



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Μελέτης Πλοίου και Θαλασίων
Μεταφορών

**Βελτιστοποίηση του Λειτουργικού Κόστους
Στόλου Πλοίων Μεταφοράς ΥΦΑ με την Χρήση Εξελικτικών
Αλγορίθμων**

Διπλωματική εργασία

του φοιτητή

Παναγιώτη Κουσουλού Μπαϊράμη

Επιβλέπων: Δημήτριος Β. Λυρίδης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

Περίληψη

Το φυσικό αέριο αποτελεί το βασικό καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας με τρόπο φιλικότερο προς το περιβάλλον. Η αγορά LNG παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια μεγάλη ανάπτυξη με ολοένα και περισσότερους σταθμούς επαναεριοποίησης να κατασκευάζονται σε όλο τον κόσμο και νέα πλοία μεταφοράς LNG να χτίζονται προκειμένου να καλύψουν την ζήτηση για μεταφορά του φυσικού αερίου.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εξετάζεται η θαλάσσια μεταφορά LNG από την σκοπιά του πλοιοκτήτη. Μια σειρά από τερματικούς σταθμούς υγροποίησης και επαναεριοποίησης επιλέγονται να εξυπηρετηθούν από τον διαθέσιμο ετερογενή στόλο για την κάλυψη της ζήτησης τους. Βασικός στόχος είναι η δημιουργία ενός εργαλείου που θα βοηθάει στην λήψη αποφάσεων επάνω στο θέμα της ανάθεσης του στόλου σε συμβόλαια μικρής διάρκειας με το μικρότερο λειτουργικό κόστος. Προκειμένου να γίνει αυτό, γίνεται η μοντελοποίηση σε πρόβλημα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού που στην συνέχεια επιλύεται με την χρήση του κώδικα που δημιουργείται και περιλαμβάνει την χρήση γενετικού αλγόριθμου.

Με στόχο το λειτουργικό κόστος που υπολογίζεται να είναι ρεαλιστικό, γίνεται η καταγραφή της σημερινής κατάστασης πολλών παραγόντων της ναυτιλίας LNG που το επηρεάζουν. Με βάση τα στοιχεία που συλλέγονται, κατασκευάζονται 4 σενάρια για την εφαρμογή του αλγορίθμου. Τα σενάρια αυτά παρέχουν στον αλγόριθμο όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος και διαμορφώνονται έτσι ώστε να παρέχουν πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα και την ταχύτητα του κώδικα. Επιπλέον, γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας της τιμής των καυσίμων για να φανεί πως επηρεάζει το λειτουργικό κόστος και την επιλογή ανάθεσης του στόλου. Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη CII που αντιστοιχεί σε κάθε πλοίο του στόλου για την λύση που παράγεται από τον αλγόριθμο.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στο να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη εργασία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον καθηγητή μου, Δημήτριο Β. Λυρίδη, για την επίβλεψη, την καθοδήγηση και τις κατατοπιστικές συμβουλές του.

Επίσης, ευχαριστώ για την άψογη συνεργασία τον υποψήφιο διδάκτορα Χρήστο Παπαλεωνίδα. Η βοήθεια του ήταν πολύ πολύτιμη σε όλα τα στάδια υλοποίησής της εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Ευχαριστίες.....	3
Εικόνες.....	7
Πίνακες.....	10
1 Εισαγωγή.....	12
1.1 Στάδια εφοδιαστικής αλυσίδας LNG.....	13
1.1.1 Υγροποίηση.....	13
1.1.2 Μεταφορά.....	15
1.1.3 Επαναεριοποίηση.....	24
1.1.4 Διαδικασία φόρτωσης και εκφόρτωσης.....	26
1.2 Ανάλυση λειτουργικού κόστους.....	28
1.2.1 Έξοδα της καθημερινής δραστηριότητας του πλοίου.....	30
1.2.2 Έξοδα της προγραμματισμένης συντήρησης του πλοίου.....	31
1.2.3 Έξοδα ταξιδιού.....	31
1.3 Συμμόρφωση με την περιβαλλοντική νομοθεσία.....	33
1.3.1 Περιβαλλοντικοί κανόνες στην ναυτιλία.....	33
1.3.2 Λύσεις με σκοπό την συμμόρφωση στους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και επίδραση στο κόστος.....	35
2 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	39
2.1 Γραμμικός προγραμματισμός.....	39
2.1.1 Ακέραιος-Δυαδικός Γραμμικός Προγραμματισμός.....	40
2.2 Γενετικοί αλγόριθμοι.....	40
3 Ανασκόπηση σχετικής επιστημονικής βιβλιογραφίας.....	43
4 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης.....	47
4.1 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	47
4.2 Περιγραφή του αλγορίθμου.....	48
4.2.1 Παράμετροι του προβλήματος.....	49
4.2.2 Χαρακτηριστική συνάρτηση.....	52
4.2.3 Περιορισμοί.....	53
5 Μελέτη Περίπτωσης.....	55
5.1 Δημιουργία σεναρίων.....	55
5.2 Επίλυση σεναρίων.....	66
5.2.1 Σενάριο 1.....	66
5.2.2 Σενάριο 2.....	74

5.2.3	Σενάριο 3	83
5.2.4	Σενάριο 4	92
6	Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα	103
	Βιβλιογραφία.....	106
	Παράθεμα.....	110

Εικόνες

Εικόνα 1 Διαδικασία υγροποίησης LNG	14
Εικόνα 2 Εξαγωγές LNG ανά χώρα	15
Εικόνα 3 Κατανομή πλοίων βάση χωρητικότητας	17
Εικόνα 4 Σφαιρικές δεξαμενές τύπου Moss	18
Εικόνα 5 Δεξαμενή μεμβρανικού τύπου	19
Εικόνα 6 Διάταξη μηχανής DFDE	20
Εικόνα 7 Διάταξη μηχανής ME-GI	21
Εικόνα 8 Διάταξη μηχανής X-DF	22
Εικόνα 9 Τύπος προωστήριας εγκατάστασης ανά ηλικία πλοίου	22
Εικόνα 10 Προσομοίωση μεμβρανικού τύπου δεξαμενής, γεμισμένη στο 98,5 %, όταν το πλοίο έχει πάρει κλίση 17 deg	23
Εικόνα 11 Χωρητικότητα επαναεριοποίησης LNG ανά αγορά.....	26
Εικόνα 12 Εξέλιξη των τιμών των καυσίμων στην ναυτιλία από το 1990 μέχρι το 2023 στο λιμάνι του Rotterdam	32
Εικόνα 13 Propeller Boss Can Fins	37
Εικόνα 14 Σύγκλιση των λύσεων μετά από 60,80,95,100 γενιές	42
Εικόνα 15 Σχηματική αναπαράσταση των τρόπων παραγωγής απογόνων	42
Εικόνα 16 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=800 US\$.....	68
Εικόνα 17 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=400 US\$.....	68
Εικόνα 18 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1200 US\$.....	69
Εικόνα 19 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1600 US\$.....	69
Εικόνα 20 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2000 US\$.....	70
Εικόνα 21 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2400 US\$.....	70
Εικόνα 22 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2800 US\$.....	71
Εικόνα 23 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3200 US\$.....	71
Εικόνα 24 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3600 US\$.....	72
Εικόνα 25 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4000 US\$.....	72
Εικόνα 26 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4400 US\$.....	73
Εικόνα 27 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=400 US\$.....	77
Εικόνα 28 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=800 US\$.....	77
Εικόνα 29 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1200 US\$.....	78

Εικόνα 54 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1600 US\$	99
Εικόνα 55 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2000 US\$	99
Εικόνα 56 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2400 US\$	100
Εικόνα 57 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2800 US\$	100
Εικόνα 58 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3200 US\$	101
Εικόνα 59 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3600 US\$	101
Εικόνα 60 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4000 US\$	102
Εικόνα 61 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4400 US\$	102

Πίνακες

Πίνακας 1 Σύγκριση Κόστους Αρχικού Κεφαλαίου Παράκτιας με Πλωτή μονάδα	25
Πίνακας 2 Συντελεστής μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO ₂	34
Πίνακας 3 Κατάταξη των τεχνικών Post-Combustion ως προς το κόστος, τον βαθμό απορρόφησης και το στάδιο έρευνας	38
Πίνακας 4 Στοιχεία σταθμών επαναεριοποίησης	57
Πίνακας 5 Στοιχεία για τους σταθμούς υγροποίησης	58
Πίνακας 6 Αποστάσεις μεταξύ των τερματικών σταθμών υγροποίησης και επαναεριοποίησης	59
Πίνακας 7 Δείκτης προσδιορισμού καναλιού	59
Πίνακας 8 Τύποι πλοίων	60
Πίνακας 9 Ετήσιο σταθερό κόστος ανά τύπο πλοίου	61
Πίνακας 10 Κατανάλωση καυσίμου ανά τύπο πλοίου	61
Πίνακας 11 Διαστάσεις που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των Canal Costs	62
Πίνακας 12 Κόστος διέλευσης έμφορτου πλοίου τύπου 1 από το Σουέζ	63
Πίνακας 13 Κόστος διέλευσης άφορτου πλοίου τύπου 1 από το Σουέζ.....	63
Πίνακας 14 Κόστος διέλευσης πλοίου τύπου 1 από τον Παναμά	64
Πίνακας 15 Κόστος διέλευσης από το κανάλι του Παναμά και του Σουέζ για κάθε τύπο πλοίου	64
Πίνακας 16 Απόσταση της αρχικής θέσης κάθε πλοίου από τον κάθε τερματικό σταθμό υγροποίησης	65
Πίνακας 17 Κατανάλωση συστημάτων επανυγροποίησης ανά τύπο πλοίου.....	66
Πίνακας 18 Χαρακτηριστικά συμβολαίων σεναρίου 1.....	66
Πίνακας 19 Σύσταση πληθυσμού σεναρίου 1.....	67
Πίνακας 20 Βέλτιστη κατανομή για το σενάριο 1	67
Πίνακας 21 Σενάριο 1 - Δείκτης CII για τα 5 πλοία του στόλου	73
Πίνακας 22 Χαρακτηριστικά συμβολαίων σεναρίου 2.....	74
Πίνακας 23 Σύσταση πληθυσμού σεναρίου 2.....	74
Πίνακας 24 Βέλτιστη κατανομή για τους συνδυασμούς 1 έως 11 του σεναρίου 2	75
Πίνακας 25 Βέλτιστη κατανομή για τους συνδυασμούς 12 έως 22 του σεναρίου 2	75
Πίνακας 26 Κατανομή α	76
Πίνακας 27 Κατανομή β.....	76
Πίνακας 28 Χαρακτηριστικά συμβολαίων σεναρίου 3.....	83
Πίνακας 29 Σύσταση πληθυσμού πρώτου τρόπου-σενάριο 3.....	84
Πίνακας 30 Σύσταση πληθυσμού δεύτερου τρόπου-σενάριο 3.....	84
Πίνακας 31 Βέλτιστη κατανομή σεναρίου 3.....	85
Πίνακας 32 Χαρακτηριστικά συμβολαίων σεναρίου 4.....	92
Πίνακας 33 Σύσταση πληθυσμού πρώτου τρόπου-σενάριο 4.....	93
Πίνακας 34 Σύσταση πληθυσμού δεύτερου τρόπου-σενάριο 4.....	93
Πίνακας 35 Συχνότερη κατανομή για τους συνδυασμούς 1 έως 33 του σεναρίου 4	94
Πίνακας 36 Συχνότερη κατανομή για τους συνδυασμούς 34 έως 121 του σεναρίου 4	94
Πίνακας 37 Βέλτιστη κατανομή για τους συνδυασμούς 34 έως 121 του σεναρίου 4	95
Πίνακας 38 Συνδυασμοί τιμών καυσίμων	112
Πίνακας 39 Συνολικό λειτουργικό κόστος και Funcount για κάθε συνδυασμό τιμών καυσίμου του σεναρίου 1	115
Πίνακας 40 Συνολικό λειτουργικό κόστος και Funcount για κάθε συνδυασμό τιμών καυσίμου του σεναρίου 2	118

Πίνακας 41 Συνολικό λειτουργικό κόστος και Funccount των δύο τρόπων επίλυσης για κάθε συνδυασμό τιμών καυσίμου του σεναρίου 3	121
Πίνακας 42 Συνολικό λειτουργικό κόστος και Funccount των δύο τρόπων επίλυσης για κάθε συνδυασμό τιμών καυσίμου του σεναρίου 3	124

1 Εισαγωγή

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas-LNG) έχει εδραιωθεί ως ένα πολύ βασικό καύσιμο στην ενεργειακή βιομηχανία καλύπτοντας το 25% της παγκόσμιας ζήτησης σε ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρισμού, θέρμανσης καθώς και ως καύσιμο στις μετακινήσεις [6]. Τα επόμενα χρόνια το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί αφού εκτιμάται πως το LNG αποτελεί το καύσιμο για την ενεργειακή μετάβαση προς εναλλακτικά καύσιμα με μηδενικό αποτύπωμα ρύπων καθώς σε σύγκριση με άλλα ορυκτά καύσιμα θεωρείται καθαρότερο, εκπέμποντας λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου και ρυπογόνα αέρια. Η παραγωγή φυσικού αερίου αδυνατεί να καλύψει την αύξηση της ζήτησης του, γεγονός που οδηγεί σε αυξήσεις στην τιμή του. Παράλληλα η ενεργειακή κρίση εξαιτίας του πολέμου στην Ουκρανία εκτόξευσε την τιμή του ακόμα περισσότερο, αναδεικνύοντας την σημασία του ως σταθεροποιητικό παράγοντα για την οικονομία και την ενεργειακή βιωσιμότητα των χωρών.

Η ναυτιλία LNG έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της παγκόσμιας ενεργειακής βιομηχανίας, διευκολύνοντας τη μεταφορά φυσικού αερίου σε μεγάλες αποστάσεις, αφαιρώντας το στοιχείο κινδύνου που υπάρχει στην μεταφορά αερίου με αγωγό σε περίπτωση γεωπολιτικών εντάσεων. Το μέλλον της φαίνεται πολύ υποσχόμενο, αφού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο να ικανοποιηθούν οι αυξανόμενες παγκόσμιες ανάγκες για αέριο. Η ανάπτυξη νέων εργοστασίων υγροποίησης φυσικού αερίου αναμένεται να συμβάλει στην αύξηση των εμπορικών δραστηριοτήτων. Παράλληλα, νέες τεχνολογίες, όπως οι πλωτές μονάδες αποθήκευσης και επαναεριοποίησης (Floating Storage and Regasification Units-FSRUs), ανοίγουν περαιτέρω προοπτικές για τη μεταφορά και χρήση του LNG σε περιοχές όπου οι μόνιμες υποδομές είναι ακόμα περιορισμένες.

Εξετάζοντας την σημερινή κατάσταση της ναυτιλίας LNG από την σκοπιά του πλοιοκτήτη δημιουργείται ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων για το πρόβλημα της ανάθεσης ενός στόλου LNG σε διαθέσιμα συμβόλαια μικρής διάρκειας. Λόγω της έλλειψης τέτοιων εργαλείων οι αποφάσεις έως και σήμερα λαμβάνονται εμπειρικά. Ένας πιο επιστημονικός τρόπος, όπως αυτός που προτείνεται, προσφέρει την δυνατότητα αξιοποίησης του περιθωρίου λάθους που οι εμπειρικές αποφάσεις περιέχουν μεγιστοποιώντας το κέρδος για τον πλοιοκτήτη.

Τα περιεχόμενα των κεφαλαίων αναλύονται ως εξής:

- Κεφάλαιο 1^ο: Περιγράφονται τα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας του LNG, γίνεται η επισκόπηση της ναυτιλιακής αγοράς και των κύριων τεχνολογιών που συναντώνται στα πλοία LNG. Επίσης αναλύεται το λειτουργικό κόστος των πλοίων και ο τρόπος που οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί το επηρεάζουν.
- Κεφάλαιο 2^ο: Γίνεται αναφορά στις έννοιες του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και του γεννητικού αλγορίθμου.
- Κεφάλαιο 3^ο: Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας.

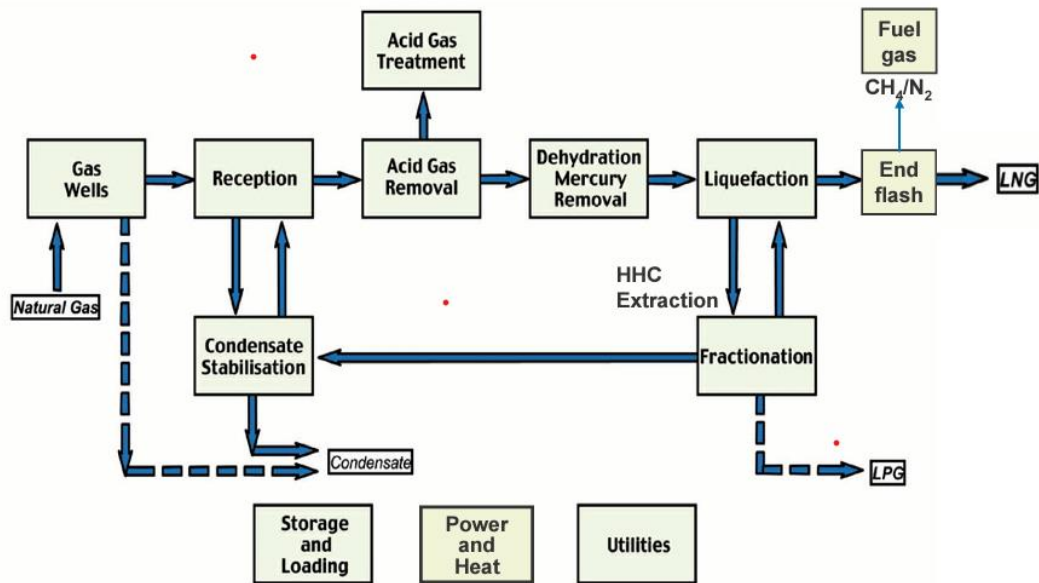
- Κεφάλαιο 4^ο: Αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται και περιγράφεται ο αλγόριθμος.
- Κεφάλαιο 5^ο: Κατασκευάζονται τα σενάρια προς επίλυση και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου.
- Κεφάλαιο 6^ο: Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της εργασίας καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

1.1 Στάδια εφοδιαστικής αλυσίδας LNG

Η εφοδιαστική αλυσίδα του LNG αναλύεται σε τρία βασικά στάδια, την υγροποίηση (upstream), την μεταφορά και την διανομή/επαναεριοποίηση (κατάντη-downstream). Αρχικά, το φυσικό αέριο εξορύσσεται και επεξεργάζεται με σκοπό τον καθαρισμό από ουσίες όπως νερό, διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια προκειμένου να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την χρήση του ως καύσιμο, ενώ στην συνέχεια υγροποιείται. Η υγροποίηση του φυσικού αερίου γίνεται σε θερμοκρασία $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ο τελικός όγκος που προκύπτει από την υγροποίηση είναι το 1/600 του αρχικού όγκου του αερίου, διευκολύνοντας έτσι την μεταφορά του. Στην συνέχεια, με υγραεριοφόρα πλοία LNG, που διαθέτουν προηγμένα συστήματα μόνωσης και τεχνολογίες διατήρησης των απαιτούμενων πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, μεταφέρεται σε κατάλληλους σταθμούς για να γίνει η επαναεριοποίηση. Η διαδικασία αυτή γίνεται με απόδοση θερμότητας στο LNG, προκαλώντας την εξάτμιση και τη μετατροπή του πίσω σε αέρια μορφή. Το αέριο LNG αντλείται μέσω αγωγών και διανέμεται στα συστήματα διανομής για χρήση σε διάφορους τομείς, όπως η ενέργεια και η θέρμανση [1],[2].

1.1.1 Υγροποίηση

Οι σταθμοί υγροποίησης LNG διακρίνονται σε δύο τύπους, τους χερσαίους ή παράκτιους (on-shore) και τους πλωτούς ή υπεράκτιους (Floating LNG-FLNG). Η δεύτερη κατηγορία χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευση υποθαλάσσιων κοιτασμάτων αερίου όπου η μεταφορά του αερίου στην στεριά μέσω σωλήνων είναι πολύ πιο κοστοβόρα. Οι βασικές λειτουργίες των σταθμών αυτών είναι ο καθαρισμός, η υγροποίηση και η αποθήκευση του LNG, ενώ διαθέτουν και εγκαταστάσεις φόρτωσης υγραεριοφόρων πλοίων. Στην εικόνα 1 γίνεται η διαγραμματική αναπαράσταση των λειτουργιών ενός σταθμού υγροποίησης.



Εικόνα 1 Διαδικασία υγροποίησης LNG [1]

Το στάδιο του καθαρισμού ξεκινάει με την απομάκρυνση των υδρογονανθράκων με πολλά άτομα άνθρακα στο μόριο τους που αποτελούν το λεγόμενο συμπύκνωμα που περιέχει κυρίως μόρια με πέντε άνθρακες και πάνω. Το προϊόν αυτό μπορεί να πουληθεί ξεχωριστά ή να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της εγκατάστασης.

Στην συνέχεια, γίνεται η απομάκρυνση των όξινων αερίων, όπως του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και του υδρόθειου (H_2S). Το CO_2 στερεοποιείται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από την θερμοκρασία υγροποίησης του LNG και επομένως πρέπει να αποβληθεί. Το υδρόθειο (H_2S) μετατρέπεται σε οξειδία του θείου SO_x τα οποία μπορούν να διαβρώσουν τον εξοπλισμό, ενώ παράλληλα μειώνει και τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Για την απομάκρυνση τους η πιο συνηθισμένη διεργασία που χρησιμοποιείται είναι η απορρόφηση με διαλύτη υδατικό διάλυμα αλκανολαμίνης. Οι τυπικές προδιαγραφές για το LNG σε ότι αφορά την περιεκτικότητα των όξινων αερίων είναι 50 ppm για το CO_2 και λιγότερο από 25 ppm για το H_2S . [5]

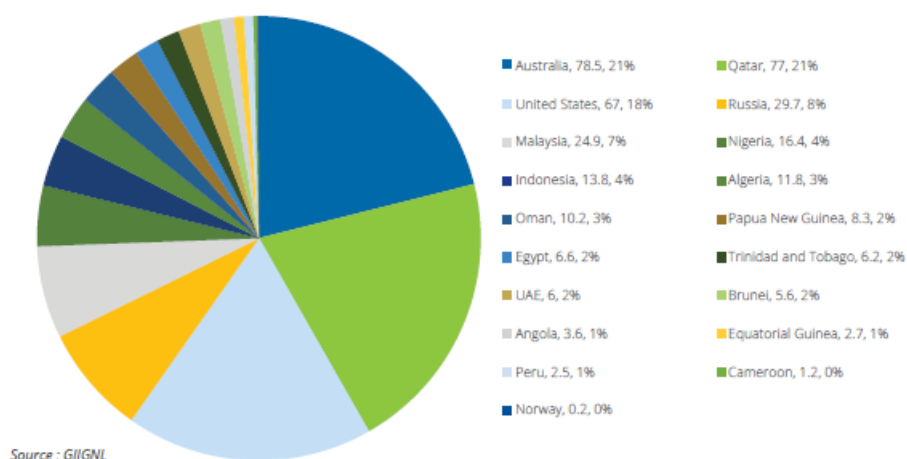
Το επόμενο στάδιο είναι η αφυδάτωση, δηλαδή η απομάκρυνση του νερού, αρχικά ψύχοντας το αέριο και έπειτα περνώντας το από μοριακό κόσκινο, συνήθως ζεόλιθου. Επιπλέον, αφαιρείται ο υδράργυρος που βρίσκεται σε μικρές ποσότητες και που μπορεί να διαβρώσει το εσωτερικό των αντλιών και των εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την υγροποίηση. [4]

Έπειτα, το αέριο ψύχεται σε διάφορα στάδια μέχρι την θερμοκρασία των -162°C περίπου. Υπάρχουν διάφορες διαδικασίες ψύξης, όπως η καθαρή διαδικασία ψύξης, η μεικτή διαδικασία ψύξης και η πιο διαδεδομένη σήμερα η μικτή διαδικασία ψύξης με προστάδιο πτώσης θερμοκρασίας. Το μεγαλύτερο μέρος των βαρύτερων

από το μεθάνιο υδρογονανθράκων αποβάλλεται με αυτόν τον τρόπο, ενώ στο τέλος μπορεί να χρειαστεί και αποβολή μέρους του αζώτου που περιέχεται στο αέριο. Έτσι προκύπτει το τελικό προϊόν με περιεκτικότητα σε μεθάνιο 85-95% και πίεση 1 atm.

Η αποθήκευση του LNG γίνεται σε ειδικές κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές διπλού τοιχώματος κατασκευασμένες από σκυρόδεμα ή μέταλλο. Ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό τοίχωμα υπάρχει μόνωση ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες ανταλλαγές θερμότητας με το περιβάλλον και να εξασφαλίζεται προστασία απέναντι σε διαρροές. Από τις δεξαμενές αυτές ξεκινάει η μεταφορά του LNG στα υγραεριοφόρα. [1],[3]

Σε ότι αφορά την παραγωγή, η συνολική δυνατότητα υγροποίησης παγκοσμίως μέχρι τις αρχές του 2022 ήταν 462 MTPA. Η αύξηση σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά ανήλθε στους 7,4 MTPA με την εγκατάσταση Train 6 Sabine Pass στις Η.Π.Α. να συμβάλει 5 MTPA σε αυτήν. Η μεγαλύτερη παραγωγός χώρα είναι η Αυστραλία και ακολουθούν οι Η.Π.Α. Το 2021 πάρθηκαν τρεις τελικές επενδυτικές αποφάσεις με την μεγαλύτερη εξ αυτών να είναι η Field East στο Qatar με δυνατότητα 33 MTPA. Με τον Ρώσο-ουκρανικό πόλεμο η αγορά έχει σε μεγάλο βαθμό απορυθμιστεί και οι επενδύσεις έχουν μειωθεί ως οικονομικό αντίκτυπο της πανδημίας Covid-19, όμως τα μελλοντικά εν δυνάμει επενδυτικά σχέδια αφορούν σε 1034,5 MTPA. Οι τεχνολογίες υγροποίησης της αμερικάνικης εταιρείας Air Products είναι αυτές που χρησιμοποιούνται συνολικά για το 68% της παραγωγής. Τέλος, οι τέσσερις πλωτές εγκαταστάσεις υγροποίησης που βρίσκονται σε λειτουργία παρήγαγαν 8,7 MTPA [7],[8]. Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται το ποσοστό των εξαγωγών LNG ανά χώρα για τους πιο σημαντικούς εξαγωγείς φυσικού αερίου.



Εικόνα 2 Εξαγωγές LNG ανά χώρα [7]

1.1.2 Μεταφορά

Στο επίκεντρο αυτής της μελέτης βρίσκεται η μεταφορά του LNG με υγραεριοφόρα πλοία. Το πρώτο πλοίο μεταφοράς LNG ναυπηγήθηκε το 1959 έφερε το όνομα "MV Methane Pioneer" και είχε μεταφορική ικανότητα μόλις 5088 tons.

Από τότε μέχρι σήμερα οι απαιτήσεις και μαζί η τεχνολογία των πλοίων LNG έχει προχωρήσει πολύ και ταυτόχρονα η μεταφορική ικανότητα των πλοίων έχει υπερδεκαπλασιαστεί. Τα σημερινά υγραεριοφόρα είναι διπλής γάστρας και διαθέτουν πολύ εξειδικευμένα συστήματα για την διαχείριση του συγκεκριμένου φορτίου.

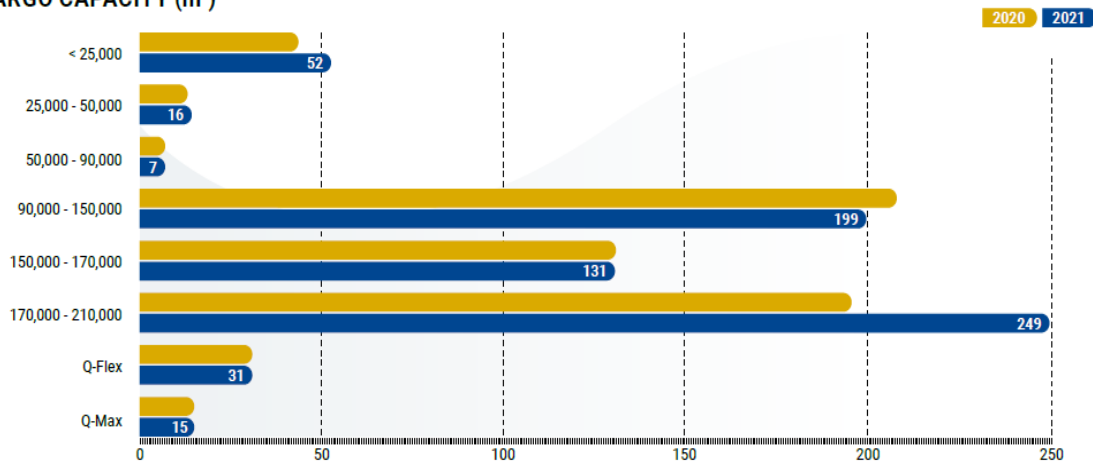
Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization-IMO) έχει θεσπίσει αυστηρούς κανόνες σχετικά με την λειτουργεία, την ασφάλεια την προστασία του περιβάλλοντος και την αποδοτικότητα των πλοίων μεταφοράς LNG μερικοί από τους οποίους είναι: [9]

- Το κεφάλαιο VII part C – “Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk” της Διεθνής Σύμβασης για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (Safety of Life at Sea-SOLAS).
- Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Κώδικας Επικίνδυνων Αγαθών (International Maritime Dangerous Goods Code – IMDG Code)
- Ο Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό πλοίων που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια χύδην (Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk-IGC Code)

Σημαντικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα πλοία LNG είναι η χωρητικότητα, ο τρόπος αποθήκευσης του φορτίου και το σύστημα πρόωσης που διαθέτουν.

Σχετικά με την χωρητικότητα, η πλειοψηφία των πλοίων κυμαίνεται από 125.000 m³ μέχρι 175.000 m³. Παλαιότερα, και συγκεκριμένα την τριετία 2007-2010, αναπτύχθηκαν και χτίστηκαν από το Qatar 45 πλοία της κατηγορίας Q-Class από 210.000 m³ μέχρι 266.000 m³. Σήμερα, ενώ εμφανίζεται η τάση αύξησης της χωρητικότητας, με όλα πλην ενός τα πλοία που χτίστηκαν την χρονιά 2021 να βρίσκονται μεταξύ 170.000 m³ και 180.000 m³, δεν προβλέπεται να ξεπεραστεί πολύ το όριο των 200.000 m³, καθώς θεωρείται πως αυτό το μέγεθος εκμεταλλεύεται ικανοποιητικά τις οικονομίες κλίμακας, προσφέρει ευελιξία στην εκμετάλλευση του στόλου και βρίσκεται εντός του ανώτερου ορίου της διώρυγας του Παναμά [7] [8]. Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται ο αριθμός των LNGCs ομαδοποιημένα ως προς την χωρητικότητα.

CARGO CAPACITY (m³)



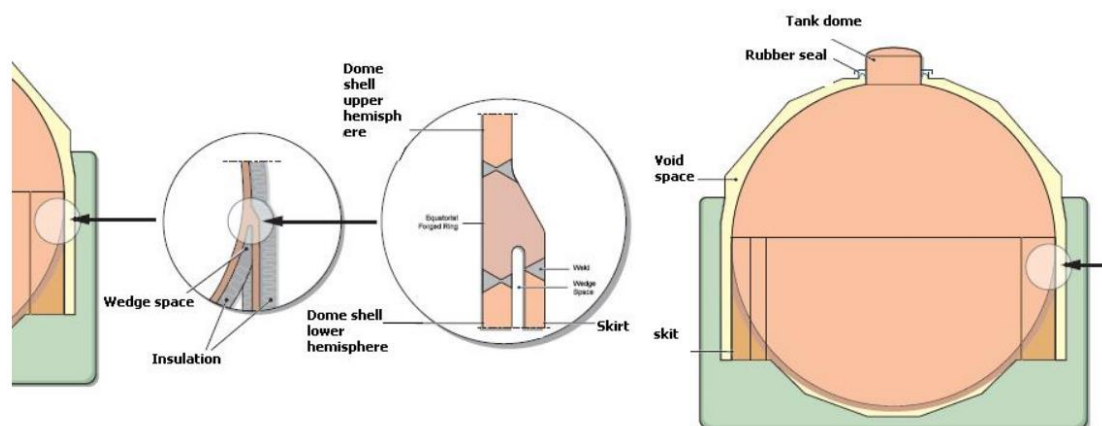
Εικόνα 3 Κατανομή πλοίων βάση χωρητικότητας [8]

1.1.2.1 Κατηγορίες Δεξαμενών

Σε ότι αφορά στον τρόπο αποθήκευσης του φορτίου υπάρχουν δύο κατηγορίες δεξαμενών. Οι αυτόνομες δεξαμενές (self-supporting) που δεν βασίζονται στην αντοχή του πλοίου και οι μεμβρανικού τύπου δεξαμενές που αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα (μεμβράνη) ικανό να παραλάβει θερμικές και άλλου είδους διαστολές και συστολές, το οποίο μονώνεται και στηρίζεται στην γάστρα που τις περικλείει. Οι δεύτερες απαντώνται στο 81% του στόλου. Βασικά πλεονεκτήματά τους είναι η καλή εκμετάλλευση χώρου, το λεπτότερο και ελαφρύτερο σύστημα συγκράτησης του φορτίου, η αποδοτικότερη κατανάλωση καυσίμου και το μικρότερο ύψος της γέφυρας για τα πλοία με μεμβρανικού τύπου δεξαμενές. Ωστόσο, υστερούν σε αντοχή σε δυσμενείς συνθήκες και δεν επιτρέπουν την μερική φόρτωση (Partial Loading), όπως συμβαίνει στα πλοία με αυτόνομες δεξαμενές. [7][9]

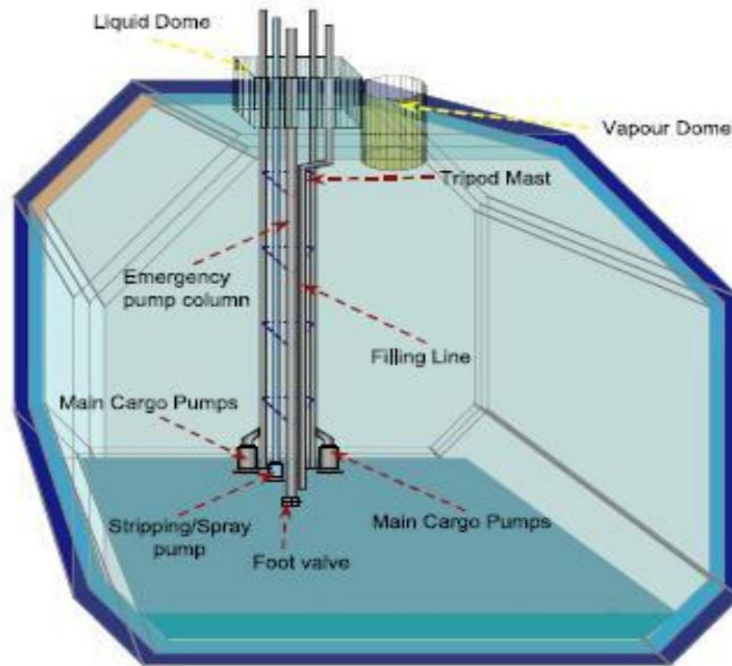
Η συνηθέστερη σχεδίαση για αυτόνομη δεξαμενή είναι οι σφαιρικές δεξαμενές τύπου **Moss** που απεικονίζονται στην εικόνα 4. Πήραν το όνομά τους από την εταιρεία που τις σχεδίασε, την νορβηγική MOSS ROSENBERG VERFT. Τα πλοία αυτού του τύπου διαθέτουν 4-5 δεξαμενές που λειτουργούν σε πίεση 3,2 psi η οποία μπορεί να αυξηθεί σε περίπτωση ανάγκης. Οι δεξαμενές κατασκευάζονται από αλουμίνιο και μονώνονται με έναν αφρό από πολυουρεθάνιο. Στο κάτω τμήμα των δεξαμενών υπάρχει ένα δεύτερο πολύ λεπτό προστατευτικό στρώμα που περιέχει άζωτο από όπου ελέγχεται τυχόν διαρροή μεθανίου. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι η μόνωση παραμένει στεγνή. Το σφαιρικό σχήμα βοηθάει στην ομοιόμορφη καταπόνηση της δεξαμενής, η οποία συστέλλεται και διαστέλλεται μέχρι και 2 πόδια (0,6098 m). Γι' αυτό όλες οι σωληνώσεις που επικοινωνούν με την δεξαμενή εισέρχονται από την κορυφή της και διαθέτουν την απαραίτητη ευκαμψία. Τέλος, η δεξαμενή στηρίζεται σε ένα μεταλλικό δαχτυλίδι, ικανό να παραλάβει παραμορφώσεις μέσα από το οποίο μεταφέρεται το βάρος της δεξαμενής στην

γάστρα του πλοίου. Η διάταξη αυτή υπολογίζεται πως έχει απώλειες 0,1% του συνολικού όγκου του φορτίου ανά ημέρα [7],[10],[11],[12].



Εικόνα 4 Σφαιρικές δεξαμενές τύπου Moss [10]

Τα περισσότερα πλοία LNG διαθέτουν μεμβρανικού τύπου δεξαμενές, το σχήμα των οποίων φαίνεται στην εικόνα 5. Οι κύριοι σχεδιαστές είναι οι εταιρείες Gaztransport με το σύστημα **Mark III** και Technigaz με το σύστημα **NO 96**. Οι δύο εταιρείες πλέον έχουν συγχωνευτεί και οι νεότερες σχεδιάσεις τους έχουν απώλειες περίπου 0,1% επί του όγκου φορτίου ανά ημέρα από 0,15% παλαιότερα. Ως κατασκευές, διαθέτουν διπλά τοιχώματα από μέταλλο ή σύνθετα υλικά που συρρικνώνονται ελάχιστα κατά την ψύξη. Η σχεδίαση Mark III αποτελείται επιπλέον από διπλό στρώμα μόνωσης αφρού, ενώ η NO96 από ένα στρώμα κιβωτίων από κόντρα πλακέ που ψεκάζονται με αέριο άζωτο. Για αυτές τις δεξαμενές είναι υποχρεωτικό η πλήρωση να βρίσκεται κάτω του 10% ή πάνω από το 70% του ύψους της δεξαμενής καθώς λόγω του προνευτασμού του πλοίου η κίνηση του φορτίου μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες κρουστικές φορτίσεις στα τοιχώματα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται sloshing [7].



Εικόνα 5 Δεξαμενή μεμβρανικού τύπου[10]

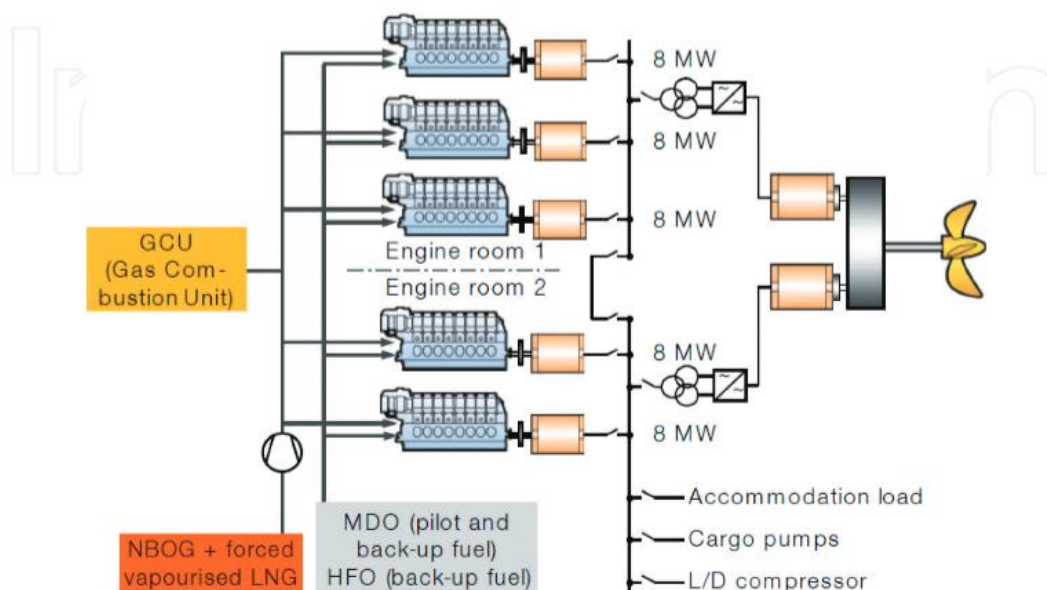
1.1.2.2 Εγκαταστάσεις Πρόωσης

Η προωστήρια εγκατάσταση είναι πολύ σημαντική διότι επηρεάζει πολλούς παράγοντες όπως είναι το κόστος λειτουργείας, το κόστος αρχικής επένδυσης, την εκπομπή ρύπων και την συμμόρφωση με τους ολοένα και αυστηρότερους κανονισμούς. Παλαιότερα τα πλοία LNG χρησιμοποιούσαν ατμοστρόβιλους. Η χαμηλή απόδοση τους σε συνδυασμό με την αυστηροποίηση των κανονισμών οδήγησε σταδιακά στην ανάπτυξη νέων κινητήρων. Σήμερα οι δύο τύποι κινητήρων που εφαρμόζονται σε νέα πλοία είναι δύο:

- Dual/Tri Fuel Diesel Electric (D/TFDE)
- Two Stroke Gas Injection (ME-GI, ME-GA, X-DF)

Οι μηχανές DFDE πρωτοεμφανίστηκαν το 2006 και παρέχουν την δυνατότητα καύσης Marine Diesel Oil αλλά και boil-off gas, αερίου δηλαδή που εξατμίζεται κατά την μεταφορά. Με την εμφάνιση των TFDE προσφέρεται η επιπλέον δυνατότητα καύσης Heavy Fuel Oil και μαζί με τις DFDE συναντώνται στο 30% των πλοίων LNG. Αποτελούνται από τέσσερις ή πέντε γεννήτριες οι οποίες καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες του πλοίου συμπεριλαμβανομένης και της πρόωσης μέσω δύο ηλεκτροκινητήρων. Διαθέτουν ξεχωριστές λειτουργίες. Για καύση BOG οι γεννήτριες ακολουθούν τον κύκλο Otto ενώ για καύση MDO ή HFO ακολουθούν τον κύκλο Diesel. Το BOG αναμειγνύεται με αέρα και εγχέεται στον θάλαμο καύσης κάθε κυλίνδρου σε σχετικά χαμηλή πίεση 5-6 bar. Για την έναρξη της καύσης απαιτείται και η προσθήκη ελάχιστης ποσότητας diesel της τάξης του 1% [14]. Η λειτουργία αυτή εκμεταλλεύεται

το χαμηλό κόστος καυσίμου και τους μειωμένους ρύπους ενώ απαιτεί σύστημα ελέγχου του χρονισμού έγχυσης καυσίμου. Τα δύο άλλα καύσιμα προσφέρουν καλύτερη θερμική απόδοση και απόκριση. Οι δύο λειτουργίες μπορούν να εναλλάσσονται χωρίς την διακοπή παροχής ισχύος. Οι DFDE έχουν ως βασικό μειονέκτημα ότι είναι αρκετά ακριβές και έχουν υψηλό κόστος συντήρησης λόγω των πολλών γεννητριών που συνεπάγεται πολλά ανταλλακτικά. Διαθέτουν συνήθως ένα σύστημα υπεύθυνο για την καύση του περισσεύοντος BOG που δεν χρησιμοποιείται τελικά. Η συνήθης διάταξη των μηχανών αυτών είναι η παρακάτω. Μια τυπική διάταξη μηχανής DFDE φαίνεται στην εικόνα 6.

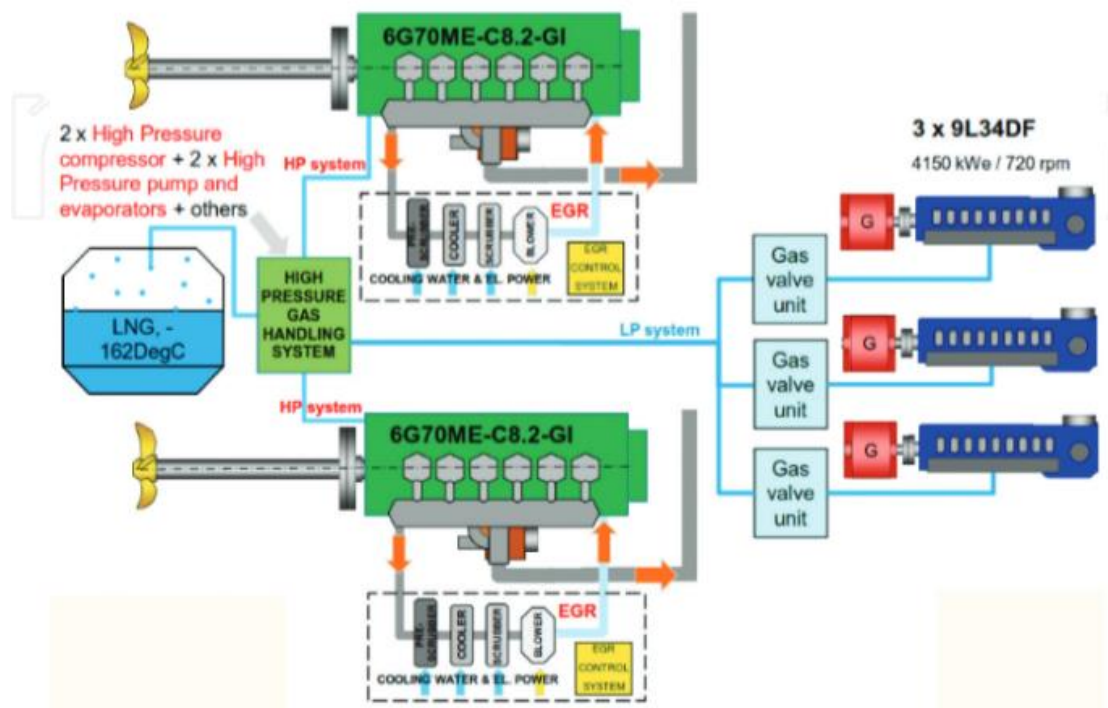


Εικόνα 6 Διάταξη μηχανής DFDE [14]

Οι δίχρονοι κινητήρες φυσικού αερίου εισήχθησαν στην αγορά αρχικά από την MAN το 2015 με τους υψηλής πίεσης ME-GI και από την Win-GD το 2017 με τους χαμηλής πίεσης X-DF. Οι πρώτοι έχουν μεγαλύτερη θερμική απόδοση, ισχύ και κατανάλωση καυσίμου ενώ οι δεύτεροι εκπέμπουν ελάχιστους ρύπους όπως οξειδία του αζώτου (NO_x) και έχουν μικρότερο κόστος. Και οι δύο κινητήρες παρέχουν την δυνατότητα λειτουργίας με καύσιμο diesel ή φυσικό αέριο. Η λειτουργία με καύσιμο diesel είναι όμοια με την λειτουργία όλων των δίχρονων μηχανών. Η λειτουργία με καύσιμο το φυσικό αέριο (gas mode) διαφέρει για τις δύο μηχανές και αναλύεται περαιτέρω.

Οι κινητήρες ME-GI σε gas mode λειτουργούν με βάση τον κύκλο diesel. Αρχικά στον κύλινδρο εισέρχεται μικρή ποσότητα diesel η οποία θα βοηθήσει ως πιλοτικό καύσιμο στην έναρξη της ανάφλεξης και λίγο πριν το ANΣ (Άνω Νεκρό σημείο) προστίθεται μέσα από μια σωλήνα διπλού τοιχώματος το φυσικό αέριο σε πίεση 300 bar. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι με αυτόν τον τρόπο δεν προκαλείται κρουστική καύση και επομένως η προδιαγραφή των κινητήρων αυτών σε αριθμό μεθανίου δεν

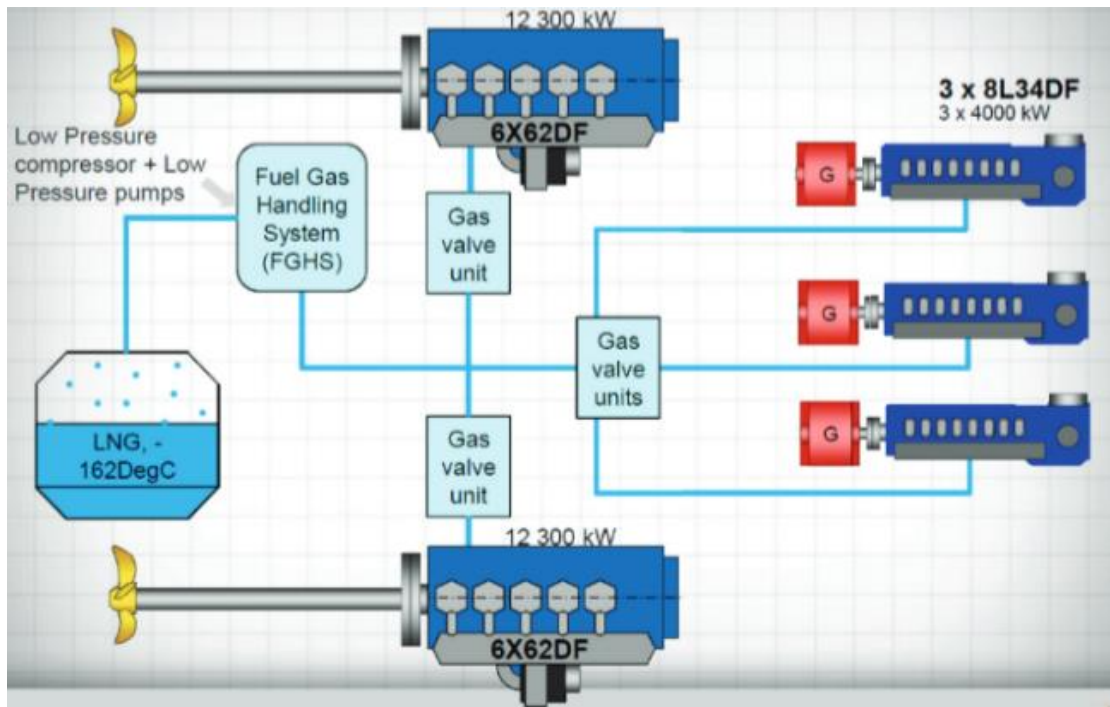
είναι σημαντική. Για την έγχυση του πιλοτικού καυσίμου, χρησιμοποιείται ένας συμπιεστής εμβόλου και η συνολική ποσότητα του diesel είναι της τάξης του 3% [15]. Αντίστοιχα, ένα σύστημα που αποτελείται είτε από έναν συμπιεστή είτε από μία αντλία LNG και ένα μηχάνημα ατμοποίησης του LNG χρησιμοποιείται για την έγχυση του φυσικού αερίου. Συνήθως για τα LNGCs που ξεπερνούν τα 145000 m³ χρησιμοποιούνται δύο κινητήρες. Τέλος υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης ενός συστήματος επανυγροποίησης της ποσότητας του BOG που δεν χρησιμοποιείται από τον κινητήρα. Η τυπική διάταξη των μηχανών ME-GI φαίνεται στην εικόνα 7.



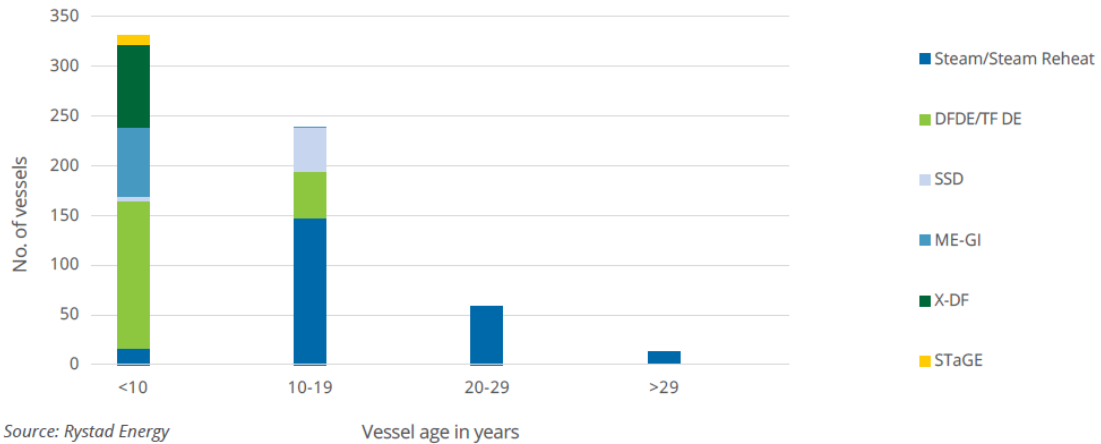
Εικόνα 7 Διάταξη μηχανής ME-GI [14]

Τέλος, οι κινητήρες X-DF σε gas mode λειτουργούν με βάση τον κύκλο Otto. Το σύστημα έγχυσης του αερίου είναι παρόμοιο με των κινητήρων ME-GI, όμως η εισαγωγή του αερίου γίνεται σε πίεση 5-16 bar στο μέσο περίπου της διαδρομής του εμβόλου προς το ΑΝΣ κατά την φάση της συμπίεσης [14]. Η χαμηλή πίεση του αερίου σημαίνει ότι δεν απαιτείται πολύ σύνθετος μηχανισμός έγχυσης άρα ελαττώνεται το αρχικό κόστος της επένδυσης αλλά και το κόστος συντήρησης. Στο ΑΝΣ εισέρχεται μία μικρή ποσότητα diesel της τάξης του 1% προκειμένου να ξεκινήσει η ανάφλεξη. Και στους κινητήρες X-DF χρησιμοποιείται σύστημα επανυγροποίησης του περισσεύοντος BOG [13],[14]. Η τυπική διάταξη ενός συστήματος X-DF φαίνεται στην εικόνα 8.

Στην εικόνα 9, φαίνεται το ποσοστό που κατέχει κάθε τύπος πρόωσης για πλοία διαφόρων ηλικιών.



Εικόνα 8 Διάταξη μηχανής X-DF [14]

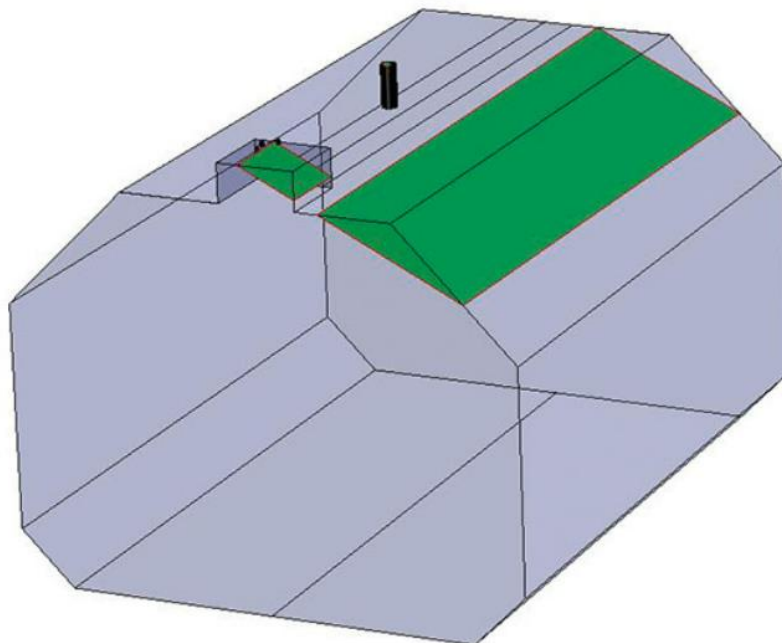


Εικόνα 9 Τύπος προωστήριας εγκατάστασης ανά ηλικία πλοίου. [7]

1.1.2.3 Ο κίνδυνος των απομονωμένων θυλάκων ατμού

Ο κίνδυνος των απομονωμένων θυλάκων ατμού (Isolated Vapour Pockets-IVPs) συναντάται σε όλα τα πλοία LNG και κυρίως σε αυτά με δεξαμενές μεμβρανικού τύπου. Το φυσικό αέριο κατά την μεταφορά του τείνει να εξατμίζεται σε ένα μικρό ποσοστό του. Το ποσοστό αυτό που εξατμίζεται αναφέρεται ως boil-off gas (BOG). Αυτό το ποσοστό είτε χρησιμοποιείται για την κίνηση του πλοίου, είτε επανυγροποιείται και ανατοποθετείται στις δεξαμενές, είτε καίγεται και

απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Προφανώς, το BOG έχει μικρότερη πυκνότητα από το LNG με αποτέλεσμα να πηγαίνει προς το πάνω μέρος της δεξαμενής, σχηματίζοντας έναν θύλακα ατμού, από όπου και συλλέγεται μέσω ενός συστήματος αγωγών ατμού και βαλβίδων ασφαλείας. Οι βαλβίδες αυτές είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να απελευθερώνουν το BOG μόλις η πίεση εξαιτίας του ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια. Όσο το πλοίο ταξιδεύει, υφίσταται ταλαντωτικές κινήσεις διατοχισμού και προνευτασμού μετακινώντας μαζί και την θέση αυτών των θυλάκων. Όταν το πλοίο επιστρέφει όμως κατά την ταλάντωση στην αρχική του θέση, ο θύλακας ξανασυνδέεται με το σύστημα και απελευθερώνεται. Σύμφωνα με τον IGC Code, ένα πλοίο LNG επιτρέπεται να φορτώνεται μέχρι το 98% της μέγιστης χωρητικότητας του, ενώ υπάρχουν κριτήρια που επιτρέπουν φόρτωση έως και το 99,5% [16]. Σε περίπτωση όμως που το πλοίο προσαράξει ή πλημμυρίσει λαμβάνοντας μια μόνιμη μεγαλύτερη κλίση όπως αυτή που φαίνεται στην εικόνα 10, τότε οι θύλακες αυτοί θα παγιδευτούν μακριά από το σύστημα απελευθέρωσης τους. Η πίεση της δεξαμενής θα αυξηθεί με αποτέλεσμα να χαλάσουν οι βαλβίδες ασφαλείας. Αυτό θα επιφέρει σταδιακά περαιτέρω αύξηση της πίεσης που θα οδηγήσει στην καταστροφή των τοιχωμάτων της δεξαμενής, τα οποία σε καμία περίπτωση δεν είναι σχεδιασμένα να παραλαμβάνουν τέτοια φορτία. Σε τέτοιες περιπτώσεις, για να μην καταρρεύσουν οι δεξαμενές κάποιες από τις διαθέσιμες επιλογές είναι η μετακίνηση φορτίου από μια δεξαμενή σε μια άλλη, η χρήση των δεξαμενών νερού ballast, καύση μέρους του φορτίου σε λέβητες ή ειδικές μονάδες καύσης αερίου (Gas Consumption Units-GCUs) και η έγχυση ψυχρού φορτίου στον θύλακα. Εάν δεν υπάρχει άλλη λύση, τότε μέρος του φορτίου απελευθερώνεται στο περιβάλλον με όσο το δυνατόν πιο ασφαλή τρόπο.



Εικόνα 10 Προσομοίωση μεμβρανικού τύπου δεξαμενής, γεμισμένη στο 98,5 %, όταν το πλοίο έχει πάρει κλίση 17 deg [16]

1.1.3 Επαναεριοποίηση

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την παραλαβή του φορτίου από τα πλοία, την αποθήκευση του σε υγρή μορφή και τελικά την επαναεριοποίηση του LNG και την μεταφορά του στον καταναλωτή. Η μεταφορά γίνεται κυρίως με αγωγούς φυσικού αερίου. Εναλλακτικά η επαναεριοποίηση μπορεί να γίνει αργότερα εάν απαιτείται περαιτέρω μεταφορά με βυτιοφόρα, τραίνα και μικρά πλοία μεταφοράς LNG. Η επαναεριοποίηση γίνεται με θέρμανση του LNG σε έναν εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος χρησιμοποιεί είτε θαλασσινό νερό είτε αέρα, ενώ όταν η ζήτηση για αέριο είναι πολύ υψηλή η διαδικασία μπορεί να επιταχυνθεί με την χρήση καυστήρων που λειτουργούν με LNG.

Οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται είναι δύο ειδών:

- Παράκτιες εγκαταστάσεις επαναεριοποίησης LNG (on-shore)
- Πλωτές μονάδες αποθήκευσης και επαναεριοποίησης LNG (FSRU)

Στις παράκτιες μονάδες επαναεριοποίησης το LNG αποθηκεύεται σε δεξαμενές στην ακτή μέχρι την επαναεριοποίηση του. Άλλη λύση που χρησιμοποιείται, ειδικά όταν δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης στην στεριά, είναι η αποθήκευση του LNG σε πλωτές μονάδες αποθήκευσης (Floating Storage Units-FSU) που συνήθως αγκυροβολούνται κοντά σε μια προβλήτα μέσω της οποίας συνδέονται με την ακτή. Ο βασικός εξοπλισμός των μονάδων επαναεριοποίησης περιλαμβάνει αρθρωτούς βραχίονες που συνδέονται επάνω στα πλοία LNG προκειμένου να γίνει η μεταφορά του στις δεξαμενές αποθήκευσης, αντλίες χαμηλής πίεσης, επανασυμπυκνωτές και αντλίες υψηλής πίεσης. Οι τελευταίες αυξάνουν την πίεση του αερίου από περίπου 5 bar στα 50 bar που απαιτούν τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας ή ακόμα και στα 100 bar εάν πρόκειται εισαγωγή του αερίου στο δίκτυο φυσικού αερίου [17]. Απαραίτητη είναι η ανάμειξη του αερίου, που κανονικά είναι άχρωμο και άοσμο, με τετραϋδροθειοφαίνιο προκειμένου να αποκτήσει την χαρακτηριστική του οσμή ώστε να μπορεί να ανιχνευτεί μία πιθανή διαρροή. Συχνά οι εγκαταστάσεις επαναεριοποίησης βρίσκονται κοντά σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή μεγάλες βιομηχανικές μονάδες.

Μια πλωτή μονάδα αποθήκευσης και επαναεριοποίησης LNG μπορεί να έχει σχεδιαστεί εξ αρχής για αυτή την λειτουργία ή μπορεί να προέκυψε από την μετατροπή ενός LNG carrier σε FSRU. Μπορεί επίσης το στάδιο της επαναεριοποίησης να γίνεται σε διαφορετική μονάδα από την αποθήκευση χρησιμοποιώντας ένα FRU (Floating Regasification Unit) και ένα FSU. Η διαδικασία είναι παρόμοια με ότι συμβαίνει σε μια παράκτια μονάδα. Η αποθήκευση γίνεται σε δεξαμενές όμοιες με των πλοίων μεταφοράς LNG και ανάμεσα στις μεμβρανικές και τις τύπου Moss προτιμότερες είναι οι πρώτες. Αυτό διότι προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα ενώ το επίπεδο κατάστρωμα τους επιτρέπει την ευκολότερη εγκατάσταση του εξοπλισμού επαναεριοποίησης πάνω σε αυτό. Η αεριοποίηση του LNG γίνεται με εναλλάκτες θερμότητας. Ανάλογα την τοπική νομοθεσία εφαρμόζεται σύστημα ανοιχτού, κλειστού βρόγχου καθώς και σύστημα IFV (Intermediate Fluid Vaporization). Στο

σύστημα ανοιχτού βρόγχου θαλασσινό νερό περνάει μια φορά από τον εναλλάκτη θερμότητας και καταλήγει στην θάλασσα δαπανώντας περίπου το 1,5% του παραγόμενου αερίου για την ενέργεια που απαιτείται. Στον κλειστό βρόγχο ως θερμαντικό μέσο χρησιμοποιείται ένα μείγμα νερού και γλυκόλης το οποίο θερμαίνεται με ατμό από τους λέβητες της εγκατάστασης ενώ δαπανάει το 2,5% του συνολικού αερίου. Το σύστημα IFV μπορεί να είναι ανοιχτού ή κλειστού βρόγχου με την θέρμανση του αερίου να γίνεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη το θερμαντικό μέσο είναι προπάνιο ενώ στην δεύτερη νερό ή υδατικό μείγμα γλυκόλης. Εάν είναι δυνατό προτιμάται το ανοιχτού βρόγχου σύστημα καθώς είναι πιο οικονομικό και έχει λιγότερους ρύπους. Τέλος, το BOG φτάνει το 0,1-0,15% της συνολικής ποσότητας αερίου ανά ημέρα. [17],[18],[19]

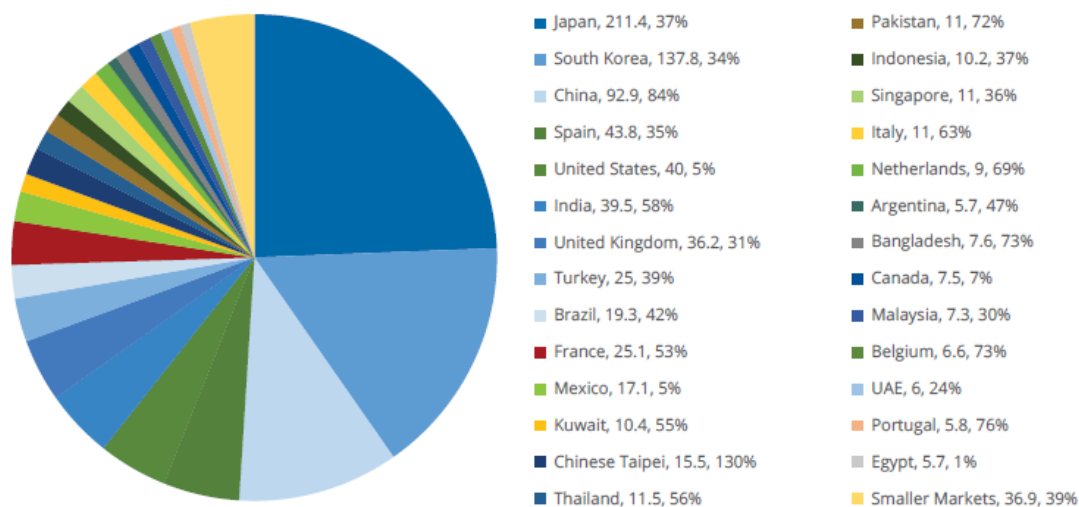
Ανάμεσα στις δύο επιλογές οι παράκτιες εγκαταστάσεις προσφέρουν μόνιμη και υψηλής παροχής λύση και έχουν χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα. Οι πλωτές εγκαταστάσεις προσφέρουν την δυνατότητα μετακίνησης τους σε περιοχές με μεγαλύτερη ζήτηση απαιτούν μικρότερο αρχικό κεφάλαιο, όπως φαίνεται και στον πίνακα 1. Επιπλέον, οι πρώτες χτίζονται σε διάστημα 36-40 μηνών ενώ οι δεύτερες σε 27-36 μήνες εάν πρόκειται για νέα κατασκευή ή 18-24 μήνες εάν πρόκειται για μετατροπή LNG carrier σε FSRU [17].

Component	Capacity 3 MTPA, Storage 180.000 m ³	
	Onshore	FSRU (New build)
Jetty (including piping)	80	80
Unloading lines	100	N/A
Tanks (1 × 180.000 m ³)	180	in FSRU
FSRU Vessel	N/A	250
Process plant	100	in FSRU
Utilities	60	in FSRU
Onshore interface/infrastructure)	N/A	30
CAPEX	520	360
Contingency 30% Onshore, 10% FSRU	156	36
Owners's Costs	74	54
Total CAPEX	750	450

Πίνακας 1 Σύγκριση Κόστους Αρχικού Κεφαλαίου Παράκτιας με Πλωτή μονάδα [15]

Στο τέλος του 2021, η παγκόσμια χωρητικότητα επαναεριοποίησης ανήλθε στους 901,9 MTPA, προστέθηκαν δηλαδή 24,8 MTPA από το προηγούμενο έτος με το μεγαλύτερο έργο, το τούρκικο Ertugrul Gazi FSRU, να συνεισφέρει στην αύξηση αυτή 7,5 MTPA. Συνολικά 19 πλωτές και 24 παράκτιες μονάδες βρίσκονται υπό κατασκευή. Την μεγαλύτερη δυνατότητα επαναεριοποίησης την έχει η Ιαπωνία και ακολουθούν η Νότια Κορέα, η Ινδία και η Κίνα. Για την χρονιά 2021 η Κίνα ήταν η χώρα που έκανε την μεγαλύτερη εισαγωγή LNG, με την αξιοποίηση της δυνατότητας της να ξεπερνάει το 100%. Τα επόμενα χρόνια προκειμένου η Κίνα να καλύψει τις ανάγκες της και να απομακρυνθεί από τον άνθρακα σχεδιάζει την κατασκευή μιας παράκτιας μονάδας επαναεριοποίησης και την επέκταση εφτά από τις ήδη υπάρχουσες. [7],[8]. Στην

εικόνα 11 παρουσιάζεται το ποσοστό των πιο σημαντικών εισαγωγών LNG ανά χώρα.



Εικόνα 11 Χωρητικότητα επαναεριοποίησης LNG ανά αγορά [7]

1.1.4 Διαδικασία φόρτωσης και εκφόρτωσης

Κρίνεται σκόπιμο να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα τρία στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας που αναλύθηκαν παραπάνω. Η διαδικασία της φόρτωσης και της εκφόρτωσης απαιτεί χρόνο και είναι ιδιαίτερα περίπλοκη.

Η διαχείριση ενός φορτίου όπως το LNG είναι μια διαδικασία που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς εγκυμονεί αρκετούς κινδύνους. Αν και σε υγρή κατάσταση το φυσικό αέριο δεν είναι εύφλεκτο, στην περίπτωση που διαφύγει στην ατμόσφαιρα μετατρέπεται σε ατμό ο οποίος σε κατάλληλη σύσταση μείγματος με το οξυγόνο και παρουσία πηγής ανάφλεξης είναι άκρως εκρηκτικό. Επιπλέον, σε περίπτωση διαφυγής μολύνει σημαντικά το περιβάλλον καθώς οι υδρογονάνθρακες, κυρίως μεθάνιο, που περιέχει έχουν μεγαλύτερες επιπτώσεις από το CO₂ στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ιδιαίτερη φύση του φορτίου σε συνδυασμό και με τους αστάθμητους παράγοντες που υπάρχουν στις θαλάσσιες μεταφορές έχουν οδηγήσει την βιομηχανία στην ανάπτυξη μιας σειράς από τεχνικά και επιχειρησιακά μέτρα προκειμένου να αποφεύγονται όσο γίνεται ατυχήματα. Οι διαδικασίες που εφαρμόζονται σήμερα κατά την φόρτωση και εκφόρτωση LNG στους τερματικούς σταθμούς υγροποίησης και επαναεριοποίησης απαιτούν χρόνο για να γίνουν και επηρεάζουν οικονομικά το πλοίο.

Καθώς το πλοίο προσεγγίζει τον τερματικό σταθμό, επιβιβάζεται σε αυτό ένας τοπικός πλοηγός (pilot) που έχει καλή γνώση των συνθηκών της θαλάσσιας περιοχής. Ο ρόλος του είναι να βοηθήσει να γίνουν όλες οι απαραίτητες μανούβρες ώστε το πλοίο να προσεγγίσει με ασφάλεια τον χώρο που θα αγκυροβολήσει. Στους χειρισμούς αυτούς βοηθάνε και ένας αριθμός ρυμουλκών σκαφών ανάλογα με το μέγεθος του LNGC. Για το σημείο που τελικά δένεται πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οι

βραχίονες φόρτωσης ή εκφόρτωσης του σταθμού θα βρίσκονται στην σωστή θέση σε σχέση με το πλοίο. Τα σχοινιά ή οι γραμμές πρόσδεσης βοηθούν ώστε να αποφεύγονται μεγάλες κινήσεις του πλοίου, ενώ συνήθως βρίσκονται σε ετοιμότητα και δύο ρυμουλκά προκειμένου να κάνουν διορθώσεις εάν χρειαστεί. Αμέσως μετά την πρόσδεση, το πλοίο συνδέεται με τον τερματικό σταθμό μέσω ειδικής σκάλας (Gangway). Με ευθύνη του κυβερνήτη η δίοδος πρέπει να παραμένει πάντοτε εξασφαλισμένη.

Μόλις εξασφαλιστεί η πρόσβαση στο πλοίο, οι υπεύθυνοι του τερματικού σταθμού αναλαμβάνουν να εγκαταστήσουν τρόπους επικοινωνίας, τόσο με το πλήρωμα όσο και με τον μηχανολογικό εξοπλισμό του πλοίου. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω του ESD (Emergency Shut Down) καλωδίου που συνήθως είναι ηλεκτρικό ή οπτικό. Επιτρέπει την τηλεφωνική σύνδεση μεταξύ του πλοίου και του σταθμού και το κυριότερο δίνει την δυνατότητα στον σταθμό να ενεργοποιήσει το σύστημα ESD σε περίπτωση που χρειαστεί να σταματήσει η φόρτωση ή η εκφόρτωση άμεσα προκειμένου να αντιμετωπιστεί ένας πιθανός κίνδυνος. Επιπλέον, στο πλοίο παρέχεται και εξοπλισμός, που συνήθως περιλαμβάνει ένα φορητό υπολογιστή, που παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις τάσεις που αναπτύσσονται στα σχοινιά πρόσδεσης ώστε να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις.

Ταυτόχρονα, οι άνθρωποι του σταθμού αναλαμβάνουν να επιθεωρήσουν την κατάσταση του πλοίου. Ελέγχουν εάν υπάρχει διαθέσιμος και είναι λειτουργικός όλος ο προβλεπόμενος εξοπλισμός που σχετίζεται με την ασφάλεια, όπως τα μηχανήματα πυρόσβεσης. Τυχόν προβλήματα πρέπει να επιλυθούν πριν την έναρξη της διαδικασίας. Όλα τα σχετικά θέματα με την ασφάλεια αναλύονται στην συνάντηση που λαμβάνει χώρα πριν την ανταλλαγή φορτίου μεταξύ των υπεύθυνων του σταθμού και μελών του πληρώματος, κυρίως του αξιωματικού καταστρώματος και του πλοιάρχου. Αναλύονται και συμφωνούνται επίσης όλα τα βήματα για το πως θα κινηθούν οι διαδικασίες, το φορτίου που θα μεταφερθεί, ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς του φορτίου.

Εφόσον όλα τα παραπάνω ολοκληρωθούν μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της φόρτωσης ή εκφόρτωσης του LNG. Πρώτο βήμα είναι η σύνδεση του κινητού βραχίονα του σταθμού με το σύστημα σωλήνων του πλοίου. Επειδή το σύστημα περιέχει και άλλα αέρια όπως οξυγόνο και CO₂ γίνεται ο καθαρισμός του με αέριο άζωτο (N₂) ώστε η ατμόσφαιρα μέσα στους σωλήνες να είναι μη εκρηκτική. Επιπλέον γίνεται έλεγχος για διαρροές και έλεγχος για την μέγιστη πίεση που μπορεί να παραλάβει το σύστημα. Ενεργοποιείται το σύστημα Custody Transfer Metering (CTM), το οποίο μετράει την ποσότητα του LNG στις δεξαμενές, την θερμοκρασία καθώς και την πίεση, ώστε να μπορούν να προσδιορίζονται οι μεταφερόμενες ποσότητες. Το σύστημα αυτό το παρακολουθούν εκπρόσωποι του πληρώματος αλλά και του σταθμού. Ταυτόχρονα γίνεται η πρώτη δοκιμή του συστήματος ESD σε θερμές συνθήκες για να διαπιστωθεί ότι λειτουργεί εντός των προβλεπόμενων χρονικών ορίων. Έπειτα ξεκινάει η ψύξη του βραχίονα και των σωληνώσεων ώστε να είναι σε θέση να παραλάβουν το πολύ ψυχρό φορτίο χωρίς να υποστούν απότομες θερμικές

καταπονήσεις. Μετά την ψύξη ελέγχεται ξανά το σύστημα ESD για να διαπιστωθεί ότι δεν έχουν επηρεαστεί οι βαλβίδες ασφαλείας.

Με τον τρόπο αυτό το πλοίο καθίσταται έτοιμο για ανταλλαγή φορτίου. Στην αρχή ο ρυθμός μεταφοράς φορτίου είναι αρκετά χαμηλός και σταδιακά αυξάνεται μέχρι την μέγιστη τιμή που έχει συμφωνηθεί. Περίπου μία ώρα πριν το τέλος της διαδικασίας αυτής, ο ρυθμός μειώνεται ξανά πριν μηδενιστεί προκειμένου να τερματιστεί η διαδικασία ομαλά χωρίς να υπερπληρωθούν οι δεξαμενές. Έπειτα με την χρήση των αντλιών του πλοίου μεταφέρεται στις δεξαμενές το LNG που έχει μείνει μέσα στις σωλήνες του. Οι βραχίονες ξανά καθαρίζονται με N₂ στην αρχή της διαδικασίας και στην συνέχεια αποσυνδέονται. Το σύστημα CTM κλείνει και καταγράφονται οι τελικές ενδείξεις του. Ακολουθεί ακόμα μία συνάντηση του πλοιάρχου, του αξιωματικού καταστρώματος με τους εκπροσώπους του σταθμού, στην οποία καταγράφονται προβλήματα που μπορεί να συνέβησαν στην διαδικασία και υπογράφονται όλα τα απαραίτητα έγγραφα. Το προσωπικό του σταθμού αποβιβάζεται και αποσυνδέεται το σύστημα ESD. Η σκάλα απομακρύνεται και το πλοίο μπορεί να ξεκινήσει την αναχώρησή του. [20,21]

Η συνολική διάρκεια όλης της παραπάνω διαδικασίας εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο φορτώνεται ή ξεφορτώνεται το LNG και το μέγεθος του πλοίου. Μπορεί να αναλυθεί στον καθαρό χρόνο μεταφοράς φορτίου και στον χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθούν οι υπόλοιπες ενέργειες. Το πρώτο κομμάτι μπορεί να υπολογιστεί εύκολα για δεδομένη ποσότητα LNG και γνωστό ρυθμό ανταλλαγής φορτίου. Το δεύτερο κομμάτι εκτιμάται στα πλαίσια της εργασίας ότι διαρκεί 10 ώρες δεδομένου ότι δεν υπάρχουν επιπλοκές λόγω για παράδειγμα δυσμενών καιρικών συνθηκών.

1.2 Ανάλυση λειτουργικού κόστους

Μια ναυτιλιακή εταιρεία προκειμένου να εξασφαλίσει την επιβίωση της χρειάζεται μια αποτελεσματική οικονομική στρατηγική που θα λαμβάνει υπόψη τα έσοδα και τα κόστη. Πολύ σημαντικός παράγοντας της επένδυσης είναι οι αρχικές αποφάσεις όπως το μέγεθος, ο τύπος αποθήκευσης του φορτίου, οι μηχανές πρόωσης, η επιλογή αγοράς καινούριου ή μεταχειρισμένου πλοίου, καθώς αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του κόστους της. Συγκεκριμένα, το κόστος για ένα καινούριο πλοίο LNG χωρητικότητας 174.000 m³ με δίχρονο κινητήρα για το 2021 ανήλθε στα 220 εκατομμύρια US\$ [7].

Τα έσοδα μπορούν να προκύψουν από την εκμετάλλευση του πλοίου διαθέτοντας το για ναύλωση και μετακυλώντας έτσι το ρίσκο στον ναυλωτή. Η ναύλωση του πλοίου μπορεί να γίνει είτε για συγκεκριμένο χρόνο είτε για την μεταφορά συγκεκριμένης ποσότητας αερίου και προσφέρει σταθερά έσοδα στον πλοιοκτήτη. Οι χρονοναυλώσεις διακρίνονται σε μακράς-μεσαίας διάρκειας (long-medium term) με διάρκεια μεγαλύτερη των 4 ετών και μικρής διάρκειας (short-term) συμβόλαια. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης του πλοίου μέσα από την spot αγορά όπου ο πλοιοκτήτης αναλαμβάνει όλο το ρίσκο και προσπαθεί να αυξήσει τα έσοδα του εκμεταλλεόμενος τις συνθήκες της αγοράς. Το 2021, το 36,6% του LNG που έφτασε σε σταθμούς επαναεριοποίησης και αντιστοιχεί σε 136,3 MT

μεταφέρθηκε μέσα από short-term ή spot συμβόλαια [8]. Τέλος, ένας πλοιοκτήτης δεν μπορεί να ελέγξει την τιμή για την μεταφορά μιας μονάδας φορτίου. Προσπαθεί λοιπόν να αυξήσει τα έσοδα του μέσα από την αποδοτικότερη εκμετάλλευση του πλοίου και την αύξηση της χωρητικότητας του πλοίου στοχεύοντας σε οικονομίες κλίμακας.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το κόστος για την απόκτηση του πλοίου είναι πολύ σημαντικό μέρος του συνολικού, ειδικά εάν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι η αρχική απόφαση διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο για τα υπόλοιπα κόστη στην διάρκεια ζωής του πλοίου. Ένα καινούριο πλοίο είναι σαφώς ακριβότερη επένδυση όμως για την λειτουργία του απαιτεί μικρότερο πλήρωμα, έχει μικρότερη κατανάλωση καυσίμου και συμμορφώνεται στους κανονισμούς που συνεχώς γίνονται αυστηρότεροι. Αντίστοιχα ένα παλιότερο πλοίο είναι φθηνότερο στην απόκτηση του έχει όμως μεγαλύτερα έξοδα συντήρησης. Σημαντικός επίσης είναι και ο τρόπος χρηματοδότησης της επένδυσης καθώς στην περίπτωση δανεισμού αρχικού κεφαλαίου θα πρέπει στα κόστη να ληφθούν υπόψιν και το ποσό εξυπηρέτησης του δανείου. Τα παραπάνω κόστη λαμβάνονται υπόψιν στην αρχή της επένδυσης και ο πλοιοκτήτης δεν μπορεί να τα διαφοροποιήσει αργότερα σε αντίθεση με το κόστος για την λειτουργία του πλοίο. Έτσι, το λειτουργικό κόστος είναι αυτό που επί της ουσίας παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς την σωστή διαχείριση του.

Το λειτουργικό κόστος ενός πλοίου μεταφοράς LNG εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες. Αρχικά επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του πλοίου όπως η κατανάλωση καυσίμου, το πόσο μεγάλο πλήρωμα χρειάζεται, ο τρόπος αποθήκευσης του φορτίου και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται δηλαδή οι επιδιορθώσεις και η συντήρηση που χρειάζεται, χαρακτηριστικά που σε σημαντικό βαθμό έχουν καθοριστεί κατά τον σχεδιασμό του πλοίου και παραμένουν έπειτα σχετικά αμετάβλητα. Έπειτα από την τιμή διαφόρων συντελεστών που χρειάζεται όπως τα καύσιμα, οι μισθοί του πληρώματος, τα διάφορα αναλώσιμα και το κόστος των επισκευών. Στην τιμή τους ο πλοιοκτήτης δεν έχει μεγάλη επιρροή καθώς αυτή καθορίζεται από την αγορά. Τρίτος παράγοντας που επηρεάζει το κόστος, είναι η αποτελεσματικότητα του τρόπου διαχείρισης του πλοίου. Σε αυτόν τον τομέα κυρίως ο ιδιοκτήτης έχει την δυνατότητα να επέμβει καθ' όλη την ζωή του πλοίου με την εύρεση και ανάθεση του στόλου σε συμβόλαια με ευνοϊκούς όρους. Προκειμένου να μπορεί να επιτευχθεί αυτό, ο πλοιοκτήτης πρέπει να είναι σε θέση να πάρει γρήγορες και σωστές αποφάσεις αξιολογώντας τις διαθέσιμες επιλογές που έχει στην διάθεσή του. Χρειάζεται επομένως τα εργαλεία ώστε να συγκρίνει τα επιπλέον κόστη που θα προκύψουν από διαφορετικά συμβόλαια για τον ίδιο και για τον ναυλωτή για να είναι σε θέση να αυξήσει τελικά τα κέρδη του.

Το λειτουργικό κόστος μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους κόστη που αφορούν σε:

- Έξοδα απαραίτητα για την καθημερινή δραστηριότητα του πλοίου, όπως το πλήρωμα και οι προμήθειες
- Έξοδα της προγραμματισμένης συντήρησης του πλοίου
- Έξοδα ταξιδιού

1.2.1 Έξοδα της καθημερινής δραστηριότητας του πλοίου

Σε αυτά περιλαμβάνονται το κόστος πληρώματος, αναλωσίμων, η ασφάλιση του πλοίου, η συντήρηση και επισκευή καθώς και κάποια γενικά κόστη.

1.2.1.1 Έξοδα πληρώματος

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όλα τα άμεσα και έμμεσα κόστη που σχετίζονται με το πλήρωμα του πλοίου. Πρόκειται για τους μισθούς των εργαζομένων, τα έξοδα για την ασφάλιση και τα ένσημα τους, τις τυχόν αποζημιώσεις και τη διατροφή τους. Επηρεάζονται από τον αριθμό του πληρώματος, την πολιτική του πλοιοκτήτη και το τι ορίζει η σημαία στην οποία υπάγεται το πλοίο. Γενικά, αυξάνονται όσο μεγαλύτερο είναι το πλοίο, όχι όμως γραμμικά. Σημαντικός παράγοντας είναι και η εξειδίκευση που απαιτείται από τον εργαζόμενο. Επίσης, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός αυτοματοποίησης των εργασιών του πλοίου ειδικά στο μηχανοστάσιο και την διαχείριση του φορτίου τόσο μειώνεται το συγκεκριμένο κόστος. Η εξέλιξη της τεχνολογίας στα συστήματα παρακολούθησης έχει βοηθήσει ιδιαίτερα στην ελάττωση του πληρώματος. Σχετικά με την σημαία, πλοία που φέρουν σημαία ευρωπαϊκού κράτους πληρώνουν περίπου 50% περισσότερα χρήματα για πληρώματα σε σχέση με κράτη όπως η Λιβερία, ο Παναμάς και η Σιγκαπούρη [22]. Τέλος, κάποια επιρροή έχουν και τα συνδικάτα των εργαζομένων.

1.2.1.2 Προμήθειες και αναλώσιμα

Στο λειτουργικό κόστος συνεισφέρουν αρκετά οι προμήθειες και τα αναλώσιμα. Πρόκειται κυρίως για το λάδι λίπανσης το οποίο καταναλώνεται σε μεγάλες ποσότητες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και διάφορες προμήθειες που σχετίζονται με τον εξοπλισμό της καμπίνας και του εσωτερικού χώρου του πλοίου.

1.2.1.3 Επισκευές και συντήρηση

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται όλες οι απαραίτητες επιδιορθώσεις που απαιτούνται από την κλάση ή και από τους ναυλωτές ώστε το πλοίο να παραμένει αξιόπλοο, εξαιρούνται ωστόσο οι προγραμματισμένοι δεξαμενισμού του πλοίου, οι οποίοι αναλύονται χωριστά. Η κατηγορία αποτελείται από την γενική συντήρηση του πλοίου, ξαφνικές βλάβες και το κόστος των ανταλλακτικών. Η γενική συντήρηση αναφέρεται σε εργασίες που γίνονται όσο το πλοίο ταξιδεύει όπως βαψίματα, συγκολλήσεις και εργασίες πάνω στην κύρια και τις βοηθητικές μηχανές. Οι ξαφνικές βλάβες περιλαμβάνουν την χρέωση των συνεργείων ή ακόμα και του ναυπηγείου αν απαιτείται για την διόρθωση τους. Τα ανταλλακτικά της κύριας μηχανής, των βοηθητικών ή άλλων μηχανημάτων συνεισφέρουν και αυτά σημαντικά στον υπολογισμό του κόστους το οποίο τείνει να αυξάνεται με την παλαιότητα του πλοίου.

1.2.1.4 Ασφάλεια

Το κόστος της ασφάλειας διαφέρει από πλοίο σε πλοίο αφού σχετίζεται άμεσα με την αξία του. Το μεγαλύτερο μέρος του κόστους έχει να κάνει με την κάλυψη των μηχανημάτων, και της γάστρας από βλάβες ή ολική απώλεια. Είναι δηλαδή ασφάλιση της περιουσίας του πλοιοκτήτη. Τέτοιου είδους ασφάλειες τις αναλαμβάνουν μεσίτες

ή εταιρείες που ασχολούνται με την ασφάλιση στην ναυτιλία. Απαραίτητο στάδιο για τον υπολογισμό του κόστους είναι η οικονομική αξιολόγηση του πλοίου και του μηχανολογικού του εξοπλισμού λαμβάνοντας υπόψιν το ύψος των ναύλων, την ηλικία και την κατάσταση του πλοίου καθώς και το ιστορικό του πλοιοκτήτη σε παλαιότερες ασφαλιστικές διεκδικήσεις. Το υπόλοιπο κόστος έχει να κάνει με την ασφάλεια απέναντι σε νομικές διεκδικήσεις τρίτων σε περίπτωση ατυχήματος, πρόσκρουσης, περιβαλλοντικής μόλυνσης ή καταστροφής του φορτίου. Τέλος, υπάρχει η μη υποχρεωτική επιλογή της ασφάλισης απέναντι σε πολέμους, απώλεια κερδών ή απεργίες.

1.2.1.5 Γενικά κόστη

Στην κατηγορία αυτή τοποθετούνται κάποια μικρά έξοδα όπως η ετήσια συνδρομή στο κράτος της σημαίας που ανήκει το πλοίο. Ανήκουν επίσης τα κόστη για την οργάνωση και διοίκηση του πλοίου από την στεριά, οι χρεώσεις για επικοινωνία ανάμεσα στο πλοίο και την στεριά και διάφορα άλλα κόστη.

1.2.2 Έξοδα της προγραμματισμένης συντήρησης του πλοίου

Πρόκειται για τα έξοδα των τακτικών δεξαμενισμών και επιθεωρήσεων του πλοίου. Κάθε πλοίο περνάει την ετήσια επιθεώρηση, την ενδιάμεση επιθεώρηση κάθε 2,5 χρόνια και την ειδική επιθεώρηση κάθε 5 χρόνια. Η τελευταία είναι η πιο εκτεταμένη και με το τέλος της το πλοίο ανανεώνει το πιστοποιητικό κλάσης για την επόμενη 5ετία [22]. Ελέγχονται πολλαπλά σημεία του πλοίου ως προς τα πάχη των ελασμάτων τους ενώ γίνεται και ο έλεγχος του μηχανολογικού εξοπλισμού. Η ενδιάμεση και η ειδική επιθεώρηση γίνεται με δεξαμενισμό του πλοίου ώστε να ελεγχθεί και το εξωτερικό τμήμα του πυθμένα. Ανάλογα με την ηλικία του πλοίου τα κόστη μπορεί να αυξηθούν σημαντικά.

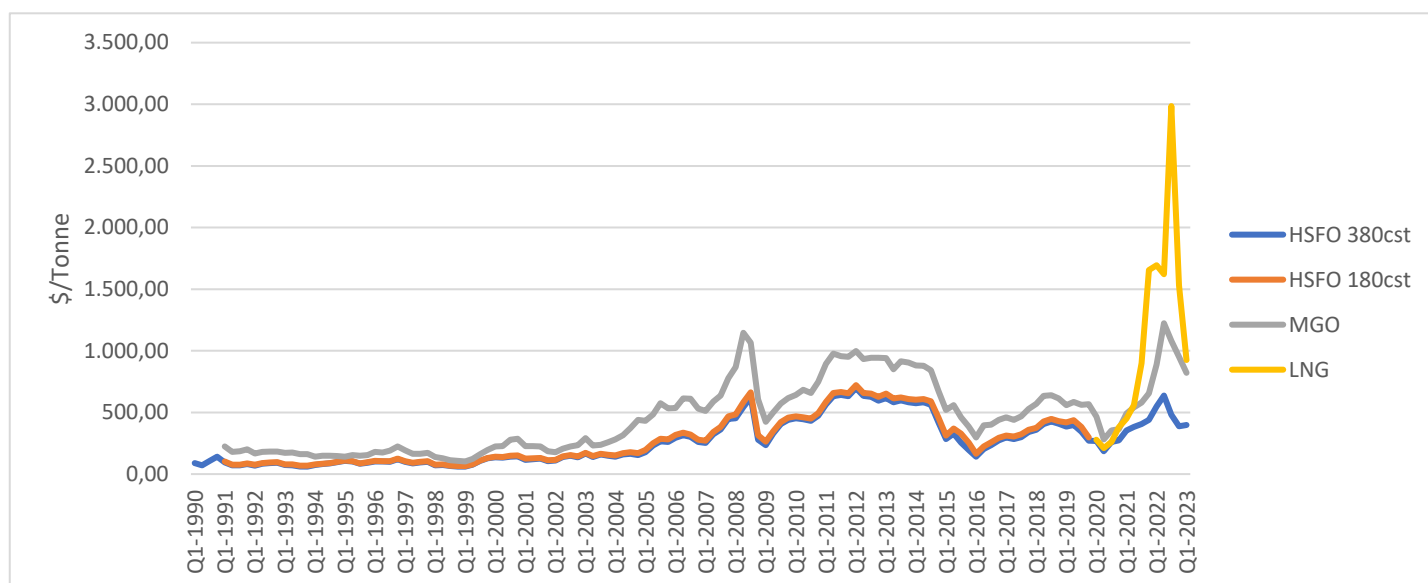
1.2.3 Έξοδα ταξιδιού

Τα έξοδα ταξιδιού καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό του λειτουργικού κόστους και για τον λόγο αυτό η μείωση τους ύστερα από προσεκτικό προγραμματισμό της λειτουργίας του πλοίου μπορεί να αποφέρει υψηλή κερδοφορία. Διακρίνονται σε κόστη για καύσιμο, τέλη λιμανιού και τέλη καναλιού. Τα κόστη αυτά επιβαρύνουν τον ναυλωτή εφόσον αυτός υπάρχει.

1.2.3.1 Κόστος καυσίμου

Το καύσιμο για την λειτουργία της κύριας μηχανής και των ηλεκτρογεννητριών και ότι αφορά σε αυτό είναι πιθανότατα το σημαντικότερο από οικονομικής πλευράς στοιχείο ενός πλοίου. Παλαιότερα στις αρχές της δεκαετίας του '70 οι τιμές των καυσίμων δεν έπαιζαν τόσο σημαντικό ρόλο και οι πλοιοκτήτες έδιναν μεγαλύτερη σημασία στην ταχύτητα [22]. Από τα μέσα και μετά της ίδιας δεκαετίας οι τιμές αυτές ξεκινάν να αυξάνονται φτάνοντας μέχρι και το δεκαπλάσιο της αρχικής τιμής τους. Τα τελευταία χρόνια σημειώνονται σταδιακές αυξήσεις οδηγώντας τελικά το σύνολο της ναυτιλίας σε υιοθέτηση τεχνολογιών και τρόπων λειτουργίας που μειώνουν την κατανάλωση καυσίμου. Τέτοιες εξελίξεις στοχεύουν στην μείωση της

αντίστασης τριβής της γάστρας, την καλύτερη σχεδίαση της προπέλας, την ελάττωση της ενέργειας που δαπανάται για την ψύξη του κινητήρα και την εκμετάλλευση ενός ποσοστού της θερμότητας που αποβάλλεται μέσω των καυσαερίων. Μεγάλη πρόοδος έχει σημειωθεί στην βελτιστοποίηση του θερμικού κύκλου στις σύγχρονες μηχανές. Ως επιπρόσθετο μέτρο οι πλοιοκτήτες επιλέγοντας μικρότερη ταχύτητα πετυχαίνουν μειώσεις στην κατανάλωση καυσίμου ανάλογες του τετραγώνου της μείωσης της ταχύτητας. Στην εικόνα 12 παρουσιάζεται η εξέλιξη διάφορων ναυτιλιακών καυσίμων από το 1990 μέχρι σήμερα.



Εικόνα 12 Εξέλιξη των τιμών των καυσίμων στην ναυτιλία από το 1990 μέχρι το 2023 στο λιμάνι του Rotterdam [23]

1.2.3.2 Τέλη λιμανιού

Τα πλοία LNG προκειμένου να χρησιμοποιήσουν τις εγκαταστάσεις και τις υπηρεσίες των σταθμών υδροποίησης και επαναεριοποίησης καταβάλουν ένα χρηματικό ποσό ως τέλη στην εταιρεία διαχείρισης του σταθμού. Το κόστος τους διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πλοίου. Κάποιες από τις υπηρεσίες που προσφέρονται από τον σταθμό είναι η φόρτωση και εκφόρτωση του LNG, η αγκύρωση του πλοίου και η βοήθεια πλοήγησης. [24]

1.2.3.3 Τέλη καναλιού

Πρόκειται για το ποσό που καταβάλει το πλοίο προκειμένου να διέλθει από ένα κανάλι. Τα κυριότερα κανάλια είναι η διώρυγα του Suez και η διώρυγα του Panama. Σε κάθε συμβόλαιο ένα πλοίο είναι πιθανό να χρειαστεί να περάσει αρκετές φορές από ένα κανάλι γεγονός που αυξάνει τα έξοδα ταξιδιού σημαντικά. Το συνολικό ποσό που αντιστοιχεί σε κάθε πλοίο υπολογίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά του.

1.3 Συμμόρφωση με την περιβαλλοντική νομοθεσία

1.3.1 Περιβαλλοντικοί κανόνες στην ναυτιλία

Τα τελευταία χρόνια γίνεται παγκόσμια προσπάθεια για την μείωση των ρύπων και την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής μόλυνσης. Το 2015 υπογράφηκε από την πλειοψηφία των κρατών η συμφωνία του Παρισιού, με στόχο την επαναφορά της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κοντά στα προβιομηχανικά επίπεδα μέχρι το 2050 [25]. Κατόπιν, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός IMO, η Ευρωπαϊκή Ένωση και άλλοι φορείς ξεκίνησαν να υιοθετούν νέα μέτρα σχετικά με τον περιορισμό των ρύπων στην ναυτιλία. Αυτό οδήγησε και θα οδηγήσει σε μία σειρά από νέες καινοτομίες ή και βελτιώσεις στην υπάρχουσα τεχνολογία των πλοίων γεγονός που σημαίνει αύξηση του κόστους αρχικού κεφαλαίου και του κόστους λειτουργείας.

Οι περισσότεροι κανονισμοί που αφορούν την ναυτιλία έχουν θεσπιστεί από τον IMO. Πρόκειται για δείκτες που δείχνουν την ενεργειακή απόδοση του πλοίου και οι κυριότεροι από αυτούς είναι:

- EEDI
- EEXI
- CII

Από το 2011 ξεκίνησε η αρχικά προαιρετική και στην συνέχεια υποχρεωτική χρήση του δείκτη EEDI για όλα τα πλοία που έχουν κατασκευαστεί από 01/01/2011 και έπειτα. Στην ουσία είναι ένας δείκτης που χαρακτηρίζει το πλοίο ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα του. Εκφράζεται από τον λόγο:

$$EEDI = \frac{P * SFOC * C_f}{Capacity * V_{ref}}$$

όπου

P:	Η συνολική ισχύς που χρησιμοποιεί το πλοίο για να κινηθεί με ταχύτητα V_{ref}
SFOC:	Η Κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα
C_f :	Ο συντελεστής μετατροπής του καυσίμου σε CO ₂
Capacity	Η μεταφορική ικανότητα του πλοίου

Από τον παραπάνω λόγο υπολογίζεται ο επιτευχθείς συντελεστής για το κάθε πλοίο και πρέπει να είναι μικρότερος από τα όρια που επιβάλει ο IMO.

Σε αντιστοιχία, από τις 01/01/2023 ήρθε σε ισχύ ο δείκτης EEXI ο οποίος υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο και αφορά σε όλα τα πλοία ανεξαρτήτως της χρονιάς κατασκευής τους. [26]

Ο δείκτης CII ισχύει από 01/01/23 και εκφράζει τον λόγο του παραγόμενου CO₂ προς το συνολικό έργο που προσφέρει δηλαδή:

$$CII = \frac{\text{Annual Fuel Consumption} * CO_2 \text{emmission factor}}{\text{Capacity} * \text{Annual Distance Sailed}}$$

Κάθε χρόνο το πλοίο βαθμολογείται βάση του δείκτη που έχει επιτύχει και η βαθμολογία κυμαίνεται από Α έως Ε. Στην περίπτωση που το πλοίο βαθμολογηθεί με Ε μια χρονιά ή D για τρεις συνεχόμενες χρονιές πρέπει να προβεί σε βελτιώσεις. [27].

Πιο αναλυτικά, ο δείκτης CII λαμβάνει υπόψιν και ορισμένους διορθωτικούς συντελεστές ώστε να εφαρμόζεται καλύτερα ανάλογα με τον τύπο πλοίου που εξετάζει. Για ένα πλοίο LNG και ταξίδι που δεν αντιμετώπισε επικίνδυνες καιρικές συνθήκες ή έπλευσε σε παγωμένη θάλασσα ο τύπος υπολογισμού είναι [28]

$$CII = \frac{\sum CF_j * [FC_j - (0.75 - 0.03 * y_i) * (FC_{ELECTRICAL,j})]}{\text{Capacity} * Dt}$$

Όπου

- j: ο δείκτης που αντιστοιχεί σε κάθε διαφορετικό καύσιμο που χρησιμοποιείται. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα καύσιμα LNG, HFO και MDO.
- CF_j : ο συντελεστής μετατροπής της μάζας του καυσίμου j σε μάζα CO_2 . Για τα καύσιμα LNG, HFO και MDO ο συντελεστής αυτός αναφέρεται στον πίνακα 2.

FUEL	CF
LNG	2,75
MDO	3,206
HFO	3,114

Πίνακας 2 Συντελεστής μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO_2 [29]

- FC_j : η συνολική μάζα σε γραμμάρια καυσίμου j που καταναλώθηκε
- y_i : ένας δείκτης που ξεκινάει από το 0 για την χρονιά 2023 και αυξάνεται κατά μια μονάδα ετησίως
- $FC_{ELECTRICAL,j}$: η μάζα καυσίμου j που το πλοίο κατανάλωσε για την λειτουργία του συστήματος επανυδροποίησης του BOG
- Capacity: για τα LNGC είναι το DWT του πλοίου
- D_t : η συνολική απόσταση που διένυσε σε ναυτικά μίλια

Κανόνες που επηρεάζουν τα πλοία LNG έχει θεσπίσει και η Ευρωπαϊκή Ένωση. Από το 2015 έχει έρθει σε ισχύ ο κανονισμός MRV, που αφορά στην υποχρεωτική καταγραφή των ρύπων για τα πλοία που εισέρχονται σε λιμάνια της Ε.Ε. και έχει στόχο την δημιουργία νέων κανονισμών για τον περιορισμό τους [30]. Η πρώτη καταγραφή

ξεκίνησε το 2018 με αντικείμενο το CO₂. Από το 2024 θα καταγράφονται επιπλέον και τα αέρια του μεθανίου (CH₄) και του οξειδίου του αζώτου (N₂O).

Επιπλέον, η Ε.Ε. στα πλαίσια της δέσμης νομοθετημάτων “Fit for 55” που έχει στόχο την μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, έχει υιοθετήσει κανονισμούς που σχετίζονται με την ναυτιλία. Συγκεκριμένα, ο κανονισμός FuelEU Maritime επιβάλλει την σταδιακή μείωση του CO₂ που εκλύεται για την παραγωγή ενέργειας στο πλοίο επιβάλλοντας ίσως την ανάγκη για μερική χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Από το 2024 και μετά ισχύει και ο κανονισμός EU ETS (Emissions Trading System) για τα πλοία LNG ο οποίος περιορίζει την έκλυση αερίων CO₂ κάτω από ένα όριο του οποίου η τιμή διαμορφώνεται στην λογική ενός συστήματος δημοπρασίας. [31]

1.3.2 Λύσεις με σκοπό την συμμόρφωση στους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και επίδραση στο κόστος

Οι λύσεις που προτείνονται διαχωρίζονται σε επιχειρησιακές και τεχνικές προτάσεις και σήμερα περισσότερες από 40 βρίσκονται υπό εξέταση [32]. Το αρχικό κόστος για την εφαρμογή τους, η επίδραση τους στο λειτουργικό κόστος και ο βαθμός μείωσης των ρύπων ποικίλει για κάθε μία. Ορισμένες προτάσεις έχουν αρχίσει ήδη να εφαρμόζονται ενώ άλλες βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της εξέλιξης τους καθώς η αγορά των πλοίων LNG ή η υπάρχουσα τεχνολογία δεν μπορεί να τις υποστηρίξει ακόμα.

Στις επιχειρησιακές λύσεις εντάσσονται οι εξής:

- Η μείωση της ταχύτητας
- Η αποδοτική ανάθεση και εκτέλεση των συμβολαίων
- Ο τακτικός καθαρισμός της γάστρας
- Η στίλβωση της προπέλας
- Η επιλογή του αποδοτικότερου συνδυασμού βυθίσματος-διαγωγής
- Η χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων πηδαλιουχίας

Ειδικότερα για την μείωση της ταχύτητας, ως μέτρο μπορεί να μειώσει τους ρύπους σε μεγάλο βαθμό μειώνοντας κατά πολύ την κατανάλωση καυσίμου. Σαν γενικός κανόνας, η κατανάλωση καυσίμου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του πλοίου. Έτσι για μια μείωση 10% στην ταχύτητα, η κατανάλωση ελαττώνεται κατά 27% [33]. Αυτό είναι φυσικά θετικό σε ότι έχει να κάνει με το κόστος που αφορά στα καύσιμα. Πρέπει βέβαια να ληφθεί υπόψιν ότι μια μείωση στην ταχύτητα θα δυσκολέψει και την διάθεση του πλοίου για ναύλωση.

Σε συνδυασμό με το παραπάνω για την σωστή ανάθεση συμβολαίων στον στόλο πρέπει να δοθεί προσοχή στην ταχύτητα που απαιτείται για κάθε μεταφορά. Συμβόλαια με χαμηλότερη απαίτηση μπορούν να μειώσουν τόσο τους ρύπους όσο και το λειτουργικό κόστος, άμεσα ως αποτέλεσμα της μικρότερης κατανάλωσης καυσίμου αλλά και έμμεσα ελαττώνοντας την φορολογία άνθρακα που θα επιβληθεί

από το σύστημα EU ETS. Επίσης για την καλύτερη εκτέλεση των συμβολαίων συστήματα διόρθωσης της πορείας του πλοίου για αποφυγή δυσμενών καιρικών συνθηκών (Weather Routing) μπορούν να επιφέρουν μειώσεις έως και 5% [34] στην κατανάλωση καυσίμου στην κύρια μηχανή. Το κόστος αρχικής εγκατάστασης τους ανέρχεται στα 15k US\$ και η ετήσια συνδρομή τους ώστε να παραμένουν ενημερωμένα επιβαρύνει το λειτουργικό κόστος με 3k US\$ ετησίως [34].

Αντίστοιχα ορισμένες τεχνικές λύσεις είναι οι εξής:

- Βαφή χαμηλής τριβής στην γάστρα (Low friction hull coating)
- Προσθήκη του μηχανισμού Propeller boss can fins (PBCF) στην προπέλα
- Εφαρμογή Engine derating στην κύρια μηχανή
- Συστήματα δέσμευσης άνθρακα

Το Low friction hull coating είναι ένας τρόπος να μειωθεί η αντίσταση τριβής του πλοίου και άρα η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης και τελικά η κατανάλωση καυσίμου, το κόστος και οι ρύποι. Πρόκειται για μια βαφή η οποία εφαρμόζεται στα ύφαλα της γάστρας και εμποδίζει την ανάπτυξη μικροοργανισμών όπως φύκια και μαλάκια. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που εφαρμόζονται σήμερα που εμπίπτουν σε μία από τις δύο κατηγορίες, τις βιοκτόνες όπως ο ακρυλικός σιλυλεστέρας και της μη βιοκτόνες βαφές όπως οι Fouling Release βαφές [35]. Το λειτουργικό κόστος θα επιβαρυνθεί αφού η τιμή των βαφών αυτών εκτιμώνται στα 28-375k US\$ ανά πενταετία οπότε και η βαφή ανανεώνεται, θα υπάρξουν όμως και μειώσεις στο κόστος καυσίμων καθώς η κατανάλωση ελαττώνεται κατά 1-4% [32].

Ο μηχανισμός PBCF είναι μια βελτίωση στην σχεδίαση της υπάρχουσας προπέλας. Επάνω στην πλήμνη τοποθετούνται πτερύγια όπως φαίνεται στην εικόνα τα οποία εκμεταλλεύονται την δίνη που δημιουργείται στο συγκεκριμένο σημείο λόγω της έλικας αυξάνοντας την ταχύτητα του πλοίου για δεδομένη ισχύ πρόωσης. Η βελτίωση στην κατανάλωση καυσίμου υπολογίζεται στο 5-7% [36]. Ο μηχανισμός αυτός απεικονίζεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 13 Propeller Boss Can Fins [35]

Το Engine-Derating είναι στην ουσία η τροποποίηση της κύριας μηχανής ώστε να λειτουργεί αποδοτικότερα σε μια ισχύ που δεν είναι εξ αρχής σχεδιασμένη να λειτουργεί, αλλά έχει προκύψει ως συνέπεια της επιλογής μικρότερης ταχύτητας από αυτήν για την οποία το πλοίο είχε σχεδιαστεί. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους όπως με μείωση του μήκους διαδρομής του εμβόλου, αφαίρεση ενός ή περισσότερων στροβιλοσυμπιεστών, και αδρανοποιώντας μερικούς από τους κυλίνδρους. Το κόστος αυτής της μετατροπής διαφέρει πολύ από πλοίο σε πλοίο και ανάλογα με την μέθοδο που θα ακολουθηθεί η μείωση στην κατανάλωση κυμαίνεται από 2-10% [37].

Προκειμένου τα πλοία LNG να μειώσουν περαιτέρω την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα κατά την λειτουργία τους, εξετάζονται διάφορες τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂ (Carbon Capture Systems-CCS). Οι τεχνολογίες αυτές συναντώνται σήμερα σε άλλους τομείς της βιομηχανίας, στην ναυτιλία ωστόσο βρίσκονται σε ερευνητικό ακόμα στάδιο. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες που εφαρμόζονται στην βιομηχανία σήμερα. Η μέθοδος Oxy-fuel, δηλαδή η καύση μείγματος οξυγόνου-καυσίμου (Oxy-fuel method) αντί αέρος-καυσίμου και η μέθοδος pre-combustion carbon capture, μέθοδος κατά την οποία οι υδρογονάνθρακες του καυσίμου διασπώνται κυρίως σε CO₂ και H₂, δεν αποτελούν ρεαλιστικές λύσεις στην ναυτιλία καθώς απαιτούν ριζικές αλλαγές στην διάταξη και τον μηχανολογικό εξοπλισμό του πλοίου, μεγάλη αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου και επομένως πολύ σημαντική αύξηση του κόστους. Αντιθέτως, η μέθοδος post-combustion carbon capture είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμη καθώς απαιτεί μετασκευές κυρίως στο σύστημα διαχείρισης των καυσαερίων. Εφαρμόζεται για την απομάκρυνση του CO₂ από τα καυσαέρια και διαχωρίζεται στις τεχνικές της προσρόφησης (Adsorption), της χημικής απορρόφησης

(Chemical absorption), τον διαχωρισμό με μεμβράνες (Membrane separation) και την κρυογενική απόσταξη (Cryogenic Capture).

Η τεχνική της προσρόφησης γίνεται μέσω ενός στερεού προσροφητή. Αυτός μπορεί να είναι ο ζεόλιθος, μεταλλικά-οργανικά πλέγματα και υλικά με βάση τον άνθρακα όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα. Ο προσροφητής δεσμεύει το CO₂ σε πρώτη φάση από τα καυσαέρια και ύστερα το απελευθερώνει στον χώρο αποθήκευσης του κατά την διαδικασία της αναγέννησης του. Η χημική απορρόφηση μοιάζει ως προς την αρχή λειτουργίας της στην προσρόφηση αλλά είναι ικανή να δεσμεύσει μεγαλύτερα ποσοστά CO₂ και με μεγαλύτερη καθαρότητα στο τελικό μείγμα. Για τον λόγο αυτό, το μεγαλύτερο κομμάτι της έρευνας αφορά σε αυτήν την τεχνική. Συνηθέστερα χρησιμοποιεί ως απορροφητή αμίνες, όπως η μονοαιθυλαμίνη (MEA), διμεθυλαμίνη (DMEA) και η πιπεραζίνη (PZ), αμμωνία ή υδροξείδιο του νατρίου. Οι μεμβράνες διαχωρισμού των καυσαερίων, για χρήση στην ναυτιλία, είναι κατασκευασμένες από μικροπορώδεις ανόργανες ενώσεις και διαχωρίζουν τα καυσαέρια εκμεταλλευόμενες την διαφορετική διαπερατότητα αυτών [38]. Τέλος, η κρυογενική απόσταξη είναι μια τεχνική βασισμένη στο διαφορετικό σημείο βρασμού των αερίων που περιέχονται στα καυσαέρια. Στα αρνητικά, η απαίτηση σε θερμοκρασίες -100 με -135 °C και πιέσεις από 10 έως 20 MPa αυξάνουν την αναγκαιότητα για την διαδικασία ενέργεια, είναι όμως πολύ φιλική προς το περιβάλλον και έχει τον μεγαλύτερο βαθμό απορρόφησης. Οι τέσσερις τεχνικές κατατάσσονται ως προς το κόστος τους, τον βαθμό απορρόφησης CO₂ και το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η έρευνα τους στον πίνακα 3.

	Energy demand	Absorption Rate	Maturity of Research
Adsorption	2	3	2
Chemical Absorption	3	2	1
Membrane Separation	1	4	4
Cryogenic Separation	4	1	3

Πίνακας 3 Κατάταξη των τεχνικών Post-Combustion ως προς το κόστος, τον βαθμό απορρόφησης και το στάδιο έρευνας [38]

Το πλεονέκτημα των πλοίων μεταφοράς LNG που χρησιμοποιούν το αέριο και ως καύσιμο ως προς την εφαρμογή CCS είναι η ευκολία στον διαχωρισμό των καυσαερίων λόγω της καθαρότητας του LNG καθώς και η ύπαρξη μεγάλου μέρους του εξοπλισμού που απαιτεί η διαχείριση και αποθήκευση του CO₂ [39]. Η τεχνολογία ωστόσο παραμένει ακόμα πολύ κοστοβόρα ως αρχική επένδυση και με υψηλό λειτουργικό κόστος. Ενδεικτικά υπολογίζεται για την μέθοδο post-combustion με χρήση υδατικού διαλύματος MEA/PZ και χωρίς την απαίτηση αύξησης της διαθέσιμης ισχύος του πλοίου μπορεί να επιτευχθεί δέσμευση 73% στο CO₂ με κόστος 77,5 €/TonCO₂ [38].

2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Όπως έχει αναφερθεί στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου για την ανάθεση ενός στόλου πλοίων LNG σε διαθέσιμα συμβόλαια στην αγορά με το μικρότερο κόστος καθώς και η επίλυση του μοντέλου αυτού. Για την μοντελοποίηση του προβλήματος θα χρησιμοποιηθεί η θεωρία του γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming-LP) και συγκεκριμένα του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming-MILP). Η λύση θα παραχθεί με την χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου (Genetic Algorithm-GA) και συγκεκριμένα του γενετικού αλγόριθμου του λογισμικού Matlab. Θα πρέπει επιπλέον να οριστούν με σαφήνεια οι παράμετροι του προβλήματος, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί που διέπουν το πρόβλημα.

2.1 Γραμμικός προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι ένα εργαλείο της επιχειρησιακής έρευνας και έχει στόχο την εύρεση του βέλτιστου τρόπου ανάθεσης περιορισμένων πόρων σε ανταγωνιστικές λειτουργίες με τον πιο αποδοτικό τρόπο. Ορίζει δηλαδή σε τι επίπεδο θα χρησιμοποιηθεί κάθε πόρος από κάθε διαφορετική λειτουργία ώστε να παράγεται το βέλτιστο αποτέλεσμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λέξη προγραμματισμός εδώ έχει την έννοια της οργάνωσης-σχεδιασμού και δεν αφορά στον προγραμματισμό των υπολογιστών. Αντίστοιχα η λέξη γραμμικός προϋποθέτει ότι κάθε μαθηματική συνάρτηση του προβλήματος είναι μια γραμμική συνάρτηση.

Σταθμός για τον γραμμικό προγραμματισμό υπήρξε η ανάπτυξη του αλγορίθμου Simplex από τον George Dantzig το 1947 [40]. Έτσι, από τα μισά του προηγούμενου αιώνα επιχειρήσεις σε πολλούς κλάδους της οικονομίας όπως στην πολεμική βιομηχανία, στις τράπεζες, στην μεταφορά αγαθών υιοθετούν το μοντέλο για την συστηματικότερη οργάνωση της λειτουργίας τους. Η ταυτόχρονη εξέλιξη των υπολογιστών βοηθάει στην επίλυση των προβλημάτων αυτών που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ικανότητα. Μάλιστα ένα σημαντικό κομμάτι της επιστήμης των υπολογιστών έχει ασχοληθεί συγκεκριμένα με την μελέτη και την ανάπτυξη τρόπων επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού [41].

Η μαθηματική μοντελοποίηση ξεκινάει με τον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης (Objective function). Πρόκειται για την συνάρτηση για την οποία στόχος είναι η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της τιμής της αναλόγως του προβλήματος εντός του διαστήματος των εφικτών λύσεων. Ορίζεται ως εξής:

$$Z = \sum_i^n C_i * X_i$$

Όπου X_i είναι οι μεταβλητές απόφασης και C_i οι συντελεστές που αντιστοιχούν σε κάθε μεταβλητή και εκφράζουν το πόσο επηρεάζει κάθε μεταβλητή την τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης. Ισχύει πάντα $X_i \geq 0$.

Το πρόβλημα περιέχει επίσης και τους λεγόμενους περιορισμούς (Constraints) οι οποίοι ορίζουν το διάστημα που περιέχει τις εφικτές λύσεις. Οι περιορισμοί είναι ανισότητες της μορφής

$$a_{1,1} * X_1 + a_{1,2} * X_2 + \dots + a_{1,n} * X_n \leq b_1$$

$$a_{2,1} * X_1 + a_{2,2} * X_2 + \dots + a_{2,n} * X_n \leq b_2$$

...

$$a_{m,1} * X_1 + a_{m,2} * X_2 + \dots + a_{m,n} * X_n \leq b_m$$

Παρατηρείται ότι τόσο η χαρακτηριστική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις.

Το πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί σε μορφή πινάκων ως εξής

$$Z = CX$$

$$Ax \leq b$$

2.1.1 Ακέραιος-Δυαδικός Γραμμικός Προγραμματισμός

Πολλά προβλήματα στην καθημερινή ζωή απαιτούν κάποιες ή και όλες οι μεταβλητές απόφασης να παίρνουν ακέραιες τιμές προκειμένου η λύση τους να έχει νόημα. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι η ανάθεση εργατών, μηχανημάτων ή μεταφορικών μέσων σε διάφορες εργασίες. Σε αυτήν την περίπτωση, εισάγεται ένας ακόμη περιορισμός ώστε να εξασφαλίζεται πως όλες οι μεταβλητές είναι ακέραιοι μη αρνητικοί αριθμοί. Τέτοιου είδους προβλήματα χαρακτηρίζονται προβλήματα Ακέραιου Προγραμματισμού (Integer Programming-IP) εάν όλες οι μεταβλητές είναι ακέραιες ή Μεικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Programming-MIP) εάν μόνο μερικές από αυτές λαμβάνουν ακέραια τιμή. Ειδική υποκατηγορία του ακέραιου προγραμματισμού είναι ο δυαδικός προγραμματισμός, στον οποίο κάθε μεταβλητή που χρησιμοποιείται λαμβάνει τιμές 0 ή 1.

Εφόσον το μαθηματικό μοντέλο ενός τέτοιου προβλήματος περιλαμβάνει μόνο γραμμικές συναρτήσεις τότε ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία του Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Διάφοροι αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν για την εύρεση της βέλτιστης εφικτής λύσης όπως οι μέθοδοι branch-and-bound και cutting planes. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη πολύ αποτελεσματικών ευριστικών αλγορίθμων (heuristic algorithms) έχει δώσει νέα εργαλεία για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Ανάμεσα στις πιθανές επιλογές είναι οι αλγόριθμοι tabu search, simulated annealing και οι γενετικοί [41].

2.2 Γενετικοί αλγόριθμοι

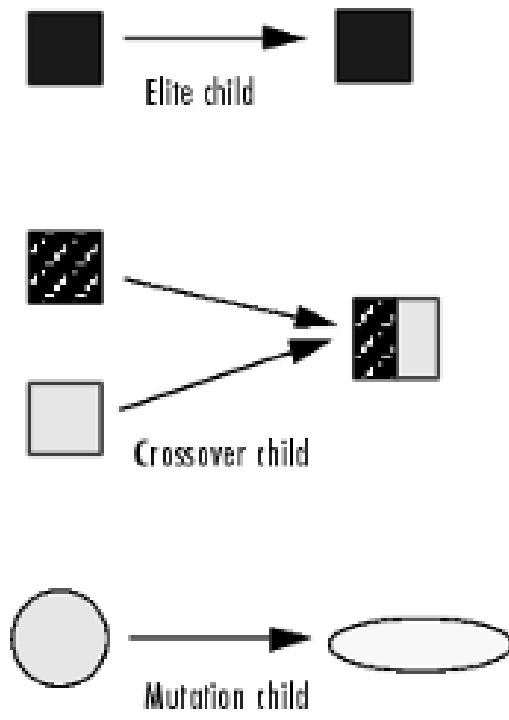
Οι γενετικοί ή εξελικτικοί αλγόριθμοι ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των ευριστικών αλγορίθμων. Ο τρόπος λειτουργίας τους μιμείται σε έναν βαθμό την θεωρία της εξέλιξης προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη από όλες τις δυνατές λύσεις.

Κάθε φυτό ή ζώο κληρονομεί τα χρωμοσώματα του από τους δύο γονείς του. Τα χρωμοσώματα αυτά περιέχουν μέσα τους τα γονίδια τα οποία καθορίζουν τα χαρακτηριστικά κάθε οργανισμού. Μέσα από την αναπαραγωγική διαδικασία προκύπτουν με τυχαίο τρόπο άπειροι διαφορετικοί συνδυασμοί και επομένως διαφορετικοί απόγονοι ανάλογα με το ποια γονίδια κληρονόμησαν από τους γονείς τους. Οι οργανισμοί εκείνοι που ευνοήθηκαν διαθέτουν χαρακτηριστικά που τους κάνουν ισχυρότερους και επομένως αυξάνεται η πιθανότητα για τους ίδιους να γίνουν γονείς και να μεταβιβάσουν στους απογόνους τους την πληροφορία εκείνη που τους κάνει πιο ισχυρούς. Με τον τρόπο αυτό οι οργανισμοί εξελίσσονται από γενιά σε γενιά. Ένα ακόμα φαινόμενο που επηρεάζει την εξέλιξη αυτή είναι οι μεταλλάξεις. Οι μεταλλάξεις οφείλονται σε αλλοιώσεις του γενετικού υλικού και προσδίδουν και αυτές ιδιαιτερότητες στους απογόνους. Ενώ συνήθως, οι μεταλλάξεις αυτές μπορεί να είναι αρνητικές ή ακόμα και να μην επηρεάζουν έναν απόγονο δεν λείπουν και οι φορές που μια μετάλλαξη αποτελεί πλεονέκτημα. Στην περίπτωση αυτή, ο οργανισμός με το πλεονέκτημα αυξάνει τις πιθανότητες του να αναπαραχθεί [41].

Με παρόμοιο τρόπο οι γενετικοί αλγόριθμοι βρίσκουν αρχικά έναν αριθμό εφικτών λύσεων οι οποίες αποτελούν τον πληθυσμό. Κάθε μια από τις λύσεις αξιολογείται με βάση την τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης που αντιστοιχεί σε αυτήν. Με ευνοϊκό τρόπο για τις λύσεις που αξιολογούνται καλύτερα επιλέγονται κάποιες για να διασταυρωθούν με τυχαίο τρόπο μεταξύ τους προκειμένου να προκύψει η επόμενη γενιά λύσεων του αλγορίθμου. Μέσα από αυτήν την διασταύρωση τα δύο διανύσματα ένα από κάθε λύση-γονέα, που περιέχουν τις τιμές των μεταβλητών συνδιαμορφώνουν το διάνυσμα της λύσης-παιδιού. Οι λύσεις που προκύπτουν από αυτήν την διαδικασία ονομάζονται Cross-over Children. Σε κάθε γενιά του αλγορίθμου εφαρμόζονται επιπλέον και ορισμένες μεταλλάξεις προκειμένου να εξερευνηθούν λύσεις οι οποίες δεν προκύπτουν από τον αρχικό πληθυσμό. Αυτές είναι οι Mutation Children. Τέλος σε αντίθεση με την φυσική διαδικασία, ο αλγόριθμος επιτρέπει σε έναν αριθμό από τις καλύτερες λύσεις να περνάνε αυτούσιες στην επόμενη γενιά. Οι λύσεις αυτές ονομάζονται Elite Children [41]. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν ένα από τα ακόλουθα κριτήρια τερματισμού ικανοποιείται:

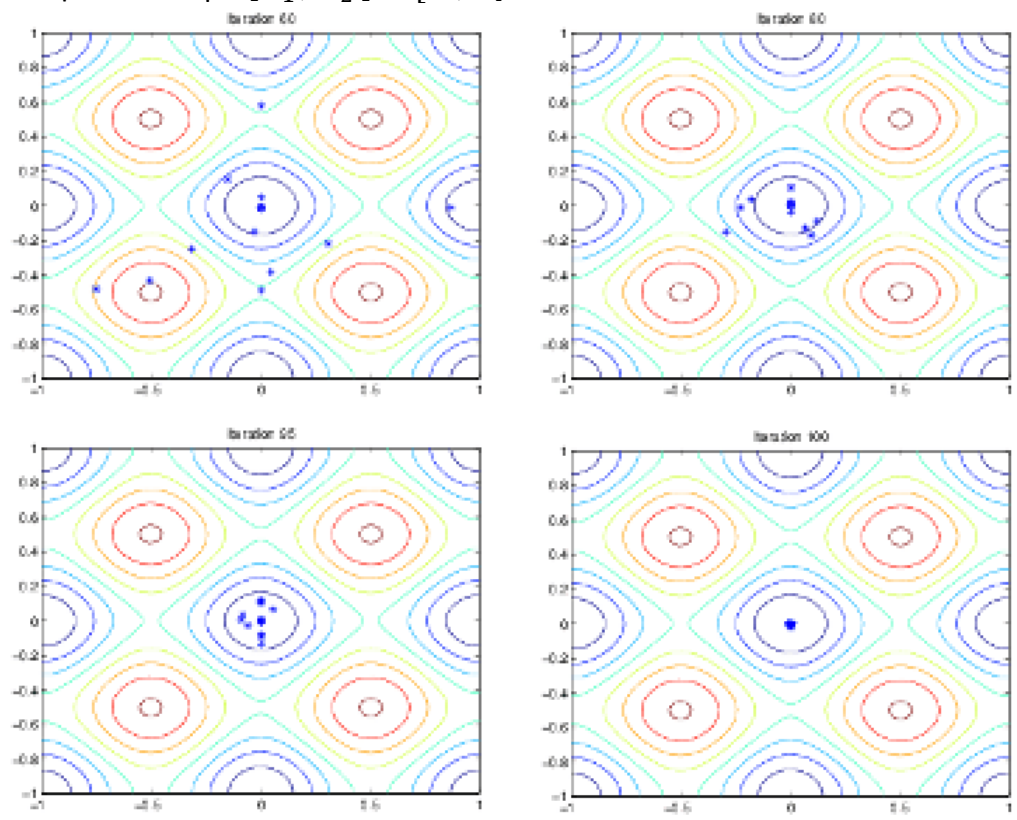
- Επίτευξη μέγιστου αριθμού γενεών
- Υπέρβαση χρόνου τρεξίματος
- Εύρεση λύσης με τιμή χαρακτηριστικής συνάρτησης μικρότερη από ένα δοθέν όριο
- Αδυναμία εύρεσης λύσης με αξιόλογη διαφορά στην τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης

Για τα προβλήματα που έχουν ακέραιους και γραμμικούς περιορισμούς το λογισμικό του Matlab ελέγχει ότι οι παραγόμενες σε κάθε γενιά λύσεις ικανοποιούν αυτούς τους περιορισμούς [42].



Εικόνα 15 Σχηματική αναπαράσταση των τρόπων παραγωγής απογόνων [42]

Με τον τρόπο αυτό ο αλγόριθμος καταλήγει στην βέλτιστη ή έστω σε μία πάρα πολύ καλή λύση. Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται η σύγκλιση των λύσεων του πληθυσμού σε διάφορα στάδια του αλγορίθμου για ένα πρόβλημα δύο μεταβλητών με λύση το διάνυσμα $[x_1, x_2] = [0, 0]$



Εικόνα 14 Σύγκλιση των λύσεων μετά από 60,80,95,100 γενιές [42]

3 Ανασκόπηση σχετικής επιστημονικής βιβλιογραφίας

Είναι απαραίτητο να παρουσιαστεί η βιβλιογραφία που ασχολείται με το πρόβλημα της ανάθεσης στόλου και ιδιαίτερα πλοίων μεταφοράς LNG. Διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί που βασίζονται στον γραμμικό ή μη- γραμμικό προγραμματισμό, με ακέραιες ή και συνεχείς μεταβλητές, και μια σειρά εργαλείων έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Τα τελευταία χρόνια δίνεται από κάποιους μελετητές και ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη μοντέλων που θα λαμβάνουν υπόψιν και περιβαλλοντικούς παράγοντες, που έχουν εισέλθει στην ναυτιλία.

Οι V. Goel, M. Slusky, W.-J. van Hoevec, K.C. Furman, Y. Shao (2014) προτείνουν για το πρόβλημα δρομολόγησης αποθεμάτων (Inventory Routing Problem-IRP) LNG δύο μοντέλα προγραμματισμού περιορισμών (Constraint Programming). Το πρώτο μοντέλο, εξετάζει την σκοπιά των τερματικών σταθμών υγροποίησης και επαναεριοποίησης, με τον στόχο να είναι η διαμόρφωση του προγράμματος δρομολόγησης του στόλου έτσι ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των τερματικών με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Το δεύτερο μοντέλο εστιάζει στα πλοία, τα οποία επιλέγουν ποιος είναι ο βέλτιστος τρόπος για να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες των διαθέσιμων σταθμών. Για την ταχύτερη επίλυση τους αναπτύσσεται και ένας ευριστικός αλγόριθμος ο οποίος παρέχει καλές εφικτές αρχικές λύσεις στα δύο μοντέλα. Ο χρονικός ορίζοντας ορίζεται το ένα έτος. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται ως προς τον χρόνο και την ποιότητα της λύσης που παρέχουν με ένα μοντέλο μεικτού ακέραιου προγραμματισμού. Για την επίλυση των περιπτώσεων που εξετάζονται χρησιμοποιούνται τα προγράμματα CPLEX 11.1 και CPOptimizer 12.1 [43].

Οι Jaeyoung Cho, Gino J. Limb, Seon Jin Kimb, Taofeek Biobakuc (2017) διατυπώνουν ένα πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων LNG λαμβάνοντας υπόψιν το επιπλέον κόστος που προσθέτουν οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες στην μεταφορά LNG. Διαμορφώνει δύο μοντέλα για την επίλυση του προβλήματος. Το πρώτο μοντέλο είναι μεικτού ακέραιου προγραμματισμού, στοχαστικό ως προς την πιθανότητα εμφάνισης κακοκαιρίας και έχει στόχο την αύξηση του κέρδους μειώνοντας το κόστος που προστίθεται στον στόλο αλλά και στον σταθμό υγροποίησης όταν οι καιρικές συνθήκες καθυστερούν την φόρτωση. Το δεύτερο μοντέλο είναι ντετερμινιστικό ως προς τις καιρικές συνθήκες επιτρέποντας στον πλοιοκτήτη να τις καθορίσει διαλέγοντας έτσι τον βαθμό ρίσκου που θα αναλάβει. Για την επίλυση χρησιμοποιείται το πρόγραμμα CPLEX 12.6 το οποίο όμως αρχικά δεν καταφέρνει να δώσει λύσεις εντός 24 ωρών. Για το λόγο αυτό προστίθενται δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο μειώνει τις μεταβλητές χρησιμοποιώντας μια Probing Based Preprocessing τεχνική για να απορρίψει προφανείς μη εφικτές ή και κακές λύσεις ενώ το δεύτερο στάδιο θέτει ένα άνω όριο στις εφικτές λύσεις. Οι τύποι πλοίων που εξετάζονται διαφέρουν ως προς το μέγεθος και τις δυνατότητες φόρτωσης, με ορισμένα πλοία να μπορούν να φορτωθούν και μερικώς [44].

Οι Mohamed Kais Msakni, Mohamed Haouari (2018) εξετάζουν τον προγραμματισμό ενός στόλου LNG που εξυπηρετεί μακροχρόνια συμβόλαια και ταυτόχρονα εκμεταλλεύεται την Spot αγορά. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους με την επιλογή κατάλληλων spot συμβολαίων όταν αυτό είναι δυνατό. Ο στόλος είναι ετερογενής και οι περιορισμοί του προβλήματος λαμβάνουν υπόψιν τον χρόνο που είναι διαθέσιμο το πλοίο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τερματικών. Διαμορφώνεται ένα μοντέλο μεικτού αέριου προγραμματισμού το οποίο επιλύεται με μια ευριστική μέθοδο, συγκεκριμένα την neighborhood search procedure. Μια δεύτερη μέθοδος αναπτύσσεται η οποία παρότι δεν λαμβάνει υπόψιν τον περιορισμό για αέριες μεταβλητές χρησιμοποιείται για να παραχθεί ένα ανώτατο όριο για τις διαθέσιμες λύσεις. Με τον τρόπο αυτό συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα της πρώτης μεθόδου. Χρονικός ορίζοντας είναι οι 90 ημέρες και για την επίλυση των μοντέλων αναπτύσσεται κατάλληλος αλγόριθμος σε C++ και χρησιμοποιείται το πρόγραμμα IBM ILOG CPLEX [45].

Οι A. Bittante, F. Pettersson, H. Saxen (2018) χρησιμοποιούν μεικτό γραμμικό προγραμματισμό με σκοπό την επιλογή των κατάλληλων τύπων πλοίου για την κάλυψη των αναγκών ενός αριθμού τερματικών επαναεριοποίησης και κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς. Χρησιμοποιεί τρεις μεταβλητές, μια αέρεια για τον προσδιορισμό του τύπου πλοίου, μια επίσης αέρεια ως μετρητή για τις φορές που πραγματοποιείται κάθε διαδρομή και μια συνεχής για την μεταφερόμενη ποσότητα LNG. Εξετάζει έναν ετερογενή στόλο πλοίων χωρητικότητας από 7.500 έως 120.000 m³. Στα πλοία επιτρέπεται να παραλαμβάνουν φορτίο από έναν σταθμό υγροποίησης ενώ μπορούν να παραδίδουν σε παραπάνω από έναν σταθμούς επαναεριοποίησης στο ίδιο ταξίδι. Ο χρονικός ορίζοντας που εξετάζεται είναι 30 ημέρες. Η μελέτη περίπτωσης που αναπτύσσεται επιλύεται με το πρόγραμμα AIMMS4.6-IBM ILOG CPLEX Optimizer. Τέλος, εξετάζεται το πως διαφοροποιούν την επιλογή του στόλου η τιμή του LNG, οι αυξήσεις στον χρόνο ταξιδιού ή στους χρόνους ελλιμενισμού και η αβεβαιότητα στην ζήτηση των σταθμών επαναεριοποίησης [46].

Οι C. Papaleonidas, Dimitrios V. Lyridis, Alexios Papakostas και Dimitris A. Konstantinidis (2020) αναπτύσσουν ένα μοντέλο μεικτού αέριου προγραμματισμού με στόχο την ανάθεση ενός στόλου LNGCs με το μικρότερο λειτουργικό κόστος. Ο στόλος αποτελείται από τρεις διαφορετικούς τύπους πλοίων και ο χρονικός ορίζοντας που εξετάζεται είναι το ένα έτος. Το μοντέλο επιλύεται με την χρήση του γενετικού αλγορίθμου της Matlab για διάφορα σενάρια. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση της τιμής του καυσίμου LNG με στοχαστικό τρόπο [47].

Οι Zhongbin Zhao, Xifu Wang, Hao Wang, Suxin Cheng and Wei Liu (2022) αναπτύσσουν ένα μοντέλο μη γραμμικού αέριου προγραμματισμού με στόχο την ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους ενός στόλου LNG. Το μοντέλο αυτό επιλύεται με την χρήση του προγράμματος LINGO 17.0, ένα πρόγραμμα που εξειδικεύεται στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, επιλέγοντας έναν υβριδικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Δημιουργείται ένα σενάριο που περιλαμβάνει τον συνδυασμό τριών τύπων πλοίου LNG που διαφοροποιούνται ως προς την

χωρητικότητα τους και ανατίθενται σε τρία συμβόλαια. Η λύση συγκρίνεται και με παλαιότερο μοντέλο στο ίδιο πρόγραμμα ως προς το κόστος. Εξετάζουν την ευαισθησία του κόστους σε μεταβολές της τιμής των καυσίμων, της τιμής του προϊόντος, των τελών λιμανιού και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν το λειτουργικό κόστος. Τέλος προτείνονται λύσεις προς όλα τα εμπλεκόμενα μέλη στην μεταφορά του LNG προκειμένου να μειωθεί η ευαισθησία του κόστους ως προς τους παράγοντες που εξετάζονται και να μειωθεί συνολικά το λειτουργικό κόστος [33].

Οι Sara Al-Haidous, Rajesh Govindan, Adel Elomri, Tareq Al-Ansari (2022) εξετάζουν το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της ανάθεσης του στόλου λαμβάνοντας υπόψιν τους οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Αναπτύσσουν δύο χαρακτηριστικές συναρτήσεις, μία για το κόστος και μια για την εκπομπή ρύπων, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο μεικτού αέριου γραμμικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα επιλύεται με μια ευριστική μέθοδο και συγκεκριμένα έναν BPSO (Binary Particle Swarm Optimization) αλγόριθμο. Εξετάζουν μια σειρά πλοίων από 160.000 m³ έως την κατηγορία Qmax, τα οποία χρησιμοποιούν ως καύσιμο HFO, LNG ή και τα δύο. Ο χρονικός ορίζοντας επιλέγεται να είναι ένας μήνας στην διάρκεια του οποίου, δίνεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης παραπάνω από ενός σταθμού επαναεριοποίησης σε κάθε πλοίο. Αυτή η δυνατότητα μειώνει σημαντικά την τιμή και του κόστους και των ρύπων [48].

Οι Weihao Ma, Shunfeng Hao, Dongfang Ma, Dianhai Wang, Sheng Jin, Fengzhong Qu (2022) εξετάζουν το πρόβλημα της επιλογής κατάλληλων διαδρομών για πλοία Bulk carrier μέσα σε ζώνες Emission Control Area (ECA). Αναπτύσσουν έναν γενετικό αλγόριθμο και εξετάζουν τέσσερις μεταβλητές που έχουν να κάνουν με την διαδρομή του πλοίου, την ταχύτητα και την ποσότητα LSFO και MGO που θα χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο. Το μοντέλο που προκύπτει ανήκει στην κατηγορία του μεικτού μη-γραμμικού προγραμματισμού και η χαρακτηριστική συνάρτηση έχει στόχο την μείωση του κόστους μέσω του βέλτιστου συνδυασμού των παραπάνω μεταβλητών απόφασης [49].

Οι Firmanto Hadi, Heri Supomo, Tri Achmad (2023) εστιάζοντας στην industrial ναυτιλία με χρονικό ορίζοντα τα 20 χρόνια προσεγγίζει την μεταφορά LNG ως milk-run μεταφορά. Στο πρόβλημα που επιλύει ένα πλοίο ξεκινώντας από έναν τερματικό σταθμό υγροποίησης φυσικού αερίου μεταφέρει LNG σε πολλούς μικρότερους τερματικούς επαναεριοποίησης. Στόχος είναι η ανάθεση του κατάλληλου τύπου πλοίου LNG λαμβάνοντας υπόψιν την χωρητικότητα του με το μικρότερο κόστος. Τα πλοία που συγκρίνονται έχουν χωρητικότητα από 1.000 έως 65.000 m³. Για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου που προτείνεται χρησιμοποιείται γενετικός αλγόριθμος. Το κόστος αποτελείται από το λειτουργικό κόστος του πλοίου καθώς και το κόστος επένδυσης τόσο για το ίδιο το πλοίο όσο και για τον σταθμό επαναεριοποίησης που θα το υποδεχτεί [50].

Οι Indranil Deb, Ranjan Kumar Gupta (2023) χρησιμοποιούν τον δικό τους γενετικό αλγόριθμο εφαρμόζοντας τον σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης του κόστους μεταφοράς εμπορευμάτων από έναν αριθμό αρχικών σε έναν αριθμό

τερματικών σταθμών. Η έρευνα περιορίζεται στην επίλυση του ισορροπημένου προβλήματος μεταφοράς. Λαμβάνεται υπόψιν το κόστος για την μεταφορά κάθε μονάδας προϊόντος καθώς και οι περιορισμοί της ζήτησης των τερματικών σταθμών και της προσφοράς των αρχικών σταθμών. Ο αλγόριθμος εξετάζεται ως προς την ακρίβειά και την ταχύτητά του για διάφορες αλλαγές στις χαρακτηριστικές παραμέτρους των γενετικών αλγορίθμων, όπως ο αρχικός πληθυσμός, ο τρόπος παραγωγής των απογόνων και οι γενιές μέχρι τον τερματισμό του αλγόριθμου [51].

Στην συγκεκριμένη εργασία έχουμε συμφωνία ως προς το μαθηματικό μοντέλο με τον Paraleonida [47]. Ο αλγόριθμος που κατασκευάζεται εφαρμόζεται σε σενάρια με περισσότερες παραμέτρους αυξάνοντας των αριθμό των πλοίων και των συμβολαίων. Σκοπός είναι να αξιολογηθεί η δυνατότητα επέκτασης του γενετικού αλγορίθμου σε δυσκολότερες εφαρμογές. Για να γίνει αυτό παράγουμε επιπλέον αποτελέσματα ως προς την ταχύτητα του, υπολογίζοντας τον χρόνο που χρειάζεται ο αλγόριθμος για την επίλυση του μοντέλου και τον αριθμό των φορών που χρειάζεται να κληθεί η χαρακτηριστική συνάρτηση. Επιπλέον, η μεταβολή της τιμής και των τριών καυσίμων λαμβάνεται υπόψιν με ντετερμινιστικό τρόπο. Τέλος, με επίκεντρο τις ανάγκες της ναυτιλίας σήμερα, εξετάζουμε πλοία πιο σύγχρονα και παράγουμε αποτελέσματα για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του στόλου υπολογίζοντας τον δείκτη CII.

4 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

4.1 Μεθοδολογική προσέγγιση

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση των ευριστικών αλγορίθμων και συγκεκριμένα των γενετικών (εξελικτικών) αλγορίθμων ως προς την εφαρμογή τους ως εργαλείο στην ναυτιλία LNG. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι δυνατότητες των γενετικών αλγορίθμων στην διαδικασία ανάθεσης του διαθέσιμου στόλου σε κατάλληλα συμβόλαια με σκοπό την μείωση του λειτουργικού κόστους. Ο λόγος που επιλέγεται μια τέτοια μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης είναι λόγω του μεγάλου πλήθους των μεταβλητών και των περιορισμών που περιέχει, ιδιαίτερα όσο ο στόλος και τα διαθέσιμα συμβόλαια αυξάνονται.

Εστιάζοντας στο κομμάτι της εφοδιαστικής αλυσίδας που αφορά στην μεταφορά του LNG με πλοία εξετάζουμε τον τρόπο μείωσης του λειτουργικού κόστους μέσα από την σωστή διαχείριση του στόλου που προκύπτει από την καλές αποφάσεις για την ανάθεση των πλοίων σε συμβόλαια. Οι αποφάσεις αυτές παίρνονται κυρίως με εμπειρικό τρόπο μέχρι σήμερα λόγω της έλλειψης επιστημονικών εργαλείων που υπάρχει. Η προσέγγιση που εξετάζεται διαφέρει από την μέχρι τώρα πρακτική και σε ένα ακόμα σημείο καθώς προτείνει την συνεργασία πλοιοκτήτη και ναυλωτή στην διαδικασία του προγραμματισμού. Λαμβάνονται υπόψιν δηλαδή τα σταθερά κόστη του πλοίου που αναλαμβάνει ο πλοιοκτήτης, όπως τα σταθερά έξοδα για συντήρηση του πλοίου και οι μισθοί του πληρώματος, αλλά και τα έξοδα που αναλαμβάνει ο ναυλωτής όπως τα έξοδα των καυσίμων των τελών στα λιμάνια και τα τέλη καναλιών. Αυτόν τον από κοινού σχεδιασμό έχουν λόγο να τον στηρίξουν και οι δύο πλευρές. Από την πλευρά του ναυλωτή, η επιλογή συγκριτικά καλύτερων συμβολαίων με μικρότερες αποστάσεις σημαίνει μείωση των καυσίμων αλλά και περισσότερο μεταφερόμενο φορτίο αφού υπάρχει μικρότερη απώλεια λόγω BOG. Από την πλευρά του πλοιοκτήτη μείωση του λειτουργικού κόστους σημαίνει μεγαλύτερο περιθώριο για αύξηση στα ναύλα του πλοίου.

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η αγορά των short-term συμβολαίων. Η αγορά αυτή δεν φαίνεται να έχει μελετηθεί μέχρι σήμερα πιθανότατα επειδή είδε απότομη αύξηση τα τελευταία χρόνια, ενώ τα προηγούμενα η συντριπτική πλειοψηφία του LNG μεταφερόταν μέσα από συμβόλαια μεγάλης και μεσαίας διάρκειας. Έτσι ο χρονικός ορίζοντας που λαμβάνεται υπόψιν είναι το ένα έτος. Σε ότι αφορά τα κόστη, επειδή το εργαλείο που δημιουργείται εφαρμόζεται σε έναν υπαρκτό στόλο, δεν έχουν ληφθεί υπόψιν τα κόστη που αφορούν στο αρχικό κεφάλαιο.

Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύσσεται ο κώδικας ο οποίος βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο του Paraleonidas (2019) [47], στο περιβάλλον του Matlab. Ο κώδικας αυτός περιλαμβάνει την μετατροπή των μαθηματικών σχέσεων του μοντέλου σε κατάλληλους πίνακες, την εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τα χαρακτηριστικά των πλοίων, όπως η θέση τους, η χωρητικότητα τους, οι καταναλώσεις τους καθώς και χαρακτηριστικά των συμβολαίων όπως η απαιτούμενη ποσότητα LNG και η απόσταση μεταξύ του τερματικού υγροποίησης και

επαναεριοποίησης. Κάνει όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς και τέλος προχωράει στην κλήση της συνάρτησης ga που περιέχεται στο πακέτο Global Optimization Toolbox του Matlab. Στην συνάρτηση ga γίνονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ικανοποιητικά στο παρόν πρόβλημα.

Συνολικά δημιουργούνται αρκετά σενάρια, με ολοένα και αυξανόμενα συμβόλαια και πλοία. Στόχος είναι να εξεταστεί η ταχύτητα του αλγορίθμου για αύξηση των μεταβλητών απόφασης. Η ταχύτητα εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του υπολογιστή που χρησιμοποιείται. Για αυτό τον λόγο επιλέγεται ένα εναλλακτικό κριτήριο προκειμένου να αξιολογηθεί ο αλγόριθμος με πιο αντικειμενικό τρόπο. Σε κάθε σενάριο καταγράφεται ο αριθμός που χρειάστηκε να κληθεί η χαρακτηριστική συνάρτηση μέχρι να υπολογιστεί η λύση. Επιπλέον, στα σενάρια που κρίνεται απαραίτητο πραγματοποιούνται δύο διαφορετικές επιλύσεις αλλάζοντας τον πληθυσμό και τον χρόνο που ο αλγόριθμος εξετάζει το κάθε πρόβλημα. Οι δύο λύσεις που προκύπτουν συγκρίνονται ποιοτικά μεταξύ τους ώστε να εξακριβωθεί η ακρίβεια του αλγορίθμου. Επιπλέον γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του λειτουργικού κόστους για αλλαγή της τιμής των καυσίμων προκειμένου ο πλοιοκτήτης που θα χρησιμοποιήσει το συγκεκριμένο εργαλείο να έχει πιο ολοκληρωμένη εικόνα για να κάνει τις προβλέψεις του. Τέλος, καθώς ήδη φαίνεται η σημασία των κανονισμών, σχετικά με την σημασία του περιβάλλοντος, στην λήψη αποφάσεων στην ναυτιλία παράγεται και ο δείκτης CII κάθε πλοίου για την λύση στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει.

Με στόχο τα αποτελέσματα που παράγονται να είναι ρεαλιστικά και επομένως ευκολότερα στο να αξιολογηθούν γίνεται μια ανασκόπηση των τεχνολογιών που αυτή την στιγμή χρησιμοποιούνται στην ναυτιλία LNG. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι συνηθέστεροι τύποι πρόωσης καθώς και ο τύποι δεξαμενών που συναντώνται στα πλοία. Τα δυο αυτά χαρακτηριστικά είναι οι πιο καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν το λειτουργικό κόστος, αφού σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμου, το κόστος των ανταλλακτικών, την δυνατότητα του πλοίου να ξεφορτώνει σε πολλά τερματικά, το μέγεθος του πληρώματος και την ποσότητα του BOG που απελευθερώνεται. Οι χωρητικότητες των πλοίων λαμβάνονται σκόπιμα στο εύρος 160.000-180.000 m³ καθώς εκεί συναντάται ο μεγαλύτερος όγκος των πλοίων που κατασκευάζονται σήμερα. Το μέγεθος αυτό προσφέρει και μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με μεγαλύτερα πλοία της κατηγορίας Q-max και Q-FLEX σε ότι αφορά τεχνικούς περιορισμούς που έχουν να κάνουν με την δυνατότητα ελλιμενισμού στους τερματικούς σταθμούς. Τέτοιο περιορισμοί δεν λαμβάνονται υπόψη στην συγκεκριμένη εργασία.

4.2 Περιγραφή του αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος ξεκινάει με την εισαγωγή παραμέτρων που αφορούν στα χαρακτηριστικά ενός στόλου LNGC που αποτελείται από V αριθμό πλοίων καθώς και στα χαρακτηριστικά ενός αριθμού C συμβολαίων. Επιπλέον εισάγονται και ένας

αριθμός διαφορετικών συνδυασμών των τιμών του HFO, MDO και LNG δηλαδή των καυσίμων του πλοίου. Τα στοιχεία αυτά διαβάζονται από τον αλγόριθμο μέσα από φύλλα Excel τα οποία εύκολα τροποποιούνται δίνοντας στον αλγόριθμο την δυνατότητα να μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικά σενάρια. Στην συνέχεια γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την διαμόρφωση της χαρακτηριστικής συνάρτησης βάση του μοντέλου του Paraleonidas [47], που περιλαμβάνει τις μεταβλητές απόφασης $X_{v,c}$ και μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κόστους. Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος ορίζονται ως δυαδικές $X_{v,c} = (0 \text{ ή } 1)$ και απαντάνε με ναι ή όχι στην ερώτηση εάν έχει ανατεθεί το πλοίο v στο συμβόλαιο c . Προκύπτει δηλαδή ένας πίνακας X με γραμμές όσες το πλήθος των πλοίων και στήλες όσες το πλήθος των συμβολαίων. Για ένα σενάριο με 3 πλοία και 3 συμβόλαια ο πίνακας αυτός θα είναι της μορφής:

$$X = \begin{array}{|c|c|c|} \hline X_{1,1} & X_{1,2} & X_{1,3} \\ \hline X_{2,1} & X_{2,2} & X_{2,3} \\ \hline X_{3,1} & X_{3,2} & X_{3,3} \\ \hline \end{array}$$

Στην συνέχεια μοντελοποιούνται κατάλληλα και οι περιορισμοί και τέλος υπολογίζεται ο τρόπος με τον οποίο κατανέμονται τα πλοία στα συμβόλαια και το συνολικό λειτουργικό κόστος για έναν μεγάλο αριθμό συνδυασμών τιμών καυσίμων. Επιπλέον υπολογίζεται και ο δείκτης CII για κάθε πλοίο. Τέλος, ως ένδειξη της ικανότητας του αλγορίθμου να παράγει γρήγορα το αποτέλεσμα υπολογίζεται η τιμή funcscout που δηλώνει πόσες φορές χρειάστηκε να κληθεί και να υπολογιστεί η χαρακτηριστική συνάρτηση καθώς και ο χρόνος εύρεσης της λύσης.

4.2.1 Παράμετροι του προβλήματος

Σε αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο να οριστούν οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του προβλήματος.

- Δείκτης c : Πρόκειται για τον δείκτη που χρησιμοποιείται για να γίνει αναφορά σε ένα συμβόλαιο. Παίρνει τιμές $\{1, \dots, C\}$ όπου C το πλήθος των συμβολαίων
- Δείκτης v : Πρόκειται για τον δείκτη που χρησιμοποιείται για να γίνει αναφορά σε ένα πλοίο. Παίρνει τιμές $\{1, \dots, V\}$ όπου V το πλήθος των πλοίων
- Δείκτης L : Πρόκειται για τον δείκτη που χρησιμοποιείται για να γίνει αναφορά σε ένα τερματικό σταθμό υδροποίησης LNG. Παίρνει τιμές $\{1, \dots, NL\}$ όπου NL το πλήθος των τερματικών σταθμών υδροποίησης
- Δείκτης R : Πρόκειται για τον δείκτη που χρησιμοποιείται για να γίνει αναφορά σε ένα σταθμό επαναεριοποίησης. Παίρνει τιμές $\{1, \dots, NR\}$ όπου NR το πλήθος των σταθμών επαναεριοποίησης
- T_{HOR} : Αναφέρεται στον χρονικό ορίζοντα για τον οποίο εξετάζουμε το πρόβλημα και έχει μονάδα μέτρησης days.
- $S_{VBALLAST,v}$: Η ταχύτητα του πλοίου v σε κατάσταση Ballast. Έχει μονάδες μέτρησης kn

- $Sv_{LADEN,v}$: Η ταχύτητα του πλοίου v σε κατάσταση έμφορτη. Έχει μονάδες μέτρησης kn
- Cap_v : Η χωρητικότητα σε LNG του πλοίου v σε m^3
- VFC_v : το σταθερό ετήσιο κόστος του πλοίου v σε $\$$
- D_c : Η ετήσια ζήτηση LNG όπως αναφέρεται σε ένα συμβόλαιο c σε m^3
- $R_{max,c}$: Η μέγιστη ετήσια ποσότητα LNG που μπορεί να επαναεριοποιηθεί ο τερματικός σταθμός R όπως αναφέρεται σε ένα συμβόλαιο c σε m^3
- N : Ο αριθμός των παραδόσεων φορτίου από το πλοίο v . Λαμβάνει ακέραιες τιμές
- $Lv_{INITIAL,L,v}$: Η τυχαία αρχική απόσταση του πλοίου v από τον σταθμό L σε nm
- $Dur_{INITIAL,vc}$: Ο χρόνος ταξιδιού προκειμένου το πλοίο v να μεταφερθεί από την αρχική του θέση στον σταθμό υγροποίησης L που ορίζεται στο συμβόλαιο c σε days και υπολογίζεται ως το πηλίκο της τυχαίας αρχικής απόστασης προς την απόσταση που διανύει το πλοίο άφορτο σε μια ημέρα

$$Dur_{INITIAL,vc} = \frac{Lv_{INITIAL,L,v}}{Sv_{BALLAST,v} * 24}$$

- LR_c : Η απόσταση μεταξύ των τερματικών L και R όπως αναφέρεται στο συμβόλαιο v σε nm
- $Dur_{VLADEN,vc}$: Ο χρόνος ταξιδιού από τον σταθμό L στον σταθμό R στην έμφορτη κατάσταση σε days και υπολογίζεται ως το πηλίκο της απόστασης μεταξύ των δύο σταθμών προς την απόσταση που διανύει το πλοίο έμφορτο σε μια ημέρα

$$Dur_{VLADEN,vc} = \frac{LR_c}{Sv_{LADEN,v} * 24}$$

- $Dur_{VBALLAST,vc}$: Ο χρόνος ταξιδιού από τον σταθμό R στον σταθμό L στην άφορτη κατάσταση σε days και υπολογίζεται ως το πηλίκο της απόστασης μεταξύ των δύο σταθμών προς την απόσταση που διανύει το πλοίο άφορτο σε μια ημέρα

$$Dur_{BALLAST,vc} = \frac{LR_c}{Sv_{BALLAST,v} * 24}$$

- LQ_{vc} : Ο όγκος LNG που φορτώνεται στον τερματικό L σε m^3 και υπολογίζεται ως το γινόμενο της διαχωρητότητας του πλοίου σε LNG και της χωρητικότητας του πλοίου

$$LQ_{vc} = perm * Cap_v$$

- DQ_{vc} : Ο όγκος LNG που καταφθάνει στον τερματικό R σε m^3 και υπολογίζεται ως ο όγκος φορτίου που το πλοίο φόρτωσε στην αρχή του ταξιδιού μείον τον όγκο που χάθηκε ως BOG, δηλαδή

$$DQ_{vc} = LQ_{vc} * (1 - BOG_{RATE} * Dur_{vLADEN,vc})$$

- **NV_{vc}**: Ο αριθμός των απαιτούμενων ταξιδιών από ένα πλοίο **v** για την ικανοποίηση της ζήτησης ενός συμβολαίου **c**. Υπολογίζεται ως το πηλίκο της ζητούμενης ποσότητας LNG που ορίζει το συμβόλαιο προς τον όγκο LNG που καταφθάνει στον τερματικό **R** για το πλοίο **v**

$$NV_{vc} = \frac{D_c}{DQ_{vc}}$$

Επειδή ο αριθμός ταξιδιών είναι προφανώς ακέραιος η παραπάνω τιμή στρογγυλοποιείται στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο

- **LNG_{RATE,L}**: η ταχύτητα φόρτωσης LNG στον σταθμό **L** σε m³/h
- **LNG_{RATE,R}**: η ταχύτητα φόρτωσης LNG στον σταθμό **R** σε m³/h
- **Dur_{L,vc}**: Ο χρόνος που περνάει το πλοίο στον σταθμό υδροποίησης **L** για να φορτώσει σε days και υπολογίζεται ως

$$Dur_{L,vc} = \frac{LQ_{vc}}{LNG_{RATE,L} * 24} + 10$$

- **Dur_{R,vc}**: Ο χρόνος που περνάει το πλοίο στον σταθμό επαναεριοποίησης **R** για να ξεφορτώσει σε days και υπολογίζεται ως

$$Dur_{R,vc} = \frac{DQ_{vc}}{LNG_{RATE,R} * 24} + 10$$

Όπως έχει αναλυθεί στους χρόνους **Dur_{L,vc}** και **Dur_{R,vc}** πρέπει να προστεθεί και η διάρκεια η οποία απαιτείται προκειμένου το πλοίο να ολοκληρώσει όλες τις διαδικασίες που προηγούνται ή έπονται της φόρτωσης και εκφόρτωσης.

- **BOG_{RATE}**: το Boil-off gas ανά ημέρα ως ποσοστό του συνολικού φορτίου
- **perm**: η διαχωρητικότητα σε φορτίο του χώρου φορτίου (ποσοστό)
- **T_{DELIVERY,c}**: ο μέγιστος χρόνος παράδοσης ενός φορτίου όπως ορίζεται από ένα συμβόλαιο **v** σε days
- **TF_{L,c}**: τα τέλη λιμανιού στον σταθμό **L** όπως ορίζεται από το συμβόλαιο **v** σε \$/days
- **TF_{R,c}**: τα τέλη λιμανιού στον σταθμό **R** όπως ορίζεται από το συμβόλαιο **v** σε \$/days
- **C_{canal,v}**: τα τέλη καναλιού για κάθε πλοίο \$
- **C_{LNG}**: η τιμή του LNG για καύσιμο σε \$/ton
- **C_{HFO}**: η τιμή του HFO για καύσιμο σε \$/ton
- **C_{MDO}**: η τιμή του MDO για καύσιμο σε \$/ton
- **FCB_{LNG,v}**: Η κατανάλωση καυσίμου LNG του πλοίου **v** στην κατάσταση Ballast

- $FCB_{HFO,v}$: Η κατανάλωση καυσίμου HFO του πλοίου v στην κατάσταση Ballast
- $FCB_{MDO,v}$: Η κατανάλωση καυσίμου MDO του πλοίου v στην κατάσταση Ballast
- $FCL_{LNG,v}$: Η κατανάλωση καυσίμου LNG του πλοίου v στην έμφορτη κατάσταση
- $FCL_{HFO,v}$: Η κατανάλωση καυσίμου HFO του πλοίου v στην έμφορτη κατάσταση
- $FCL_{MDO,v}$: Η κατανάλωση καυσίμου MDO του πλοίου v στην έμφορτη κατάσταση
- $FCP_{LNG,v}$: Η κατανάλωση καυσίμου LNG του πλοίου v όσο βρίσκεται στο λιμάνι
- $FCP_{HFO,v}$: Η κατανάλωση καυσίμου HFO του πλοίου v όσο βρίσκεται στο λιμάνι
- $FCP_{MDO,v}$: Η κατανάλωση καυσίμου MDO του πλοίου v όσο βρίσκεται στο λιμάνι

4.2.2 Χαρακτηριστική συνάρτηση

Η χαρακτηριστική συνάρτηση περιγράφει το συνολικό λειτουργικό κόστος του στόλου για την διάθεση του σε συμβόλαια και ορίζεται ως

$$\begin{aligned}
 MinZ = \sum_v \sum_c x_{vc} * \{ & VFC_v + [NV_{vc} * (TF_{R,c} * Dur_{R,vc} + TF_{L,c} * Dur_{R,vc})] \\
 & + [NV_{vc} * (Dur_{L,vc} + Dur_{R,vs}) \\
 & * (FCP_{LNG,v} * C_{LNG} + FCP_{HFO,v} * C_{HFO} + FCP_{MDO,v} * C_{MDO})] \\
 & + [(Dur_{INITIAL,vc} + NV_{vc} * Dur_{VBALLAST,vs}) \\
 & * (FCB_{LNG,v} * C_{LNG} + FCB_{HFO,v} * C_{HFO} + FCB_{MDO,v} * C_{MDO})] \\
 & + [NV_{vc} * (Dur_{VLADDEN,vc}) \\
 & * (FCL_{LNG,v} * C_{LNG} + FCL_{HFO,v} * C_{HFO} + FCL_{MDO,v} * C_{MDO})] \\
 & + [2 * NV_{vc} * C_{CANAL,C}] \}
 \end{aligned}$$

Στο εσωτερικό της μεγάλης αγκύλης υπολογίζεται το λειτουργικό κόστος για το πλοίο v όταν αυτό ανατεθεί στο συμβόλαιο c και πολλαπλασιάζεται με την μεταβλητή απόφασης x_{vc} . Το λειτουργικό κόστος αποτελείται από το άθροισμα:

- του σταθερού κόστους VFC_v το οποίο περιλαμβάνει τα έξοδα της καθημερινής δραστηριότητας του πλοίου και τα έξοδα τις προγραμματισμένης συντήρησης του πλοίου όπως αυτά αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3.
- της πρώτης αγκύλης που υπολογίζει τα τέλη λιμανιού
- της δεύτερης αγκύλης που υπολογίζει το κόστος καυσίμων όσο το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι
- της τρίτης αγκύλης που υπολογίζει το κόστος καυσίμων όσο το πλοίο ταξιδεύει σε κατάσταση ballast
- την τέταρτη αγκύλη που υπολογίζει το κόστος καυσίμων όσο το πλοίο ταξιδεύει σε έμφορτη κατάσταση
- την πέμπτη αγκύλη που υπολογίζει τα τέλη διέλευσης από διώρυγα

Για την επίλυση του προβλήματος πέρα από τον πίνακα των μεταβλητών απόφασης X υπολογίζεται και ένας πίνακας C ο οποίος σε κάθε κελί έχει το κόστος για

που αντιστοιχεί σε κάθε δυνατό συνδυασμό πλοίου με συμβόλαιο. Έτσι για παράδειγμα για τρία συμβόλαια και τρία πλοία είναι της μορφής

$$C = \begin{array}{|c|c|c|} \hline C_{1,1} & C_{1,2} & C_{1,3} \\ \hline C_{2,1} & C_{2,2} & C_{2,3} \\ \hline C_{3,1} & C_{3,2} & C_{3,3} \\ \hline \end{array}$$

Με τον τρόπο αυτό η τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης υπολογίζεται από το άθροισμα των κελιών του πίνακα Z του οποίου κάθε κελί προκύπτει ως το γινόμενο του αντίστοιχου κελιού του πίνακα X και του πίνακα C. Για την παραπάνω περίπτωση είναι της μορφής

$$Z = \begin{array}{|c|c|c|} \hline X_{1,1} * C_{1,1} & X_{1,2} * C_{1,2} & X_{1,3} * C_{1,3} \\ \hline X_{2,1} * C_{2,1} & X_{2,2} * C_{2,2} & X_{2,3} * C_{2,3} \\ \hline X_{3,1} * C_{3,1} & X_{3,2} * C_{3,2} & X_{3,3} * C_{3,3} \\ \hline \end{array}$$

4.2.3 Περιορισμοί

Προκειμένου το πρόβλημα να λυθεί σωστά είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψιν και να μοντελοποιηθούν στην κατάλληλη μορφή οι απαραίτητοι περιορισμοί.

Αρχικά ο περιορισμός που εξασφαλίζει ότι η τιμή που μπορεί να πάρει η μεταβλητή απόφασης είναι δυαδική

$$X_{v,c} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ για κάθε } v \in V \text{ και κάθε } c \in C$$

Επιπλέον πρέπει να διασφαλίζεται ότι ένα πλοίο μπορεί να αντιστοιχηθεί με ένα συμβόλαιο. Προκύπτει με αυτόν τον τρόπο ο παρακάτω περιορισμός

$$X_{1,c} + X_{2,c} + \dots + X_{n,c} = 1$$

Ομοίως πρέπει να διασφαλίζεται ότι ένα συμβόλαιο μπορεί να αντιστοιχηθεί με ένα μόνο πλοίο. Επειδή έχει γίνει η υπόθεση ότι τα συμβόλαια θα είναι πάντα περισσότερα από τον διαθέσιμο στόλο κάποια συμβόλαια δεν θα επιλεγούν. Ο περιορισμός αυτός εκφράζεται με τον εξής τρόπο

$$X_{v,1} + X_{v,2} + \dots + X_{v,c} \leq 1$$

Οι επόμενοι περιορισμοί στα πλαίσια του MILP θα πρέπει να μετατραπούν σε ανισότητες της μορφής

$$A_{v,c} * x_{v,c} \leq b = 0$$

Έτσι ο περιορισμός ώστε η συνολική ποσότητα που μεταφέρει ένα πλοίο v σε έναν χρόνο να μην ξεπερνάει την μέγιστη ετήσια ικανότητα επαναεριοποίησης του τερματικού R δηλαδή

$$N \cdot DQ_{v,c} \leq R_{max,c} \text{ για κάθε } v \in V \text{ και κάθε } c \in C$$

μετατρέπεται στην μορφή

$$(N \cdot DQ_{v,c} - R_{max,c}) \cdot X_{v,c} \leq 0$$

Με τον τρόπο αυτό στην περίπτωση που η ποσότητα που μεταφέρει το πλοίο v ξεπεράσει το όριο που ορίζεται στο συμβόλαιο c η μεταβλητή απόφασης παίρνει την τιμή μηδέν ώστε να ισχύει η ανισότητα.

Αντίστοιχα, ο περιορισμός που εξασφαλίζει ότι ένα πλοίο v μπορεί να καλύψει την ζήτηση του συμβολαίου c

$$N \cdot DQ_{v,c} \geq D_c \text{ για κάθε } v \in V \text{ και κάθε } c \in C$$

Μετατρέπεται στην μορφή

$$(D_c - N \cdot DQ_{v,c}) \cdot X_{v,c} \leq 0$$

Ο περιορισμός που εξασφαλίζει ότι το πλοίο v φορτώνει εκτελεί το δρομολόγιο μεταξύ των δύο τερματικών και ξεφορτώνει εντός του χρόνου που προβλέπεται από το συμβόλαιο c

$$Dur_{L,v,c} + DurV_{LADEN,v,c} + Dur_{R,v,c} \leq T_{DELIVERY,C} \text{ για κάθε } v \in V \text{ και κάθε } c \in C$$

Μετατρέπεται στην μορφή

$$(Dur_{L,v,c} + DurV_{LADEN,v,c} + Dur_{R,v,c} - T_{DELIVERY,C}) \cdot X_{v,c} \leq 0$$

Τέλος, ο περιορισμός που εξασφαλίζει ότι το πλοίο v μεταφέρει την ποσότητα LNG που ορίζεται στο συμβόλαιο εντός του χρονικού ορίζοντα που έχουμε επιλέξει, δηλαδή του ενός έτους

$$NV_{v,c} \cdot (Dur_{L,v,c} + DurV_{LADEN,v,c} + Dur_{R,v,c} + DurV_{BALLAST,v,c}) \leq T_{HOR} \text{ για } \\ \text{κάθε } v \in V \text{ και κάθε } c \in C$$

Μετατρέπεται στην μορφή

$$[NV_{v,c} \cdot (Dur_{L,v,c} + DurV_{LADEN,v,c} + Dur_{R,v,c} + DurV_{BALLAST,v,c}) - T_{HOR}] \cdot X_{v,c} \leq 0$$

5 Μελέτη Περίπτωσης

5.1 Δημιουργία σεναρίων

Προκειμένου να γίνει η εφαρμογή του αλγορίθμου επάνω στο μαθηματικό μοντέλο χρειάζεται να προσδιοριστούν προηγουμένως κάποιες πληροφορίες. Με στόχο το αποτέλεσμα που θα προκύψει να μην είναι θεωρητικό αλλά να ανταποκρίνεται όσο το δυνατό περισσότερο στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται τιμές που αντλούνται μέσα από αναφορές εταιριών διαχείρισης στόλων ή σταθμών υδροποίησης και επαναεριοποίησης, προηγούμενες έρευνες, στατιστικά στοιχεία φορέων που σχετίζονται με την ναυτιλία και το υδροποιημένο φυσικό αέριο. Στόχος είναι οι τιμές του κόστους που θα προκύψουν ως αποτελέσματα να μπορούν να αξιολογηθούν εμπειρικά ως προς την ορθότητα τους.

Ο χρονικός ορίζοντας που επιλέχθηκε για την ανάλυση του προβλήματος είναι 365 ημέρες. Ο χρόνος αυτός ανταποκρίνεται στις ανάγκες πλοιοκτητών που θέλουν να διαθέσουν τον στόλο τους σε short-term συμβόλαια. Στο διάστημα αυτό το πλοίο πρέπει να καλύψει την μεταφορά της απαιτούμενης ποσότητας LNG όπως ορίζεται στο συμβόλαιο. Θα πρέπει δηλαδή να ξεκινήσει από μια τυχαία απόσταση και να φτάσει στον σταθμό υδροποίησης όπου θα παραλάβει το φορτίο, να ταξιδέψει μέχρι τον σταθμό επαναεριοποίησης, να ξεφορτώσει και να γυρίσει άφορτο ξανά στον σταθμό υδροποίησης για να παραλάβει νέο φορτίο και να επαναλάβει την διαδικασία έως ότου καλύψει την ζήτηση του συμβολαίου. Ο ανεφοδιασμός του πλοίου σε καύσιμα, αναλώσιμα και προμήθειες γίνεται όσο αυτό βρίσκεται σε έναν από τους τερματικούς σταθμούς και δεν λαμβάνεται υπόψιν στον υπολογισμό του χρόνου ταξιδιού, σε αντιστοιχία και με το μαθηματικό μοντέλο που ακολουθείται. Επιπλέον, οι δεξαμενισμοί του πλοίου δεν λαμβάνονται υπόψιν κατά τον υπολογισμό καθώς κάθε πλοίο μετά την κάλυψη του συμβολαίου έχει επιπλέον διαθέσιμο χρόνο.

Σχετικά με το όριο φόρτωσης των πλοίων αυτό επιλέγεται για το σύνολο του στόλου στο 98% της μέγιστης χωρητικότητας. Το ποσοστό αυτό έχει οριστεί με βάση τις οδηγίες του IGC Code. Γίνεται η υπόθεση για λόγους απλότητας ότι κανένα πλοίο δεν πληροί τις προϋποθέσεις που του επιτρέπουν να αυξήσει το ποσοστό μέχρι το οποίο μπορεί να φορτώσει. Επομένως:

$$perm = 0.98$$

Οι τερματικοί επαναεριοποίησης επιλέγονται με βάση την γεωγραφική τους θέση με στόχο να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος περιοχών. Επιπλέον, οι σταθμοί που έχουν επιλεγεί αντιπροσωπεύουν μια χώρα ή περιοχή που έχει μεγάλη ετήσια ζήτηση σε LNG. Τα χαρακτηριστικά των σταθμών αυτών που απαιτούνται για τον αλγόριθμο είναι

- Ένας χαρακτηριστικός αριθμός που χρησιμεύει για να γίνει αναφορά στο συγκεκριμένο τερματικό. Έχουμε επιλέξει 5 σταθμούς επαναεριοποίησης άρα οι αριθμοί είναι προφανώς από το 1 έως το 5.

- Η μέγιστη ετήσια ικανότητα επαναεριοποίησης, ώστε να γίνεται έλεγχος ότι δεν θα ξεπεραστεί κατά την εκτέλεση ενός συμβολαίου. Ο αριθμός αυτός στα στοιχεία του IGU αναφέρεται σε MTPA. Επειδή στα πλαίσια της εργασίας η χωρητικότητα των πλοίων LNG μετράται σε m^3 έχει γίνει η μετατροπή με βάση τις οδηγίες του IGU [52]. Σύμφωνα με αυτές, ισχύει

$$1 \text{ Tonne of LNG} = 2.222 \text{ m}^3$$

- Η ταχύτητα με την οποία ξεφορτώνει LNG (Discharging Rate). Το στοιχείο αυτό αντλείται από τις σελίδες κάθε τερματικού. Εξάιρεση αποτελεί η πλωτή μονάδα επαναεριοποίησης SPEC FSRU στην Κολομβία για την οποία δεν βρέθηκαν στοιχεία για το Discharging Rate. Για αυτή την περίπτωση έγινε η υπόθεση ότι ισούται με $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Στις αναφορές των τεχνικών προδιαγραφών το Discharging Rate αναφέρεται στον μέγιστο και σταθερό ρυθμό με τον οποίο ξεφορτώνεται ένα πλοίο [53,54,55,56]. Αυτό γιατί στην πραγματικότητα, το πλοίο ξεκινάει να παραδίδει το φορτίο του με μια μικρότερη ταχύτητα και σταδιακά καταλήγει στην μέγιστη δυνατή ενώ πριν το τέλος της διαδικασίας η ταχύτητα ξαναμειώνεται σταδιακά. Για λόγους απλοποίησης η τιμή του Discharging Rate επιλέγεται ως η μέγιστη δυνατή.
- Το κόστος επίσκεψης στον τερματικό σταθμό επαναεριοποίησης (Cost of visit). Το κόστος αυτό είναι σχεδόν αδύνατο να υπολογιστεί ακριβώς καθώς εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες διαφέρει από τερματικό σε τερματικό. Σε δημοσίευση του H. Rogers [57] του 2018, το κόστος επίσκεψης για ένα πλοίο LNG μεταφορικής ικανότητας 160.000 m^3 προσεγγίζεται στα $100 \text{ k US}\$/\text{day}$, ενώ στην δημοσίευση του Papaleonidas [47] το κόστος επίσκεψης για διάφορα τερματικά παίρνει τιμές από 26.000 έως $33.000 \text{ US}\$/\text{day}$. Η εκτίμηση για το κόστος στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί και εκφράζεται σε $\text{US}\$/\text{day}$. Το μέγεθος του πλοίου λαμβάνεται υπόψιν καθώς όσο αυξάνεται η μεταφορική ικανότητα ο χρόνος που χρειάζεται το πλοίο στο λιμάνι μεγαλώνει.

Τα στοιχεία για τους σταθμούς επαναεριοποίησης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.

Regasification Terminal ID	Name of Terminal-Market Name	Discharging Rate specified by regasification terminal [m ³ /hour]	Cost of visit in terminal R (includes fees of port calls/visits)	Maximum Regasification terminal capacity [m ³]
1	Revithoussa - Greece	7250	60000	10,221
2	Gate Terminal LNG - Netherlands	12500	57000	19,998
3	SPEC FSRU (Hoegh Grace)- Colombia	10000	49000	6,666
4	Hazira LNG - India	11000	65000	11,110
5	Futtsu LNG - Japan	12000	53000	35,552

Πίνακας 4 Στοιχεία σταθμών επαναεριοποίησης

Με αντίστοιχο τρόπο και κριτήρια επιλέγονται οι σταθμοί υγροποίησης που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των συμβολαίων. Συνολικά 5 σταθμοί λαμβάνονται υπόψιν από 5 χώρες που ηγούνται στην εξαγωγή φυσικού αερίου. Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται είναι

- Ο χαρακτηριστικός αριθμός που αντιστοιχεί σε κάθε σταθμό υγροποίησης
- Ο ρυθμός φόρτωσης του τερματικού υγροποίησης. Στοιχεία για τον σταθμό Sabine Pass έχουν αντληθεί από αναφορά της Federal Energy Regulatory Commission των Η.Π.Α. [58], αρμόδια αρχή για θέματα ενέργειας. Στοιχεία για τον τερματικό σταθμό RAS GAS αντλούνται από το αρχείο του τερματικού που αναφέρει τους κανονισμούς και τις διαδικασίες που σχετίζονται με τον ελλιμενισμό των LNGCs [59]. Για τους υπόλοιπους σταθμούς έγινε η υπόθεση ότι ο ρυθμός φόρτωσης παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 11.000 έως 13.000 m³/h καθώς η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στους σταθμούς υγροποίησης και επαναεριοποίησης είναι παρόμοια. Ανάλογες εκτιμήσεις γίνονται και από τον Papaleonidas [47].
- Το κόστος επίσκεψης στον σταθμό υγροποίησης. Όπως και για τους σταθμούς επαναεριοποίησης δεν μπορούμε να είμαστε βέβαιοι για την τιμή του κόστους αυτού. Εκτιμάται επομένως με βάση τις παραδοχές που γίναν και για τους σταθμούς επαναεριοποίησης.

Τα στοιχεία για τους σταθμούς επαναεριοποίησης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.

Liquefaction Terminal ID	Name of Terminal-Market Name	Loading Rate specified by liquefaction terminal [m ³ /hour]	Cost of visit in terminal L (includes fees of port calls/visits) [US\$/day]
1	Sabine Pass-US	12000	65000
2	Idku-Egypt	11000	54000
3	Ichthys-Australia	13000	62000
4	Sakhalin-Russia	12000	50000
5	Rasgas - Qatar	10400	59000

Πίνακας 5 Στοιχεία για τους σταθμούς υγροποίησης.

Για τα κόστη επίσκεψης και τα Loading/Discharging Rates καθώς αυτά βασίζονται προσωπικές εκτιμήσεις, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να αλλάζει τις τιμές τους μέσα από τα φύλλα Excel.

Στην συνέχεια γίνεται υπολογισμός της απόστασης ανάμεσα στους τερματικούς σταθμούς υγροποίησης και επαναεριοποίησης. Η απόσταση απαιτείται για τον υπολογισμό της διάρκειας του ταξιδιού και κατ' επέκταση πολλών παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψιν στον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους και του δείκτη CII. Η απόσταση βρέθηκε με την χρήση των σελίδων Marine Traffic [60] και Sea-distances [61]. Με τις σελίδες αυτές έγινε και μια πρόβλεψη της διαδρομής που ακολουθεί ένα πλοίο που συνδέει τα δύο τερματικά προκειμένου να διαπιστωθεί εάν το πλοίο διέρχεται από την διώρυγα του Σουέζ ή του Παναμά και εάν δηλαδή πρέπει να υπολογιστούν στο λειτουργικό κόστος για την εκτέλεση του συμβολαίου κόστη διέλευσης από διώρυγα. Στην περίπτωση της σύνδεσης του τερματικού Rasgas στο Qatar με τον τερματικό Spec FSRU στην Κολομβία χρειάστηκε να γίνει σύγκριση μεταξύ της συντομότερης διαδρομής που διέρχεται το Σουέζ και της μεγαλύτερης διαδρομής γύρω από το Ακρωτήριο της Καλής Ελπίδος καθώς η διαφορά των δύο είναι περίπου 2000 nm. Αυτή η απόσταση για τις ταχύτητες των πλοίων που έχουμε θεωρήσει αντιστοιχεί σε 10 ημέρες επιπλέον ταξιδιού λαμβάνοντας υπόψιν και τον γυρισμό. Για να παρθεί η απόφαση πρέπει να ληφθούν υπόψιν πολύ παράγοντες όπως η τιμή του καυσίμου, το εν δυνάμει κέρδος που το πλοίο θα είχε εάν αξιοποιούσε τις 10 αυτές μέρες για την μεταφορά φορτίου τα έξοδα καναλιού υπολογιζόμενα για την διώρυγα του Σουέζ. Συνυπολογίζοντας τα παραπάνω, επιλέχθηκε η διαδρομή μέσω Σουέζ.

Κατασκευάστηκαν δύο πίνακες. Ο πίνακας 6 δείχνει τις αποστάσεις μεταξύ των τερματικών ενώ ο πίνακας 7 δείχνει εάν η διαδρομή περιέχει κανάλι. Για την διώρυγα του Σουέζ το κελί παίρνει την τιμή "1", ενώ για του Παναμά την τιμή "2" ώστε να απλοποιείται ο τρόπος που εισάγονται τα δεδομένα αυτά στον αλγόριθμο.

in nm		Distance Matrix					
		Regasification Terminal ID					
		1	2	3	4	5	
		Revithoussa-Greece	Gate Terminal LNG - Netherlands	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	Hazira LNG - India	Futtsu LNG - Japan	
Liquefaction Terminal ID	1	Sabine Pass-US	6.398	5.070	1.568	9.967	9.211
	2	Idku-Egypt	532	3.147	5.904	3.351	8.562
	3	Ichthys-Australia	7.448	9.980	9.633	4.330	3.826
	4	Russia-Sakhalin	9.144	11.861	9.068	7.292	930
	5	Qatar-Rasgas	3.733	6.471	9.170	1.319	7.049

Πίνακας 6 Αποστάσεις μεταξύ των τερματικών σταθμών υγροποίησης και επαναεριοποίησης

in nm		Distance Matrix					
		Regasification Terminal ID					
		1	2	3	4	5	
		Revithoussa-Greece	Gate Terminal LNG - Netherlands	SPEC FSRU (Hoegh Grace) -Colombia	Hazira LNG - India	Futtsu LNG - Japan	
Liquefaction Terminal ID	1	Sabine Pass-US	0	0	0	1	2
	2	Idku-Egypt	0	0	0	1	1
	3	Ichthys-Australia	1	1	2	0	0
	4	Russia-Sakhalin	1	1	2	0	0
	5	Qatar-Rasgas	1	1	1	0	0

Πίνακας 7 Δείκτης προσδιορισμού καναλιού

Σχετικά με τα χαρακτηριστικά του στόλου, έχουν επιλεγθεί τρία διαφορετικά πλοία της εταιρείας Maran Gas με βάση τα οποία έχει δημιουργηθεί το δείγμα του στόλου που χρησιμοποιείται στα σενάρια. Τα τρία πλοία είναι τα Maran Gas Lindos,

Maran Gas Andros και Maran Gas Kalymnos [7]. Η επιλογή έγινε ώστε να υπάρχει διαφοροποίηση στις χωρητικότητες των πλοίων και στον τύπο κύριας μηχανής. Προκύπτουν επομένως τρεις τύποι πλοίων με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα 8.

Vessel type	1	2	3
Vessel capacity (m ³)	159.800	173.400	174.000
M/E Type	TFDE	MEGI	XDF

Πίνακας 8 Τύποι πλοίων

Για την εκτίμηση του ετήσιου κόστους που αναλαμβάνει ο πλοιοκτήτης λαμβάνονται υπόψιν οι ετήσιες οικονομικές αναφορές του 2022 που παρέχουν ναυτιλιακές εταιρείες εισηγμένες στο χρηματιστήριο. Τέτοια έξοδα περιλαμβάνουν τους μισθούς του πληρώματος, την ασφάλεια του στόλου, τα κόστη επισκευών, ανταλλακτικών και συντήρησης, τα κόστη λιπαντικών, τα τέλη της σημαίας καθώς και τις προμήθειες και τα αναλώσιμα που χρειάζεται το πλοίο. Οι εταιρείες που εξετάζονται είναι η Flex LNG, η GasLog Ltd και GasLog Partners και η Awilco LNG.

Η εταιρεία Flex LNG λειτουργεί έναν στόλο 13 πλοίων, εκ των οποίων τα 9 έχουν σύστημα πρόωσης MEGI και τα 4 σύστημα X-DF και χωρητικότητες από 173.400 έως 174.000 m³. Τα λειτουργικά κόστη που εμφανίζει ανέρχονται στα 63.414.000 US\$ που σημαίνει ότι το κόστος ανά πλοίο ισούται με 4.878.000 US\$. [62]

Η εταιρεία GasLog Ltd έχει στην κατοχή της έναν στόλο 21 πλοίων, εκ των οποίων τα 12 έχουν σύστημα X-DF, 7 έχουν TFDE ενώ τα 2 γηραιότερα πλοία της εταιρείας έχουν σύστημα Steam. Οι χωρητικότητες των παλαιότερων πλοίων είναι από 145.000 μέχρι 170.000 m³ ενώ για τα πιο καινούρια από 174.000 έως 180.000 m³. Τα λειτουργικά έξοδα της εταιρείας ανέρχονται στα 98.228.000 US\$. Το κόστος ανά πλοίο είναι 4.677.523 US\$. [63]

Αντίστοιχα, η εταιρεία GasLog Partners διαθέτει 14 πλοία, εκ των οποίων τα 4 παλαιότερα έχουν σύστημα πρόωσης Steam και χωρητικότητα 145.000 m³ και τα 10 νεότερα σύστημα TFDE με χωρητικότητα από 155.000 έως 174.000 m³. Τα λειτουργικά έξοδα των πλοίων αυτών είναι 72.363.000 US\$ που αντιστοιχεί σε 5.168.756 US\$ ανά πλοίο. [64]

Τέλος, η εταιρεία Awilco LNG κατέχει έναν στόλο δύο πλοίων TFDE χωρητικότητας 156.000 m³ με τα λειτουργικά έξοδα να φτάνουν τα 10.977.000 US\$ δηλαδή 5.488.500 US\$ ανά πλοίο. [65]

Παρατηρείται ότι το κόστος ανά πλοίο των εταιρειών που λειτουργούν πλοία με X-DF και ME-GI είναι σχετικά χαμηλότερο. Αυτό συμβαίνει επειδή τα καινούρια αυτά πλοία έχουν μικρότερο κόστος ανταλλακτικών και μεγαλύτερη αυτοματοποίηση άρα μικρότερη απαίτηση σε πλήρωμα. Τα πλοία TFDE λόγω των πολλών γεννητριών απαιτούν αρκετά ανταλλακτικά για τα μηχανικά τους μέρη. Με βάση αυτά, το κόστος για κάθε τύπο πλοίου εκτιμάται στον πίνακα 9.

Vessel type	1	2	3
Vessel's fixed cost per year [US\$/year]	5.000.000	4.700.000	4.650.000

Πίνακας 9 Ετήσιο σταθερό κόστος ανά τύπο πλοίου

Για τους παραπάνω τύπους πλοίων χρειάζεται να υπολογιστούν οι καταναλώσεις καυσίμων για την κύρια και τις βοηθητικές μηχανές. Η ταχύτητα υπηρεσίας όταν το πλοίο είναι φορτωμένο ισούται με 19,5 kn ενώ άφορτο το πλοίο ταξιδεύει με ταχύτητα 16 kn. Επίσης, οι μηχανές επιλέγεται να λειτουργούν με LNG και πιλοτικό MDO. Βάσει των στοιχείων της Maran Gas προκύπτουν τα στοιχεία για τις καταναλώσεις του πίνακα 10.

Vessel type	1	2	3
Vessel capacity (m ³)	159.800	173.400	174.000
Vessel's service speed for laden voyage [kn]	19,50	19,50	19,50
Vessel's service speed for ballast voyage [knots]	16,00	16,00	16,00
Fuel consumption during laden voyage [tn/day]	110,10	80,10	78,70
Fuel consumption during ballast voyage [ton/day]	60,55	51,70	54,00
MDO fuel consumption rate for both laden and ballast voyage [%]	0,01	0,03	0,01
LNG fuel consumption for port operations [tn/day]	0	0	0
MDO fuel consumption for port operations [tn/day]	24,96	32,4	26,4
HFO fuel consumption rate for both laden and ballast voyage [%]	0,00	0,00	0,00
HFO fuel consumption for port operations [tn/day]	0,00	0,00	0,00

Πίνακας 10 Κατανάλωση καυσίμου ανά τύπο πλοίου

Το HFO επιλέγεται να μην καταναλωθεί στα σενάρια που δημιουργούμε ωστόσο υπάρχει ως επιλογή εάν ο χρήστης θέλει να το χρησιμοποιήσει. Το κελί Fuel Consumption during laden voyage αναφέρεται στους συνολικούς τόνους καυσίμου που καταναλώνονται όταν το πλοίο ταξιδεύει φορτωμένο και η συγκεκριμένη τιμή έχει υπολογιστεί για ταχύτητα 19,5 kn και την κύρια μηχανή να λειτουργεί καταναλώνοντας φυσικό αέριο. Αντίστοιχα, το κελί Fuel Consumption during ballast voyage αναφέρεται στην κατανάλωση του άφορτου πλοίου, σε ταχύτητα 16 kn και για λειτουργία με φυσικό αέριο. Η κατανάλωση περιέχει ένα ποσοστό LNG και ένα ποσοστό diesel. Το ποσοστό του diesel στην περίπτωση αυτή είναι ίσο με την ελάχιστη απαίτηση του κάθε συστήματος σε πιλοτικό καύσιμο. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται MDO σε ποσότητα 1% για τα πλοία με συστήματα TFDE και X-DF και 3% για τα πλοία ME-GI. Για την κατανάλωση στο λιμάνι επιλέγεται η λειτουργία με diesel και συγκεκριμένα με MDO. Υπάρχει όμως και η επιλογή να καταναλωθεί φυσικό αέριο. Σημειώνεται ότι τα πλοία με συστήματα ME-GI και X-DF στο λιμάνι λειτουργούν μόνο τις ηλεκτρογεννήτριες για να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες τους.

Για να προσδιοριστούν τα τέλη καναλιών για κάθε έναν από τους τρεις τύπους πλοίου χρησιμοποιούμε το εργαλείο της Wilhelmsen για τον Παναμά [66] και αυτό της Leth Agencies για το Suez [67]. Τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για τον υπολογισμό του κόστους φαίνονται στον πίνακα 11.

Vessel identity	1	2	3
LOA (m)	294,2	294,9	296,9
B (m)	44	46,44	46,42
Gross Tonnage (m ³)	108087	117781	116652
Net Tonnage (m ³)	92230	100098	100819
SCNT estimation (m ³)	110174	119833	119609
LOCK TYPE	NEOPANAMAX	NEOPANAMAX	NEOPANAMAX
Capacity (m ³)	163.700	173.400	174.000

Πίνακας 11 Διαστάσεις που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των Canal Costs

Το SCNT αναφέρεται στο Suez Canal Net Tonnage, ένα μέγεθος που υπολογίζεται κατά την έκδοση του Suez Canal Special Tonnage Certificate. Στην περίπτωση που το πιστοποιητικό δεν υπάρχει μια προσωρινή λύση που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό του είναι η προσέγγιση με βάση τον τύπο:

$$SCNT = \frac{(Gross\ Tonnage + Net\ Tonnage)}{2} * 1.1 \quad [32]$$

Το Lock type είναι μια κατηγοριοποίηση που έχει να κάνει με τις διαστάσεις του πλοίου για το κανάλι του Παναμά. Και τα τρία πλοία ανήκουν στην κατηγορία NEOPANAMAX.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον πρώτο τύπο πλοίου στους πίνακες 12,13 και 14. Για την διώρυγα του Σουέζ υπάρχει διαφοροποίηση στην προσέγγιση του κόστους αναλόγως του αν το πλοίο είναι φορτωμένο ή όχι. Η εκτίμηση για το κανάλι του Παναμά δεν λαμβάνει υπόψιν αυτή τη διαφορά.

Tariff:	23-05
Canal Tolls:	601 155,49
First 5000:	38 550,00
Next 5000:	29 950,00
Next 10000:	51 900,00
Next 20000:	80 200,00
Next 30000:	111 300,00
Next 50000:	142 617,70
Next 60000:	0,00
Rest:	0,00
TotalSDR:	454 517,70
USD/SDR Exchange rate:	1,32
Tugs (2):	26 452,46 NOT Gas Free: Two Tugs since not gas free and SCNT > 90000!
Mooring:	2 900,00
Pilotage:	395,50
Pilotage:	0,00
Disbursements:	20 358,08
SCA Surcharge 7% of Canal Tolls from 01/04/2023:	42 080,88
GRAND TOTAL USD:	693 342,41

Πίνακας 13 Κόστος διέλευσης άφορτου πλοίου τύπου 1 από το Σουέζ [67]

Tariff:	23-05
Canal Tolls:	707 041,86
First 5000:	45 300,00
Next 5000:	35 250,00
Next 10000:	61 000,00
Next 20000:	94 400,00
Next 30000:	131 100,00
Next 50000:	167 525,58
Next 60000:	0,00
Rest:	0,00
TotalSDR:	534 575,58
USD/SDR Exchange rate:	1,32
Tugs (2):	26 452,46 NOT Gas Free: Two Tugs since not gas free and SCNT > 90000!
Mooring:	2 900,00
Pilotage:	634,63
Pilotage:	0,00
Disbursements:	20 458,08
SCA Surcharge 7% of Canal Tolls from 01/04/2023:	49 492,93
GRAND TOTAL USD:	806 979,96

Πίνακας 12 Κόστος διέλευσης έμφορτου πλοίου τύπου 1 από το Σουέζ [67]

Fixed Fee	\$300,000.00
Capacity Fee	\$216,000.00
Tug Assistance	\$28,500.00
Linehandlers	\$6,700.00
Canal Inspection	\$275.00
Security Surcharge	\$1,250.00
Launch Hire (Estimated - Billed On Actual)	\$600.00
PC Oil Pollution Prevention Fee	\$1,410.00
ADCS Charge (Input / Transfer / Upload)	\$250.00
Bank Commission	\$1,691.05
Fumigation (Compulsory)	\$385.00
Auto Hire	\$100.00
Petties & Incidentals	\$150.00
Fresh Water Surcharge	\$10,000.00
Fresh Water Surcharge Variable	\$25,800.00
Transit Booking Fee (Optional)	\$85,000.00
Grand Total USD	\$678,111.05

Πίνακας 14 Κόστος διέλευσης πλοίου τύπου 1 από τον Παναμά [66]

Το συνολικό κόστος καναλιού για μια μεταφορά από το Σουέζ είναι το άθροισμα των δύο τιμών, φορτωμένου και άφορτου πλοίου, εφόσον το πλοίο πρέπει να πάει από τον τερματικό σταθμό υδροποίησης στον τερματικό σταθμό επαναεριοποίησης και να γυρίσει. Αντίστοιχα το κόστος της διέλευσης από τον Παναμά λαμβάνεται διπλάσιο από την παραπάνω προσέγγιση προκειμένου να περιέχει και την επιστροφή του πλοίου. Για τους τρεις τύπους πλοίου το κόστος διέλευσης από κάθε κανάλι παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στον πίνακα 15.

Canal Intex	1	2	3
Suez Charges	1500322,37	1608891,06	1606384,86
Panama Charges	1356222,10	1394306,08	1396011,32

Πίνακας 15 Κόστος διέλευσης από το κανάλι του Παναμά και του Σουέζ για κάθε τύπο πλοίου

Το Canal index είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για να αναγνωρίσει ο αλγόριθμος τον τύπο του πλοίου.

Επιπλέον, χρειάζεται να υπολογιστεί η αρχική απόσταση κάθε πλοίου από κάθε σταθμό υδροποίησης. Για λόγους απλοποίησης οι αρχικές αποστάσεις κάθε πλοίου λαμβάνονται τυχαία μεταξύ των τιμών [1000,6000] nm. Επίσης γίνεται η

παραδοχή ότι το πλοίο δεν διέρχεται από κανάλι για να φτάσει στον πρώτο σταθμό υγροποίησης. Για 5 πλοία και για τους 5 σταθμούς υγροποίησης που εξετάζουμε δημιουργήθηκε ο πίνακας 16.

	Vessel 1	Vessel 2	Vessel 3	Vessel 4	Vessel 5
Liq Terminal 1	5653	3873	4184	2460	5117
Liq Terminal 2	5446	2212	2984	3089	1159
Liq Terminal 3	2505	1636	3258	3801	5383
Liq Terminal 4	3158	4817	3322	4037	3221
Liq Terminal 5	5622	4245	4329	4764	4510

Πίνακας 16 Απόσταση της αρχικής θέσης κάθε πλοίου από τον κάθε τερματικό σταθμό υγροποίησης

Για να ελεγχθεί η ευαισθησία του κόστους ως προς τις τιμές των καυσίμων έχουν δημιουργηθεί 121 διαφορετικοί συνδυασμοί τιμών. Η τιμή του LNG, που είναι και αυτή που θα επηρεάσει περισσότερο το κόστος, αυξάνεται από την τιμή 400 μέχρι την τιμή 4400 με βήμα 400 US\$/tn. Οι τιμές των MDO και HFO σε κάθε βήμα της τιμής του LNG αυξάνονται επίσης βηματικά. Το MDO ξεκινάει από την τιμή 200 και καταλήγει στην τιμή 1200 με βήμα 100 US\$. Το HFO ξεκινάει στην τιμή 100 και φτάνει στην τιμή 850 με βήμα 75 US\$. Οι τιμές αυτές επιλέγονται ώστε να καλύπτουν το εύρος ανάμεσα στο οποίο έχει κυμανθεί η τιμή τους τα τελευταία 20 χρόνια. Συγκεντρωτικά οι συνδυασμοί που προκύπτουν φαίνονται στον πίνακα 38 του παραθέματος.

Τέλος, για τον υπολογισμό του CII χρειάζεται να προσεγγιστεί η διόρθωση του καυσίμου που χρησιμοποιείται για επανυγροποίηση του BOG. Ο πρώτος τύπος πλοίου δεν διαθέτει σύστημα επανυγροποίησης. Για τους δυο άλλους τύπους πλοίων που εξετάζουμε επειδή έχουμε υποθέσει ότι τα πλοία ταξιδεύουν χρησιμοποιώντας ως κύριο καύσιμο το φυσικό αέριο, τα συστήματα επανυγροποίησης δεν λειτουργούν στην διάρκεια του ταξιδιού. Τα συστήματα αυτά επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν όσο το πλοίο είναι στο λιμάνι όπου η κατανάλωση αερίου είναι μηδενική, και χρησιμοποιείται μόνο MDO. Συγκεκριμένα, παραμένουν ανοιχτά όσο το πλοίο κάνει τις απαραίτητες προετοιμασίες και κινήσεις εντός του λιμανιού για να παραλάβει ή να ξεφορτώσει φορτίο, ενώ κλείνουν για όσο διαρκεί η μεταφορά του LNG. Η εκτίμηση που έχει γίνει στα πλαίσια της εργασίας είναι 10 ώρες λειτουργίας ανά ελλιμενισμό. Σημειώνεται στην κατάσταση αυτή τα πλοία λειτουργούν τις βοηθητικές μηχανές τους που είναι τετράχρονες. Η ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων αυτών σύμφωνα με στοιχεία που παρέχονται από την Maran Gas παρουσιάζεται στον πίνακα 17.

Σύστημα re-liquefaction			
Applied System	Not Applicable	DSME's PRS® (Partial Reliquefaction System)	DSME's A-PRS
Vessel type	1	2	3
Energy Consumption (kW)	-	244	1590

Πίνακας 17 Κατανάλωση συστημάτων επανυγροποίησης ανά τύπο πλοίου

Τα συστήματα αυτά λειτουργούν όσο το πλοίο βρίσκεται στους τερματικούς σταθμούς. Ακολουθώντας τις οδηγίες υπολογισμού των διορθωτικών συντελεστών για τον συντελεστή CII, ο IMO ορίζει την προκαθορισμένη κατανάλωση καυσίμου όταν δεν υπάρχουν άλλα στοιχεία στα 200 g/kWh για πλοία με τετράχρονες μηχανές [38]. Επομένως, η συνολική ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται για επανυγροποίηση του BOG για μια μεταφορά φορτίου υπολογίζεται με βάση τον εξής τύπο.

$$FC_{electrical} = Energy\ Consumption * (10 + 10) * 200$$

5.2 Επίλυση σεναρίων

5.2.1 Σενάριο 1

Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει έναν ετερογενή στόλο 5 πλοίων που αξιοποιούνται σε 5 συμβόλαια. Το σύνολο των μεταβλητών απόφασης $X_{v,c}$ είναι επομένως 25. Πιο συγκεκριμένα, ο στόλος αποτελείται από ένα πλοίο τύπου 1 (DFDE), δύο πλοία τύπου 2 (ME-GI) και δύο πλοία τύπου 3 (X-DF). Τα διαθέσιμα συμβόλαια εκτελούν τις διαδρομές που φαίνονται στον επόμενο πίνακα. Για κάθε συμβόλαιο γίνεται και μια υπόθεση του χρόνου εκτέλεσης για μια διαδρομή σε ημέρες και της συνολικής ποσότητας που το πλοίο πρέπει να μεταφέρει. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον πίνακα 18.

Contract No	Liquefaction Terminal	Regasification Terminal	Delivery deadline (Tc) [days]	Demanded quantity by Regasification terminal for time charter [m ³]
1	Idku-Egypt	Revithoussa - Greece	15	3.000.000
2	Idku-Egypt	Gate Terminal LNG - Netherlands	20	2.000.000
3	Qatar-Rasgas	Futtsu LNG - Japan	25	1.000.000
4	Russia-Sakhalin	Hazira LNG - India	30	900.000
5	Sabine Pass-US	Revithoussa - Greece	20	1.500.000

Πίνακας 18 Χαρακτηριστικά συμβολαίων σεναρίου 1

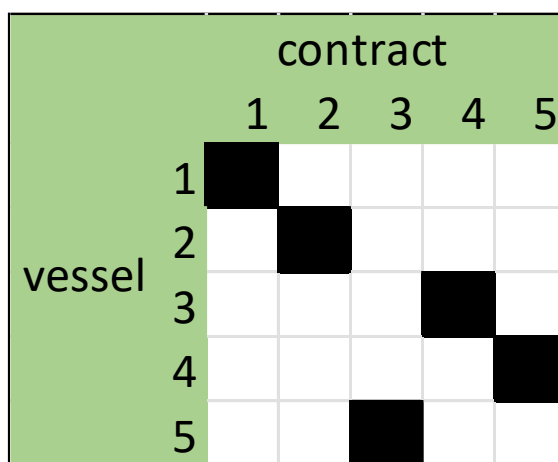
Ο αλγόριθμος επιλέγεται να σταματάει μετά από 25 γενιές χωρίς βελτίωση της λύσης. Ο πληθυσμός κάθε γενιάς είναι 200 λύσεις. Ο αριθμός των Elite Children

επιλέγεται να είναι 30, ενώ ο υπόλοιπος πληθυσμός επιλέγεται να δημιουργείται κατά 95% με την διαδικασία του Crossover και ο υπόλοιπος με την διαδικασία του Mutation. Η σύσταση του πληθυσμού για το σενάριο 1 φαίνεται στον πίνακα 19.

Elite Childer	30
Crossover Children	162
Mutation Children	8
Total	200

Πίνακας 19 Σύσταση πληθυσμού σεναρίου 1

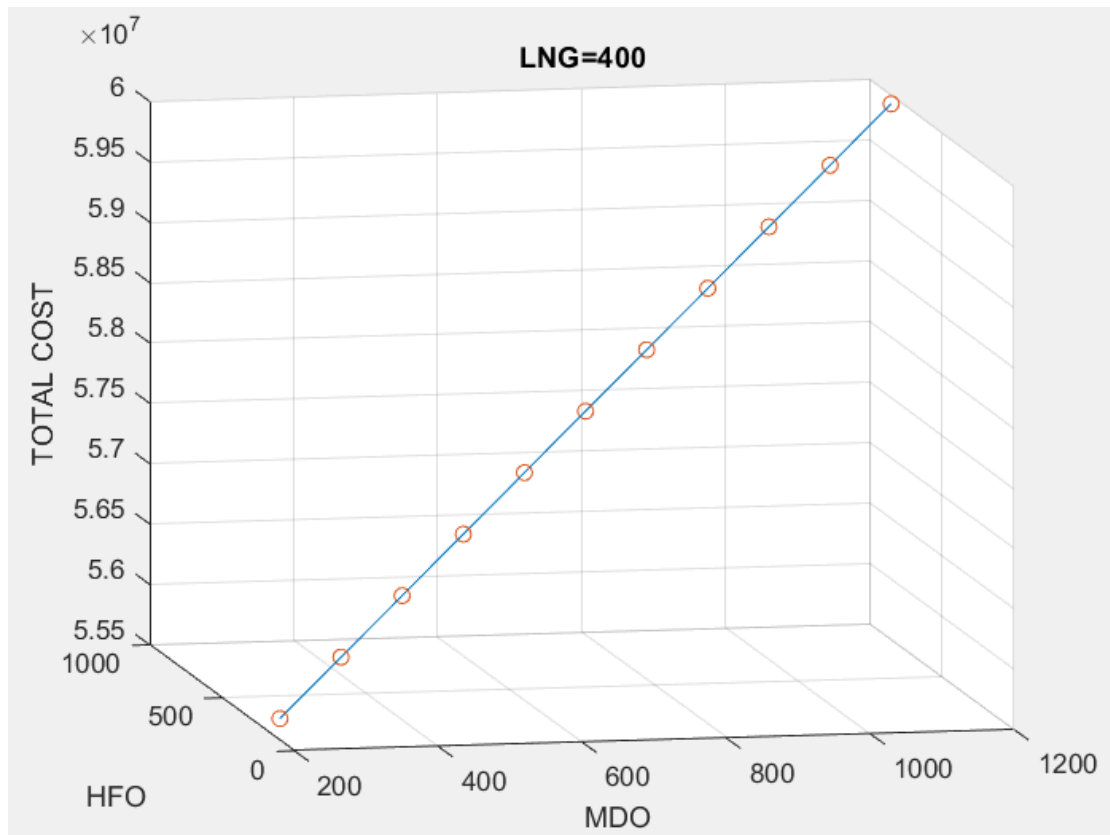
Η κατανομή για την οποία επιτυγχάνεται το ελάχιστο κόστος όπως προκύπτει είναι η ίδια για κάθε διαφορετικό συνδυασμό της τιμής των καυσίμων και παρουσιάζεται στον πίνακα 20.



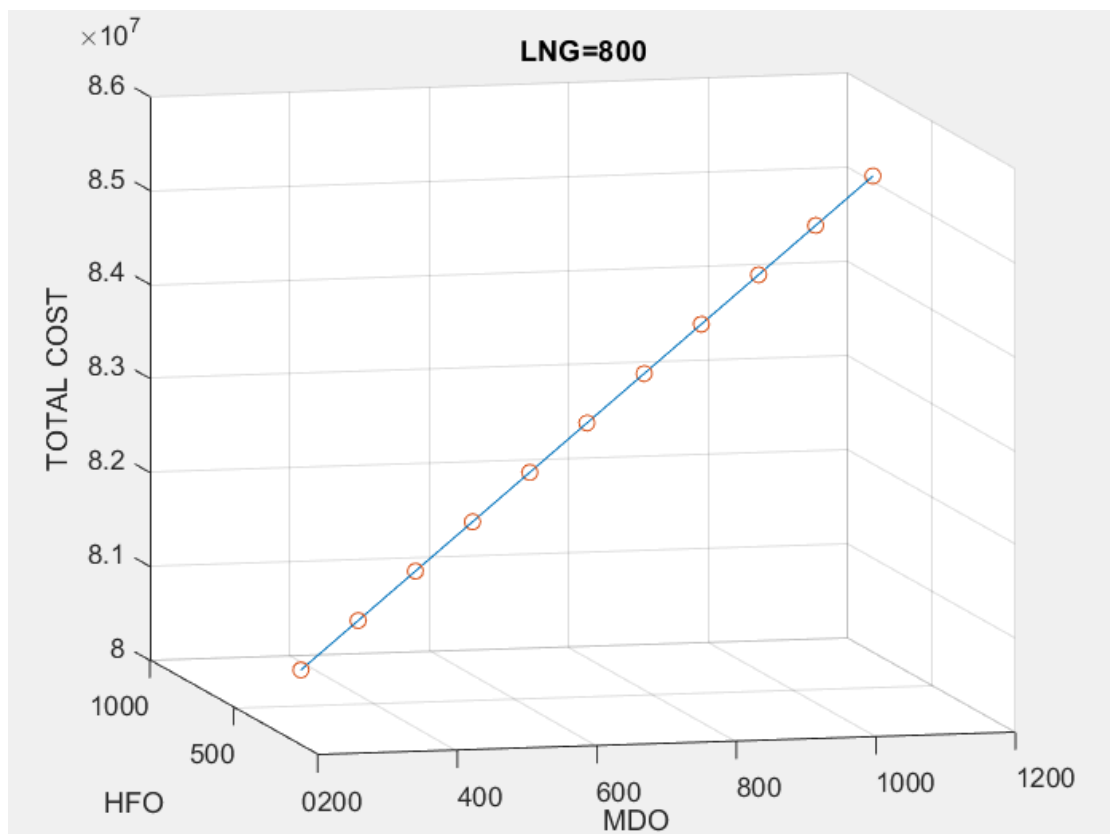
Πίνακας 20 Βέλτιστη κατανομή για το σενάριο 1

Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι έχει βρεθεί η βέλτιστη λύση και όχι απλώς μια πολύ καλή λύση. Επιπλέον, το αποτέλεσμα βρίσκεται μέσα στις πρώτες 26 γενιές του γενετικού αλγορίθμου. Η χαρακτηριστική συνάρτηση καλείται κατά μέσο όρο 3096 φορές. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο χρόνος που χρειάζεται ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη εργασία (μοντέλο Ideapad 3 με επεξεργαστή Intel Core i3-1115G4 3.00GHz) για κάθε συνδυασμό είναι κατά μέσο 47 sec.

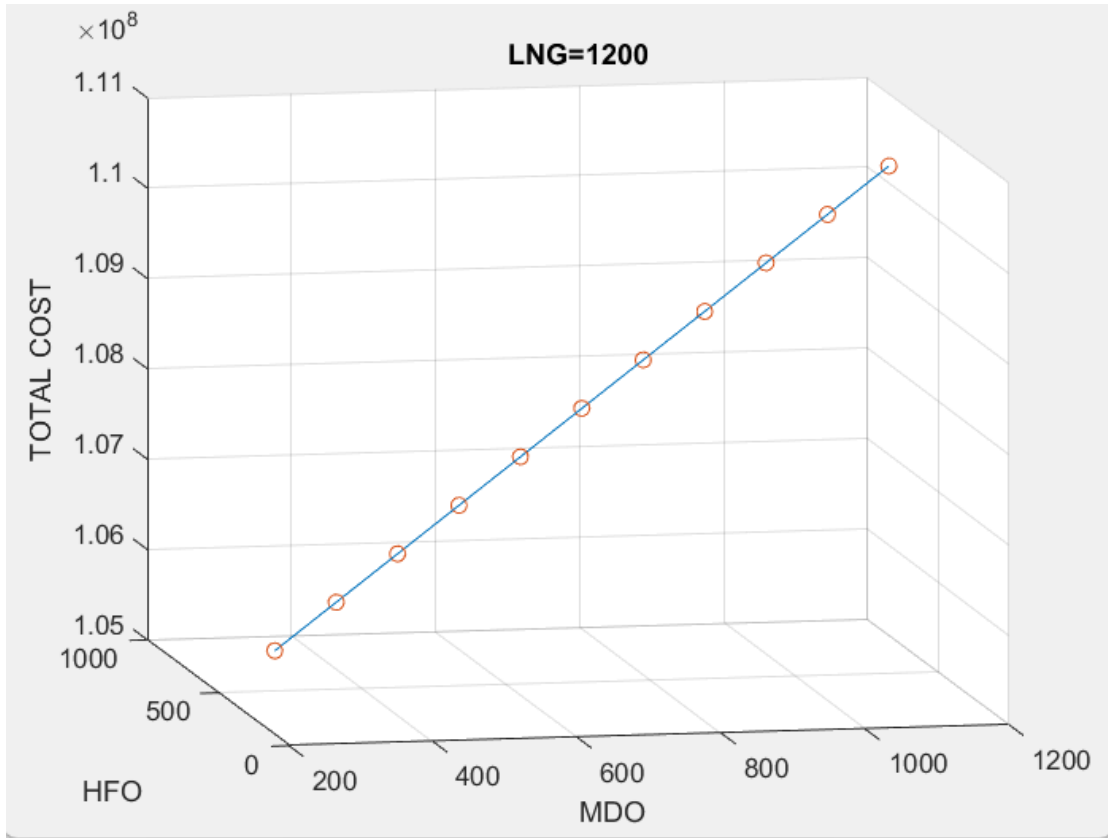
Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το κόστος που προέκυψε για κάθε συνδυασμό τιμής καθώς και οι φορές που χρειάστηκε να κληθεί η συνάρτηση για κάθε συνδυασμό στον πίνακα 39 του παραθέματος. Επιπλέον, στις εικόνες 16 έως 26 παρουσιάζονται για κάθε βήμα της τιμής του LNG από τα 400 έως τα 4400 US\$ και τα διαγράμματα τριών διαστάσεων με άξονες χ και ψ την τιμή του καυσίμου MDO και HFO και άξονα z το συνολικό λειτουργικό κόστος.



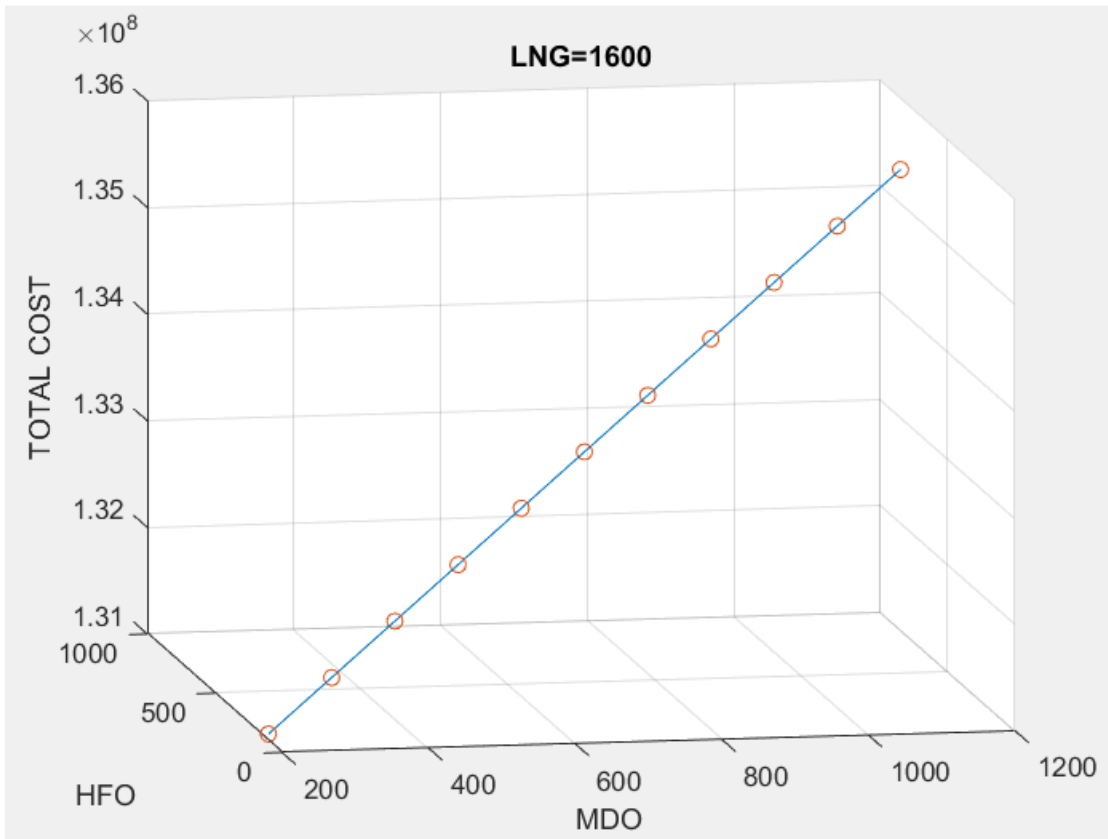
Εικόνα 17 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=400 US\$



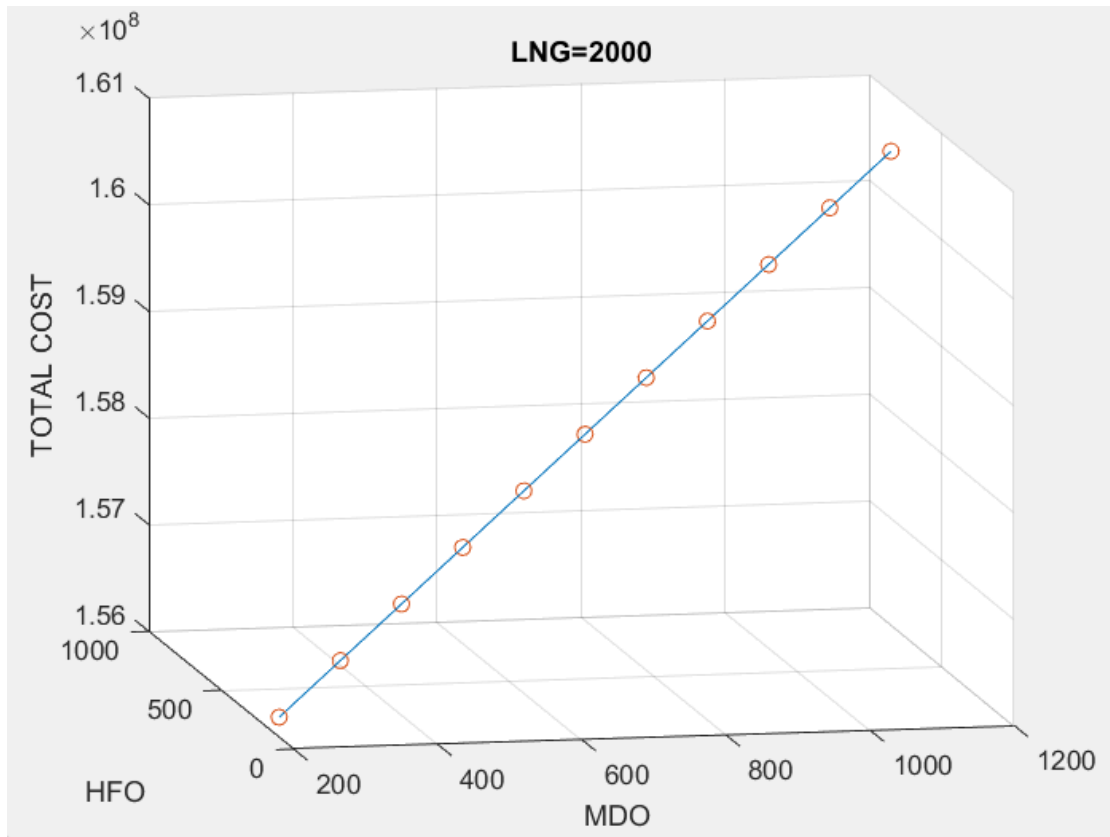
Εικόνα 16 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=800 US\$



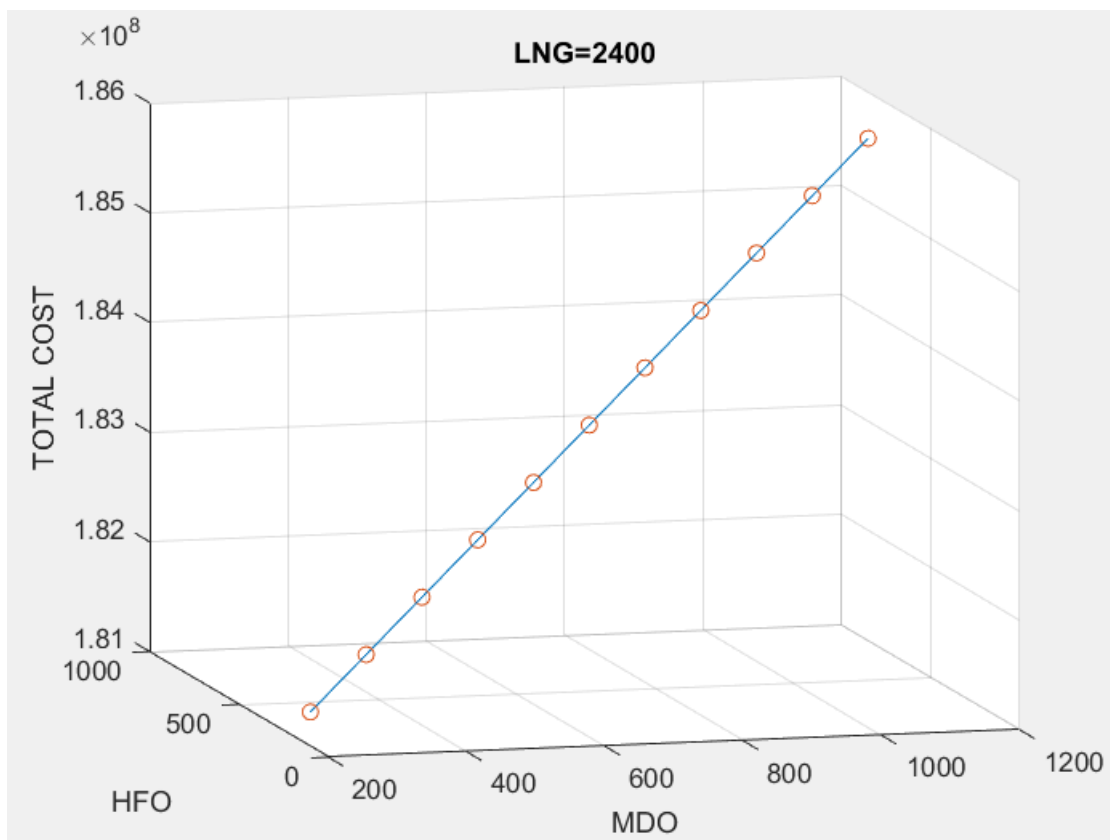
Εικόνα 18 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1200 US\$



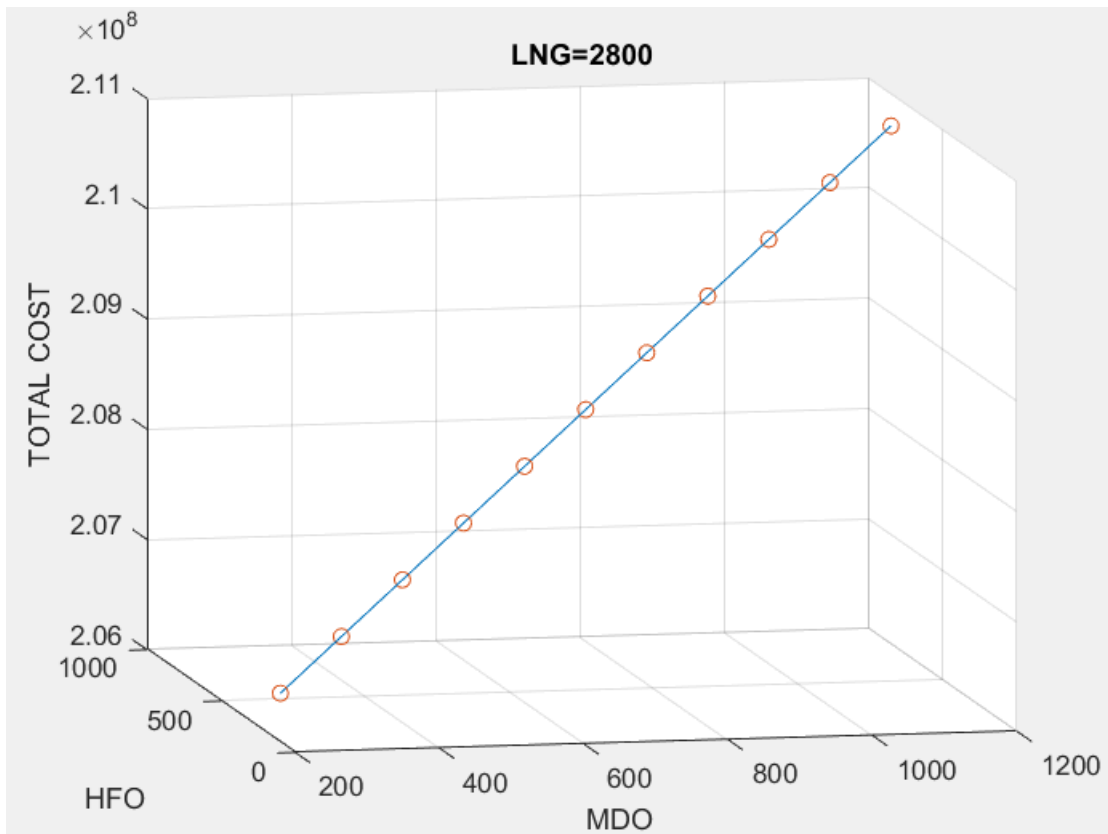
Εικόνα 19 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1600 US\$



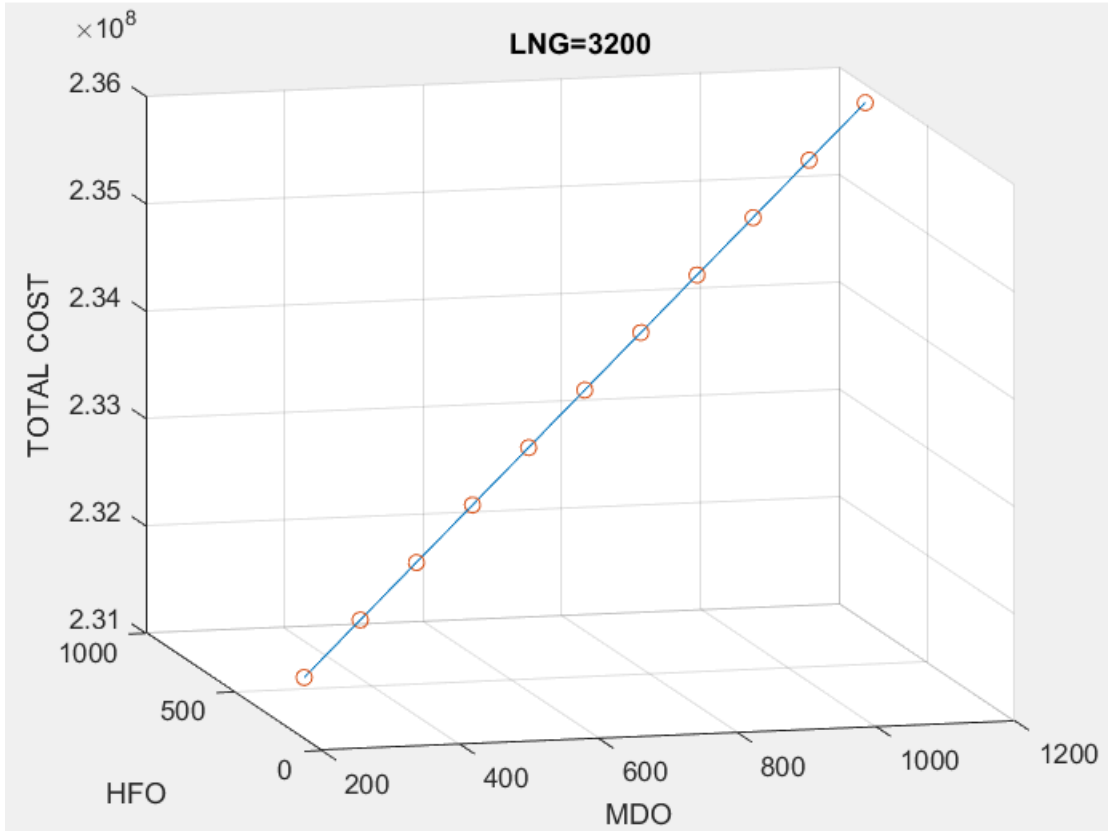
Εικόνα 21 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2000 US\$



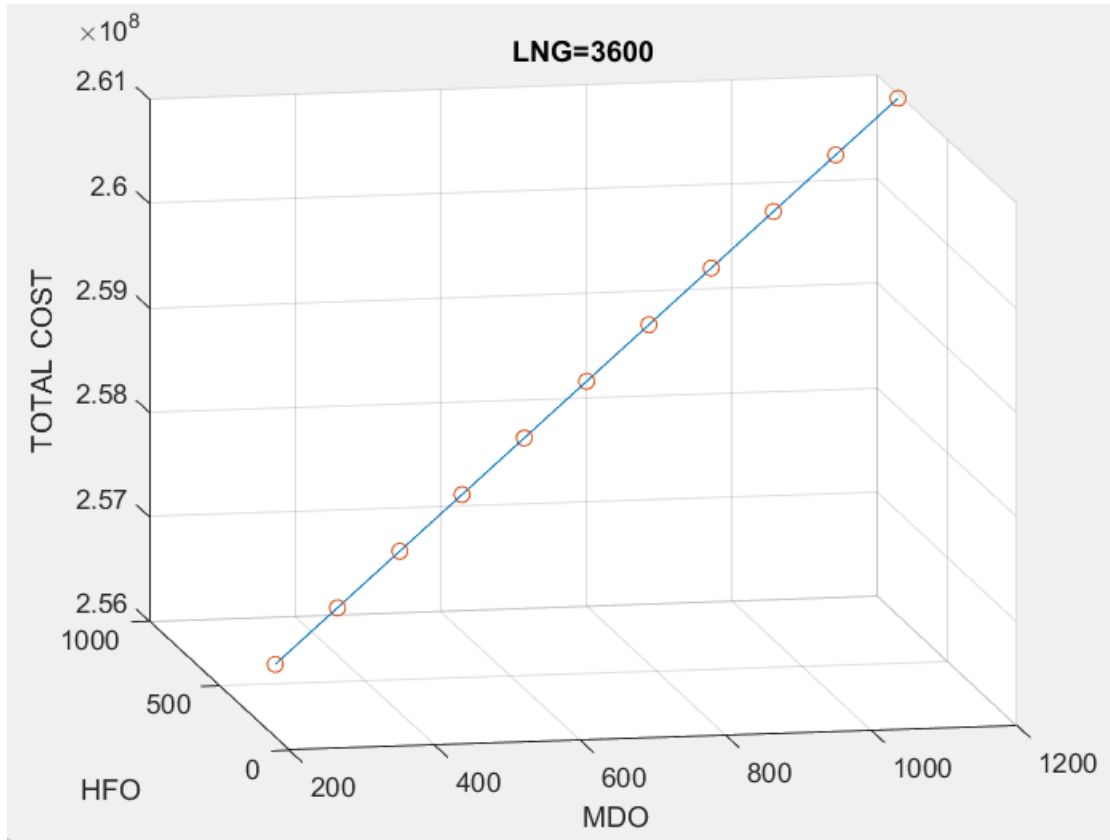
Εικόνα 20 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2400 US\$



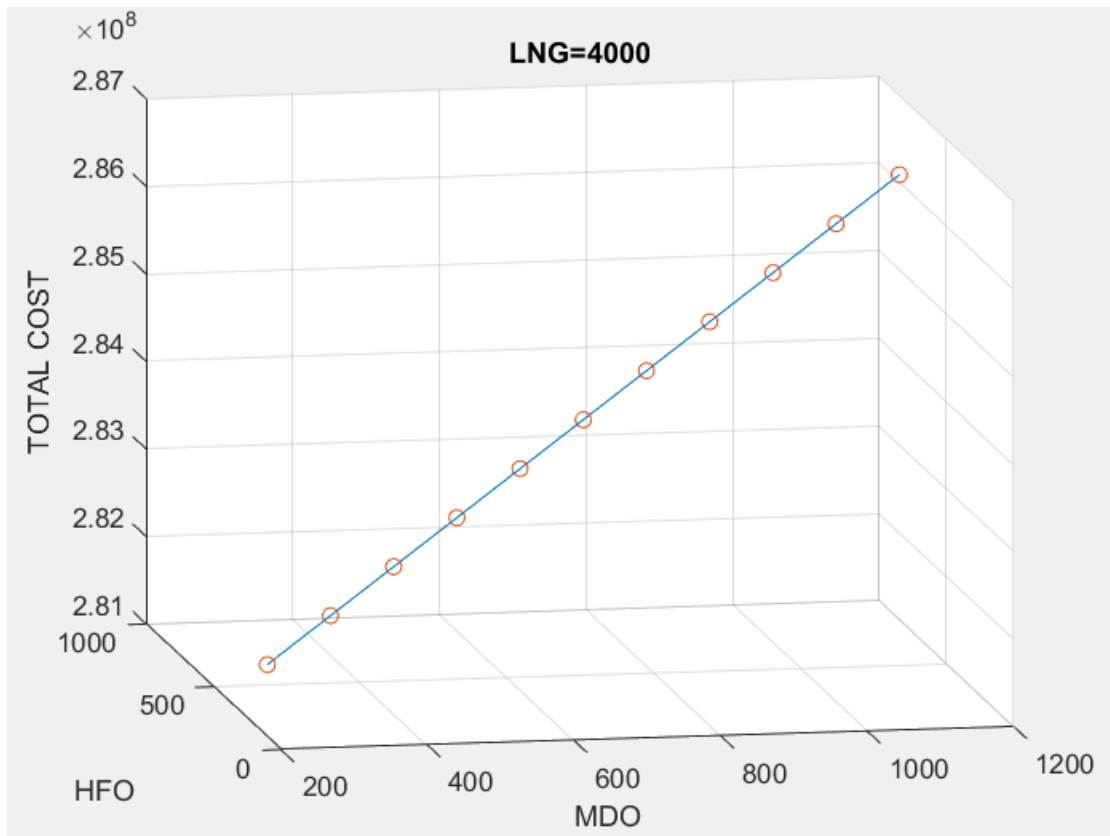
Εικόνα 22 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2800 US\$



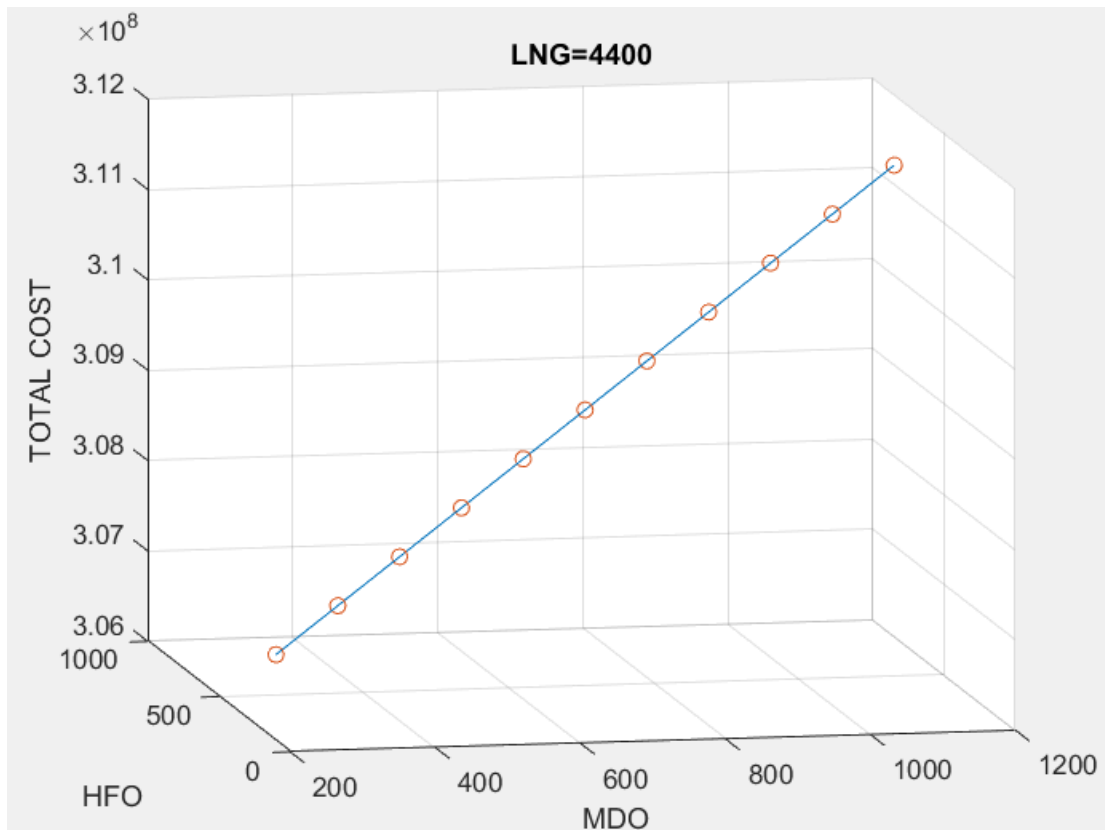
Εικόνα 23 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3200 US\$



Εικόνα 24 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3600 US\$



Εικόνα 25 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4000 US\$



Εικόνα 26 Σενάριο 1 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4400 US\$

Τέλος, ο δείκτης CII όπως προέκυψε για κάθε ένα από τα πλοία φαίνεται στον πίνακα 21.

Vessel	1	2	3	4	5
CII	17,7278	15,0589	14,4653	14,9305	14,2715

Πίνακας 21 Σενάριο 1 - Δείκτης CII για τα 5 πλοία του στόλου

Παρατηρείται ότι το πρώτο πλοίο έχει αρκετά αυξημένο δείκτη CII. Η σημαντικότερη επίδραση αυτής της αύξησης είναι ότι εκτελεί το δρομολόγιο IDKU-Revithoussa. Το δρομολόγιο αυτό λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των δύο τερματικών σταθμών έχει μεγάλη διάρκεια χρόνου που το πλοίο παραμένει στο λιμάνι σε σχέση με τον χρόνο που το πλοίο μεταφέρει φορτίο. Η παρατήρηση αυτή που αφορά σε πλοία που εκτελούν δρομολόγια μικρής απόστασης έχει γίνει και από τους οργανισμούς Institute of Chartered Shipbrokers (ICS) και Διεθνής Ένωση Πλοιοκτητών Δεξαμενοπλοίων (INTERTANKO) και έχει κατατεθεί ως σχόλιο στην MEPC προκειμένου να γίνουν διορθώσεις στον τρόπο υπολογισμού του δείκτη CII [68].

5.2.2 Σενάριο 2

Το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει τον ίδιο ετερογενή στόλο 5 πλοίων με σύνθεση 1 πλοίο TFDE και από δύο πλοία ME-GI και X-DF. Στα προηγούμενα συμβόλαια προστίθενται 5 επιπλέον. Οι μεταβλητές απόφασης με τον τρόπο αυτό αυξάνονται στις 50. Τα χαρακτηριστικά των συμβολαίων φαίνονται στον πίνακα 22.

Contract No	Liquefaction Terminal	Regasification Terminal	Delivery deadline (Tc) [days]	Demanded quantity by Regasification terminal for time charter [m ³]
1	Idku-Egypt	Revithoussa - Greece	15	3.000.000
2	Idku-Egypt	Gate Terminal LNG - Netherlands	20	2.000.000
3	Qatar-Rasgas	Futtsu LNG - Japan	25	1.000.000
4	Russia-Sakhalin	Hazira LNG - India	30	900.000
5	Sabine Pass-US	Revithoussa - Greece	20	1.500.000
6	Qatar-Rasgas	Futtsu LNG – Japan	15	3.000.000
7	Sabine Pass-US	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	15	3.500.000
8	Qatar-Rasgas	Hazira LNG - India	20	2.500.000
9	Ichthys-Australia	Futtsu LNG - Japan	25	3.000.000
10	Idku-Egypt	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	20	2.000.000

Πίνακας 22 Χαρακτηριστικά συμβολαίων σεναρίου 2

Ο αλγόριθμος επιλέγεται να σταματάει μετά από 50 γενιές χωρίς βελτίωση της λύσης. Ο πληθυσμός κάθε γενιάς είναι 200 λύσεις. Ο αριθμός των Elite Children επιλέγεται να είναι 30, ενώ ο υπόλοιπος πληθυσμός επιλέγεται να δημιουργείται κατά 95% με την διαδικασία του Crossover και ο υπόλοιπος με την διαδικασία του Mutation. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε γενιά ο πληθυσμός αποτελείται από

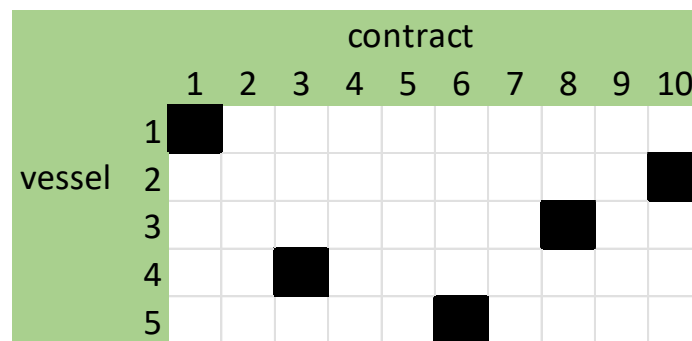
Elite Childer	30
Crossover Children	162
Mutation Children	8
Total	200

Πίνακας 23 Σύσταση πληθυσμού σεναρίου 2

Με την αύξηση στα διαθέσιμα συμβόλαια αυξήθηκαν και οι τρόποι κατανομής του στόλου. Όπως έχει αναλυθεί, ο γενετικός αλγόριθμος δεν εγγυάται την εύρεση της βέλτιστης λύσης ειδικά όσο το πρόβλημα που καλείται να λύσει γίνεται πιο

σύνθετο. Αναλόγως του χρόνου που έχει στην διάθεση του παράγει πολύ καλές λύσεις οι οποίες είτε βρίσκονται κοντά στην βέλτιστη είτε ταυτίζονται με αυτή. Επιπλέον με την αύξηση της τιμής των καυσίμων και συγκεκριμένα του καυσίμου LNG αλλάζει και η κατανομή των πλοίων στα συμβόλαια. Παρατηρείται, ότι οι συνδυασμοί για τους οποίους η τιμή του LNG ισούται με 400 US\$, δηλαδή τους συνδυασμούς 1 έως 11, εμφανίζουν κοινά στοιχεία μεταξύ τους. Το ίδιο συμβαίνει και για τους συνδυασμούς με τιμή καυσίμου LNG στα 800 US\$. Από την τιμή 1200 US\$ έως 4400\$ οι κατανομές επίσης παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό οι συνδυασμοί τιμών ομαδοποιούνται και εξετάζονται σε τρεις κατηγορίες

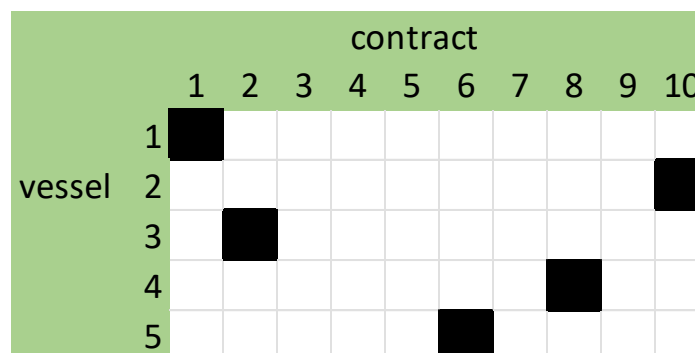
Για τους συνδυασμούς 1 έως 11 (LNG = 400 US\$) η βέλτιστη κατανομή που εμφανίζεται σε 10 από τους 11 συνδυασμούς φαίνεται στον πίνακα 24.



Πίνακας 24 Βέλτιστη κατανομή για τους συνδυασμούς 1 έως 11 του σεναρίου 2

Ο συνδυασμός 7 έχει επιλέξει τα ίδια συμβόλαια όμως έχει τοποθετήσει τον στόλο σε αυτά με διαφορετικό τρόπο. Στο διάγραμμα που αντιστοιχεί στην τιμή LNG=400 φαίνεται ότι το σημείο αυτό έχει ελαφρώς αυξημένο κόστος σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία που βρίσκονται στην ίδια ευθεία.

Για τους συνδυασμούς 12 έως 22 (LNG = 800 US\$) η βέλτιστη κατανομή που εμφανίζεται φαίνεται στον πίνακα 25.



Πίνακας 25 Βέλτιστη κατανομή για τους συνδυασμούς 12 έως 22 του σεναρίου 2

Η αλλαγή στην τιμή των καυσίμων επηρέασε την επιλογή των συμβολαίων και πλέον το συμβόλαιο 2 αντικατέστησε το συμβόλαιο 3 σε σχέση με την προηγούμενη κατανομή.

Για τους συνδυασμούς 23 έως 121 (LNG = 1200 έως 4400 US\$) ξεχωρίζουν δύο κατανομές. Η κατανομή α του πίνακα 26 που εμφανίζεται συχνότερα σε 65 από τους 99 συνδυασμούς και η κατανομή β του πίνακα 27 που εμφανίζεται 7 φορές. Η διαφορά των δύο κατανομών είναι η ανταλλαγή των πλοίων 3 και 4 στα συμβόλαια που αναλαμβάνουν. Η κατανομή β παρουσιάζει το μικρότερο λειτουργικό κόστος από τις δύο. Οι υπόλοιποι 27 συνδυασμοί παρουσιάζουν διαφορετικές λύσεις. Το κοινό στοιχείο όλων όμως είναι ότι επιλέγουν πάντα τα ίδια συμβόλαια με τις κατανομές α και β.

		contract									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
vessel	1	■									
	2										■
	3							■			
	4								■		
	5						■				

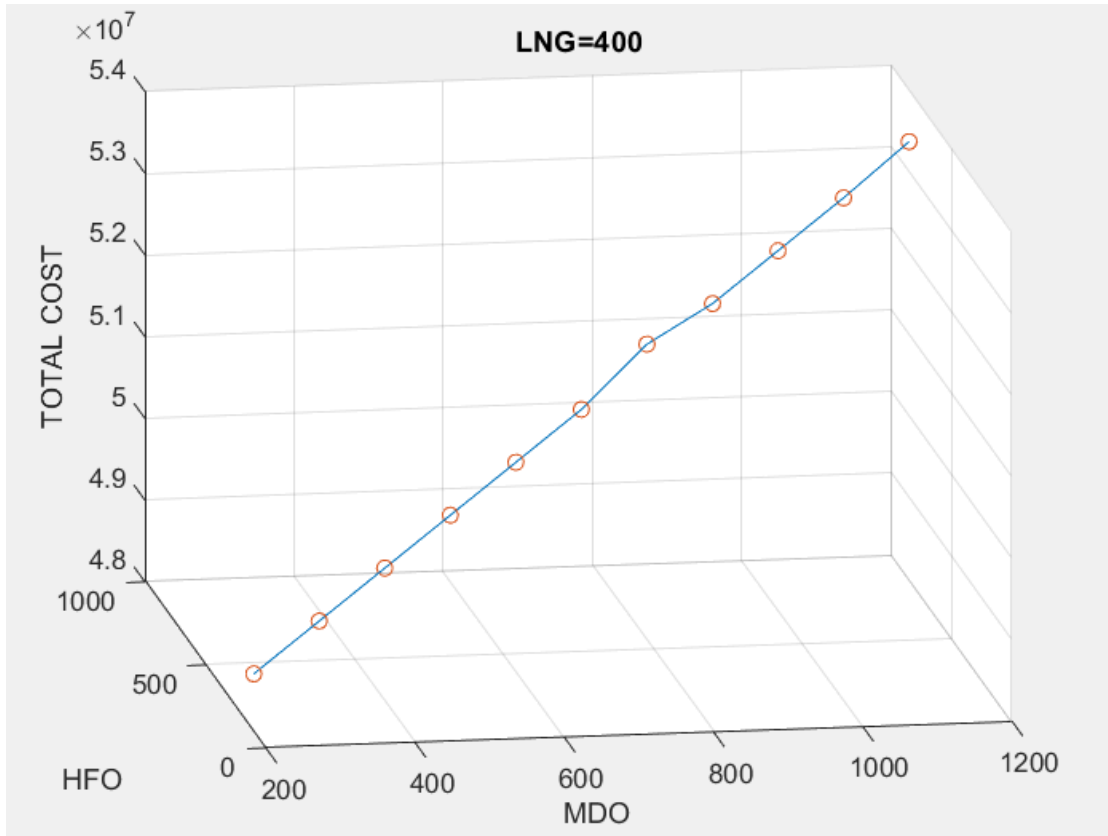
Πίνακας 26 Κατανομή α

		contract									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
vessel	1	■									
	2										■
	3								■		
	4							■			
	5						■				

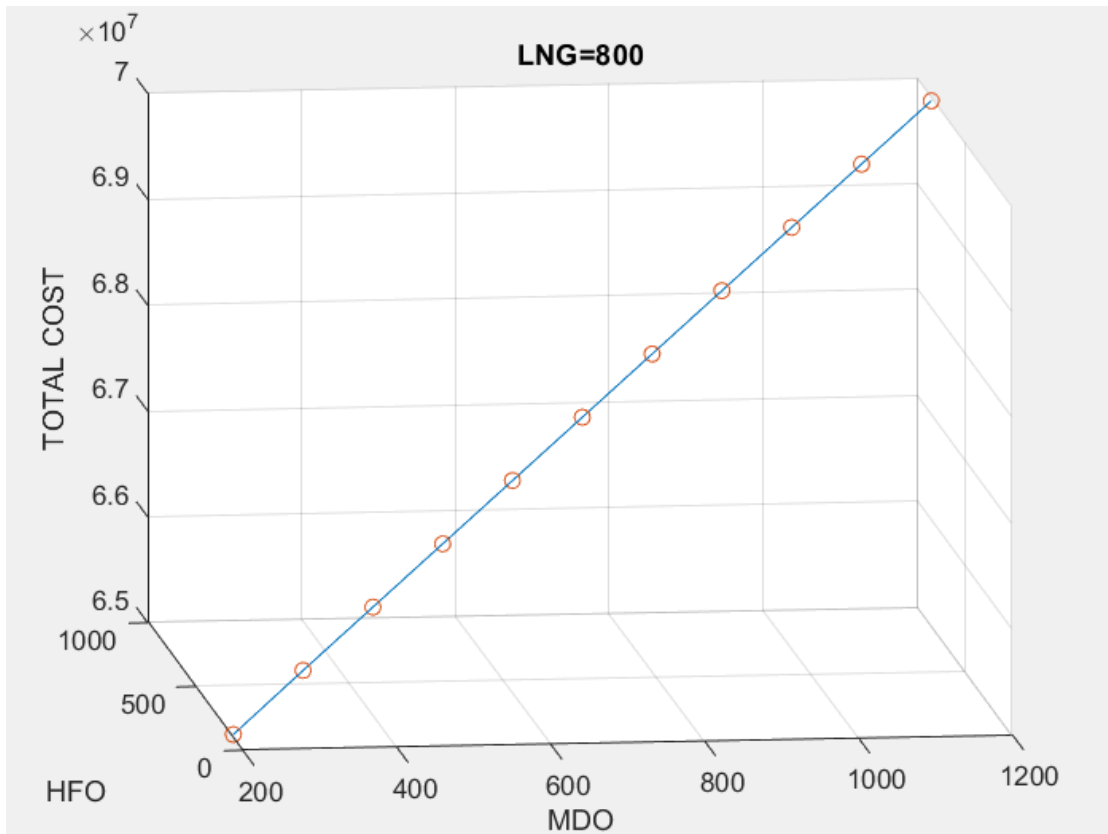
Πίνακας 27 Κατανομή β

Το αποτέλεσμα χρειάζεται από 51 έως 169 γενιές του γενετικού αλγορίθμου για να υπολογιστεί. Η χαρακτηριστική συνάρτηση καλείται κατά μέσο όρο 15327 φορές. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο χρόνος που χρειάζεται ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη εργασία (μοντέλο Ideapad 3 με επεξεργαστή Intel Core i3-1115G4 3.00GHz) για κάθε συνδυασμό είναι κατά μέσο 58 sec.

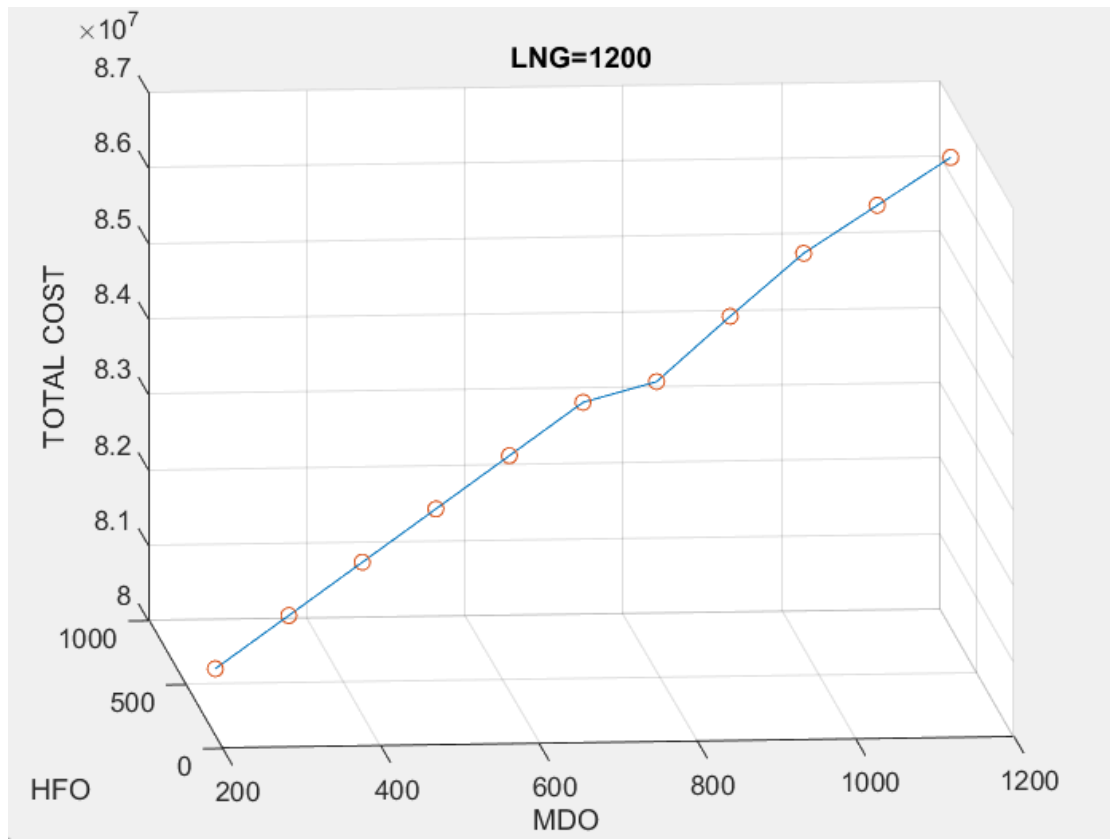
Στον πίνακα 40 του παραθέματος παρουσιάζεται το κόστος που προέκυψε για κάθε συνδυασμό τιμής καθώς και οι φορές που χρειάστηκε να κληθεί η συνάρτηση για κάθε συνδυασμό. Επιπλέον, στις εικόνες 27 έως 37 παρουσιάζονται για κάθε βήμα της τιμής του LNG από τα 400 έως τα 4400 US\$ τα διαγράμματα τριών διαστάσεων με άξονες χ και ψ την τιμή του καυσίμου MDO και HFO και άξονα z το συνολικό λειτουργικό κόστος.



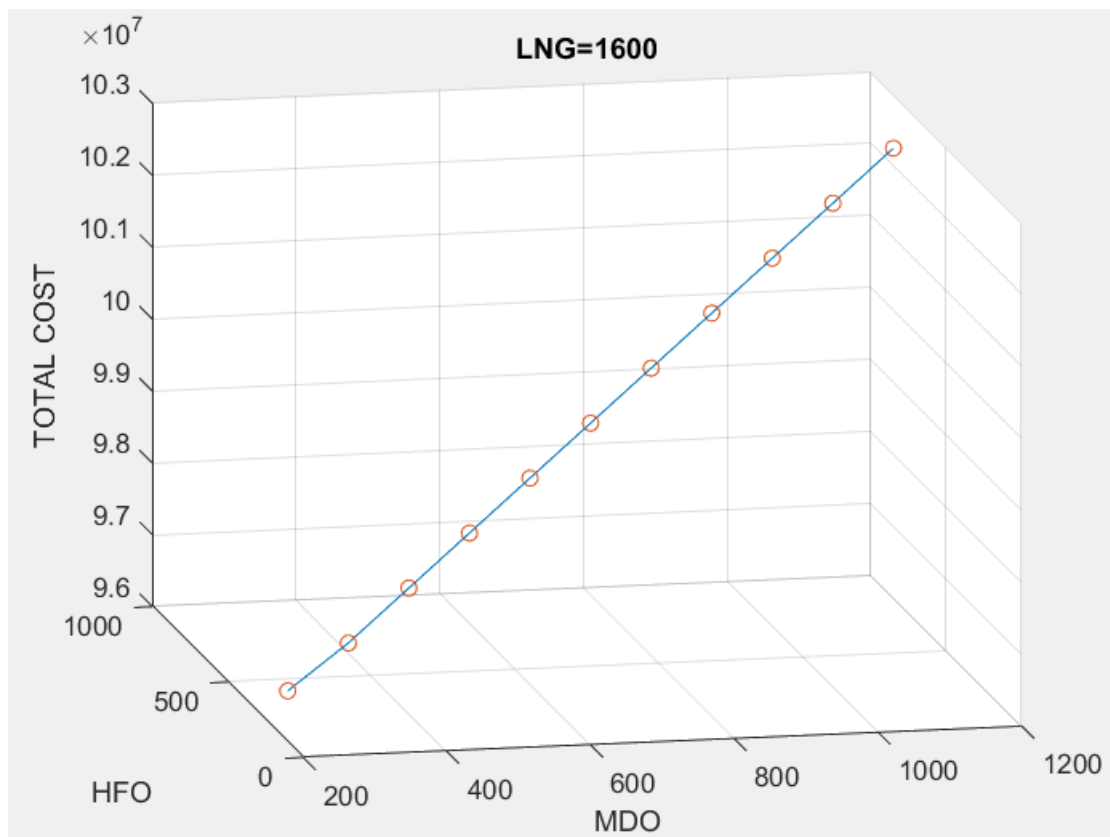
Εικόνα 27 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=400 US\$



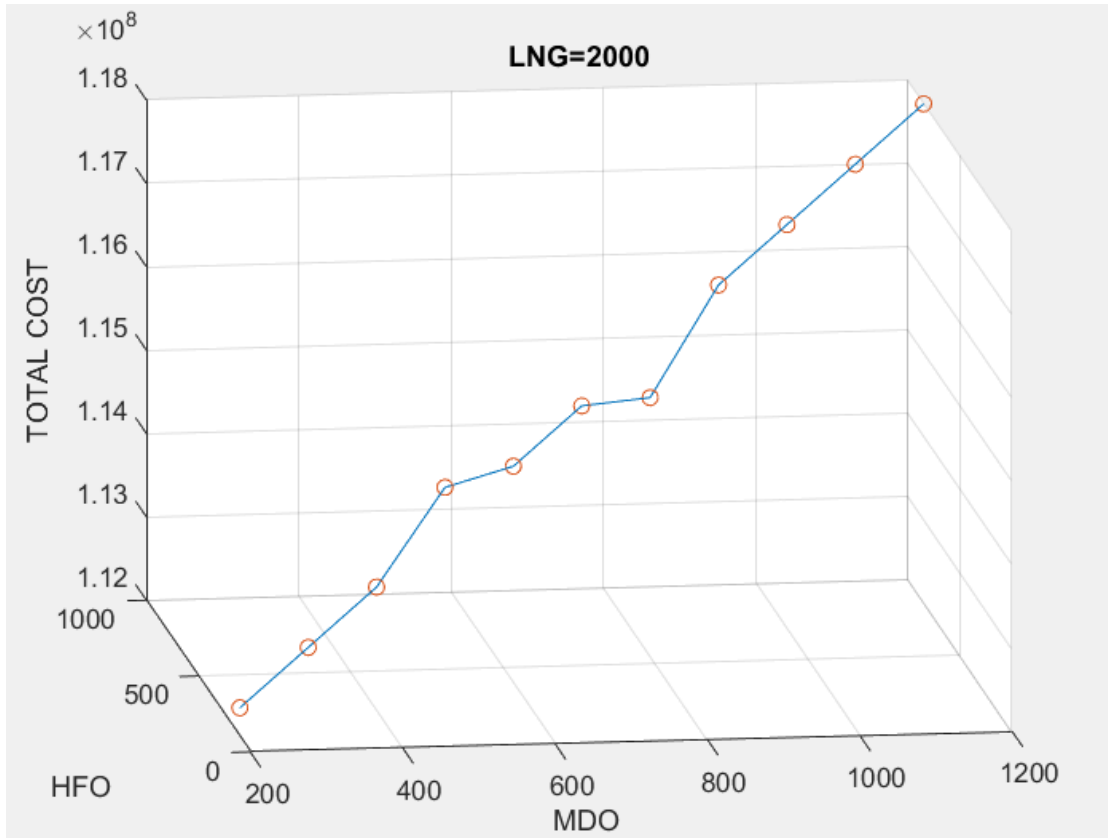
Εικόνα 28 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=800 US\$



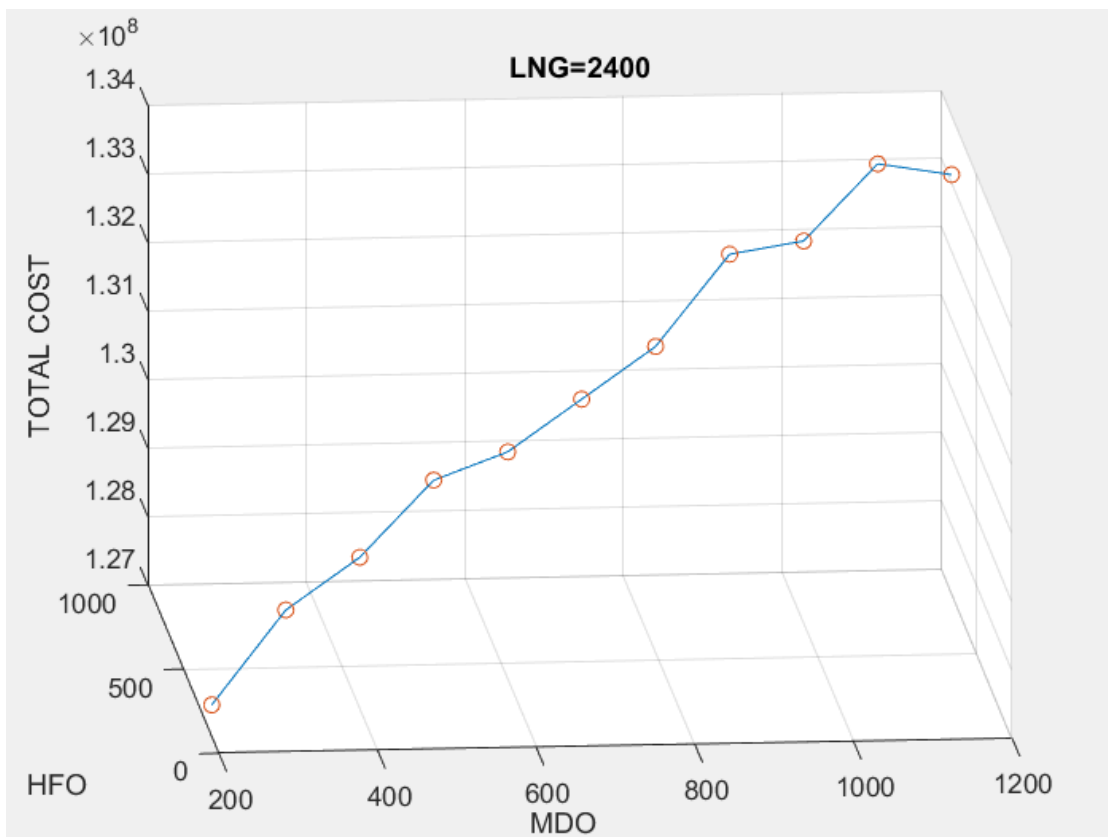
Εικόνα 29 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1200 US\$



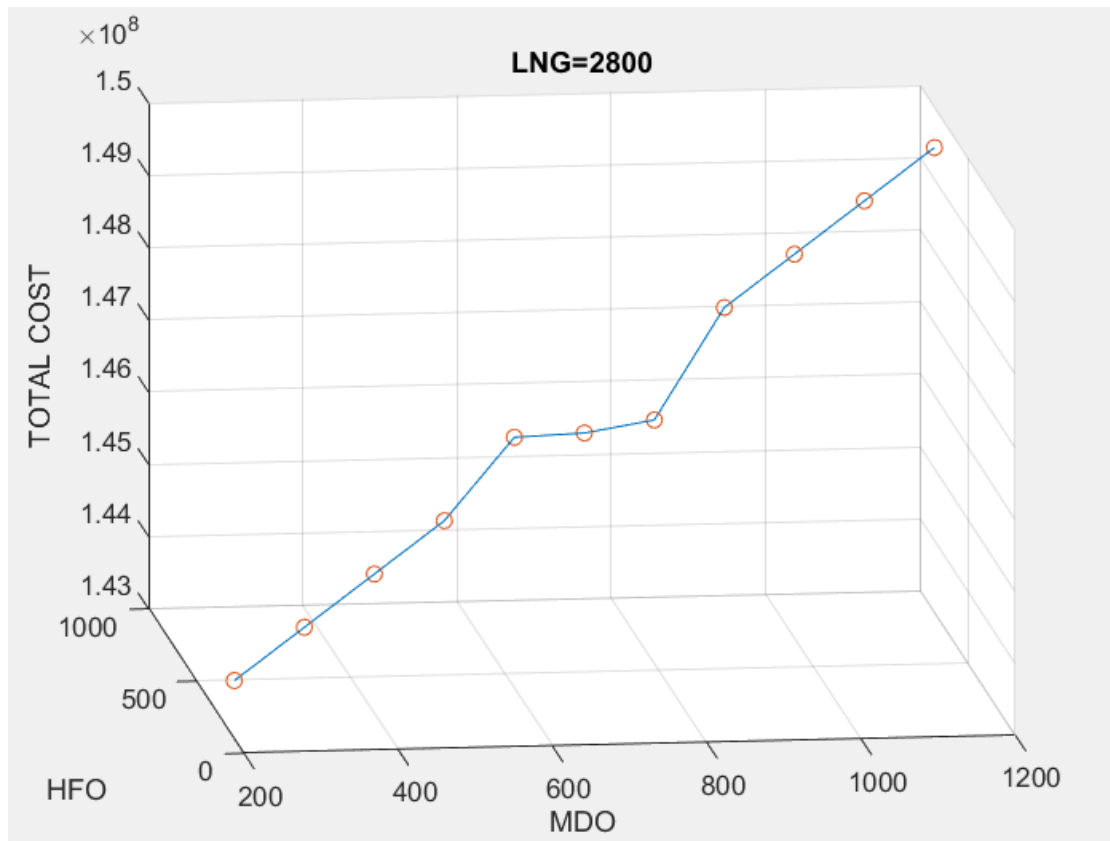
Εικόνα 30 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1600 US\$



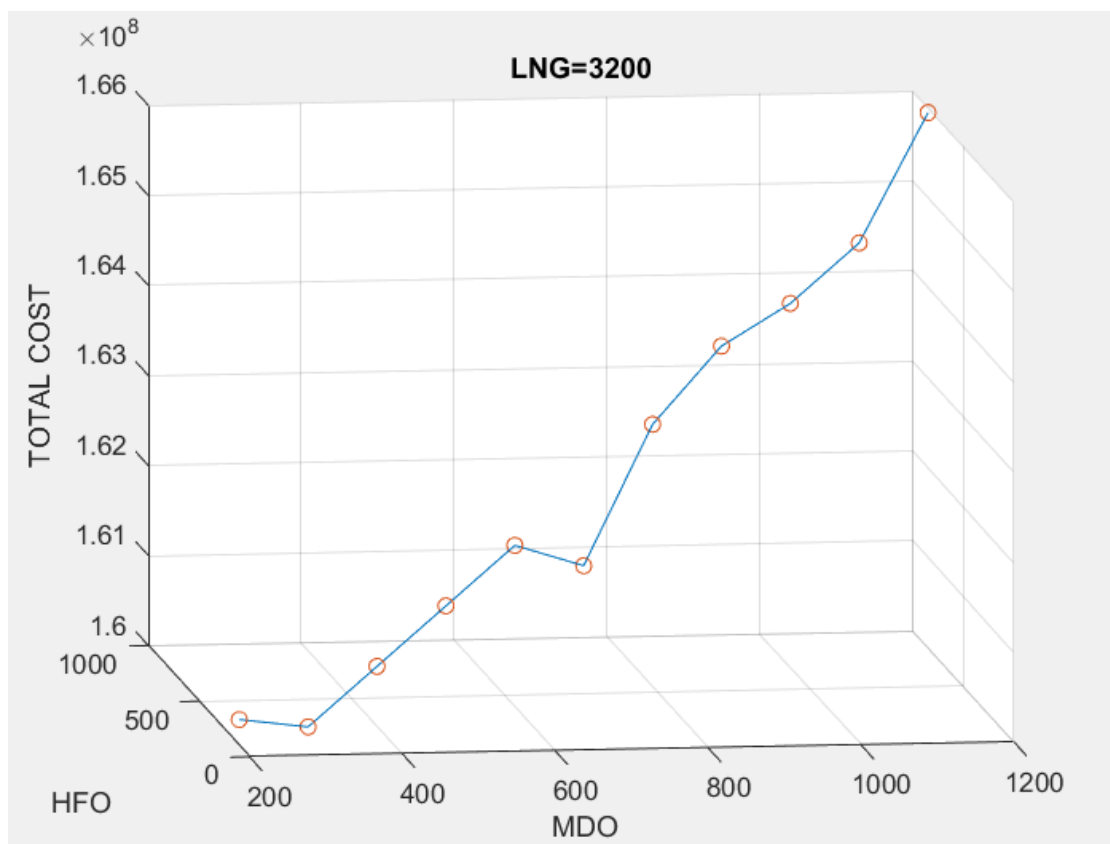
Εικόνα 31 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2000 US\$



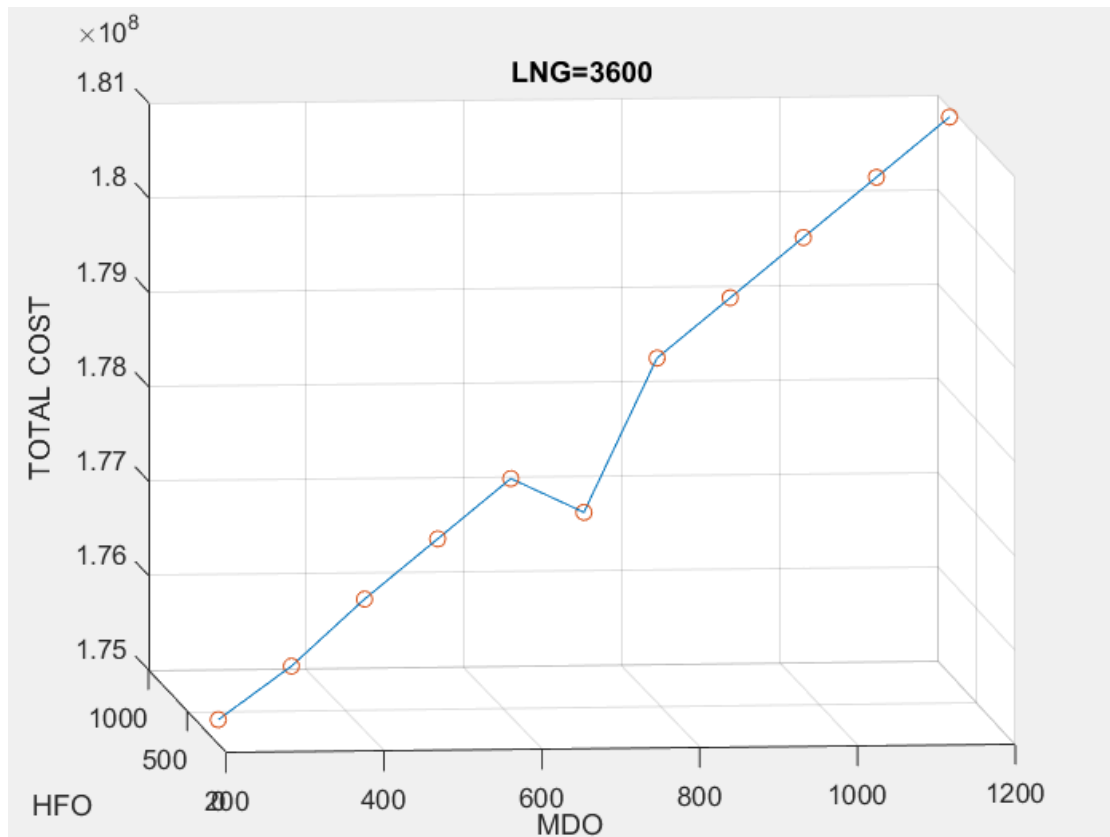
Εικόνα 32 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2400 US\$



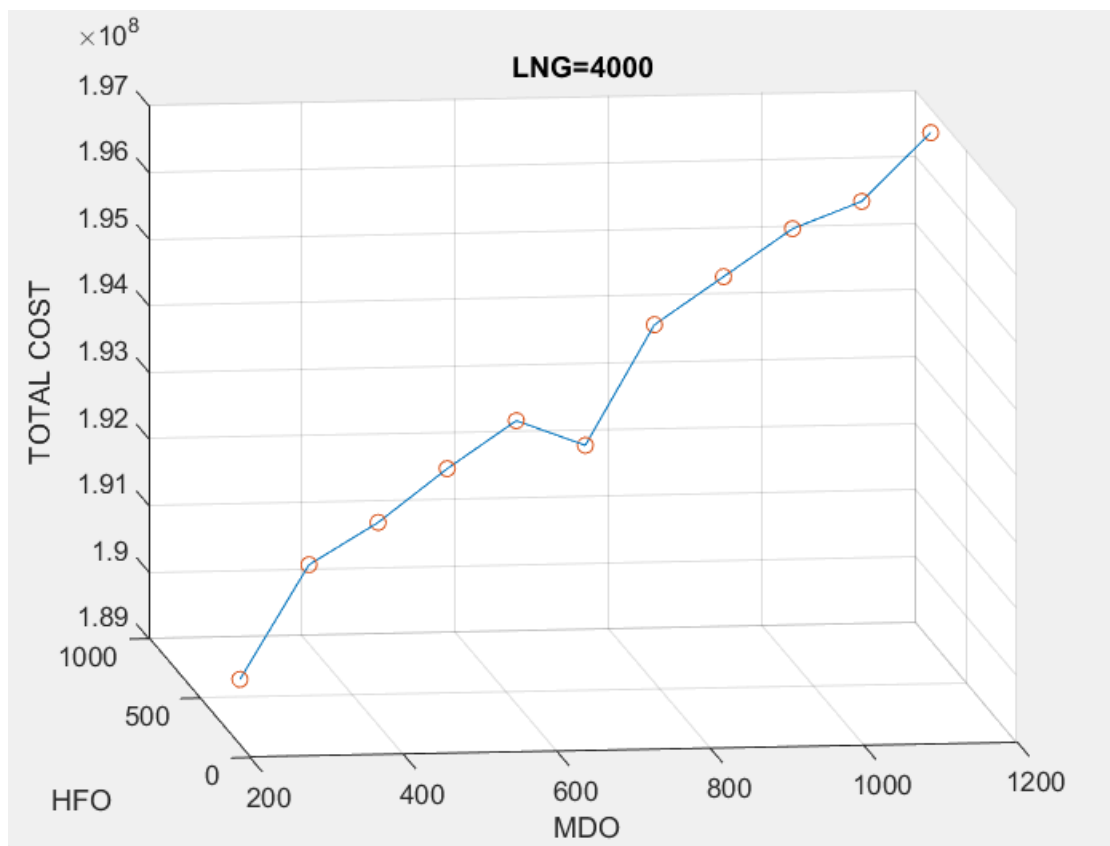
Εικόνα 33 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2800 US\$



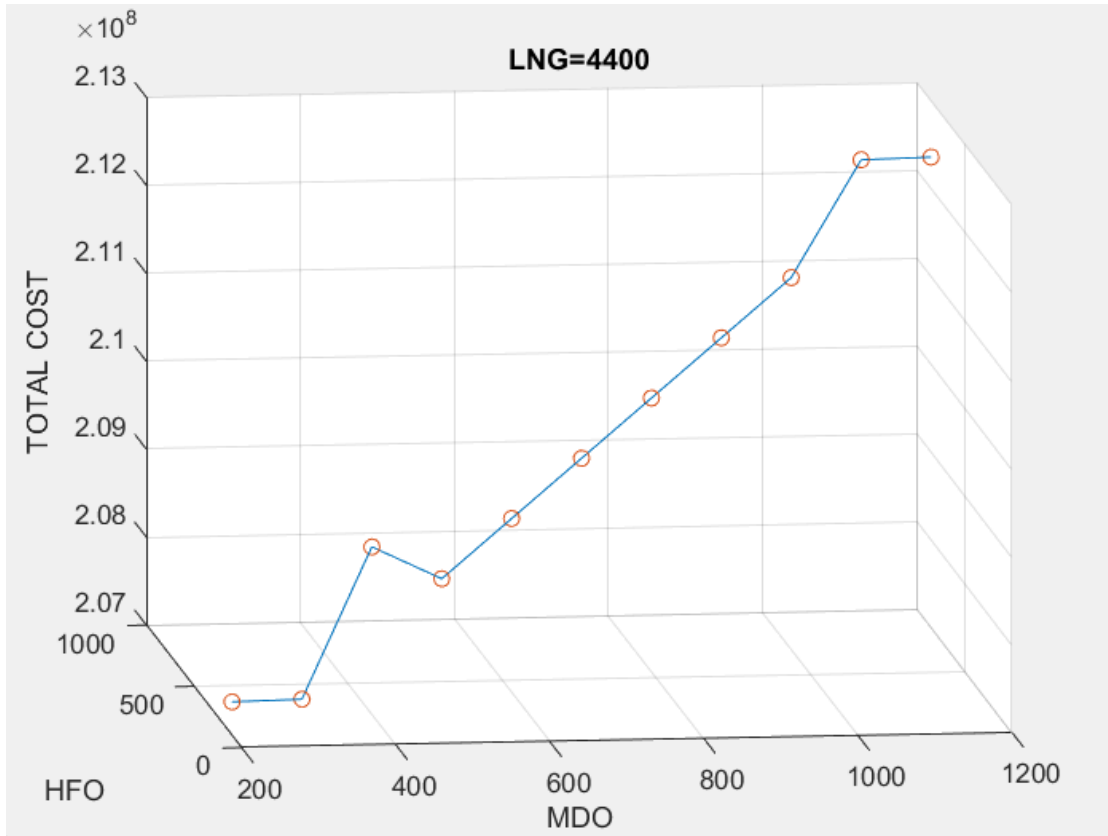
Εικόνα 34 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3200 US\$



Εικόνα 35 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3600 US\$



Εικόνα 36 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4000 US\$



Εικόνα 37 Σενάριο 2 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4400 US\$

5.2.3 Σενάριο 3

Το τρίτο σενάριο περιλαμβάνει τον ίδιο ετερογενή στόλο 5 πλοίων με σύνθεση 1 πλοίο TFDE και από δύο πλοία ME-GI και X-DF. Τα 15 διαθέσιμα συμβόλαια μαζί με τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 28. Οι μεταβλητές απόφασης με τον τρόπο αυτό αυξάνονται στις 75. Επίσης, τα συμβόλαια 11,12,13,15 περιλαμβάνουν διέλευση από κανάλι.

Contract No	Liquefaction Terminal	Regasification Terminal	Delivery deadline (Tc) [days]	Demanded quantity by Regasification terminal for time charter [m ³]
1	Idku-Egypt	Revithoussa - Greece	15	3.000.000
2	Idku-Egypt	Gate Terminal LNG - Netherlands	20	2.000.000
3	Qatar-Rasgas	Futtsu LNG - Japan	25	1.000.000
4	Russia-Sakhalin	Hazira LNG - India	30	900.000
5	Sabine Pass-US	Revithoussa - Greece	20	1.500.000
6	Qatar-Rasgas	Futtsu LNG – Japan	15	3.000.000
7	Sabine Pass-US	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	15	3.500.000
8	Qatar-Rasgas	Hazira LNG - India	20	2.500.000
9	Ichthys-Australia	Futtsu LNG - Japan	25	3.000.000
10	Idku-Egypt	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	20	2.000.000
11	Idku-Egypt	Hazira LNG - India	15	800.000
12	Qatar-Rasgas	Gate Terminal LNG - Netherlands	20	1.500.000
13	Russia-Sakhalin	Gate Terminal LNG - Netherlands	25	1.000.000
14	Ichthys-Australia	Hazira LNG - India	15	1.500.000
15	Russia-Sakhalin	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	30	1.500.000

Πίνακας 28 Χαρακτηριστικά συμβολαίων σεναρίου 3

Ήδη από το προηγούμενο σενάριο φάνηκε ότι χρειάζεται να αυξηθεί ο πληθυσμός και ο αριθμός των γενιών στις οποίες σταματάει ο αλγόριθμος ώστε να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Για να φανεί ο τρόπος που αυτοί οι δύο παράγοντες επηρεάζουν το αποτέλεσμα, το σενάριο επιλύεται δύο φορές. Την πρώτη φορά σταματάει μετά από 50 γενιές χωρίς βελτίωση της λύσης και εξετάζει πληθυσμό 200 λύσεων. Την δεύτερη φορά, σταματάει μετά από 120 γενιές και ο πληθυσμός των λύσεων που εξετάζονται σε κάθε γενιά αυξάνεται στις 400. Προφανώς, ο δεύτερος τρόπος απαιτεί περισσότερο χρόνο, δίνει όμως και καλύτερες λύσεις.

Δημιουργούνται τα τριών διαστάσεων διαγράμματα για κάθε βήμα της τιμής του LNG από τα 400 έως τα 4400 US\$ με άξονες χ και ψ την τιμή του καυσίμου MDO και HFO και άξονα z το συνολικό λειτουργικό κόστος. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στην πρώτη επίλυση είναι χρώματος μπλε και στην δεύτερη χρώματος κόκκινου. Ο αριθμός των Elite Children επιλέγεται να είναι 30, ενώ ο υπόλοιπος πληθυσμός επιλέγεται να δημιουργείται κατά 95% με την διαδικασία του Crossover και ο υπόλοιπος με την διαδικασία του Mutation. Η σύσταση του πληθυσμού σε κάθε γενιά για τους δύο τρόπους επίλυσης απεικονίζεται στους πίνακες 29 και 30.

Elite Childer	30
Crossover Children	162
Mutation Children	8
Total	200

Πίνακας 29 Σύσταση πληθυσμού πρώτου τρόπου-σενάριο 3

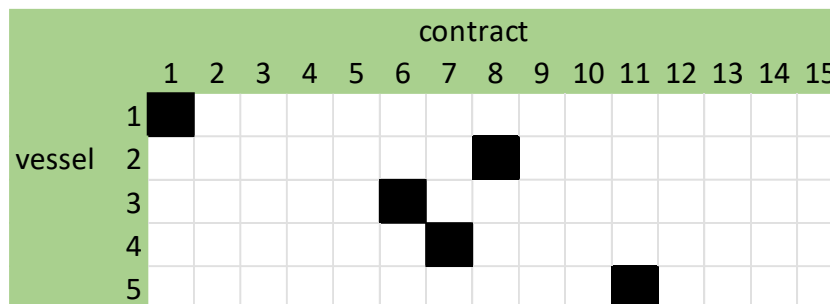
Elite Childer	30
Crossover Children	352
Mutation Children	18
Total	400

Πίνακας 30 Σύσταση πληθυσμού δεύτερου τρόπου-σενάριο 3

Με τον δεύτερο τρόπο επίλυσης παράγονται αποτελέσματα με μικρότερο κόστος και επομένως εκείνος θα είναι η αναφορά για την εύρεση της καλύτερης κατανομής. Παρατηρείται, ότι οι συνδυασμοί για τους οποίους η τιμή του LNG ισούται με 400 US\$, δηλαδή τους συνδυασμούς 1 έως 11, δεν επιλέγουν κάποιο από τα συμβόλαια που διέρχονται από κανάλι. Η πολύ χαμηλή τιμή καυσίμων οδηγεί στην επιλογή συμβολαίων που περιλαμβάνουν μεγαλύτερο κόστος καυσίμων όμως δεν έχουν κόστη διέλευσης από κανάλι. Ο συνδυασμός των συμβολαίων 1,3,6,8,14 επιλέγονται 5 φορές ενώ 5 φορές επιλέγεται και ο συνδυασμός των συμβολαίων 1,3,4,6,8. Τέλος, μια φορά επιλέγονται τα συμβόλαια 1,2,6,8,14. Οι διαφορετικές κατανομές που εμφανίζονται οφείλονται στην διαφοροποίηση των τιμών του MDO, τα πολύ κοντινά κόστη των παραπάνω συμβολαίων και στο γεγονός ότι ο γενετικός αλγόριθμος βρίσκει μια λύση πολύ καλή, όχι όμως απαραίτητα την βέλτιστη. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα για τιμή LNG=400, οι λύσεις που προκύπτουν είναι αρκετά ικανοποιητικές καθώς όλα τα σημεία φαίνονται σχεδόν συγγραμμικά και άρα όποια από τις κατανομές και να είναι η βέλτιστη δεν απέχει από τις υπόλοιπες σημαντικά. Σε σύγκριση με τον πρώτο τρόπο επίλυσης, φαίνεται από τα διαγράμματα ότι τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι μεν κοντινά αλλά βελτιωμένα.

Για τους υπόλοιπους συνδυασμούς, δηλαδή για τιμές LNG από 800 έως 4400 US\$, ο δεύτερος τρόπος επίλυσης παράγει 101 από τις 110 κατανομές που περιλαμβάνουν τα συμβόλαια 1,6,7,8 καθώς και το συμβόλαιο 11 το οποίο περνάει από το κανάλι του Σουέζ καθώς και 6 κατανομές που περιλαμβάνουν τα συμβόλαια

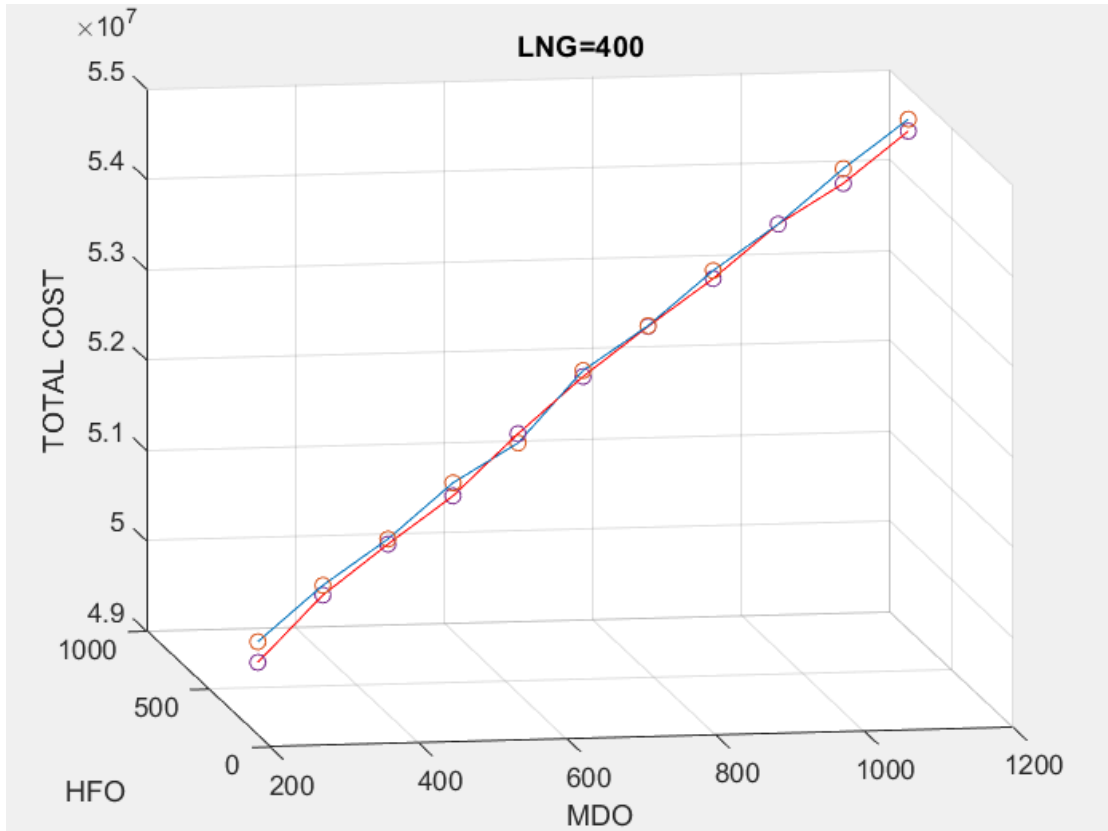
1,2,6,8,11 που εντοπίζονται όσο η τιμή του LNG είναι χαμηλή. Λόγω της αύξησης της τιμής των καυσίμων, το δρομολόγιο του συμβολαίου 11 επιλέγεται παρόλο που περιλαμβάνει τέλος καναλιού. Η καλύτερη κατανομή εμφανίζεται με συχνότητα 87 φορές και παρουσιάζεται στον πίνακα 31. Η πρώτη επίλυση βρίσκει την ίδια κατανομή 35 φορές και όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα είναι γενικά λιγότερο αποτελεσματική.



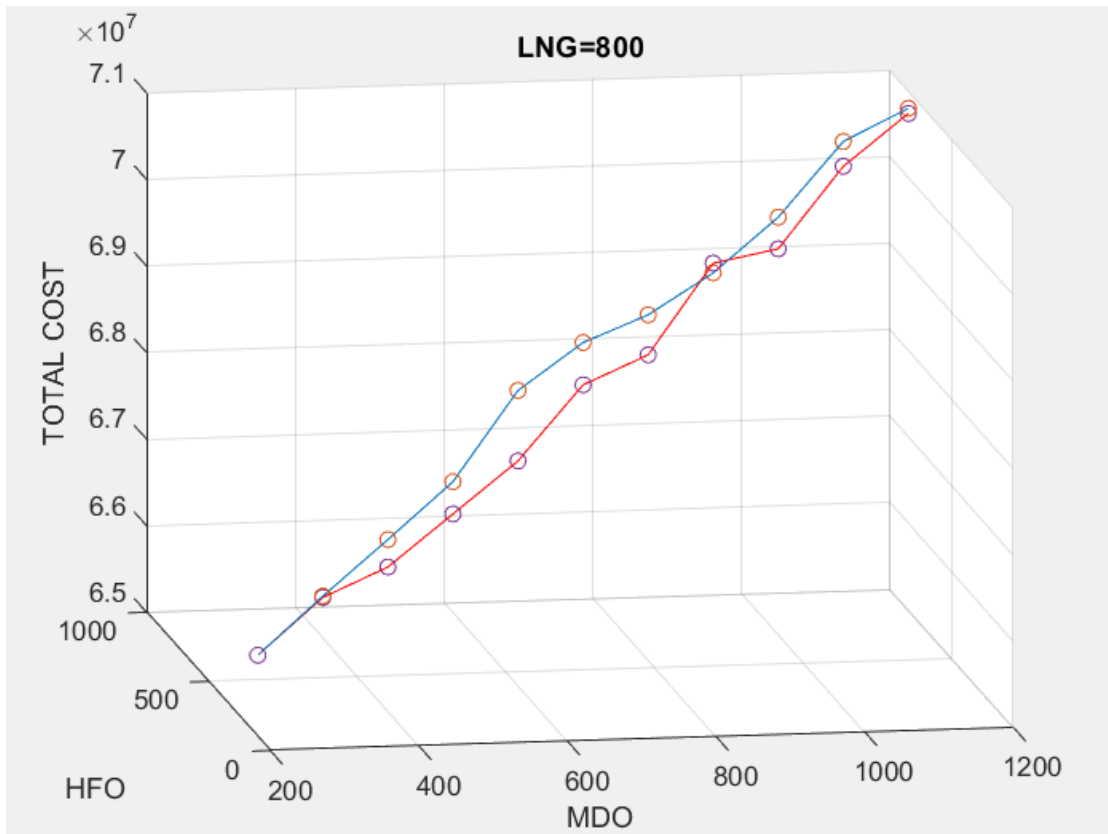
Πίνακας 31 Βέλτιστη κατανομή σεναρίου 3

Το αποτέλεσμα στον πρώτο τρόπο χρειάζεται από 51 έως 179 γενιές του γενετικού αλγορίθμου για να υπολογιστεί ενώ στον δεύτερο από 121 έως 341 γενιές. Η χαρακτηριστική συνάρτηση καλείται κατά μέσο όρο 13850 φορές και 68958 φορές αντίστοιχα. Ενδεικτικά ο χρόνος που χρειάζεται ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη εργασία για κάθε ένα από τους δύο τρόπους είναι κατά μέσο 89 sec και 397 sec αντίστοιχως. Επομένως, για χάρη της βελτιστοποίησης της λύσης φαίνεται ότι το υπολογιστικό κόστος ανέβηκε κατά 4 περίπου φορές.

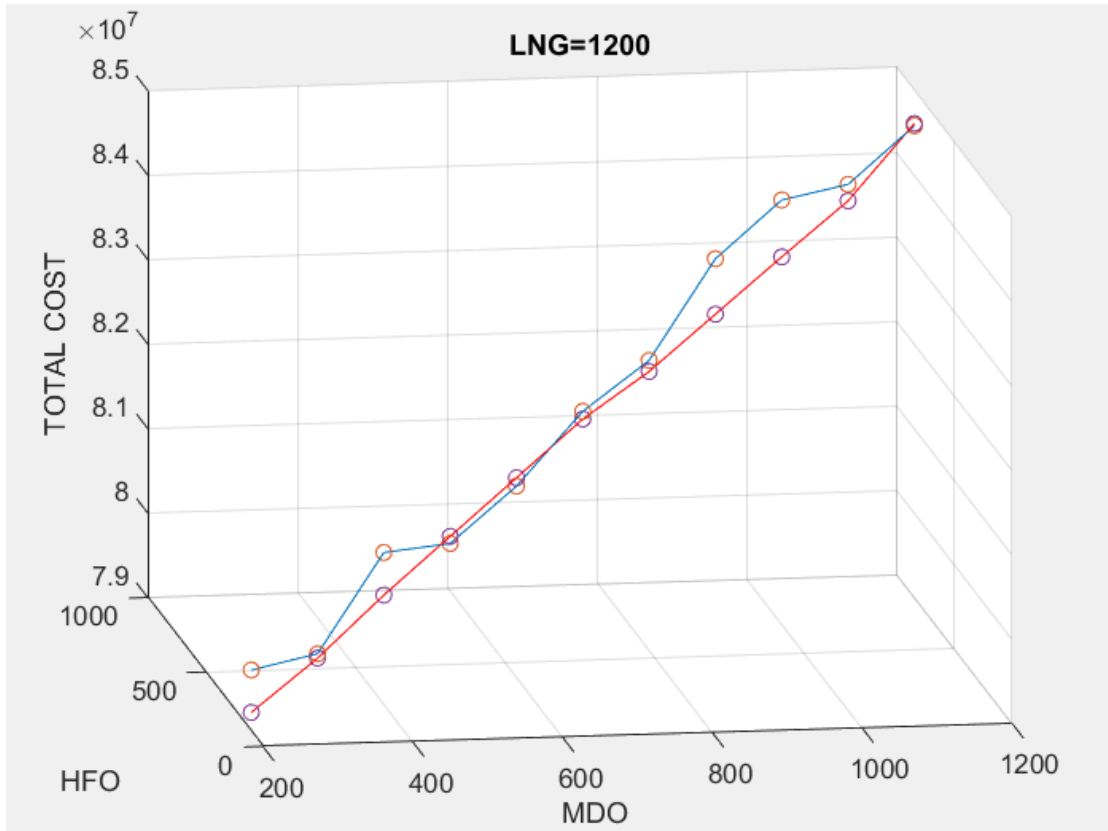
Στον πίνακα 41 του παραθέματος παρουσιάζεται αναλυτικά το κόστος που προέκυψε για κάθε συνδυασμό τιμής καθώς και οι φορές που χρειάστηκε να κληθεί η συνάρτηση για κάθε συνδυασμό και για τους δύο τρόπους επίλυσης. Οι στήλες Cost1 και FUNCCOUNT1 αντιστοιχούν στο κόστος και τον αριθμό κλήσης της χαρακτηριστικής συνάρτησης με τον πρώτο τρόπο και οι στήλες Cost2 και FUNCCOUNT2 στα αντίστοιχα μεγέθη του δεύτερου τρόπου. Επιπλέον, η στήλη Difference υπολογίζει την διαφορά στο κόστος των λύσεων που παράγει ο κάθε τρόπος για κάθε συνδυασμό τιμών, με θετική τιμή όταν το κόστος του πρώτου τρόπου είναι μικρότερο από του δεύτερου. Επιπλέον παρουσιάζονται για κάθε βήμα της τιμής του LNG από τα 400 έως τα 4400 US\$ και τα διαγράμματα τριών διαστάσεων με άξονες χ και ψ την τιμή του καυσίμου MDO και HFO και άξονα z το συνολικό λειτουργικό κόστος. Με μπλε η καμπύλη που αντιστοιχεί στον πρώτο τρόπο και με κόκκινο η καμπύλη που αντιστοιχεί στον δεύτερο.



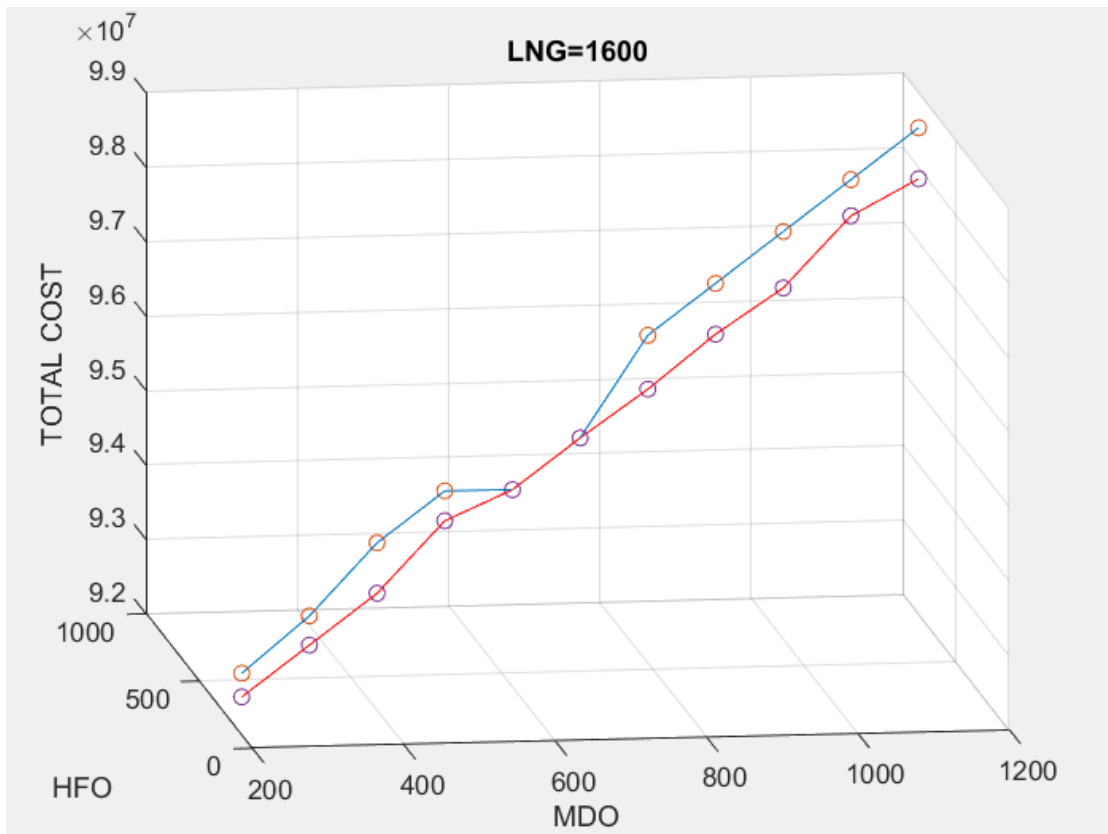
Εικόνα 38 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=400 US\$



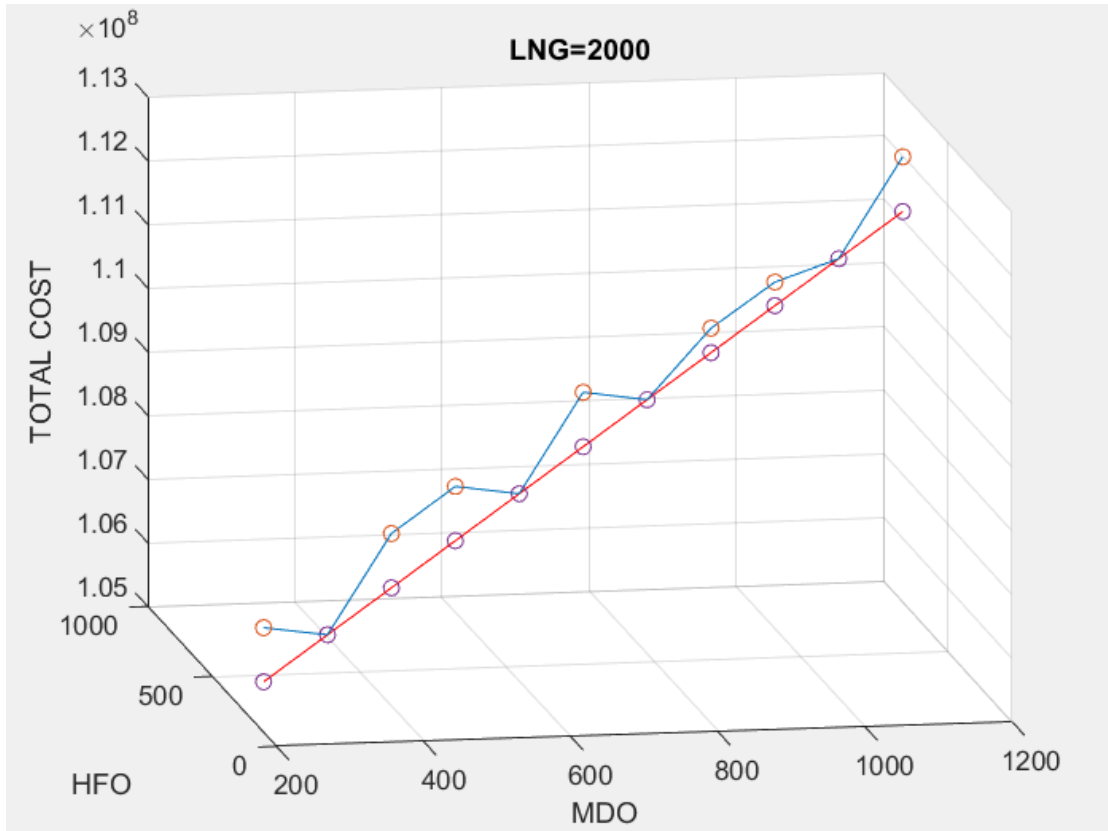
Εικόνα 39 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=800 US\$



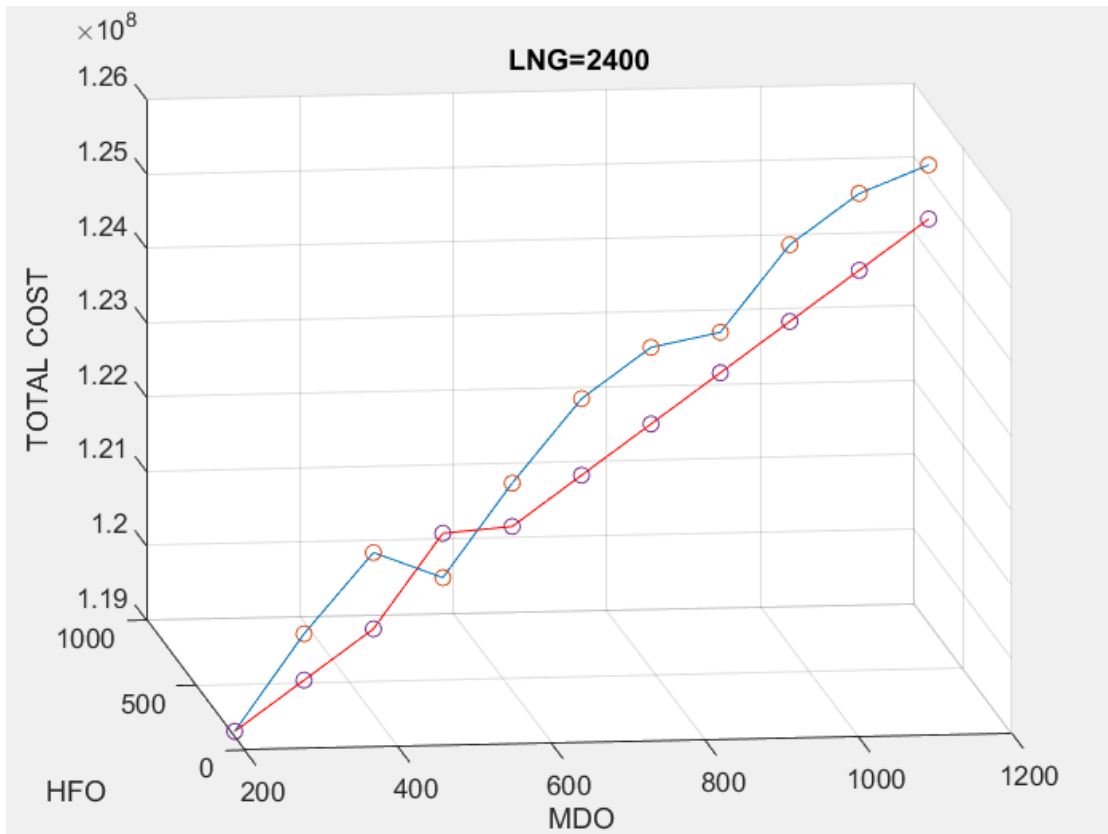
Εικόνα 40 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1200 US\$



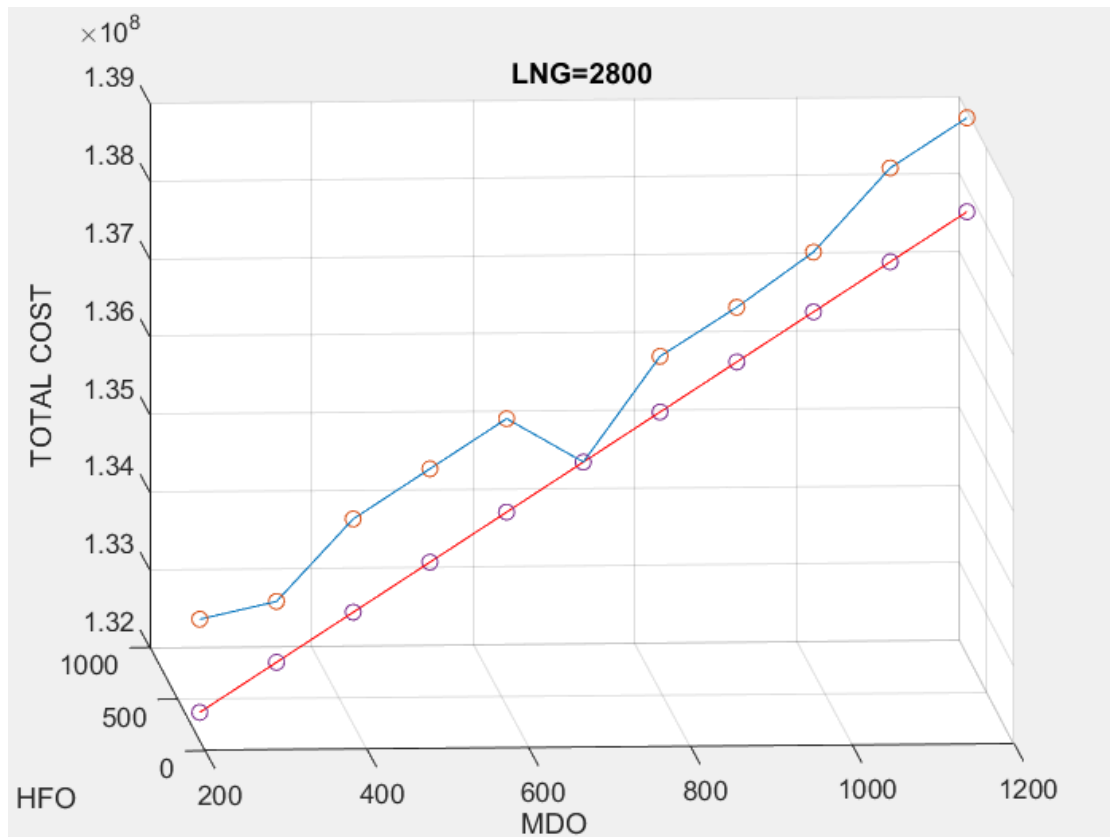
Εικόνα 41 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1600 US\$



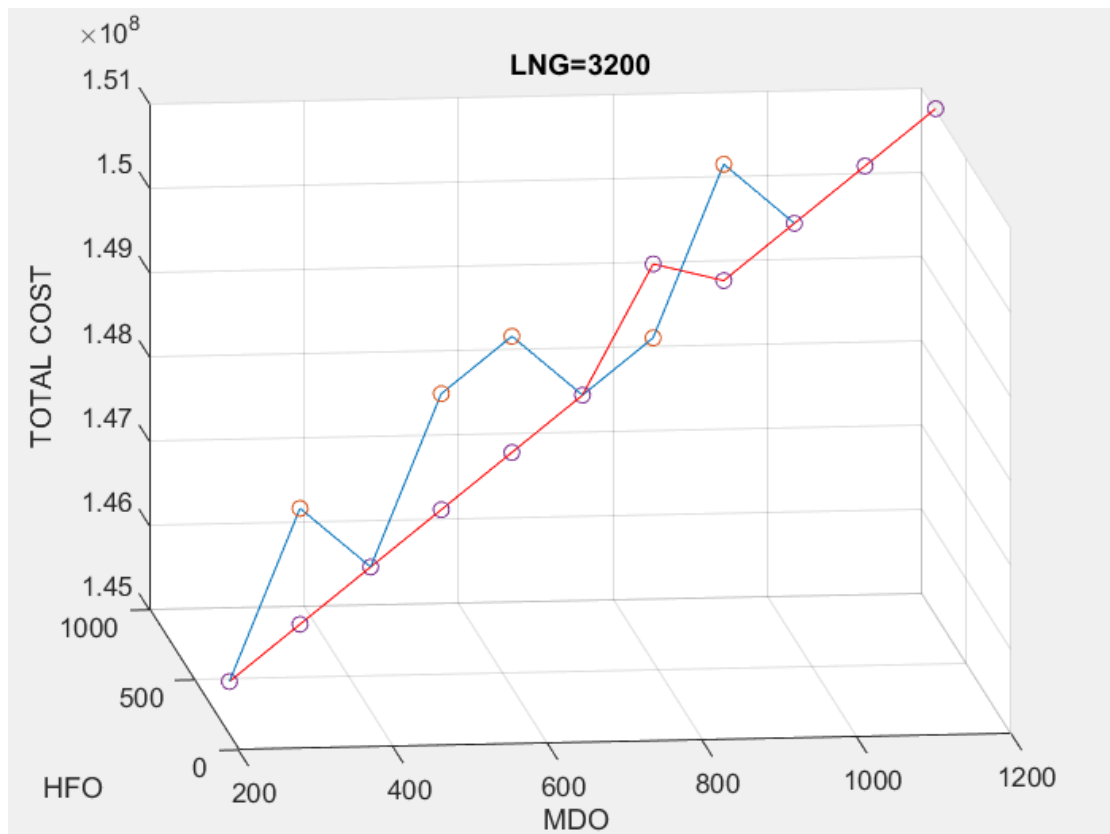
Εικόνα 42 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2000 US\$



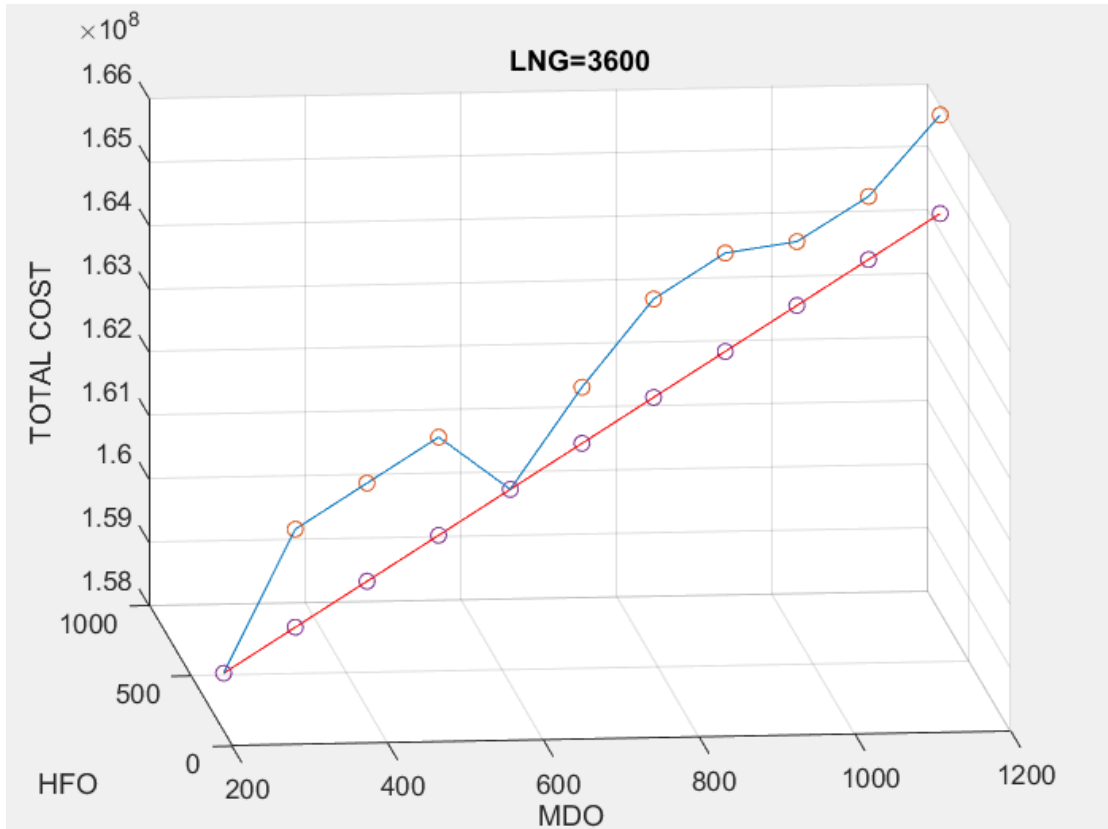
Εικόνα 43 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2400 US\$



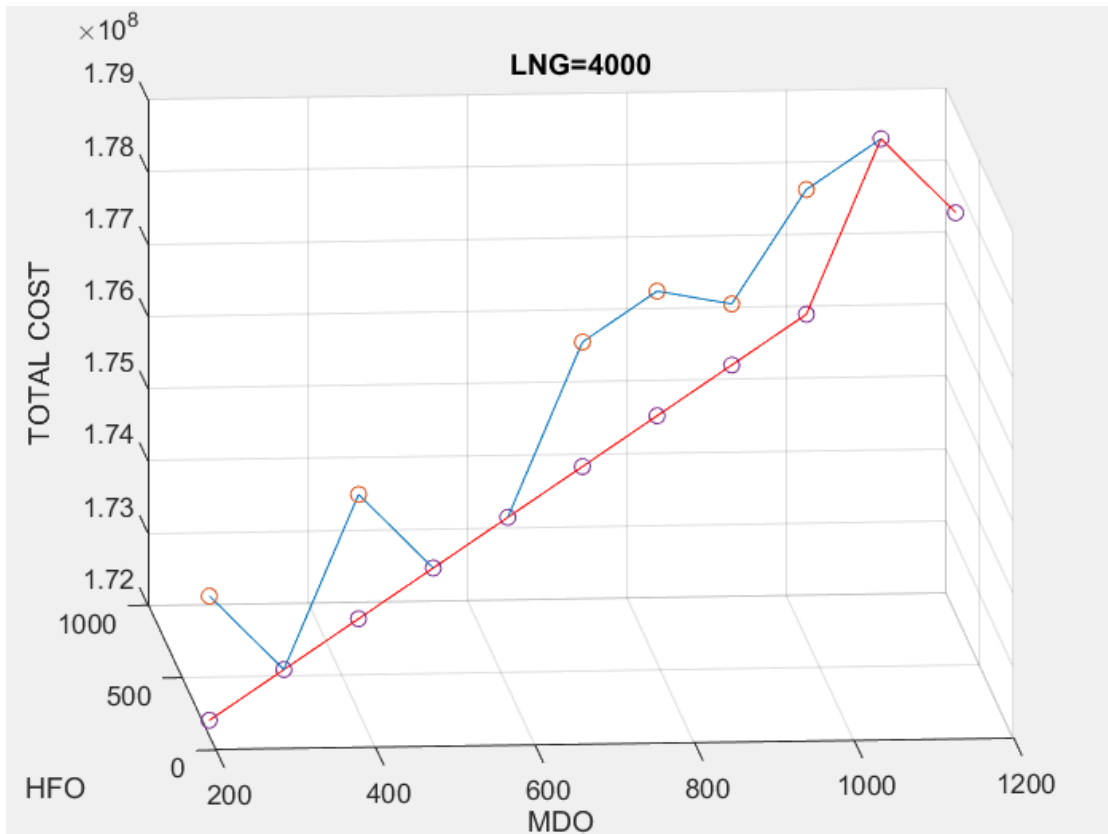
Εικόνα 44 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2800 US\$



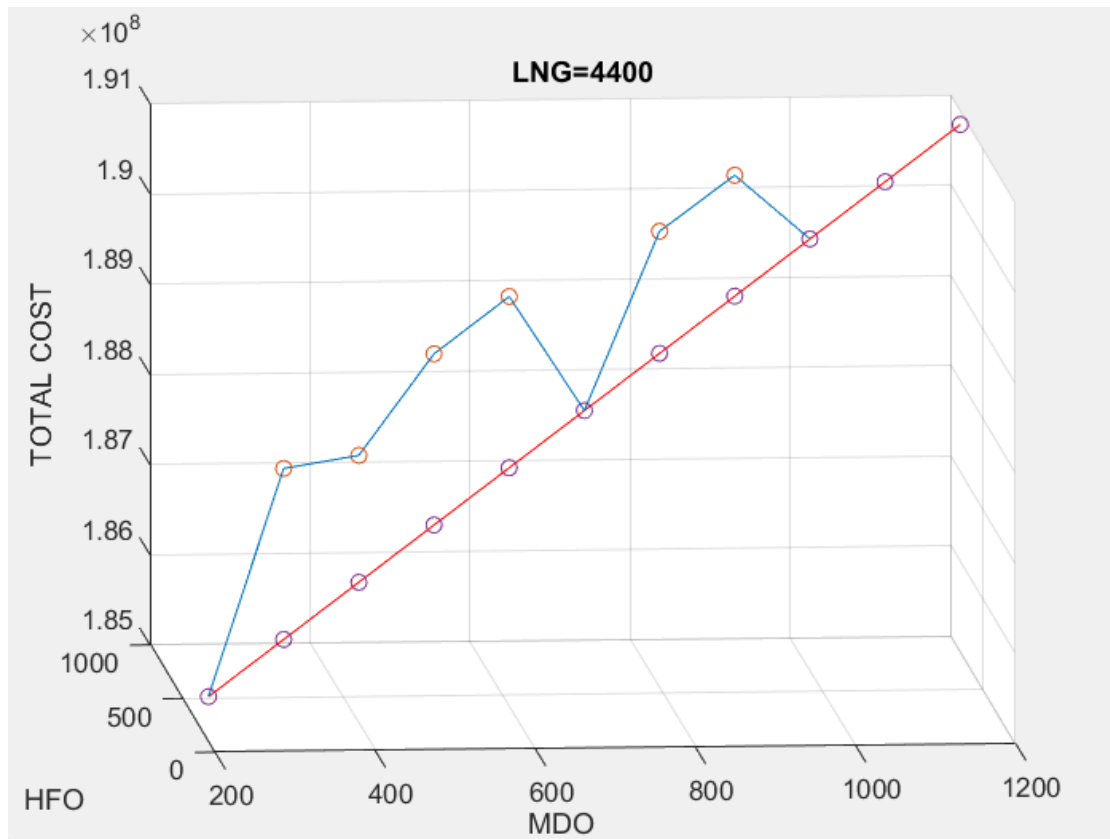
Εικόνα 45 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3200 US\$



Εικόνα 46 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3600 US\$



Εικόνα 47 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4000 US\$



Εικόνα 48 Σενάριο 3 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4400 US\$

5.2.4 Σενάριο 4

Το τέταρτο σενάριο περιλαμβάνει έναν ετερογενή στόλο 10 πλοίων με σύνθεση 2 πλοία TFDE, 5 πλοία ME-GI και 3 πλοία X-DF. Περιλαμβάνει επίσης τα 15 διαθέσιμα συμβόλαια των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 32. Οι μεταβλητές απόφασης με τον τρόπο αυτό αυξάνονται στις 150. Επίσης, τα συμβόλαια 11,12,13,15 περιλαμβάνουν διέλευση από κανάλι.

Contract No	Liquefaction Terminal	Regasification Terminal	Delivery deadline (Tc) [days]	Demanded quantity by Regasification terminal for time charter [m ³]
1	Idku-Egypt	Revithoussa - Greece	15	3.000.000
2	Idku-Egypt	Gate Terminal LNG - Netherlands	20	2.000.000
3	Qatar-Rasgas	Futtsu LNG - Japan	25	1.000.000
4	Russia-Sakhalin	Hazira LNG - India	30	900.000
5	Sabine Pass-US	Revithoussa - Greece	20	1.500.000
6	Qatar-Rasgas	Futtsu LNG – Japan	15	3.000.000
7	Sabine Pass-US	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	15	3.500.000
8	Qatar-Rasgas	Hazira LNG - India	20	2.500.000
9	Ichthys-Australia	Futtsu LNG - Japan	25	3.000.000
10	Idku-Egypt	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	20	2.000.000
11	Idku-Egypt	Hazira LNG - India	15	2.000.000
12	Qatar-Rasgas	Gate Terminal LNG - Netherlands	20	1.500.000
13	Russia-Sakhalin	Gate Terminal LNG - Netherlands	25	1.000.000
14	Ichthys-Australia	Hazira LNG - India	15	1.500.000
15	Russia-Sakhalin	SPEC FSRU (Hoegh Grace) - Colombia	30	1.500.000

Πίνακας 32 Χαρακτηριστικά συμβολαίων σεναρίου 4

Λόγω της μεγάλης αύξησης στις μεταβλητές ο πληθυσμός επιλέγεται στα 500 και αριθμός των γενιών στις οποίες σταματάει ο αλγόριθμος επιλέγεται στα 120 για τον δεύτερο τρόπο επίλυσης. Τα χαρακτηριστικά του πρώτου τρόπου παραμένουν στις 50 γενιές και με πληθυσμό 200. Και σε αυτό το σενάριο δημιουργούνται τα τριών διαστάσεων διαγράμματα για κάθε βήμα της τιμής του LNG από τα 400 έως τα 4400 US\$ με άξονες χ και ψ την τιμή του καυσίμου MDO και HFO και άξονα z το συνολικό λειτουργικό κόστος. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στην πρώτη επίλυση είναι χρώματος μπλε και στην δεύτερη χρώματος κόκκινου. Ο αριθμός των Elite Children επιλέγεται

να είναι 30, ενώ ο υπόλοιπος πληθυσμός επιλέγεται να δημιουργείται κατά 95% με την διαδικασία του Crossover και ο υπόλοιπος με την διαδικασία του Mutation. Ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνεται ο πληθυσμός για τους δύο τρόπους επίλυσης φαίνεται στους πίνακες 33 και 34.

Elite Childer	30
Crossover Children	162
Mutation Children	8
Total	200

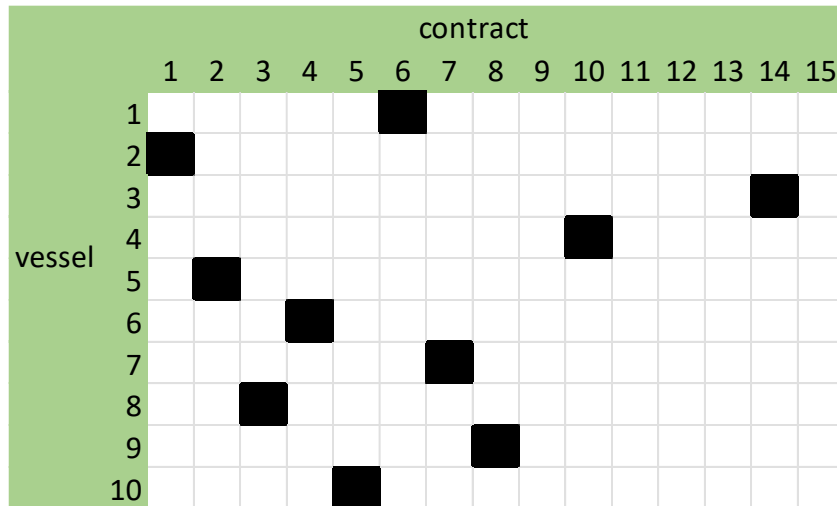
Πίνακας 33 Σύσταση πληθυσμού πρώτου τρόπου-σενάριο 4

Αντίστοιχα, ο πληθυσμός του δεύτερου τρόπου επίλυσης αποτελείται από

Elite Childer	30
Crossover Children	447
Mutation Children	23
Total	500

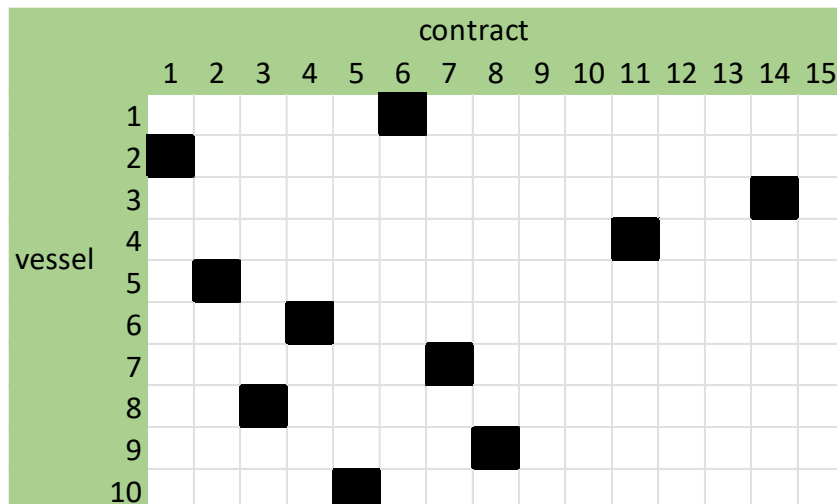
Πίνακας 34 Σύσταση πληθυσμού δεύτερου τρόπου-σενάριο 4

Με τον δεύτερο τρόπο επίλυσης παράγονται αποτελέσματα με μικρότερο κόστος και επομένως εκείνος θα είναι η αναφορά για την εύρεση της καλύτερης κατανομής. Παρατηρείται, ότι οι συνδυασμοί για τους οποίους η τιμή του LNG είναι 400, 800 και 1200 US\$, δηλαδή τους συνδυασμούς 1 έως 33, δεν επιλέγεται κάποιο από τα συμβόλαια που διέρχονται από κανάλι δηλαδή το 11,12,13,15. Επιπλέον, μόνο σε 1 από τις 33 περιπτώσεις επιλέγεται το συμβόλαιο 9 ενώ τις υπόλοιπες απορρίπτεται και αυτό. Για τα υπόλοιπα συμβόλαια προκύπτουν διάφορες κατανομές. Οι διαφορετικές κατανομές που εμφανίζονται οφείλονται στην διαφοροποίηση των τιμών του MDO, στις ομοιότητες μεταξύ των πλοίων, τα πολύ κοντινά κόστη των παραπάνω συμβολαίων και στο γεγονός ότι ο γενετικός αλγόριθμος βρίσκει μια λύση πολύ καλή, όχι όμως απαραίτητα την βέλτιστη. Σε σύγκριση με τον πρώτο τρόπο επίλυσης, φαίνεται από τα διαγράμματα ότι τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι μεν κοντινά αλλά βελτιωμένα. Από τις 33 περιπτώσεις ο δεύτερος τρόπος επίλυσης εμφανίζει 19 φορές καλύτερο αποτέλεσμα, 8 φορές ισοδύναμο και 6 φορές χειρότερο. Η πιο συνηθισμένη κατανομή του με συχνότητα εμφάνισης 6 φορές παρουσιάζεται στον πίνακα 35.



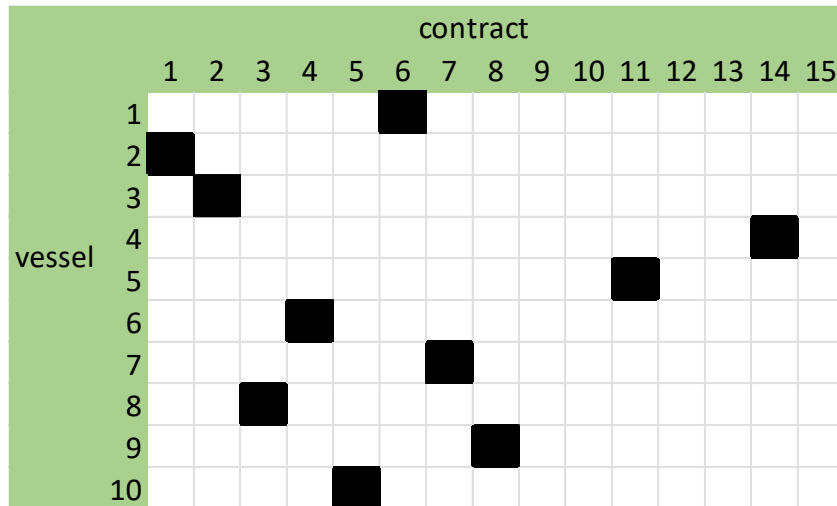
Πίνακας 35 Συχνότερη κατανομή για τους συνδυασμούς 1 έως 33 του σεναρίου 4

Για τους υπόλοιπους συνδυασμούς, δηλαδή για τιμές LNG από 1600 έως 4400 US\$, τα συμβόλαια 9,10,12,13 και 15 απορρίπτονται κάθε φορά. Αυτό σημαίνει ότι το συμβόλαιο 11 που περιέχει διέλευση από το Σουέζ έχει αντικαταστήσει το συμβόλαιο 10 των προηγούμενων περιπτώσεων, λόγω μικρότερου κόστους. Ο δεύτερος τρόπος επίλυσης εμφανίζει 65 φορές καλύτερο αποτέλεσμα, 42 φορές ισοδύναμο και 14 φορές χειρότερο από τον πρώτο. Η πιο συνηθισμένη κατανομή του με συχνότητα εμφάνισης 44 φορές παρουσιάζεται στον πίνακα 36.



Πίνακας 36 Συχνότερη κατανομή για τους συνδυασμούς 34 έως 121 του σεναρίου 4

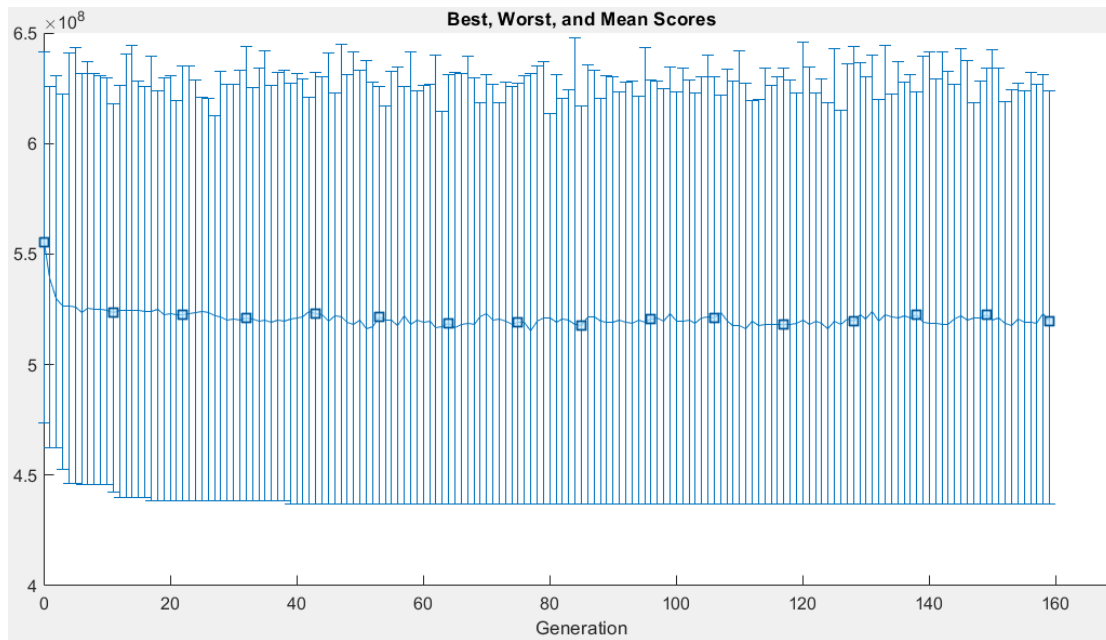
Επίσης, εμφανίζεται και μια κατανομή με ελαφρώς καλύτερο αποτέλεσμα 29 φορές η οποία παρουσιάζει αρκετή ομοιότητα με την παραπάνω η οποία παρουσιάζεται στον πίνακα 37.



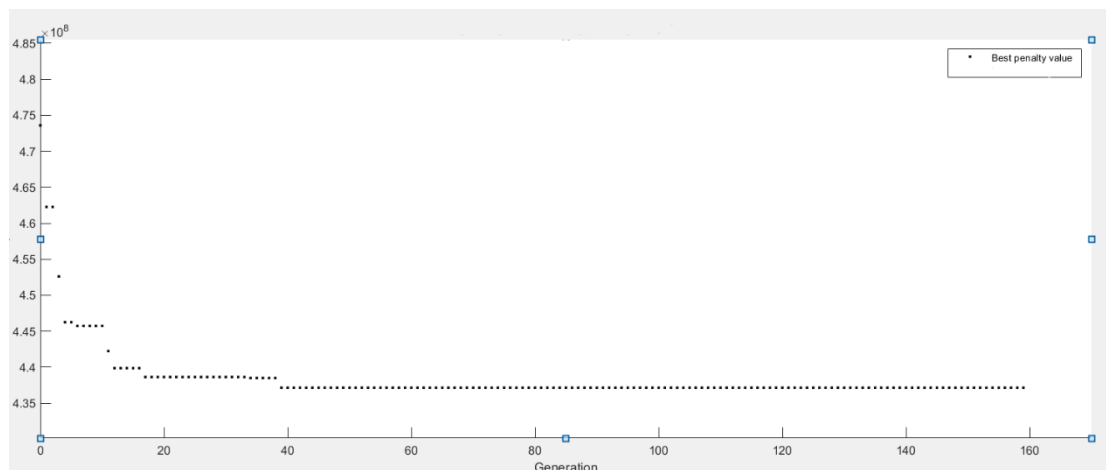
Πίνακας 37 Βέλτιστη κατανομή για τους συνδυασμούς 34 έως 121 του σεναρίου 4

Το αποτέλεσμα στον πρώτο τρόπο χρειάζεται από 63 έως 216 γενιές του γενετικού αλγορίθμου για να υπολογιστεί ενώ στον δεύτερο από 125 έως 384 γενιές. Η χαρακτηριστική συνάρτηση καλείται κατά μέσο όρο 18068 φορές και 96659 φορές αντίστοιχα. Ενδεικτικά ο χρόνος που χρειάζεται ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη εργασία για κάθε ένα από τους δύο τρόπους είναι κατά μέσο 73 sec και 479 sec αντιστοίχως. Επομένως, για χάρη της βελτιστοποίησης της λύσης φαίνεται ότι το υπολογιστικό κόστος ανέβηκε κατά 5 περίπου φορές.

Για τον δεύτερο τρόπο επιλέγεται τυχαία ο συνδυασμός 80. Για αυτόν τον συνδυασμό παρουσιάζεται γραφικά η πορεία του αλγορίθμου προς την βέλτιστη λύση γενιά προς γενιά. Στο πρώτο διάγραμμα της εικόνας 49 αποτυπώνονται η βέλτιστη και η χειρότερη λύση καθώς και η μέση τιμή όλων των κατανομών του πληθυσμού, προκειμένου να κατανοηθεί το περιθώριο λάθους στην περίπτωση που ο πλοιοκτήτης δεν πάρει σωστές αποφάσεις για τον στόλο του. Η απόσταση των χειρότερων λύσεων από τις καλύτερες παρατηρείται ότι ξεπερνά τα 200 εκατομμύρια US\$. Επιπλέον, μεμονωμένα παρουσιάζεται γραφικά στην εικόνα 50 και η εξέλιξη της βέλτιστης τιμής σε ένα δεύτερο διάγραμμα.



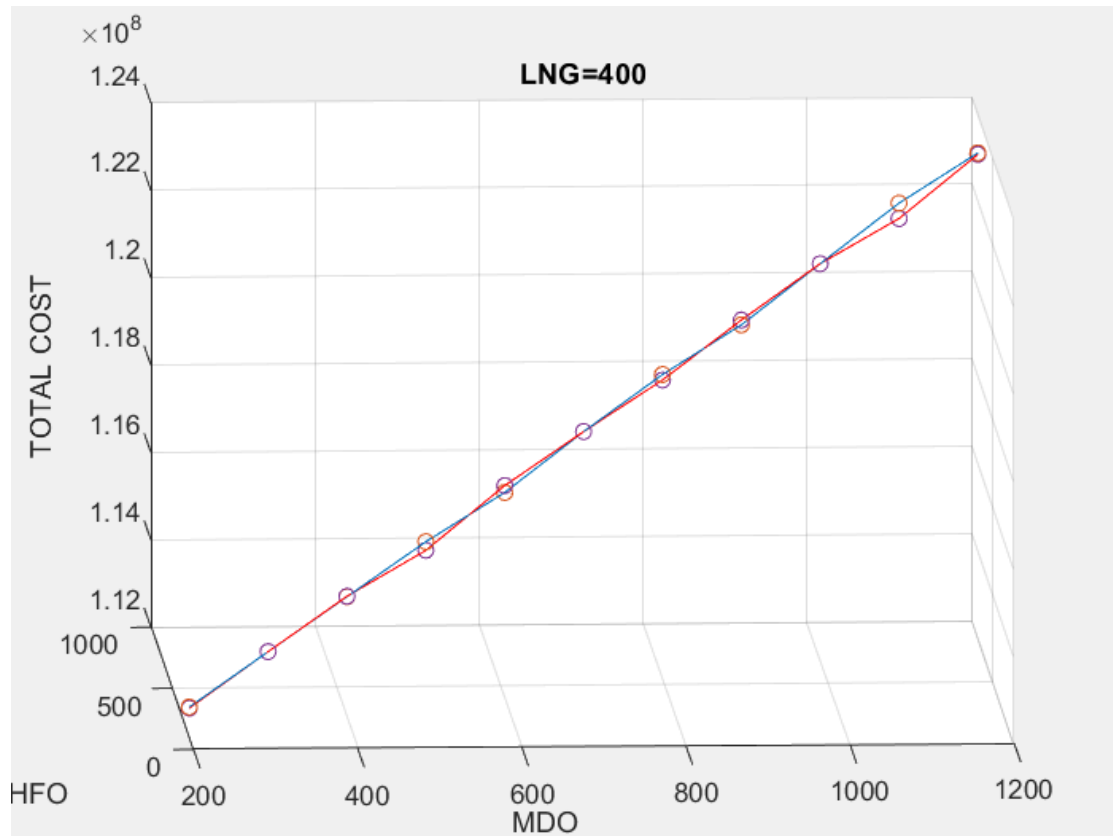
Εικόνα 49 Εξέλιξη της τιμής της βέλτιστης, μέσης και χειρότερης λύσης για τον συνδυασμό 80 – σενάριο 4



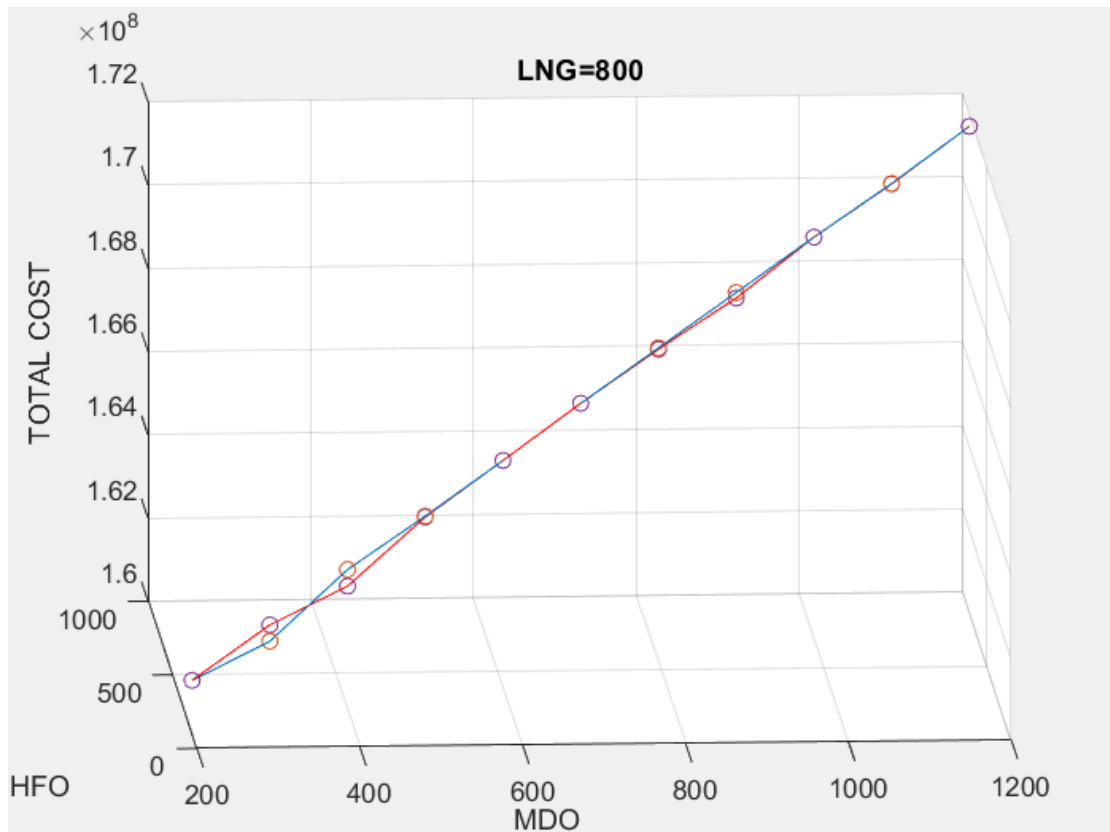
Εικόνα 50 Εξέλιξη της τιμής της βέλτιστης λύσης για τον συνδυασμό 80 – σενάριο 4

Στον πίνακα 42 του παραθέματος παρουσιάζεται αναλυτικά το κόστος που προέκυψε για κάθε συνδυασμό τιμής καθώς και οι φορές που χρειάστηκε να κληθεί η συνάρτηση για κάθε συνδυασμό και για τους δύο τρόπους επίλυσης. Οι στήλες Cost1 και FUNCCOUNT1 αντιστοιχούν στο κόστος και τον αριθμό κλήσης της χαρακτηριστικής συνάρτησης με τον πρώτο τρόπο και οι στήλες Cost2 και FUNCCOUNT2 στα αντίστοιχα μεγέθη του δεύτερου τρόπου. Επιπλέον, η στήλη Difference υπολογίζει την διαφορά στο κόστος των λύσεων που παράγει ο κάθε τρόπος για κάθε συνδυασμό τιμών, με θετική τιμή όταν το κόστος του πρώτου τρόπου είναι μικρότερο από του δεύτερου. Επιπλέον παρουσιάζονται στις εικόνες 51 έως 61 για κάθε βήμα της τιμής του LNG από τα 400 έως τα 4400 US\$ τα διαγράμματα τριών διαστάσεων με άξονες χ και ψ την τιμή του καυσίμου MDO και HFO και άξονα z το

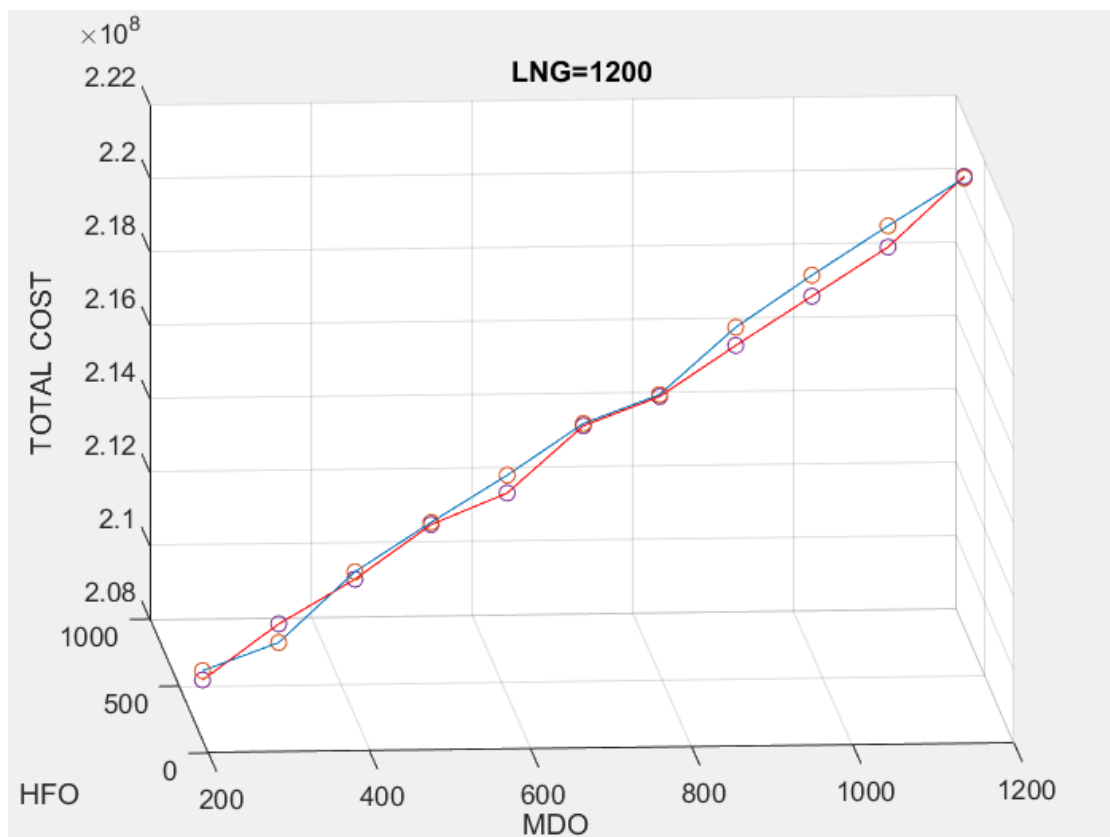
συνολικό λειτουργικό κόστος. Με μπλε η καμπύλη που αντιστοιχεί στον πρώτο τρόπο και με κόκκινο η καμπύλη που αντιστοιχεί στον δεύτερο.



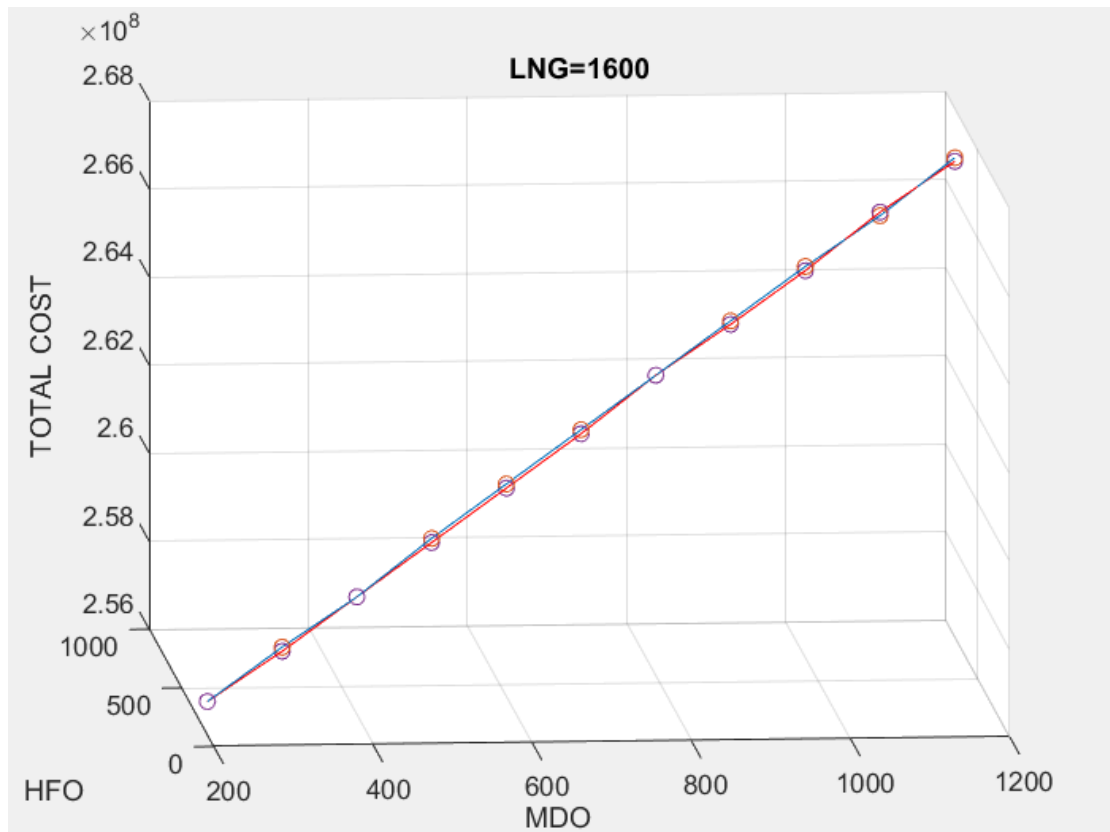
Εικόνα 51 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=400 US\$



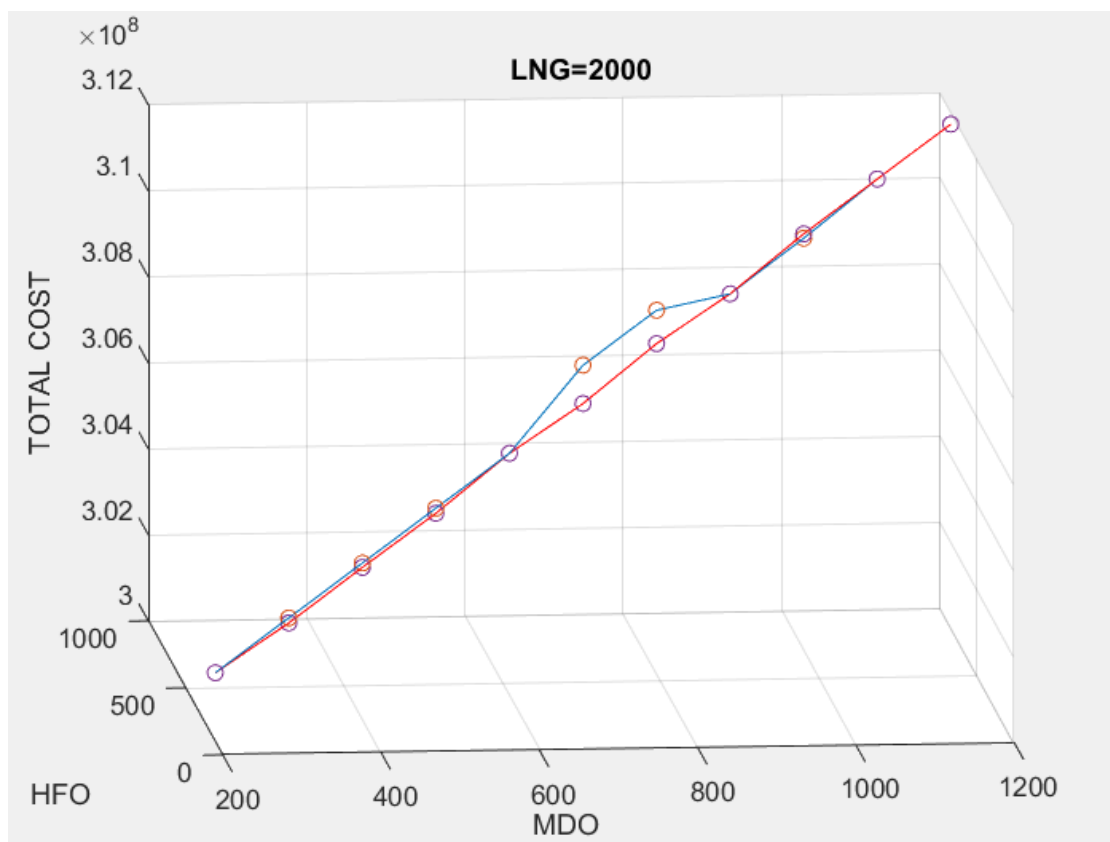
Εικόνα 52 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=800 US\$



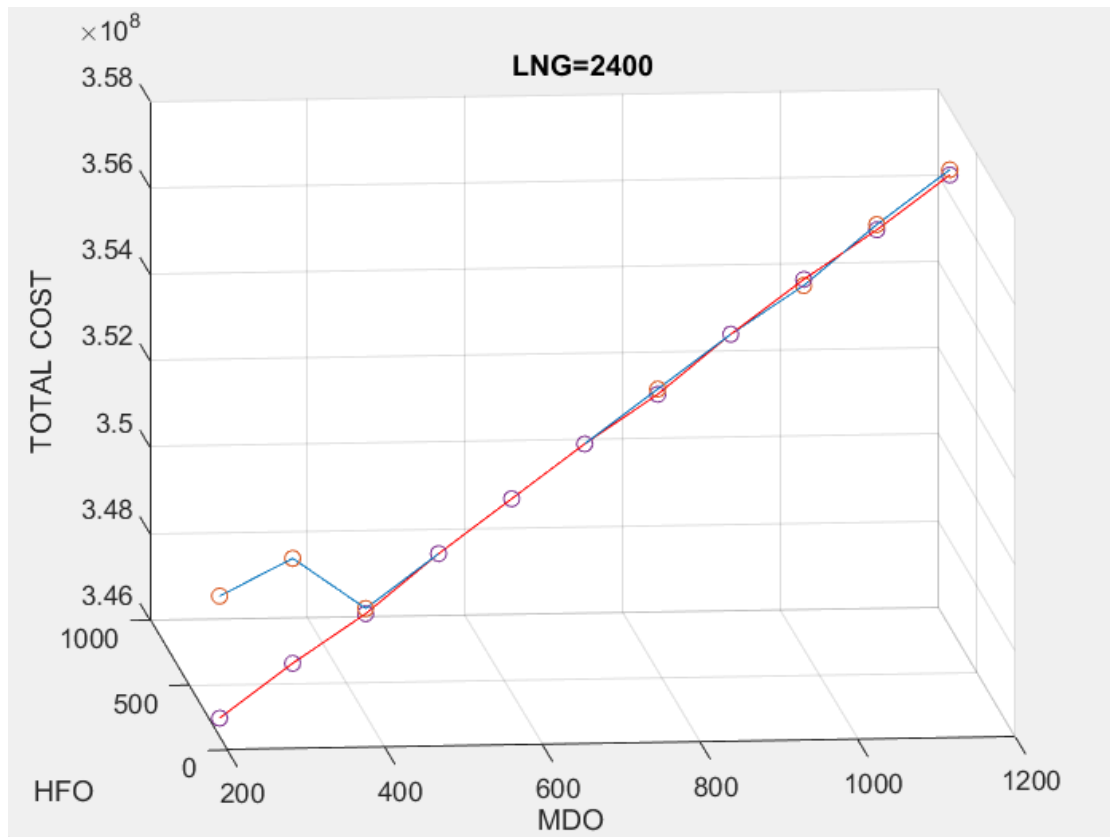
Εικόνα 53 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσεως των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1200 US\$



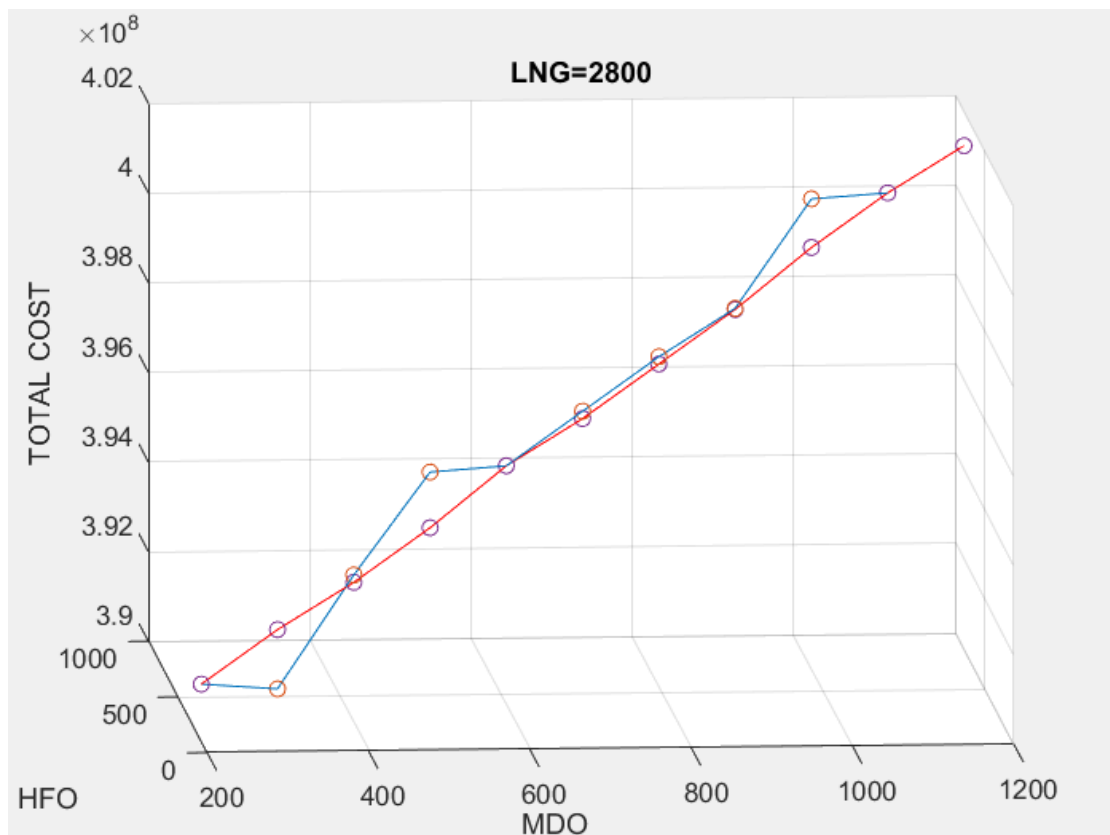
Εικόνα 54 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=1600 US\$



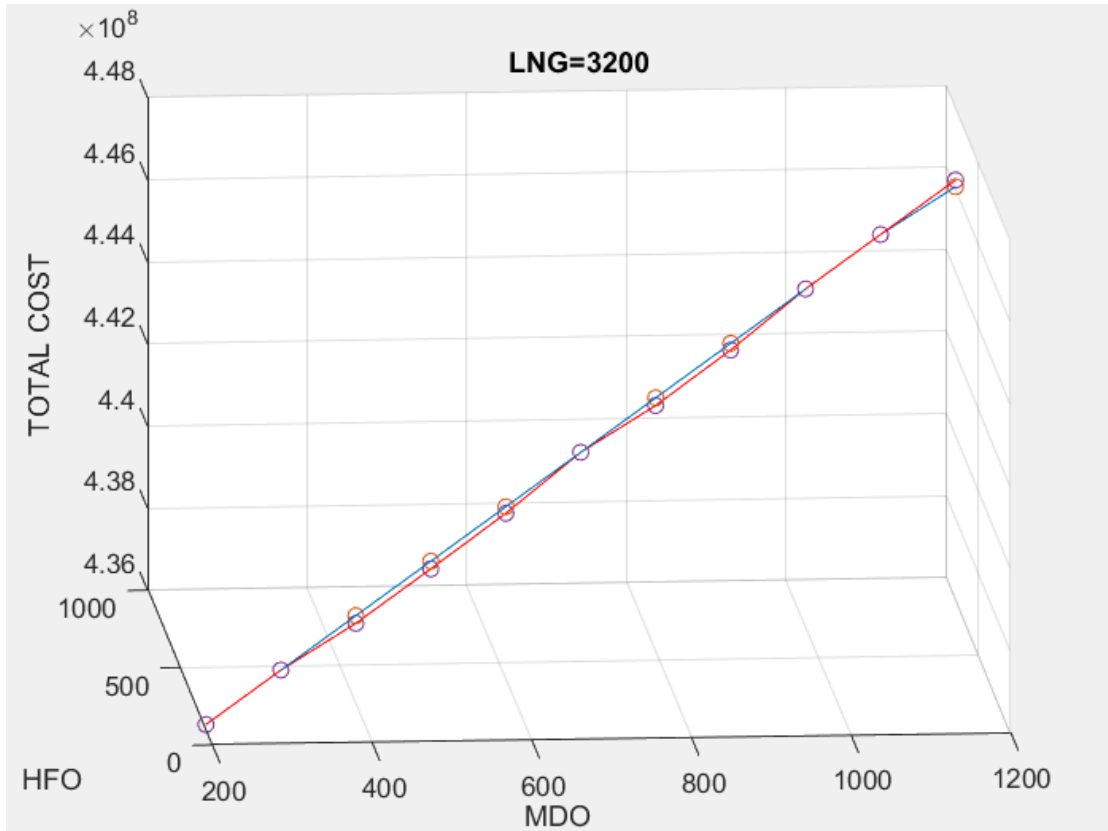
Εικόνα 55 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2000 US\$



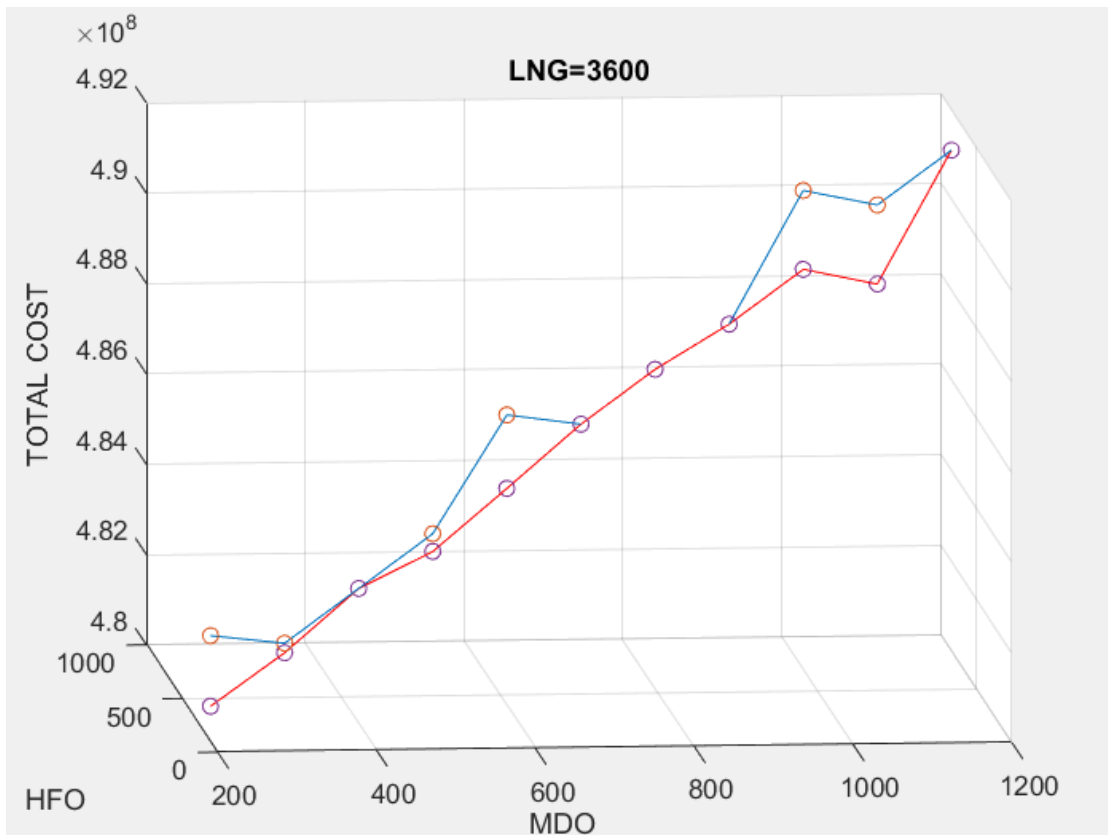
Εικόνα 56 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2400 US\$



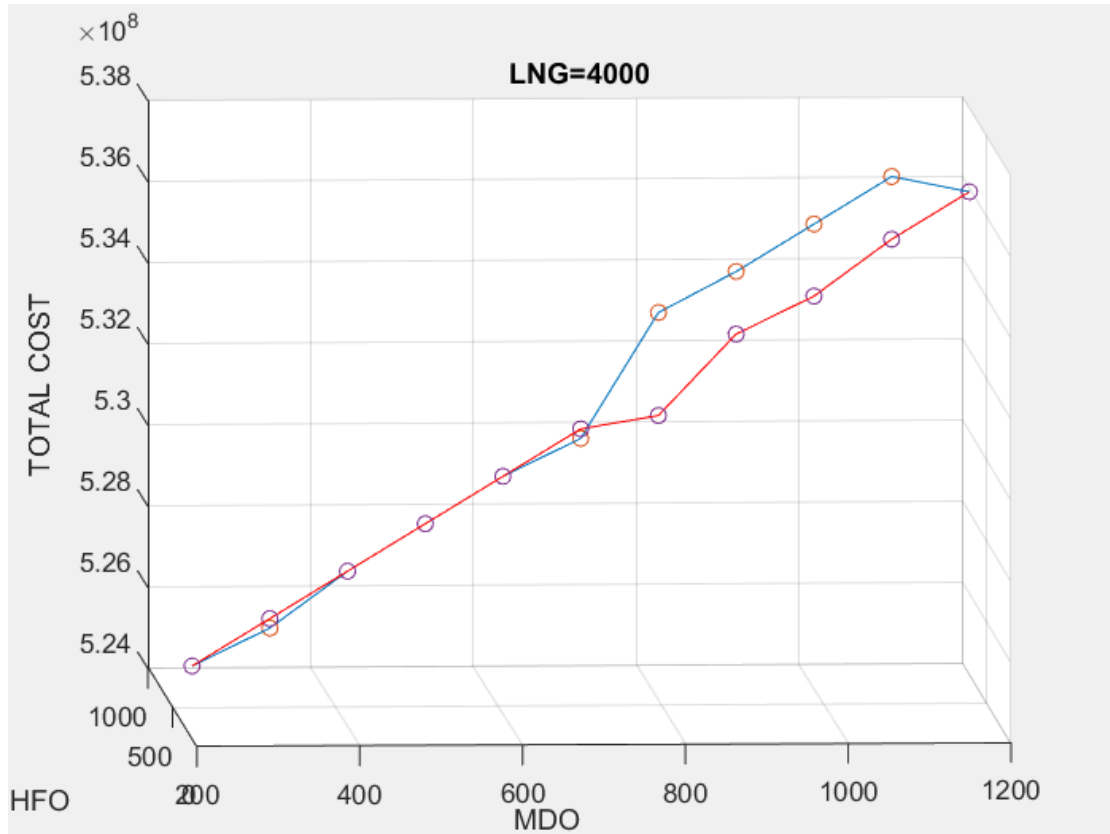
Εικόνα 57 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=2800 US\$



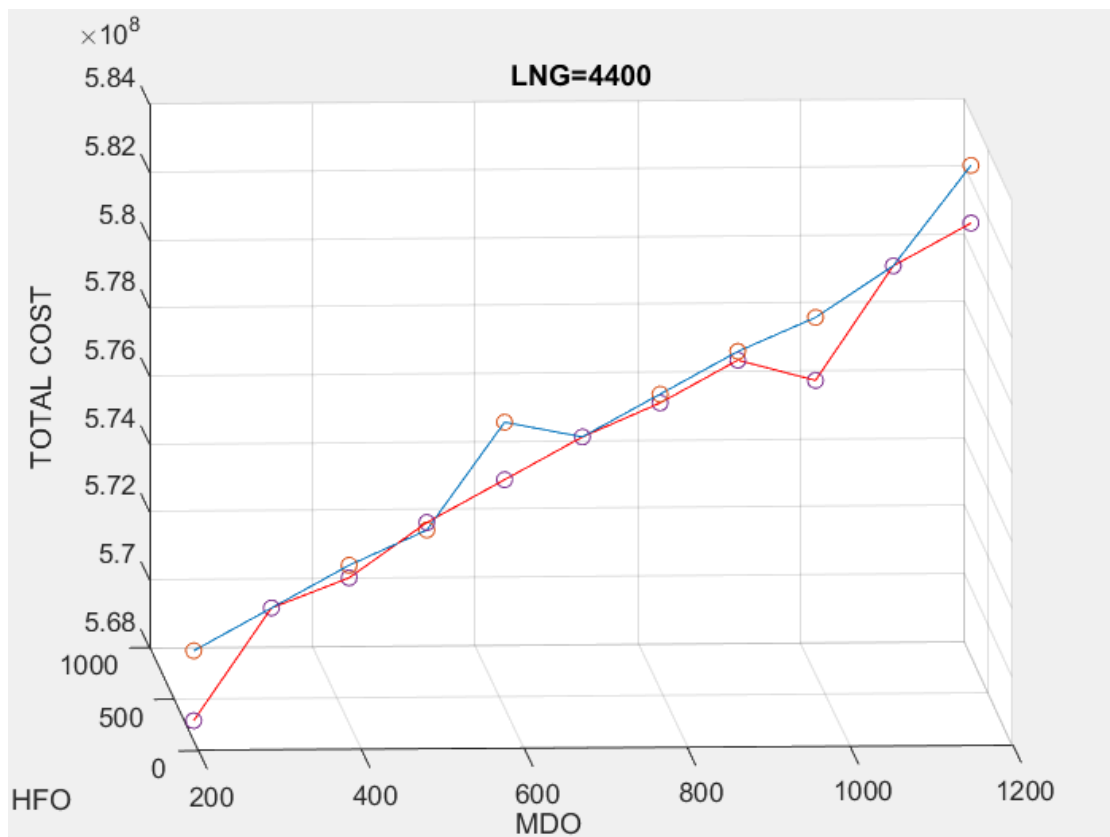
Εικόνα 58 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3200 US\$



Εικόνα 59 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=3600 US\$



Εικόνα 60 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4000 US\$



Εικόνα 61 Σενάριο 4 - Λειτουργικό κόστος συναρτήσει των τιμών των καυσίμων MDO, HFO για τιμή LNG=4400 US\$

6 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

Για τα επόμενα χρόνια η προσπάθεια προστασίας του περιβάλλοντος θα είναι ο βασικότερος παράγοντας που θα καθορίζει την βιομηχανία της ναυτιλίας και της ενέργειας. Το LNG θεωρείται καύσιμο φιλικότερο προς το περιβάλλον από τις διαθέσιμες εναλλακτικές και η ζήτησή του θα συνεχίσει να αυξάνεται. Μαζί θα συνεχίσει να αυξάνεται και η υποδομή που απαιτείται για την παραγωγή, την κατανάλωση και την εισαγωγή του σε αγορές παντού στον κόσμο. Νέα πλοία μεταφοράς LNG με σημαντικές καινοτομίες θα συνεχίσουν να κατασκευάζονται, αυξάνοντας το μέγεθος των στόλων ενώ τόσο παράκτιες όσο και πλωτές μονάδες επαναεριοποίησης θα εμφανίζονται σε ολοένα και περισσότερες χώρες προκειμένου να μπορέσουν να αξιοποιήσουν το LNG.

Τα συμβόλαια χρονοναύλωσης μεσαίας και μεγάλης διάρκειας, είναι θετικά για την διευκόλυνση του προγραμματισμού της αξιοποίησης του στόλου σε βάθος χρόνου. Τα προηγούμενα χρόνια κυριαρχούσαν στην ναυτιλία LNG, έχουν όμως σήμερα μειώσει το ποσοστό τους σημαντικά ως προς την συνολική ποσότητα που εξυπηρετούν. Συμβόλαια με μικρότερη διάρκεια έχουν εμφανιστεί προσφέροντας μια εναλλακτική στους πλοιοκτήτες για να αυξήσουν τα κέρδη τους, εφόσον τα εκμεταλλευτούν κατάλληλα. Αυτό φυσικά προϋποθέτει καλό προγραμματισμό, μια διαδικασία που δεν είναι εύκολη λόγω της πολυπλοκότητας της, των πολλών μεταβλητών που πρέπει να λάβει υπόψιν και της έλλειψης εργαλείων που θα βοηθούσαν στην λήψη αποφάσεων.

Τα έξοδα για την λειτουργία ενός πλοίου και η μείωση τους είναι βασική προϋπόθεση για την σωστή οικονομική διαχείριση του. Τα κόστη για να κατανοηθούν και να μελετηθούν αναλύονται σε υποκατηγορίες. Κάποια από αυτά τα αναλαμβάνει ο πλοιοκτήτης του πλοίου ενώ τα υπόλοιπα ο ναυλωτής. Στα έξοδα που αναλαμβάνει ο πλοιοκτήτης συγκαταλέγονται όσα αφορούν στην καθημερινή χρήση του πλοίου όπως είναι τα έξοδα πληρώματος, οι προμήθειες και τα αναλώσιμα, οι επισκευές και η ασφάλεια του πλοίου. Επίσης στον πλοιοκτήτη αναλογούν και τα έξοδα της προγραμματισμένης συντήρησης του πλοίου. Αντίστοιχα, ο ναυλωτής επηρεάζεται από τα κόστη που έχουν να κάνουν με τα ταξίδια. Τέτοια είναι το κόστος καυσίμου και τα τέλη λιμανιού και διέλευσης από κανάλια. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας τρόπος συνεργασίας του πλοιοκτήτη με τον ναυλωτή από τον οποίο ωφελούνται και οι δύο μειώνοντας τα λειτουργικά κόστη του πλοίου συνολικά μέσα από τον από κοινού προγραμματισμό των δύο πλευρών.

Επιπλέον, η νομοθεσία με στόχο την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής έχει επιβάλει μέτρα που επηρεάζουν την ναυτιλία LNG και το κόστος του στόλου. Πρόσθετα κόστη που έχουν να κάνουν με πρόστιμα για την μη συμμόρφωση στους κανονισμούς αναγκάζουν τους πλοιοκτήτες να υιοθετήσουν καινοτόμες τεχνικές λύσεις και παράλληλα υπηρεσιακές λύσεις. Και οι δυο κατηγορίες επηρεάζουν συνήθως αρνητικά το λειτουργικό κόστος του πλοίου είτε αυξάνοντας την απαίτηση

του σε ενέργεια και άρα σε καύσιμο, είτε προσθέτοντας σταθερά κόστη για την συντήρηση των λύσεων αυτών.

Το κόστος καυσίμου αποτελεί το μεγαλύτερο κόστος από τα λειτουργικά έξοδα του πλοίου. Η τιμή όμως του καυσίμου δεν είναι σταθερή για όσο αυτό αξιοποιείται. Υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στο κόστος καυσίμου που επηρεάζεται από αστάθμητους παράγοντες της αγοράς όπως γεωπολιτικές κρίσης. Οι διάφορες αυξομειώσεις στα ναυτιλιακά καύσιμα υπεισέρχονται στον προγραμματισμό του στόλου, αλλάζοντας το κόστος ταξιδιού των διαδρομών που προβλέπει το συμβόλαιο και καθορίζει τελικά το αν συμφέρει η επιλογή αυτού έναντι κάποιου άλλου. Τα περισσότερα LNGCs που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν την δυνατότητα καύσης περισσότερων από ενός καυσίμου. Οι αλλαγές στην τιμή του καυσίμου είναι λογικό λοιπόν ότι επηρεάζουν και την επιλογή του καυσίμου που το πλοίο θα χρησιμοποιήσει για να κινηθεί. Για το λόγο αυτό παρέχεται η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών καυσίμων από τον αλγόριθμο.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των πλοίων που επηρεάζουν την οικονομική απόδοση τους είναι το είδος της κύριας μηχανής και ο τρόπος αποθήκευσης του φορτίου. Οι συνηθέστερες επιλογές κύριας μηχανής είναι οι DFDE-TFDE, οι MEGI-MEGA και οι X-DF. Τα πλοία που κατασκευάζονται σήμερα υιοθετούν μια από τις παραπάνω επιλογές. Οι μηχανές DFDE-TFDE δεν διαθέτουν σύστημα επανυγροποίησης του φορτίου που εξατμίζεται κατά την μεταφορά. Η ποσότητα BOG που απελευθερώνεται καίγεται μετατρέποντας τους υδρογονάνθρακες που περιέχει το φυσικό αέριο σε CO₂. Οι μηχανές MEGI-MEGA και X-DF διαθέτουν συστήματα μερικής ή ολικής επανυγροποίησης, τα οποία χρησιμοποιούνται όσο το περισσεύον BOG δεν χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Τα reliquifaction συστήματα απαιτούν φυσικά ενέργεια για την χρήση τους, αυξάνοντας την κατανάλωση του πλοίου σε καύσιμο. Επίσης, κατά τον υπολογισμό του CII, η ενέργεια αυτή λαμβάνεται υπόψιν και ένα μέρος της αφαιρείται. Ο τύπος αποθήκευσης φορτίου είναι συνήθως τύπου Moss ή μεμβρανικού. Η ποσότητα BOG διαφέρει ανάμεσα στους διάφορους τρόπους αποθήκευσης.

Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των πλοίων, οι αλλαγές στην τιμή των καυσίμων, οι τεχνολογικές εξελίξεις, η είσοδος καινούριων πλοίων στην αγορά και η αύξηση στις διαθέσιμες θαλάσσιες διαδρομές μεταφοράς LNG δημιουργούν ένα σύνθετο και πολύ δύσκολο υπολογιστικό πρόβλημα ανάθεσης για τον στόλο σε συμβόλαια που βρίσκονται διαθέσιμα. Η απουσία επιστημονικών εργαλείων λήψης αποφάσεων οδηγεί τους πλοιοκτήτες στην ανάθεση του στόλου με εμπειρικό τρόπο. Λόγω του μεγάλου αριθμού των μεταβλητών και των περιορισμών του προβλήματος η έρευνα επικεντρώνεται σε ανάπτυξη εργαλείων που υιοθετούν ευριστικούς τρόπους λύσης. Μοντέλα που χρησιμοποιούν γραμμικό ή μη- γραμμικό προγραμματισμό, με ακέραιες ή και συνεχείς μεταβλητές έχουν προσπαθήσει να εφαρμοστούν επάνω στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Στην συγκεκριμένη εργασία, ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόζεται επάνω σε ένα μοντέλο γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού. Τα συμβόλαια για την εφαρμογή

του εργαλείου που κατασκευάζεται λαμβάνουν υπόψιν την παρούσα κατάσταση της short-term αγοράς LNG ως προς τις ποσότητες και την διάρκεια συμβολαίου. Τα δεδομένα για τα πλοία που εισάγονται λαμβάνουν υπόψιν διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την χωρητικότητα και την κύρια μηχανή των πλοίων δημιουργώντας έναν ετερογενή στόλο. Οι τιμές των καυσίμων κυμαίνονται ανάμεσα στις ακραίες τιμές που έχουν λάβει τα τελευταία χρόνια.

Για τα συνολικά 4 σενάρια που χρησιμοποιούνται σταδιακά αυξάνονται οι μεταβλητές τους. Παρατηρείται ότι όσο ο αριθμός των μεταβλητών αυξάνεται τόσο το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο. Ωστόσο, ο αλγόριθμος είναι σε θέση να παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα για κάθε ένα από τα σενάρια. Ο αριθμός των γενεών που επιτρέπεται στον αλγόριθμο να τρέξει καθώς και το μέγεθος του πληθυσμού που εξετάζει επηρεάζουν την ταχύτητα αλλά και την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου στο να βρίσκει βέλτιστες λύσεις. Όσο το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο είναι χρήσιμο να αυξάνονται τα δύο αυτά μεγέθη.

Για κάθε σενάριο παράγεται το συνολικό λειτουργικό κόστος του στόλου για συνολικά 121 συνδυασμούς καυσίμων. Έτσι δημιουργείται μια εικόνα για το πως μεταβάλλεται η βέλτιστη κατανομή του στόλου ανάλογα με την τιμή του καυσίμου. Η πληροφορία αυτή είναι απαραίτητη για κάποιον που θέλει να κάνει προβλέψεις για την διαχείριση του στόλου του. Φαίνεται επίσης το πώς επηρεάζεται το κόστος από την αύξηση της τιμής του καυσίμου. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, οι πολλοί συνδυασμοί τιμών επιτρέπουν και μία εκτίμηση για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Μεγάλες αποκλίσεις των κατανομών από συνδυασμό σε συνδυασμό θα σήμαινε ότι η λύση που υπολογίζεται απέχει σημαντικά από την βέλτιστη. Ωστόσο ακόμα και στο 4 σενάριο που είναι το πιο σύνθετο κάτι τέτοιο δεν φαίνεται να συμβαίνει.

Τέλος, κάνοντας τους απαραίτητους υπολογισμούς, ο αλγόριθμος υπολογίζει για την κατανομή που έχει βρει και τον συντελεστή CII. Φαίνεται ότι για συμβόλαια που περιλαμβάνουν μικρότερες διαδρομές ο δείκτης αυτός είναι ιδιαίτερα αυξημένος.

Το παραπάνω εργαλείο προσφέρεται για περαιτέρω έρευνα σε διάφορα σημεία. Ως προς την χαρακτηριστική συνάρτηση μπορεί να διαφοροποιηθεί ώστε να λαμβάνει υπόψιν την επίτευξη του ελάχιστου δείκτη EEXI, CII ή την ελαχιστοποίηση των ρύπων. Εναλλακτικά, για ένα μοντέλο που θα αντιστοιχίσει την τιμή των παραπάνω δεικτών ή την ποσότητα των ρύπων σε οικονομικό κόστος για το πλοίο μπορεί ο γενετικός αλγόριθμος να μετατραπεί ώστε να συνυπολογίζει το κόστος αυτό στο συνολικό λειτουργικό κόστος του πλοίου. Για το μοντέλο που χρησιμοποιείται μπορούν να προστεθούν περισσότεροι περιορισμοί, όπως περιορισμοί που αφορούν σε τεχνικά χαρακτηριστικά των σταθμών υδροποίησης και επαναεριοποίησης. Επιπλέον, μετατροπές στον αλγόριθμο θα μπορούσαν να γίνουν προκειμένου να επιτραπεί η μερική φόρτωση. Για τον ίδιο τον αλγόριθμο, βελτιώσεις που αφορούν στην ταχύτητα και την ακρίβεια γίνεται να επιτευχθούν βελτιώνοντας τον τρόπο με τον οποίο παράγεται κάθε γενιά του γενετικού αλγορίθμου.

Βιβλιογραφία

- [1] Alireza Bahadori, Ph.D. (2014), Natural Gas Processing Technology and Engineering, ch. 13
- [2] ΤΡΑΠΕΖΑ ΠΕΙΡΑΙΩΣ (2013), ΚΛΑΔΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ 20 ΔΕΞΑΜΕΝΟΠΛΟΙΑ LNG, ΔΑΓΚΑΛΙΔΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, Retrieved 03/06/2023.
- [3] CAMERON LNG (2018), Natural Gas and the Liquefaction Process-CLNG
- [4] Pall Corporation (2015), Mercury Removal from Natural Gas
- [5] Πλακιά Ανθούλα (2021), Thermodynamic modeling and simulation of CO₂ and H₂S removal processes from natural gas and flue gases, p 9
- [6] Exxon Mobil (2023), 2022 Outlook for Energy, Available at: <https://corporate.exxonmobil.com/-/media/global/files/outlook-for-energy/2022/2022-outlook-for-energy-data-pages.xlsx>
- [7] IGU (International Gas Union) World LNG Report (2021)
- [8] GIIGNL Annual Report (2021)
- [9] ABS (2015), LNG BUNKERING TECHNICAL AND OPERATIONAL ADVISORY, Available at: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_LNG_Bunkering_Advisory.pdf, Retrieved 03/06/23.
- [10] <http://www.liquefiedgascarrier.com/cargo-containment-systems.html>, Retrieved 04/06/23.
- [11] <https://www.cpvmmfg.com/news/weighing-the-pros-and-cons-of-lng-transportation-methods/>, Retrieved 04/06/23.
- [12] Stavros Hatzigrigoris, Richard Gilmore, Andreas Spertos LNG Carriers An Update on Technology, Available at: <https://docplayer.net/37899412-Lng-carriers-an-update-on-technology-by-stavros-hatzigrigoris-richard-gilmore-andreas-spertos.html>, Retrieved 04/06/23
- [13] Nikos Kissas, Christos Papaleonidas, Dimitrios Fouflias, Dimitrios V. Lyridis (2019), Comparative Techno-Economic Analysis of TFDE, ME-GI and X-DF Propulsion Systems for LNG Carriers. Case study for Alternative Multi-Annual Operational Profiles
- [14] Huan Tu (2019), Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers
- [15] ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas (2018) <https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2018/02/me-gi-dual-fuel-man-b-amp-w-engines.pdf> Retrieved 18/08/23
- [16] DNV (2021) - Understanding the risks of isolated vapour pockets. Available at: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Understanding-the-risks-of-isolated-vapour-pockets.html>, Retrieved 13/09/23
- [17] Oxford Institute for Energy Studies (2017) The Outlook for Floating Storage and Regasification Units

- [18] <https://www.hellenicshippingnews.com/floating-storage-regasification-units/> (2020), Retrieved 10/06/23.
- [19] <https://www.econnectenergy.com/articles/how-does-regasification-of-lng-work> (2023), Retrieved 10/06/23.
- [20] DESFA (2017) LNG - TERMINAL 'REVITHOUSSA' Marine Procedures Manual
- [21] Azalea Maritime - LNG Marine Loading Terminal Information Cargo Handling Agreement Available at: http://www.azalea-maritime.com/LNG_CCR_Resource_Management_Training_Materials/1.4%20Load%20Terminal%20Info%20Cargo%20Handling%20Agreement3.pdf Retrieved 13/09/23
- [22] Martin Stopford (2009) Maritime Economics (3rd edition)
- [23] Clarkson Research Services Limited (2023) Shipping Intelligence Network Timeseries-fuel prices
- [24] <https://www.desfa.gr/en/regulated-services/lng/description>
- [25] Ευρωπαϊκό Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2023) Συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή, Available at: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement> Retrieved 27/06/23
- [26] IMO (2023) EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system, Available at: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx> Retrieved 27/06/23
- [27] DNV (2022) CII-Carbon Intensity Indicator, Available at: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/index.html>, Retrieved 27/06/23.
- [28] RESOLUTION MEPC.355(78) (June 2022) 2022 INTERIM GUIDELINES ON CORRECTION FACTORS AND VOYAGE ADJUSTMENTS FOR CII CALCULATIONS (CII GUIDELINES, G5)
- [29] RESOLUTION MEPC.308(73) (October 2018) 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS
- [30] ICS (2018) Guidance on EU MRV
- [31] UK P&I (2021) "Fit for 55" - EU Proposals to Regulate Shipping GHG EMISSIONS
- [32] DNV (2021) - OPPDATERING AV TEKNOLOGISTATUS Potensial og barrierer for energieffektivisering av fartoy
- [33] Zhongbin Zhao, Xifu Wang, Hao Wang, Suxin Cheng and Wei Liu (2022) Fleet Deployment Optimization for LNG Shipping Vessels Considering the Influence of Mixed Factors
- [34] Glomeemp - Weather Routing, Available at: <https://glomeep.imo.org/technology/weather-routing/>, Retrieved 06/07/23

- [35] IMO (2020) Fourth GHG Study
- [36] MOL (2021) Contributions to Global Environmental Conservation: The PBCF
- [37] Glomeemp – ENGINE DE-RATING, Available at:
<https://glomeep.imo.org/technology/engine-de-rating/> , Retrieved 06/07/23
- [38] Weisan Hua, Yishun Sha, Xuelai Zhang, Hongfen Cao (2023) Research progress of carbon capture and storage (CCS) technology based on the shipping industry
- [39] OGC (2021) IS CARBON CAPTURE ON SHIPS FEASIBLE?
- [40] Wayne L. Winston (2004) Operations Research APPLICATIONS AND ALGORITHMS 4th EDITION
- [41] FREDERICK S. HILLIER & GERALD J. LIEBERMAN (2010) INTRODUCTION TO OPERATIONS RESEARCH 9th EDITION
- [42] <https://www.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html>, Retrieved: 15/08/23
- [43] V. Goel, M. Slusky, W.-J. van Hoevec, K.C. Furman, Y. Shao (2014) – Constraint programming for LNG ship scheduling and inventory management
- [44] Jaeyoung Cho, Gino J. Limb, Seon Jin Kimb, Taofeek Biobakuc (2017) Liquefied natural gas inventory routing problem under uncertain weather conditions
- [45] Mohamed Kais Msakni, Mohamed Haouari (2018) Short-term planning of liquefied natural gas deliveries
- [46] A. Bittante, F. Pettersson, H. Saxen (2018) Optimization of a small-scale LNG supply chain
- [47] Christos Papaleonidas, Dimitrios V. Lyridis, Alexios Papakostas, Dimitrios Konstantinidis (2020) An Innovative Decision Support Tool for LNG Supply Chain Planning
- [48] Sara Al-Haidous, Rajesh Govindan, Adel Elomri, Tareq Al-Ansari (2022) An optimization approach to increasing sustainability and enhancing resilience against environmental constraints in LNG supply chains: A Qatar case study
- [49] Weihao Ma, Shunfeng Hao, Dongfang Ma, Dianhai Wang, Sheng Jin, Fengzhong Qu (2022) Scheduling decision model of liner shipping considering emission control areas regulations
- [50] Firmanto Hadi, Heri Supomo, Tri Achmad (2023) Using genetic algorithm for fleet assignment of small-scale LNG supply chain
- [51] Indranil Deb, Ranjan Kumar Gupta (2023) A genetic algorithm based heuristic optimization technique for solving balanced allocation problem involving overall shipping cost minimization with restriction to the number of serving units as well as customer hubs

[52] IGU - Natural-Gas-Conversion-Guide

[53] LNG TERMINAL USE AGREEMENT between TOTAL LNG USA, INC. and SABINE PASS LNG, L.P. (2004)

[54] Gate Terminal Operational data, Available at:
<https://www.gateterminal.com/en/commercial/operational-data/> Retrieved: 15/09/23

[55] Shell India - LNG Terminal – Features and Terminal Operations Available at:
<https://www.shell.in/shellenergy/shell-energy-india/lng-terminal/lng-terminal-features-and-terminal-operations.html> , Retrieved: 15/09/23

[56] TEPCO - FUNCTION OF TEPCO'S FUTTSU LNG TERMINAL AND PLANS TO ENSURE ITS RELIABILITY (LNG TERMINAL PRODUCING ABOUT 10,000 MW), Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4215/inhold/LNG%20Conferences/2001/Data/PAPERSVO/SESSION6/Ps6-3-ku.pdf Retrieved: 15/09/23

[57] Howard Rogers (2018) The LNG Shipping Forecast: costs rebounding, outlook uncertain

[58] Federal Energy Regulatory Commission (2009) Sabine Pass LNG, L.P.; Notice of Availability of the Environmental Assessment for the Proposed Sabine Pass LNG Export Project

[59] RasGas - LNG Terminal Regulations Manual Berth (2016) Available at:
No.3<https://www.qatargascompatibility.com/Terminals/3/Ficheros/LNG%20Terminal%20Regulations%20Manual%20Berth%20No.3%202016.pdf>, Retrieved: 15/09/23

[60] <https://www.marinetraffic.com/>

[61] sea-distances.org

[62] Flex LNG- 20F 2022 Available at: <https://www.flexlng.com/category/annual-reports/>

[63] GasLog Ltd. (2022) – Annual Report

[64] GasLog Partners LP (2022) – Annual Report

[65] AWILCO - Annual Report 2022

[66] <https://www.wilhelmsen.com/tollcalculators/panama-toll-calculator/>

[67] <https://lethagencies.com/suez-calculator>

[68] ICS, INTERTANKO (2016) - REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS Comments on the report of the Correspondence Group on Carbon Intensity Reduction (TOR 3)

Παράθεμα

Combination No.	HFO	MDO	LNG
1	100	200	400
2	175	300	400
3	250	400	400
4	325	500	400
5	400	600	400
6	475	700	400
7	550	800	400
8	625	900	400
9	700	1000	400
10	775	1100	400
11	850	1200	400
12	100	200	800
13	175	300	800
14	250	400	800
15	325	500	800
16	400	600	800
17	475	700	800
18	550	800	800
19	625	900	800
20	700	1000	800
21	775	1100	800
22	850	1200	800
23	100	200	1200
24	175	300	1200
25	250	400	1200
26	325	500	1200
27	400	600	1200
28	475	700	1200
29	550	800	1200
30	625	900	1200
31	700	1000	1200
32	775	1100	1200
33	850	1200	1200
34	100	200	1600
35	175	300	1600
36	250	400	1600
37	325	500	1600
38	400	600	1600
39	475	700	1600
40	550	800	1600

41	625	900	1600
42	700	1000	1600
43	775	1100	1600
44	850	1200	1600
45	100	200	2000
46	175	300	2000
47	250	400	2000
48	325	500	2000
49	400	600	2000
50	475	700	2000
51	550	800	2000
52	625	900	2000
53	700	1000	2000
54	775	1100	2000
55	850	1200	2000
56	100	200	2400
57	175	300	2400
58	250	400	2400
59	325	500	2400
60	400	600	2400
61	475	700	2400
62	550	800	2400
63	625	900	2400
64	700	1000	2400
65	775	1100	2400
66	850	1200	2400
67	100	200	2800
68	175	300	2800
69	250	400	2800
70	325	500	2800
71	400	600	2800
72	475	700	2800
73	550	800	2800
74	625	900	2800
75	700	1000	2800
76	775	1100	2800
77	850	1200	2800
78	100	200	3200
79	175	300	3200
80	250	400	3200
81	325	500	3200
82	400	600	3200
83	475	700	3200

84	550	800	3200
85	625	900	3200
86	700	1000	3200
87	775	1100	3200
88	850	1200	3200
89	100	200	3600
90	175	300	3600
91	250	400	3600
92	325	500	3600
93	400	600	3600
94	475	700	3600
95	550	800	3600
96	625	900	3600
97	700	1000	3600
98	775	1100	3600
99	850	1200	3600
100	100	200	4000
101	175	300	4000
102	250	400	4000
103	325	500	4000
104	400	600	4000
105	475	700	4000
106	550	800	4000
107	625	900	4000
108	700	1000	4000
109	775	1100	4000
110	850	1200	4000
111	100	200	4400
112	175	300	4400
113	250	400	4400
114	325	500	4400
115	400	600	4400
116	475	700	4400
117	550	800	4400
118	625	900	4400
119	700	1000	4400
120	775	1100	4400
121	850	1200	4400

Πίνακας 38 Συνδυασμοί τιμών καυσίμων

Combination No.	HFO	MDO	LNG	Cost (US\$)	FUNCCOUNT
1	100	200	400	55.678.907	3099
2	175	300	400	56.104.637	3104
3	250	400	400	56.530.367	3095
4	325	500	400	56.956.096	3104
5	400	600	400	57.381.826	3101
6	475	700	400	57.807.555	3089
7	550	800	400	58.233.285	3090
8	625	900	400	58.659.014	3089
9	700	1000	400	59.084.744	3095
10	775	1100	400	59.510.473	3094
11	850	1200	400	59.936.203	3087
12	100	200	800	80.806.356	3093
13	175	300	800	81.232.085	3096
14	250	400	800	81.657.815	3093
15	325	500	800	82.083.544	3101
16	400	600	800	82.509.274	3095
17	475	700	800	82.935.004	3093
18	550	800	800	83.360.733	3092
19	625	900	800	83.786.463	3094
20	700	1000	800	84.212.192	3107
21	775	1100	800	84.637.922	3097
22	850	1200	800	85.063.651	3100
23	100	200	1200	105.933.804	3102
24	175	300	1200	106.359.534	3085
25	250	400	1200	106.785.263	3101
26	325	500	1200	107.210.993	3081
27	400	600	1200	107.636.722	3089
28	475	700	1200	108.062.452	3098
29	550	800	1200	108.488.181	3080
30	625	900	1200	108.913.911	3094
31	700	1000	1200	109.339.641	3099
32	775	1100	1200	109.765.370	3098
33	850	1200	1200	110.191.100	3102
34	100	200	1600	131.061.252	3099
35	175	300	1600	131.486.982	3084
36	250	400	1600	131.912.712	3082
37	325	500	1600	132.338.441	3093
38	400	600	1600	132.764.171	3094
39	475	700	1600	133.189.900	3098
40	550	800	1600	133.615.630	3095
41	625	900	1600	134.041.359	3097

42	700	1000	1600	134.467.089	3095
43	775	1100	1600	134.892.818	3099
44	850	1200	1600	135.318.548	3102
45	100	200	2000	156.188.701	3099
46	175	300	2000	156.614.430	3090
47	250	400	2000	157.040.160	3093
48	325	500	2000	157.465.889	3101
49	400	600	2000	157.891.619	3102
50	475	700	2000	158.317.349	3105
51	550	800	2000	158.743.078	3094
52	625	900	2000	159.168.808	3089
53	700	1000	2000	159.594.537	3102
54	775	1100	2000	160.020.267	3104
55	850	1200	2000	160.445.996	3107
56	100	200	2400	181.316.149	3091
57	175	300	2400	181.741.879	3107
58	250	400	2400	182.167.608	3093
59	325	500	2400	182.593.338	3096
60	400	600	2400	183.019.067	3105
61	475	700	2400	183.444.797	3103
62	550	800	2400	183.870.526	3083
63	625	900	2400	184.296.256	3098
64	700	1000	2400	184.721.986	3094
65	775	1100	2400	185.147.715	3095
66	850	1200	2400	185.573.445	3099
67	100	200	2800	206.443.597	3093
68	175	300	2800	206.869.327	3099
69	250	400	2800	207.295.057	3091
70	325	500	2800	207.720.786	3096
71	400	600	2800	208.146.516	3100
72	475	700	2800	208.572.245	3102
73	550	800	2800	208.997.975	3099
74	625	900	2800	209.423.704	3099
75	700	1000	2800	209.849.434	3084
76	775	1100	2800	210.275.163	3095
77	850	1200	2800	210.700.893	3091
78	100	200	3200	231.571.046	3096
79	175	300	3200	231.996.775	3092
80	250	400	3200	232.422.505	3097
81	325	500	3200	232.848.234	3100
82	400	600	3200	233.273.964	3094
83	475	700	3200	233.699.694	3104
84	550	800	3200	234.125.423	3100

85	625	900	3200	234.551.153	3099
86	700	1000	3200	234.976.882	3103
87	775	1100	3200	235.402.612	3087
88	850	1200	3200	235.828.341	3102
89	100	200	3600	256.698.494	3095
90	175	300	3600	257.124.224	3101
91	250	400	3600	257.549.953	3091
92	325	500	3600	257.975.683	3111
93	400	600	3600	258.401.412	3099
94	475	700	3600	258.827.142	3091
95	550	800	3600	259.252.872	3104
96	625	900	3600	259.678.601	3096
97	700	1000	3600	260.104.331	3104
98	775	1100	3600	260.530.060	3094
99	850	1200	3600	260.955.790	3088
100	100	200	4000	281.825.943	3088
101	175	300	4000	282.251.672	3107
102	250	400	4000	282.677.402	3093
103	325	500	4000	283.103.131	3091
104	400	600	4000	283.528.861	3094
105	475	700	4000	283.954.590	3090
106	550	800	4000	284.380.320	3096
107	625	900	4000	284.806.049	3090
108	700	1000	4000	285.231.779	3089
109	775	1100	4000	285.657.509	3099
110	850	1200	4000	286.083.238	3096
111	100	200	4400	306.953.391	3081
112	175	300	4400	307.379.120	3102
113	250	400	4400	307.804.850	3099
114	325	500	4400	308.230.580	3109
115	400	600	4400	308.656.309	3094
116	475	700	4400	309.082.039	3094
117	550	800	4400	309.507.768	3104
118	625	900	4400	309.933.498	3077
119	700	1000	4400	310.359.227	3092
120	775	1100	4400	310.784.957	3097
121	850	1200	4400	311.210.686	3097

Πίνακας 39 Συνολικό λειτουργικό κόστος και Fuelcount για κάθε συνδυασμό τιμών καυσίμου του σεναρίου 1

Combination No.	HFO	MDO	LNG	Cost	FUNCCOUNT
1	100	200	400	48.703.679	15132
2	175	300	400	49.165.544	12085
3	250	400	400	49.627.409	15792
4	325	500	400	50.089.274	18397
5	400	600	400	50.551.139	10881
6	475	700	400	51.013.004	15990
7	550	800	400	51.625.865	9862
8	625	900	400	51.936.734	20090
9	700	1000	400	52.398.598	21080
10	775	1100	400	52.860.463	23635
11	850	1200	400	53.362.363	13073
12	100	200	800	65.028.858	12058
13	175	300	800	65.529.305	9857
14	250	400	800	66.021.840	9496
15	325	500	800	66.514.376	19871
16	400	600	800	67.006.912	13791
17	475	700	800	67.499.448	15156
18	550	800	800	67.991.984	16522
19	625	900	800	68.484.519	20615
20	700	1000	800	68.977.055	17836
21	775	1100	800	69.469.591	10709
22	850	1200	800	69.962.127	10378
23	100	200	1200	80.886.904	11542
24	175	300	1200	81.450.011	10709
25	250	400	1200	82.013.118	12201
26	325	500	1200	82.576.225	19419
27	400	600	1200	83.139.332	10209
28	475	700	1200	83.702.439	13454
29	550	800	1200	83.832.918	26704
30	625	900	1200	84.556.280	18807
31	700	1000	1200	85.248.404	12422
32	775	1100	1200	85.740.940	14286
33	850	1200	1200	86.233.475	12767
34	100	200	1600	96.715.372	17867
35	175	300	1600	97.179.908	19033
36	250	400	1600	97.743.015	23993
37	325	500	1600	98.306.122	24826
38	400	600	1600	98.869.229	20424
39	475	700	1600	99.432.335	14624
40	550	800	1600	99.995.442	17670
41	625	900	1600	100.558.549	14639

42	700	1000	1600	101.121.656	11214
43	775	1100	1600	101.684.763	10885
44	850	1200	1600	102.247.870	12783
45	100	200	2000	112.346.698	11541
46	175	300	2000	112.909.805	9004
47	250	400	2000	113.472.912	15460
48	325	500	2000	114.507.118	12390
49	400	600	2000	114.599.125	19216
50	475	700	2000	115.162.232	13275
51	550	800	2000	115.099.457	17512
52	625	900	2000	116.288.446	16680
53	700	1000	2000	116.851.553	18014
54	775	1100	2000	117.414.660	11052
55	850	1200	2000	117.977.767	9522
56	100	200	2400	127.461.144	18708
57	175	300	2400	128.639.702	14984
58	250	400	2400	129.202.808	17971
59	325	500	2400	130.122.865	11223
60	400	600	2400	130.329.022	15140
61	475	700	2400	130.892.129	16513
62	550	800	2400	131.455.236	15648
63	625	900	2400	132.594.854	10568
64	700	1000	2400	132.581.450	13566
65	775	1100	2400	133.501.159	12025
66	850	1200	2400	133.136.993	14304
67	100	200	2800	143.806.491	17322
68	175	300	2800	144.369.598	23602
69	250	400	2800	144.932.705	11905
70	325	500	2800	145.495.812	15993
71	400	600	2800	146.475.350	16297
72	475	700	2800	146.360.021	21619
73	550	800	2800	146.365.996	28934
74	625	900	2800	147.748.240	20383
75	700	1000	2800	148.311.347	13546
76	775	1100	2800	148.874.453	16667
77	850	1200	2800	149.437.560	14384
78	100	200	3200	160.289.762	14128
79	175	300	3200	160.099.495	10418
80	250	400	3200	160.662.602	18271
81	325	500	3200	161.225.709	13944
82	400	600	3200	161.788.816	14941
83	475	700	3200	161.454.002	17689
84	550	800	3200	162.915.030	11731

85	625	900	3200	163.676.227	15737
86	700	1000	3200	164.041.243	21010
87	775	1100	3200	164.604.350	19567
88	850	1200	3200	165.943.473	10696
89	100	200	3600	175.266.285	16909
90	175	300	3600	175.758.210	12904
91	250	400	3600	176.392.499	14454
92	325	500	3600	176.955.606	11650
93	400	600	3600	177.518.713	10714
94	475	700	3600	177.087.272	18701
95	550	800	3600	178.644.926	11762
96	625	900	3600	179.208.033	11553
97	700	1000	3600	179.771.140	10001
98	775	1100	3600	180.334.247	15308
99	850	1200	3600	180.897.354	10339
100	100	200	4000	189.994.222	21538
101	175	300	4000	191.559.289	12244
102	250	400	4000	192.035.363	22449
103	325	500	4000	192.685.503	12412
104	400	600	4000	193.248.609	19748
105	475	700	4000	192.720.541	15990
106	550	800	4000	194.374.823	19229
107	625	900	4000	194.937.930	16336
108	700	1000	4000	195.501.037	11340
109	775	1100	4000	195.753.281	17018
110	850	1200	4000	196.627.251	16134
111	100	200	4400	207.380.901	11050
112	175	300	4400	207.289.186	10539
113	250	400	4400	208.899.262	8867
114	325	500	4400	208.415.399	19714
115	400	600	4400	208.978.506	12069
116	475	700	4400	209.541.613	15814
117	550	800	4400	210.104.720	13777
118	625	900	4400	210.667.827	24286
119	700	1000	4400	211.230.934	17139
120	775	1100	4400	212.448.342	14472
121	850	1200	4400	212.357.148	12246

Πίνακας 40 Συνολικό λειτουργικό κόστος και Fuelcount για κάθε συνδυασμό τιμών καυσίμου του σεναρίου 2

Combination No.	HFO	MDO	LNG	Cost1	FUNCCOUNT1	Cost2	FUNCCOUNT2	Difference
1	100	200	400	50.036.919	14981	49.808.777	79642	228.142
2	175	300	400	50.544.170	14797	50.435.625	77749	108.545
3	250	400	400	50.938.006	12414	50.881.361	89716	56.645
4	325	500	400	51.442.585	18030	51.297.693	62106	144.892
5	400	600	400	51.765.923	24636	51.868.130	82473	-102.207
6	475	700	400	52.450.050	19585	52.383.761	53766	66.289
7	550	800	400	52.827.729	15308	52.820.807	122846	6.922
8	625	900	400	53.320.650	17724	53.231.921	66834	88.729
9	700	1000	400	53.716.913	30612	53.716.913	55053	0
10	775	1100	400	54.212.872	16518	54.049.793	98183	163.079
11	850	1200	400	54.642.256	13469	54.510.499	124265	131.757
12	100	200	800	65.941.142	23320	65.941.142	67831	0
13	175	300	800	66.477.048	16351	66.463.017	82711	14.031
14	250	400	800	66.984.892	23329	66.667.383	70403	317.509
15	325	500	800	67.506.766	14149	67.133.733	72668	373.033
16	400	600	800	68.414.430	10217	67.600.084	89667	814.346
17	475	700	800	68.821.569	12921	68.332.609	109268	488.960
18	550	800	800	68.995.514	19579	68.532.785	111504	462.729
19	625	900	800	69.333.873	24341	69.445.587	47919	-111.714
20	700	1000	800	69.830.275	20755	69.465.486	69799	364.789
21	775	1100	800	70.559.277	13939	70.272.167	64226	287.110
22	850	1200	800	70.795.808	9215	70.735.512	76184	60.296
23	100	200	1200	79.727.777	8871	79.225.820	73956	501.957
24	175	300	1200	79.760.943	17357	79.709.386	79101	51.557
25	250	400	1200	80.800.041	10219	80.296.066	83390	503.975
26	325	500	1200	80.747.783	22130	80.831.189	44619	-83.406
27	400	600	1200	81.266.982	23159	81.366.312	51195	-99.330
28	475	700	1200	81.993.647	12105	81.901.435	90693	92.212
29	550	800	1200	82.436.558	21934	82.305.379	81269	131.179
30	625	900	1200	83.480.701	9371	82.824.577	87399	656.124
31	700	1000	1200	84.016.833	10060	83.343.776	84125	673.057
32	775	1100	1200	84.041.927	13272	83.847.262	85285	194.665
33	850	1200	1200	84.577.049	15128	84.603.022	54049	-25.973
34	100	200	1600	92.827.404	13807	92.509.715	45337	317.689
35	175	300	1600	93.436.246	9847	93.044.838	58791	391.408
36	250	400	1600	94.257.915	10245	93.579.961	70341	677.954
37	325	500	1600	94.794.047	10224	94.393.028	55746	401.019
38	400	600	1600	94.650.207	20245	94.650.207	79885	0
39	475	700	1600	95.185.330	14788	95.185.330	84529	0
40	550	800	1600	96.402.443	10051	95.678.265	73324	724.178
41	625	900	1600	96.938.575	9365	96.255.575	96462	683.000

42	700	1000	1600	97.474.707	10183	96.716.663	87049	758.044
43	775	1100	1600	98.010.839	10137	97.524.278	52881	486.561
44	850	1200	1600	98.546.971	10026	97.860.944	79798	686.027
45	100	200	2000	106.643.526	10043	105.793.610	81997	849.916
46	175	300	2000	106.328.733	17025	106.328.733	57621	0
47	250	400	2000	107.715.790	10055	106.863.855	64568	851.935
48	325	500	2000	108.251.921	10071	107.398.978	57338	852.943
49	400	600	2000	107.934.101	9518	107.934.101	64547	0
50	475	700	2000	109.324.185	8885	108.469.224	70695	854.961
51	550	800	2000	109.004.347	23817	109.004.347	71833	0
52	625	900	2000	109.923.659	12071	109.539.470	44965	384.189
53	700	1000	2000	110.445.534	11909	110.074.593	45734	370.941
54	775	1100	2000	110.609.716	15662	110.609.716	65297	0
55	850	1200	2000	112.004.845	10059	111.144.839	44615	860.006
56	100	200	2400	119.077.504	14450	119.077.504	60903	0
57	175	300	2400	120.235.540	18351	119.612.627	47088	622.913
58	250	400	2400	121.173.664	10068	120.147.750	91012	1.025.914
59	325	500	2400	120.682.873	11914	121.279.290	53230	-596.417
60	400	600	2400	121.801.165	11765	121.217.996	77591	583.169
61	475	700	2400	122.782.060	10038	121.753.119	75829	1.028.941
62	550	800	2400	123.318.192	10057	122.288.242	44195	1.029.950
63	625	900	2400	123.366.790	17031	122.823.365	88081	543.425
64	700	1000	2400	124.390.456	9343	123.358.488	48620	1.031.968
65	775	1100	2400	124.926.588	10211	123.893.611	62737	1.032.977
66	850	1200	2400	125.155.625	18199	124.428.734	60570	726.891
67	100	200	2800	133.559.274	10069	132.361.399	61246	1.197.875
68	175	300	2800	133.678.671	14141	132.896.522	69663	782.149
69	250	400	2800	134.631.538	10071	133.431.645	58448	1.199.893
70	325	500	2800	135.167.670	8857	133.966.768	68552	1.200.902
71	400	600	2800	135.703.802	8840	134.501.891	62344	1.201.911
72	475	700	2800	135.037.014	17714	135.037.014	58386	0
73	550	800	2800	136.288.046	13450	135.572.137	59166	715.909
74	625	900	2800	136.809.921	11942	136.107.260	78387	702.661
75	700	1000	2800	137.411.658	10392	136.642.383	88710	769.275
76	775	1100	2800	138.384.462	10045	137.177.505	75035	1.206.957
77	850	1200	2800	138.920.594	10221	137.712.628	89165	1.207.966
78	100	200	3200	145.645.294	23629	145.645.294	66393	0
79	175	300	3200	147.553.281	10180	146.180.417	75419	1.372.864
80	250	400	3200	146.715.540	14304	146.715.540	44245	0
81	325	500	3200	148.625.544	10243	147.250.663	55479	1.374.881
82	400	600	3200	149.161.676	10058	147.785.786	51459	1.375.890
83	475	700	3200	148.320.908	12779	148.320.908	72190	0
84	550	800	3200	148.856.031	12589	149.731.177	60131	-875.146

85	625	900	3200	150.770.072	10051	149.391.154	60186	1.378.918
86	700	1000	3200	149.926.277	19552	149.926.277	76151	0
87	775	1100	3200	150.461.400	12565	150.461.400	62033	0
88	850	1200	3200	150.996.523	18560	150.996.523	70068	0
89	100	200	3600	158.929.189	15463	158.929.189	64556	0
90	175	300	3600	161.011.155	10048	159.464.311	88134	1.546.844
91	250	400	3600	161.547.287	10210	159.999.434	63495	1.547.853
92	325	500	3600	162.083.419	10063	160.534.557	62737	1.548.862
93	400	600	3600	161.069.680	16346	161.069.680	66716	0
94	475	700	3600	162.489.909	11751	161.604.803	71071	885.106
95	550	800	3600	163.691.815	10060	162.139.926	71033	1.551.889
96	625	900	3600	164.227.947	10043	162.675.049	112725	1.552.898
97	700	1000	3600	164.218.058	13939	163.210.172	92992	1.007.886
98	775	1100	3600	164.739.932	13129	163.745.295	60887	994.637
99	850	1200	3600	165.836.343	9554	164.280.418	60909	1.555.925
100	100	200	4000	173.932.897	10212	172.213.083	60957	1.719.814
101	175	300	4000	172.748.206	21267	172.748.206	47485	0
102	250	400	4000	175.005.161	10040	173.283.329	62797	1.721.832
103	325	500	4000	173.818.452	14136	173.818.452	67786	0
104	400	600	4000	174.353.575	16006	174.353.575	66769	0
105	475	700	4000	176.613.557	9385	174.888.698	76832	1.724.859
106	550	800	4000	177.149.689	10228	175.423.821	58737	1.725.868
107	625	900	4000	176.805.596	14315	175.958.944	57651	846.652
108	700	1000	4000	178.221.953	10032	176.494.067	54767	1.727.886
109	775	1100	4000	178.758.085	8881	178.758.085	44888	0
110	850	1200	4000	177.564.313	15509	177.564.313	83393	0
111	100	200	4400	185.496.978	14826	185.496.978	57689	0
112	175	300	4400	187.926.904	10048	186.032.101	48869	1.894.803
113	250	400	4400	187.973.070	12268	186.567.224	65296	1.405.846
114	325	500	4400	188.999.167	10034	187.102.347	50085	1.896.820
115	400	600	4400	189.535.299	10026	187.637.470	48613	1.897.829
116	475	700	4400	188.172.593	12929	188.172.593	51812	0
117	550	800	4400	190.060.570	16868	188.707.716	58720	1.352.854
118	625	900	4400	190.582.444	15802	189.242.839	50427	1.339.605
119	700	1000	4400	189.777.962	26363	189.777.962	71834	0
120	775	1100	4400	190.313.084	13275	190.313.084	69604	0
121	850	1200	4400	190.848.207	23311	190.848.207	57676	0

Πίνακας 41 Συνολικό λειτουργικό κόστος και Funccount των δύο τρόπων επίλυσης για κάθε συνδυασμό τιμών καυσίμου του σεναρίου 3

Combination No.	HFO	MDO	LNG	Cost_a	FUNCCOUNT	Cost_b	FUNCCOUNT	Difference
1	100	200	400	112.690.164	13491	112.666.481	94061	-23.683
2	175	300	400	113.734.561	15021	113.734.561	71030	0
3	250	400	400	114.768.472	24541	114.778.958	86071	10.486
4	325	500	400	115.802.991	15361	115.605.863	147171	-197.128
5	400	600	400	116.705.562	36951	116.863.238	90771	157.676
6	475	700	400	117.874.889	23181	117.874.889	139180	0
7	550	800	400	118.956.545	15531	118.830.571	63041	-125.974
8	625	900	400	119.870.109	27261	119.980.476	94529	110.367
9	700	1000	400	121.045.339	11791	121.045.339	84659	0
10	775	1100	400	122.207.868	13661	121.855.447	130251	-352.421
11	850	1200	400	123.134.132	21651	123.100.579	91711	-33.553
12	100	200	800	161.283.535	15191	161.283.535	66801	0
13	175	300	800	161.935.489	33551	162.327.932	79020	392.443
14	250	400	800	163.372.329	16211	162.973.098	124141	-399.231
15	325	500	800	164.369.178	17741	164.348.118	116619	-21.060
16	400	600	800	165.420.496	16721	165.420.496	72911	0
17	475	700	800	166.505.519	15021	166.505.519	68680	0
18	550	800	800	167.549.916	14171	167.518.727	118971	-31.189
19	625	900	800	168.594.313	17061	168.462.620	70560	-131.693
20	700	1000	800	169.638.709	15531	169.638.709	70086	0
21	775	1100	800	170.642.353	18591	170.630.253	92649	-12.100
22	850	1200	800	171.727.503	20461	171.727.503	83250	0
23	100	200	1200	209.876.906	11621	209.624.263	167851	-252.643
24	175	300	1200	210.342.821	25221	210.850.793	99701	507.972
25	250	400	1200	211.965.699	14171	211.762.798	71030	-202.901
26	325	500	1200	213.010.096	14001	212.949.259	67270	-60.837
27	400	600	1200	213.993.630	21311	213.509.178	104871	-484.452
28	475	700	1200	215.098.890	16551	215.038.001	77610	-60.889
29	550	800	1200	215.584.667	26411	215.530.863	181010	-53.804
30	625	900	1200	217.116.091	17571	216.622.411	99701	-493.680
31	700	1000	1200	218.232.080	15361	217.660.156	70091	-571.924
32	775	1100	1200	219.276.477	12981	218.697.900	136831	-578.577
33	850	1200	1200	220.274.090	21991	220.320.874	66331	46.784
34	100	200	1600	256.755.433	17061	256.755.433	92180	0
35	175	300	1600	257.768.567	14341	257.674.734	123201	-93.833
36	250	400	1600	258.687.689	31851	258.687.689	82311	0
37	325	500	1600	259.794.837	16381	259.700.643	110981	-94.194
38	400	600	1600	260.807.972	14001	260.713.598	88421	-94.374
39	475	700	1600	261.821.106	16041	261.726.552	90301	-94.554
40	550	800	1600	262.834.241	17061	262.834.241	115211	0
41	625	900	1600	263.847.376	15531	263.766.200	74791	-81.176

42	700	1000	1600	264.860.511	15701	264.765.415	126021	-95.096
43	775	1100	1600	265.792.418	25901	265.873.645	83721	81.227
44	850	1200	1600	266.886.780	19441	266.805.528	105341	-81.252
45	100	200	2000	301.596.645	17741	301.596.645	79491	0
46	175	300	2000	302.609.780	15871	302.492.624	77140	-117.156
47	250	400	2000	303.622.915	14681	303.521.629	97349	-101.286
48	325	500	2000	304.636.050	17741	304.518.533	71500	-117.517
49	400	600	2000	305.649.184	15191	305.649.184	116620	0
50	475	700	2000	307.436.328	12301	306.544.442	78081	-891.886
51	550	800	2000	308.450.647	11281	307.675.454	78551	-775.193
52	625	900	2000	308.570.350	21311	308.570.350	122261	0
53	700	1000	2000	309.600.285	23181	309.701.723	96410	101.438
54	775	1100	2000	310.714.858	16041	310.714.858	69151	0
55	850	1200	2000	311.727.993	17061	311.727.993	84191	0
56	100	200	2400	349.260.511	14001	346.437.858	85601	-2.822.653
57	175	300	2400	349.878.162	28281	347.450.993	75261	-2.427.169
58	250	400	2400	348.464.128	12641	348.342.605	97821	-121.523
59	325	500	2400	349.477.262	16211	349.477.262	118501	0
60	400	600	2400	350.490.397	14681	350.490.397	71500	0
61	475	700	2400	351.503.532	17061	351.503.532	74321	0
62	550	800	2400	352.516.667	23351	352.395.042	68681	-121.625
63	625	900	2400	353.529.801	14001	353.529.801	104870	0
64	700	1000	2400	354.401.195	25221	354.542.936	81371	141.741
65	775	1100	2400	355.556.071	25221	355.434.370	128841	-121.701
66	850	1200	2400	356.569.206	12641	356.447.479	118499	-121.727
67	100	200	2800	391.279.071	15191	391.279.071	94061	0
68	175	300	2800	390.969.567	20971	392.292.206	70091	1.322.639
69	250	400	2800	393.305.340	14001	393.141.358	110511	-163.982
70	325	500	2800	395.396.404	26751	394.154.312	123671	-1.242.092
71	400	600	2800	395.331.610	14681	395.331.610	67741	0
72	475	700	2800	396.344.745	11961	396.180.221	136361	-164.524
73	550	800	2800	397.357.879	35551	397.193.175	86540	-164.704
74	625	900	2800	398.229.127	20801	398.206.130	84660	-22.997
75	700	1000	2800	400.467.998	11281	399.384.149	59280	-1.083.849
76	775	1100	2800	400.397.284	12811	400.397.284	75731	0
77	850	1200	2800	401.244.993	25051	401.244.993	91241	0
78	100	200	3200	436.120.284	14341	436.120.284	72910	0
79	175	300	3200	437.133.418	23521	437.133.418	74791	0
80	250	400	3200	438.146.553	15191	437.959.247	98761	-187.306
81	325	500	3200	439.159.688	17741	438.972.202	110509	-187.486
82	400	600	3200	440.172.823	16551	440.010.775	133541	-162.048
83	475	700	3200	441.185.957	19951	441.185.957	112860	0
84	550	800	3200	442.199.092	13151	442.011.065	122731	-188.027

85	625	900	3200	443.212.227	14681	443.050.103	165966	-162.124
86	700	1000	3200	444.225.362	31001	444.225.362	79960	0
87	775	1100	3200	445.238.496	26581	445.238.496	108159	0
88	850	1200	3200	446.089.431	16041	446.251.631	76671	162.200
89	100	200	3600	482.342.161	22501	480.779.314	110510	-1.562.847
90	175	300	3600	481.974.631	14851	481.764.183	88891	-210.448
91	250	400	3600	482.987.766	13491	482.987.766	92181	0
92	325	500	3600	484.000.901	12641	483.607.833	155631	-393.068
93	400	600	3600	486.430.134	15531	484.803.046	124141	-1.627.088
94	475	700	3600	486.027.170	12131	486.027.170	78079	0
95	550	800	3600	487.040.305	19441	487.040.305	84661	0
96	625	900	3600	487.841.909	22671	487.841.909	109571	0
97	700	1000	3600	490.601.235	15531	488.854.864	110041	-1.746.371
98	775	1100	3600	490.079.709	28281	488.330.687	68210	-1.749.022
99	850	1200	3600	491.092.844	18931	491.092.844	100640	0
100	100	200	4000	525.802.709	14171	525.802.709	90770	0
101	175	300	4000	526.582.072	16891	526.815.844	68210	233.772
102	250	400	4000	527.828.979	14001	527.828.979	74791	0
103	325	500	4000	528.842.113	13831	528.842.113	72441	0
104	400	600	4000	529.855.248	36441	529.855.248	73851	0
105	475	700	4000	530.633.890	18251	530.868.383	64921	234.493
106	550	800	4000	533.582.630	18081	531.041.602	81840	-2.541.028
107	625	900	4000	534.436.749	11451	532.894.652	93120	-1.542.097
108	700	1000	4000	535.451.068	14001	533.672.753	132600	-1.778.315
109	775	1100	4000	536.465.387	14171	534.920.922	76201	-1.544.465
110	850	1200	4000	535.934.057	15361	535.934.057	67271	0
111	100	200	4400	570.643.922	14341	568.583.915	140121	-2.060.007
112	175	300	4400	571.657.057	17911	571.657.057	71501	0
113	250	400	4400	572.670.191	15361	572.298.964	115211	-371.227
114	325	500	4400	573.460.594	25221	573.683.326	121320	222.732
115	400	600	4400	576.388.150	10941	574.696.461	86541	-1.691.689
116	475	700	4400	575.709.596	21991	575.709.596	80900	0
117	550	800	4400	576.722.730	11621	576.464.734	110979	-257.996
118	625	900	4400	577.735.865	13151	577.477.689	118501	-258.176
119	700	1000	4400	578.490.643	17911	576.634.687	236470	-1.855.956
120	775	1100	4400	579.762.135	17741	579.762.135	83721	0
121	850	1200	4400	582.474.063	14681	580.775.269	68211	-1.698.794

Πίνακας 42 Συνολικό λειτουργικό κόστος και Funccount των δύο τρόπων επίλυσης για κάθε συνδυασμό τιμών καυσίμου του σεναρίου 4