανόλη (C₂H₅OH) κ.α. Γενικά, οι αντιδράσεις για την μετατροπή του CO₂ σε συνθετικό καύσιμο είναι γνωστές ως αντιδράσεις αναμόρφωσης. Η μεθανόλη αποτελεί μια από τις πιο γνωστές προσεγγίσεις εμπορικής κλίμακας για τον μετασχηματισμό του CO₂. Επιπλέον, η παραγωγή μεθανίου μέσω της αντίδρασης Sabatier, αποτελεί μία σημαντική διαδικασία καταλυτικής μετατροπής. Η σύνθεση Sabatier είναι γνωστή και ως μεθανοποίηση του CO₂, αποτελεί ουσιαστικά μια τεχνολογία υδρογόνωσης, κατά την οποία το νερό και το μεθάνιο παράγονται από την εξώθερμη αντίδραση του CO₂ με υδρογόνο (H₂). Η διαδικασία της μεθανοποίησης του CO₂ εκτιμάται ότι χρειάζεται 1 τόνο CO₂ ανά παραγόμενο τόνο συνθετικού αερίου (SNG). Το συνθετικό αέριο μπορεί επίσης να παραχθεί με την μέθοδο της ξηρής αναμόρφωσης του μεθανίου ως ενδιάμεσο προϊόν το οποίο στην συνέχεια μπορεί να μετατραπεί σε καύσιμα ή χημικά. Ακόμα, η διεργασία Fischer-Tropsch μετατρέπει το συνθετικό αέριο, με την βοήθεια ενός καταλύτη, σε ένα μείγμα αποτελούμενο από υδρογονάνθρακες. Συνήθως, τα παραγόμενα προϊόντα της διεργασίας Fischer-Tropsch είναι Diesel και βενζίνη χωρίς την παρουσία θείου. Τέλος, μέσω της ίδιας διεργασίας είναι πιθανό να συντίθενται αλκοόλες και άλλα χρήσιμα προϊόντα (Global CCS Institute, Parsons & Brinckerhoff, 2011) (Herburn, et al., 2019) (Jarvis & Samsatli, 2018) (Chauvy & De Weireld, 2020).

Κεφάλαιο 5 Τεχνικά χαρακτηριστικά των πλοίων μεταφοράς υδροποιημένου CO₂ και υπάρχουσα εμπειρία από τα LNG/LPG

5.1 Πλοία μεταφοράς αερίων (Gas Carriers)

Το εμπόριο υγροποιημένων αερίων δια θαλάσσης στις μέρες μας αποτελεί μια ώριμη βιομηχανία, η οποία εξυπηρετείται από έναν μεγάλο στόλο δεξαμενόπλοιων. Τα πλοία που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο των υγροποιημένων αερίων διατηρούν τα φορτία τους σε δεξαμενές που αποτρέπουν την είσοδο του αέρα. Έτσι, στις δεξαμενές είναι εξαιρετικά δύσκολο να αναπτυχθούν εύφλεκτες ατμόσφαιρες, αφού εντός αυτών συναντάται μόνο το φορτίο και οι ατμοί του φορτίου που μεταφέρεται. Οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο εμπόριο είναι αναγκασμένες να συμμορφώνονται με τα πρότυπα που ορίζονται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό και ειδικότερα από τον κώδικα κατασκευής και εξοπλισμού πλοίων που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια (IGC Code), με τους εθνικούς κανόνες και με τις απαραίτητες απαιτήσεις ασφαλείας για την αποφυγή της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Τα πλοία μεταφοράς αερίων έχουν χωρητικότητα που κυμαίνεται από 500-6000 m³ για μικρά δεξαμενόπλοια που μεταφέρουν στις δεξαμενές τους προπάνιο, βουτάνιο και χημικά αέρια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ πλοία τα οποία μεταφέρουν το φορτίο τους σε πλήρως μονωμένες δεξαμενές ή σε κατάσταση ψύξης μπορούν να ξεπεράσουν την χωρητικότητα των 100.000 m³ (CCNR/OCIMF, 2010).

Τα αέρια μπορούν να υγροποιηθούν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες :

1. Με αύξηση της πίεσης υπό κανονική θερμοκρασία
2. Με ψύξη και συμπίεση του αερίου
3. Με ψύξη σε ατμοσφαιρική πίεση

Πλοία που μεταφέρουν αέρια και εμπίπτουν στην 1^η κατηγορία αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως «πλοία μεταφοράς αερίων υπό πλήρη πίεση» (fully pressurized gas carriers), ενώ τα πλοία που μεταφέρουν το φορτίο τους σε συνθήκες ψύξης και συμπίεσης είναι γνωστά ως «πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση ημιπίεσης και ημιψύξης» (semi-pressurized/semi-refrigerated gas carriers). Τέλος, τα πλοία που κατατάσσονται στην 3^η κατηγορία είναι ευρέως γνωστά με την ονομασία «πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση ψύξης» (refrigerated gas carriers) (Babicz, 2015).

5.1.1 Πλοία μεταφοράς αερίων υπό πλήρη πίεση (Fully pressurized gas carriers)

Τα πλοία που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία είναι απλούστερα σε σύγκριση με τα πλοία που συναντώνται στις άλλες κατηγορίες όσον αφορά τα συστήματα περιορισμού και τον εξοπλισμό διακίνησης του φορτίου που μεταφέρουν. Το φορτίο μεταφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα σε δεξαμενές τύπου «C» με τυπική πίεση περί τα 17,5 bar (Babicz, 2015). Συνήθως, είναι εξοπλισμένα με δύο ή τρεις δεξαμενές φορτίου χωρίς την ύπαρξη εγκατάστασης για εκ νέου υγροποίηση του φορτίου. Επιπλέον, η πίεση εντός των δεξαμενών φορτίου μπορεί να μεταβληθεί και εξαρτάται από το μεταφερόμενο φορτίο αλλά και από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος (Prime Marine, 2023). Τα δεξαμενόπλοια πλήρους πίεσης είναι σχετικά μικρά και έχουν χωρητικότητα φορτίου περίπου 6.000 m³, ενώ αποτελούν έναν απλό τρόπο μεταφοράς υγραερίου προς και από μικρούς τερματικούς σταθμούς αερίου (CCNR/OCIMF, 2010). Επίσης, πέρα από

υγραέριο μεταφέρουν και φορτία αμμωνίας(Babicz, 2015). Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πλοίων αυτών συνοψίζονται παρακάτω.

Πλεονεκτήματα :

1. Είναι κατασκευασμένα με τις συνήθεις κατηγορίες ναυπηγικού χάλυβα επειδή το φορτίο μεταφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και δεν είναι αναγκαία η τοποθέτηση μόνωσης.
2. Δεν απαιτείται η τοποθέτηση εγκατάστασης εκ νέου υγροποίησης του φορτίου.
3. Οι λειτουργίες επί του πλοίου είναι απλούστερες συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες πλοίων.

Μειονεκτήματα:

1. Η υψηλή πίεση που απαιτείται για την μεταφορά του φορτίου απαιτεί σημαντικό πάχος στα τοιχώματα των δεξαμενών και έτσι οδηγούμαστε σε μεγαλύτερο εκτόπισμα και αύξηση του κόστους.
2. Εξαιτίας του τρόπου κατασκευής τους οι χώροι κάτω από το κατάστρωμα είναι περιορισμένοι.



Εικόνα 16: Πλοίο μεταφοράς αερίων σε κατάσταση πλήρους πίεσης (fully pressurized gas carrier) (Bosneagu,Vasilache&Raiciu,2017)

5.1.2 Πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση ημιπίεσης/ημιψύξης (semi-pressurized/semi-refrigerated gas carriers)

Στις μέρες μας, αυτός ο τύπος πλοίων είναι ιδιαίτερα δημοφιλής. Τα πλοία που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία είναι σχεδιασμένα για να μεταφέρουν διάφορα φορτία στις δεξαμενές τους, όπως LPG, μονομερές χλωριούχου βινυλίου, προπυλένιο, βουταδιένιο κ.α.. Οι δεξαμενές τους είναι κατασκευασμένες από χάλυβες που αντέχουν σε χαμηλές θερμοκρασίες για θερμοκρασία μεταφοράς του φορτίου στους -48°C και είναι σε θέση να μεταφέρουν τα περισσότερα φορτία υγραερίου και χημικών αερίων. Επιπλέον, σε μερικά πλοία και ειδικότερα σε εκείνα που προορίζονται για την μεταφορά αιθυλενίου, οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από κραματοποιημένους χάλυβες για να είναι

εφικτή η μεταφορά του στους -104°C (Babicz, 2015). Επίσης, οι δεξαμενές είναι είτε κυλινδρικές, είτε σφαιρικές και φέρουν ειδική μόνωση (CCNR/OCIMF, 2010).



Εικόνα 17: Πλοίο μεταφοράς αερίων σε κατάσταση ημιπίεσης (semi-pressurized gas carrier) (Bosneagu, Vasilache & Raiciu, 2017)

5.1.3 Πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση πλήρους ψύξης (fully refrigerated gas carriers)

Τα πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση πλήρους ψύξης είναι σχεδιασμένα για να μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση και σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Φέρουν δεξαμενές πρισματικού σχήματος κατασκευασμένες από κράμα χάλυβα-νικελίου 3,5%, επιτρέποντας έτσι την μεταφορά των φορτίων σε χαμηλές θερμοκρασίες. Με την χρήση πρισματικών δεξαμενών είναι εφικτή η μεταφορά μεγάλων όγκων φορτίου, όπως αμμωνία, χλωριούχο βινύλιο και υγραέριο σε μεγάλες αποστάσεις (CCNR/OCIMF, 2010). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι χώροι αποθήκευσης και μεταφοράς του φορτίου πρέπει να αδρανοποιούνται κατά τη μεταφορά εύφλεκτων φορτίων και να φέρουν ένα πλήρες δευτερεύον φράγμα (secondary barrier) (Babicz, 2015). Επιπλέον, η χωρητικότητα των πλοίων αυτών ποικίλει σε μέγεθος και είναι συνήθως από 15.000-100.000 m³, ενώ φέρουν εγκατεστημένη μονάδα υγροποίησης επί του σκάφους με σκοπό την διατήρηση των συνθηκών που αναφέρονται παραπάνω καθ' όλη την διάρκεια του ταξιδιού (Prime Marine, 2023). Τέλος, όλα τα πλοία αυτής της κατηγορίας διαθέτουν διπλό πυθμένα και μερικά από αυτά φέρουν πλευρικές δεξαμενές έρματος, ενώ όλοι οι χώροι φορτίου είναι εξοπλισμένοι με βαλβίδες ασφαλείας για την περίπτωση που το φορτίο θερμαίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος απουσία συστήματος υγροποίησης ή πυρκαγιάς (Bosneagu, Vasilache, & Raiciu, 2017).



Εικόνα 18: Πλοίο μεταφοράς αερίων σε κατάσταση πλήρους ψήξης (fully refrigerated gas carrier) (Bosneagu, Vasilache & Raiciu, 2017)

5.2 Πλοία μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG Carriers)

Η μεταφορά φυσικού αερίου ξεκίνησε με την συμβολή χερσαίων αγωγών και στην συνέχεια τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου κατέστησαν δυνατή την μεταφορά του διά θαλάσσης. Οι υψηλές απαιτήσεις ενέργειας για την υγροποίηση του φυσικού αερίου δεν αποτέλεσαν τροχοπέδη στην ανάπτυξη και κατασκευή πλοίων μεταφοράς του φυσικού αερίου, καθώς όταν το φυσικό αέριο βρίσκεται σε υγρή μορφή, σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία -160°C ο όγκος που καταλαμβάνει μειώνεται κατά ένα συντελεστή (περίπου 600 προς 1) (Niotis, 2022). Το εξαιρετικά χαμηλό σημείο βρασμού του ΥΦΑ απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες για να είναι εφικτή η μεταφορά του σε πλοία LNG. Έτσι, οι δεξαμενές των πλοίων αυτών είναι κατασκευασμένες από ειδικά υλικά (σιδηρονικέλιο, ανοξείδωτο χάλυβα, κράματα αλουμινίου) τα οποία είναι σχεδιασμένα να αντέχουν σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, θεωρείται αναγκαία η τοποθέτηση στις δεξαμενές εξωτερικών στρωμάτων θερμομόνωσης, με σκοπό την αποτροπή της εξάτμισης μέρους του φορτίου εξαιτίας της εξωτερικής θερμοκρασίας (MOL, 2023).

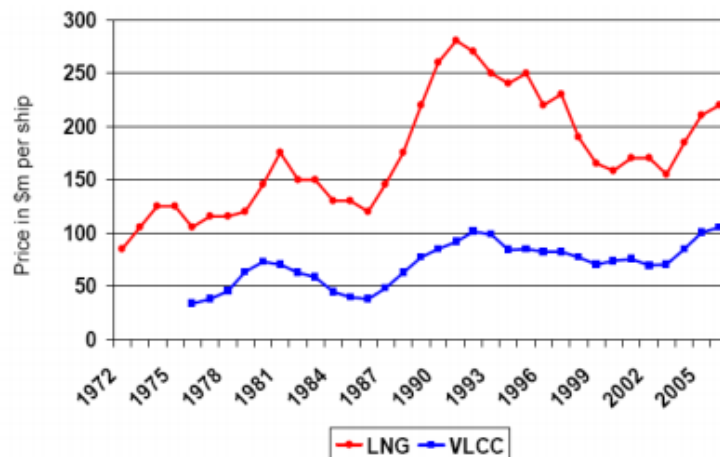
Το «METHANE PIONEER» ήταν το πρώτο πλοίο που μετέφερε ΥΦΑ διεθνώς σε ένα ταξίδι από τον τερματικό σταθμό Trunkline στην λίμνη Charles της Λουιζιάνα προς τις εγκαταστάσεις της British Gas στο Canvey Island του Ηνωμένου Βασιλείου το 1959. Το «METHANE PIONEER» ήταν φορτηγό πλοίο που μετασκευάστηκε σε LNG, εξοπλισμένο με 5 δεξαμενές που είχαν μόνωση από ξύλο μπάλσα και ίνες γυαλιού. Έπειτα από το επιτυχημένο ταξίδι του «METHANE PIONEER», κατασκευάστηκαν δύο νέα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ το «Methane Princess» και το «Methane Progress», τα οποία

ήταν εξοπλισμένα με ανεξάρτητες δεξαμενές φορτίου συνολικής χωρητικότητας 27.000 m³ (Babicz, 2015).

Σύμφωνα με τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό, ένα υγροποιημένο αέριο ορίζεται ως «μία ουσία που είναι αέρια σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, αλλά η οποία μπορεί να υγροποιηθεί αυξάνοντας την πίεση ή μειώνοντας την θερμοκρασία ή με συνδυασμό και των δύο μεθόδων». Χωρίς τις παραπάνω μεθόδους διαχείρισης των αερίων δεν θα ήταν δυνατή η μεταφορά τους με πλοία, καθώς το κόστος και η μεταφορά τους σε αέρια μορφή θα ήταν πολύ υψηλά και απαγορευτικά. Τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ είναι σχεδιασμένα με διπλό κύτος, ειδικά σχεδιασμένο για την διαχείριση της χαμηλής θερμοκρασίας του φορτίου που μεταφέρουν (Bosneagu, Vasilache, & Raiciu, 2017).

Κατά την μεταφορά του ΥΦΑ παρατηρείται το φαινόμενο των εξατμιζόμενων αερίων (Boil-off gas), όπου παρά την μόνωση των δεξαμενών που είναι σχεδιασμένη για να αποτρέπει την είσοδο της εξωτερικής θερμότητας, η μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον είναι σχεδόν αναπόφευκτη (Babicz, 2015). Εάν ο όγκος παραμένει σταθερός επέρχεται αύξηση της πίεσης στη δεξαμενή αποθήκευσης, ενώ αν η πίεση διατηρείται σταθερή έχουμε αύξηση στην θερμοκρασία του υγροποιημένου αερίου με αποτέλεσμα να επανέρχεται σε αέρια φάση. Έτσι, για να έχουμε διατήρηση της πίεσης εντός του χώρου φορτίου το αέριο απελευθερώνεται εκτός της δεξαμενής αποθήκευσης (Ursan, 2011). Το μέρος του φορτίου που εξατμίζεται, επαναχρησιμοποιείται μέσω ειδικών συστημάτων που συναντώνται μόνο σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ. Το πλεονάζον εξατμιζόμενο αέριο διοχετεύεται με κατάλληλες διατάξεις, είτε για επαναυγροποίηση, είτε καίγεται σε ειδικούς λέβητες παραγωγής ατμού ή θέρμανσης νερού για τις ανάγκες του πλοίου ή οδηγείται στις κύριες μηχανές για καύση μαζί με το πετρέλαιο (Babicz, 2015) (Ζαραφωνίτης, 2005). Ο τυπικός ρυθμός εξατμισμού του ΥΦΑ στα σύγχρονα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ είναι περίπου 0,1-0,15 % του συνολικού όγκου του υγρού/ημέρα (Babicz, 2015).

Από την δεκαετία του 1970, η χωρητικότητα των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ κυμαινόταν από 125.000 m³- 138.000 m³. Το 2004 ήταν η χρονιά η οποία έγιναν παραγγελίες πλοίων συνολικής χωρητικότητας περί των 216.000 m³. Το μεγαλύτερο πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ είναι τύπου Q-max με το όνομα «MOZAN» και έχει συνολική χωρητικότητα 266.000m³ (Babicz, 2015). Οι τιμές κατασκευής των πλοίων ΥΦΑ έχουν γνωρίσει σημαντικές μεταβολές με την πάροδο του χρόνου, κυρίως λόγω του ανταγωνισμού για παραγγελίες μεταξύ των ναυπηγείων. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται το μέσο κόστος νεότευκτων πλοίων συνολικής χωρητικότητας μεταξύ 125.000-145.000m³. Επιπλέον, στο διάγραμμα 11 γίνεται σύγκριση με το κόστος κατασκευής πλοίων μεταφοράς αργού πετρελαίου. Το κόστος για ένα πλοίο χωρητικότητας 135.000m³, στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990 έφτασε τα 250 εκατομμύρια δολάρια. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, για ένα πλοίο χωρητικότητας 145.000m³ το κόστος κατασκευής κυμαινόταν από 150-160 εκατομμύρια δολάρια. Τέλος, το 2006 για πλοία χωρητικότητας 155.000m³ το κόστος κατασκευής ανερχόταν σε 220 εκατομμύρια δολάρια. Η αύξηση που παρατηρήθηκε στο κόστος κατασκευής οφείλεται κυρίως στην αύξηση της τιμής του χάλυβα (Kamalnejad, Sheykhbahee, & Mazaheri, 2016).



Διάγραμμα 11: Κόστος κατασκευής πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ (LNG Carriers) και πλοίων μεταφοράς αργού πετρελαίου σε εκατομμύρια δολάρια ανά πλοίο (Kamalnejad,Sheykhbahae & Mazaheri, 2016)



Εικόνα 19: Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG Carrier). Ανακτήθηκε από <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:712524/mmsi:538003212/imo:9337755/vessel:MOZAH>

5.3 Πλοία μεταφοράς αέριων προϊόντων του πετρελαίου (LPG Carriers)

Τα πλοία μεταφοράς αέριων προϊόντων του πετρελαίου αποτελούν έναν από τους κυριότερους τύπους υγραεριοφόρων πλοίων παγκοσμίως. Τα πλοία αυτά είναι σε θέση να μεταφέρουν εντός των δεξαμενών τους μια γκάμα προϊόντων που προκύπτουν από την διύλιση και την επεξεργασία του πετρελαίου. Συνήθως, μεταφέρουν βουτάνιο και

προπάνιο ή συνδυασμό των δυο αερίων (Bosneagu, Vasilache, & Raiciu, 2017). Επιπλέον, έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν και άλλα προϊόντα όπως αμμωνία, προπυλένιο και χλωριούχο βινύλιο (Babicz, 2015). Για την κατηγοριοποίηση τους λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία και η πίεση που απαιτείται για την μεταφορά του εκάστοτε φορτίου. Έτσι, μπορούμε να καταλήξουμε στις παρακάτω κατηγορίες (Babicz, 2015):

1. Τα πλοία με χωρητικότητα μικρότερη των 4000m³, τα οποία με την σειρά τους κατατάσσονται στην κατηγορία των πλοίων που μεταφέρουν το φορτίο σε κατάσταση πλήρους πίεσης (fully-pressurized gas carriers).
2. Τα πλοία με χωρητικότητα περί τα 7500m³, τα οποία μεταφέρουν το φορτίο σε κατάσταση ημι-ψύξης ή ημί-πίεσης (semi-refrigerated/semi-pressurized gas carriers).
3. Τα πλοία με χωρητικότητα από 10.000-100.000m³, με μεταφορά του φορτίου σε κατάσταση πλήρους ψύξης (fully-refrigerated gas carriers).

5.4 Κανονισμοί που διέπουν την λειτουργία των πλοίων μεταφοράς αερίων

Ένας από τους σημαντικότερους Διεθνής κώδικες του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού είναι ο κώδικας IGC. Ο κύριος στόχος του κώδικα αυτού είναι να παρέχει ένα διεθνές πρότυπο για την ασφαλή μεταφορά υγροποιημένων αερίων δια θαλάσσης. Μέσω του κώδικα IGC ορίζονται τα πρότυπα σχεδιασμού, κατασκευής και ο απαραίτητος εξοπλισμός που πρέπει να φέρουν τα πλοία μεταφοράς αερίων σύμφωνα με το μεταφερόμενο προϊόν, ώστε να ελαχιστοποιούνται τυχών κίνδυνοι για το πλοίο, το πλήρωμα και το περιβάλλον. Σύμφωνα με τον κώδικα, κάθε ένα από τα προϊόντα που είναι σε θέση να μεταφέρουν τα πλοία που εντάσσονται στον κώδικα μπορεί να έχει μία ή περισσότερες επικίνδυνες ιδιότητες, οι οποίες περιλαμβάνουν τοξικότητα, διαβρωτικότητα, ευφλεκτότητα. Επιπλέον, αναφέρεται ότι μπορεί να προκύψουν περεταίρω κίνδυνοι που σχετίζονται με τον τρόπο μεταφοράς του φορτίου, δηλαδή εάν έχουμε μεταφορά των προϊόντων υπό κρυογονικές συνθήκες ή συνθήκες πίεσης (IMO, 2014).

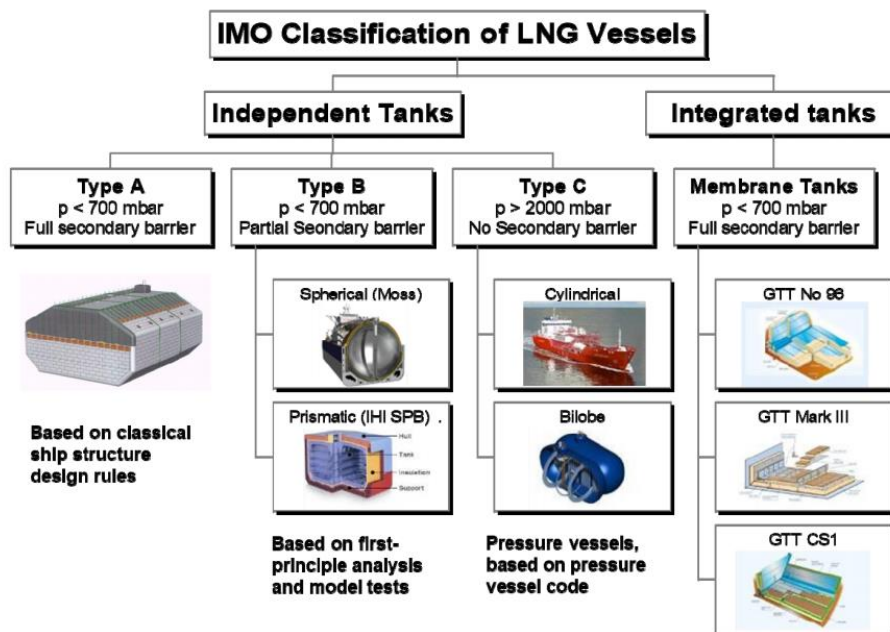
Οι απαιτήσεις του κώδικα αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων που ελλοχεύουν κατά την λειτουργία του πλοίου και την μεταφορά των προϊόντων που φέρουν τα πλοία εντός των δεξαμενών τους. Στους βασικότερους κινδύνους συγκαταλέγονται οι συγκρούσεις ή προσαράξεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εκτεταμένη βλάβη των δεξαμενών φορτίου, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση του μεταφερόμενου προϊόντος στο περιβάλλον. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός προβαίνει ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε επανεξέταση του κώδικα IGC, λαμβάνοντας υπόψη πάντα την υπάρχουσα εμπειρία. Η περιοδική αναθεώρηση του κώδικα έχει ως κύριο στόχο την καταγραφή των απαιτήσεων που χρειάζονται για την μεταφορά νέων προϊόντων. Τέλος, εκτός των προτύπων που αφορούν στο σχεδιασμό και τον απαιτούμενο εξοπλισμό των πλοίων που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια, ο κώδικας συμπεριλαμβάνει και άλλες σημαντικές υποδείξεις που αποσκοπούν στην ασφαλή

μεταφορά των προϊόντων, όπως την εκπαίδευση του πληρώματος, τον χειρισμό στο λιμάνι, την χρήση του εξατμιζόμενου φορτίου, τα όρια φόρτωσης των δεξαμενών, καθώς και τις απαιτήσεις για την επιθεώρηση και την πιστοποίηση των πλοίων αυτών (IMO, 2014).

Η ανάπτυξη του κώδικα IGC, καθώς και ο εμπλουτισμός των προτύπων και των κατευθυντήριων γραμμών για την ασφαλή λειτουργία των πλοίων που μεταφέρουν αέρια δια θαλάσσης, αποτελεί κύριο έργο της Επιτροπής Ναυτικής Ασφάλειας του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού. Ωστόσο, οργανισμοί όπως η Εταιρεία Διεθνών Διαχειριστών Δεξαμενόπλοιων και Τερματικών Σταθμών Φυσικού Αερίου (SIGTTO) και μέλη της Διεθνούς Ένωσης Νηογνομόνων (IACS) υποστηρίζουν σε μεγάλο βαθμό την διεύρυνση του κώδικα με συμβουλευτικό έργο (IMO, 2014).

5.5 Συστήματα δεξαμενών

Σύμφωνα με τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό, τα πλοία που εντάσσονται στον κώδικα IGC είναι σε θέση να μεταφέρουν το φορτίο τους σε συστήματα δεξαμενών που χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Την μία κατηγορία αποτελούν οι αυτόνομες δεξαμενές (independent tanks), στις οποίες περιλαμβάνονται οι δεξαμενές τύπου «Α» (Type A), δεξαμενές τύπου «Β» (Type B) και οι δεξαμενές τύπου «C» (Type C). Η δεύτερη κατηγορία είναι οι ενσωματωμένες δεξαμενές (Integrated tanks), οι οποίες είναι μεμβρανικού τύπου δεξαμενές. Οι αυτόνομες δεξαμενές (Independent tanks) είναι πλήρως διαχωρισμένες από την δομή της γάστρας και δεν συμβάλλουν στην αντοχή του πλοίου. Αντίθετα, οι ενσωματωμένες δεξαμενές (Integrated tanks) αποτελούν κύριο δομικό μέρος του πλοίου και συμβάλλουν άμεσα στην αντοχή του (Niotis, 2022) (Babiczy, 2015) (Chakraborty, 2019).



Διάγραμμα 12: Συστήματα δεξαμενών κατά IMO (Niotis,2022)

5.5.1 Δεξαμενές τύπου «Α»

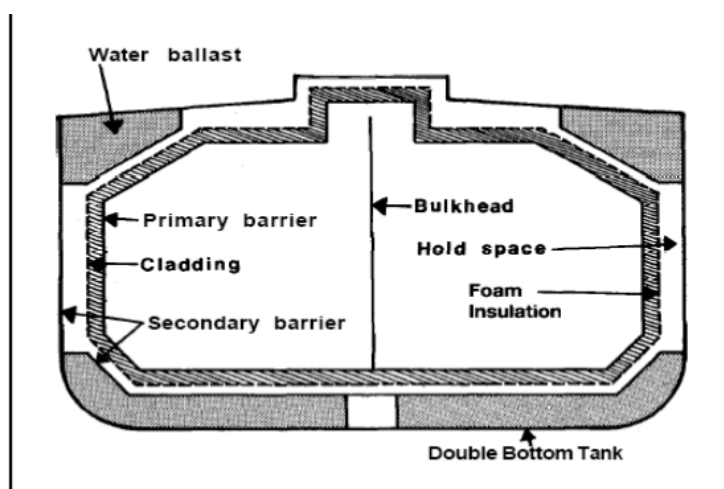
Οι δεξαμενές τύπου «Α» σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας αναγνωρισμένα πρότυπα και μεθόδους δομικού σχεδιασμού των πλοίων (Chakraborty, 2019). Η πίεση σχεδιασμού των δεξαμενών τύπου «Α» είναι μικρότερη από 0,7 bar, σύμφωνα με τον κώδικα IGC. Έτσι, τα φορτία πρέπει να μεταφέρονται σε κατάσταση πλήρους ψύξης, σε ατμοσφαιρική πίεση. Επιπλέον, απαιτείται εσωτερική ενίσχυση διότι οι δεξαμενές αυτού του τύπου είναι αυτό-στηριζόμενες. Επίσης, οι δεξαμενές περιβάλλονται από ένα μονωτικό στρώμα αφρού ή περλίτη, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί είτε στο εξωτερικό μέρος της δεξαμενής είτε στο εσωτερικό της γάστρας (Niotis, 2022)(CCNR/OCIMF, 2010).

Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια, σε περίπτωση διαρροής της δεξαμενής φορτίου, απαιτείται η εγκατάσταση ενός δευτερεύοντος συστήματος περιορισμού του φορτίου. Αυτό το σύστημα περιορισμού είναι γνωστό και ως δευτερεύον φράγμα και αποτελεί χαρακτηριστικό των πλοίων που μεταφέρουν το φορτίο τους σε θερμοκρασίες κάτω των -10°C εντός δεξαμενών αυτού του τύπου (CCNR/OCIMF, 2010).

Για πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση πλήρους ψύξης που δεν θα μεταφέρουν τα φορτία τους σε θερμοκρασίες κάτω των -55°C , το δευτερεύον φράγμα θα πρέπει να είναι σε θέση να συγκρατεί ολόκληρο τον όγκο της δεξαμενής φορτίου σε μια καθορισμένη γωνία κλίσης και μπορεί να αποτελεί μέρος της γάστρας του πλοίου. Αυτή η σχεδιαστική προσέγγιση απαιτεί συγκεκριμένα μέρη της γάστρας να είναι κατασκευασμένα από ειδικό χάλυβα, ικανό να αντέχει σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Εναλλακτικά, προκρίνεται η κατασκευή ξεχωριστού δευτερεύοντος φράγματος γύρω από κάθε

δεξαμενή φορτίου. Σύμφωνα με τον κώδικα IGC, το δευτερεύον φράγμα πρέπει να είναι σε θέση να συγκρατεί την διαρροή φορτίου από τις δεξαμενές για μία περίοδο 15 ημερών (ISGINTT, 2010).

Όταν τα πλοία μεταφέρουν εύφλεκτα φορτία, ο χώρος μεταξύ της δεξαμενής φορτίου και του δευτερεύοντος φράγματος (secondary barrier) πρέπει να καθίσταται γεμάτος με αδρανές αέριο με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας εύφλεκτης ατμόσφαιρας σε περίπτωση διαρροής του φορτίου από την δεξαμενή (Niotis, 2022) (CCNR/OCIMF, 2010).



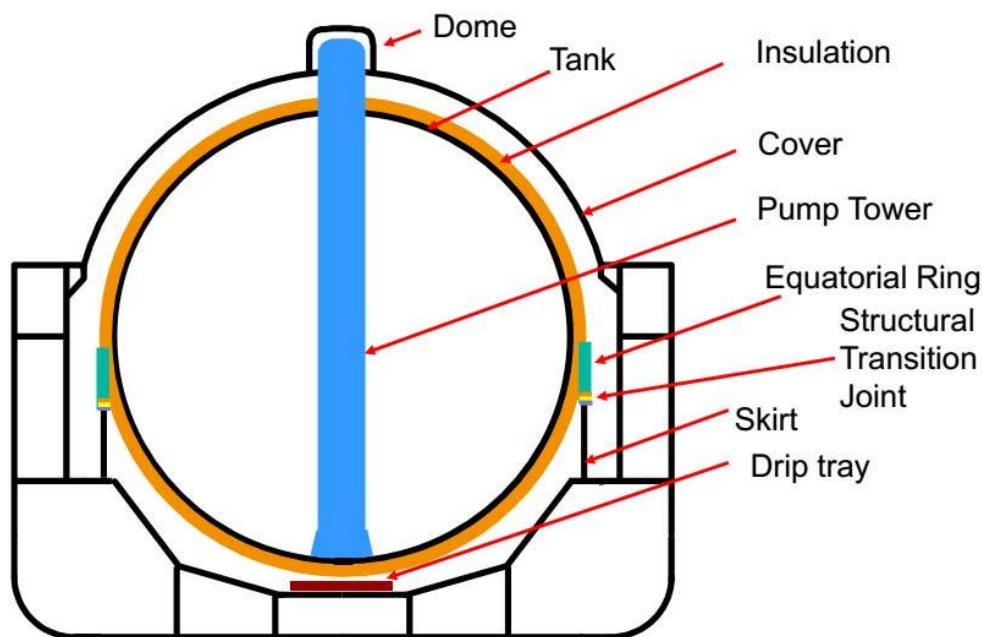
Εικόνα 20: Τυπική πρισματική δεξαμενή τύπου «Α» σε πλοίο μεταφοράς αερίων προϊόντων του πετρελαίου (LPG Carrier) (CCNR/OCIMF, 2010)

5.5.2 Δεξαμενές τύπου «B»

Οι δεξαμενές τύπου «B» απαιτούν λεπτομερέστερη ανάλυση της καταπόνησης συγκριτικά με τις δεξαμενές τύπου «A» και σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας προηγμένες αναλυτικές τεχνικές λαμβάνοντας υπόψη τη μηχανική θραύσης. Μπορεί να έχουν είτε πρισματική μορφή, είτε να είναι σφαιρικού τύπου, γνωστές και ως Moss Type από την κατασκευάστρια εταιρεία (Niotis, 2022).

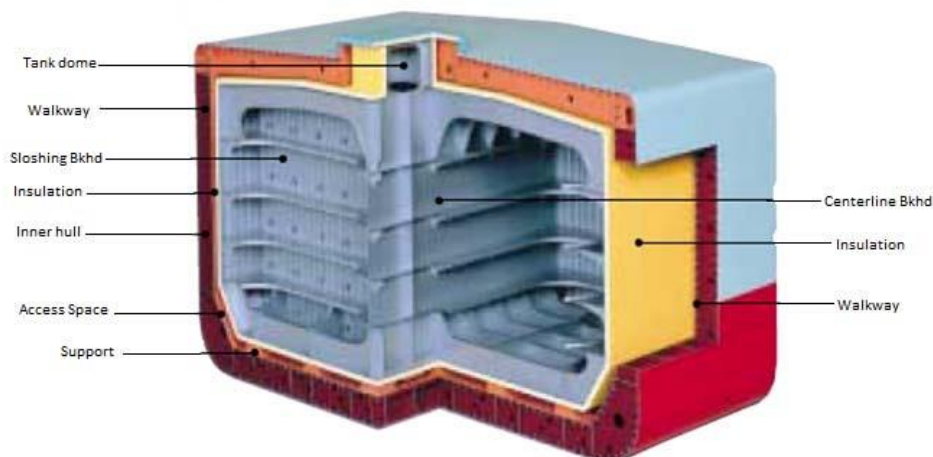
Οι σφαιρικού τύπου δεξαμενές δεν απαιτείται να φέρουν ένα πλήρες δευτερεύον φράγμα (secondary barrier), αλλά σχεδιάζονται με ένα μερικό δευτερεύον φράγμα στο οποίο συλλέγεται τυχόν διαρροή του υγρού φορτίου (drip tray). Συνήθως, ο χώρος μεταξύ της δεξαμενής και του εσωτερικού της γάστρας είναι πλήρως εφοδιασμένος με αδρανές αέριο για την αποφυγή εύφλεκτης ατμόσφαιρας σε περίπτωση διαρροής του φορτίου (CCNR/OCIMF, 2010). Το υλικό κατασκευής των πρώτων σφαιρικών δεξαμενών τύπου «B» ήταν 9% νικέλιο-χάλυβα. Έκτοτε, η κατασκευαστική προσέγγιση των δεξαμενών έχει αλλάξει και πλέον χρησιμοποιείται αλουμίνιο σειράς 5083 (Niotis, 2022). Κύριο χαρακτηριστικό των σφαιρικών δεξαμενών είναι το “equatorial ring”, το οποίο αποτελεί έναν δακτύλιο που στηρίζεται από μία κυλινδρική διάταξη, η οποία είναι συγκολλημένη

στη γάστρα του πλοίου και έτσι μεταβιβάζεται το βάρος της δεξαμενής στην κατασκευή του πλοίου. Επιπλέον, η μόνωση που χρησιμοποιείται στις δεξαμενές αυτές εγκαθίσταται στο εξωτερικό περίβλημα της δεξαμενής και το πρώτο στρώμα της μόνωσης καλύπτεται από μια στεγανή μεμβράνη, συνήθως κατασκευασμένη από αλουμίνιο με πάχος 0,25 mm (Niotis, 2022).



Εικόνα 21: Σφαιρική δεξαμενή (Moss type tank) τύπου «B» (Niotis,2022)

Στις δεξαμενές τύπου «B» συγκαταλέγονται και δεξαμενές, οι οποίες έχουν πρισματική μορφή. Οι πρισματικές δεξαμενές τύπου «B» είναι ευρέως γνωστές με την ονομασία «IHI-SPB», που προκύπτει από την κατασκευάστρια εταιρεία «Ishikawajima-Harima Heavy Industries». Η τεχνολογία SPB συμμορφώνεται πλήρως με τις απαιτήσεις του IMO που αφορούν στις δεξαμενές τύπου «B», πρισματικής μορφής και κατασκευάζονται από κράματα αλουμινίου σειράς 5083 (Niotis, 2022) (IHI Corporation, 2000). Για την μόνωση των δεξαμενών χρησιμοποιείται μονωτικός αφρός πολυουρεθάνης (PUF) και για την υποστήριξη της κατασκευής χρησιμοποιούνται τάκοι από ειδικά ενισχυμένο κόντρα πλακέ (plywood). Επιπλέον, οι δεξαμενές υποδιαιρούνται από μία διαμήκη φρακτή, η οποία βρίσκεται στο μέσο των δεξαμενών και από 4 οριζόντια διαχωριστικά τοιχώματα παφλασμού του φορτίου (swash bulkhead) (IHI Corporation, 2000).



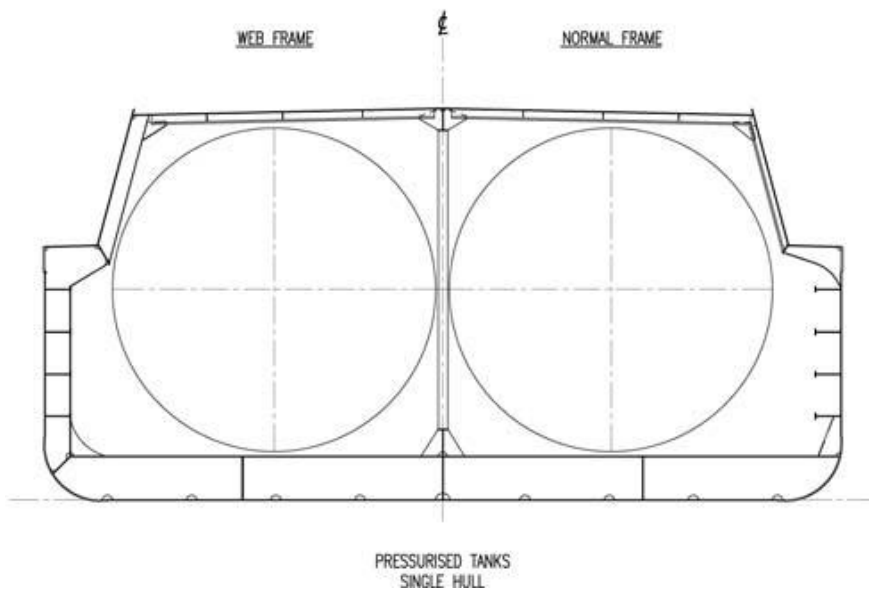
Εικόνα 22: Πρισματική δεξαμενή τύπου «B» (IHI-SPB tank) (Niotis, 2022).

5.5.3 Δεξαμενές τύπου «C»

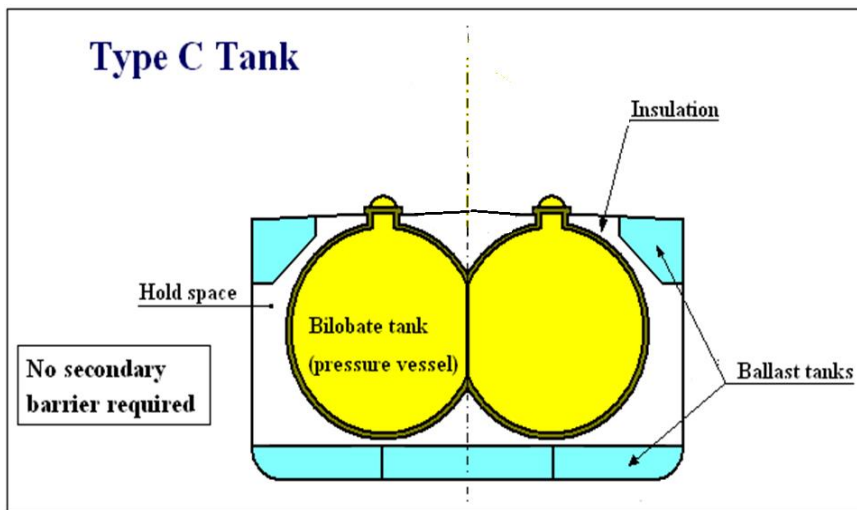
Οι δεξαμενές τύπου «C» έχουν συνήθως σφαιρική, κυλινδρική διατομή ή διατομή «bi-lobe» (bi-lobe design) και κατασκευάζονται για πιέσεις, οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν τα 4 bar (CCNR/OCIMF, 2010). Είναι κατάλληλες για πλοία με σχετικά μικρή χωρητικότητα, που δραστηριοποιούνται στην αγορά των LPG carriers. Η επιλογή της κατάλληλης διατομής των δεξαμενών για το κάθε πλοίο πρέπει να γίνεται με γνώμονα την καλύτερη αξιοποίηση του όγκου της γάστρας (Sillars, 2008). Συνήθως, χρησιμοποιούνται σε πλοία μεταφοράς αερίων σε κατάσταση ημιπίεσης (semi-pressurized) ή σε κατάσταση πλήρους πίεσης (fully-pressurized). Επιπλέον, είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν σε πλοία όπου το φορτίο τους μεταφέρεται υπό πλήρη ψύξη, υπό την προϋπόθεση ότι οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από κατάλληλους χάλυβες που αντέχουν σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Οι δεξαμενές τύπου «C» μπορούν να τοποθετηθούν στο πλοίο είτε σε οριζόντια θέση, είτε σε κατακόρυφη. Στο συγκεκριμένο τύπο δεξαμενών δεν απαιτείται δευτερεύον φράγμα (secondary barrier) και ο χώρος αποθήκευσης δύναται να γεμίσει με αδρανές αέριο ή με ξηρό αέρα (CCNR/OCIMF, 2010). Επίσης, στο χώρο φορτίου τοποθετούνται ειδικοί αισθητήρες που είναι σε θέση να ανιχνεύσουν τυχόν αλλαγή στη σύνθεση του αδρανούς αερίου ή του ξηρού αέρα λόγω των ατμών του μεταφερόμενου φορτίου. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να ανιχνευθούν και να αποτραπούν τυχόν διαρροές από τις δεξαμενές (Chakraborty, 2019).

Όταν οι δεξαμενές τύπου «C» χρησιμοποιούνται σε δεξαμενόπλοια πλήρους πίεσης (fully pressurized), όπου το φορτίο μεταφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορούν να σχεδιαστούν για μέγιστη πίεση λειτουργίας περί τα 18 bar. Επιπλέον, σε πλοία όπου μεταφέρουν το φορτίο τους σε κατάσταση ημιπίεσης (semi-pressurized), οι δεξαμενές είναι σχεδιασμένες για πιέσεις από 5 έως 7 bar. Επιπρόσθετα, οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των δεξαμενών έχουν την δυνατότητα να αντέχουν σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες της τάξεως των -48°C όταν το μεταφερόμενο φορτίο είναι υγραέριο ή -104°C για την μεταφορά αιθυλενίου (CCNR/OCIMF, 2010).

Εκτός από την ευρεία χρήση των δεξαμενών αυτών στα πλοία LPG, με την πάροδο του χρόνου προκρίνεται η χρήση τους και σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, που δραστηριοποιούνται σε εμπορικές συναλλαγές μικρής κλίμακας. Τέλος, μέχρι και σήμερα το μεγαλύτερο πλοίο που έχει κατασκευαστεί για να μεταφέρει το φορτίο του σε δεξαμενές τύπου «C», έχει χωρητικότητα 37.000 m³ (Niotis, 2022).



Εικόνα 23: Δεξαμενές τύπου «C» κυλινδρικής διατομής (CCNR/OCIMF, 2010)



Εικόνα 24: Δεξαμενές τύπου «C» διατομής τύπου «bi-lobe» (bi-lobe design) (Niotis, 2022).

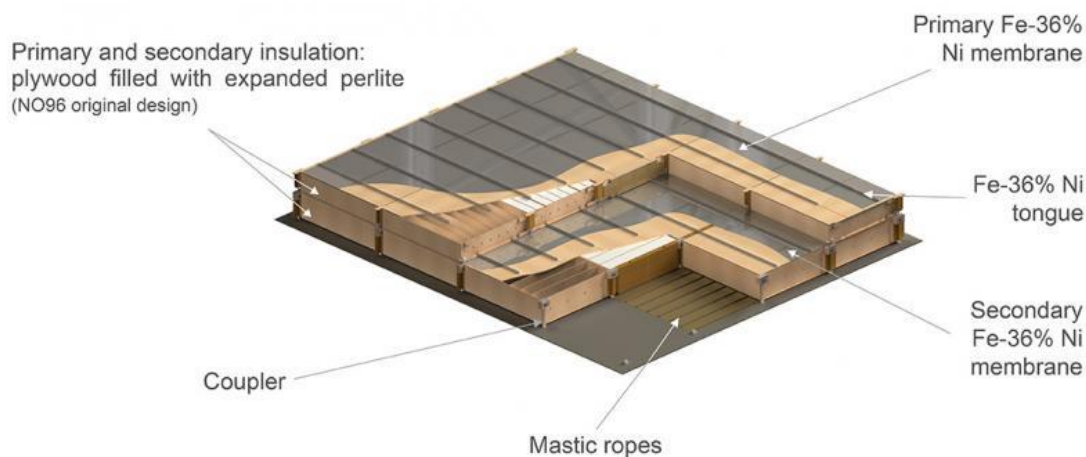
5.5.4 Δεξαμενές μεμβρανικού τύπου

Οι μεμβρανικού τύπου δεξαμενές αποτελούν κύριο δομικό μέρος του πλοίου και συμβάλλουν στην αντοχή του. Η κύρια φρακτή (primary barrier) της δεξαμενής αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα μεμβράνης που κυμαίνεται σε πάχος από 0,7mm – 1,5mm. Το στρώμα μεμβράνης με την σειρά του υποστηρίζεται στην εσωτερική δομή της

γάστρας μέσω μιας μόνωσης πάχους έως και 10mm, σύμφωνα με τον κώδικα IGC (Chakraborty, 2019). Για τις μεμβρανικού τύπου δεξαμενές είναι υποχρεωτικό να φέρουν μια δευτερεύουσα φρακτική (secondary barrier) για να διασφαλίζεται η ακεραιότητα της συνολικής κατασκευής. σε περίπτωση αστοχίας της κύριας φρακτικής (primary barrier). Η μεμβράνη που χρησιμοποιείται είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να μην καταπονείται, λόγω της θερμικής διαστολής ή συστολής (CCNR/OCIMF, 2010). Επιπλέον, η μόνωση που φέρουν οι δεξαμενές αυτές πρέπει να είναι σε θέση να προστατεύει πλήρως τα δομικά μέρη του πλοίου από τις εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (Niotis, 2022). Τα συστήματα μεμβρανικού τύπου έχουν αναπτυχθεί κατά κύριο λόγο για την μεταφορά του υγροποιημένου φυσικού αερίου δια θαλάσσης (LNG). Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων: το «No.96» που αναπτύχθηκε από την εταιρεία «Gaz Transport», το «Mark III», που αναπτύχθηκε από την εταιρεία «Technigaz» και το σύστημα «CSI», το οποίο αναπτύχθηκε έπειτα από την ένωση των δύο εταιρειών το 1994 (CCNR/OCIMF, 2010). Τέλος, τα φορτία λόγω του φαινομένου «sloshing» είναι ένα από τα κυριότερα προβλήματα των δεξαμενών αυτών. Για τον λόγο αυτό, κατά τον σχεδιασμό τους πρέπει να καθοριστούν τα επιτρεπόμενα όρια πλήρωσης των δεξαμενών, καθώς και να γίνει ανάλυση του φαινομένου (Niotis, 2022).

5.5.4.1 Σύστημα GTT No.96

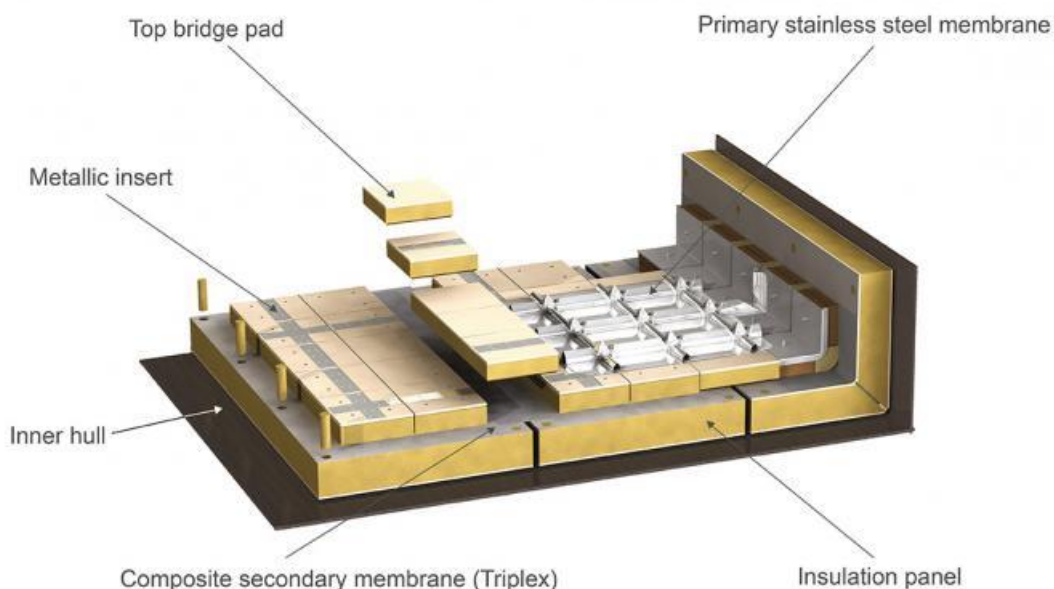
Στα συστήματα GTT 96 χρησιμοποιούνται δύο στρώματα μεμβράνης κατασκευασμένα από το υλικό «invar». Το «invar» είναι ένα κράμα από ανοξείδωτο χάλυβα με περιεκτικότητα 36 % νικέλιο και 0,2 % άνθρακα. Συγκεκριμένα, η κύρια μεμβράνη (primary membrane) βρίσκεται σε επαφή με το φορτίο και τοποθετείται επάνω στην κύρια μόνωση της δεξαμενής που αποτελείται από κουτιά κόντρα πλακέ (plywood) τα οποία στο εσωτερικό τους φέρουν μόνωση κατασκευασμένη από περλίτη. Το πάχος των κουτιών της μόνωσης κυμαίνεται από 200-300mm. Η δευτερεύουσα μεμβράνη (secondary membrane) με την σειρά της εξασφαλίζει την απαραίτητη στεγανότητα σε περίπτωση αστοχίας της κύριας μεμβράνης και της μόνωσης αυτής. Το υλικό κατασκευής της δευτερεύουσας μεμβράνης (secondary membrane), παραμένει ίδιο με της κύριας μεμβράνης (primary membrane). Επιπλέον, για την δευτερεύουσα μόνωση (secondary insulation) της δεξαμενής χρησιμοποιούνται εκ νέου κουτιά κατασκευασμένα από κόντρα πλακέ, που εμπεριέχουν μόνωση από περλίτη. Σε νεότερες σχεδιάσεις του συστήματος GTT 96 χρησιμοποιούνται μεμβράνες «invar» πάχους 0,7mm, οι οποίες κατανέμονται ομοιόμορφα κατά μήκος των τοιχωμάτων της δεξαμενής και υποστηρίζονται από τα κουτιά που συγκρατούν την μόνωση από περλίτη. Η μόνωση περλίτη, έπειτα από ειδική επεξεργασία, γίνεται ανθεκτικότερη στην υγρασία ή το νερό. Τέλος, το πάχος των κουτιών που εμπεριέχουν την μόνωση της δεξαμενής ποικίλει και εξαρτάται από το απαιτούμενο βαθμό του φαινομένου «boil-off» (CCNR/OCIMF, 2010).



Εικόνα 25: Σύστημα δεξαμενών «GTT-No.96» (Πηγή: <https://gtt.fr/technologies/no96-systems>)

5.5.4.2 Σύστημα GTT-Mark III

Το σύστημα δεξαμενών «GTT-Mark III», όπως και το «GTT No.96», υποστηρίζονται άμεσα από την δομή της γάστρας του πλοίου. Το παρόν σύστημα, αποτελείται από την κύρια μεμβράνη (primary membrane), πάχους 1,2mm, η οποία είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα 304L και έχει κυματοειδή μορφή. Η κύρια μεμβράνη τοποθετείται επάνω σε προκατασκευασμένα μονωτικά πάνελ (GTT-Mark III systems,). Το αρχικό σχέδιο των δεξαμενών αποτελούνταν από πλαστικοποιημένα πάνελ από ξύλο μπάλσα (balsa wood), τα οποία συγκρατούνταν από δύο στρώματα από κόντρα πλακέ. Ως μονωτικό υλικό χρησιμοποιείται αφρός πολουρεθάνης, ο οποίος είναι ενισχυμένος με κρούστες από κόντρα πλακέ ή με ίνες γυαλιού (ISGINTT, 2010). Η δευτερεύουσα μεμβράνη (secondary membrane), η οποία είναι τοποθετημένη ανάμεσα στις δύο στρώσεις της μόνωσης, είναι κατασκευασμένη από συνθετικό υλικό. Στον αρχικό σχεδιασμό του συστήματος το πάχος των προκατασκευασμένων πάνελ της μόνωσης ανερχόταν στα 270mm. Στον σχεδιασμό «Mark III-Flex» του 2011 το πάχος των πάνελ της κύριας μόνωσης παρέμεινε το ίδιο με την σχεδίαση του 1969 (100mm), ενώ των πάνελ της δευτερεύουσας μόνωσης της δεξαμενής αυξήθηκε στα 300mm. Η σχεδίαση «Mark III-Flex +», που πρωτοεμφανίστηκε στην αγορά το 2017, διαφοροποίησε το πάχος της δευτερεύουσας μόνωσης σε 380mm. Τέλος, σύμφωνα με την «GTT technologies», ο αρχικός σχεδιασμός τεχνολογίας «Mark III» για ένα πλοίο χωρητικότητας 170.000 m³ έχει ρυθμό εξάτμισης (boil-off rate) του μεταφερόμενου φορτίου της τάξεως του 0,15% V/ ημέρα, ο σχεδιασμός «Mark III-Flex» του 2011 έχει 0,10% V/ημέρα, ενώ ο σχεδιασμός «Mark III-Flex +» του 2017 μειώνει το ποσοστό του boil-off rate σε 0,07% V/ημέρα (Gaztransport & Technigaz, 2023).

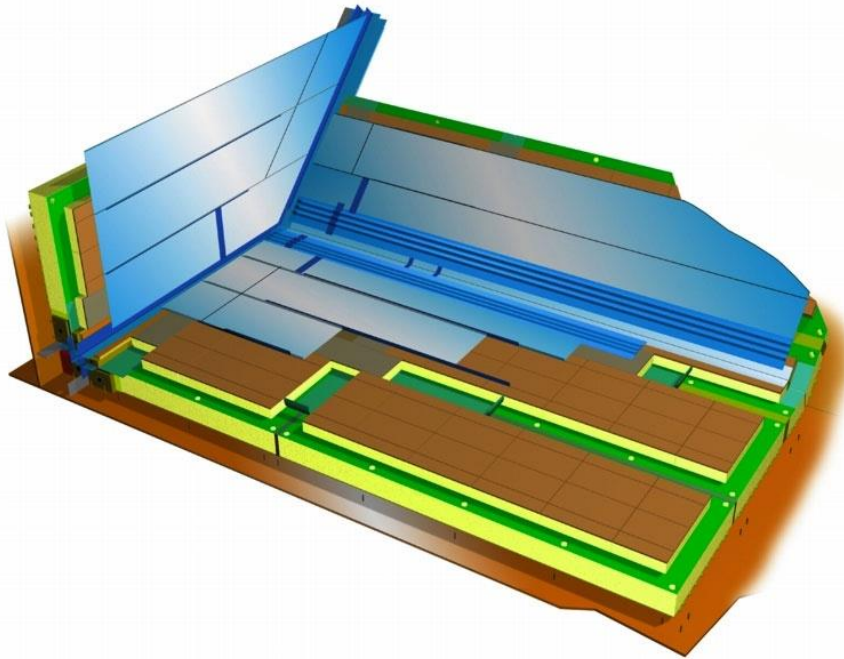


Εικόνα 26: Σύστημα δεξαμενών «GTT-Mark III» (Πηγή: <https://gtt.fr/technologies/markiii-systems>)

5.5.4.3 Σύστημα GTT-CS1

Το σύστημα «GTT-CS1» δεν διαφέρει σημαντικά από τα δύο παραπάνω συστήματα δεξαμενών, αφού κατασκευαστικά φέρει τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ήδη στα προαναφερθέντα συστήματα. Η κύρια μεμβράνη (primary membrane) του «GTT-CS1», είναι κατασκευασμένη από το υλικό «invar», τοποθετείται κατά μήκος των τοιχωμάτων της δεξαμενής, στερεώνεται στην μόνωση και έχει πάχος 0,7mm. Η δευτερεύουσα μεμβράνη (secondary membrane) κατασκευάζεται από ένα σύνθετο πολυστρωματικό υλικό, που αποτελείται από ένα φύλλο αλουμινίου τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο στρώσεις, αποτελούμενες από υαλοβάμβακα και ρητίνη. Επιπλέον, όπως και στα δύο προαναφερθέντα συστήματα έτσι και σε αυτό, η δευτερεύουσα μεμβράνη είναι τοποθετημένη ανάμεσα στα δύο μονωτικά στρώματα της δεξαμενής (Deybach, 2003).

Η μόνωση του συστήματος αυτού αποτελείται από προκατασκευασμένα πάνελ, τα οποία εμπεριέχουν ενισχυμένο αφρό πολυουρεθάνης. Το μέγεθος των προκατασκευασμένων πάνελ είναι συνήθως 3m x 1m. Επιπλέον, τα μονωτικά πάνελ τοποθετούνται στον εσωτερικό πυθμένα επάνω σε ένα στρώμα ρητίνης, σκοπός του οποίου είναι η συγκράτηση ολόκληρης της κατασκευής, καθώς και η ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων που ασκούνται στο σύστημα (Deybach, 2003).



Εικόνα 27: Σύστημα δεξαμενών «GTT-CS1» (Deybach, 2003).

5.6 Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO₂ (LCO₂ Carriers)

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, καθώς και τα χαρακτηριστικά¹ τους. Συγκεκριμένα, η παρούσα παράγραφος απαρτίζεται από δύο υποπαραγράφους. Στην πρώτη γίνεται λόγος για τα πλοία που βρίσκονται ήδη σε υπηρεσία και δραστηριοποιούνται στην αγορά των τεχνολογιών CCS και CCUS, που έχουν αναλυθεί στα κεφάλαια 3 και 4 αντίστοιχα. Επιπλέον, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά τους που αφορούν στις κύριες διαστάσεις, στην μηχανολογική εγκατάσταση, τον τύπο δεξαμενών που φέρουν, καθώς και η χωρητικότητα αυτών, ο αριθμός των προπελών που φέρουν και ο τύπος αυτών κ.α. Στην δεύτερη υποπαράγραφο παρουσιάζονται τα πλοία που βρίσκονται υπό κατασκευή και πλοία που πρόκειται να κατασκευαστούν στο μέλλον, με στόχο την διεύρυνση της αγοράς των τεχνολογιών CCUS και CCS. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στις κύριες διαστάσεις τους, την μηχανολογική τους εγκατάσταση, τον τύπο και την χωρητικότητα των δεξαμενών φορτίου και άλλα σημαντικά στοιχεία των πλοίων αυτών.

¹ Τα στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των πλοίων αντλήθηκαν από τις ιστοσελίδες : <https://www.larvik-shipping.no/fleet/> , <https://www.marinetraffic.com/>, <https://maritime.ihs.com/Account2/Index>

5.6.1 Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO₂ σε υπηρεσία

Ο υπάρχων στόλος των LCO₂ carriers, που δραστηριοποιούνται στα πλαίσια της τεχνολογίας CCUS, η οποία έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 4, αριθμεί τέσσερα πλοία. Τα τρία από αυτά ανήκουν στην εταιρεία χημικών «Nippon Gases Europe», η οποία χρησιμοποιεί το δεσμευμένο CO₂ στα πλαίσια της τεχνολογίας CCUS, ενώ διαχειρίστρια εταιρεία είναι η ναυτιλιακή «Larvik Shipping». Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλοίων που είναι σε υπηρεσία παρουσιάζονται παρακάτω.

Το πλοίο με την ονομασία «M/T EMBLA» και έτος κατασκευής το 2005, έχει ολικό μήκος (LOA) 82,5 m και μήκος μεταξύ καθέτων (LBP) ίσο με 79,40 m. Το πλάτος (B) του είναι 12,6 m και έχει βύθισμα (T) ίσο με 5,3 m. Επιπλέον, το κοίλο (D) του πλοίου ισούται με 8 m και η παραγόμενη ισχύς της μηχανολογικής εγκατάστασης είναι τα 1850kW ή 2515 HP στις 750 rpm. Επίσης, στο πλοίο είναι εγκατεστημένες δύο ηλεκτρογεννήτριες ισχύος 145 kW και 264 kW αντίστοιχα. Το νεκρό βάρος (DWT) του πλοίου είναι 3480 t και το εκτόπισμα του ανέρχεται σε 4544 t. Για την μεταφορά του φορτίου χρησιμοποιούνται κυλινδρικές δεξαμενές τοποθετημένες σε οριζόντια θέση (πιθανότατα δεξαμενές τύπου «C»), ενώ το φορτίο μεταφέρεται σε κατώτερη θερμοκρασία έως τους -30 °C. Τέλος, η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών είναι 1770 t-CO₂.



Εικόνα 28: Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, «M/T EMBLA» (Πηγή: <https://www.larvik-shipping.no/embla/>)

Το πλοίο με ονομασία «M/T FROYA» κατασκευάστηκε το 2005 και αποτελεί και αυτό ιδιοκτησία της εταιρείας «Nippon Gases Europe», ενώ διαχειρίστρια εταιρεία είναι η «Larvik Shipping». Επίσης, το πλοίο «M/T GERDA», με έτος κατασκευής το 2005, βρίσκεται υπό την διαχείριση της εταιρείας «Larvik Shipping», αλλά αποτελεί ιδιοκτησία άλλης εταιρείας. Τα δύο αυτά πλοία θεωρούνται «αδελφά πλοία» με το «M/T EMBLA», καθώς έχουν ακριβώς τα ίδια κύρια χαρακτηριστικά, ίδια μηχανολογική εγκατάσταση, ίδια ταχύτητα υπηρεσίας και χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου.



Εικόνα 29: Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, «M/T FROYA» (Πηγή: <https://www.larvik-shipping.no/froya/>)



Εικόνα 30: Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, «M/T GERDA»(Πηγή: <https://www.larvik-shipping.no/gerda-2/>)

Τέλος, το πλοίο «M/T HELLE», που κατασκευάστηκε το 1999 με ιδιοκτήτρια εταιρεία την «Nippon Gases Europe» και διαχειρίστρια την «Larvik Shipping», έχει ολικό μήκος (LOA) 79,55 m και μήκος μεταξύ καθέτων (LBP) ίσο με 74 m. Επιπρόσθετα, το βύθισμα (T) του είναι 4 m και το πλάτος (B) του είναι 13,75 m. Το κοίλο (D) του είναι 6,55 m, ενώ το νεκρό βάρος (DWT) ανέρχεται σε 1786 t και το εκτόπισμα του ισούται με 3007 t. Η κύρια μηχανή του πλοίου παράγει 1800 kW ή 2447 HP ισχύ στις 750 rpm. Επιπλέον, στο πλοίο είναι εγκατεστημένες δύο ηλεκτρογεννήτριες με ισχύ 190kW η κάθε μία. Η υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου είναι 14 kn. Οι δεξαμενές φορτίου είναι κυλινδρικές, τοποθετημένες σε οριζόντια θέση (πιθανότατα δεξαμενές τύπου «C») με συνολική χωρητικότητα 1240 t-CO₂.



Εικόνα 31: Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, «M/T HELLE» (Πηγή: <https://www.larvik-shipping.no/helle/>)

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας πλοίων LCO₂ carriers σε υπηρεσία

Όνομα πλοίου:	EMBLA	FROYA	HELLE	GERDA
IMO No.	9279446	9345350	9201906	9279410
Σημαία:	Νορβηγίας	Νορβηγίας	Νορβηγίας	Νορβηγίας
Έτος ναυπήγησης:	2005	2005	1999	2005
Ναυπηγείο:	Bodewes Shipyard, Ολλανδία	Bodewes Shipyard, Ολλανδία	Frisian Shipyard	Bodewes Shipyard, Ολλανδία
Ιδιοκτήτρια εταιρεία :	Nippon Gases Europe Ship			Praxair Ship
Διαχειρίστρια εταιρεία:	Larvik Shipping AS, Larvik, Norway			
Τύπος πλοίου:	CO ₂ gas carrier	CO ₂ gas carrier	CO ₂ gas carrier	CO ₂ gas carrier

Deadweight:	3480 t	3450 t	1786 t	3450 t
Χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου:	1770 m ³	1770 m ³	1240 m ³	1770 m ³
Gross Tonnage:	2506	2506	1825	2506
Net Tonnage:	752	752	547	752
Ολικό μήκος (L _{OA}):	82.5 m	82.5 m	79.55 m	82.5 m
Μήκος μεταξύ καθέτων (L _{BP}):	79.40 m	79.40 m	74 m	79.40 m
Πλάτος (B):	12.6 m	12.6 m	13.75 m	12.6 m
Βύθισμα (T):	5.3 m	5.2 m	4 m	5.2 m
Κοίλο (D):	8 m	8 m	6.55 m	8 m
Εκτόπισμα (Δ):	4530 t	4508 t	3007 t	4508 t
Lightship (LS):	1050 t	1058 t	1221 t	1058 t
Κύρια μηχανή:	6M25 4 STROKE 6CYL (CATERPILLAR)	6M25 4 STROKE 6CYL (CATERPILLAR)	6M25 4 STROKE 6CYL (CATERPILLAR)	6M25 4 STROKE 6CYL (CATERPILLAR)
Ηλεκτρογεννήτριες :	1x145kW 400V 50HZ , 1x264kW 400V 50HZ	1x236kW 400V 50HZ , 1x145kW 400V 50HZ	2 X 190 kW 440 V 60hz	1x145kW 400V 50HZ , 1x264kW 400V 50HZ
Ισχύς κύριας μηχανής:	1850kW (2,515 HP) @ 750 rpm	1850kW (2,515 HP) @ 750 rpm	1800kW (2,447 HP) @ 750 rpm	1850kW (2,515 HP) @ 750 rpm
Υπηρεσιακή ταχύτητα:	12.5 kn	12.5 kn	14 kn	12.5 kn

5.6.2 Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO₂ υπό κατασκευή

Η εταιρεία «Northern Lights» και η «Kawasaki Kisen Kaisha» υπέγραψαν το 2022 συμβόλαιο για την διαχείριση και την λειτουργία των υπό κατασκευή πλοίων της «Northern Lights». Τα πλοία πρόκειται να παραδοθούν το 2024 και θα συνεισφέρουν στο πρόγραμμα «Longship», το οποίο χρηματοδοτείται από την κυβέρνηση της Νορβηγίας, με σκοπό την δέσμευση του CO₂ από βιομηχανίες και την μόνιμη αποθήκευση του σε βάθος 2600 m, σε μία τοποθεσία στην Βόρεια Θάλασσα.

Τα δύο πλοία, που βρίσκονται υπό κατασκευή είναι χωρητικότητας 7500 m^3 , έχουν ολικό μήκος (LOA) ίσο με 127.8 m, πλάτος (B) 21.6 m, βύθισμα (T) 8 m και κοίλο (D) 11 m. Η εγκατεστημένη κύρια μηχανή τους (7S35ME-B9-GI) είναι κατασκευασμένη από την εταιρεία «MAN B&W» και παράγει 6090kW ή 8280 hp στις 167 rpm, ενώ χρησιμοποιεί ως καύσιμο το φυσικό αέριο (LNG). Επιπλέον, εκτός της κύριας μηχανής, τα πλοία αυτά θα έχουν εγκατεστημένο ένα ειδικό στροφείο, ύψους 28m και διαμέτρου 4 m, το οποίο θα υποβοηθά την πρόωση του πλοίου με την συμμετοχή της αιολικής ενέργειας και εκτιμάται ότι σε κάθε πλοίο θα επιτυγχάνεται μείωση καυσίμου και εκπομπών CO₂ της τάξεως του 5% (Blenkey, 2022). Τέλος, τα πλοία αυτά θα έχουν υπηρεσιακή ταχύτητα τους 14 κόμβους και το νεκρό βάρος τους (DWT) θα ανέρχεται σε 8000 t.



Εικόνα 32: Υπό κατασκευή πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, «Northern Lights» (Πηγή: <https://norlights.com/news/northern-lights-awards-ship-management-contract-to-k-line/>)

Η εταιρεία «Capital Gas» το 2022 αποφάσισε να επενδύσει στην κατασκευή του μεγαλύτερου έως και σήμερα πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα, χωρητικότητας 30.000 m^3 . Ήδη, ο Βρετανικός νηογνώμονας «Lloyd's Register» και το νηολόγιο της Λιβερίας ενέκριναν το σχεδιασμό και την κατασκευή του εν λόγω πλοίου. Ο Βρετανικός νηογνώμονας αναμένεται να συμμετάσχει στο έργο με την απαιτούμενη τεχνογνωσία, όσον αφορά τους τεχνικούς κανονισμούς, αλλά και την ανάπτυξη μιας νέας δεξαμενής τύπου «C», με την χρήση νέου χάλυβα. Συγκεκριμένα, ο χάλυβας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της δεξαμενής τύπου «C» θα κάνει τα δομικά μέρη του συστήματος πιο ελαφριά, διατηρώντας την δομική ακεραιότητα των δεξαμενών (Ναυτικά Χρονικά, 2022).

Ένα εξίσου μεγάλο εγχείρημα με αυτό της «Capital Gas» αποτελεί αυτό της εταιρείας «Mitsui O.S.K. Lines», η οποία ανέπτυξε σχέδια για την κατασκευή ενός LCO₂, συνολικής χωρητικότητας 64.000 m^3 . Το μεγάλοπνοο αυτό σχέδιο, έχει λάβει ήδη την έγκριση επί της αρχής από τον Ιαπωνικό νηογνώμονα «Class NK» (Blenkey, 2022).



Εικόνα 33: LCO₂ 64.000m³, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία «Mitsui O.S.K. Lines» (Πηγή: <https://www.marinelog.com/news/lco2-carrier-developments-set-to-pick-up-pace/>)

Παράλληλα, όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2, η εταιρεία «Mitsubishi Heavy Industries» έχει αναπτύξει σχέδια για την κατασκευή ενός πρότυπου LCO₂, το οποίο αναμένεται να παρουσιάσει στην αγορά έως το 2025 (Jiang, 2021). Ακόμα, η εταιρεία «Wärtsilä» έχει αναπτύξει ένα σχέδιο δεξαμενών συνολικής χωρητικότητας της τάξεως των 7500m³, κατάλληλων για χρήση σε πλοία LCO₂. Συγκεκριμένα, το σχέδιο απαρτίζεται από δύο δεξαμενές, χωρητικότητας 3750m³ η κάθε μία και έχει εγκριθεί από τον Νορβηγικό νηογνώμονα «DNV».

Κεφάλαιο 6 Μελέτη σκοπιμότητας δρομολόγησης πλοίου υδροποιημένου CO₂.

6.1 Εισαγωγή

Για να αξιολογηθεί εάν η επένδυση, που αφορά στην δρομολόγηση πλοίου υδροποιημένου CO₂ στην Ελλάδα είναι αποδοτική, στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση του κριτηρίου της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV), καθώς και διαφόρων άλλων κριτηρίων αξιολόγησης επενδύσεων. Επιπλέον, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα απαιτούμενα στοιχεία που χρειάζονται για να πραγματοποιηθεί η οικονομοτεχνική ανάλυση για την κατασκευή και λειτουργία του πλοίου εντός του Ελλαδικού χώρου. Συγκεκριμένα, εκτός από τον απαραίτητο ορισμό του σεναρίου κυκλικού ταξιδιού που θα εκτελεί το συγκεκριμένο πλοίο, γίνεται μια εκτίμηση των ετήσιων εκπομπών του εργοστασίου της ΔΕΗ στο Ηράκλειο Κρήτης, με σκοπό την εκλογή της μεταφορικής ικανότητας του υπό μελέτη πλοίου. Ακόμη, εντός του κεφαλαίου 6 αναφέρονται όλα τα απαραίτητα οικονομικά στοιχεία με τα οποία πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση της παρούσας επένδυσης.

6.2 Κριτήρια αξιολόγησης επενδύσεων

6.2.1 Ορισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV)

Η Καθαρή Παρούσα Αξία αποτελεί ένα μέσο αξιολόγησης μιας επένδυσης, το οποίο ανάγει τις μελλοντικές δοσοληψίες της υπό μελέτη επένδυσης στο παρόν. Με την χρησιμοποίηση του κριτηρίου αυτού είναι δυνατό να εκφραστούν οι εισροές και εκροές μιας επένδυσης σε σημερινές αξίες. Με τα παραπάνω επιτυγχάνεται να υπολογιστούν το καθαρό όφελος ή η ζημιά που θα προκύψει για τον επίδοξο επενδυτή στην χρονική στιγμή που απαιτείται να ληφθεί η απόφαση. Ο NPV υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{Inc_t - Exp_t}{(1+i)^t} - CAPEX$$

Όπου:

- **Inc** : τα έσοδα στο έτος t

- **Exp** : τα έξοδα στο έτος t
- **CAPEX**: οι κεφαλαιουχιακές δαπάνες το χρόνο t=0
- **r**: το επιτόκιο προεξόφλησης
- **N** : η διάρκεια ζωής της επένδυσης

Οι τιμές που μπορούν να προκύψουν για την ΚΠΑ είναι είτε θετικές είτε μηδενικές είτε αρνητικές.

- **NPV > 0**, η επένδυση που μελετάται θεωρείται κερδοφόρα.
- **NPV = 0**, η επένδυση χαρακτηρίζεται ως αδιάφορη καθώς δεν προκύπτει ούτε όφελος αλλά ούτε και ζημιά για τον επενδυτή.
- **NPV < 0**, η επένδυση κρίνεται ζημιογόνα για τον επενδυτή.

6.2.2 Ορισμός Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR)

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης μιας επένδυσης είναι ένας δείκτης που μετρά την απόδοση μίας μακροχρόνιας επένδυσης, εξισώνοντας την παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών ροών πλέον της τελικής αγοραίας αξίας, με την τρέχουσα αγοραία αξία. Όταν το επιτόκιο προεξόφλησης για μια χρηματοροή αυξάνει, ο NPV της χρηματοροής μειώνεται. Έτσι, ο IRR μπορεί να οριστεί ως το επιτόκιο προεξόφλησης που μηδενίζει τη χρηματοροή, δηλαδή το επιτόκιο εκείνο που εξισώνει την αρχική επένδυση με την αξία όλων των μελλοντικών ταμειακών ροών. Ουσιαστικά ο IRR δείχνει πόσο αποδοτική θεωρείται μια επένδυση ποσοστιαία. Τέλος, για να θεωρείται συμφέρουσα η επένδυση πρέπει το ποσοστό του IRR να είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό του πληθωρισμού. Ο IRR μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$0 = NPV = \sum_{t=1}^N \frac{Inc_t - Exp_t}{(1 + IRR)^t} - CAPEX$$

6.2.3 Περίοδος αποπληρωμής (Payback Period)

Το κριτήριο της περιόδου αποπληρωμής αποδίδει την χρονική περίοδο που απαιτείται για να καλυφθεί η δαπάνη της αρχικής επένδυσης από τις ετήσιες ταμιακές ροές. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, το συγκεκριμένο κριτήριο δεν λαμβάνει υπόψη τη διαχρονική αξία του χρήματος. Επιπλέον, με το συγκεκριμένο κριτήριο δεν λαμβάνεται υπόψη η κλίμακα της επένδυσης. Γενικότερα, όσο μικρότερη είναι η περίοδος ανάκτησης του κεφαλαίου τόσο ασφαλέστερη θεωρείται η επένδυση.

6.2.4 Απαιτούμενος Ναύλος (Required Freight Rate-RFR)

Το κριτήριο του απαιτούμενου ναύλου συναντάται συχνά στις θαλάσσιες μεταφορές και είναι ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κατά την φάση της μελέτης και σχεδίασης ενός πλοίου. Έτσι, για ένα συγκεκριμένο πλοίο εάν θεωρηθεί ότι ο ναύλος που εισπράττει το πλοίο παραμένει σταθερός, τότε ο NPV για την συγκεκριμένη επένδυση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{Inc_t - Exp_t}{(1+i)^t} - CAPEX + \left(\frac{2,5\% \times CAPEX}{(1+i)^N} \right)$$

Όπου:

- **Inc** : τα έσοδα του πλοίου που προέρχονται από την ναύλωση του πλοίου $Inc = F \times X$, όπου F ο ναύλος που εισπράττει το πλοίο και X το μεταφερόμενο φορτίο σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο.
- $\left(\frac{2,5\% \times CAPEX}{(1+i)^N} \right)$: Η αξία που θα έχει το πλοίο στο τέλος της διάρκειας ζωής του, εκφρασμένη σε σημερινές χρηματικές μονάδες.

Ο ναύλος F που μηδενίζει την Καθαρή Παρούσα Αξία καλείται απαιτούμενος ναύλος (RFR) για το υπό μελέτη πλοίο. Ουσιαστικά, ο RFR εκφράζει τον ελάχιστο ναύλο που θα πρέπει να εξασφαλίζει το πλοίο για τη διάρκεια ζωής της επένδυσης ώστε $NPV \geq 0$. Γενικότερα, σύμφωνα με το κριτήριο επιλέγεται το πλοίο με τον μικρότερο RFR, επειδή ένα τέτοιο πλοίο θα παρουσιάζει $NPV \geq 0$, ακόμη και για αρκετά χαμηλούς ναύλους.

6.3 Επισκόπηση της μελέτης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν δύο (2) διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ως οι επικρατέστερες για την μεταφορά του υγροποιημένου CO₂. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση η μεταφορά του φορτίου γίνεται σε κατάσταση ημί-πίεσης (7 bar, -50°C), ενώ στην δεύτερη περίπτωση που μελετάται το φορτίο βρίσκεται σε συνθήκες πλήρους πίεσης (15 bar, -30°C). Επιπλέον, η διάρκεια ζωής της επένδυσης θεωρείται ότι είναι τα 25 έτη. Ως βασική πηγή εφοδιασμού του υπό σχεδίαση πλοίου, θεωρείται ο ατμοηλεκτρικός σταθμός Λινοπεραμάτων στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης. Επιπρόσθετα, το υπό μελέτη πλοίο θα είναι σε θέση να εφοδιάζεται με φορτίο από τα διυλιστήρια των ΕΛΠΕ, στην περιοχή του Ασπροπύργου, καθώς και από την μονάδα των ΕΛΠΕ στην Θεσσαλονίκη. Τέλος, το πλοίο θα μεταφέρει το δεσμευμένο CO₂ έως το κοίτασμα του Πρίνου που βρίσκεται στην θαλάσσια περιοχή μεταξύ Καβάλας και Θάσου.



Εικόνα 34: Εγκαταστάσεις ΕΛΠΕ Ασπροπύργου (Πηγή: <https://www.reporter.gr/Periballon/411542-Τροποποιούνται-oi-periballontikoi-oroi-gia-to-diylithrio-twn-ELPE>)



Εικόνα 35: Εγκαταστάσεις στο κοίτασμα του Πρίνου (Πηγή: <https://energypress.gr/news>)



Εικόνα 36: ΑΗΣ Λινοπεραμάτων-Ηράκλειο Κρήτης (Πηγή: <https://www.nextplus.gr>)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, έγινε μια εκτίμηση των εκλυόμενων εκπομπών CO₂ από το εργοστάσιο της ΔΕΗ στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης, με στόχο την ορθολογική προσέγγιση του όγκου φορτίου που θα είναι σε θέση να μεταφέρει το πλοίο σε βάθος 25 ετίας. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι ετήσιες περιβαλλοντικές εκθέσεις που βρίσκονται ανηρτημένες στην ιστοσελίδα² του Υπουργείου Περιβάλλοντος & Ενέργειας και αφορούν στον ατμοηλεκτρικό σταθμό Λινοπεραμάτων, για τα έτη 2020, 2021. Βάσει των εκθέσεων, οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από το εργοστάσιο της ΔΕΗ ανέρχονται για το έτος 2020 σε 556.000 τόνους, ενώ το έτος 2021 ανέρχονται σε 623.000 τόνους. Στις παραπάνω τιμές έγινε μια προσαύξηση της τάξεως του 2% ανά έτος μέχρι το έτος 2050. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης αυτής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7: Υπολογισμένες ετήσιες εκπομπές ΑΗΣ Λινοπεραμάτων

ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΗΣ ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΩΝ	
Τόνοι/έτος	ΕΤΟΣ
556000	2020
623000	2021
635460	2022
648169	2023
661133	2024
674355	2025
687842	2026
701599	2027
715631	2028

² Οι περιβαλλοντικές εκθέσεις ανακτήθηκαν από την ιστοσελίδα : <https://ypen.gov.gr/>

729944	2029
744543	2030
759434	2031
774622	2032
790115	2033
805917	2034
822035	2035
838476	2036
855245	2037
872350	2038
889797	2039
907593	2040
925745	2041
944260	2042
963145	2043
982408	2044
1002056	2045
1022098	2046
1042539	2047
1063390	2048
1084658	2049
1106351	2050

Σύμφωνα με τον Jose Navarro (2021), ο λόγος διαστολής του CO₂ είναι 535:1, ενώ η πυκνότητα του σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι 1.97 kg/m³. Επιπλέον, η πυκνότητα του CO₂ σε πίεση 7bar και θερμοκρασία -50°C είναι 1153 kg/m³, ενώ σε πίεση 15 bar και θερμοκρασία -30°C ανέρχεται σε 1060 kg/m³. Βάσει αυτών υπολογίστηκε ότι το εργοστάσιο της ΔΕΗ σε βάθος 25 ετίας θα παράγει περίπου 1.200.000 τόνους υγροποιημένου CO₂. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε πως η καθαρότητα και το ποσοστό ανάκτησης του δεσμευόμενου CO₂ αγγίζουν το 100%. Με βάση τα παραπάνω εκτιμήθηκε ότι το 60% του φορτίου του πλοίου θα προέρχεται από την περιοχή των Λινοπεραμάτων (ΑΗΣ Λινοπεραμάτων και παρακείμενες βιομηχανίες), ενώ το υπόλοιπο 40% θα προέρχεται σε ποσοστό 20% από την περιοχή του Ασπροπύργου και σε ποσοστό 20% από τις εγκαταστάσεις των ΕΛΠΕ στην Θεσσαλονίκη. Επομένως, επιλέχθηκε να μελετηθεί ένα πλοίο με μεταφορική ικανότητα \cong 27300 τόνους υγροποιημένου CO₂.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι στην παρούσα μελέτη δεν ελήφθησαν υπόψη κόστη που αφορούν στην υγροποίηση του δεσμευμένου CO₂, αλλά και κεφαλαιουχικές, λειτουργικές δαπάνες που αφορούν στην κατασκευή και λειτουργία μιας μονάδας υγροποίησης πλησίον των βιομηχανιών. Σύμφωνα με το άρθρο των Roussanaly et al.

(2021), όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 48 (βλ. Παράρτημα IV), το συνολικό κόστος των παραπάνω μπορούν να ανέλθουν στα 14-15 €/tCO₂ για 100% ανάκτηση του CO₂ και 100% καθαρότητα. Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι τις δαπάνες αυτές τις επωμίζονται είτε ο εκάστοτε ναυλωτής είτε η βιομηχανία που ενδιαφέρεται να συμμετάσχει στην δέσμευση του CO₂ με σκοπό την αποφυγή υπέρογκων προστίμων που αφορούν στην απόρριψη του CO₂ στην ατμόσφαιρα.

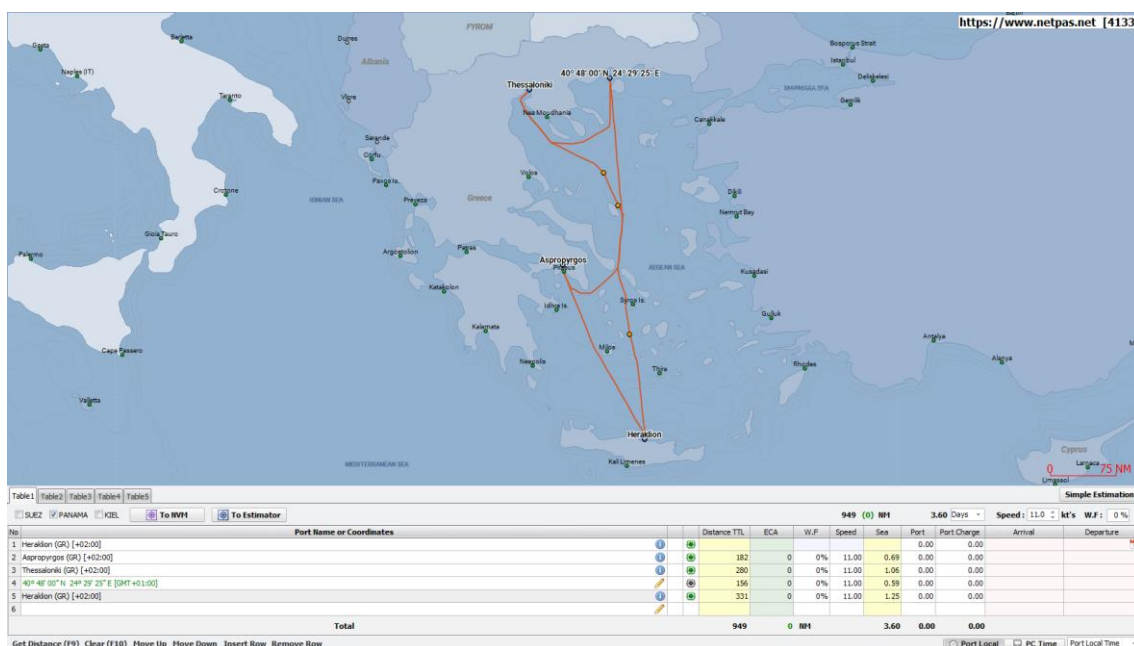
Η μελέτη της Element Energy (2018) αναφέρει ότι για τα πλοία που θα μεταφέρουν το υγροποιημένο CO₂ σε συνθήκες πίεσης 15bar και θερμοκρασίας -30°C, δεν είναι πρακτικό να έχουν μεταφορική ικανότητα άνω των 10.000 tCO₂ και αυτό γιατί όσο μειώνεται η πυκνότητα του υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα, το κόστος για τις δεξαμενές αυξάνεται, καθώς αυξάνεται και η πίεση. Επιπλέον, εντός της μελέτης αναφέρεται ότι οι συγκεκριμένες συνθήκες μεταφοράς του φορτίου συναντώνται στα ήδη υπάρχοντα LPG Carriers αλλά μόνο για πλοία με χωρητικότητα περί τους 10.000 τόνους. Επίσης, οι δεξαμενές που συναντώνται στα πλοία αυτά έχουν διάμετρο περίπου ίση με 9m που επιτρέπει μια διάταξη δεξαμενών 2x2, ενώ για μεγαλύτερα πλοία μπορεί να απαιτηθεί μια διάταξη όπου η μια δεξαμενή θα είναι επάνω στην άλλη και θεωρείται πιο περίπλοκη δομικά. Παράλληλα, στην μελέτη των ZEP/CCSA (2022) γίνεται λόγος για τα μεγέθη που πρέπει να έχουν τα πλοία που μεταφέρουν υγροποιημένο CO₂. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι τα πλοία με πίεση 15bar και -30°C έχουν μέγεθος έως 15.000 m³ και αυτό γιατί η ποσότητα-μάζα του χάλυβα που απαιτείται για την κατασκευή δεξαμενών σε πλοία άνω των 15.000 m³ με την συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία θεωρείται μη οικονομική επιλογή συγκριτικά με την ενέργεια που θα χρειαστεί να δαπανάται για να μεταφέρεται το φορτίο σε θερμοκρασία περί τους -50°C. Είναι φανερό πως και οι δύο μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι για να επιλεγούν οι κατάλληλες συνθήκες μεταφοράς του φορτίου θα πρέπει λαμβάνεται υπόψη και η μεταφορική ικανότητα του πλοίου. Με βάση τα παραπάνω στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης για τις συνθήκες 7bar, -50°C μελετήθηκε 1 πλοίο, ενώ για τις συνθήκες 15bar, -30°C μελετήθηκαν 2 πλοία που θα δραστηριοποιούνται στην μεταφορά του δεσμευμένου CO₂.

6.4 Σενάριο ταξιδιού & παραδοχές

Με την βοήθεια του λογισμικού Netpas υπολογίστηκαν τα ναυτικά μίλια για το κυκλικό ταξίδι το οποίο θα εκτελεί το υπό μελέτη πλοίο. Συγκεκριμένα, τα ναυτικά μίλια που θα πρέπει να καλύψει το πλοίο για ένα κυκλικό ταξίδι (Ηράκλειο-Ασπρόπυργος-Θεσσαλονίκη-Πρίνος-Ηράκλειο) ανέρχονται σε 949. Επιπλέον, η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου θεωρήθηκε ίση με 15 κόμβους. Ακόμη, η μέση κατανάλωση καυσίμου για το πλοίο των 7 bar πίεσης ανέρχεται σε 291,80 t/κυκλικό ταξίδι, ενώ για το πλοίο 15 bar ανέρχεται σε 158,83 t/κυκλικό ταξίδι, σύμφωνα με την μελέτη των Roussanaly et al. (2021) στην οποία η ειδική κατανάλωση καυσίμου υπολογίζεται σε $g_{fuel}/tCO_2/km$. Σύμφωνα με τον Jose Navarro (2021), ο ρυθμός φόρτωσης για ένα πλοίο χωρητικότητας 30.000 m³, μπορεί να φτάσει τους 2875 τόνους ανά ώρα, επιτυγχάνοντας έτσι το πλοίο να είναι πλήρως φορτωμένο εντός 12 ωρών. Συνεπώς, το πλοίο που μελετάται χρειάζεται 7.2 ώρες για φόρτωση του 60% της χωρητικότητας του και 2.4 ώρες για φόρτωση του

20% της χωρητικότητας του σε Ασπρόπυργο και Θεσσαλονίκη αντίστοιχα, με αποτέλεσμα ο συνολικός χρόνος φόρτωσης φορτίου για ένα κυκλικό ταξίδι να ανέρχεται σε 12 ώρες. Τέλος, ο χρόνος εισόδου/εξόδου από τα λιμάνια θεωρήθηκε ίσως με 3 ώρες για κάθε περίπτωση. Παρακάτω συνοψίζονται οι παραδοχές που αφορούν στο κυκλικό ταξίδι του υπό μελέτη πλοίου.

- Η συνολική απόσταση που θα καλύπτει το πλοίο σε ένα κυκλικό ταξίδι είναι ίση με 949 nm.
- Η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου θεωρείται ίση με 15 κόμβους.
- Ο συνολικός χρόνος εισόδου σε λιμάνια για ένα κυκλικό ταξίδι τίθεται ίσος με 12 ώρες.
- Ο συνολικός χρόνος εξόδου από λιμάνια για ένα κυκλικό ταξίδι τίθεται ίσος με 12 ώρες.
- Ο συνολικός χρόνος φόρτωσης για ένα κυκλικό ταξίδι θεωρείται ίσος με 12 ώρες.
- Ο συνολικός χρόνος εκφόρτωσης για ένα κυκλικό ταξίδι θεωρείται ίσος με 12 ώρες.
- Ο συνολικός χρόνος εν πλώ υπολογίζεται σε 63 ώρες.
- Ο χρόνος για ετήσιες επισκευές θεωρήθηκε ίσος με 480 ώρες ή 20 ημέρες.
- Το φαινόμενο του Boil-off θεωρείται αμελητέο κατά την διάρκεια του ταξιδιού.
- Τα συνολικά κυκλικά ταξίδια που θα είναι σε θέση να εκτελέσει το υπό μελέτη πλοίο υπολογίζονται σε 74 ταξίδια ανά έτος (και για τις δύο περιπτώσεις 7bar,15bar).



Εικόνα 37: Υπολογισμός απόστασης κυκλικού ταξιδιού (Πηγή: <http://www.netpas.net>)

Τα απαραίτητα οικονομικά στοιχεία που αφορούν σε κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX), λειτουργικές δαπάνες (OPEX), έξοδα λιμένων και στοιχεία που αφορούν στην ειδική κατανάλωση καυσίμου αντλήθηκαν από τις μελέτες των Roussanaly et al. (2021), την

μελέτης της Element Energy (2018), και παρουσιάζονται στο παράρτημα IV. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία που αφορούν στις δαπάνες των πλοίων που μελετώνται συνοψίζονται και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη

Δεδομένα/Δαπάνες	7bar, -50°C	15bar, -30°C ³
Αριθμός πλοίων	1	2
Μεταφερόμενο φορτίο	27260 t	13630 t
Κόστος κτήσης ⁴	58.321.600 €	82.290.000 €
Λιμενικά τέλη ⁵	1.548.335,8 €/έτος	1.010.716,1 €/έτος
Λειτουργικά έξοδα ⁶	3.499.296 €	4.937.400€/έτος
Ειδική κατανάλωση καυσίμου ⁷	6,09 gr/tCO ₂ /km	6,63 gr/tCO ₂ /km
Κατανάλωση καυσίμου	21.591,46 t/έτος	11.752,99 t/έτος
Κόστος καυσίμου MGO ⁸	745 €	745 €
Συνολικό κόστος καυσίμου	16.085.639,51 €	8.755.976,19 €

Για την μελέτη σκοπιμότητας του επενδυτικού σχεδίου λαμβάνονται υπόψη 4 πιθανά σενάρια:

1. Η επένδυση να καλυφτεί από 100% ίδια κεφάλαια.
2. Για την επένδυση να ληφθεί δάνειο ίσο με 30% του CAPEX και 70% να καλυφτεί από ίδια κεφάλαια
3. Για την επένδυση να ληφθεί δάνειο ίσο με 50% του CAPEX και 50% να καλυφτεί από ίδια κεφάλαια.
4. Για την επένδυση να ληφθεί δάνειο ίσο με 70% του CAPEX και 30% να καλυφτεί από ίδια κεφάλαια.

Ακόμη, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για κάθε τύπο πλοίου, αλλά και για κάθε πιθανό σενάριο από τα 4 σενάρια που παρουσιάζονται παραπάνω, υπολογίστηκαν οι τιμές του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου. Οι τιμές του RFR αντικατοπτρίζουν το σημείο αναφοράς με το οποίο ο πλοιοκτήτης θα πρέπει να διαπραγματευτεί τυχόν μελλοντικούς

³ Τα δεδομένα που παρουσιάζονται αναφέρονται στο 1 πλοίο.

⁴ Το CAPEX υπολογίζεται συναρτήσει της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου (Roussanaly et al.,2021).

⁵ Υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση $y=0.4635x+5559.3$, όπου x η μεταφορική ικανότητα του πλοίου. Η εξίσωση προκύπτει από την ανάλυση διαφόρων μελετών που συνοψίζονται και παρουσιάζονται στην μελέτη της Element Energy (2018).

⁶ Υπολογίστηκε ως το 6% του CAPEX.

⁷ Υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή συναρτήσει της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου (Roussanaly et al.,2021).

⁸ Μέση τιμή MGO για το λιμάνι του Πειραιά (Πηγή: <http://www.bunkerportsnews.com/>)

ναύλους, γνωρίζοντας ότι οποιαδήποτε χαμηλότερη τιμή θα οδηγήσει σε αρνητικό NPV. Στον πίνακα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις τιμές του RFR.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα υπολογισμού RFR για κάθε σενάριο & τύπο πλοίου

RFR (.000 €/DAY)								
i	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3		Σενάριο 4	
	7bar, -50°C	15 bar, -30°C	7 bar, -50°C	15 bar, -30°C	7 bar, -50°C	15 bar, -30°C	7 bar, -50°C	15 bar, -30°C
8	77,0	129,6	76,3	127,4	75,7	125,9	75,2	124,4
10	79,8	137,6	78,2	132,9	77,1	129,9	76,1	126,9
12	82,8	145,9	80,3	138,8	78,6	134,1	76,9	129,4

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τους παραπάνω υπολογισμούς αν ο υποψήφιος πλοιοκτήτης αποφασίσει να επενδύσει στην κατασκευή 2 πλοίων που μεταφέρουν το φορτίο σε συνθήκες 15bar στους -30°C, θα πρέπει να επιτύχει μεγαλύτερα συμβόλαια, συγκριτικά με το αν επενδύσει σε ένα πλοίο που μεταφέρει το φορτίο σε χαμηλή πίεση (7bar,-50°C). Επιπλέον, είναι εμφανές πως εάν η επένδυση καλυφτεί κατά 70% του CAPEX από δάνειο, ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος είναι χαμηλότερος από τα υπόλοιπα σενάρια.

Για τους υπολογισμούς που ακολουθούν και ειδικότερα για τον υπολογισμό των εσόδων των πλοίων που μελετώνται, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 13,31 €/tCO₂, 22,56 €/tCO₂, για το πλοίο χαμηλής πίεσης (7bar,-50°C) και για το πλοίο μέσης πίεσης (15bar,-30°C) αντίστοιχα, λόγω έλλειψης στοιχείων σχετικά με τα ναυλοσύμφωνα για τα πλοία υγροποιημένου CO₂. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από τον μέσο όρο των RFR που υπολογίστηκαν παραπάνω.

6.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για πλοίο χαμηλής πίεσης (7bar,-50°C)

6.5.1 Πρώτο σενάριο: 0% Δάνειο, 100% Ίδια κεφάλαια

Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται τα δεδομένα για τους υπολογισμούς του πρώτου σεναρίου, για το πλοίο που μεταφέρει το υγροποιημένο CO₂ σε χαμηλή πίεση, με ναύλο ίσο με 13,31 €/tCO₂.

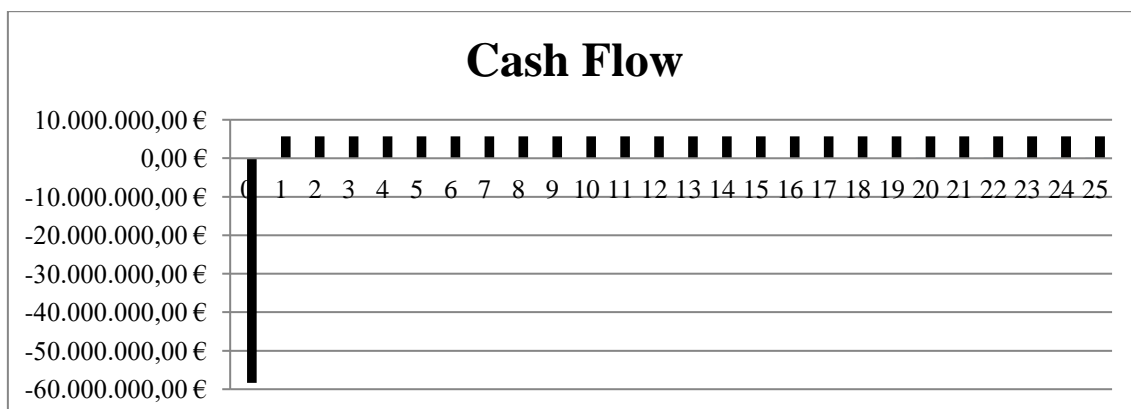
Πίνακας 10: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του πρώτου σεναρίου

Απαιτούμενη αρχική επένδυση	58.321.600 €
Ετήσια έσοδα	26.849.464,40 €
Ετήσια έξοδα	-21.133.271,29 €
Ετήσια κέρδη	5.716.193,11 €
Ναύλος	77.824,53 € / ημέρα

Το Cash Flow του πρώτου σεναρίου για χρονική διάρκεια της επένδυσης ίση με 25 χρόνια εξελίσσεται όπως φαίνεται στον πίνακα 11:

Πίνακας 11: Cash Flow πρώτου σεναρίου

CASH FLOW	
ΕΤΟΣ	PROFIT
0	-58,321,600.00 €
1	5,716,193.11 €
2	5,716,193.11 €
3	5,716,193.11 €
4	5,716,193.11 €
5	5,716,193.11 €
6	5,716,193.11 €
7	5,716,193.11 €
8	5,716,193.11 €
9	5,716,193.11 €
10	5,716,193.11 €
11	5,716,193.11 €
12	5,716,193.11 €
13	5,716,193.11 €
14	5,716,193.11 €
15	5,716,193.11 €
16	5,716,193.11 €
17	5,716,193.11 €
18	5,716,193.11 €
19	5,716,193.11 €
20	5,716,193.11 €
21	5,716,193.11 €
22	5,716,193.11 €
23	5,716,193.11 €
24	5,716,193.11 €
25	5,716,193.11 €



Διάγραμμα 13: Cash Flow πρώτου σεναρίου

Βάσει της εξέλιξης του Cash Flow του πρώτου σεναρίου, ο IRR υπολογίζεται ίσος με:

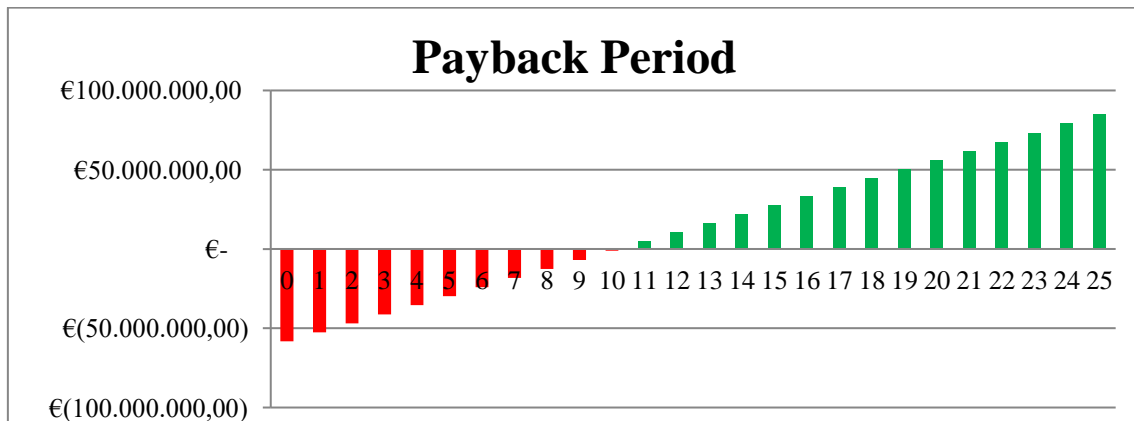
IRR 8.54%

Επιπλέον, στον πίνακα 12, παρουσιάζεται η εξέλιξη αποπληρωμής όπως υπολογίστηκε στα πλαίσια του τρέχοντος σεναρίου.

Πίνακας 12: Περίοδος αποπληρωμής πρώτου σεναρίου

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ	
ΕΤΟΣ	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ
0	-58,321,600.00 €
1	-52,605,406.89 €
2	-46,889,213.80 €
3	-41,173,020.68 €
4	-35,456,827.58 €
5	-29,740,634.47 €
6	-24,024,441.37 €
7	-18,308,248.26 €
8	-12,592,055.16 €
9	-6,875,862.05 €
10	-1,159,668.95 €
11	4,556,524.16 €
12	10,272,717.26 €
13	15,988,910.37 €
14	21,705,103.47 €
15	27,421,296.58 €
16	33,137,489.68 €
17	38,853,682.79 €

18	44,569,875.89 €
19	50,286,069.00 €
20	56,002,262.10 €
21	61,718,455.21 €
22	67,434,648.31 €
23	73,150,841.42 €
24	78,867,034.52 €
25	84,583,227.63 €

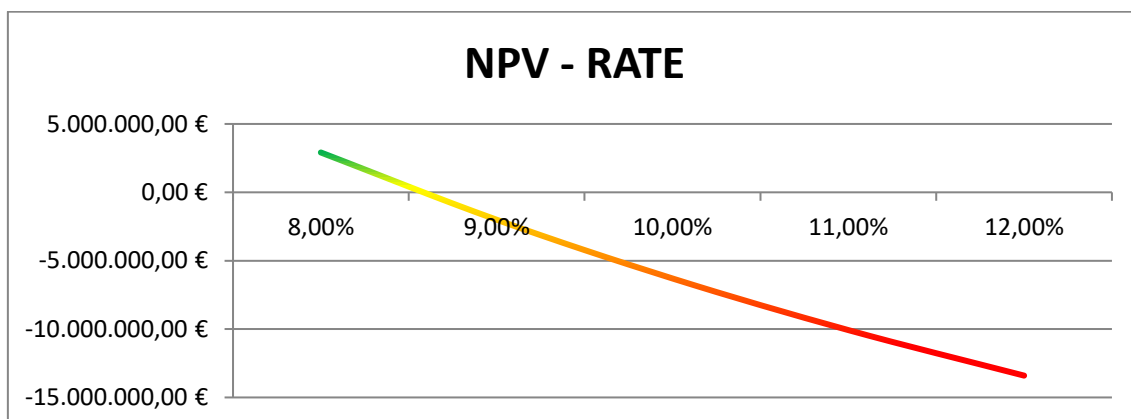


Διάγραμμα 14: Εξέλιξη αποπληρωμής πρώτου σεναρίου

Όπως διακρίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, το έτος αποπληρωμής είναι τα 10.2 χρόνια. Επιπλέον, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο υπολογισμός του NPV για διάφορες τιμές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Πίνακας 13: Τιμές του NPV για διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 1^ο

RATE	NPV
8.00%	2,910,381.99 €
9.00%	-2,004,752.45 €
10.00%	-6,300,915.18 €
11.00%	-10,073,957.68 €
12.00%	-13,402,935.55 €



Διάγραμμα 15: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 1°

6.5.2 Δεύτερο Σενάριο: 30% Δάνειο, 70% Ίδια κεφάλαια

Τα ετήσια έσοδα του δεύτερου σεναρίου προέρχονται από την ναύλωση του πλοίου, ενώ τα ετήσια έξοδα υπολογίζονται αθροίζοντας τα ετήσια λειτουργικά έξοδα, τα έξοδα καυσίμου, τα ετήσια έξοδα για λιμενικά τέλη, καθώς και την ετήσια δόση του δανείου θεωρώντας ότι το πλοίο ναυλώνεται με συμβόλαιο επαναληπτικής (consecutive) ναύλωσης μονού ταξιδιού.

Πίνακας 14: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του δεύτερου σεναρίου

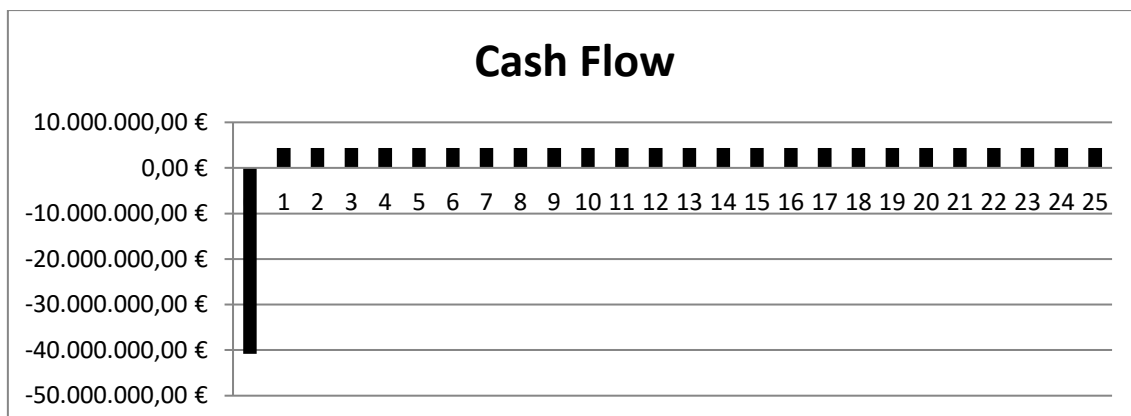
Απαιτούμενη αρχική επένδυση	58,321,600 €
Ετήσια έσοδα	26,849,464.40 €
Ποσό δανείου	17,496,480.00 €
Ετήσια δόση δανείου	1,368,692.21 €
Ίδια κεφάλαια	40,825,120.00 €
Ετήσια έξοδα	-22,501,963.51 €
Ετήσια κέρδη	4,347,500.89 €
Ναύλος	77,824.53 € / ημέρα

Η καθαρή χρηματοροή του δεύτερου σεναρίου παρουσιάζεται στον πίνακα 15.

Πίνακας 15: Cash Flow δεύτερου σεναρίου

CASH FLOW	
ΕΤΟΣ	PROFIT
0	-40,825,120.00 €
1	4,347,500.89 €
2	4,347,500.89 €
3	4,347,500.89 €
4	4,347,500.89 €
5	4,347,500.89 €

6	4,347,500.89 €
7	4,347,500.89 €
8	4,347,500.89 €
9	4,347,500.89 €
10	4,347,500.89 €
11	4,347,500.89 €
12	4,347,500.89 €
13	4,347,500.89 €
14	4,347,500.89 €
15	4,347,500.89 €
16	4,347,500.89 €
17	4,347,500.89 €
18	4,347,500.89 €
19	4,347,500.89 €
20	4,347,500.89 €
21	4,347,500.89 €
22	4,347,500.89 €
23	4,347,500.89 €
24	4,347,500.89 €
25	4,347,500.89 €



Διάγραμμα 16: Cash Flow δεύτερου σεναρίου

Βάσει της παραπάνω χρηματοροής, ο IRR υπολογίζεται ίσος με :

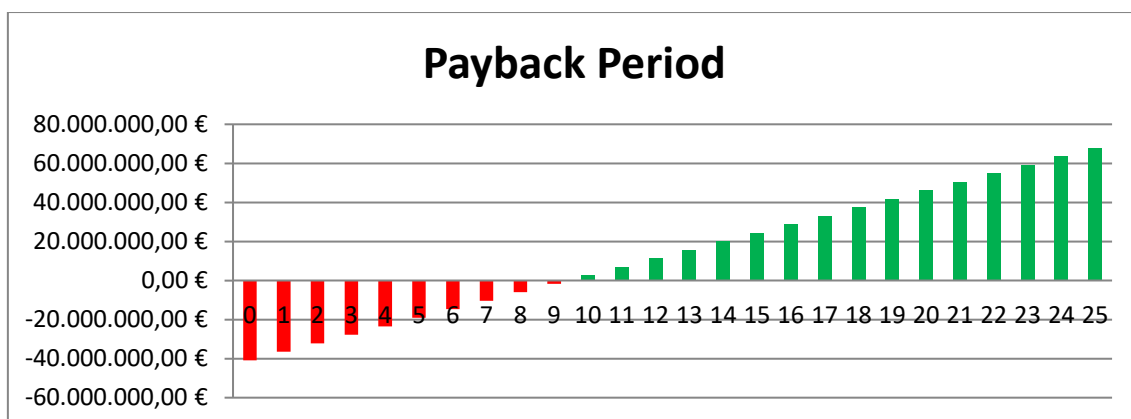
IRR 9.56 %

Για το δεύτερο σενάριο που μελετάται, το έτος αποπληρωμής υπολογίζεται ίσο με 9.39 έτη. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας αλλά και το διάγραμμα της εξέλιξης αποπληρωμής για το τρέχον σενάριο.

Πίνακας 16: Περίοδος αποπληρωμής δεύτερου σεναρίου

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ

ΕΤΟΣ	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ
0	-40,825,120.00 €
1	-36,477,619.11 €
2	-32,130,118.20 €
3	-27,782,617.32 €
4	-23,435,116.42 €
5	-19,087,615.53 €
6	-14,740,114.63 €
7	-10,392,613.74 €
8	-6,045,115.85 €
9	-1,697,611.95 €
10	2,649,888.94 €
11	6,997,389.84 €
12	11,344,890.73 €
13	15,692,391.63 €
14	20,039,892.52 €
15	24,387,393.42 €
16	28,734,894.31 €
17	33,082,395.20 €
18	37,429,896.10 €
19	41,777,396.89 €
20	46,124,897.89 €
21	50,472,398.78 €
22	54,819,899.68 €
23	59,167,400.57 €
24	63,514,901.47 €
25	67,862,402.36 €

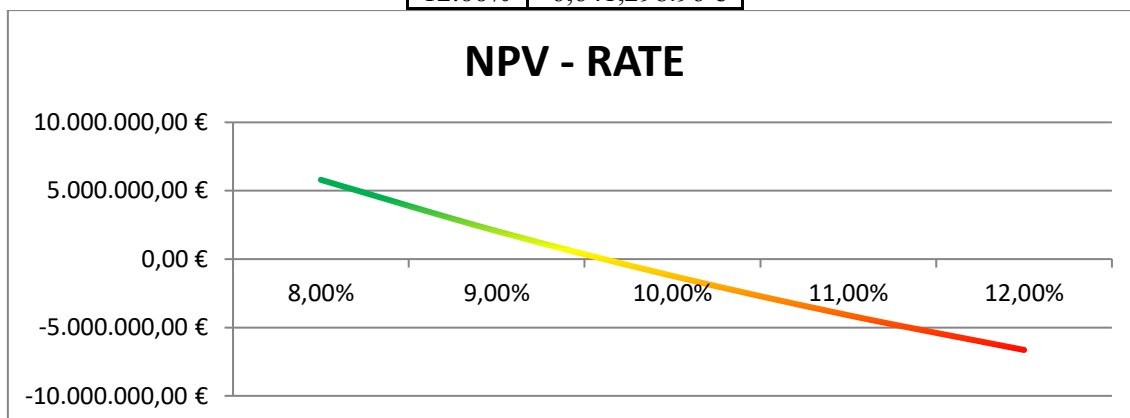


Διάγραμμα 17: Εξέλιξη αποπληρωμής δεύτερου σεναρίου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του NPV για διάφορες τιμές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Πίνακας 17: Τιμές του NPV για διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 2^ο

RATE	NPV
8.00%	5,796,378.97 €
9.00%	2,047,639.36 €
10.00%	-1,228,109.15 €
11.00%	-4,104,254.00 €
12.00%	-6,641,298.96 €



Διάγραμμα 18: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 2^ο

6.5.3 Τρίτο Σενάριο: 50% Δάνειο, 50% Ίδια κεφάλαια

Τα ετήσια έσοδα του τρίτου σεναρίου προέρχονται από την ναύλωση του πλοίου, ενώ τα ετήσια έξοδα υπολογίζονται αθροίζοντας τα ετήσια λειτουργικά έξοδα, τα έξοδα καυσίμου, τα ετήσια έξοδα για λιμενικά τέλη, καθώς και την ετήσια δόση του δανείου θεωρώντας ότι το πλοίο ναυλώνεται με συμβόλαιο επαναληπτικής (consecutive) ναύλωσης μονού ταξιδιού.

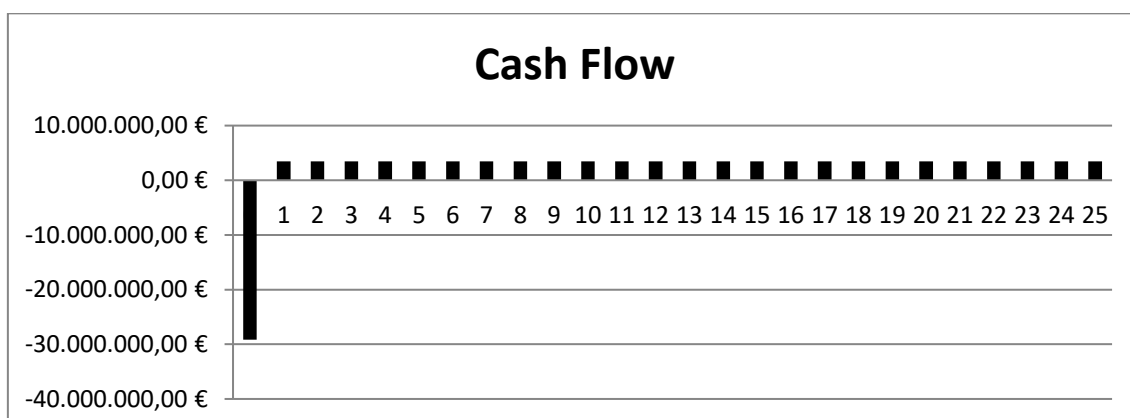
Πίνακας 18: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του τρίτου σεναρίου

Απαιτούμενη αρχική επένδυση	58,321,600.00 €
Ετήσια έσοδα	26,849,464.40 €
Ποσό δανείου	29,160,800.00 €
Ετήσια δόση δανείου	2,281,153.68 €
Ίδια κεφάλαια	29,160,800.00 €
Ετήσια έξοδα	-23,414,424.98 €
Ετήσια κέρδη	3,435,039.42 €
Ναύλος	77,824.53 € / ημέρα

Η καθαρή χρηματοροή του τρίτου σεναρίου για χρονική διάρκεια της επένδυσης ίση με 25 έτη παρουσιάζεται στον πίνακα 19.

Πίνακας 19: Cash Flow τρίτου σεναρίου

CASH FLOW	
ΕΤΟΣ	PROFIT
0	-29,160,800.00 €
1	3,435,039.42 €
2	3,435,039.42 €
3	3,435,039.42 €
4	3,435,039.42 €
5	3,435,039.42 €
6	3,435,039.42 €
7	3,435,039.42 €
8	3,435,039.42 €
9	3,435,039.42 €
10	3,435,039.42 €
11	3,435,039.42 €
12	3,435,039.42 €
13	3,435,039.42 €
14	3,435,039.42 €
15	3,435,039.42 €
16	3,435,039.42 €
17	3,435,039.42 €
18	3,435,039.42 €
19	3,435,039.42 €
20	3,435,039.42 €
21	3,435,039.42 €
22	3,435,039.42 €
23	3,435,039.42 €
24	3,435,039.42 €
25	3,435,039.42 €



Διάγραμμα 19: Cash Flow τρίτου σεναρίου

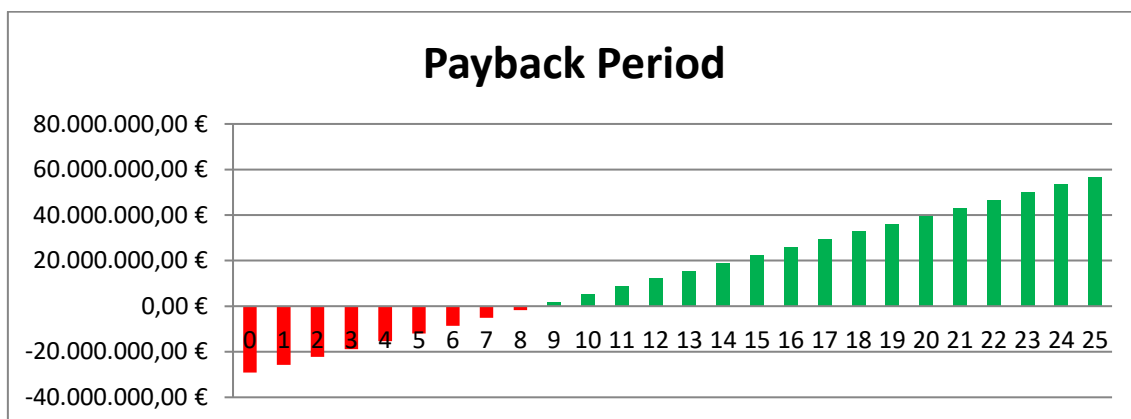
Με βάση την παραπάνω εξέλιξη του Cash Flow, ο IRR υπολογίζεται ίσος με:

IRR 10.89 %

Για το τρίτο σενάριο που μελετάται, το έτος αποπληρωμής υπολογίζεται ίσο με 8.49 έτη. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας αλλά και το διάγραμμα της εξέλιξης αποπληρωμής για το τρέχον σενάριο.

Πίνακας 20: Περίοδος αποπληρωμής τρίτου σεναρίου

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ	
ΕΤΟΣ	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ
0	-29,160,800.00 €
1	-25,725,760.58 €
2	-22,290,721.16 €
3	-18,855,681.74 €
4	-15,420,642.32 €
5	-11,985,602.90 €
6	-8,550,563.48 €
7	-5,115,524.06 €
8	-1,680,484.64 €
9	1,754,554.79 €
10	5,189,594.21 €
11	8,624,633.63 €
12	12,059,673.05 €
13	15,494,712.47 €
14	18,929,751.89 €
15	22,364,791.31 €
16	25,799,830.73 €
17	29,234,870.15 €
18	32,669,909.57 €
19	36,104,948.99 €
20	39,539,988.41 €
21	42,975,027.83 €
22	46,410,067.25 €
23	49,845,106.67 €
24	53,280,146.09 €
25	56,715,185.52 €

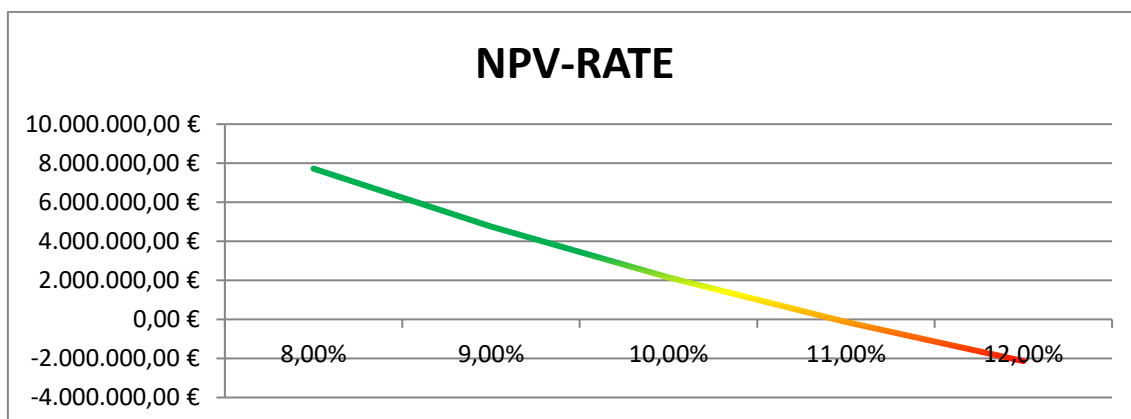


Διάγραμμα 20: Εξέλιξη αποπληρωμής τρίτου σεναρίου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του NPV για διάφορες τιμές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Πίνακας 21: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 3^ο

RATE	NPV
8.00%	7,720,376.96 €
9.00%	4,749,233.90 €
10.00%	2,153,761.54 €
11.00%	-124,451.55 €
12.00%	-2,133,541.23 €



Διάγραμμα 21: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 3^ο

6.5.4 Τέταρτο Σενάριο: 70% Δάνειο, 30% Ίδια κεφάλαια

Τα ετήσια έσοδα του τέταρτου σεναρίου προέρχονται από την ναύλωση του πλοίου, ενώ τα ετήσια έξοδα υπολογίζονται αθροίζοντας τα ετήσια λειτουργικά έξοδα, τα έξοδα καυσίμου, τα ετήσια έξοδα για λιμενικά τέλη, καθώς και την ετήσια δόση του δανείου

θεωρώντας ότι το πλοίο ναυλώνεται με συμβόλαιο επαναληπτικής (consecutive) ναύλωσης μονού ταξιδιού.

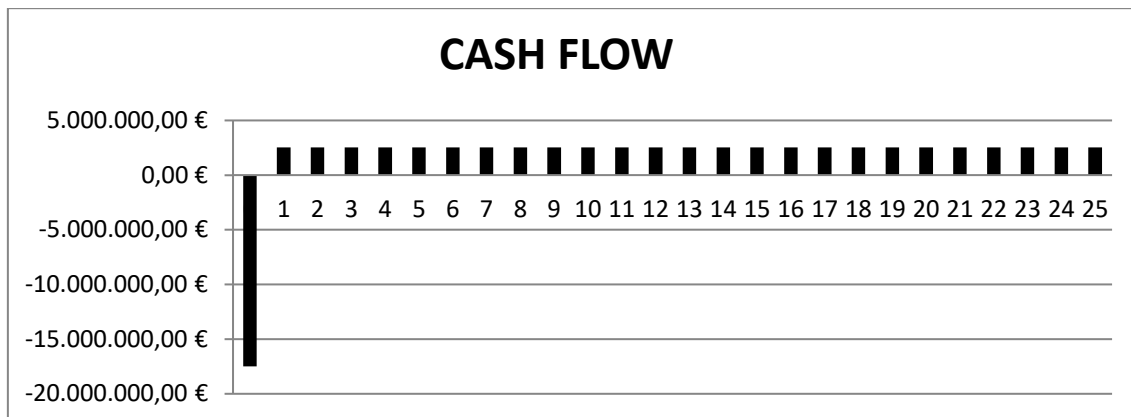
Πίνακας 22: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του τέταρτου σεναρίου

Απαιτούμενη αρχική επένδυση	58,321,600.00 €
Ετήσια έσοδα	26,849,464.40 €
Ποσό δανείου	40,825,120.00 €
Ετήσια δόση δανείου	3,193,615.16 €
Ίδια κεφάλαια	17,496,480.00 €
Ετήσια έξοδα	-24,326,886.45 €
Ετήσια κέρδη	2,522,577.95 €
Ναύλος	77,824.53 € / ημέρα

Η καθαρή χρηματοροή του τρίτου σεναρίου για χρονική διάρκεια της επένδυσης ίση με 25 έτη παρουσιάζεται στον πίνακα 23.

Πίνακας 23: Cash Flow τέταρτου σεναρίου

CASH FLOW	
ΕΤΟΣ	PROFIT
0	-17,496,480.00 €
1	2,522,577.95 €
2	2,522,577.95 €
3	2,522,577.95 €
4	2,522,577.95 €
5	2,522,577.95 €
6	2,522,577.95 €
7	2,522,577.95 €
8	2,522,577.95 €
9	2,522,577.95 €
10	2,522,577.95 €
11	2,522,577.95 €
12	2,522,577.95 €
13	2,522,577.95 €
14	2,522,577.95 €
15	2,522,577.95 €
16	2,522,577.95 €
17	2,522,577.95 €
18	2,522,577.95 €
19	2,522,577.95 €
20	2,522,577.95 €
21	2,522,577.95 €
22	2,522,577.95 €
23	2,522,577.95 €
24	2,522,577.95 €
25	2,522,577.95 €



Διάγραμμα 22: Cash Flow τέταρτου σεναρίου

Με βάση την παραπάνω εξέλιξη του Cash Flow, ο IRR υπολογίζεται ίσος με:

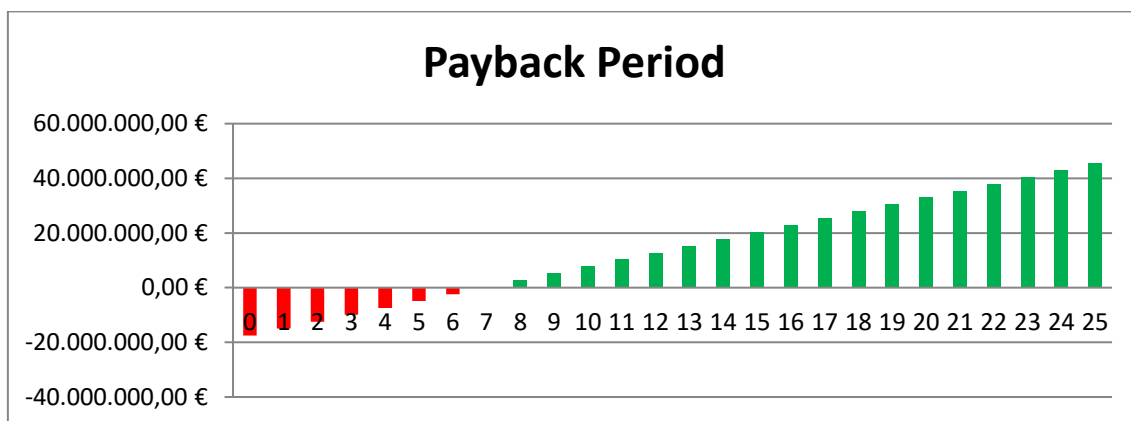
IRR 13.86 %

Για το τέταρτο σενάριο που μελετάται, το έτος αποπληρωμής υπολογίζεται ίσο με 6.94 έτη. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας αλλά και το διάγραμμα της εξέλιξης αποπληρωμής για το τρέχον σενάριο.

Πίνακας 24: Περίοδος αποπληρωμής τέταρτου σεναρίου

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ	
ΕΤΟΣ	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ
0	-17,496,480.00 €
1	-14,973,902.05 €
2	-12,451,324.11 €
3	-9,928,746.16 €
4	-7,406,168.21 €
5	-4,883,590.27 €
6	-2,361,012.32 €
7	161,565.63 €
8	2,684,143.58 €
9	5,206,721.52 €
10	7,729,299.47 €
11	10,251,877.42 €
12	12,774,455.36 €
13	15,297,033.51 €
14	17,819,611.26 €
15	20,342,189.20 €
16	22,864,767.15 €
17	25,387,345.10 €
18	27,909,923.04 €

19	30,432,500.99 €
20	32,955,078.94 €
21	35,477,656.88 €
22	38,000,234.83 €
23	40,522,812.78 €
24	43,045,390.72 €
25	45,567,968.67 €

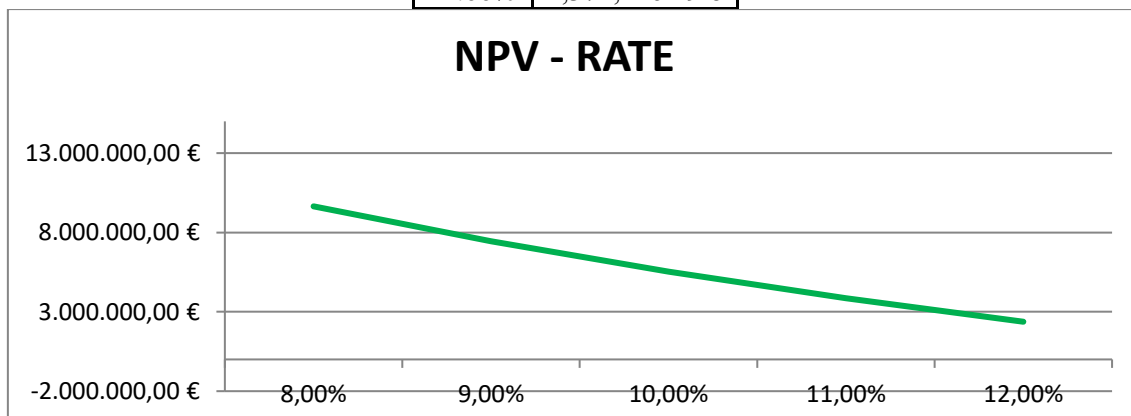


Διάγραμμα 23: Εξέλιξη αποπληρωμής τέταρτου σεναρίου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του NPV για διάφορες τιμές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Πίνακας 25: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 4^ο

RATE	NPV
8.00%	9,644,374.95 €
9.00%	7,450,828.44 €
10.00%	5,535,632.23 €
11.00%	3,855,350.90 €
12.00%	2,374,216.49 €



Διάγραμμα 24: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 4^ο

6.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 2 πλοία μέσης πίεσης (15bar,-30°C)

6.6.1 Πρώτο Σενάριο: 0% Δάνειο, 100% Ίδια κεφάλαια

Στον πίνακα 26 παρουσιάζονται τα δεδομένα για τους υπολογισμούς του πρώτου σεναρίου, για τα πλοία που μεταφέρουν το υγροποιημένο CO₂ σε μέση πίεση, με ναύλο ίσο με 22,56 €/tCO₂.

Πίνακας 26: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του πρώτου σεναρίου

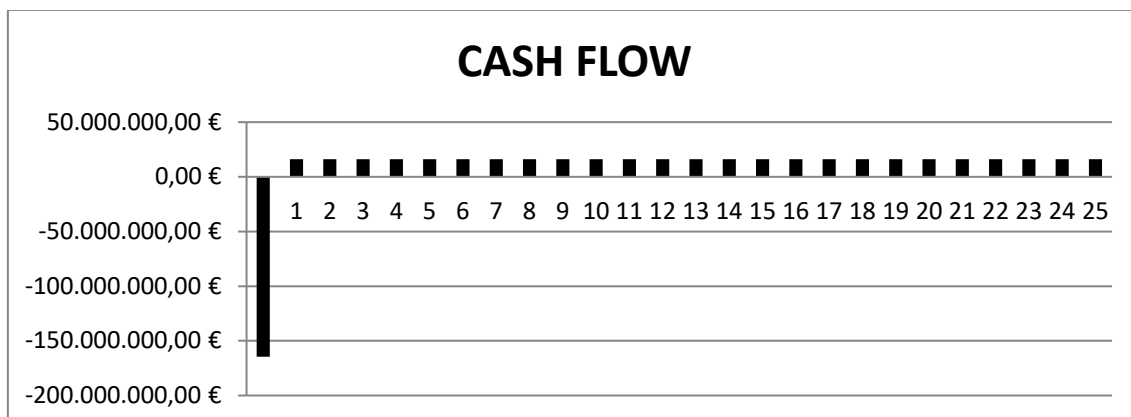
Απαιτούμενη αρχική επένδυση	164,580,000.00 €
Ετήσια έσοδα	45,508,000.40 €
Ετήσια έξοδα	-29,408,184.59 €
Ετήσια κέρδη	16,100,749.81 €
Ναύλος	65,954.98 € /ημέρα/πλοίο

Το Cash Flow του πρώτου σεναρίου για χρονική διάρκεια της επένδυσης ίση με 25 χρόνια εξελίσσεται όπως φαίνεται στον πίνακα 27:

Πίνακας 27: Cash Flow πρώτου σεναρίου

CASH FLOW	
ΕΤΟΣ	PROFIT
0	-164,580,000.00 €
1	16,100,749.81 €
2	16,100,749.81 €
3	16,100,749.81 €
4	16,100,749.81 €
5	16,100,749.81 €
6	16,100,749.81 €
7	16,100,749.81 €
8	16,100,749.81 €
9	16,100,749.81 €
10	16,100,749.81 €
11	16,100,749.81 €
12	16,100,749.81 €
13	16,100,749.81 €
14	16,100,749.81 €
15	16,100,749.81 €
16	16,100,749.81 €
17	16,100,749.81 €
18	16,100,749.81 €
19	16,100,749.81 €
20	16,100,749.81 €

21	16,100,749.81 €
22	16,100,749.81 €
23	16,100,749.81 €
24	16,100,749.81 €
25	16,100,749.81 €



Διάγραμμα 25: Cash Flow πρώτου σεναρίου

Με βάση την παραπάνω εξέλιξη του Cash Flow, ο IRR υπολογίζεται ίσος με:

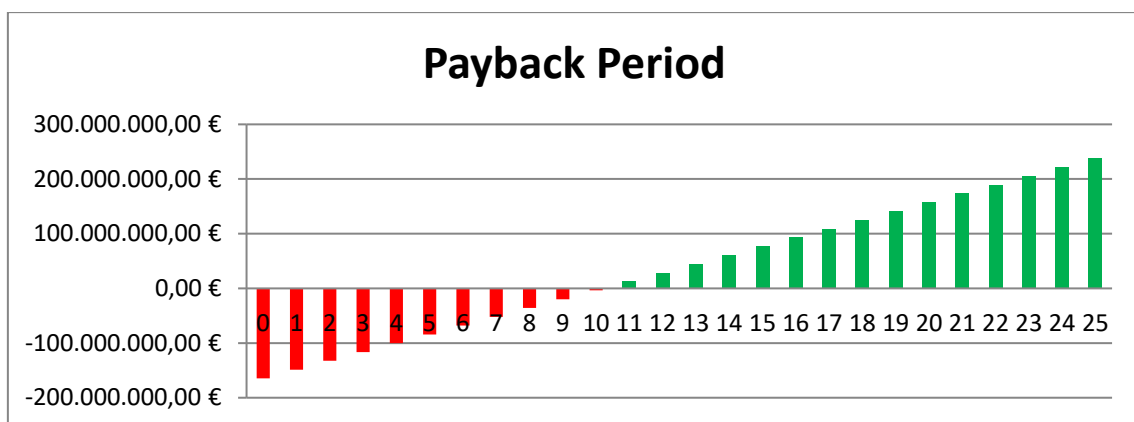
IRR 8.51 %

Για το πρώτο σενάριο που μελετάται, το έτος αποπληρωμής υπολογίζεται ίσο με 10.22 έτη. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας αλλά και το διάγραμμα της εξέλιξης αποπληρωμής για το τρέχον σενάριο.

Πίνακας 28: Περίοδος αποπληρωμής πρώτου σεναρίου

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ	
ΕΤΟΣ	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ
0	-164,580,000.00 €
1	-148,479,250.19 €
2	-132,378,500.38 €
3	-116,277,750.56 €
4	-100,177,000.75 €
5	-84,076,250.94 €
6	-67,975,501.13 €
7	-51,874,751.32 €
8	-35,774,001.51 €
9	-19,673,251.69 €
10	-3,572,501.88 €
11	12,528,247.93 €
12	28,628,997.74 €
13	44,729,747.55 €

14	60,830,497.36 €
15	76,931,247.18 €
16	93,031,996.99 €
17	109,132,746.80 €
18	125,233,496.61 €
19	141,334,246.42 €
20	157,434,996.24 €
21	173,535,746.05 €
22	189,636,495.86 €
23	205,737,245.67 €
24	221,837,995.48 €
25	237,938,745.29 €

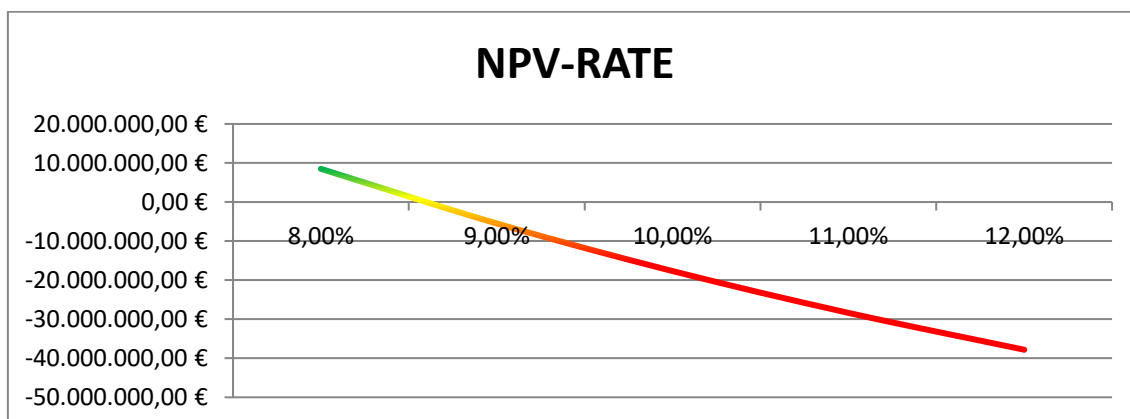


Διάγραμμα 26: Εξέλιξη αποπληρωμής πρώτου σεναρίου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του NPV για διάφορες τιμές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Πίνακας 29: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 1°

RATE	NPV
8.00%	8,493,482.05 €
9.00%	-5,474,803.96 €
10.00%	-17,673,345.87 €
11.00%	-28,377,875.23 €
12.00%	-37,815,522.43 €



Διάγραμμα 27: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 1°

6.6.2 Δεύτερο Σενάριο: 30% Δάνειο, 70% Ίδια κεφάλαια

Τα ετήσια έσοδα του δεύτερου σεναρίου προέρχονται από την ναύλωση των πλοίων, ενώ τα ετήσια έξοδα υπολογίζονται αθροίζοντας τα ετήσια λειτουργικά έξοδα, τα έξοδα καυσίμου, τα ετήσια έξοδα για λιμενικά τέλη, καθώς και την ετήσια δόση του δανείου θεωρώντας ότι τα πλοία ναυλώνονται με συμβόλαιο επαναληπτικής (consecutive) ναύλωσης μονού ταξιδιού.

Πίνακας 30: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του δεύτερου σεναρίου

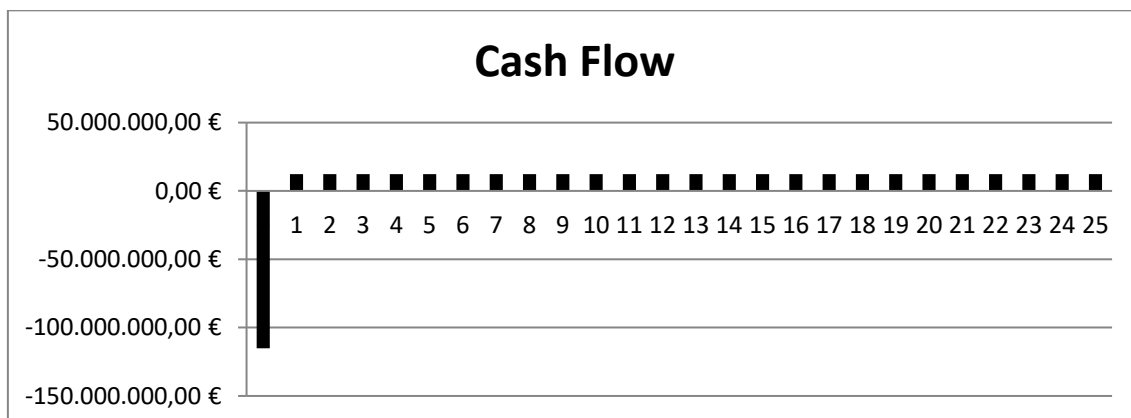
Απαιτούμενη αρχική επένδυση	164,580,000.00 €
Ετήσια έσοδα	45,508,934.40 €
Ποσό δανείου	49,374,000.00 €
Ετήσια δόση δανείου	3,862,365.99 €
Ίδια κεφάλαια	115,206,000.00 €
Ετήσια έξοδα	-33,270,550.57 €
Ετήσια κέρδη	12,238,383.83 €
Ναύλος	65,954.98 € /ημέρα/πλοίο

Το Cash Flow του δεύτερου σεναρίου για χρονική διάρκεια της επένδυσης ίση με 25 χρόνια εξελίσσεται όπως φαίνεται στον πίνακα 31:

Πίνακας 31: Cash Flow δεύτερου σεναρίου

CASH FLOW	
ΕΤΟΣ	PROFIT
0	-115,206,000.00 €
1	12,238,383.83 €
2	12,238,383.83 €
3	12,238,383.83 €
4	12,238,383.83 €
5	12,238,383.83 €
6	12,238,383.83 €

7	12,238,383.83 €
8	12,238,383.83 €
9	12,238,383.83 €
10	12,238,383.83 €
11	12,238,383.83 €
12	12,238,383.83 €
13	12,238,383.83 €
14	12,238,383.83 €
15	12,238,383.83 €
16	12,238,383.83 €
17	12,238,383.83 €
18	12,238,383.83 €
19	12,238,383.83 €
20	12,238,383.83 €
21	12,238,383.83 €
22	12,238,383.83 €
23	12,238,383.83 €
24	12,238,383.83 €
25	12,238,383.83 €



Διάγραμμα 28: Cash Flow δεύτερου σεναρίου

Με βάση την παραπάνω εξέλιξη του Cash Flow, ο IRR υπολογίζεται ίσος με:

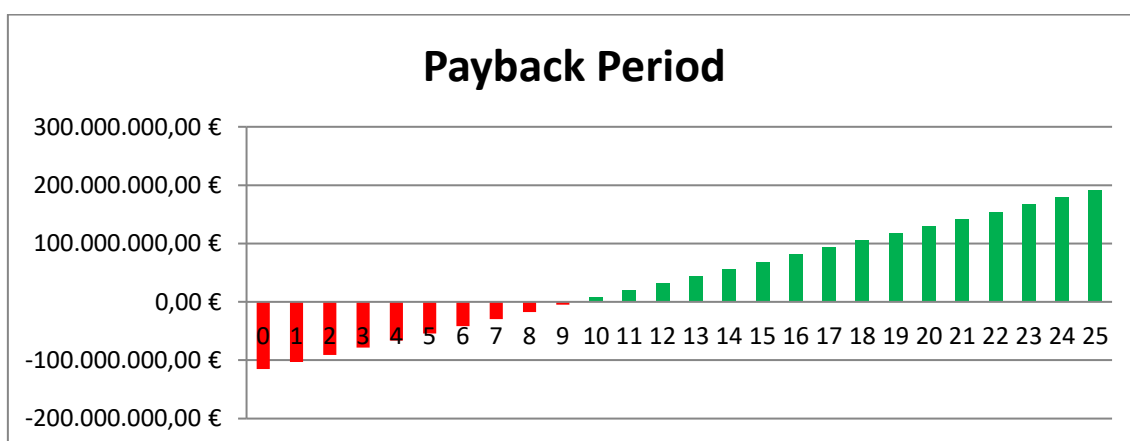
IRR 9.53 %

Για το πρώτο σενάριο που μελετάται, το έτος αποπληρωμής υπολογίζεται ίσο με 9.41 έτη. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας αλλά και το διάγραμμα της εξέλιξης αποπληρωμής για το τρέχον σενάριο.

Πίνακας 32: Περίοδος αποπληρωμής δεύτερου σεναρίου

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ	
ΕΤΟΣ	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ

0	-115,206,000.00 €
1	-102,967,616.17 €
2	-90,729,232.35 €
3	-78,490,848.52 €
4	-66,252,464.69 €
5	-54,014,080.87 €
6	-41,775,697.04 €
7	-29,537,313.21 €
8	-17,298,929.39 €
9	-5,060,545.56 €
10	7,177,838.27 €
11	19,416,222.09 €
12	31,654,605.92 €
13	43,892,989.75 €
14	56,131,373.57 €
15	68,369,757.40 €
16	80,608,141.23 €
17	92,846,525.05 €
18	105,084,908.88 €
19	117,323,292.71 €
20	129,561,676.53 €
21	141,800,060.36 €
22	154,038,444.19 €
23	166,276,828.02 €
24	178,515,211.84 €
25	190,753,595.67 €

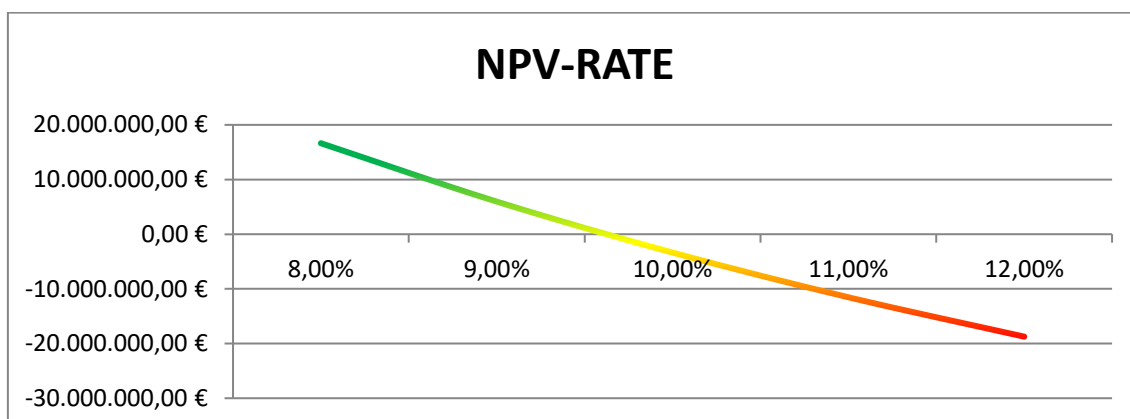


Διάγραμμα 29: Εξέλιξη αποπληρώμης δεύτερου σεναρίου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του NPV για διάφορες τιμές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Πίνακας 33: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 2°

RATE	NPV
8.00%	16,637,589.60 €
9.00%	5,960,798.69 €
10.00%	-3,358,196.48 €
11.00%	-11,531,735.36 €
12.00%	-18,734,596.15 €



Διάγραμμα 30: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 2°

6.6.3 Τρίτο Σενάριο: 50% Δάνειο, 50% Ίδια κεφάλαια

Τα ετήσια έσοδα του τρίτου σεναρίου προέρχονται από την ναύλωση των πλοίων, ενώ τα ετήσια έξοδα υπολογίζονται αθροίζοντας τα ετήσια λειτουργικά έξοδα, τα έξοδα καυσίμου, τα ετήσια έξοδα για λιμενικά τέλη, καθώς και την ετήσια δόση του δανείου θεωρώντας ότι τα πλοία ναυλώνονται με συμβόλαιο επαναληπτικής (consecutive) ναύλωσης μονού ταξιδιού.

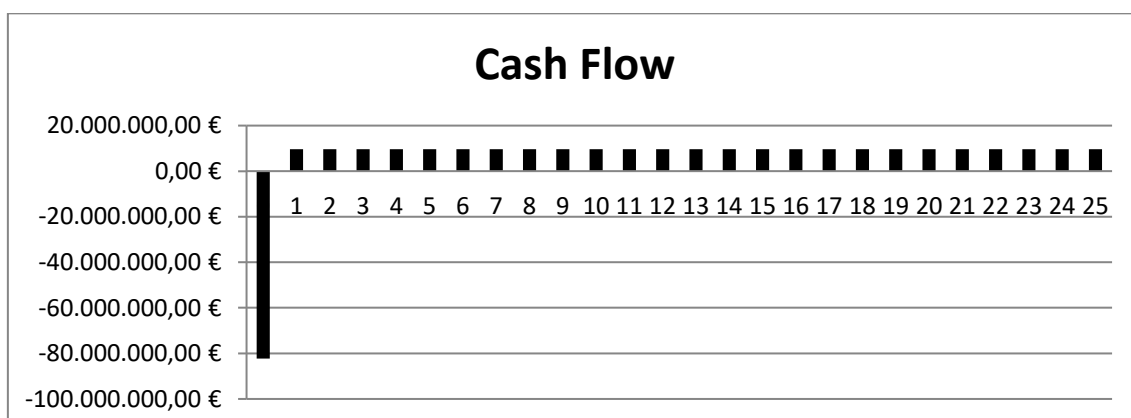
Πίνακας 34: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του τρίτου σεναρίου

Απαιτούμενη αρχική επένδυση	164,580,000.00 €
Ετήσια έσοδα	45,508,934.40 €
Ποσό δανείου	82,290,000.00 €
Ετήσια δόση δανείου	6,437,276.64 €
Ίδια κεφάλαια	82,290,000.00 €
Ετήσια έξοδα	-35,845,461.23 €
Ετήσια κέρδη	9,663,473.17 €
Ναύλος	65,954.98 € /ημέρα/πλοίο

Το Cash Flow του δεύτερου σεναρίου για χρονική διάρκεια της επένδυσης ίση με 25 χρόνια εξελίσσεται όπως φαίνεται στον πίνακα 35:

Πίνακας 35: Cash Flow τρίτου σεναρίου

CASH FLOW	
ΕΤΟΣ	PROFIT
0	-82,290,000.00 €
1	9,663,473.17 €
2	9,663,473.17 €
3	9,663,473.17 €
4	9,663,473.17 €
5	9,663,473.17 €
6	9,663,473.17 €
7	9,663,473.17 €
8	9,663,473.17 €
9	9,663,473.17 €
10	9,663,473.17 €
11	9,663,473.17 €
12	9,663,473.17 €
13	9,663,473.17 €
14	9,663,473.17 €
15	9,663,473.17 €
16	9,663,473.17 €
17	9,663,473.17 €
18	9,663,473.17 €
19	9,663,473.17 €
20	9,663,473.17 €
21	9,663,473.17 €
22	9,663,473.17 €
23	9,663,473.17 €
24	9,663,473.17 €
25	9,663,473.17 €



Διάγραμμα 31: Cash Flow τρίτου σεναρίου

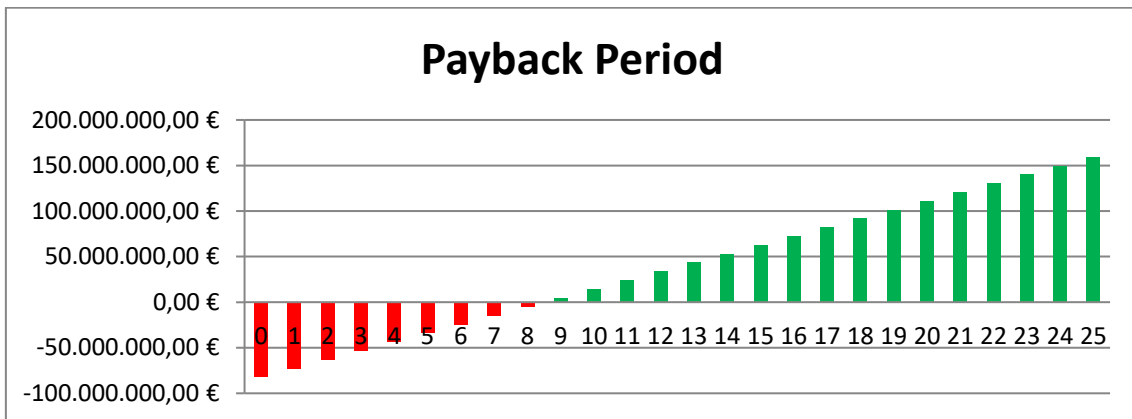
Με βάση την παραπάνω εξέλιξη του Cash Flow, ο IRR υπολογίζεται ίσος με:

IRR 10.85 %

Για το τρίτο σενάριο που μελετάται, το έτος αποπληρωμής υπολογίζεται ίσο με 8.52 έτη. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας αλλά και το διάγραμμα της εξέλιξης αποπληρωμής για το τρέχον σενάριο.

Πίνακας 36: Περίοδος αποπληρωμής τρίτου σεναρίου

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ	
ΕΤΟΣ	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ
0	-82,290,000.00 €
1	-72,626,526.83 €
2	-62,963,053.66 €
3	-53,299,580.49 €
4	-43,636,107.32 €
5	-33,972,634.15 €
6	-24,309,160.98 €
7	-14,645,687.81 €
8	-4,982,214.64 €
9	4,681,258.53 €
10	14,344,731.70 €
11	24,008,204.87 €
12	33,671,678.04 €
13	43,335,151.21 €
14	52,998,624.38 €
15	62,662,097.55 €
16	72,325,570.72 €
17	81,989,043.89 €
18	91,652,517.06 €
19	101,315,990.23 €
20	110,979,463.40 €
21	120,642,936.57 €
22	130,306,409.74 €
23	139,969,882.91 €
24	149,633,356.08 €
25	159,296,829.25 €

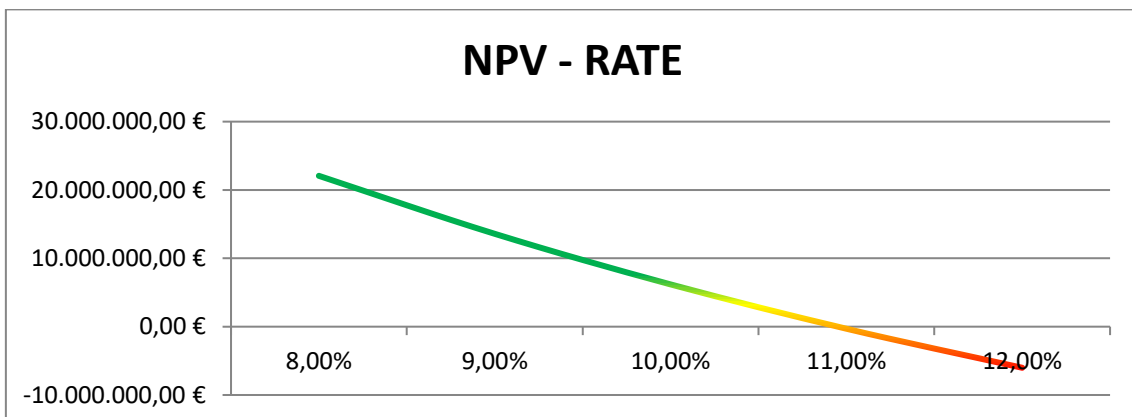


Διάγραμμα 32: Εξέλιξη αποπληρωμής τρίτου σεναρίου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του NPV για διάφορες τιμές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Πίνακας 37: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 3^ο

RATE	NPV
8.00%	22,066,994.63 €
9.00%	13,584,533.79 €
10.00%	6,185,236.45 €
11.00%	-300,975.44 €
12.00%	-6,013,978.63 €



Διάγραμμα 33: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 3^ο

6.6.4 Τέταρτο Σενάριο: 70% Δάνειο, 30% Ίδια κεφάλαια

Τα ετήσια έσοδα του τέταρτου σεναρίου προέρχονται από την ναύλωση των πλοίων, ενώ τα ετήσια έξοδα υπολογίζονται αθροίζοντας τα ετήσια λειτουργικά έξοδα, τα έξοδα

καυσίμου, τα ετήσια έξοδα για λιμενικά τέλη, καθώς και την ετήσια δόση του δανείου θεωρώντας ότι τα πλοία ναυλώνονται με συμβόλαιο επαναληπτικής (consecutive) ναύλωσης μονού ταξιδιού.

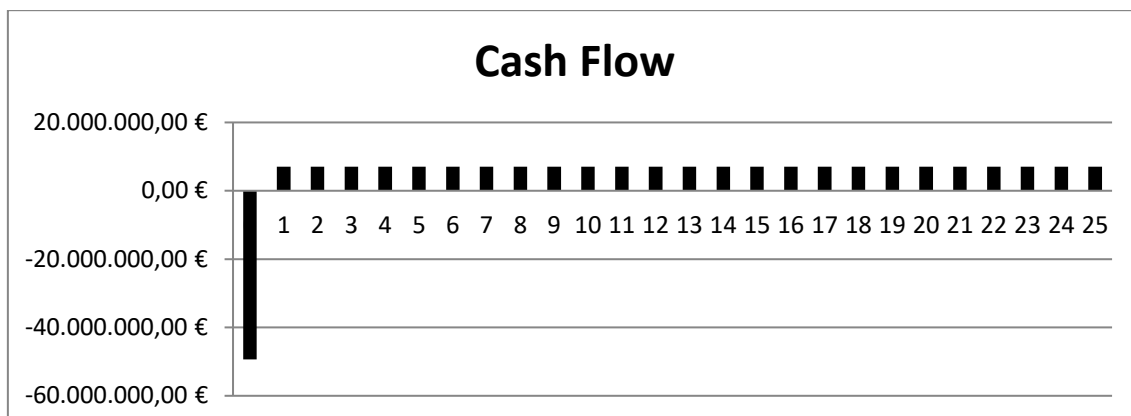
Πίνακας 38: Δεδομένα για τους υπολογισμούς του τέταρτου σεναρίου

Απαιτούμενη αρχική επένδυση	164,580,000.00 €
Ετήσια έσοδα	45,508,934.40 €
Ποσό δανείου	115,206,000.00 €
Ετήσια δόση δανείου	9,012,187.30 €
Ίδια κεφάλαια	49,374,000.00 €
Ετήσια έξοδα	-38,420,371.89 €
Ετήσια κέρδη	7,088,562.51 €
Ναύλος	65,954.98 € /ημέρα/πλοίο

Το Cash Flow του δεύτερου σεναρίου για χρονική διάρκεια της επένδυσης ίση με 25 χρόνια εξελίσσεται όπως φαίνεται στον πίνακα 39:

Πίνακας 39: Cash Flow τέταρτου σεναρίου

CASH FLOW	
ΕΤΟΣ	PROFIT
0	-49,374,000.00 €
1	7,088,562.51 €
2	7,088,562.51 €
3	7,088,562.51 €
4	7,088,562.51 €
5	7,088,562.51 €
6	7,088,562.51 €
7	7,088,562.51 €
8	7,088,562.51 €
9	7,088,562.51 €
10	7,088,562.51 €
11	7,088,562.51 €
12	7,088,562.51 €
13	7,088,562.51 €
14	7,088,562.51 €
15	7,088,562.51 €
16	7,088,562.51 €
17	7,088,562.51 €
18	7,088,562.51 €
19	7,088,562.51 €
20	7,088,562.51 €
21	7,088,562.51 €
22	7,088,562.51 €
23	7,088,562.51 €
24	7,088,562.51 €
25	7,088,562.51 €



Διάγραμμα 34: Cash Flow τέταρτου σεναρίου

Με βάση την παραπάνω εξέλιξη του Cash Flow, ο IRR υπολογίζεται ίσος με:

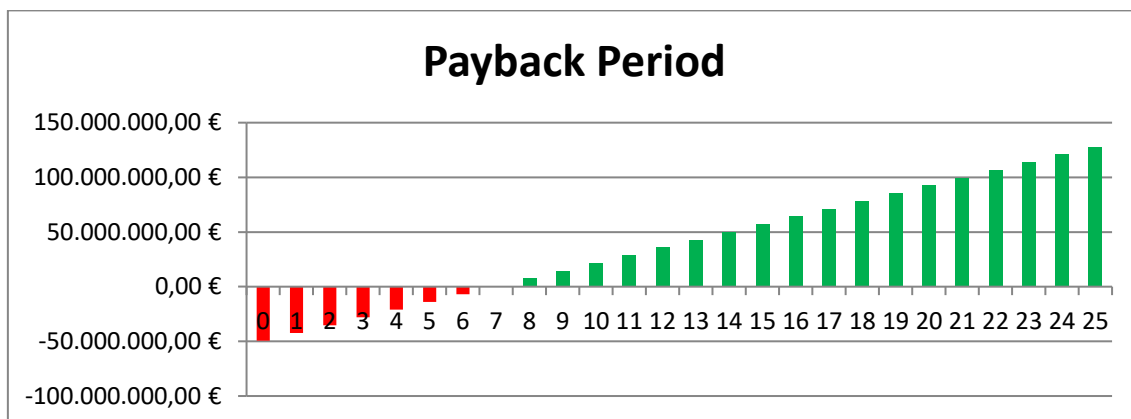
IRR 13.79 %

Για το τέταρτο σενάριο που μελετάται, το έτος αποπληρωμής υπολογίζεται ίσο με 6.97 έτη. Παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας αλλά και το διάγραμμα της εξέλιξης αποπληρωμής για το τρέχον σενάριο.

Πίνακας 40: Περίοδος αποπληρωμής τέταρτου σεναρίου

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ	
ΕΤΟΣ	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ
0	-49,374,000.00 €
1	-42,285,437.49 €
2	-35,196,874.97 €
3	-28,108,312.46 €
4	-21,019,749.95 €
5	-13,931,187.43 €
6	-6,842,624.92 €
7	245,937.59 €
8	7,334,500.11 €
9	14,423,062.62 €
10	21,511,625.13 €
11	28,600,187.65 €
12	35,688,750.16 €
13	42,777,312.67 €
14	49,865,875.19 €
15	56,954,437.70 €
16	64,043,000.21 €
17	71,131,562.73 €
18	78,220,125.24 €

19	85,308,687.75 €
20	92,397,250.27 €
21	99,485,812.78 €
22	106,574,375.29 €
23	113,662,937.81 €
24	120,751,500.32 €
25	127,840,062.83 €

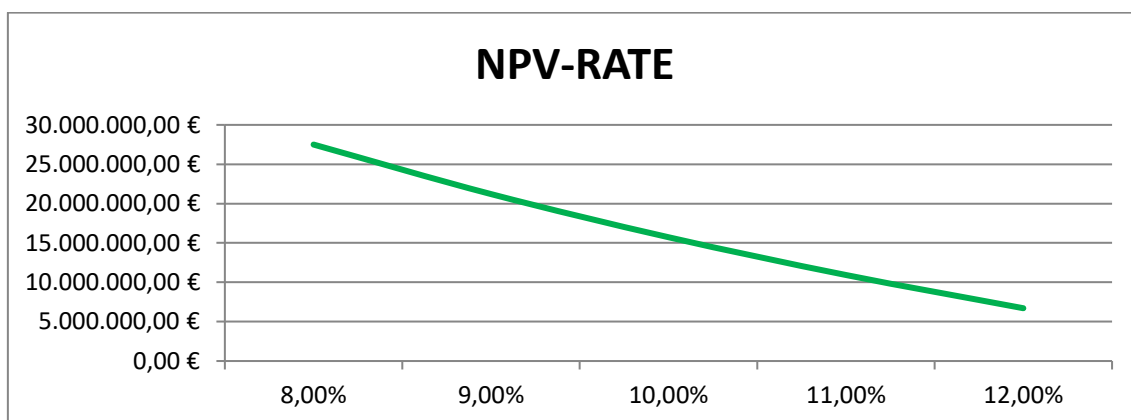


Διάγραμμα 35: Εξέλιξη αποπληρωμής τέταρτου σεναρίου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του NPV για διάφορες τιμές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Πίνακας 41: Τιμές του NPV για τις διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης-Σενάριο 4°

RATE	NPV
8.00%	27,496,399.67 €
9.00%	21,208,268.89 €
10.00%	15,728,669.37 €
11.00%	10,929,784.47 €
12.00%	6,706,638.89 €



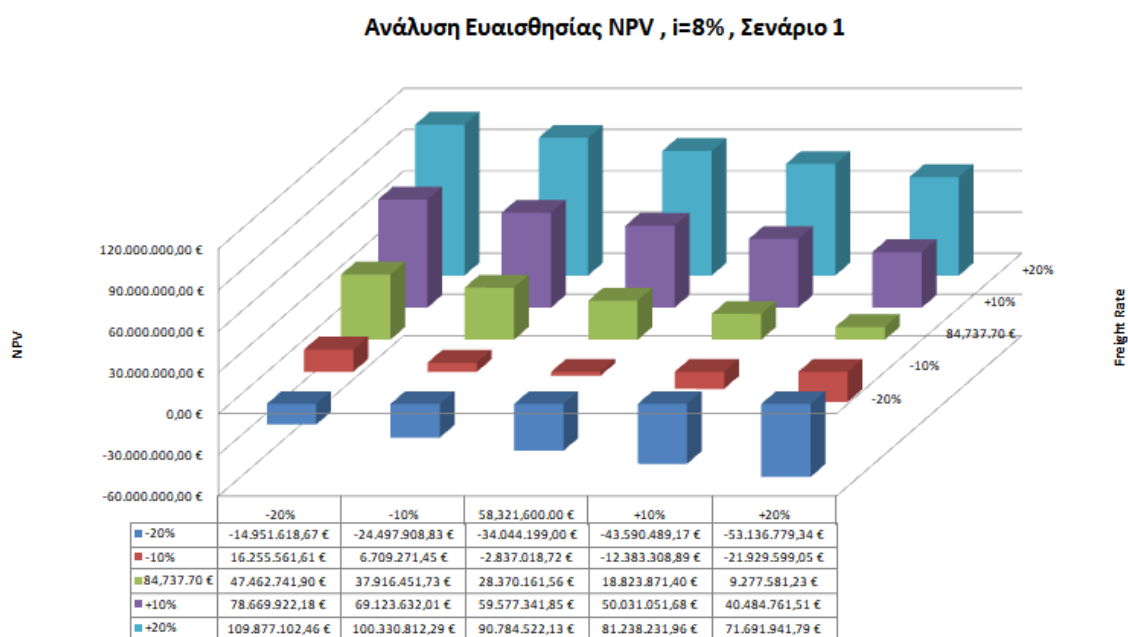
Διάγραμμα 36: Διάγραμμα NPV-RATE, Σενάριο 4°

6.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη με σκοπό να εξεταστεί πώς το ναυλοσύμφωνο που θα επιτύχει ο εκάστοτε πλοιοκτήτης είναι σε θέση να επηρεάσει την βιωσιμότητα της επένδυσης. Επιπλέον, εκτός από την μεταβολή της τιμής του ναύλου, εξετάζεται και κατά πόσο η μεταβολή των κεφαλαιουχικών δαπανών είναι σε θέση να επηρεάσουν την συγκεκριμένη επενδυτική κίνηση. Συγκεκριμένα, αφού υπολογίστηκε ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος για τρεις διαφορετικές τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης έγινε μία προσαύξηση της τάξεως του 10%. Έπειτα, με βάση τα αποτελέσματα αυτής της προσαύξησης, στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας οι τιμές του ναύλου αλλά και του CAPEX μεταβλήθηκαν από -20% έως 20%.

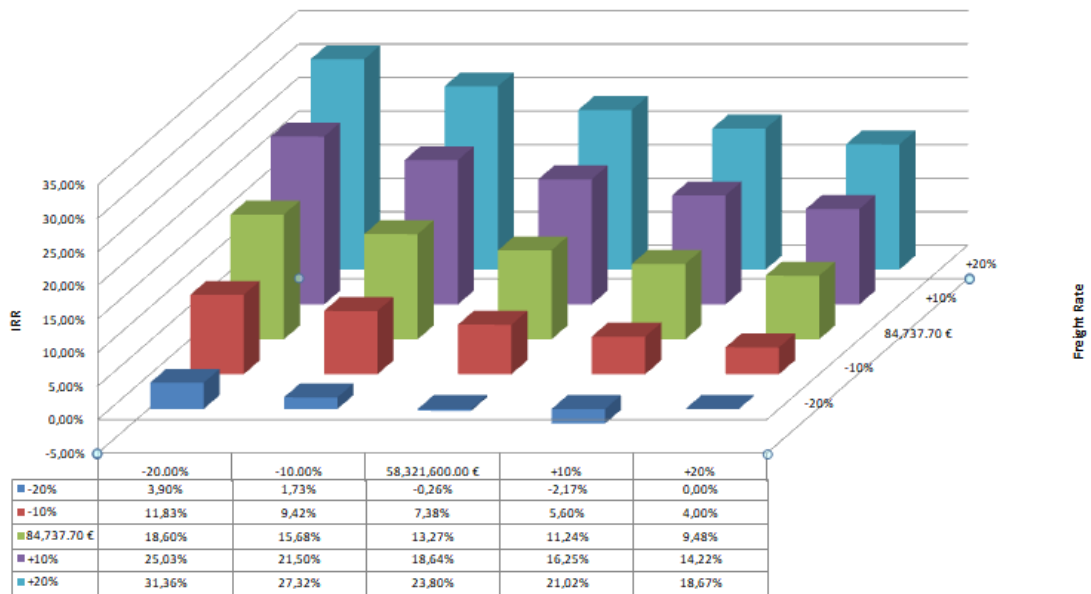
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα 4 διαφορετικά σενάρια που μελετήθηκαν και για τους δύο πιθανούς τύπους πλοίων παρατίθενται σε μορφή διαγραμμάτων.

6.7.1 Πρώτο Σενάριο: 0% Δάνειο, 100% Ίδια κεφάλαια (7bar, -50°C)



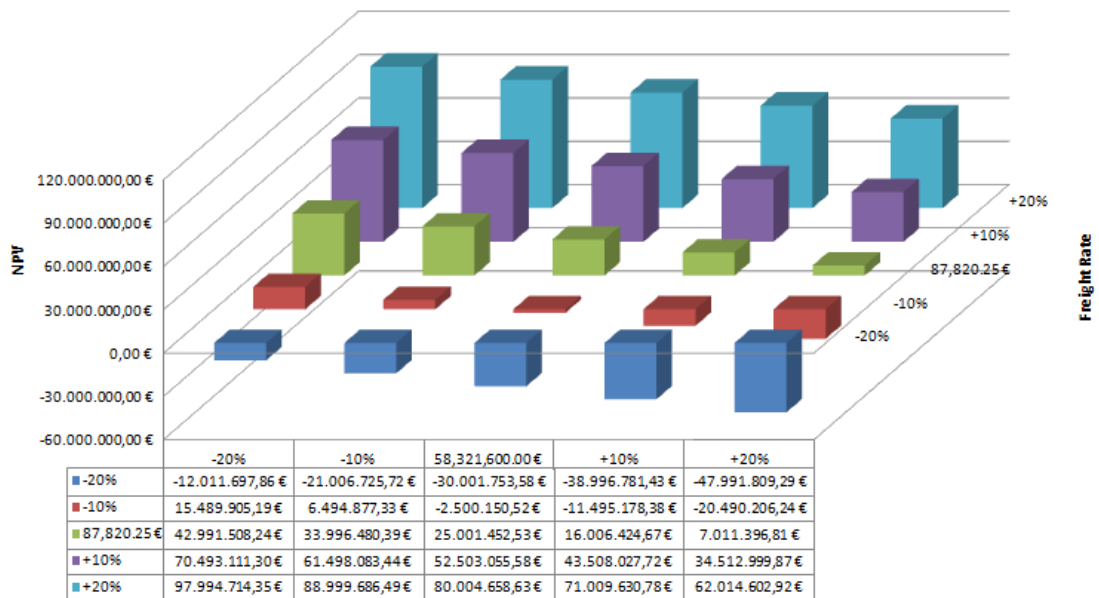
Διάγραμμα 37: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1^ο (i=8%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=8%, Σενάριο 1



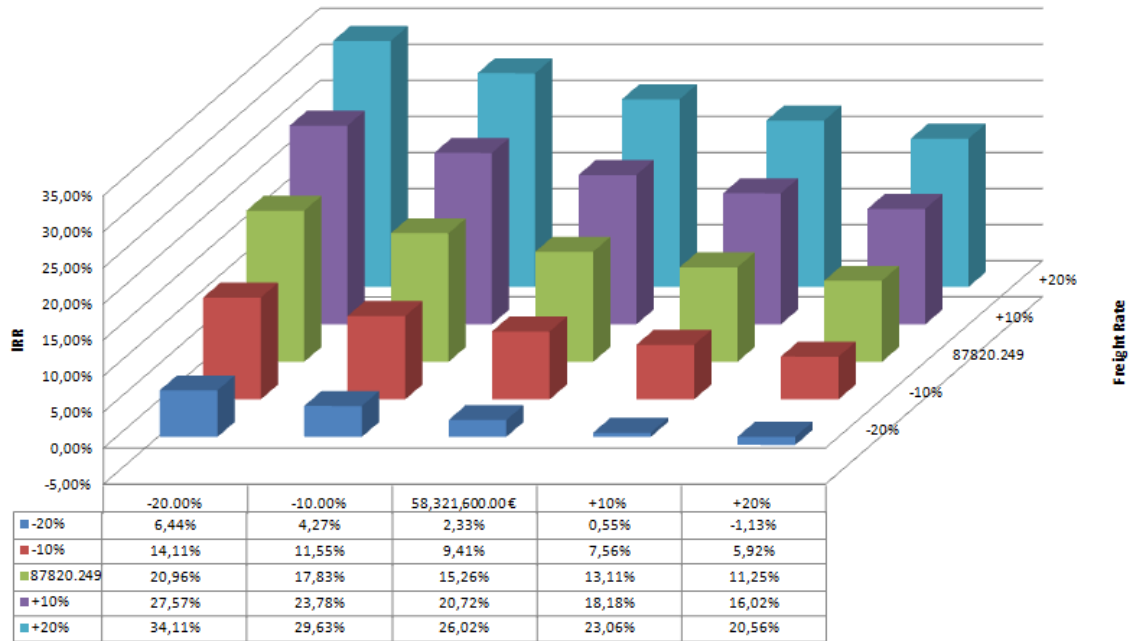
Διάγραμμα 38: Ανάλυση ευαισθησίας IRR- Σενάριο 1° (i=8%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=10% , Σενάριο 1



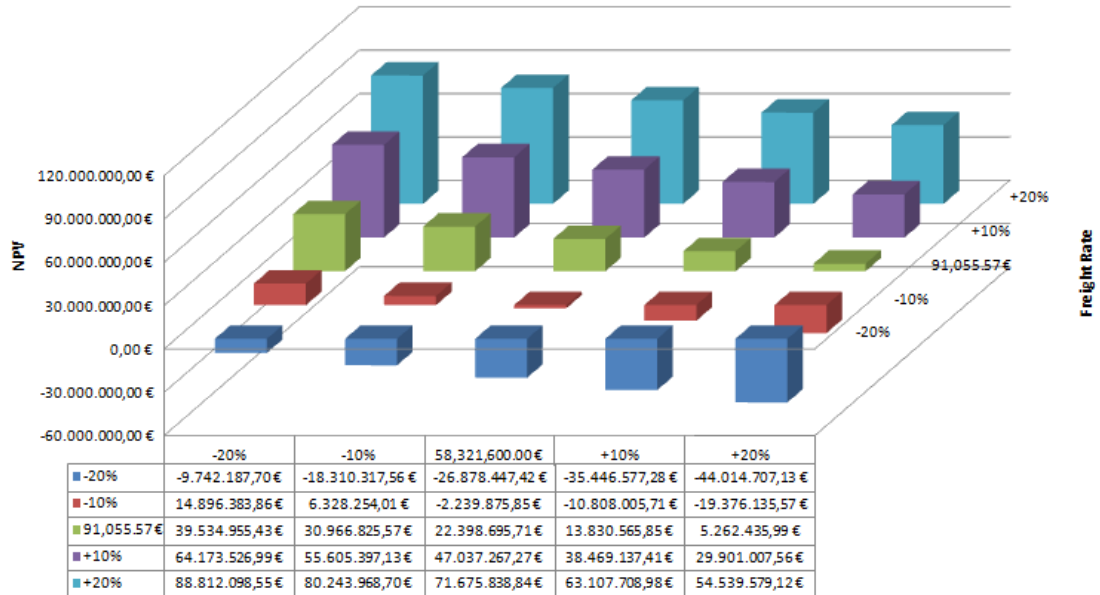
Διάγραμμα 39: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1° (i=10%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=10%, Σενάριο 1



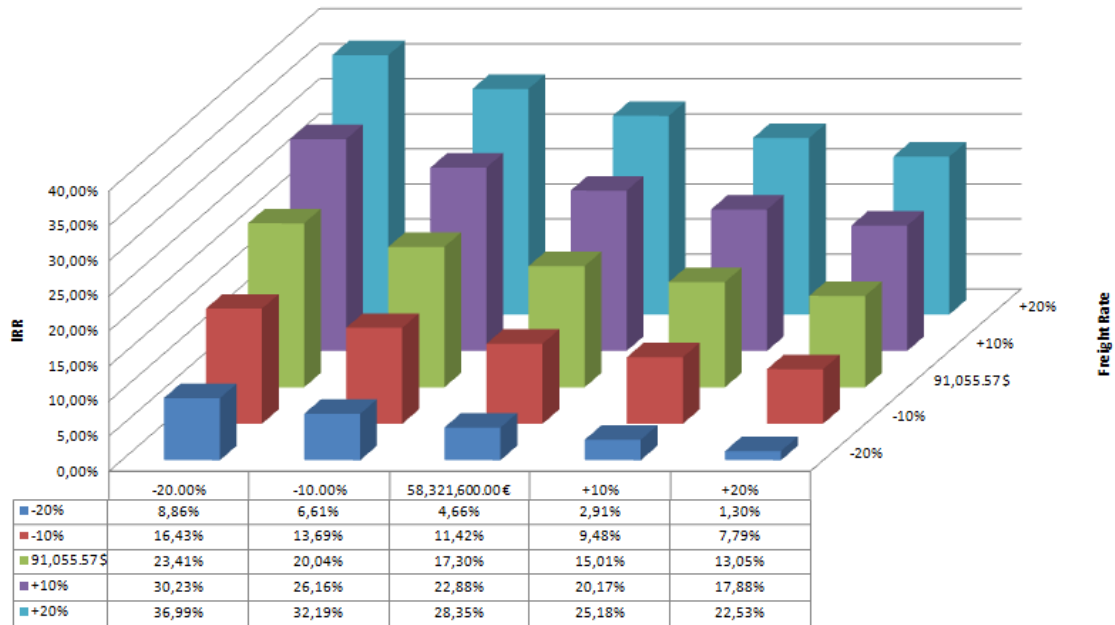
Διάγραμμα 40: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1^ο (i=10%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=12% , Σενάριο 1



Διάγραμμα 41: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1^ο (i=12%)

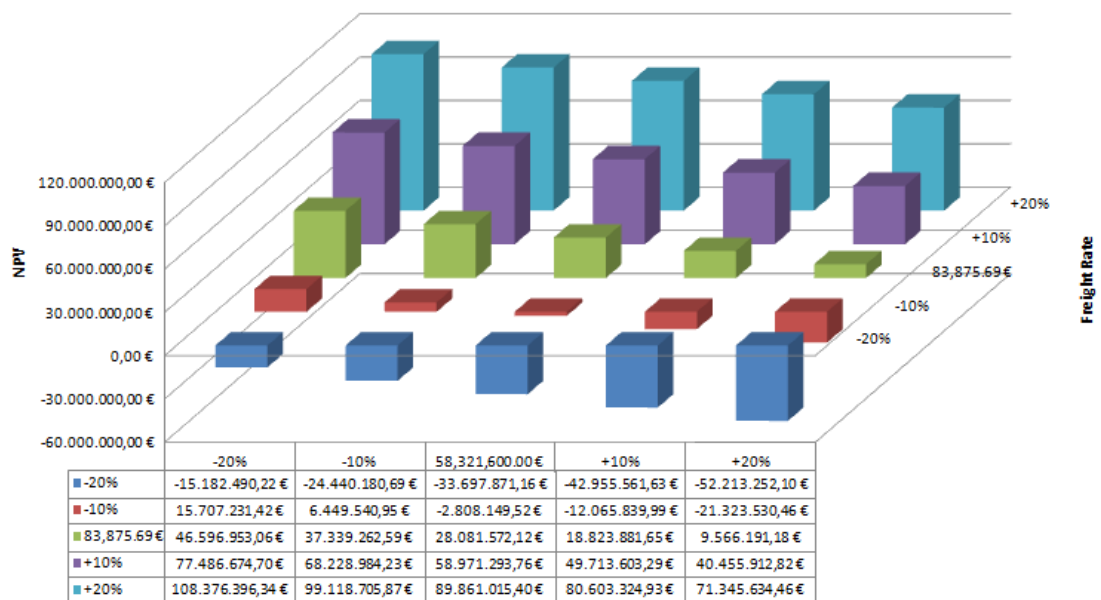
Ανάλυση ευαισθησίας IRR, $i=12\%$, Σενάριο 1



Διάγραμμα 42: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1^ο ($i=12\%$)

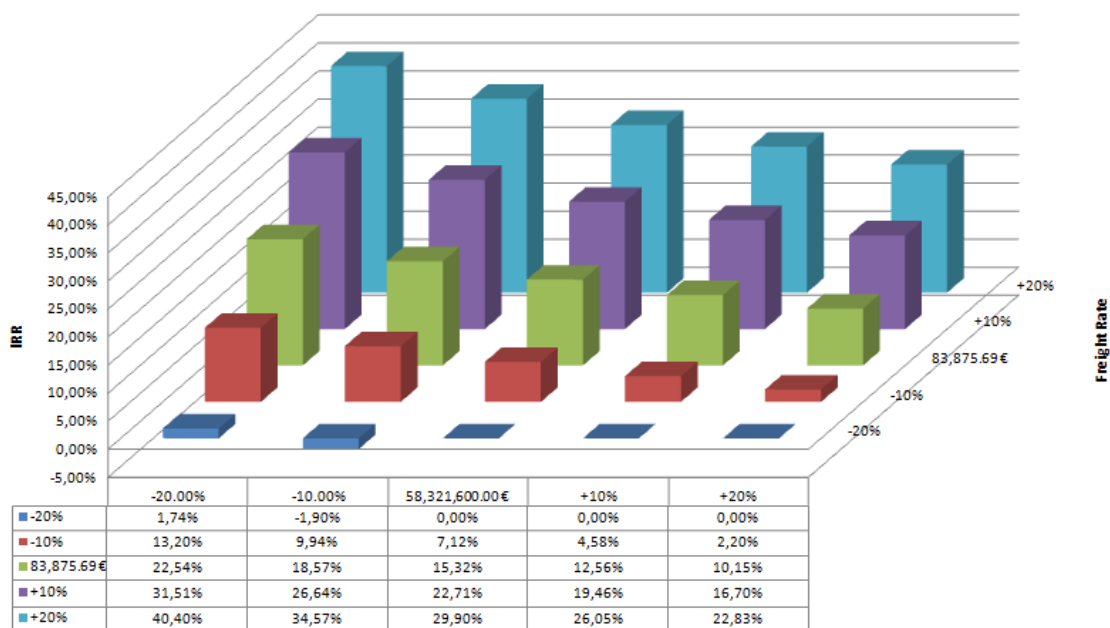
6.7.2 Δεύτερο Σενάριο: 30% Δάνειο, 70% Ίδια κεφάλαια (7bar, -50°C)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV, $i=8\%$, Σενάριο 2



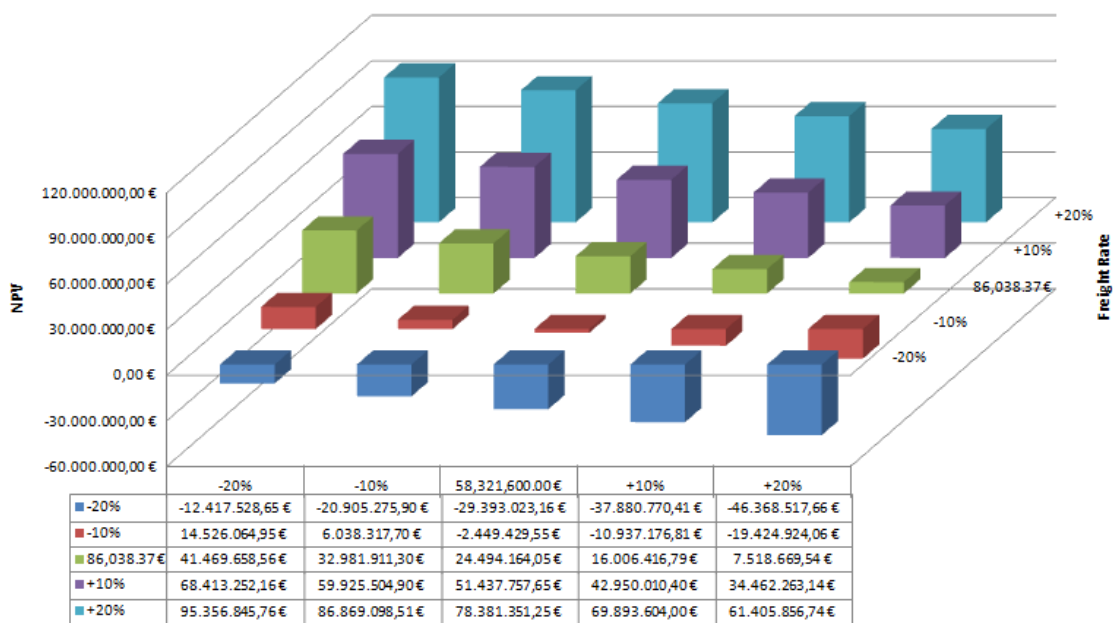
Διάγραμμα 43: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2^ο ($i=8\%$)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=8%, Σενάριο 2



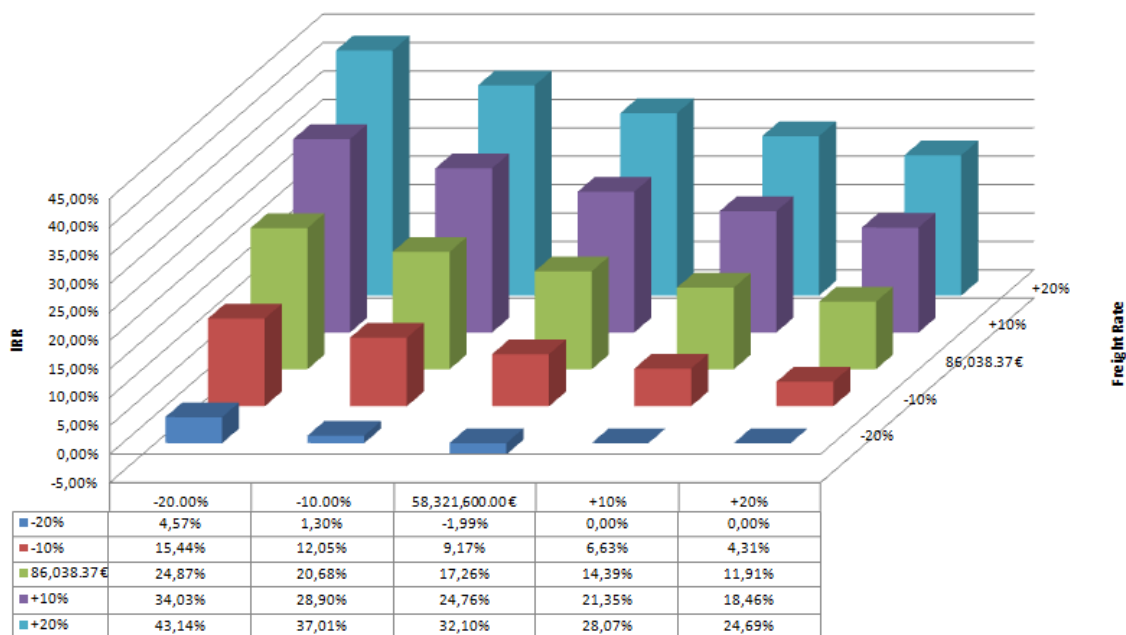
Διάγραμμα 44: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2^ο (i=8%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV, i=10%, Σενάριο 2



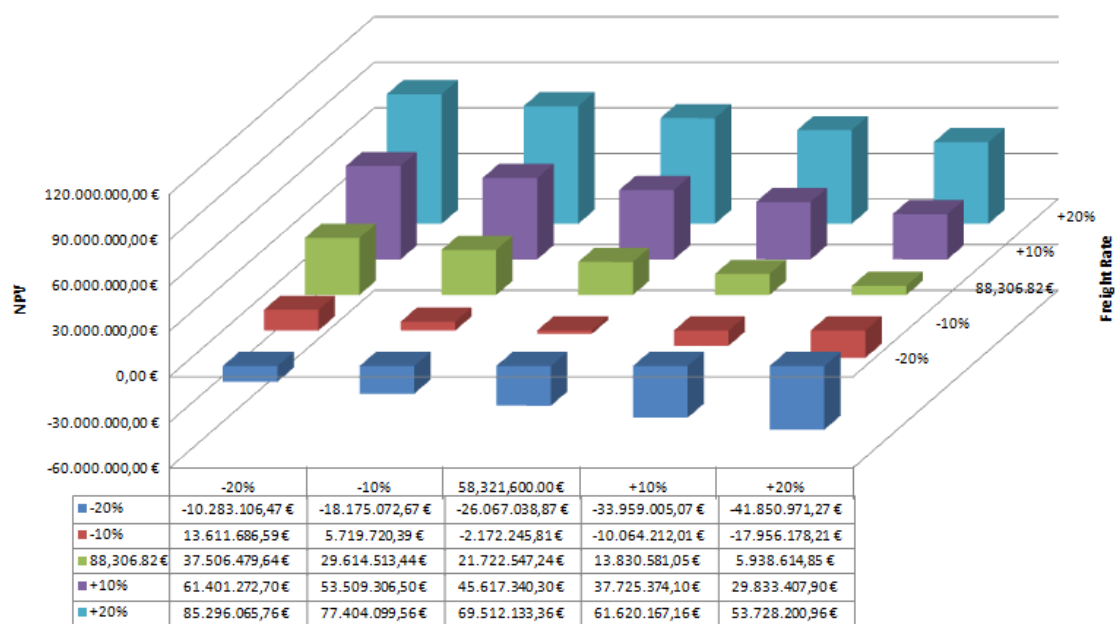
Διάγραμμα 45: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2^ο (i=10%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, $i=10\%$, Σενάριο 2



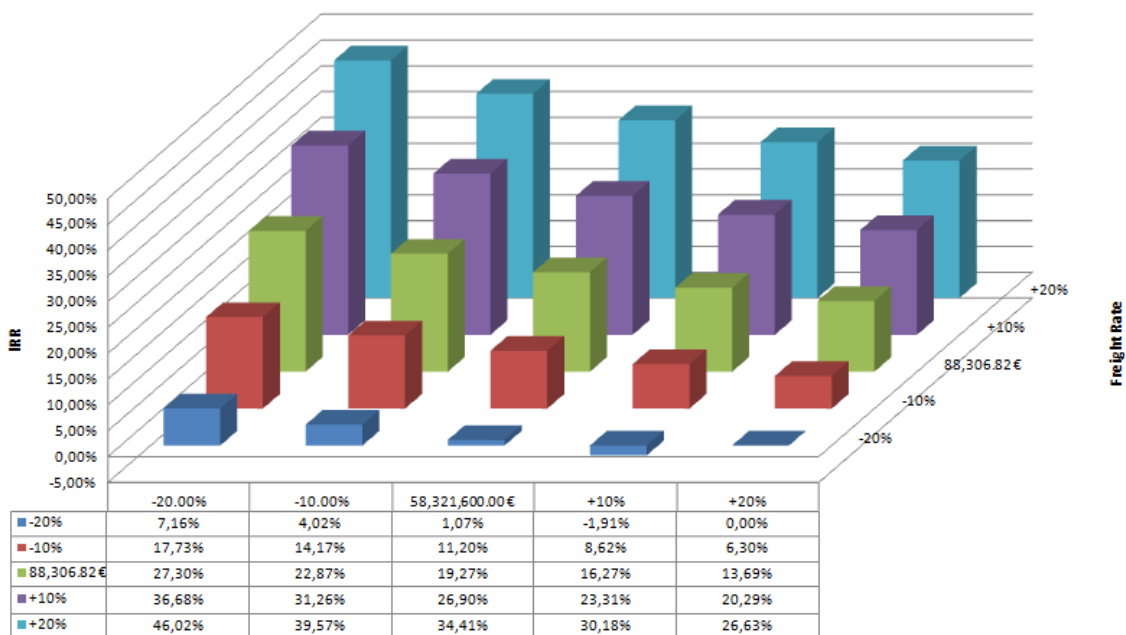
Διάγραμμα 46: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2^ο ($i=10\%$)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV, $i=12\%$, Σενάριο 2



Διάγραμμα 47: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2^ο ($i=12\%$)

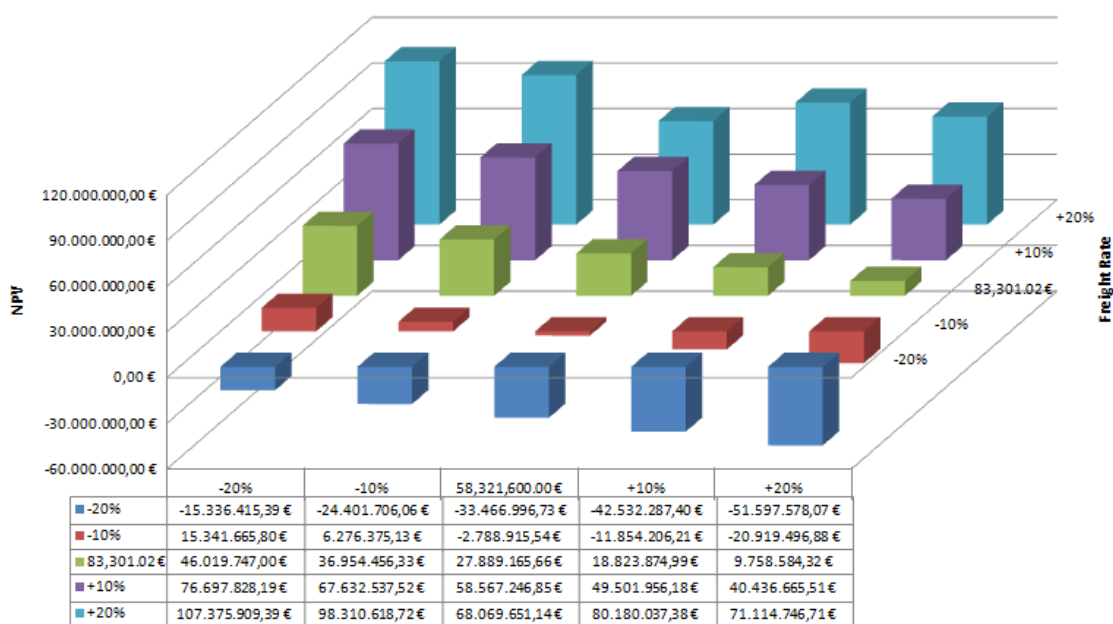
Ανάλυση ευαισθησίας IRR, $i=12\%$, Σενάριο 2



Διάγραμμα 48: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2^ο ($i=12\%$)

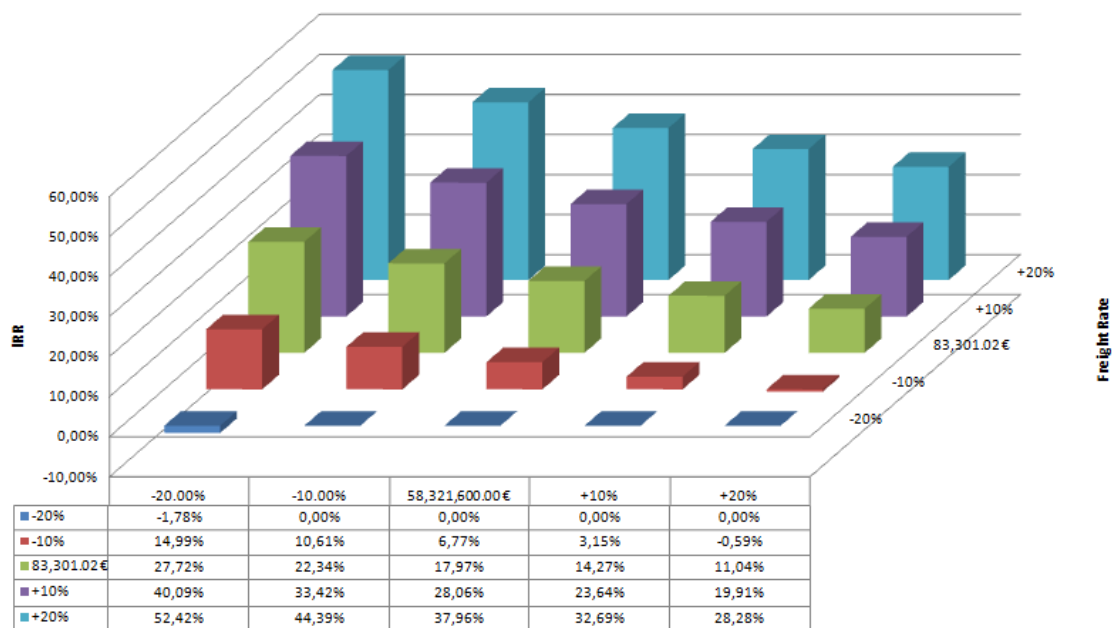
6.7.3 Τρίτο Σενάριο: 50% Δάνειο, 50% Ίδια κεφάλαια (7bar, -50°C)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV, $i=8\%$, Σενάριο 3



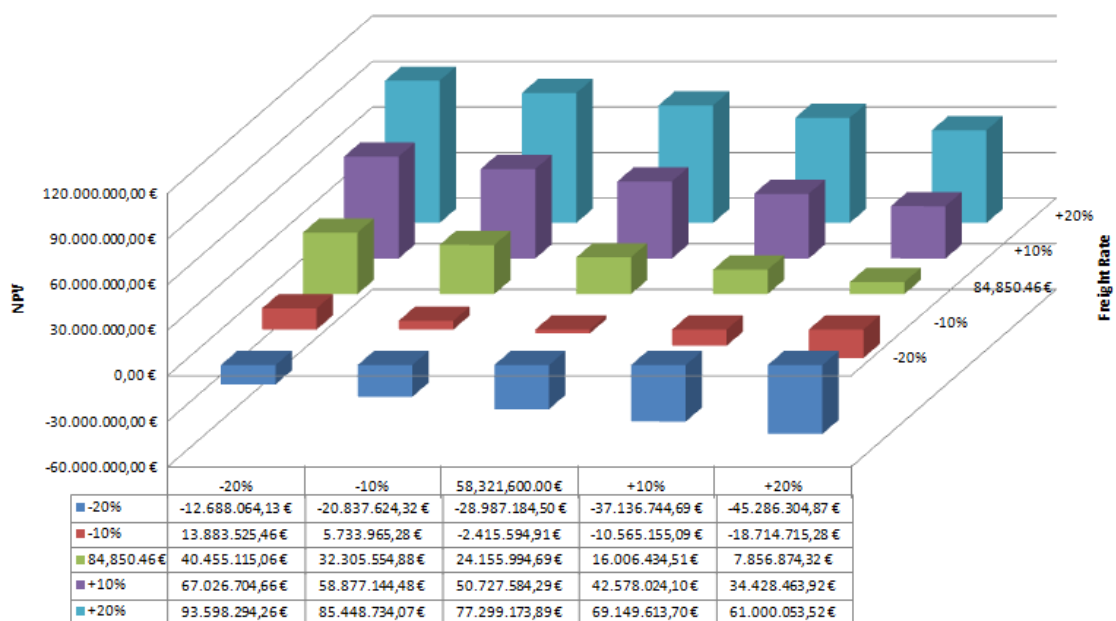
Διάγραμμα 49: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3^ο ($i=8\%$)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, $i=8\%$, Σενάριο 3



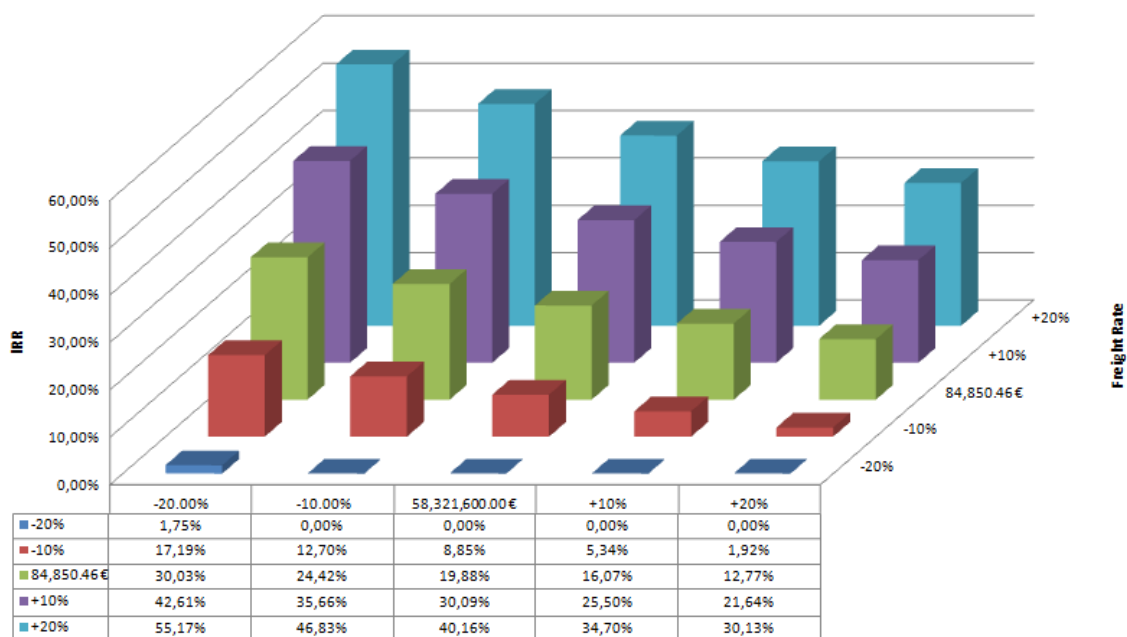
Διάγραμμα 50: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3^ο ($i=8\%$)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV, $i=10\%$, Σενάριο 3



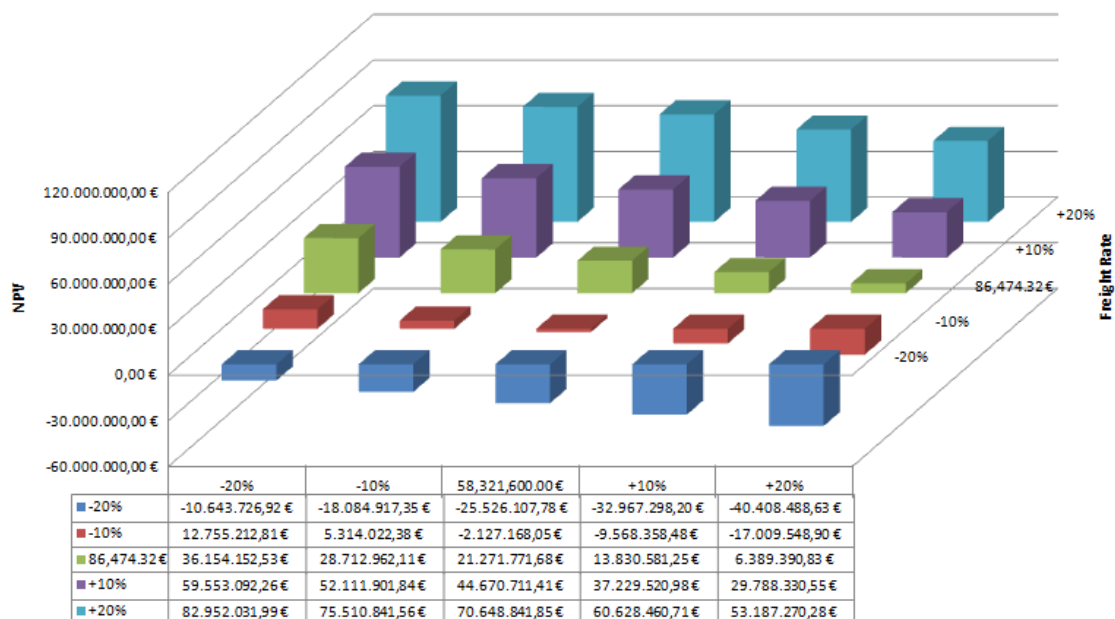
Διάγραμμα 51: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3^ο ($i=10\%$)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, $i=10\%$, Σενάριο 3



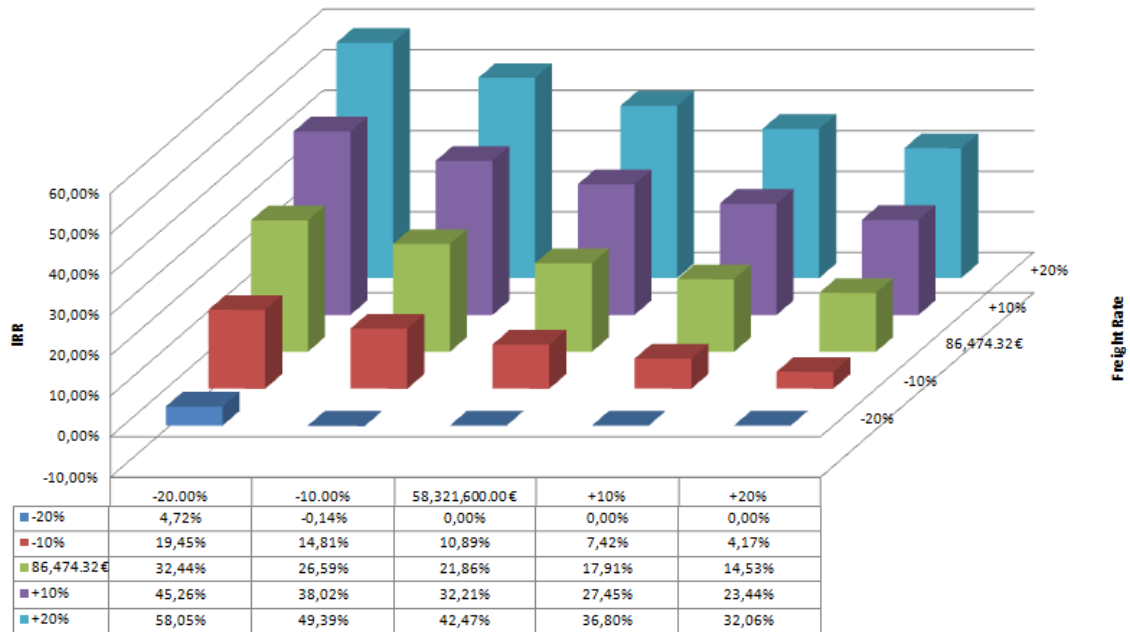
Διάγραμμα 52: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3^ο ($i=10\%$)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV, $i=12\%$, Σενάριο 3



Διάγραμμα 53: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3^ο ($i=12\%$)

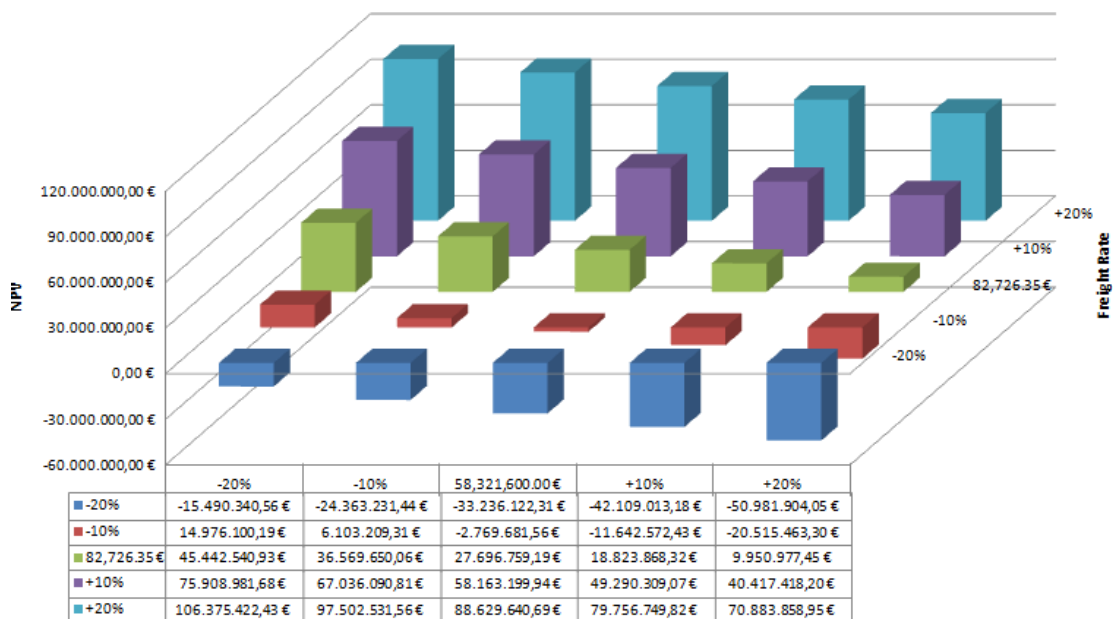
Ανάλυση ευαισθησίας IRR, $i=12\%$, Σενάριο 3



Διάγραμμα 54: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3^ο ($i=12\%$)

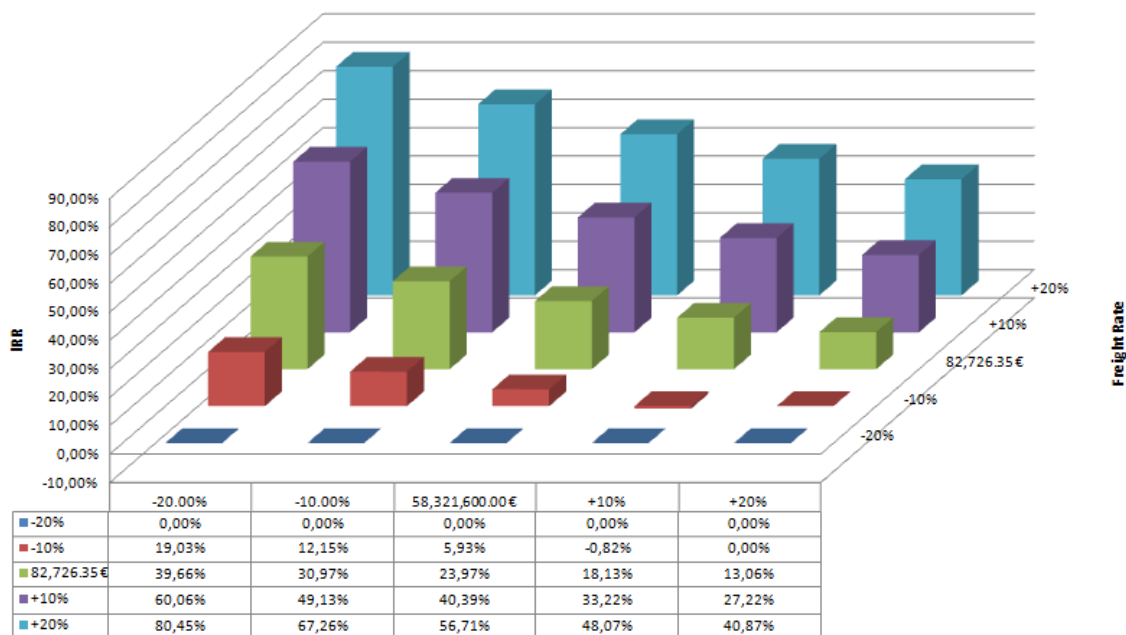
6.7.4 Τέταρτο Σενάριο: 70% Δάνειο, 30% Ίδια κεφάλαια (7bar, -50°C)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV, $i=8\%$, Σενάριο 4



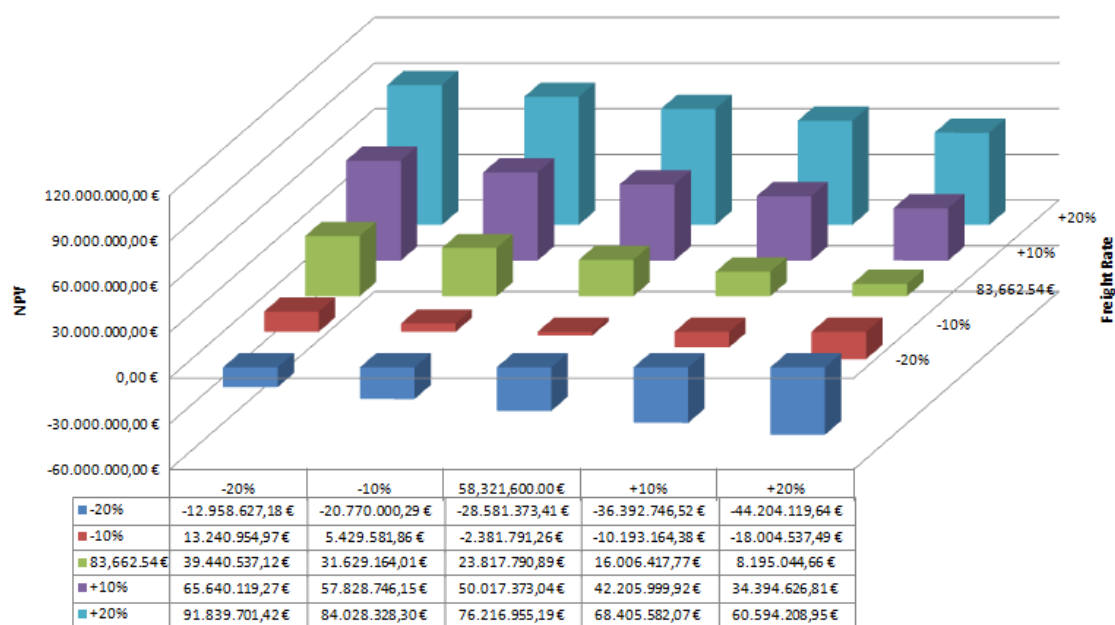
Διάγραμμα 55: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4^ο ($i=8\%$)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, $i=8\%$, Σενάριο 4



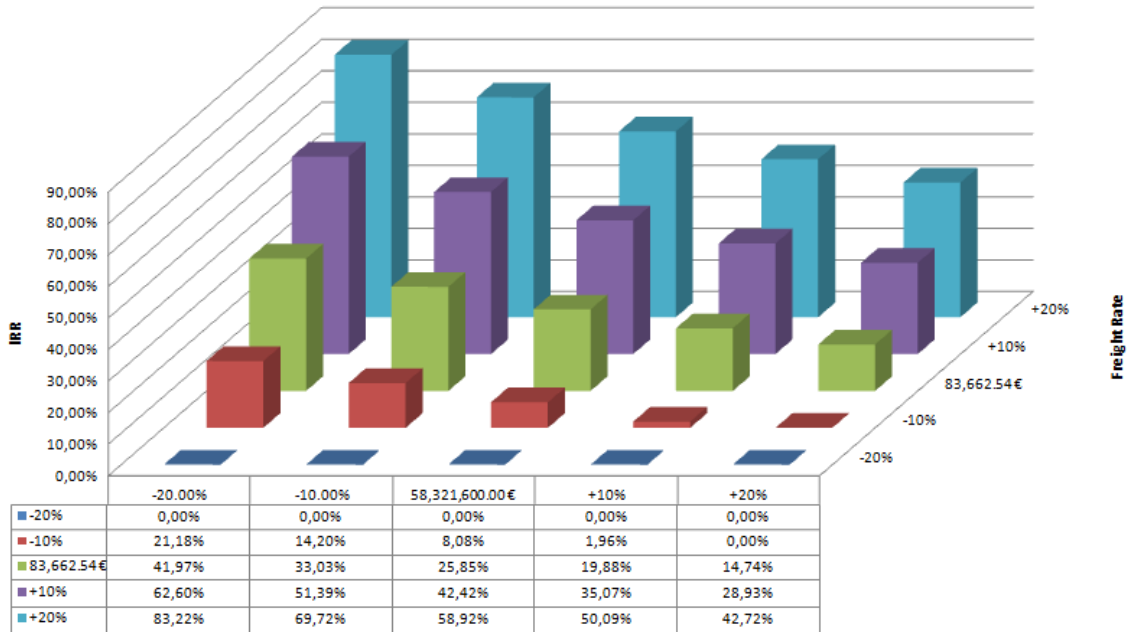
Διάγραμμα 56: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4^ο ($i=8\%$)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , $i=10\%$, Σενάριο 4



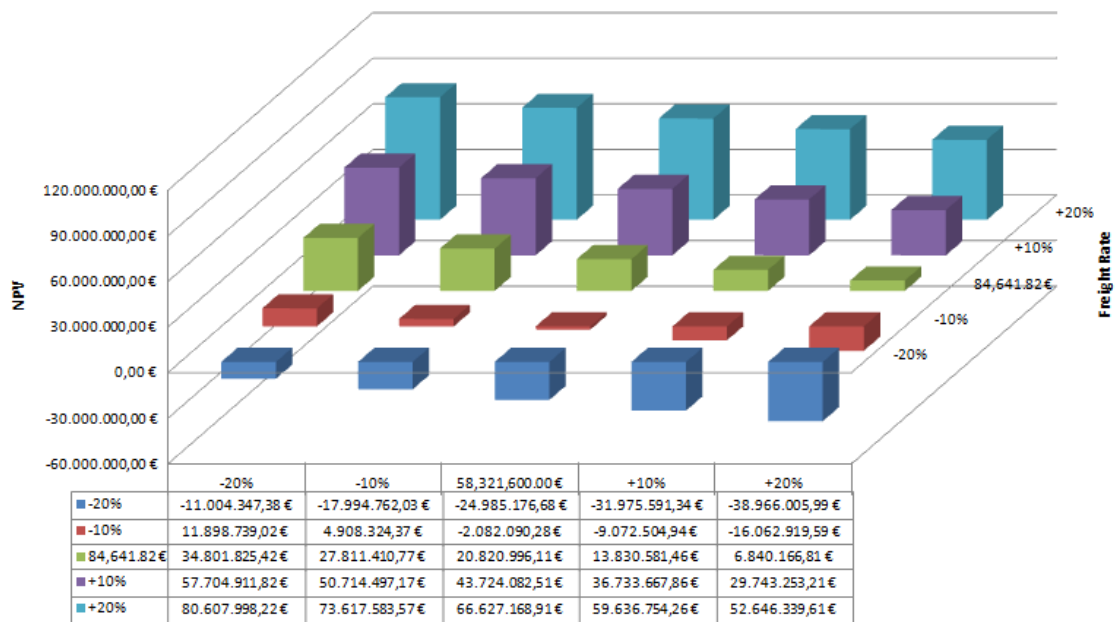
Διάγραμμα 57: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4^ο ($i=10\%$)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=10%, Σενάριο 4



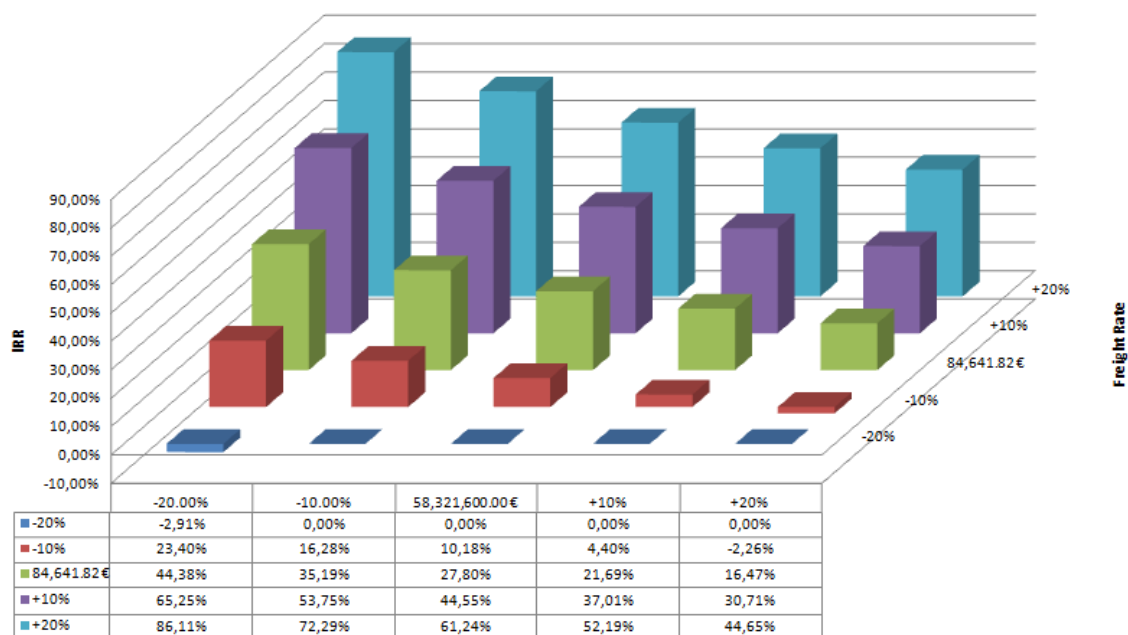
Διάγραμμα 58: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4^ο (i=10%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=12% , Σενάριο 4



Διάγραμμα 59: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4^ο (i=12%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=12%, Σενάριο 4

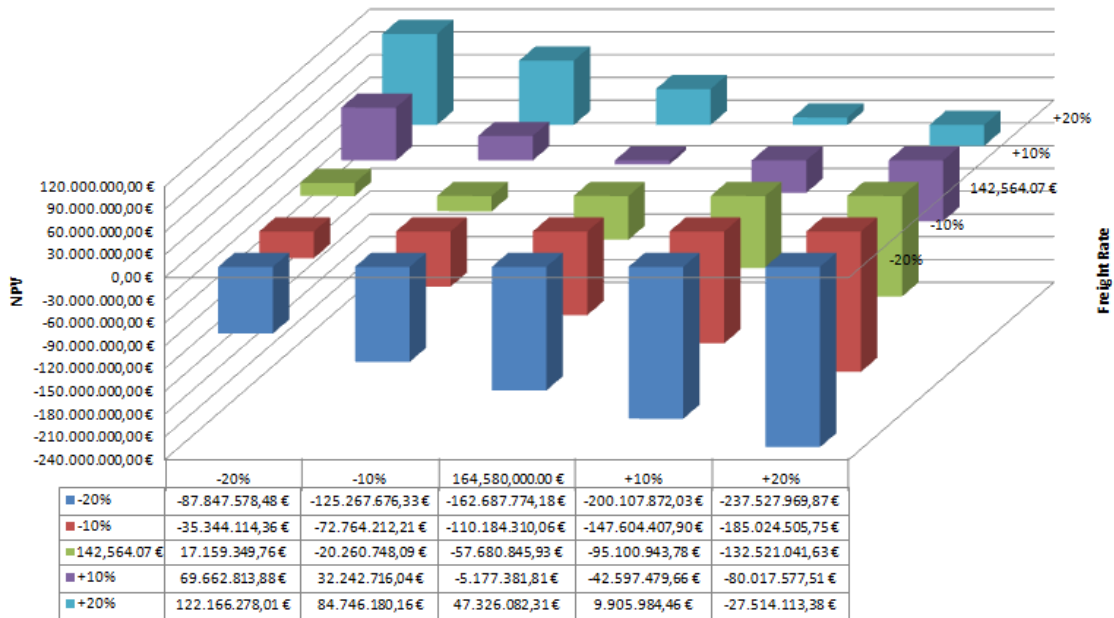


Διάγραμμα 60: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4^ο (i=12%)

Για όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν είναι φανερό πως η επιλογή του να επενδύσει κάποιος στο πλοίο χαμηλής πίεσης, μπορεί να του επιφέρει θετικό NPV ακόμη και για αύξηση του CAPEX ίση με 20%. Συγκεκριμένα, ακόμη και στην περίπτωση της προσαύξησης του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου κατά 10%, η επένδυση θεωρείται επικερδής για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν για το CAPEX. Στις περιπτώσεις που ο ναύλος είναι μειωμένος κατά 20%, η επένδυση θεωρείται μη κερδοφόρα ακόμα και στην περίπτωση μείωσης του CAPEX κατά 20%. Τέλος, στις περιπτώσεις που ο ναύλος είναι μειωμένος κατά 10%, ο πλοιοκτήτης μπορεί να ενδιαφερθεί για την επένδυση μόνο εάν οι κεφαλαιουχικές δαπάνες του επενδυτικού πλάνου είναι μειωμένες κατά 10% και άνω, από την αρχική εκτίμηση που έγινε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

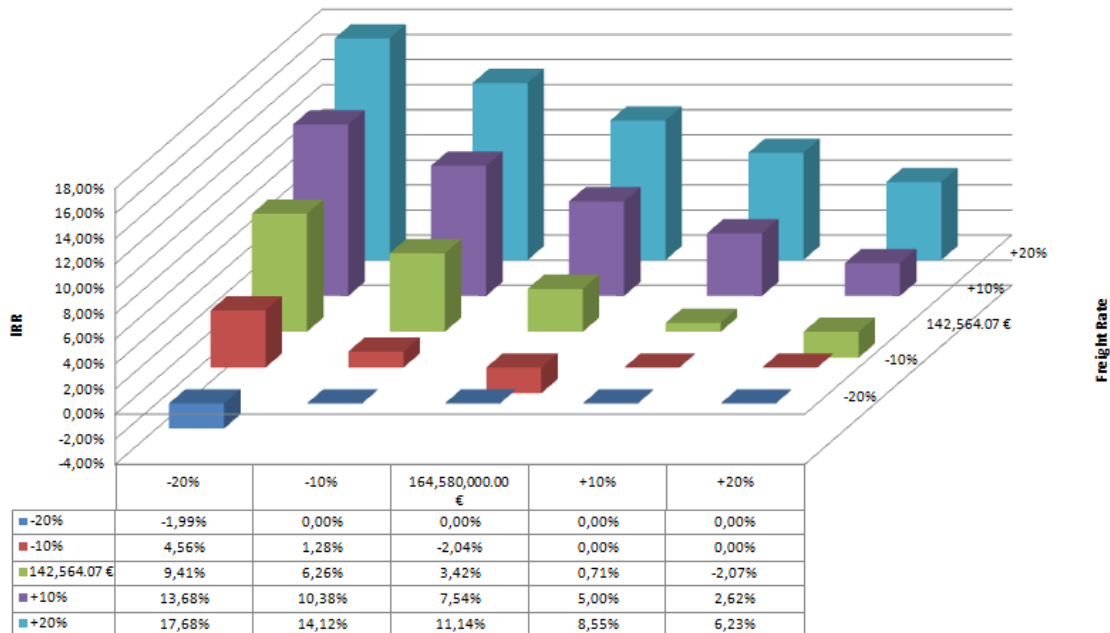
6.7.5 Πρώτο Σενάριο: 0% Δάνειο, 100% Ίδια κεφάλαια (15bar, -30°C)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=8% , Σενάριο 1



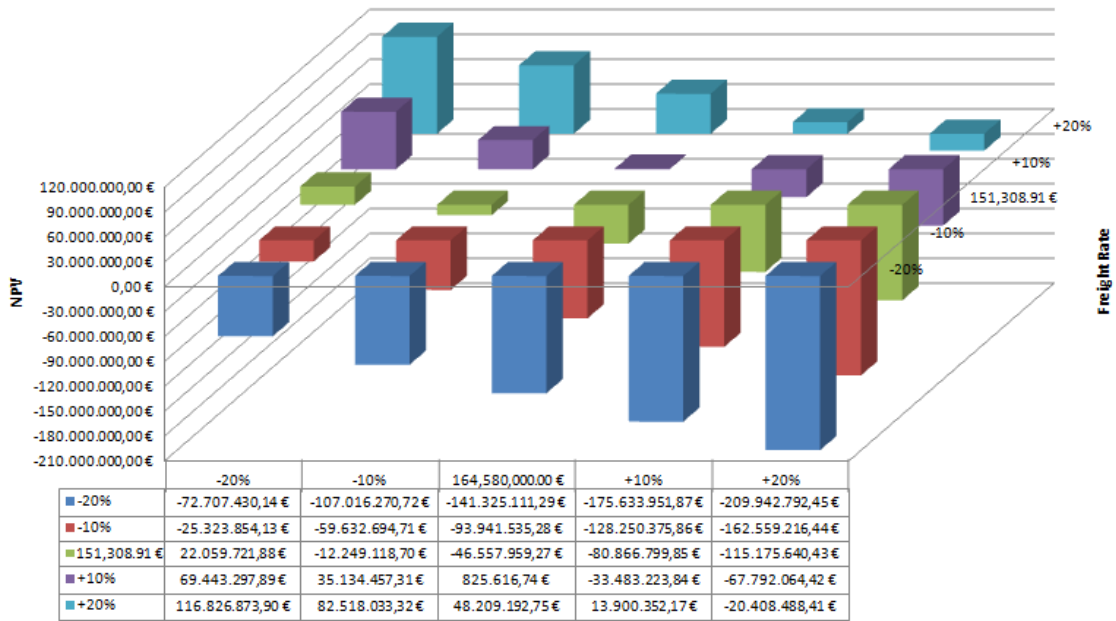
Διάγραμμα 61: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1^ο (i=8%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=8%, Σενάριο 1



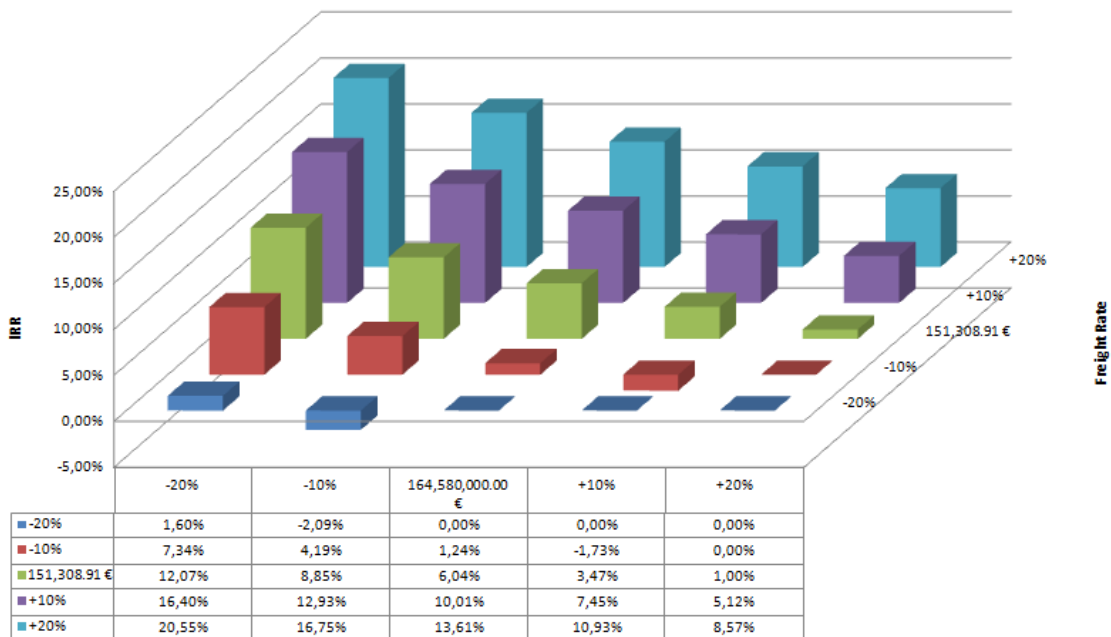
Διάγραμμα 62: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1^ο (i=8%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=10% , Σενάριο 1



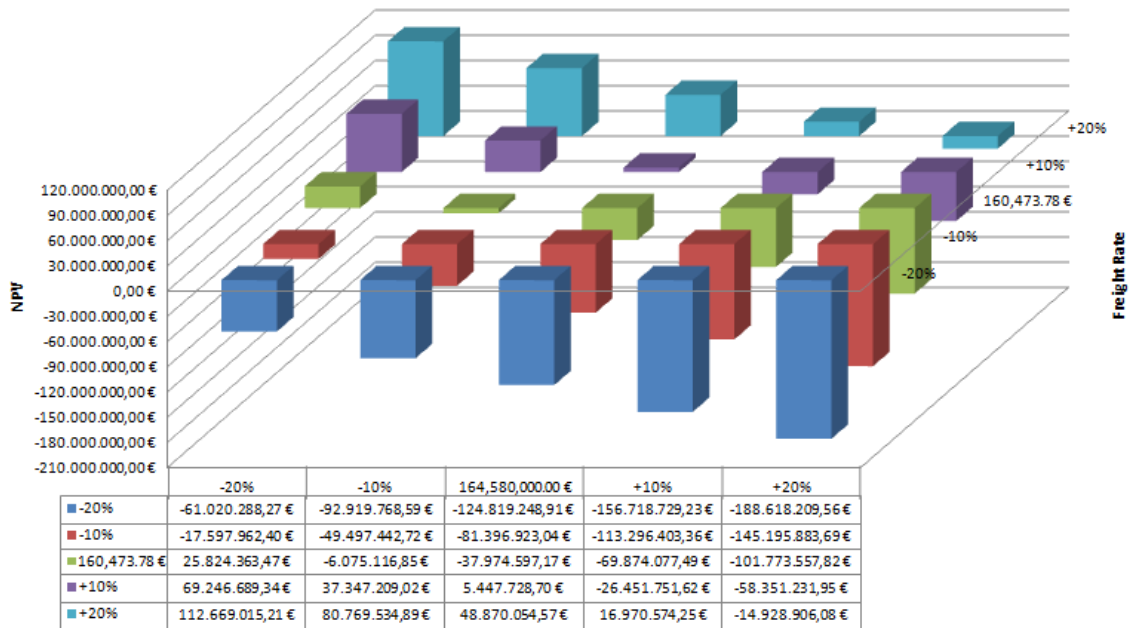
Διάγραμμα 63: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1^ο (i=10%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR , i=10% , Σενάριο 1



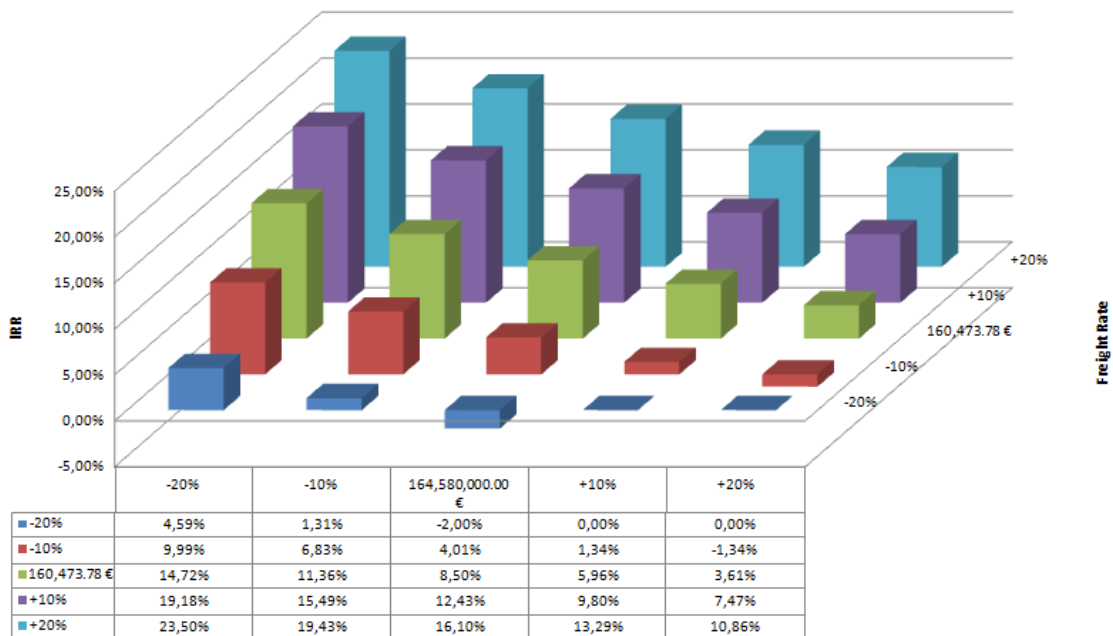
Διάγραμμα 64: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1^ο (i=10%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=12% , Σενάριο 1



Διάγραμμα 65: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 1^ο (i=12%)

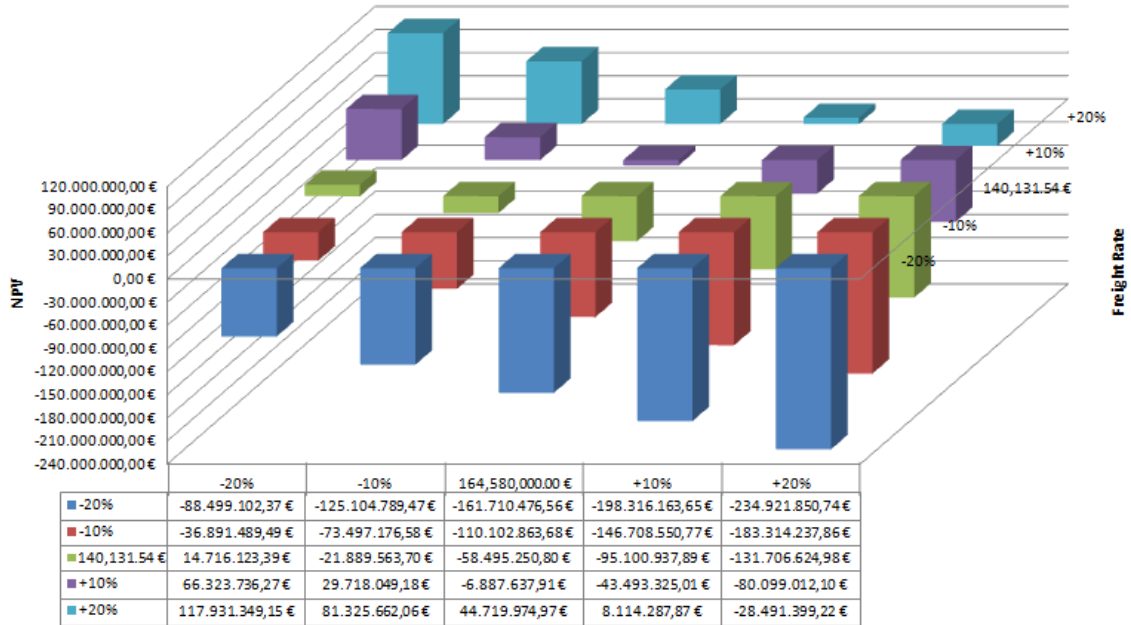
Ανάλυση ευαισθησίας IRR , i=12% , Σενάριο 1



Διάγραμμα 66: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 1^ο (i=12%)

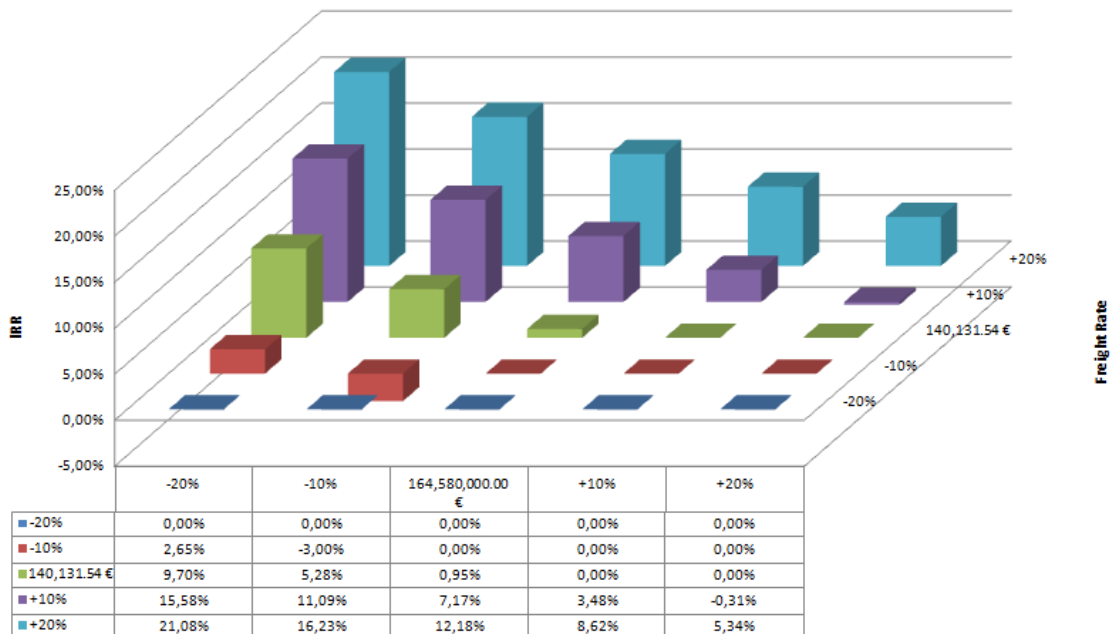
6.7.6 Δεύτερο Σενάριο: 30% Δάνειο, 70% Ίδια κεφάλαια (15bar, -30°C)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV, $i=8\%$, Σενάριο 2



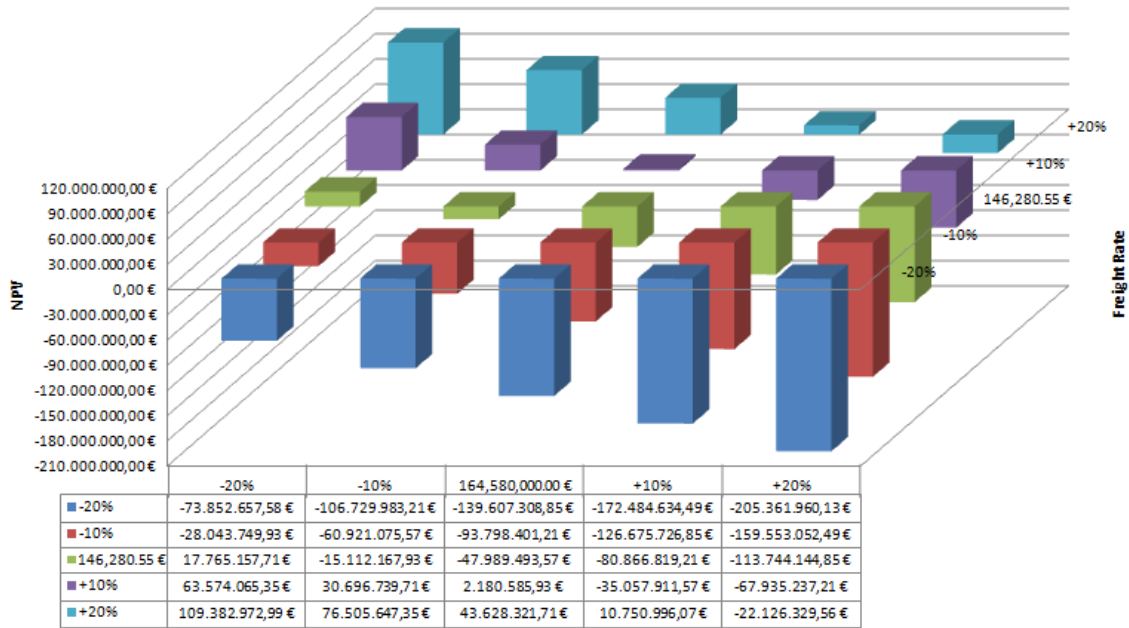
Διάγραμμα 67: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2^ο ($i=8\%$)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, $i=8\%$, Σενάριο 2



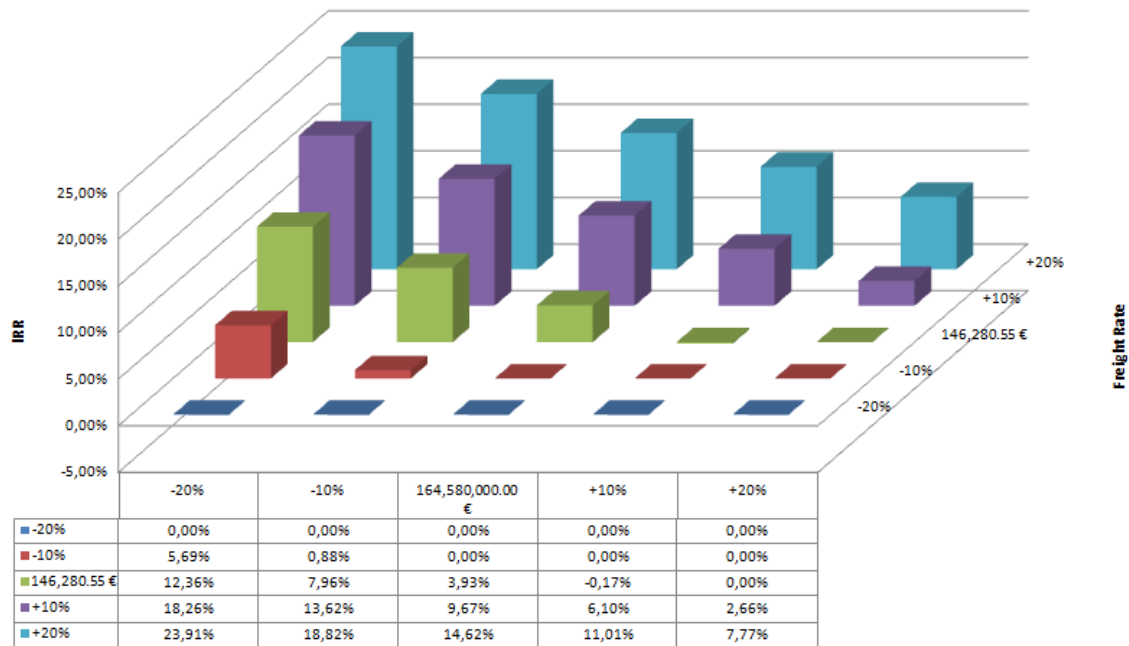
Διάγραμμα 68: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2^ο ($i=8\%$)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=10% , Σενάριο 2



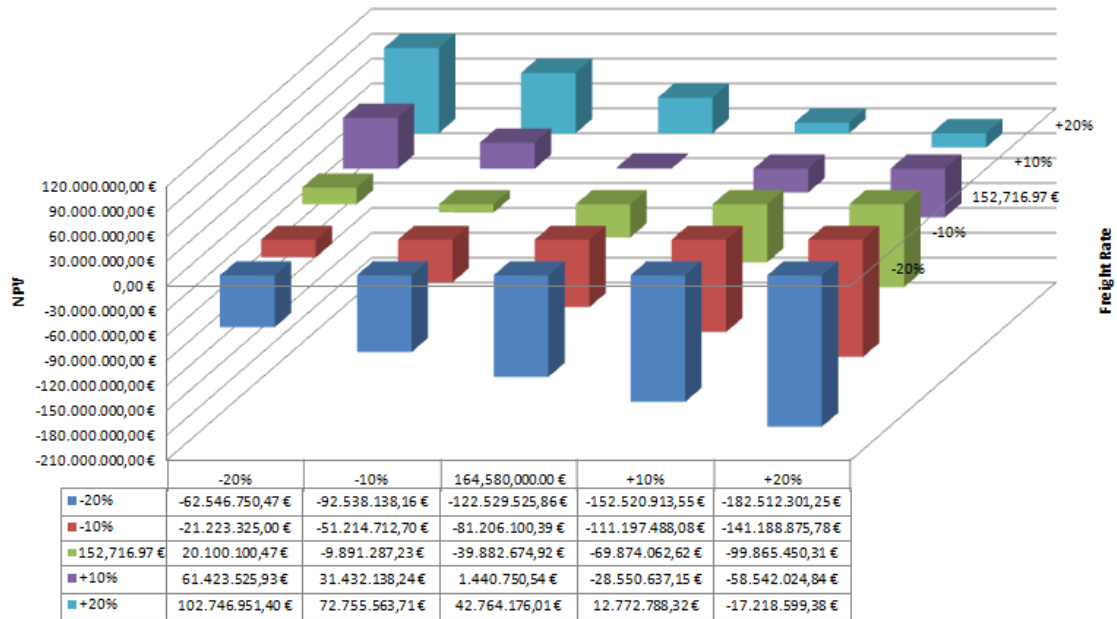
Διάγραμμα 69: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2^ο (i=10%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR , i=10% , Σενάριο 2



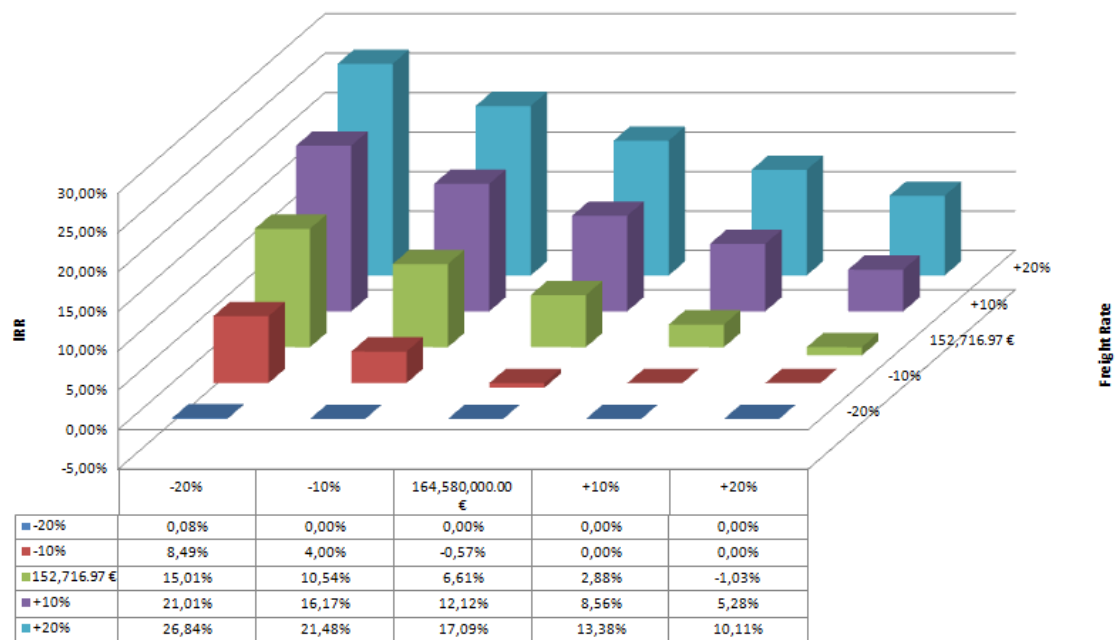
Διάγραμμα 70: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2^ο (i=10%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=12% , Σενάριο 2



Διάγραμμα 71: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 2^ο (i=12%)

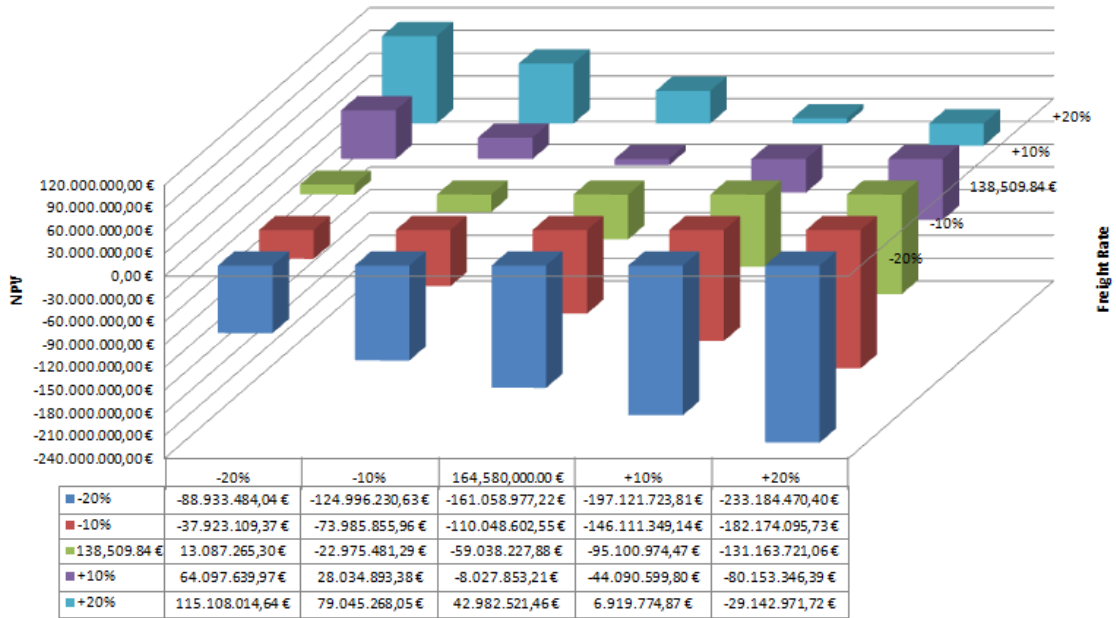
Ανάλυση ευαισθησίας IRR , i=12% , Σενάριο 2



Διάγραμμα 72: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 2^ο (i=12%)

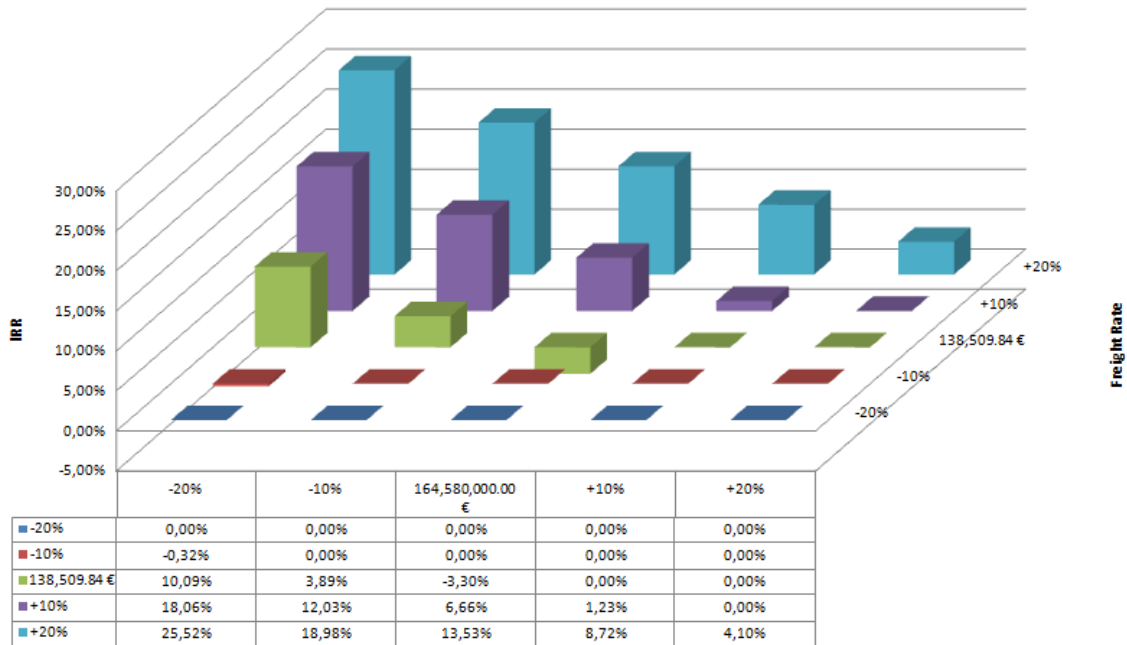
6.7.7 Τρίτο Σενάριο: 50% Δάνειο, 50% Ίδια κεφάλαια (15bar, -30°C)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=8% , Σενάριο 3



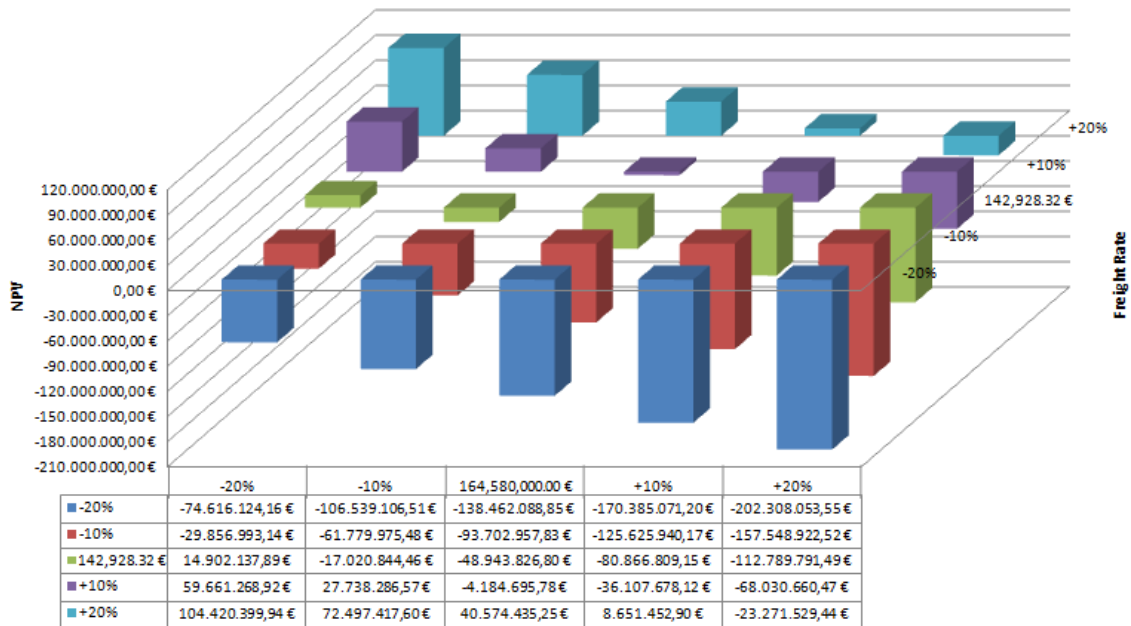
Διάγραμμα 73: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3° (i=8%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=8%, Σενάριο 3



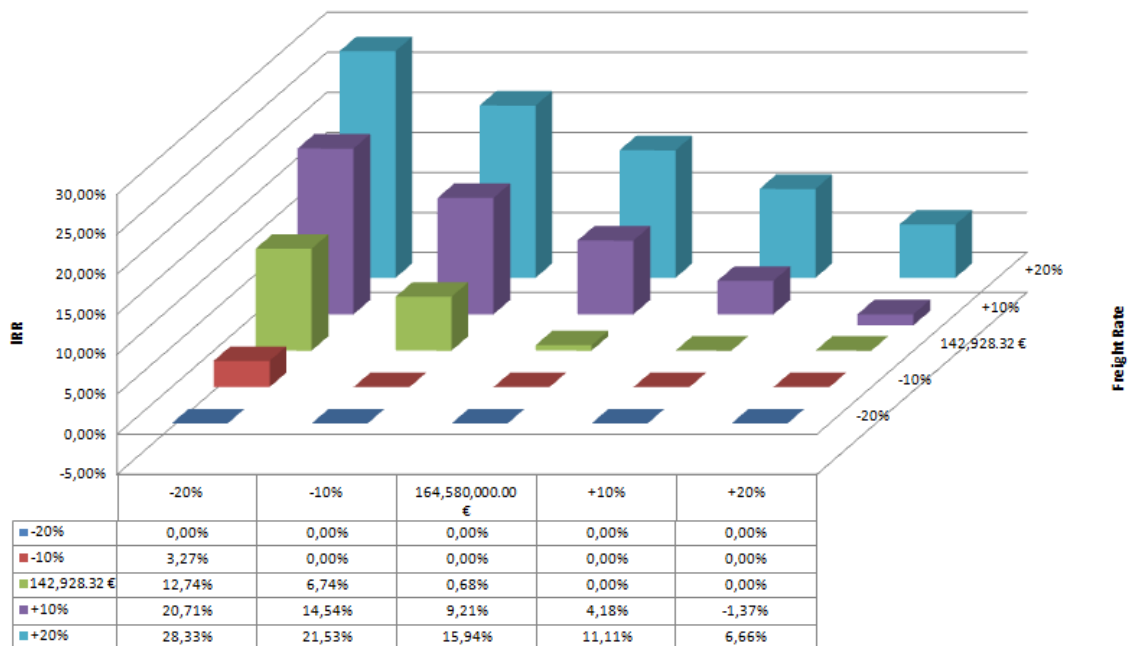
Διάγραμμα 74: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3° (i=8%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=10% , Σενάριο 3



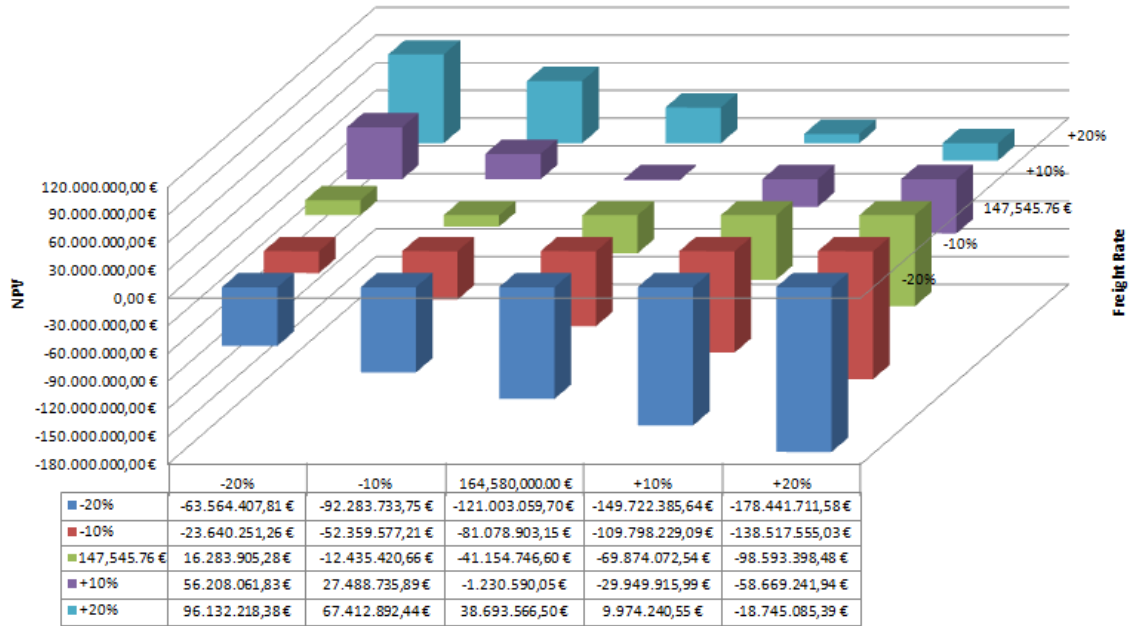
Διάγραμμα 75: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3^ο (i=10%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR , i=10% , Σενάριο 3



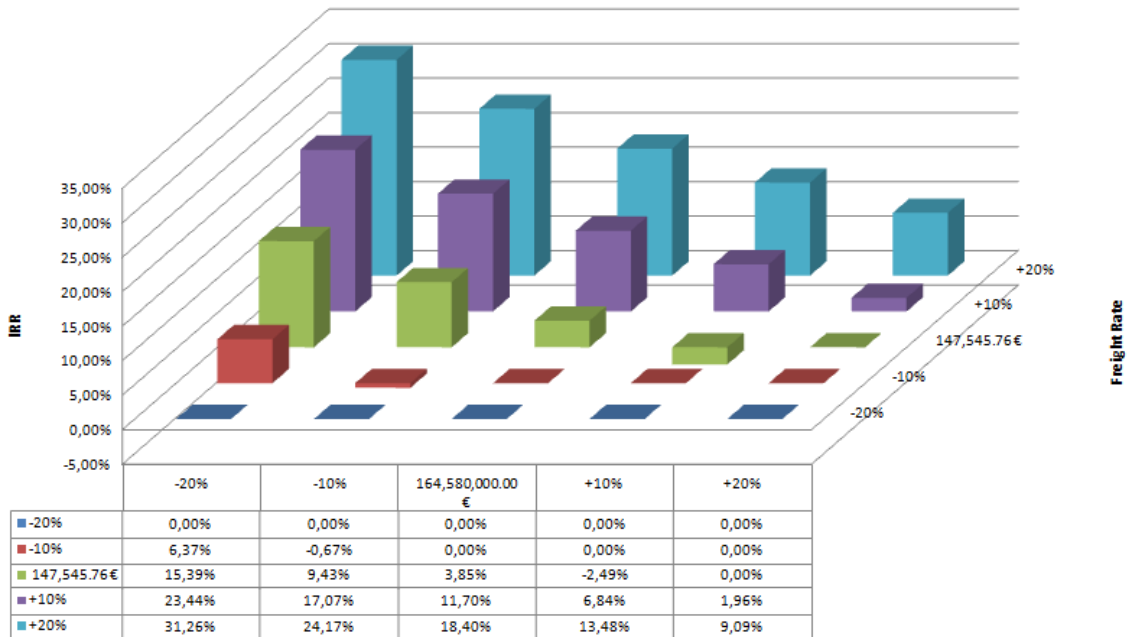
Διάγραμμα 76: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3^ο (i=10%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , $i=12\%$, Σενάριο 3



Διάγραμμα 77: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 3^ο ($i=12\%$)

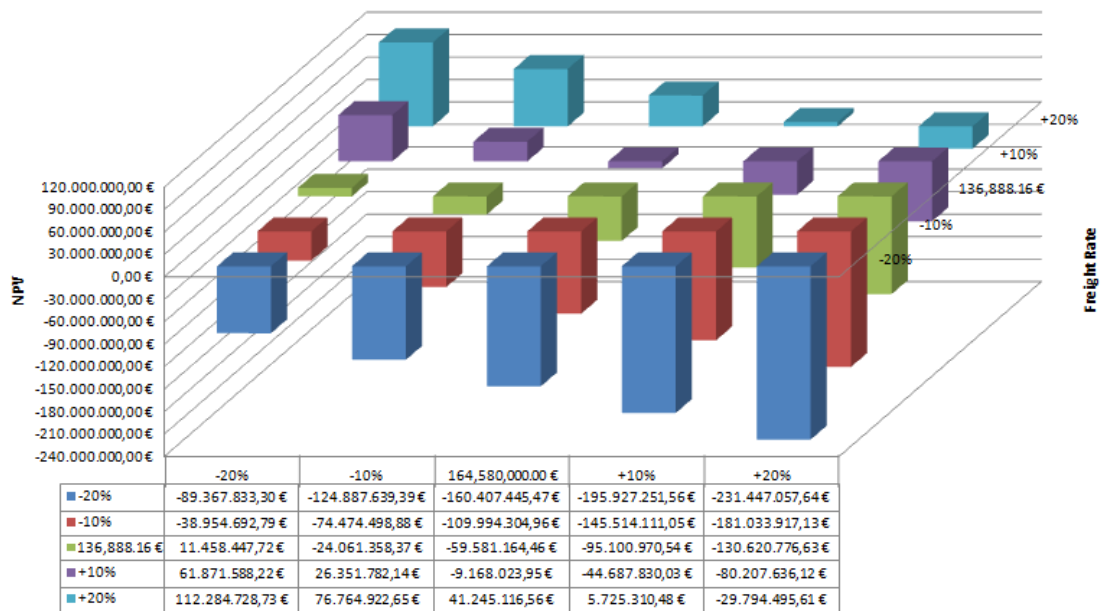
Ανάλυση ευαισθησίας IRR , $i=12\%$, Σενάριο 3



Διάγραμμα 78: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 3^ο ($i=12\%$)

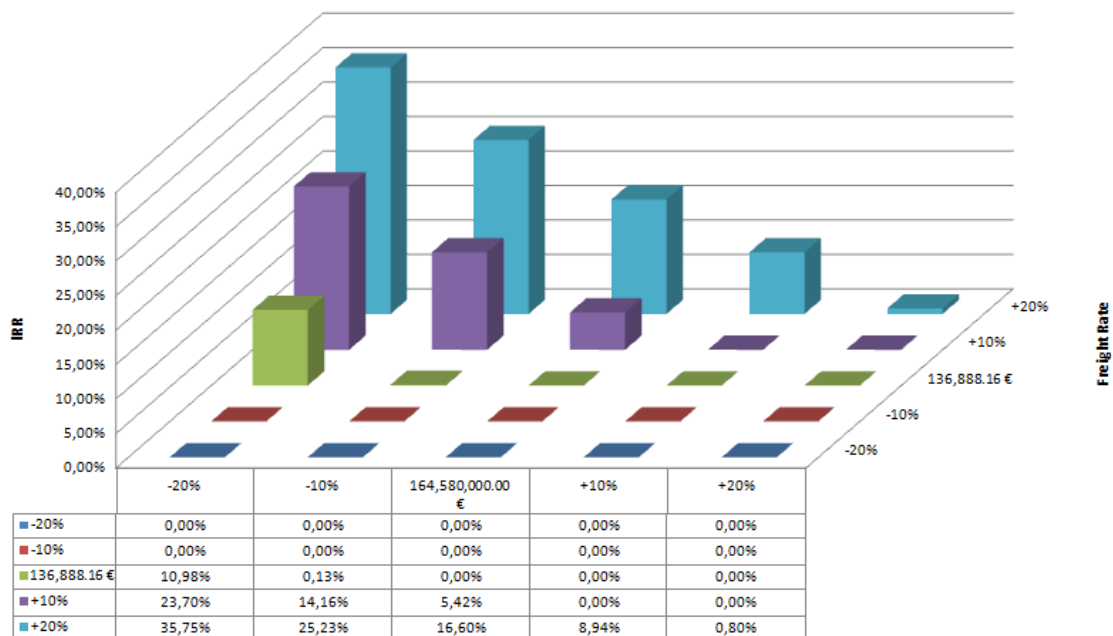
6.7.8 Τέταρτο Σενάριο: 70% Δάνειο, 30% Ίδια κεφάλαια (15bar, -30°C)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=8% , Σενάριο 4



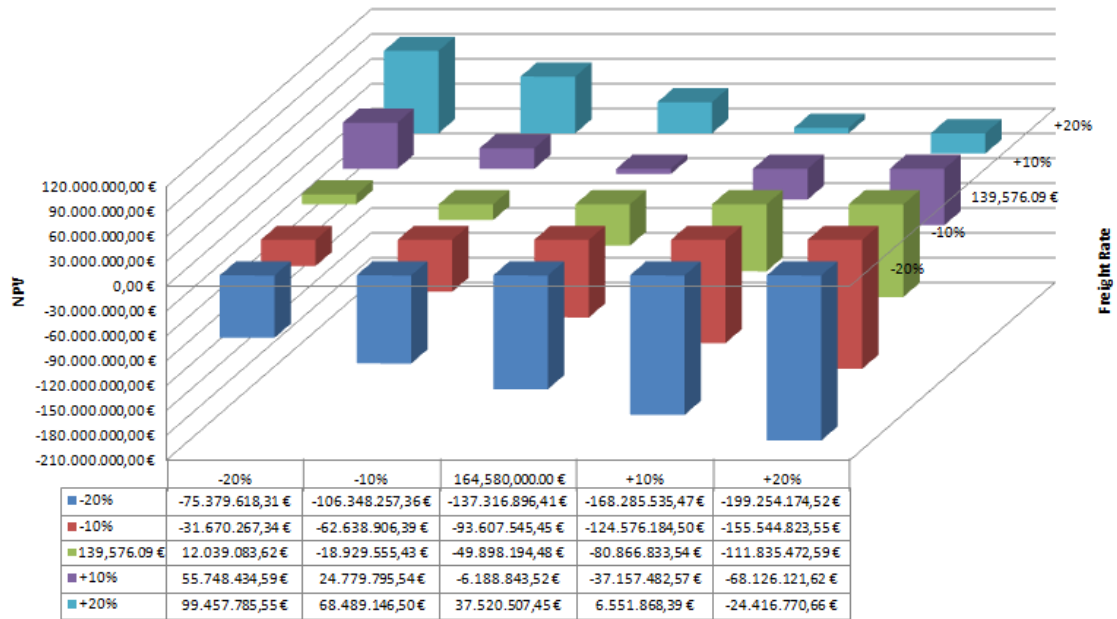
Διάγραμμα 79: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4^ο (i=8%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=8%, Σενάριο 4



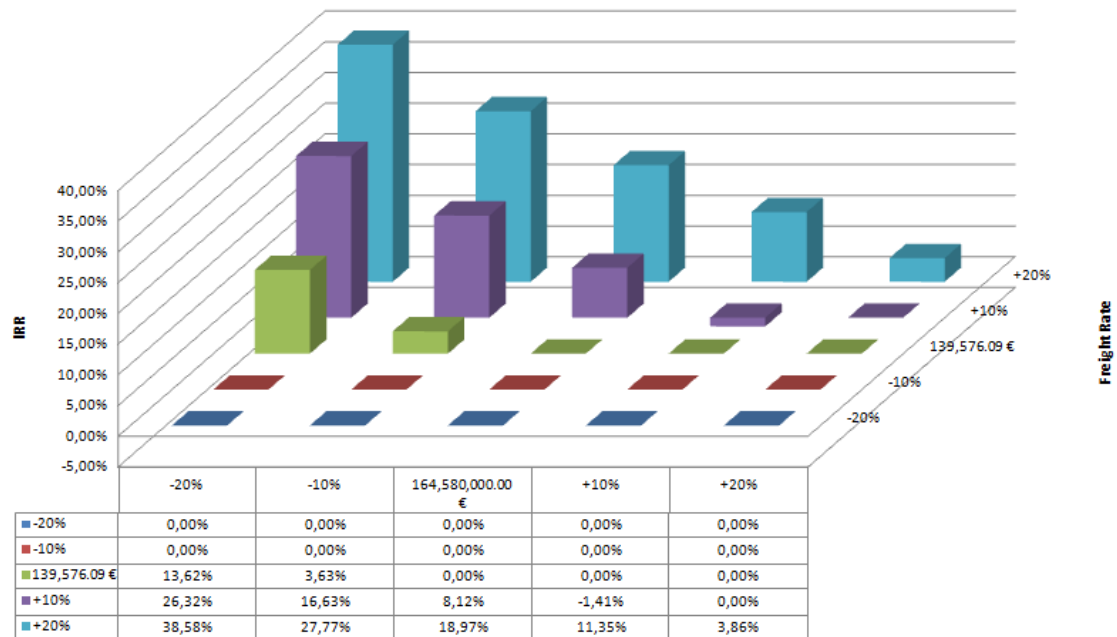
Διάγραμμα 80: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4^ο (i=8%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=10% , Σενάριο 4



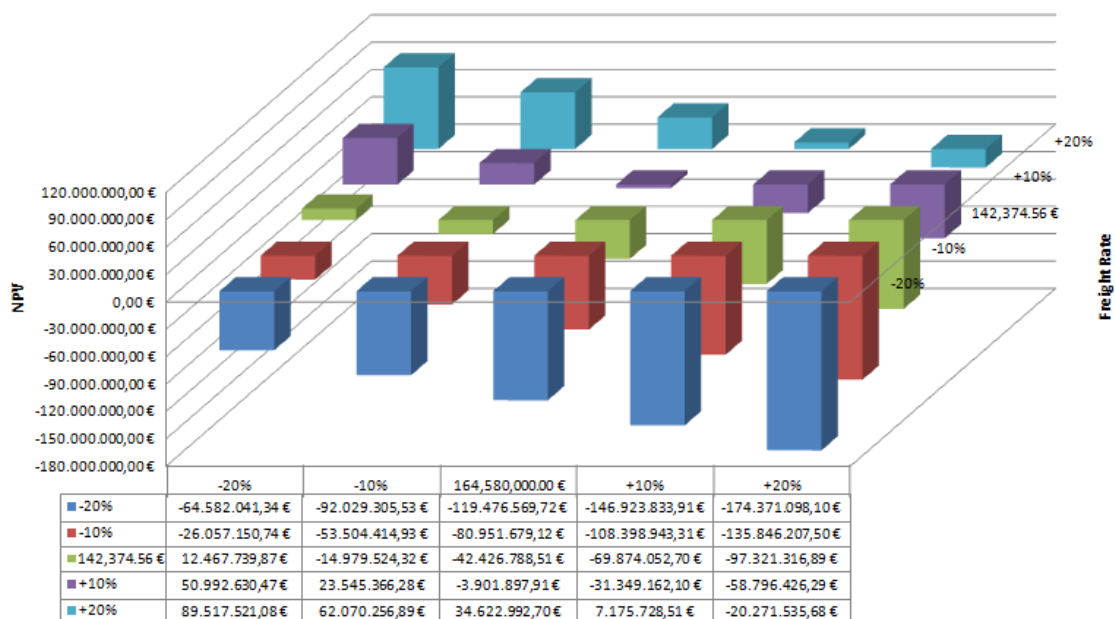
Διάγραμμα 81: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4^ο (i=10%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR, i=10%, Σενάριο 4



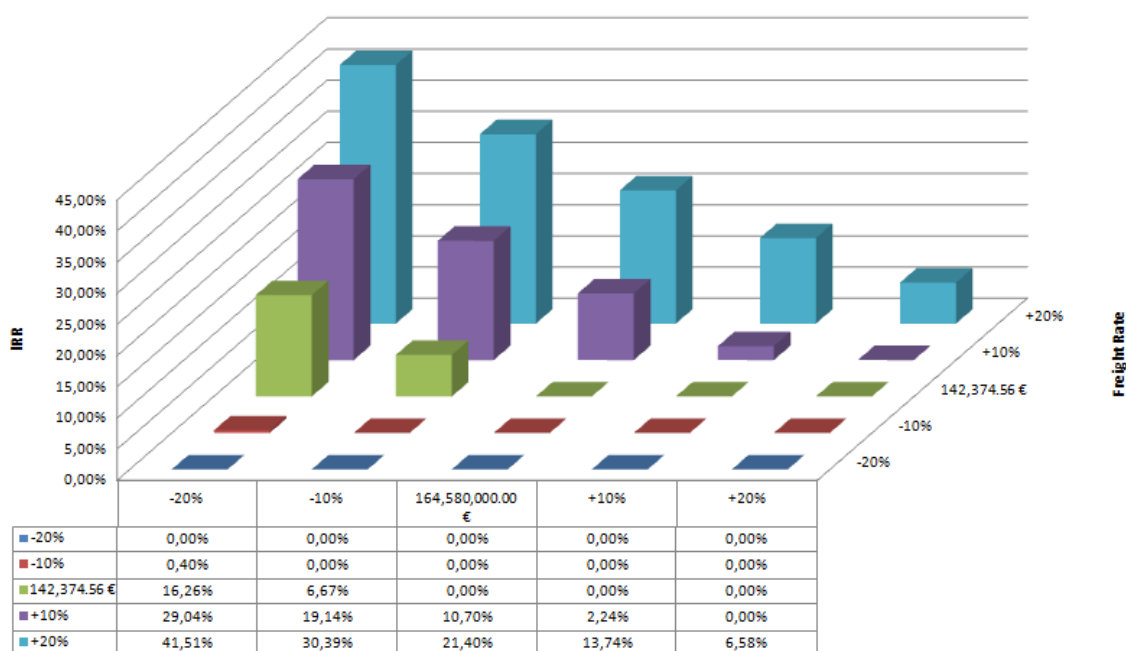
Διάγραμμα 82: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4^ο (i=10%)

Ανάλυση Ευαισθησίας NPV , i=12% , Σενάριο 4



Διάγραμμα 83: Ανάλυση ευαισθησίας NPV-Σενάριο 4^ο (i=12%)

Ανάλυση ευαισθησίας IRR , i=12% , Σενάριο 4



Διάγραμμα 84: Ανάλυση ευαισθησίας IRR-Σενάριο 4^ο (i=12%)

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, ο επίδοξος επενδυτής θα πρέπει να απορρίψει την επένδυση σε περίπτωση που οι κεφαλαιουχικές δαπάνες είναι αυξημένες κατά 20%. Επιπλέον, για την τιμή της εκτίμησης που έγινε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης αλλά

και για αύξηση 10% αυτής, η επένδυση θεωρείται επικερδής μόνο εάν το ναυλοσύμφωνο που θα επιτύχει ο πλοιοκτήτης είναι προσαυξημένο κατά 20% από την αρχική εκτίμηση. Στη περίπτωση όπου το CAPEX είναι μειωμένο κατά 10% , ο ναύλος πρέπει να είναι αυξημένος κατά 10% και άνω, ούτως ώστε να θεωρείται η επένδυση αποδεκτή. Τέλος, για μείωση του CAPEX κατά 20%, η επένδυση θεωρείται επικερδής ακόμη και για τιμές του ναύλου ίσες με αυτές της εκτίμησης.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Η ανάγκη αντιμετώπισης της περιβαλλοντικής κρίσης θα οδηγήσει στην ανάπτυξη έργων CCS και CCUS παγκοσμίως, προσβλέποντας στην αξιοποίηση των ρύπων έναντι της έως τώρα ευρείας τακτικής, δηλαδή την απόρριψη τους στην ατμόσφαιρα. Η άνθιση των έργων αυτών μελλοντικά θα δημιουργήσει με την σειρά της την ανάγκη για δόμηση εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως έχει συμβεί ανά τα χρόνια με κάθε εμπορεύσιμο προϊόν. Έτσι, η ναυτιλία πρόκειται να αποτελέσει αναπόσπαστο κομμάτι αυτής της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως συμβαίνει άλλωστε με τα ορυκτά καύσιμα. Ιστορικά, τα δίκτυα αγωγών διαδραματίζουν και αυτά με την σειρά τους σημαντικό ρόλο στην εφοδιαστική αλυσίδα των ορυκτών καυσίμων, κάτι που αναμένεται να συμβεί και στην περίπτωση του CO₂. Ωστόσο, οι μεγάλες χιλιομετρικές αποστάσεις, το είδος και η μορφολογία του εδάφους, αλλά και οι περιπτώσεις όπου χρειάζεται η μεταφορά δια θαλάσσης, καθιστούν τα δίκτυα αγωγών ασύμφορη λύση. Απεναντίας, η λύση της μεταφοράς υγροποιημένων αερίων με πλοία, αποτελεί μια δοκιμασμένη επιλογή και οικονομικά συμφέρουσα. Συνεπώς, στην προκειμένη περίπτωση είναι σημαντικό να επιλεγούν οι βέλτιστες συνθήκες για την μεταφορά του υγροποιημένου CO₂.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των πλοίων χαμηλής (7bar) και μέσης πίεσης (15bar), ούτως ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την πιο συμφέρουσα λύση για τον επίδοξο επενδυτή-πλοιοκτήτη. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της μελέτης δείχνει ότι η επιλογή επένδυσης του πλοιοκτήτη σε πλοίο χαμηλής πίεσης (7bar), είναι η πιο συμφέρουσα λύση, καθώς ακόμη και για μικρές αυξομειώσεις στον ναύλο και μεγάλες αυξομειώσεις στο CAPEX, η επένδυση παρουσιάζει θετικό NPV. Εν αντιθέσει με την επιλογή 2 πλοίων μέσης πίεσης (15bar), που σαν επένδυση φαίνεται να εμπεριέχει μεγαλύτερο ρίσκο για τον πλοιοκτήτη, αφού σε περιπτώσεις αύξησης του CAPEX κατά 20% και άνω, η επένδυση δεν

παρουσιάζει θετικό NPV ακόμη και για μεγάλες αυξήσεις του ναύλου της τάξεως του 20%. Επιπλέον, φαίνεται πως και για τα δύο επενδυτικά πλάνα η ασφαλέστερη λύση για τον επίδοξο επενδυτή είναι η λήψη δανείου, αφού πέρα από το ότι η τιμή του IRR αυξάνεται και η επένδυση θεωρείται αποδοτικότερη, μειώνεται η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης (Payback Period) και η τιμή του NPV παραμένει θετική ακόμη και για μεγάλες αυξήσεις του προεξοφλητικού επιτοκίου. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι μέχρι και σήμερα τα πλοία που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά υγροποιημένου CO₂ είναι κυρίως πλοία μέσης πίεσης (15bar, -30°C). Όπως είναι εμφανές η αγορά λόγω της τεχνολογικής ωριμότητας και της υπάρχουσας γνώσης από τα πλοία που ήδη δραστηριοποιούνται στο εμπόριο του CO₂, θα κινηθεί τα επόμενα χρόνια στην κατασκευή πλοίων με αυτές τις συνθήκες, όπως συμβαίνει με το Longship project που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5. Για να γίνουν κατανοητές οι προοπτικές μείωσης των κεφαλαιουχικών δαπανών των πλοίων χαμηλής πίεσης, απαιτείται ακόμη να αποδειχθεί ότι σε μεγάλη κλίμακα, η μεταφορά του υγροποιημένου CO₂, μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια και αξιοπιστία σε πίεση 7bar στους -50°C, γεγονός που σημαίνει ότι είναι κρίσιμο να αποφευχθεί ο σχηματισμός ξηρού πάγου κατά την μεταφορά του φορτίου, αφού οι συνθήκες αυτές είναι κοντά στο τριπλό σημείο του CO₂. Επιπρόσθετα, ο ναύλος που καλείται να επιτύχει ο πλοιοκτήτης για να θεωρηθεί συμφέρουσα η επένδυση και για τις δύο καταστάσεις που μελετήθηκαν θεωρείται αρκετά υψηλός. Βέβαια, αυτό υπογραμμίζεται λόγω της φύσης του φορτίου, καθώς μέχρι σήμερα, κατά ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό, το CO₂ θεωρείται αέριος ρύπος, γεγονός που πρόκειται να μεταβληθεί εάν το CO₂ αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως στα πλαίσια της τεχνολογίας CCUS και στην βιομηχανία τροφίμων.

Συμπεραίνεται, τελικώς, πως η επενδυτική κίνηση για την κατασκευή και λειτουργία πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα στην Ελλάδα είναι μια οικονομικά βιώσιμη επένδυση, ακόμη και στα πλαίσια που ορίστηκαν στην παρούσα μελέτη, τα οποία δεν θεωρούνται και τα πλέον ευνοϊκά για τον επίδοξο επενδυτή. Αυτό τονίζεται διότι στην παρούσα μελέτη ο πλοιοκτήτης κλήθηκε να επωμιστεί όλα τα έξοδα που αφορούν στην λειτουργία του πλοίου (OPEX, λιμενικά τέλη κλπ.), γεγονός που δεν πρόκειται να συμβεί, αφού συνηθέστερο είναι τέτοιου τύπου πλοία να επιλέγεται να ναυλωθούν με χρονοναύλωση (term charter) και εμπίπτουν στην ναυλαγορά των tankers, όπου οι διακυμάνσεις στον στιγμιαίο ναύλο μπορούν να φτάσουν σε τιμές άνω του 500%. Ακόμα, λοιπόν, και με την χρήση των δεδομένων αυτών, παρατηρείται πως η επένδυση μπορεί να θεωρείται επικερδής και εν τέλει αποδεκτή.

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω ερέυνα

Η παρούσα εργασία έχει αρκετές επεκτάσεις, οι οποίες είναι δυνατόν να εξεταστούν για περαιτέρω μελέτη. Αρχικά, θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να μελετηθεί κατά πόσο είναι βιώσιμο στην Ελλάδα να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο δίκτυο εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου εκτός από τα πλοία που μελετώνται στην παρούσα μελέτη θα εμπεριέχει ως πιθανές λύσεις για την μεταφορά του υγροποιημένου διοξειδίου, δίκτυα αγωγών και φορτηγά. Επιπλέον, είναι σημαντικό να μελετηθούν περαιτέρω οι τεχνολογίες που αφορούν στο CCUS και κάποιες από αυτές παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4. Επιπρόσθετα, θα ήταν αξιοσημείωτο να μελετηθεί κατά πόσο είναι επενδυτικά βιώσιμο

να κατασκευαστούν μονάδες υγροποίησης του δεσμευμένου CO₂, πλησίον χώρων μεγάλων βιομηχανιών, ούτως ώστε να γίνει σαφές εάν βιομηχανίες με μεγάλες εκπομπές ρύπων, αξίζει να επενδύσουν σε ένα τέτοιο πλάνο με στόχο την αποφυγή περιβαλλοντικών ποινών. Μια τέτοια έρευνα θα βοηθήσει γενικότερα τις τεχνολογίες CCUS και CCS, αφού θα καταστεί σαφές ποιες από τις εμπλεκόμενες μεριές θα επωμίζεται τα επιμέρους κόστη που προκύπτουν κατά τις διαδικασίες δέσμευσης, διατήρησης και μεταφοράς του CO₂. Ακόμη, είναι σημαντικό να γίνει μια μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου μεταφοράς CO₂, στην οποία θα μελετηθούν συγκεκριμένοι τύποι δεξαμενών και νέες διατάξεις του χώρου φορτίου, ούτως ώστε να γίνει μελλοντικά εφικτή η μεταφορά του υγροποιημένου CO₂ από πλοία μεγαλύτερης χωρητικότητας και για τις δύο καταστάσεις (7bar & 15bar) που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Τέλος, είναι κρίσιμο να ερευνηθεί η περίπτωση της μετασκευής υπάρχοντων LPG carriers σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου CO₂, αλλά και κατά πόσο είναι επενδυτικά βιώσιμο να μετασκευαστούν υπάρχοντα πλοία μέσης πίεσης για να μεταφέρουν το φορτίο τους σε συνθήκες 7bar στους -50°C.

Βιβλιογραφία

- Anderson, S., & Newell, R. (2004). Prospects for Carbon Capture And Storage Technologies. *Annual Review of Environment and Resources*, 29, 109-142.
doi:<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.29.082703.145619>
- Babic, J. (2015). *Encyclopedia of Ship Technology*. Wärtsilä Corporation. Ανάκτηση από <https://www.wartsila.com/docs/default-source/marine-documents/encyclopedia/wartsila-o-marine-encyclopedia.pdf>
- Bachu, S. (2007). Carbon dioxide storage capacity in uneconomic coal beds in Alberta, Canada: Methodology, potential and site identification. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 374-385. doi:10.1016/S1750-5836(07)00070-9
- Basile, A., Gugliuzza, A., Iulianelli, A., & Morrone, P. (2011). Membrane technology for carbon dioxide (CO₂) capture in power plants. Στο *Advanced Membrane Science and Technology for Sustainable Energy and Environmental Applications* (σσ. 113-159). Woodhead Publishing Limited.
- Blenkey, N. (2022). *LCO₂ carrier developments set to pick up pace*. Ανάκτηση από MarineLog: <https://www.marinelog.com/news/lco2-carrier-developments-set-to-pick-up-pace/>
- Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Mac Dowel, N., . . . Fennell, P. S. (2014). Carbon Capture and storage update. *Energy & Environmental Science*, 7, 130-189. doi:10.1039/c3ee42350f
- Bosneagu, R., Vasilache, S., & Raiciu, A. (2017). Liquefied Natural Gas Carriers, Present and Future. *Scientific Bulletin "Mircea cel Batran" Naval Academy*, 20(1).
- Brewer, P. G., Friederich, G., Peltzer, E. T., & Orr Jr, F. M. (1999). Direct experiments on the ocean disposal of fossil fuel CO₂. *Science*, 284, 943-945.
doi:10.1126/science.284.5416.943
- Brownsort, D. (2014). *Ship transport of CO₂ for Enhanced Oil Recovery - Literature Survey*. Scottish Carbon Capture & Storage (SCCS).
- Budinis, S., Krevor, S., Dowell, N., Brandon, N., & Hawkes, A. (2018). An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Reviews*, 61-81.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.003>
- Cao, C., Liu, H., Hou, Z., Mehmood, F., Liao, J., & Feng, W. (2020). A Review of CO₂ Storage in View of Safety and Cost-Effectiveness. *Energies*. doi:10.3390/en13030600
- Carbon Sequestration Leadership Forum. (2017, June). Status: CSLF Task Force On offshore CO₂-EOR, Enabling Large-scale CCS using Offshore CO₂ Utilization and Storage Infrastructure Developments. Beaumont, Texas, USA. Ανάκτηση από https://gcc.beg.utexas.edu/files/gcc/research/goi/2017/Eide_Offshore%20CO2-EOR%20Task%20Force%20Update_Beaumont_June_2017.pdf

- CCNR/OCIMF. (2010). *International Safety Guide for Inland Navigation Tank-barges and Terminals*. Strasbourg Cedex, France: Central Commission for the Navigation of the Rhine & Oil Companies International Marine Forum.
- Chakraborty, S. (2019). *Understanding The Design of Liquefied Gas Carriers*. Ανάκτηση από Marine Insight: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>
- Chauvy, R., & De Weireld, G. (2020). CO2 Utilization Technologies in Europe: A Short Review. *Energy Technology*, 8(12). doi:10.1002/ente.202000627
- Corbett, J. J., & Koehler, H. W. (2003). Updated emissions from ocean shipping. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 108.
- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment. *Environmental Science & Technology*, 8512-8518.
- Det Norske Veritas. (2022). *Shipping's future role in carbon capture and storage*. (E. Sørhaug, & M. Cartwright, Επιμελητές) Ανάκτηση από DNV: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Shipings-future-role-in-carbon-capture-and-storage.html>
- Deybach, F. (2003). *Membrane Technology for Offshore LNG*. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. Ανάκτηση από <https://gtt.fr/sites/default/files/20131005-otc-membrane-technology-for-offshore-Ing-2003-10-06.pdf>
- Doney, S. C., & Levine, N. M. (2006). *How Long Can the Ocean Slow Global Warming?* Ανάκτηση από OCEANUS-The Journal of our Ocean Planet: <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/how-long-can-the-ocean-slow-global-warming/?id=17726>
- Duan, Z., & Sun, R. (2003). An improved model calculating CO2 solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2000 bar. *Chemical Geology*, 193, σσ. 257-271.
- Eggleton, T. (2013). *A Short Introduction to Climate Change*. New York, United States of America: Cambridge University Press.
- Element Energy. (2018). *Shipping CO2-UK Cost Estimation Study*. Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business Energy and Industrial Strategy. Ανάκτηση από <https://www.gov.uk/government/publications/shipping-carbon-dioxide-co2-uk-cost-estimation-study>
- Endresen, Ø., Eide, M., Dalsøren, S., Isaksen, I. S., & Sørgård, E. (2008). *The Environmental Impacts of Increased International Maritime Shipping*. Ανάκτηση από OECD: <https://www.oecd.org/greengrowth/greening-transport/41373767.pdf>
- Endresen, Ø., Sørgard, E., Lee Behrens, H., Brett, P., & Isaksen, I. S. (2007). A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 112. doi:doi:10.1029/2006JD007630

- Eyring, V., Köhler, H. W., Lauer, A., & Lemper, B. (2005). Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 110. doi:10.1029/2004JD005620
- Fagerholt, K., Gausel, N. T., Rakke, J. G., & Psaraftis, H. N. (2015). Maritime routing and speed optimization with emission control areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, 57-73. doi:https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.010
- Fer, I., & Haugan, P. M. (2003). Dissolution from a liquid CO₂ Lake disposed in the Deep Ocean. *Limnology and Oceanography*, 872-883.
- Feron, P. H., & Hendriks, C. A. (2005). CO₂ Capture Process Principles and Costs. *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles*, 60, 451-459. Ανάκτηση από https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/pdf/2005/03/feron1_vol60n3.pdf
- Fleur, N. S. (2015, November 10). *New York Times*. Ανάκτηση από <http://www.nytimes.com/2015/11/11/science/atmospheric-greenhouse-gas-levels-hit-record-report-says.html>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O' Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., . . . Canadell, J. G. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, σσ. 1783-1838.
- Furre, A.-K., Eiken, O., Alnes, H., Vevatne, J., & Kiær, A. (2017). 20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner. *Energy Procedia*, 3916-3926. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1523
- GAO, L., FANG, M., LI, H., & HETLAND, J. (2011). Cost Analysis of CO₂ Transportation: Case Study in China. *Energy Procedia*, 4, 5974-5981. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.600
- Garrison, S. T. (2004). *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Brooks/Cole.
- Gaztransport & Technigaz. (2023). *Mark III Systems*. Ανάκτηση από GTT.fr: <https://gtt.fr/technologies/markiii-systems>
- Gerlach, T. M. (1991, June 4). Present-day CO₂ emissions from volcanos. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 72, σσ. 249-255.
- Global CCS Institute. (2013). *The Global Status of CCS: 2013*. Melbourne, Australia: Global CCS Institute.
- Global CCS Institute. (2018). *Fact Sheet: Capturing CO₂*. Global CCS Institute. Ανάκτηση 2022, από https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/12/Global-CCS-Institute-Fact-Sheet_Capturing-CO2.pdf
- Global CCS Institute. (2021). *The Global Status of CCS: 2021*. Australia.
- Global CCS Institute. (χ.χ.). CCS Explained: Capture. Ανάκτηση 2022, από <https://www.globalccsinstitute.com/ccs-explained-capture/>
- Global CCS Institute. (χ.χ.). *CCS Explained: Transport, Pipelines, Ships, Trucks, and Rail: Transporting CO₂*. Ανάκτηση 2022, από [globalccsinstitute.com: https://www.globalccsinstitute.com/ccs-explained-transport/](https://www.globalccsinstitute.com/ccs-explained-transport/)

- Global CCS Institute, Parsons & Brinckerhoff. (2011). *ACCELERATING THE UPTAKE OF CCS: INDUSTRIAL USE OF CAPTURED CARBON DIOXIDE*. Global CCS Institute, Parsons & Brinckerhoff.
- Gössling, S., Meyer-Habighorst, C., & Humpe, A. (2021). A global review of marine air pollution policies, their scope and effectiveness. *Ocean & Coastal Management*, 212.
- Guetlein, M.-C., & Sebi, C. (2020). *Toward the end of SF₆, the most powerful greenhouse gas?* Ανάκτηση από The Conversation: <https://theconversation.com/toward-the-end-of-sf-the-most-powerful-greenhouse-gas-147888>
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E. A., Fuss, S., Mac Dowell, N., . . . Williams, C. K. (2019). The technological and economic prospects for CO₂ utilisation and removal. *Nature*, 575(7781), 87-97.
- Houghton, J. (2005, May 4). Global warming. *Reports on Progress in Physics*.
- IEA GHG. (χ.χ.). *Storing CO₂ in Unminable Coal Seams*. IEA GHG. Ανάκτηση 2022, από https://ieaghg.org/docs/general_publications/8.pdf
- IEAGHG. (2010). *Development of a global CO₂ pipeline infrastructure, 2010/13*.
- IHI Corporation. (2000). *What is SPB Tank?* Ανάκτηση 2022, από [ihico.jp](https://www.ihico.jp/offshore/whatisspb_e.htm): https://www.ihico.jp/offshore/whatisspb_e.htm
- IMO. (1978). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. IMO.
- IMO. (2012). *Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), MEPC.213(63)*. International Maritime Organization.
- IMO. (2014). *2014 Guidelines on Survey and Certification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI), MEPC.254(67)*. International Maritime Organization.
- IMO. (2014). *Amendments to the International Code for The Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC CODE)*. IMO. Ανάκτηση από [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.370\(93\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.370(93).pdf)
- International Chamber of Shipping. (2022). *Shipping and World Trade: World Seaborne Trade*. Ανάκτηση από [ics-shipping.org](https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/shipping-and-world-trade-world-seaborne-trade/): <https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/shipping-and-world-trade-world-seaborne-trade/>
- International Maritime Organization (IMO). (2020). *Fourth IMO GHG Study*. IMO. Ανάκτηση από <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>
- IPCC. (2005). *Carbon Dioxide Capture And Storage*. (B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, & L. Meyer, Επιμ.) New York: Cambridge University Press.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC.

- IPCC. (2018). *Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to.* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, J. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, . . . T. Waterfield, Επιμ.) doi:<https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Intergovernmental Panel On Climate Change. Ανάκτηση από https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf
- IRENA. (2019). *Global Energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition).* Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Jansen, D., Gazzani, M., Manzolini, G., van Dijk, E., & Carbo, M. (2015). Pre-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.028>
- Jansen, W. (2011). Διοξείδιο του άνθρακα - βασικές πληροφορίες. (M. Rau, A. Brown, Επιμ., & Π. Θάνου, Μεταφρ.)
- Jarvis, S. M., & Samsatli, S. (2018). Technologies and infrastructures underpinning future CO₂ value chains: A comprehensive review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 85, 46-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.007>
- Jelmert, P., Chang, M., Høier, M., Pwaga, S., Iluore, C., Hundseth, Ø., . . . Idrees, M. (2010). *Comparative Study of Different EOR Methods.* Norwegian University of Science & Technology, Department of Petroleum Engineering, Tondheim, Norway.
- Jiang, J. (2021). *Mitsubishi Heavy Industries sets out to commercialise the use of CO₂ carriers.* Ανάκτηση από Splash247: <https://splash247.com/mitsubishi-heavy-industries-sets-out-to-commercialise-the-use-of-co2-carriers/>
- Johansson, L., Jalkanen, J.-P., & Kukkonen, J. (2017). Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution. *Atmospheric Environment*, 403-415.
- Kamalnejad, M., Sheykhbahee, A., & Mazaheri, S. (2016). Financial Feasibility Study between Purchasing and Hiring LNG Carrier In Iranian LNG Industry. *International Journal of Coastal & Offshore Engineering*, 1, 25-31.
- Kjärstad, J., Skagestad, R., Eldrup, N., & Johnsson, F. (2016). Ship transport—A low cost and low risk CO₂ transport option in the Nordic countries. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 168-184. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.08.024>
- Koytsoumpa, E., Bergins, C., & Kakaras, E. (2018). The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 132, 3-16.
- Kwak, D.-H., & Kim, J.-K. (2017). Techno-economic evaluation of CO₂ enhanced oil recovery (EOR) with the optimization of CO₂ supply. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 58, 169-184. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.01.002>

- Lan, X., Thoning, K. W., & Dlugokencky, E. J. (2023). *Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆, 2023-09*. Ανάκτηση από NOAA Global Monitoring Laboratory: <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>
- Larvik Shipping AS. (χ.χ.). *Fleet*. Ανάκτηση από Larvik-Shipping.no: <https://www.larvik-shipping.no/fleet/>
- Laumb, J. D., Kay, J. P., Holmes, M. J., Cowan, R. M., Azenkeng, A., Heebink, L. V., . . . Raymond, L. J. (2013). Economic and Market Analysis of CO₂ Utilization Technologies – Focus on CO₂ derived from North Dakota lignite. *Energy Procedia*, 37, 6987-6998. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.632>
- Levine, J. S., Matter, J. M., Goldberg, D., Cook, A., & Lackner, K. S. (2007). Gravitational trapping of carbon dioxide in deep sea sediments: Permeability, buoyancy, and geomechanical analysis. *Geophysical Research Letters*, 34(24). doi:[doi:10.1029/2007GL031560](https://doi.org/10.1029/2007GL031560)
- Liu, H., Fu, M., Jin, X., Shang, Y., Shindell, D., Faluvegi, G., . . . He, K. (2016). Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia. *Nature Climate Change*, 1037-1041.
- Loeve, D., Neele, F., Hendriks, C., Koornneef, J., Hendriks, C., & Brouwer, J. (2013). *D08: Transport and Storage Economics of CCS Networks in the Netherlands: Analysis of international CCS business cases around the North Sea (Phase 2)*. CATO2.
- Mikulcic, H., Ridjan Skov, I., Dominković, D. F., Wan Alwi, S., Manan, Z. A., Tan, R., . . . Wang, X. (2019). Flexible Carbon Capture and Utilization technologies in future energy systems and the utilization pathways of captured CO₂. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- MOL. (2023). *A Vessel for Every Need Supporting Everyday Life and Industries Around the World*. Tokyo, Japan: Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. Ανάκτηση 2022, από <https://www.mol.co.jp/en/various-vessels/>
- NASA. (2015, November 12). *Jet Propulsion Laboratory*. (K. Ramsayer, C. Rasmussen, & A. Buis, Επιμελητές) Ανάκτηση 2022, από <https://www.jpl.nasa.gov/news/a-breathing-planet-off-balance>
- NASA. (2023, July). *Global Climate Change*. Ανάκτηση από <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- Navarro, J. (2021). *Introduction to LCO₂ Carriers, CO₂ Properties, Regulatory Framework Shipping LCO₂*.
- Nienhuis, S., Palmer, R. A., & Harley, C. D. (2010). Elevated CO affects shell dissolution rate but not calcification rate in a marine snail. *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B*, 277.
- Nikel, D. (2020). *Sulfur hexafluoride: The truths and myths of this greenhouse gas*. Ανάκτηση από phys.org: <https://phys.org/news/2020-01-sulfur-hexafluoride-truths-myths-greenhouse.html>
- Niotis, S. (2022). *LNG LPG Carriers*. Presentation to NTUA.

- NOAA. (2008). *State of the Science FACT SHEET*. Ανάκτηση από NOAA.gov: https://www.pmel.noaa.gov/co2/files/noaa_oa_factsheet.pdf
- NOAA. (2023). *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*. Ανάκτηση από <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>
- Ormerod, W. G., Freund, P., Smith, A., & Davison, J. (2002). *Ocean Storage of CO₂*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.
- Prime Marine. (2023). *Gas Carriers*. Ανάκτηση 2022, από prime-marine.net: <https://www.prime-marine.net/our-business/gas-carriers/>
- Rackley, S. A. (2010). *Carbon Capture*. doi:<https://doi.org/10.1016/C2009-0-19306-6>
- Randhawa, G., & Bodenham, A. (2016). The increasing recreational use of nitrous. *BJA: British Journal of Anaesthesia*, 116, σσ. 321-324.
- Ravishankara, A. R., Solomon, S., Turnipseed, A. A., & Warren, R. F. (1993). Atmospheric Lifetimes of Long-Lived Halogenated Species. *Science*, 259, σσ. 194-199.
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. Ανάκτηση από OurWorldInData.org: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- Ritter, K. (2015, November 9). *UK: In 1st, global temps average could be 1 degree C higher*. Ανάκτηση από The Associated Press: <https://apnews.com/bb49340d0da24bef8f9c36cd2345fabb>
- Roussanaly, S., Deng, H., Skaugen, G., & Gundersen, T. (2021). At what Pressure Shall CO₂ Be Transported by Ship? An in-Depth Cost Comparison of 7 and 15 Barg Shipping. *Energies*, 14. doi:<https://doi.org/10.3390/en14185635>
- Scott, V., Gilfillan, S. M., Markusson, N., Chalmers, H., & Haszeldine, R. (2012). Last chance for carbon capture and storage. *Nature Climate Change*. doi:<http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE1695>
- Sillars, R. (2008). LPG Reliquefaction Plants-Design & Operation. Στο *Design and Operation of LPG Ships* (σσ. 175-186). The Royal Institution of Naval Architects.
- Smith, L., Billingham, M. A., Lee, C. H., & Milanovic, D. (2011). Establishing and maintaining the integrity of wells used for sequestration of CO₂. *Energy Procedia*, 4, 5154-5161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.492>
- Sorokhtin, O. G., Chilingar, G. V., & Khilyuk, L. F. (2007). *Global Warming and Global Cooling Evolution of Climate on Earth*. Elsevier.
- Spritzler, F. (2019, November 3). *Healthline*. Ανάκτηση 2022, από <https://web.archive.org/web/20200510064945/https://www.healthline.com/nutrition/carbonated-water-good-or-bad>
- United Nations. (1997). *KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*. Kyoto.

- United Nations. (2015). *Paris Agreement*. Paris: UNFCCC. Ανάκτηση από https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- Ursan, M. (2011). *What is boil-off?* Ανάκτηση από https://unece.org/DAM/trans/doc/2011/wp29grpe/LNG_TF-02-06e.pdf
- Valluri, S., Claremboux, V., & Kawatra, S. (2022). Opportunities and challenges in CO2 utilization. *Journal of Environmental Sciences*, 113, 322-344. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.05.043>
- Voormeij, D. A., & Simandl, J. G. (2004). Geological, Ocean, and Mineral CO2 Sequestration Options: A Technical Review. *Geoscience Canada*, 31(1), 11-22.
- Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J., & Ramshaw, C. (2011). Post-combustion CO2 capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), 1609-1624. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.005>
- Wikipedia contributors. (2023, September 5). Renewable energy. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Ανάκτηση από https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Renewable_energy&oldid=1173987557
- Wildenborg, T., & Lokhorst, A. (2005). Introduction on CO2 Geological Storage. Classification of Storage Options. *Oil & Gas Science and Technology - Rev.IFP*, 60, 513-515.
- Wrońska-Nofer, T., Palus, J., Krajewski, W., Jajte, J., Kucharska, M., Stetkiewicz, J., . . . Rydzynski, K. (2009). DNA damage induced by nitrous oxide: Study in medical personnel of operating rooms. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, σσ. 39-43.
- Wrońska-Nofer, T., Roch-Nofer, J., Jajte, J., Dziubałtowska, E., Szymczak, W., Krajewski, W., . . . Rydzynski, K. (2012). Oxidative DNA damage and oxidative stress in subjects occupationally exposed to nitrous oxide (N2O). *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 731, σσ. 58-63.
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse. Στο M. R. Rahimpour, M. Farsi, & M. A. Makarem, *Advances in Carbon Capture* (σσ. 3-28). Woodhead Publishing.
- ZEP. (2011). *The Costs of CO2 Capture, Transport and Storage*. European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants.
- ZEP/CCSA. (2022). *Network Technology – Guidance for CO2 Transport by Ship – Workgroup Report*. Zero Emissions Platform. Ανάκτηση από <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/ZEP-CCSA-Guidance-Note-for-CO2-transport-by-ship-March-2022.pdf>
- Βορριάς, Η. Σ. (2014). *Προηγμένα Συστήματα Δέσμευσης του CO2*. PhD Thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα.
- ΔΕΠΑΝ. (2020). *Ετήσια Έκθεση ΑΗΣ Λινοπεραμάτων*. Τομέας Προστασίας Περιβάλλοντος. ΔΕΠΑΝ. Ανάκτηση από <https://ypen.gov.gr/etisia-perivallontiki-ekthesi-tou-ais-linoperamaton-gia-to-etos-2020/>

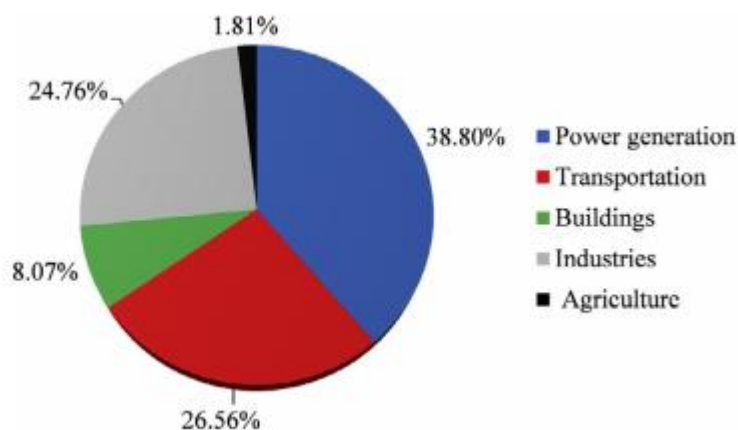
- ΔΕΠΑΝ. (2021). *Ετήσια Περιβαλλοντική Έκθεση του ΑΗΣ Λινοπεραμάτων*. Τομέας Προστασίας Περιβάλλοντος. ΔΕΠΑΝ. Ανάκτηση από <https://ypen.gov.gr/etisia-perivallontiki-ekthesi-tou-ais-linoperamatou-gia-to-etos-2021/>
- ΕΔΕΥ Α.Ε. (2020). *Υπόγεια Γεωλογική Αποθήκευση CO₂ και Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα*. ΕΔΕΥ Α.Ε. Ανάκτηση από www.greekhydrocarbons.gr
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, Συμβούλιο της ΕΕ. (2018). *Οδηγία 2009/31/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς*. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, Συμβούλιο της ΕΕ. Ανάκτηση από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/el/ALL/?uri=CELEX:32009L0031&qid=1694674862076>
- Ζαραφωνίτης, Γ. (2005). *Εισαγωγή στην Ναυπηγική και τη Θαλάσσια Τεχνολογία*. Αθήνα.
- Κοτρίκλα, Ά. (2015). *ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ*. Αθήνα: ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ.
- Κυρτάτος, Ν. Π. (1993). *Ναυτικοί Κινητήρες Diesel, Θέματα σχεδίασης και λειτουργίας*. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- Ναυτικά Χρονικά. (2022). *Capital Gas: Προχωρά με την κατασκευή του πρώτου παγκοσμίως LCO₂ μεταφορικής ικανότητας 30.000 κ.μ.* Ανάκτηση από <https://www.naftikachronika.gr/2022/09/16/capital-gas-prochora-me-tin-kataskevi-tou-protou-pagkosmios-lco2-metaporikis-ikanotitas-30000-km/>
- Παπανικολάου, Α. Δ. (2009). *Μελέτη Πλοίου-Μεθοδολογίες Προμελέτης*. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ.
- Σπύρου, Κ. (2020). *Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου II, Σημειώσεις Διδάσκοντος και Πρόσθετο Βοηθητικό Υλικό*.
- Ψαράυτης, Χ. Ν. (2005). *Οικονομική Θαλάσσιων Μεταφορών I*. Αθήνα.

Παράρτημα Ι

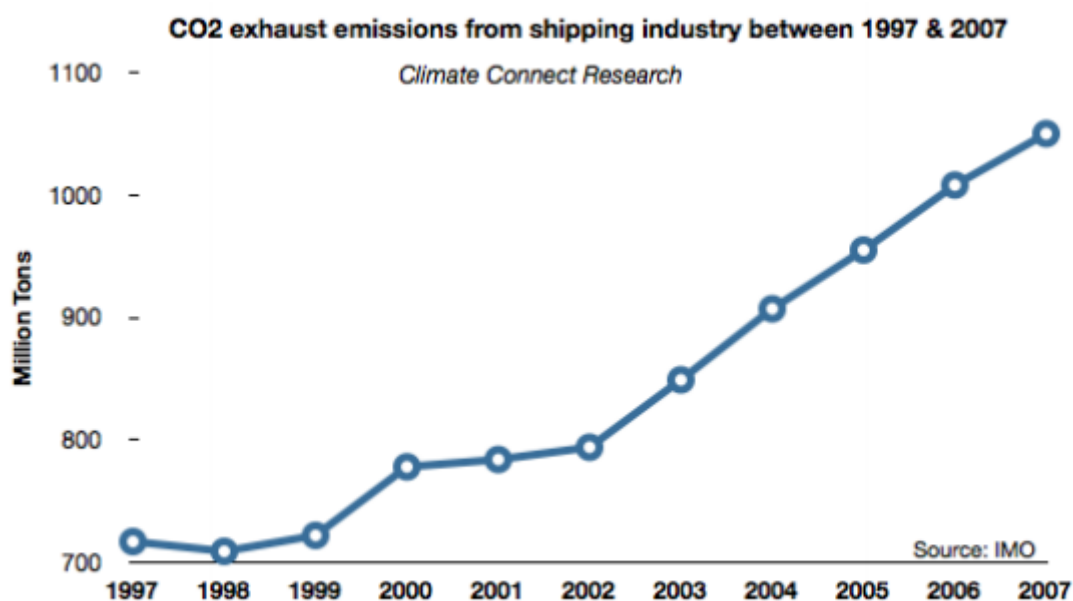
Στο παράρτημα Ι παρατίθενται μια σειρά από πίνακες και διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 2.

Πίνακας 42: Κύριες πηγές εκπομπών CO₂ και οι προληπτικές μέθοδοι τους. Πηγή: (Yoro & Daramola, 2020)

Sources	CO ₂ emission (billion Mt)	Proposed preventive option
<i>Anthropogenic/human sources</i>		
Fossil fuel combustion engines	392	CCSU
Cement production plants	113	CCSU
Power generation (coal-fired power plants)	279	CCSU, integration to methanol plant
Transportation	191	Blending fuels with biomass
Industrial manufacturing	178	CCSU
Land use changes	13	–
<i>Nonanthropogenic/natural sources</i>		
Plant, animal, and human respiration	7	–
Ocean-atmosphere exchange	7	–
Soil respiration and decomposition	1.54	–
Volcanic eruptions	0.15	–



Εικόνα 38: Επικαιροποιημένες παγκόσμιες εκπομπές CO₂ ανά τομέα το 2019. Πηγή: (Yoro & Daramola, 2020)



Διάγραμμα 85: Εκλούμενες εκπομπές CO₂ από την ναυτιλία, τη δεκαετία 1997-2007. Πηγή: (Σπύρου, 2020)

Πίνακας 43: Συντελεστές μείωσης δείκτη EEDI. Πηγή: (Σπύρου, 2020)

Ship Type	Size	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Jan 2025 and onwards
Bulk carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Gas carrier	10,000 DWT and above	0	10	20	30
	2,000 – 10,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Tanker	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	4,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Container ship	15,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 – 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*

Ship Type	Size	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Jan 2025 and onwards
General Cargo ships	15,000 DWT and above	0	10	15	30
	3,000 – 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-15*	0-30*
Refrigerated cargo carrier	5,000 DWT and above	0	10	15	30
	3,000 – 5,000 DWT	n/a	0-10*	0-15*	0-30*
Combination carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	4,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*

Πίνακας 44: Συντελεστές γραμμής αναφοράς EEDI, Πηγή: (Σπύρου, 2020)

Ship type defined in regulation 2	a	b	c
2.25 Bulk carrier	961.79	DWT of the ship	0.477
2.26 Gas carrier	1120.00	DWT of the ship	0.456
2.27 Tanker	1218.80	DWT of the ship	0.488
2.28 Container ship	174.22	DWT of the ship	0.201
2.29 General cargo ship	107.48	DWT of the ship	0.216
2.30 Refrigerated cargo carrier	227.01	DWT of the ship	0.244
2.31 Combination carrier	1219.00	DWT of the ship	0.488

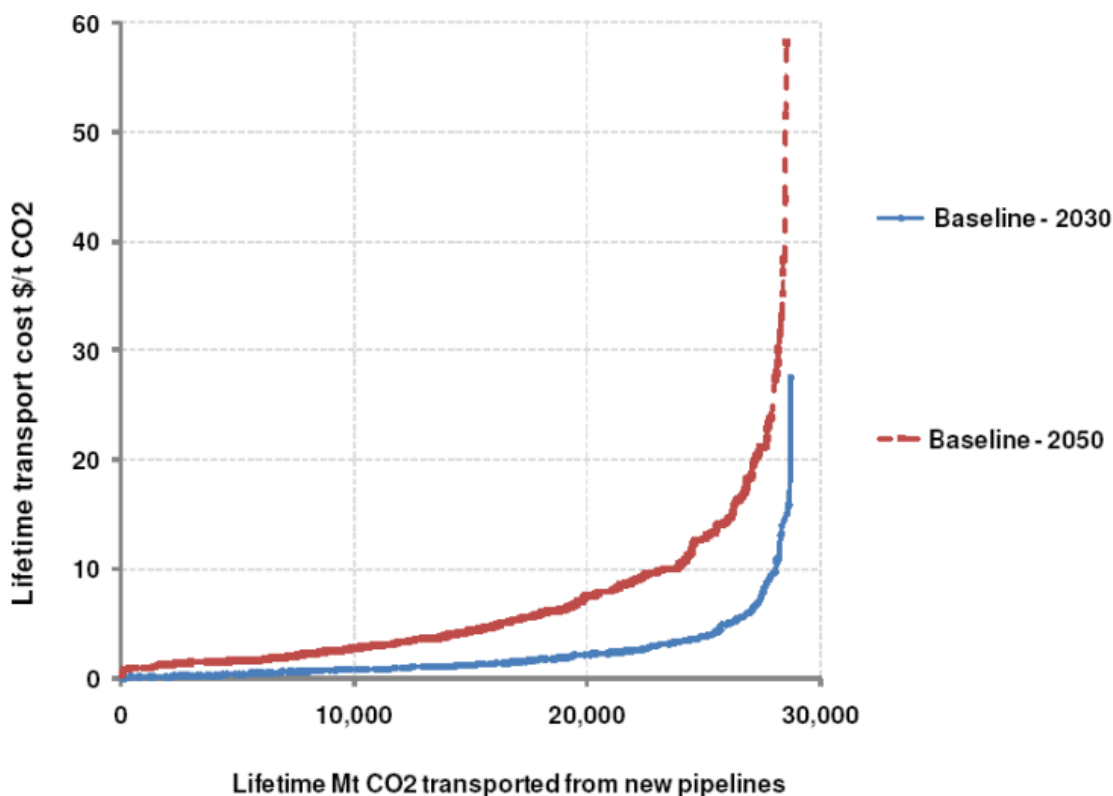
Πίνακας 45: Επιτρεπόμενα όρια εκπομπής SO_x κατά MARPOL. Πηγή: (Σπύρου, 2020)

Ημερομηνία υποχρεωτικής Εφαρμογής	Όριο περιεχομένου θείου στο καύσιμο (% m/m)	
	SO _x εντός ECA (SECA)	Sox παγκόσμιο
2000	1,5%	4,5%
07.2010	1,0%	
2012	0,1%	3,5%
2015		0,5%
2020*		

* Αρχικά είχε δοθεί η προοπτική να μετατεθεί στο 2025 – τελικά παρέμεινε το 2020

Παράρτημα II

Στο παράρτημα II παρατίθενται μια σειρά από πίνακες και διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 3.



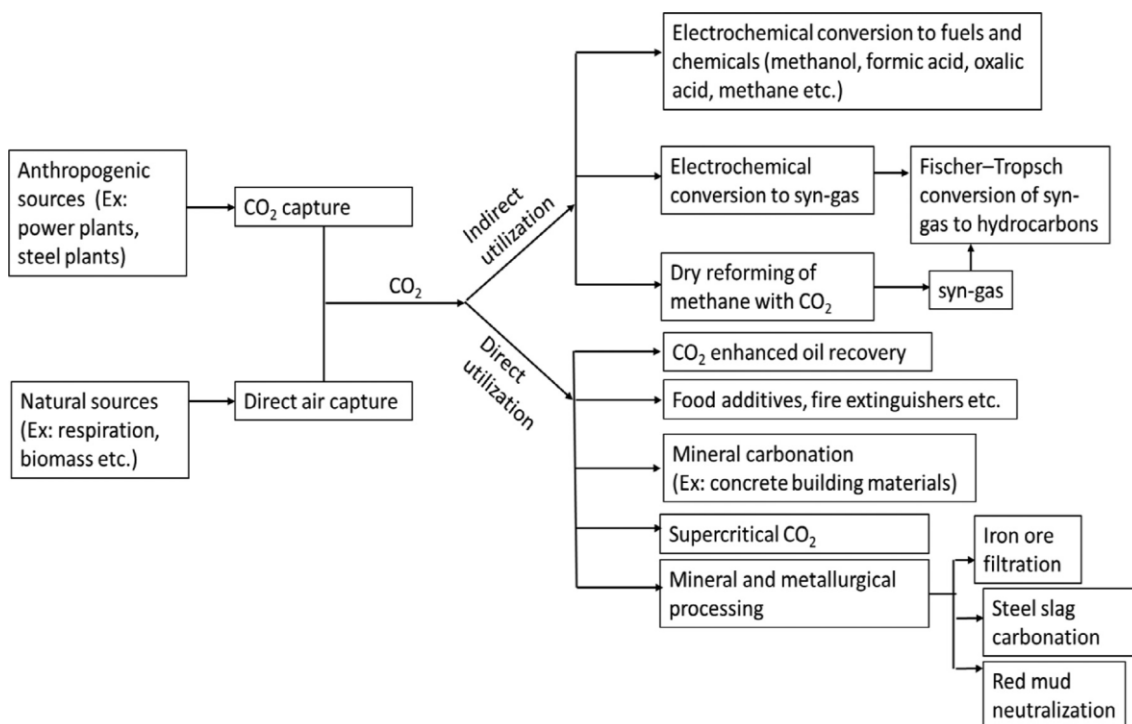
Διάγραμμα 86: Παγκόσμιες καμπύλες οριακού κόστους (για την μεταφορά του CO₂) για νέους αγωγούς το 2030 και νέους αγωγούς το 2050. Κάθε σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στη μεταφερόμενη ποσότητα CO₂ για ένα σημείο εκπομπής που συνδέεται με ένα σημείο αποθήκευσης. Πηγή: (IEAGHG, 2010)

Πίνακας 46: Συντελεστές συσχέτισης κόστους κατασκευής δικτύου αγωγών μεταφοράς CO₂, ανάλογα με το περιβάλλον ανάπτυξης του δικτύου. Πηγή: (IEAGHG, 2010)

Terrain	Cost multiplier
Flat open countryside	1
Mountainous	2.5
Desert	1.3
Forest	3
Offshore (up to 500 m water depth)	1.6
Offshore (above 500 m water depth)	2.7

Παράρτημα III

Στο παράρτημα III παρατίθενται μια σειρά από πίνακες και διαγράμματα που αφορούν στην δέσμευση και επαναχρησιμοποίηση του δεσμευμένου CO₂.



Σχήμα 3: Επισκόπηση των πιθανών χρήσεων του CO₂ στο πλαίσιο της τεχνολογίας CCUS. Πηγή: (Valluri, Claremboux, & Kawatra, 2022)

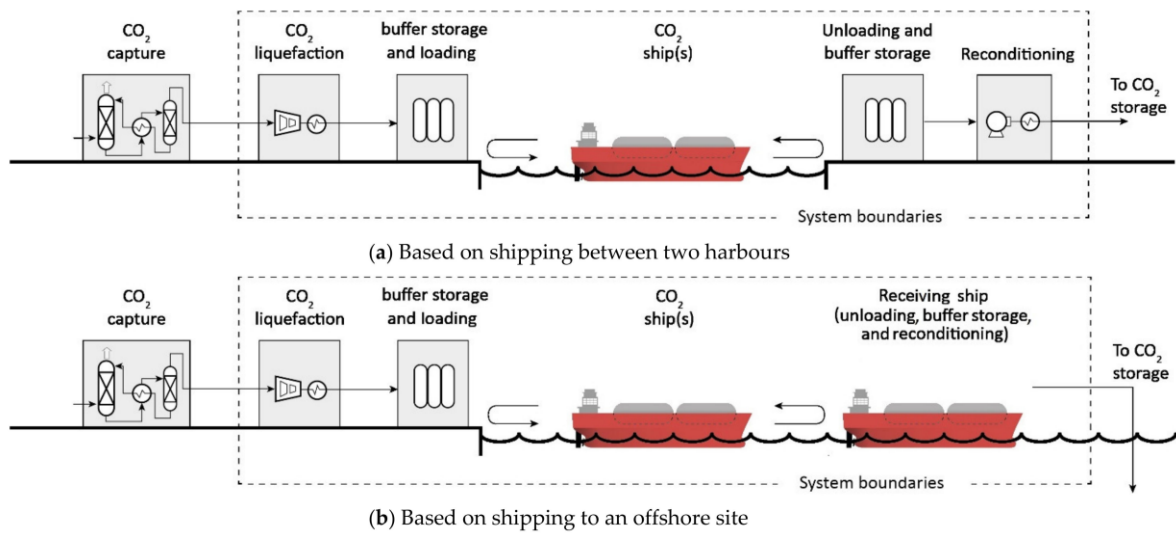
Πίνακας 47: Κυριότερες χρήσεις του δεσμευμένου CO₂. Πηγή: (Koysoumpa, Bergins, & Kakaras, 2018)

Τομέας	Διαδικασία/Προϊόν	Προοπτική
Βιομηχανίες χημικών και καυσίμων	Ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR)	Υψηλή
	Ενισχυμένη ανάκτηση φυσικού αερίου (EGR)	
	Ενισχυμένη ανάκτηση μεθανίου από στρώματα άνθρακα (ECBM)	
	Διέγερση πετρελαίου και φυσικού αερίου	
	Παραγωγή Ουρίας	
	Επεξεργασία πολυμερών	
	Παραγωγή χημικών και καυσίμων (Μεθανόλη, Μεθάνιο, Λιπάσματα κ.α)	
	Μέτρια	

Βιομηχανία Τροφίμων	Ενανθράκωση ποτών	
	Αποκαφεΐνωση του καφέ	
	Παραγωγή κρασιού	
	Επεξεργασία τροφίμων	
	Συντήρηση τροφίμων	
	Συσκευασίες τροφίμων	
	Παραγωγή ξηρού πάγου	
	Ψύξη	
Τσιμεντοβιομηχανία	Παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου και μαγνησίου για χρήση σε τσιμέντο	Μέτρια
	Σκλήρυνση σκυροδέματος με CO ₂	
	Επεξεργασία υπολειμμάτων βωξίτη	
Ενεργειακές καλλιέργειες	Καλλιέργεια φυκιών (παραγωγή βιομάζας μέσω της φωτοσύνθεσης)	Μέτρια
Φαρμακοβιομηχανία	Χημικές συνθέσεις	Χαμηλή
	Μεταφορά προϊόντων	
Χαλυβουργία	Έγχυση CO ₂ σε χύτευση μετάλλων	Χαμηλή
	CO ₂ ως ψυκτικό μέσο	
Άλλα	Συγκολλήσεις (ως αδρανές ή ημιαδρανές αέριο-Shield Gas)	Χαμηλή
	Χρήση CO ₂ σε πυροσβεστήρες	
	Γλυκαντικά, αρωματικές ουσίες	
	Προωστικό δοχείων αερολύματος	
	Αδρανές αέριο	
	Μαγειρική σόδα	
	Παραγωγή ανθρακικού νατρίου για την βιομηχανία γυαλιού	
	Στεγνό καθάρισμα ρούχων	
	Επεξεργασία νερού	
	Ψυκτικό αέριο	

Παράρτημα IV

Στο παράρτημα IV, παρατίθενται μια σειρά από πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της τεχνο-οικονομικής μελέτης, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6.



Εικόνα 39: Απεικόνιση των σταδίων μιας αλυσίδας CCS στην οποία το δεσμευμένο CO₂ μεταφέρεται διά θαλάσσης. Πηγή: (Roussanaly, Deng, Skaugen, & Gundersen, 2021)

Πίνακας 48: Συγκεντρωτικός πίνακας του κόστους υγροποίησης 1 MtCO₂/έτος για διάφορα σενάρια καθαρότητας του CO₂. Στα παρακάτω κόστη θεωρήθηκε ότι το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος ανέρχεται σε 80€/MWh. Πηγή: (Roussanaly, Deng, Skaugen, & Gundersen, 2021)

CO ₂ Purity Scenario	Targeted Transport Pressure	CO ₂ Condition after Liquefaction			Specific Energy Consumption	CO ₂ Liquefaction Cost				
		Purity	Recovery Rate ^a	Density		CAPEX	Fixed OPEX	Variable OPEX ^b	Impurity Removal	Total
Pure CO ₂ (base case)	7	100	100	1150	96.3	4.2	2.5	8.3	-	14.9
	15	100	100	1060	90.4	4.0	2.3	7.8	-	14.0
Inland emitter scenarios	7	100	100	1150	17.4	1.5	0.9	1.6	-	4.0
	15	100	100	1060	9	1.3	0.8	0.9	-	3.0
Scenario impurity 1	7	99.92	97.9	1189	103.4	4.6	2.7	8.9	0.3	16.5
	15	99.85	98.4	1094	94.6	4.3	2.5	8.1	0.0	14.9
Scenario impurity 2	7	99.74	96.1	1204	121.8	4.9	2.9	10.3	1.7	19.7
	15	99.00	97.4	1143	112.4	4.9	2.9	9.5	1.1	18.3
Scenario impurity 3	7	99.30	97.4	1158	112.6	4.6	2.7	9.6	1.3	18.1
	15	99.00	98.0	1093	105.0	4.5	2.7	9.0	1.0	17.2
Scenario purity 1	7	99.74	96.1	1204	121.8	4.9	2.9	10.3	1.7	19.7
	15	99.00	97.4	1143	112.4	4.9	2.9	9.5	1.1	18.3
Scenario purity 2	7	99.93	99.6	1190	103.7	4.8	2.8	8.8	6.4	22.8
	15	99.91	99.6	1091	93.7	4.5	2.6	8.0	6.3	21.4

Πίνακας 49: Οικονομικά στοιχεία που αφορούν στο CAPEX και OPEX, καθώς και η ειδική κατανάλωση καυσίμου, συναρτήσει της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου. Πηγή: (Roussanaly, Deng, Skaugen, & Gundersen, 2021)

Ship Capacity ^a	CAPEX ^{b,c}		Fixed OPEX ^d		Specific Fuel Consumption
	7 Barg	15 Barg	7 Barg	15 Barg	
ktCO ₂ /Ship	M€/Ship	M€/Ship	M€/Ship/year	M€/Ship/year	g _{fuel} /tCO ₂ /km
2.5	16.2	35.4	0.81	1.77	7.07
5	23.5	50	1.18	2.5	6.97
7.5	29.2	61.2	1.46	3.06	6.87
10	34.1	70.6	1.71	3.53	6.77
12.5	38.4	78.9	1.92	3.95	6.67
15	42.4	86.4	2.12	4.32	6.58
20	49.4	99.7	2.47	4.99	6.38
25	55.7	111.5	2.79	5.58	6.18
30	61.5	122.1	3.08	6.11	5.98
35	66.8	131.8	3.34	6.59	5.78
40	71.7	140.9	3.59	7.05	5.59
45	76.4	149.4	3.82	7.47	5.39
50	80.9	157.5	4.05	7.88	5.19
60	89.2	172.4	4.46	8.62	4.79
70	96.9	186.2	4.85	9.31	4.40
80	104.1	199	5.21	9.95	4.00
90	110.9	211	5.55	10.6	3.61
100	117.3	222.4	5.87	11.1	3.21

Πίνακας 50: Κόστη υγροποίησης του δεσμευμένου CO₂. Πηγή: (Element Energy, 2018)

Reference	Transport pressure	Inlet pressure (bar)	Flow rate (Mtpa)	CAPEX (£m)	Specific CAPEX (£/(tCO ₂ /a))	Fixed OPEX/y (% of CAPEX)	Energy (kWh/tCO ₂)
Oi et al, 2016 - 1	Low P	2	1.1	18.4	16.8	N/A	80.3
Oi et al, 2016 - 2	Low P	2	1.1	19.1	17.4	N/A	80.2
Oi et al, 2016 - 3	Low P	2	1.1	23.1	21.1	N/A	143.2
Oi et al, 2016 - 4	Low P	2	1.1	22.6	20.6	N/A	87.0
Seo et al, 2016 - 1	Low P	1.8	1	21.3	21.3	N/A	130.5
Seo et al, 2016 -2	Med P	1.8	1	16.6	16.6	N/A	104
Seo et al, 2016 - 3	High P	1.8	1	10.6	10.6	N/A	88
Yoo et al, 2013 - 1	Low P	1	10	N/A	N/A	N/A	106.3
TelTek, 2014 - 1	Low P	70	0.8	6.3	7.9	N/A	N/A
TelTek, 2014 - 2	Low P	70	0.8	9.9	12.4	N/A	N/A
CO2Europipe, 2011	Low P	75	3	27.2	9.1	10%	42
Yoo et al, 2013 - 2	Low P	100	10	N/A	N/A	N/A	17.3
Mitsubishi Heavy Industries, 2004	Low P	100	6.2	23.7	3.8	5%	14.4

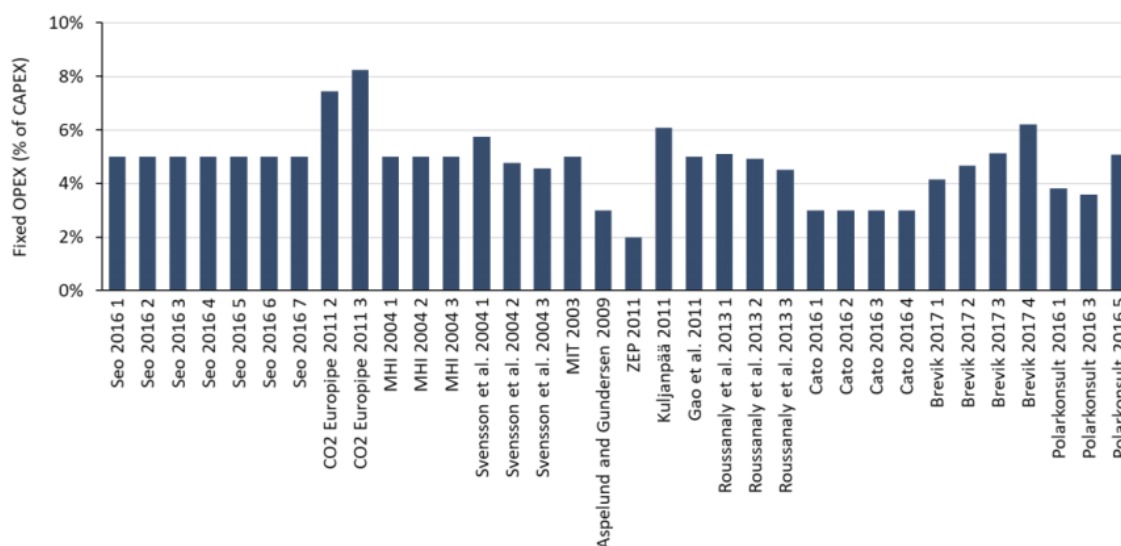
Πίνακας 51: Κόστη για την αποθήκευση του υγροποιημένου CO₂, μετά από την υγροποίηση του. Πηγή: (Element Energy, 2018)

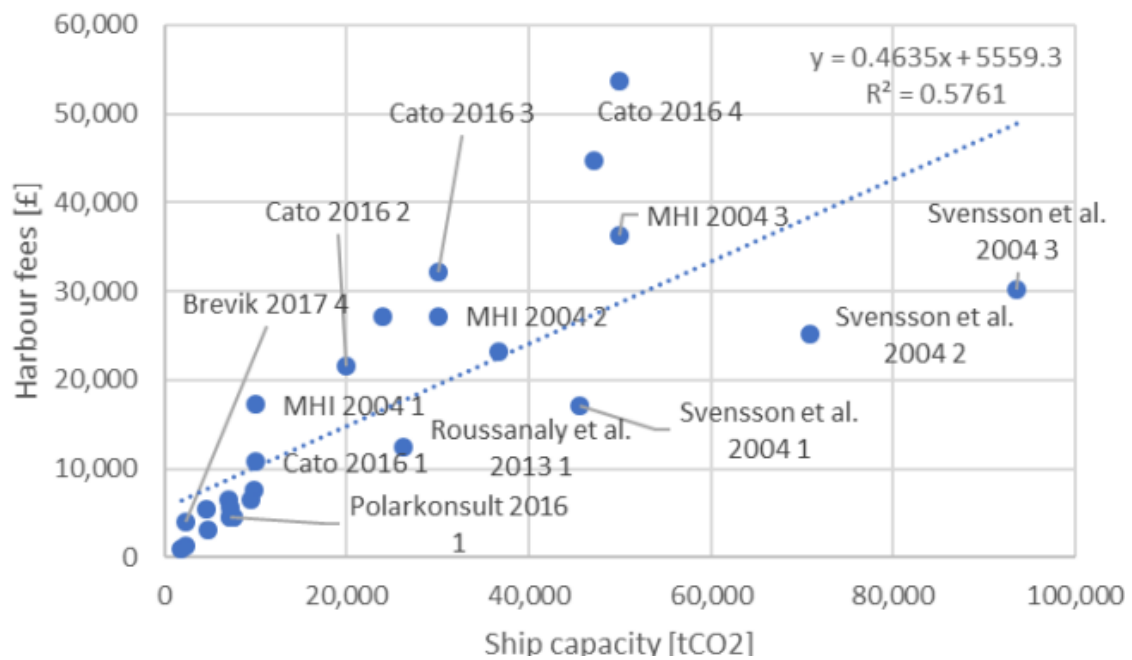
Datapoint reference	Transport pressure	Capacity (tCO ₂)	CAPEX (£m)	Specific CAPEX (£/tCO ₂)	OPEX/y (% of CAPEX)
Seo et al., 2016 - 1	Low P	12,310	5.9	482	5%
Seo et al., 2016 - 2	Med P	12,310	9.8	795	5%
Seo et al., 2016 - 3	High P	12,310	37.8	3,073	5%
TelTek, 2014 - 1	Low P	14,285	12.3	550	5%

Πίνακας 52: Κόστη για τις υποδομές που χρειάζονται για την φόρτωση του φορτίου. Πηγή: (Element Energy, 2018)

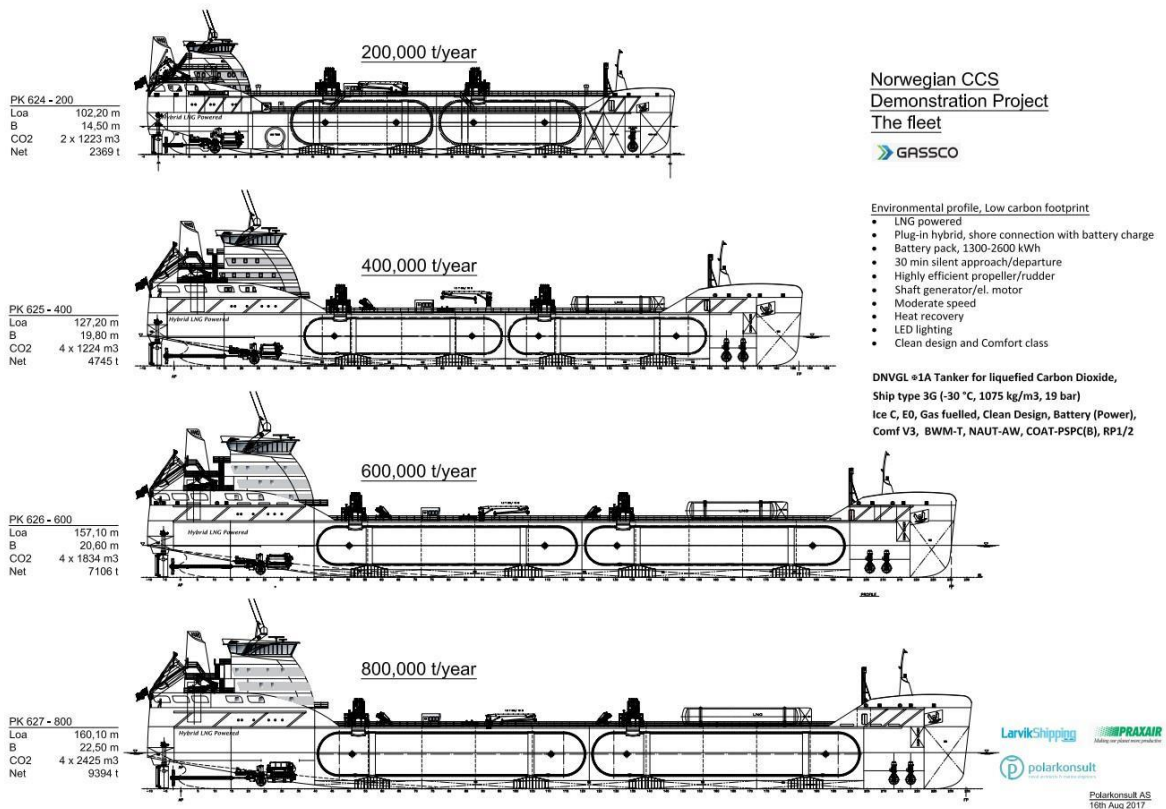
Datapoint reference	Flow rate (Mtpa)	CAPEX (£m)	Specific CAPEX (£/(tCO ₂ /a))	OPEX/a (% of CAPEX)
CO2 Europipe, 2011	3	8.4	2.80	2%
MHI, 2004	6.2	6.3	1.02	25%
MIT, 2003	8.1	57.0	7.03	2%
Aspelund and Gundersen, 2009	10	4.6	0.46	1%
Kuljanpää, 2011	3	2.6	0.88	1%
TelTEK, 2014 - 1	0.8	0.9	1.07	5%
TelTEK, 2014 - 2	0.8	1.3	1.68	4%

Πίνακας 53: OPEX συναρτήσει του CAPEX για την λειτουργία του LCO₂ carrier, βάσει διάφορων μελετών. Πηγή: (Element Energy, 2018)

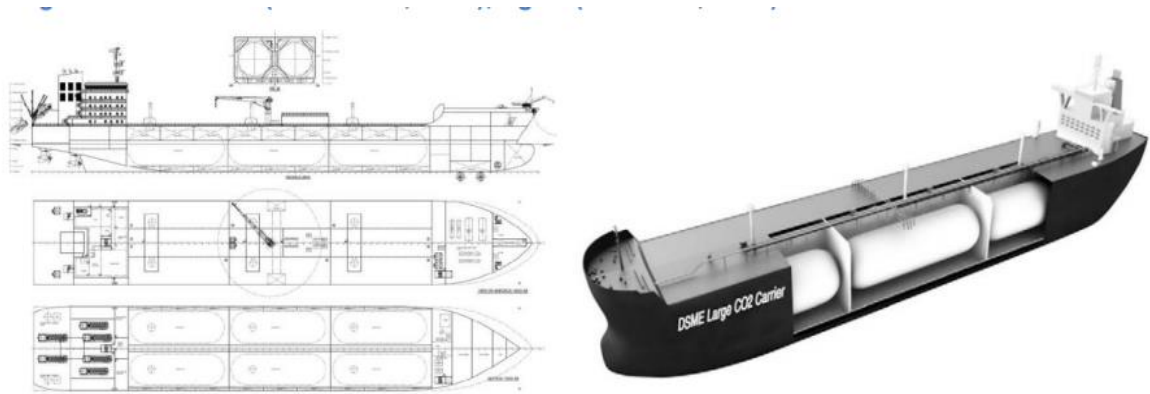




Διάγραμμα 87: Εκτίμηση των λιμενικών τελών ανά κυκλικό ταξίδι βάσει διαφόρων μελετών. Πηγή: (Element Energy, 2018)



Εικόνα 40: Διάφορα προτεινόμενα σχέδια πλοίων υγροποιημένου CO2. Πηγή: (Element Energy, 2018)



Εικόνα 41: Προτεινόμενα σχέδια πλοίων για μεταφορά υγροποιημένου CO₂ σε χαμηλή πίεση, βάσει των σχεδίων υπαρχόντων LPG carriers. Πηγή: (Element Energy, 2018)



Εικόνα 42: Προτεινόμενοι σχεδιασμοί πλοίων για την μεταφορά υγροποιημένου CO₂, μεταφορική ικανότητας 12310 tCO₂ (αριστερά) και 105.000 tCO₂ (δεξιά). Πηγή: (Element Energy, 2018)