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

# Καθορισμός Βέλτιστου Μίγματος Στόλου για Διαμερισμό Φορτίου Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου σε Πλοία Μικρής Κλίμακας μεΧρήση Δυναμικού Προγραμματισμού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΣΑΛΑΜΟΖΗ ΔΗΜΗΤΡΗ**

**Επιβλέπων :** Δημήτριος Λυρίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2020

*(Υπογραφή)*

.....

**ΣΑΛΑΜΟΖΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

© 2020 All rights reserved

# Ευχαριστίες

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όσους με βοήθησαν στη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.*

*Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Β. Λυρίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Θαλάσσιων Μεταφορών, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη βοήθειά του.*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα Χρήστο Παπαλεωνίδα, για την άριστη συνεργασία και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής.*

# Πίνακας περιεχομένων

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ..... 2**

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ..... 4**

**1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 5**

**2 Η ΑΓΟΡΑ SMALL SCALE LNG ..... 7**

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΓΟΡΑ SMALL SCALE LNG: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ, ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ..... 7
2.2 SMALL SCALE LNG ΣΤΗΝ ΚΙΝΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ..... 16
2.3 SMALL SCALE LNG ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ..... 21
2.4 ΟΙ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΜΕΝΟΙ ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ SMALL SCALE LNG ..... 24

**3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ SMALL SCALE LNG ..... 28**

3.1 ΠΛΟΙΑ SSLNGC ..... 29
3.2 ΤΕΡΜΑΤΙΚΑ SMALL SCALE LNG ..... 38
3.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ LNG ΚΑΙ BOIL - OFF GAS ..... 47
3.4 LOGISTICS – ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ SMALL SCALE LNG ..... 53

**4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SPLIT DELIVERY ..... 55**

**5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ..... 65**

**6 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ..... 77**

6.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ..... 81
*Περίπτωση 1η ..... 81*
*Περίπτωση 2η ..... 86*
*Περίπτωση 3η ..... 90*
6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ..... 94
*Περίπτωση 1η ..... 94*
*Περίπτωση 2η ..... 95*
*Περίπτωση 3η ..... 97*

**7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... 100**

7.1 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ ..... 101

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..... 102**

# Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Η διανομή στην αγορά SSLNG (Πηγή: IGU) 8
Σχήμα 2: Χωρητικότητα τερματικών ανά περιοχή (Πηγή: IGU) 9
Σχήμα 3: Οι λόγοι ανάπτυξης της αγοράς SSLNG (Πηγή: IGU) 11
Σχήμα 4: Παγκόσμιος στόλος πλοίων που κινούνται με LNG (Πηγή : APEC Research Centre) 12
Σχήμα 5: Λιμάνια ανεφοδιασμού πλοίων που κινούνται με LNG (Πηγή: IGU) 13
Σχήμα 6: Σχέση προσφοράς-ζήτησης LNG (Πηγή: APEC) 15
Σχήμα 7: Gate Terminal, Rotterdam 19
Σχήμα 8: Το τερματικό της Ρεβυθούσας 21
Σχήμα 9: Δίκτυο διανομής φυσικού αερίου στην Ελλάδα (Πηγή: ΔΕΣΦΑ) 22
Σχήμα 10: Περιοχές ελέγχου εκπομπών αερίων Emissions Control Areas (ECAs) (Πηγή: Global) 28
Σχήμα 11: Πιθανές διατάξεις δεξαμενών σε μικρά LNGc (Πηγή: Lloyd's Register Marine) 31
Σχήμα 12: IMO Type C Tank 32
Σχήμα 13: Το εσωτερικό μιας δεξαμενής μεμβράνης 33
Σχήμα 14: Το πλοίο Coralius ανεφοδιάζει πλοία στο λιμάνι του Ρότερνταμ 36
Σχήμα 15: Loading arms 37
Σχήμα 16: Small scale τερματικό υγροποίησης (Πηγή: Wartsila) 42
Σχήμα 17: Small scale LNG concept (Πηγή: Norgas Carriers) 44
Σχήμα 18: Συμβατικό τερματικό εισαγωγής – αεριοποίησης (Πηγή: Total, France) 46
Σχήμα 19: Small scale τερματικό εισαγωγής – αεριοποίησης (Πηγή: Total, France) 47
Σχήμα 20: Κυλινδρική δεξαμενή πίεσης (Πηγή: Croft systems) 50
Σχήμα 21: Σφαιρική δεξαμενή πίεσης (Πηγή: Linde Engineering) 51
Σχήμα 22: Ατμοσφαιρικές flat bottom δεξαμενές μεγάλης κλίμακας (Πηγή: B&P Engineering) 52
Σχήμα 23: Μία περίπτωση εφοδιαστικής αλυσίδας small scale LNG (Πηγή: Snam) 55
Σχήμα 24: Η πρώτη εφαρμογή co-loading LNG (Πηγή: Qatargas) 58
Σχήμα 25: Φόρτωση χαρτιού υγείας στο λιμάνι Hamina στη Φινλανδία 59
Σχήμα 26: Ship to ship transfer 60
Σχήμα 27: Σύστημα Ship to ship transfer 61

Σχήμα 28: Τα τερματικά που αναφέρονται στην μελέτη περίπτωσης ..... 80
Σχήμα 29: Διαδρομή στα βήματα 10-11 ..... 84
Σχήμα 30: Διαδρομή στα βήματα 10-11 χωρίς split delivery ..... 85
Σχήμα 31: Διαδρομή στα βήματα 12-13 ..... 85
Σχήμα 32: Διαδρομή στα βήματα 12-13 χωρίς split delivery ..... 86
Σχήμα 33: Διαδρομή στα βήματα 7-8 ..... 89
Σχήμα 34: Διαδρομή στα βήματα 7-8 χωρίς split delivery ..... 90
Σχήμα 35: Διαδρομή στα βήματα 5-7 ..... 93
Σχήμα 36: Διαδρομή στα βήματα 5-7 χωρίς split delivery ..... 93

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κατηγορίες manifolds (Πηγή: IGU) ..... 30
Πίνακας 2: Κόστη για διάφορα LNGc (Πηγή: IGU) ..... 35
Πίνακας 3: Small scale τερματικά υγροποίησης (Πηγή: IGU) ..... 39
Πίνακας 4: Διαφορές της συμβατικής με τη small scale εφοδιαστική αλυσίδα LNG ..... 54
Πίνακας 5: Ευρωπαϊκά τερματικά με break-bulk δυνατότητες (Πηγή: IGU) ..... 62
Πίνακας 6: Παγκόσμια κατανάλωση LNG ως καύσιμο (Πηγή: DNV) ..... 64
Πίνακας 7: Διαθέσιμοι τύποι πλοίων για τη μελέτη περίπτωσης ..... 78
Πίνακας 8: Ζήτηση τερματικών ..... 79
Πίνακας 9: Αποστάσεις τερματικών σε ναυτικά μίλια ..... 81
Πίνακας 10: Αποστάσεις τερματικών σε χιλιόμετρα ..... 81
Πίνακας 11: Ζήτηση τερματικών στο σενάριο 1 ..... 82
Πίνακας 12: Βέλτιστος συνδυασμός και συνολικό κόστος ..... 83
Πίνακας 13: Ζήτηση τερματικών στο σενάριο 2 ..... 87
Πίνακας 14: Βέλτιστος συνδυασμός και συνολικό κόστος ..... 88
Πίνακας 15: Ζήτηση τερματικών στο σενάριο 3 ..... 91
Πίνακας 16: Βέλτιστος συνδυασμός και συνολικό κόστος ..... 91
Πίνακας 17: Ανάλυση ευαισθησίας για την πρώτη περίπτωση ..... 95
Πίνακας 18: Ανάλυση ευαισθησίας για τη δεύτερη περίπτωση ..... 96
Πίνακας 19: Νέα κόστη κατασκευής ..... 97
Πίνακας 20: Ανάλυση ευαισθησίας για την τρίτη περίπτωση ..... 98
Πίνακας 21: Συνδυασμός και συνολικό κόστος ..... 99
Πίνακας 22: Συνδυασμός και συνολικό κόστος ..... 99

# 1 Εισαγωγή

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) αποκτά όλο και μεγαλύτερη ζήτηση τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα η αγορά του να παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη. Η small scale αγορά LNG έχει γίνει πολύ ελκυστική τα τελευταία χρόνια, με κύριες περιοχές ενδιαφέροντος τις ΗΠΑ, την Ευρώπη και κυρίως την Κίνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρουσίαση αυξημένου ενδιαφέροντος για επενδύσεις σε αυτόν τον χώρο από ναυτιλιακές εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτές τις περιοχές.

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο με βάση κάποιον κεντρικό τερματικό σταθμό αεριοποίησης LNG και δεδομένα κέντρα ζήτησης – μικρότερα τερματικά υπολογίζει τον αριθμό και το μέγεθος των πλοίων που απαιτούνται για να γίνει η διανομή LNG από τον μεγαλύτερο τερματικό στους μικρότερους. Αυτό γίνεται με τη χρήση split delivery, δηλαδή με τον διαμερισμό του φορτίου σε περισσότερα από ένα τερματικά. Στη συνέχεια υπολογίζεται το κόστος κατασκευής και λειτουργίας αυτών των πλοίων. Από τους πιθανούς συνδυασμούς που βρέθηκαν σύμφωνα με το μοντέλο, υπολογίζεται το βέλτιστο κόστος και κατά συνέπεια ο συνδυασμός που κρίνεται βέλτιστος για επένδυση από την πλευρά του πλοιοκτήτη. Για την υλοποίηση αυτού του μοντέλου γίνεται χρήση δυναμικού προγραμματισμού, ενώ απαιτούνται στοιχεία για τα εκάστοτε τερματικά και τους τύπους πλοίων που εξετάζονται.

Το split delivery είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει αρκετούς μελετητές και έχει αποτελέσει ζήτημα πολλών ερευνών, όχι μόνο στην αγορά SSLNG, η οποία εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά και γενικότερα στις θαλάσσιες και χερσαίες μεταφορές. Η βιβλιογραφία για την αγορά SSLNG είναι σχετικά μικρή. Για αυτό το λόγο εξετάστηκαν και έρευνες σε άλλους τύπους πλοίων και σε χερσαίες μεταφορές. Αυτές οι έρευνες κάνουν χρήση διαφόρων μοντέλων βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται με συντομία παρακάτω.

Οι *C. Archetti, N. Bianchessi* και *M.G. Seperanza (2011)* ανέπτυξαν ένα μοντέλο αξιοποίησης ενός στόλου οχημάτων με σκοπό την ελαχιστοποίηση των μεταφορικών εξόδων. Η διαφορά της μελέτης με προηγούμενες πάνω σε αυτό το θέμα είναι ότι στην προκειμένη περίπτωση ένα όχημα έχει τη δυνατότητα να επισκεφθεί έναν πελάτη περισσότερες από μία φορές για την κάλυψη της ζήτησής του. Μάλιστα, στη μελέτη εξετάζεται τόσο η περίπτωση άπειρου στόλου όσο και η περίπτωση στην οποία γίνεται προσπάθεια ικανοποίησης της ζήτησης με τα ελάχιστα δυνατά οχήματα.

Οι *F. Hennig* και *B. Nygreen (2011)* ανέπτυξαν ένα μοντέλο δρομολόγησης και προγραμματισμού στόλου πλοίων τύπου tanker, βασισμένο σε ρεαλιστικά δεδομένα. Το μοντέλο αυτό περιέχει τη δυνατότητα split-pickup και τη δυνατότητα split delivery. Μάλιστα, υπάρχει και η δυνατότητα χωρισμού του φορτίου σε περισσότερα από ένα πλοία. Το θετικό στοιχείο αυτού του μοντέλου είναι ότι μπορεί να καταλήξει σε εφικτές λύσεις πολύ γρήγορα και να έχει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ωστόσο, δεν γίνεται μελέτη της βέλτιστης λύσης και έτσι τα αποτελέσματα δεν μπορεί να αποδεχθεί ότι θα είναι και τα προτιμότερα.

Οι A. Agra, M. Christiansen, A. Delgado και L. Simonetti (2013) ερεύνησαν το πρόβλημα

αποθήκευσης και διανομής προϊόντων σε μικρές περιοχές. Εστίασαν στο πετρέλαιο, ωστόσο το μοντέλο βρίσκει χρησιμότητα σε οποιοδήποτε προϊόν μεταφέρεται στη θάλασσα. Ο σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους διανομής. Γίνεται χρήση μικρού ετερογενή στόλου πλοίων και εξετάζεται ένας χρονικός ορίζοντας, ο οποίος είναι μικρός και δεν υπερβαίνει τους έξι μήνες.

Οι *F. Mutlu* και *M.K. Msakni (2015)* σχεδίασαν ένα μαθηματικό μοντέλο για ένα ετήσιο πρόγραμμα διανομής σε πλοία LNG. Ο σκοπός του μοντέλου είναι να παρουσιάσει το βέλτιστο πρόγραμμα διανομής και βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε στόλο με μεγάλο αριθμό πλοίων και μεγάλο αριθμό πελατών. Γίνονται δοκιμές αρχικά χωρίς και στη συνέχεια με χρήση split delivery. Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η χρήση split delivery μειώνει αισθητά το κόστος διανομής. Το μοντέλο χρησιμοποιεί στοιχεία όπως η εποχικότητα της ζήτησης, η χωρητικότητα αποθήκευσης και η σχέση παραγωγής – ζήτησης.

Οι *A. Bittante, F. Pettersson* και *H. Saxen (2018)* δημιούργησαν μία εφοδιαστική αλυσίδα SSLNG, περιλαμβάνοντας ένα ετερογενή στόλο, ένα σύνολο από τερματικά εισαγωγής και εξαγωγής με δεδομένη ζήτηση το καθένα, θεωρώντας επίσης επιπλέον διαμερισμό του φορτίου και πολλά αποθηκευτικά σημεία μεταξύ των λιμανιών. Για την επίλυση χρησιμοποιήθηκε μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός με αντικειμενικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους με βάση την προμήθεια καυσίμου. Λήφθηκαν υπ' όψιν επίσης οι τιμές του καυσίμου, τα σημεία και ο χρόνος ελλιμενισμού, όπως επίσης και προκαταρκτικοί υπολογισμοί για την αβεβαιότητα στη ζήτηση, όλα αυτά υπό δεδομένο χρονικό ορίζοντα.

Οι *A. Bortfeldt* και *J. Yi (2019)* δημιούργησαν ένα μοντέλο για το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με τη χρήση split delivery. Το μοντέλο τους εξετάζει δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, η χρήση split delivery είναι υποχρεωτική, καθώς οι πελάτες απαιτούν ποσότητα προϊόντος, για την οποία δεν επαρκεί ένα όχημα. Έτσι, είναι προφανές ότι το φορτίο χρειάζεται να μοιραστεί. Στην δεύτερη περίπτωση, η χρήση split delivery είναι προαιρετική. Έτσι, χρησιμοποιείται μόνο όπου χρειάζεται και όπου κρίνεται ότι είναι ο βέλτιστος τρόπος για μεταφορά του φορτίου. Η έρευνα περιλαμβάνει και πραγματικά παραδείγματα εφαρμογής της. Σκοπός του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους και η εξέταση των δύο πιθανών μεθόδων για την εύρεση της βέλτιστης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στην αγορά small scale LNG, τα πλεονεκήματά της, πιθανά προβλήματα που παρουσιάζονται στην ανάπτυξή της και τους ενδιαφερόμενους για αυτή την αγορά. Επίσης, γίνεται ειδική αναφορά στην ανάπτυξη αυτής της αγοράς στην Κίνα, στην Ευρώπη και στην Ελλάδα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά της αγοράς small scale LNG. Αυτά αφορούν τα πλοία, τα τερματικά και πιο συγκεκριμένα θέματα, όπως το boil - off gas, τον τρόπο αποθήκευσης και την εφοδιαστική αλυσίδα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο split delivery, καθώς χρησιμοποιείται στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία. Γίνεται αναφορά στις χρήσεις του τόσο στις χερσαίες όσο και στις θαλάσσιες μεταφορές και πιο συγκεκριμένα στη

μεταφορά LNG.

# 2 Η αγορά small scale LNG

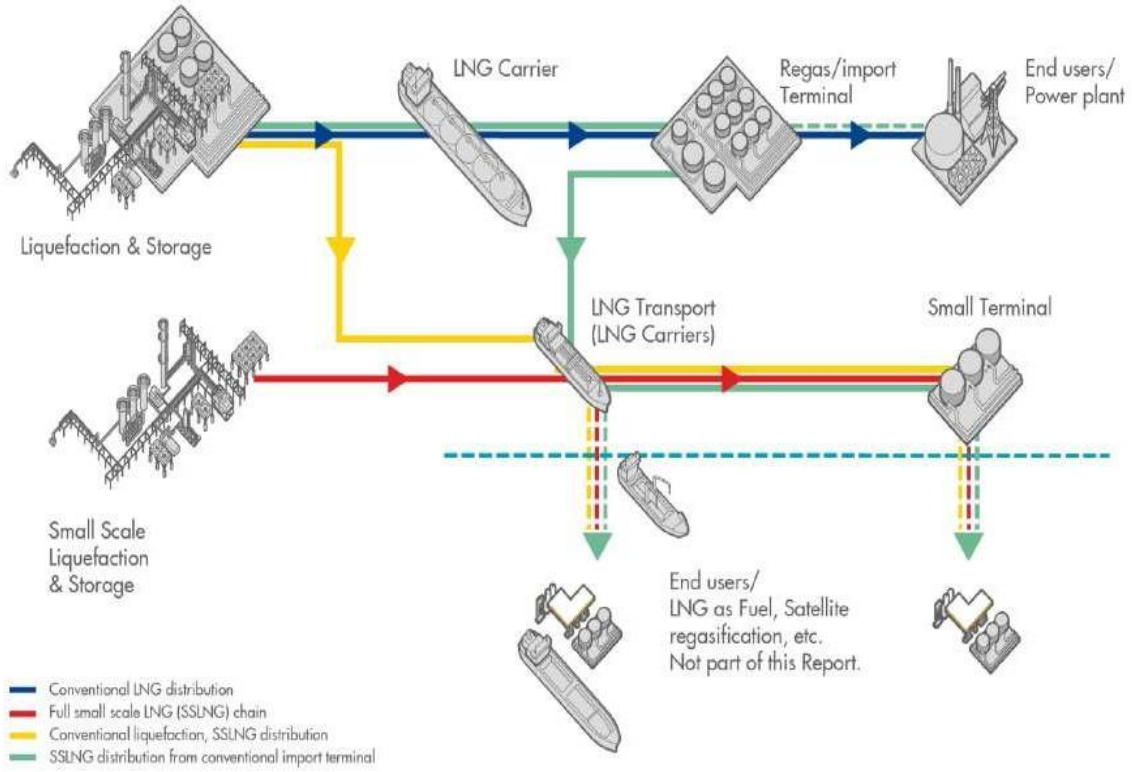
## 2.1 Γενικά για την αγορά small scale LNG: Πλεονεκτήματα, χρήσεις και πιθανά προβλήματα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε γενικότερα στοιχεία της αγοράς small scale LNG, στα πλεονεκτήματα, τις χρήσεις του LNG που προέρχεται από αγορές μικρής κλίμακας, τα πιθανά προβλήματα που παρουσιάζονται, καθώς επίσης και τους ενδιαφερόμενους για αυτή την αγορά και τα επιχειρηματικά μοντέλα που εμφανίζονται.

Ο όρος small scale LNG (SSLNG) αναφέρεται γενικά σε μικρού μεγέθους εγκαταστάσεις που σχετίζονται με την αγορά LNG (τερματικά, αποθηκευτικοί χώροι, πλοία κλπ) και διατηρούν χαρακτηριστικά της συμβατικής αγοράς LNG απλά σε μικρότερη κλίμακα.

Ο ορισμός για το μέγεθος των SSLNG διαφέρει ανάλογα με την πηγή. Ενδεικτικά, ο James Brown ορίζει την μέγιστη δυνατότητα υγροποίησης των μικρών τερματικών υγροποίησης LNG στο ένα εκατομμύριο τόνους ανά έτος, ενώ η εταιρεία PwC ορίζει το ίδιο μέγεθος στους 500.000 τόνους ανά έτος. Ο ακριβέστερος ορισμός θα θεωρηθεί αυτός του IGU, σύμφωνα με τον οποίο ένα small scale τερματικό υγροποίησης έχει δυνατότητα υγροποίησης από 0.05 έως ένα εκατομμύριο τόνους ανά έτος και ένα small scale πλοίο έχει μέγιστη χωρητικότητα 60.000 κυβικά μέτρα (Mering et al., 2015).

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, η αγορά SSLNG μπορεί να παίρνει το φυσικό αέριο από πηγές της συμβατικής αγοράς LNG και να εξυπηρετεί χρήστες που δεν μπορεί να εξυπηρετήσει η συμβατική αγορά (Asia Pacific Energy Research Centre (APERC), 2019).




*Σχήμα 1: Η διανομή στην αγορά SSLNG (Πηγή: IGU)*

Τα πρώτα χρόνια της αγοράς LNG, οι εγκαταστάσεις υγροποίησης και αεριοποίησης είχαν χωρητικότητα που σήμερα θα θεωρούταν small scale. Για παράδειγμα, το 1964 το πρώτο τερματικό στο Canvey island του Ηνωμένου Βασιλείου ήταν εξοπλισμένο με έξι δεξαμενές 4000 τόνων η κάθε μια. Σταδιακά το μέγεθος των εγκαταστάσεων αυξανόταν όσο αυξανόταν και η ζήτηση για φυσικό αέριο. Χαρακτηριστικά, το μεγαλύτερο τερματικό στον κόσμο αυτή τη στιγμή βρίσκεται στην Κορέα και έχει ολική χωρητικότητα 2,68 εκατομμύρια κυβικά μέτρα LNG (Mering et al., 2015).

Ωστόσο, η αγορά small scale LNG έχει αποκτήσει νέο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Έτσι, πολλές περιοχές έχουν αρχίσει να αναπτύσσουν small scale υποδομές, τόσο υγροποίησης όσο και αεριοποίησης και αποθήκευσης LNG. Αυτό συμβαίνει λόγω της αυξημένης ζήτησης για φυσικό αέριο, λόγω των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν και λόγω των οικονομικών οφελών για την αντίστοιχη χώρα ή περιοχή. Επιπλέον, με την ανάπτυξη αυτής της αγοράς, μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση σε φυσικό αέριο πολλές απομακρυσμένες περιοχές με λιγότερο πληθυσμό, κάτι που δεν ήταν δυνατό στο παρελθόν.

Σύμφωνα με την IGU το 2014 υπήρχαν περίπου 100 εγκαταστάσεις παραγωγής small scale LNG, ενώ η συνολική χωρητικότητα ήταν περίπου 20 εκατομμύρια τόνοι ανά έτος (mtpa), που ανέρχεται στο 5% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής LNG. Σήμερα η χωρητικότητα έχει φτάσει τους 25 mtpa και το 10% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής LNG, ενώ

προβλέπεται μια αύξηση 6% τον χρόνο για τα επόμενα χρόνια. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής βρίσκεται στην Κίνα, όπου υπολογίζεται ότι στα επόμενα χρόνια οι εγκαταστάσεις παραγωγής θα ξεπεράσουν κατά πολύ τις 100 και η χωρητικότητα θα φτάσει πάνω από 20 mtpa. Τα τερματικά υγροποίησης και αεριοποίησης είναι χιλιάδες πλέον, ακόμα και σε μικρότερες αγορές από αυτή της Κίνας. Οι κύριες από αυτές βρίσκονται στην Ιαπωνία, στις ΗΠΑ, στην Τουρκία, την Ισπανία και την Βόρεια Ευρώπη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η συνολική χωρητικότητα των τερματικών ανά περιοχή (Mering et al., 2015).

*Σχήμα 2: Χωρητικότητα τερματικών ανά περιοχή (Πηγή: IGU)*

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους παρουσιάζεται αυξημένο ενδιαφέρον για την αγορά SSLNG. Οι βασικότεροι είναι περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και κυβερνητικοί.

Οι περιβαλλοντικοί λόγοι αποτελούν ίσως τη σημαντικότερη αιτία ανάπτυξης αυτής της αγοράς τα τελευταία χρόνια. Ένας από τους βασικούς σκοπούς της αγοράς SSLNG είναι η διείσδυση σε πιο απομακρυσμένες περιοχές, οι οποίες προηγουμένως δεν είχαν πρόσβαση στο φυσικό αέριο. Η πρόσβαση σε αυτή την πηγή ενέργειας μειώνει αισθητά τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, καθώς το φυσικό αέριο είναι το πιο καθαρό ορυκτό καύσιμο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς ο IMO έχει θέσει ως στόχο την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο 50% έως το 2050 (Chu Van et al., 2019).

Επιπλέον, οι νέοι κανονισμοί του IMO, οι οποίοι τίθενται σε ισχύ το 2020, απαιτούν τα καύσιμα των πλοίων να μην υπερβαίνουν τη 0,5% περιεκτικότητα σε θείο, πράγμα που

αυξάνει την ανάγκη για χρήση LNG ως καύσιμο.

Εκτός από τα αέρια του θερμοκηπίου, το φυσικό αέριο εκπέμπει λιγότερα οξείδια του νατρίου ($NO_x$) και οξείδια του θείου ($SO_x$). Κατά την υγροποίηση του φυσικού αερίου, γίνεται και καθαρισμός του, ο οποίος μειώνει ακόμα περισσότερο τις εκπομπές αυτών των ουσιών.

Φυσικά δεν είναι μόνο οι περιβαλλοντικοί λόγοι αρκετοί για την ανάπτυξη της αγοράς small scale LNG. Το φυσικό αέριο είναι οικονομικότερο καύσιμο σε σχέση με το πετρέλαιο και οι τάσεις της αγοράς δείχνουν ότι η διαφορά τους θα συνεχίσει να αυξάνεται με αποτέλεσμα το πετρέλαιο να αντικατασταθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Στην Ασία η τιμή του φυσικού αερίου μεταβάλλεται ανάλογα με αυτή του πετρελαίου. Ωστόσο, στην Ευρώπη και στην Αμερική η τιμή του φυσικού αερίου εξαρτάται από την ζήτηση και την προσφορά του την αντίστοιχη περίοδο. Μάλιστα, από την αρχή της δεκαετίας, η διαφορά τιμής μεταξύ του φυσικού αερίου και του πετρελαίου όλο και αυξάνεται κάνοντας το πρώτο ακόμα πιο ανταγωνιστικό.

Επιπλέον, η επένδυση που απαιτείται για την διείσδυση στην αγορά SSLNG είναι πολύ μικρότερη από αυτή που απαιτείται στη συμβατική αγορά LNG. Ο χρόνος κατασκευής μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι σχετικά μικρός και έτσι μια τέτοια επένδυση είναι ιδανική σε περιοχές με γρήγορα αναπτυσσόμενη οικονομία, στις οποίες η ανάγκη για ενέργεια αυξάνεται επίσης ταχύτατα.

Εκτός από νέους ενδιαφερόμενους, τους οποίους μπορεί να προσελκύσει αυτή η αγορά, πολλές παραδοσιακές δυνάμεις της αγοράς LNG έχουν παρουσιάσει ενδιαφέρον για αυτόν τον τομέα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Shell, η οποία από το 2012 έχει αρχίσει να ασχολείται με την αγορά SSLNG στην Νορβηγία, την Ολλανδία και τη Γερμανία μεταξύ άλλων . Άλλο ένα παράδειγμα είναι η γαλλική εταιρεία Total, η οποία το 2018 ανακοίνωσε τα σχέδιά της να εισάγει ένα δίκτυο διανομής φυσικού αερίου στις ΗΠΑ. Το πιο πρόσφατο παράδειγμα είναι της εταιρείας Fortress Investment Group, η οποία έκανε την είσοδό της στην αγορά το 2019 και έχει στόχο μέχρι το 2023 να κατέχει το 25% της παγκόσμιας υγροποιημένης ποσότητας φυσικού αερίου (Sugawara & Nikaido, 2014).

Σε αρκετές χώρες υπάρχει απαίτηση από την κυβέρνηση να αυξηθεί το επίπεδο της ανεξαρτητοποίησης της χώρας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αξιοποίηση κάποιας εναλλακτικής πηγής ενέργειας, όπως το φυσικό αέριο. Το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα είναι η Κίνα, στην οποία η κυβέρνηση έχει απαιτήσει μέχρι το τέλος του 2020 το 8% των ενεργειακών αναγκών της χώρας να καλύπτεται από φυσικό αέριο. Για αυτό τον λόγο έχει αρχίσει να χρησιμοποιεί την αγορά SSLNG ώστε να μεταφέρεται φυσικό αέριο σε απομακρυσμένες περιοχές της χώρας. Στην ενδοχώρα της Κίνας αυτό γίνεται προφανώς με χερσαίες μεταφορές, ενώ στην Σιγκαπούρη, η κυβέρνηση σκοπεύει να μετατρέψει τη θέση της σε “SSLNG supply hub”, από το οποίο μικρά LNGc θα μεταφέρουν φυσικό αέριο στα μικρότερα νησιά της περιοχής (Asia Pacific Energy Research Centre (APERC), 2019).Παρ’όλο που οι λόγοι που υπάρχει αυτή προσπάθεια μπορεί να μην έχουν να κάνουν μόνο με την ανάπτυξη του SSLNG, αυτή η εξέλιξη δεν παύει να ενισχύει τη θέση του στην παγκόσμια αγορά LNG.

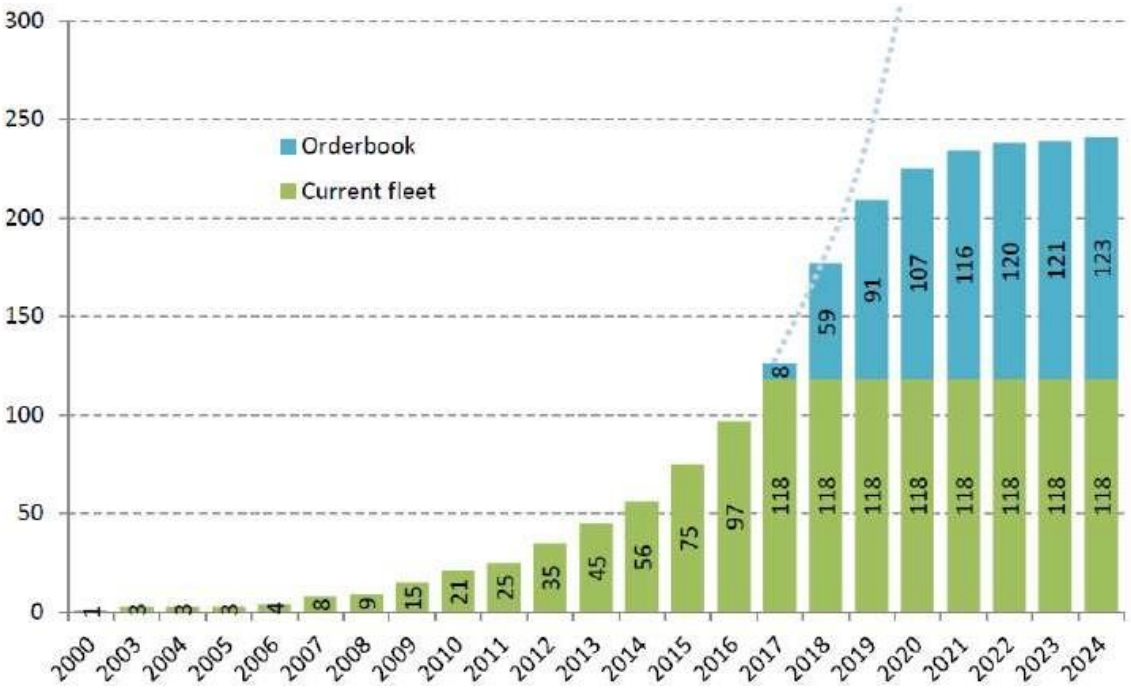
*Σχήμα 3: Οι λόγοι ανάπτυξης της αγοράς SSLNG (Πηγή: IGU)*

Οι χρήσεις του SSLNG αφορούν την κάλυψη οικιακών και εργοστασιακών ενεργειακών αναγκών σε απομακρυσμένες περιοχές, τη χρήση του ως καύσιμο σε πλοία και στις χερσαίες μεταφορές. Η τελευταία θεωρείται η σημαντικότερη για το μέλλον της αγοράς. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι χρήσεις του LNG, όταν αυτό προέρχεται από τη small scale αγορά αλλά και γενικότερα.

Μία από τις βασικότερες χρήσεις του SSLNG είναι ως καύσιμο στις χερσαίες μεταφορές. Τα οχήματα αυτά αποθηκεύουν το φυσικό αέριο είτε σε αέρια μορφή σε υψηλή πίεση (CNG) είτε σε υγρή μορφή σε συνθήκες πολύ χαμηλής θερμοκρασίας. Τα CNG είναι τα πιο συνηθισμένα και χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά φυσικού αερίου σε περιοχές που αυτό παράγεται εγχώρια, όπως την Κίνα, το Ιράν και την Αργεντινή. Λόγω της ανταγωνιστικής τιμής του φυσικού αερίου αυτή η χρήση του γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη στις ΗΠΑ αλλά και παγκοσμίως. Ενδεικτικά, στην Ευρώπη υπάρχουν 4.000 φορτηγά που λειτουργούν με LNG. Αντίστοιχα, στις ΗΠΑ ο αριθμός αυτός είναι περίπου 10.000 και στην Κίνα υπερβαίνουν τις 20.000 (Asia Pacific Energy Research Centre (APERC), 2019). Σε αρκετές χώρες οι συγκοινωνίες χρησιμοποιούν φυσικό αέριο με σκοπό την μείωση των ρύπων, ενώ παράλληλα γίνονται πολλές προσπάθειες για αυξημένη χρήση αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο αντί για βενζίνη.

Το LNG χρησιμοποιείται επίσης ως καύσιμο θαλάσσιων μεταφορών. Αυτή η χρήση του small scale LNG είναι πιο διαδεδομένη στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη. Λόγω των νέων κανονισμών του IMO παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον για το μέλλον. Ωστόσο, σε περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί Emissions Control Areas (ECAs) υπάρχει ήδη η απαίτηση τα καύσιμα του πλοίου να μην υπερβαίνουν την 0.5% περιεκτικότητα σε θείο. Αυτές οι περιοχές είναι η Βαλτική θάλασσα, η Βόρεια θάλασσα, η Βόρεια Αμερική και η Καραϊβική. Λόγω αυτών των κανονισμών υπάρχει γενικά ανάπτυξη της αγοράς LNG σε αυτές τις περιοχές καθώς και αυξημένη ζήτηση για πλοία ανεφοδιασμού (bunker vessels).

Σε ό,τι αφορά τους νέους κανονισμούς, αξίζει να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση scrubbers σε πλοία που λειτουργούν με βαρύ πετρέλαιο είναι μια άλλη εναλλακτική για τη συμμόρφωση με αυτούς. Ωστόσο, αυτή η εγκατάσταση είναι μια μεγάλη επένδυση για τους πλοιοκτήτες και έτσι αναμένεται να προτιμηθεί το LNG. Ήδη έχουν αρχίσει να λειτουργούν λιμάνια ανεφοδιασμού πλοίων που κινούνται με φυσικό αέριο, με το πρώτο να κατασκευάστηκε στη Σιγκαπούρη.




*Σχήμα 4: Παγκόσμιος στόλος πλοίων που κινούνται με LNG (Πηγή : APEC Research Centre)*

Το παραπάνω σχήμα περιέχει τον συνολικό στόλο που κινείται με LNG με στοιχεία του 2017. Όπως φαίνεται, το 2017 τα πλοία αυτά ήταν 118 και μέσα στα επόμενα χρόνια αυτός ο αριθμός θα έχει διπλασιαστεί. Παρακάτω φαίνονται και τα λιμάνια που είτε ασχολούνται ήδη με τον ανεφοδιασμό αυτών των πλοίων (με πράσινο στο σχήμα) ή τον μελετούν

(σύμφωνα με την DNV). Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, οι νέοι κανονισμοί έχουν οδηγήσει σε αύξηση των λιμανιών που ασχολούνται με τον ανεφοδιασμό, καθώς αναμένεται η ζήτηση για το LNG ως καύσιμο να αυξάνεται συνεχώς.

*Σχήμα 5: Λιμάνια ανεφοδιασμού πλοίων που κινούνται με LNG (Πηγή: IGU)*

Σε περιοχές που δεν διαθέτουν πρόσβαση σε δίκτυο φυσικού αερίου υπάρχει ανάγκη για LNG για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους. Το LNG χρησιμοποιείται για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών, για μεταφορές και σε διάφορες βιομηχανίες. Στην Κίνα γίνεται προσπάθεια για καθαρισμό της ατμόσφαιρας και επομένως για περιορισμό της χρήσης άνθρακα. Έτσι αυξήθηκε η χρήση φυσικού αερίου σε όλη την έκταση της χώρας, συμπεριλαμβανόμενης και της ενδοχώρας. Χαρακτηριστικά, παρουσιάστηκε αύξηση 15% της ζήτησης φυσικού αερίου από το 2016 στο 2017 και από τότε συνεχίζει να παρουσιάζεται όλο και μεγαλύτερη ζήτηση. Άλλο ένα παράδειγμα είναι το Περού, όπου επίσης έχει αναπτυχθεί σύστημα διανομής SSLNG, το οποίο ξεκίνησε το 2011, στις πιο απομακρυσμένες περιοχές, με σκοπό την παροχή LNG στην ενδοχώρα (Union, 2014). Άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της χρήσης SSLNG παρουσιάζονται στην Ιαπωνία και στον Καναδά.

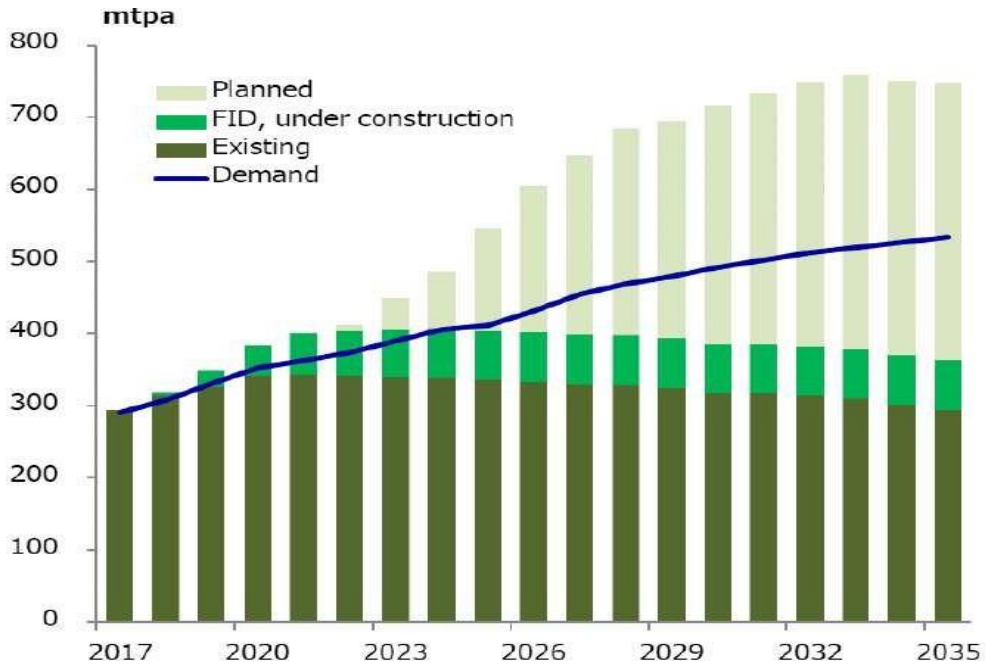
Υπάρχουν και άλλες χρήσεις LNG, οι οποίες είναι λιγότερο διαδεδομένες, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις εξίσου σημαντικές με αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ένας τομέας στον οποίο μπορεί να γίνει χρήση SSLNG είναι ο βιομηχανικός. Στις ΗΠΑ και στον Καναδά έχουν γίνει προσπάθειες χρήσης LNG στα βαριά μηχανήματα και στα φορτηγά στις εξορύξεις και

στις κατασκευές. Για παράδειγμα, η εταιρεία Westport, η οποία κατασκευάζει κινητήρες φυσικού αερίου, συνεργάζεται με την Caterpillar για την κατασκευή off-road οχημάτων που λειτουργούν με dual - fuel κινητήρες, δηλαδή κινητήρες που λειτουργούν με συνδυασμό diesel και φυσικού αερίου. Κάτι αντίστοιχο επιχειρεί και η Shell Canada, η οποία μάλιστα υπέγραψε συμφωνία το 2013 με την Caterpillar για δοκιμή αυτής της τεχνολογίας στα φορτηγά της (Asia Pacific Energy Research Centre (APERC), 2019).

Στην Βόρεια Αμερική γίνονται προσπάθειες να χρησιμοποιηθεί το LNG ως καύσιμο στα τρένα. Στις δεκαετίες του 1980 και 1990 η Burlington Northern Railroad (πλέον BNSF Railway) ξεκίνησε να χρησιμοποιεί φυσικό αέριο στα τρένα της στο Los Angeles, ενώ το 2013 ανακοίνωσε ότι θα αρχίσει να χρησιμοποιεί LNG ως καύσιμο μέχρι το τέλος εκείνης της χρονιάς (Asia Pacific Energy Research Centre (APERC), 2019). Λόγω της μικρότερης τιμής του LNG σε σχέση με άλλα καύσιμα η αγορά αυτή έχει μεγάλες προοπτικές και αναμένεται να έχει σπουδαία ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια.

Παρά τους λόγους για ανάπτυξη της αγοράς small scale LNG και τις χρήσεις που αναφέρθηκαν, κάποιοι παράγοντες μπορεί να περιορίσουν την ανάπτυξή της στο μέλλον. Υπάρχουν αρκετά προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν στο μέλλον στην αγορά SSLNG και να δυσκολέψουν την επέκτασή της. Αυτά είναι κυρίως η οικονομική της εξάρτηση από άλλες αγορές, το κόστος κατασκευής των εγκαταστάσεων και η έλλειψη τεχνογνωσίας σε ότι αφορά τη μικρότερη κλίμακα της αγοράς small scale LNG.

Η παγκόσμια αγορά LNG θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την αγορά SSLNG στο μέλλον. Για αυτό τον λόγο, πιθανή αύξηση της τιμής του LNG θα δυσκολέψει την ανάπτυξη της αγοράς SSLNG, καθώς υπάρχει άμεση εξάρτηση της τιμής του LNG στις συμβατικές αγορές με αυτή του LNG στις αγορές SSLNG. Αυτό το πρόβλημα είναι πιθανότερο να παρουσιαστεί στην αγορά της Ασίας, όπου, όπως έχει αναφερθεί, υπάρχει άμεση σχέση στις τιμές των διαφόρων καυσίμων. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, στα μέσα της επόμενης δεκαετίας αναμένεται η ζήτηση σε LNG να ξεπεράσει την προσφορά, αν δεν ληφθούν υπόψιν οι υπό κατασκευή εγκαταστάσεις. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση στην τιμή του LNG, πράγμα που θα έχει άμεσες συνέπειες και στην αγορά SSLNG και θα περιορίσει την ανάπτυξή της.




*Σχήμα 6: Σχέση προσφοράς-ζήτησης LNG (Πηγή: APEC)*

Άλλος ένας λόγος για ανησυχία είναι το γεγονός ότι το 2014 υπήρξε μία πτώση στην τιμή του πετρελαίου, κάτι που το έκανε πιο ανταγωνιστικό και κατά συνέπεια μείωσε την τάση για επενδύσεις στο φυσικό αέριο. Ωστόσο, από το 2016 οι τιμές αυτές επανήλθαν στα προηγούμενα επίπεδα και έτσι η αγορά LNG απέκτησε ξανά ανοδική πορεία και η ζήτηση συνέχισε να αυξάνεται. Όμως, αυτή η ανοδική πορεία δεν είναι εγγυημένη και η τιμή του πετρελαίου είναι σημαντικός παράγοντας στην συνέχιση αυτής. Η τάση για νέες επενδύσεις μεγάλης κλίμακας εντοπίζονται κυρίως στην Κίνα, στις ΗΠΑ, στη Μοζαμβίκη, στην Τανζανία, στην Ρωσία και στο Κατάρ, περιοχές στις οποίες είτε υπάρχει ανάγκη για εγκαταστάσεις LNG ή υπάρχει η θέληση για ανάπτυξη αυτής της βιομηχανίας (Asia Pacific Energy Research Centre (APERC), 2019). Παρ'όλα αυτά, η διαδικασία κατασκευής ή επέκτασης αυτών των εγκαταστάσεων είναι χρονοβόρα και έτσι μέχρι να ολοκληρωθεί μπορεί να υπάρξει αυξομείωση στην τιμή του φυσικού αερίου.

Η ζήτηση SSLNG δεν επηρεάζεται μόνο από τη ζήτηση πετρελαίου αλλά και από των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή. Αυτές αναμένεται να αποτελέσουν ακόμα μεγαλύτερο ανταγωνιστή στο μέλλον, καθώς το ενδιαφέρον για αυτές είναι αυξημένο. Οι λόγοι είναι κυρίως οικολογικοί, καθώς δεν αφήνουν κατάλοιπα και απόβλητα, ενώ σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, δεν εξαντλούνται ποτέ. Παράλληλα, οι περισσότερες κυβερνήσεις παρέχουν επιδοτήσεις για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων και για τη χρήση αυτών των πηγών ενέργειας.

Επιπλέον, η πολιτική τιμολόγησης του φυσικού αερίου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην

ανταγωνιστικότητά του. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην Κίνα η τιμή του φυσικού αερίου συνδέεται άμεσα με αυτή άλλων καυσίμων. Αυτό θεωρητικά έχει ως αποτέλεσμα οι μεταβολές στη ζήτησή του να είναι ελάχιστες. Ωστόσο, οι προσπάθειες της κυβέρνησης να αυξήσουν την χρήση του φυσικού αερίου έχουν, προς το παρόν, εξαλείψει αυτό το πρόβλημα.

Τέλος, ένας σημαντικός παράγοντας οικονομικής εξάρτησης του φυσικού αερίου είναι η διακύμανση της ζήτησης ανάλογα με την εποχή. Προφανώς υπάρχει μεγαλύτερη ζήτηση στους χειμερινούς μήνες για τις περισσότερες χρήσεις του φυσικού αερίου. Η μόνη χρήση στην οποία η ζήτηση παραμένει σταθερή σε γενικές γραμμές είναι αυτή του καυσίμου στις θαλάσσιες μεταφορές.

Ακόμα ένα πιθανό πρόβλημα των SSLNG είναι το κόστος κατασκευής των τερματικών εισαγωγής και υγροποίησης. Καθώς αυτές κατασκευάζονται σε σχετικά απομακρυσμένες περιοχές υπάρχει αυξημένο κόστος αναλογικά με το μέγεθός τους. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με καλύτερη οργάνωση της αγοράς και συνεργασία με τα ναυπηγεία ώστε να κατασκευάζονται εκεί τα απαραίτητα τμήματα και να μεταφέρονται στη συνέχεια στον χώρο της εγκατάστασης. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται ήδη στην Αυστραλία, όπου με αυτόν τον τρόπο έχει μειωθεί αισθητά το κόστος κατασκευής.

Η διανομή φυσικού αερίου μέσω της αγοράς SSLNG αποτελεί μία σχετικά καινούρια μέθοδο. Επομένως, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναπτυχθεί η απαραίτητη τεχνογνωσία, την οποία πρέπει να αποκτήσει το ανθρώπινο δυναμικό που θα ασχοληθεί με αυτόν τον τομέα. Η κατοχή αυτών των γνώσεων, σε συνδυασμό με τους διαθέσιμους πόρους και τη γενικότερη εμπειρία σχετικά με την αγορά του LNG, έχουν καταστήσει εφικτή την ανάπτυξη αυτού του τομέα σε αγορές όπως της Κίνας και της Νορβηγίας. Ωστόσο, παγκοσμίως γίνεται ακομά προσπάθεια για παροχή των απαραίτητων γνώσεων σχετικά με διαφορές της αγοράς SSLNG με την αγορά LNG, για την οποία η εμπειρία του ανθρώπινου δυναμικού είναι γενικά μεγαλύτερη.

Η εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού στα θέματα που αφορούν το SSLNG (τύποι συμβολαίων, κανονισμοί, καθορισμός ζήτησης και άλλα) πρέπει να είναι ένας τομέας στον οποίο να δίνεται μεγάλη έμφαση από εταιρείες που ενδιαφέρονται να ασχοληθούν με το SSLNG. Έτσι, πολλές εταιρείες έχουν ήδη εισάγει το δικό τους πρόγραμμα εκπαίδευσης και σε αρκετές χώρες, όπως στην Κίνα και στην Ιαπωνία, η κυβέρνηση έχει υποστηρίξει έμπρακτα αυτές τις προσπάθειες. Αυτός είναι ένας βασικός λόγος για τον οποίο παρατηρείται ταχύτερη ανάπτυξη αυτού του τομέα σε αυτές τις χώρες.

## 2.2 Small scale LNG στην Κίνα και στην Ευρώπη

Η Κίνα διαθέτει την μεγαλύτερη αγορά SSLNG παγκοσμίως αυτή τη στιγμή. Η ανάπτυξη αυτής της αγοράς ήταν τεράστια τα τελευταία 10 – 15 χρόνια λόγω της διαθεσιμότητας φυσικού αερίου σε τοπικές αγορές, της μικρής εξάρτησης της τιμής του από αποφάσεις της κυβέρνησης και της μετάβασης της γενικότερης αγοράς της Κίνας προς το φυσικό αέριο

λόγω των προσπαθειών μείωσεις των ρύπων στις πόλεις. Η πλειονότητα των τερματικών βρίσκεται στις βόρειες και δυτικές επαρχίες, κυρίως κατά μήκος των αγωγών φυσικού αερίου και συχνά κοντά στο LNG για τις οδικές μεταφορές. Η διαφορά στην τιμή του φυσικού αερίου και του diesel έχει επίσης οδηγήσει σε αυξημένη χρήση του LNG ως καύσιμο φορτηγών στην Κίνα, με το κόστος της μετατροπής από diesel σε φυσικό αέριο να αντισταθμίζεται περίπου σε ένα χρόνο λειτουργίας. Αυτή η αλλαγή συνέβη το 2009, όπου υπήρξε μεγάλη ανάπτυξη της αγοράς φυσικού αερίου στις χερσαίες μεταφορές. Πλέον, πάνω από 200.000 φορτηγά χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο (Mering et al., 2015). Τα τελευταία χρόνια, έχουν αρχίσει να λειτουργούν αρκετοί σταθμοί ανεφοδιασμού πλοίων (bunker fuel stations), καθώς η κυβέρνηση προσπαθεί να μεταφέρει την επιτυχία των χερσαίων μεταφορών στη χρήση του LNG ως καύσιμο στα πλοία.

Η προμήθεια φυσικού αερίου προέρχεται κυρίως από αγωγούς που παρέχουν εγχώρια παραγόμενο αέριο ή εισαγόμενο αέριο από την Κεντρική Ασία. Ωστόσο, οι πηγές αερίου προς το παρόν κινούνται προς φθηνότερες πηγές, π.χ. μεθάνιο ψυχρής κλίνης (cold bed methane – CBM) καιCOG κατά τη μεταρρύθμιση των τιμών φυσικού αερίου.

Λόγω του εξαιρετικά μεγάλου μεγέθους και της συνεχούς ανάπτυξης της αγοράς SSLNG στην Κίνα είναι δύσκολο να βρεθούν ακριβή μεγέθη για τα small scale τερματικά υγροποίησης που έχουν ήδη εγκατασταθεί ή κατασκευάζονται. Μια έρευνα από τον Wood Mackenzie αναφέρει περίπου 100 τερματικά υγροποίησης, ενώ μια έρευνα που διενήργησε η Linde εντόπισε περίπου 150 τερματικά. Η συνολική χωρητικότητα υγροποίησης κυμαίνεται στους 15 - 20 mtpa.

Η αγορά SSLNG στην Κίνα επωφελήθηκε ιδιαίτερα από τις συγκριτικά χαμηλές εγχώριες τιμές φυσικού αερίου, οι οποίες ρυθμίζονται από την Επιτροπή Ανάπτυξης και Μεταρρυθμίσεων (National Development and Reform Commission - NDRC), η οποία διοικείται κρατικά (Chen, 2014). Ωστόσο, πριν από μερικά χρόνια αυξήθηκε αισθητά η αγορά εισαγωγής LNG στην Κίνα από διεθνείς αγορές, πράγμα που οδήγησε την NDRC να αυξήσει προς στιγμή τις τιμές φυσικού αερίου. Η μέγιστη τιμή του εγχώριου (ceiling price) LNG, όμως, μειώθηκε με σκοπό να παραμείνει το κίνητρο της χρήσης LNG ως καύσιμο. Αυτή η ενέργεια συνέχισε να καθιστά το LNG ελκυστικό για φορτηγά και πλοία (Πηγή: https://en.ndrc.gov.cn/). Δεν ισχύει το ίδιο όμως για το δίκτυο αγωγών υγροποίησης, η ενασχόληση με το οποίο πλέον δεν θεωρείται βιόσιμη οικονομικά. Λόγω του δυσμενούς επιχειρηματικού περιβάλλοντος για μονάδες υγροποίησης SSLNG, το ποσοστό χρησιμοποίησης των υπαρχόντων τερματικών είναι αρκετά χαμηλό, αφήνοντας χώρο για μια αναπτυσσόμενη αγορά χωρίς την άμεση ανάγκη προσθήκης νέας χωρητικότητας υγροποίησης.

Η γνώση και η εμπειρία στην τεχνολογία LNG στην Κίνα ακολουθούν την ανάπτυξη αυτής της αγοράς. Οι κινέζικες εταιρείες έχουν γίνει πιο ανταγωνιστικές, παρ’ όλο που η διαφορά στα πρότυπα σχεδιασμού κάνει δύσκολη την σύγκριση. Οι κρατικές εταιρείες ιδιαίτερα οδηγούνται από την κυβέρνηση να αναπτύσσουν τις δικές τους διαδικασίες υγροποίησης και τον απαραίτητο εξοπλισμό για αυτή. Μια γενικότερη παρατήρηση για την αγορά της Κίνας είναι ότι οι τοπικές εταιρείες κατακτούν με την πάροδο του χρόνου όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς.

Σε ότι αφορά την Ευρώπη, αξίζει να αναφερθεί ότι η Σκανδιναβία και η Βορειοδυτική Ευρώπη είναι από τις μεγαλύτερες αγορές SSLNG παγκοσμίως. Ο βασικότερος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αφορά την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς αυτές οι χώρες έχουν θέσει ως προτεραιότητα την μείωση της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, σε αυτές τις χώρες σχηματίζονται πολλά μικρά κέντρα ζήτησης, τα οποία μπορούν να προμηθευτούν φυσικό αέριο με αυτόν τον τρόπο. Τα συμβατικά τερματικά LNG δεν αξιοποιούνται στο έπακρο σε αυτές τις χώρες και έτσι μπορούν να ικανοποιήσουν και τη ζήτηση σε SSLNG, βοηθώντας στην ανάπτυξη αυτής της αγοράς. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της GDF SUEZ, η ευρωπαϊκή ζήτηση φυσικού αερίου θα αυξάνεται μέχρι το 2030 κατά 0,16 - 0,2 % ετησίως λόγω κυρίως της αύξησης της κατανάλωσης στις μεταφορές, στην ηλεκτροπαραγωγή και στο βιομηχανικό τομέα. Οι ευνοϊκές τιμές του LNG, μαζί με την αυξανόμενη ζήτηση από τους βασικούς τομείς που αναφέρονται παραπάνω, αναμένεται να αυξήσουν τη ζήτηση της αγοράς κατά την περίοδο πρόβλεψης. Επίσης, διάφοροι κυβερνητικοί κανονισμοί, λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά οφέλη του LNG, έχουν ενθαρρύνει την ανάπτυξη της αγοράς στην περιοχή.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές χώρες της Ευρώπης, στις οποίες υπάρχει ήδη μεγάλη αγορά SSLNG καθώς και κάποια από τα βασικότερα τερματικά τους.

Η Ολλανδία είναι από τις χώρες που προωθούν την αγορά SSLNG και γενικότερα είναι από τις χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή φυσικού αερίου στην Ευρώπη. Το 2007 κατασκευάστηκε το Gate LNG project στο Ρότερνταμ με αρχικό σκοπό να λειτουργεί ως τερματικό εισαγωγής και αεριοποίησης για παροχή φυσικού αερίου στην Ολλανδία, αλλά και να εξάγει φυσικό αέριο στις Βορειοανατολικές χώρες τις Ευρώπης. Μέχρι το 2011 το τερματικό χρησιμοποιούταν από τα μεγαλύτερα πλοία LNG παγκοσμίως, τα οποία παρείχαν μεγάλο ποστοστό του LNG που καταναλώνει η Ολλανδία. Ωστόσο, στα επόμενα χρόνια η τιμή του LNG έγινε λιγότερο ανταγωνιστική σε σχέση με αυτή του αερίου δικτύου που προέρχεται από τη Ρωσία και τη Νορβηγία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το τερματικό να μην έχει την ζήτηση που αναμενόταν κατά την κατασκευή του.

Αυτό το γεγονός οδήγησε στην προσπάθεια να αξιοποιηθεί το τερματικό με άλλους τρόπους. Έτσι ξεκίνησε να λειτουργεί ως τερματικό εισαγωγής SSLNG για τις Σκανδιναβικές χώρες και συγκεκριμένα σε περιοχές που δεν είχαν προηγουμένως πρόσβαση σε φυσικό αέριο. Για αυτό τον λόγο η προβλήτα, η οποία αρχικά είχε σχεδιαστεί για να δέχεται μεγάλα πλοία, τροποποιήθηκε το 2013, ώστε να δέχεται πλοία με χωρητικότητα 5.000 – 65.000 $m^3$. Έτσι, παρ'όλο που το 2013 η Ισπανία ήταν η πρώτη χώρα σε φόρτωση LNG, οι τροποποιήσεις αυτές έφεραν την Ολλανδία στην πρώτη θέση το 2015. Το τερματικό αυτό πλέον δεν μπορεί μόνο να υποστηρίξει μεγάλα και μικρά πλοία, αλλά από το 2016 και μετά υποστηρίζει και το Ship to ship (STS) delivery, αξιοποιώντας έτσι τον μεγάλο αριθμό από προβλήτες που διαθέτει (Sugawara & Nikaido, 2014).

*Σχήμα 7: Gate Terminal, Rotterdam*

Άλλη μία Ευρωπαϊκή χώρα με μεγάλη ανάπτυξη της αγοράς small scale LNG είναι το Βέλγιο. Η εισαγωγή LNG στο Βέλγιο ξεκίνησε το 1987 στο τερματικό της Zeebrugge. Το τερματικό αυτό επιλέχθηκε καθώς στην περιοχή υπάρχει ένα από τα μεγαλύτερα δίκτυα φυσικού αερίου στην Ευρώπη. Λόγω της ευαισθητοποίησης που υπάρχει πλέον για τα περιβαλλοντικά θέματα, καθώς επίσης και λόγω της προσπάθειας το φυσικό αέριο να προσελκύσει περισσότερους αγοραστές, από αυτό το τερματικό γίνονται διανομές και εκτός Βελγίου και συγκεκριμένα σε χώρες της Βορειοδυτικής Ευρώπης. Το τερματικό αυτό βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση και αποτελεί θαλάσσια διασταύρωση της Ευρώπης. Μέσω αγωγών, το τερματικό συνδέεται με την Νορβηγία, μέσω του Gassco Zeepipe pipeline και με τη Μεγάλη Βρετανία μέσω του Interconnector.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί και η αγορά SSLNG στο Βέλγιο. Στο τερματικό της Zeebrugge φορτηγά μπορούν να εφοδιάσουν με LNG είτε τους σταθμούς ανεφοδιασμού είτε τα πλοία απευθείας. Μάλιστα, το 2016 κατασκευάστηκε μια δεύτερη προβλήτα, η οποία χρησιμοποιείται για ανεφοδιασμό πλοίων που κινούνται με LNG (Wang & Notteboom, 2015).

Ο απευθείας ανεφοδιασμός των πλοίων από φορτηγά (truck-to-ship bunkering) γίνεται από το 2012 στο λιμάνι της Antwerp. Το 2019 εγκαταστάθηκε μόνιμη προβλήτα ανεφοδιασμού από την εταιρεία Flyxus, στην οποία ένα χρόνο πριν παραχωρήθηκε το λιμάνι.

Η Νορβηγία είναι μια ακόμα χώρα που έχει διεισδύσει στην αγορά small scale LNG τα τελευταία χρόνια. Η Νορβηγία διαθέτει τη δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγή και εξαγωγή LNG στην Ευρώπη. Αυτό οφείλεται κυρίως σε μεγάλου μεγέθους εξαγωγές. Ωστόσο υπάρχουν δύο μικρότερες εγκαταστάσεις υγροποίησης φυσικού αερίου που σε συνδυασμό με την προσπάθεια της κυβέρνησης να μειώσει τις εκπομπές $NO_x$ έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη της αγοράς SSLNG. Το 2008 το Υπουργείο Περιβάλλοντος υπέγραψε συμφωνία με 15 εταιρείες, στις οποίες παρείχε κεφάλαιο με σκοπό τη μείωση των εκπομπών $NO_x$. Λόγω αυτής της χρηματοδότησης υπάρχουν πλέον πάνω από 50 πλοία στην Νορβηγία που λειτουργούν με LNG, το οποίο συνολικά φτάνει τους 0.2 – 0.3 mtpa. Ο ανεφοδιασμός αυτών των πλοίων αποτελεί βασικό λόγο για την ανάπτυξη της αγοράς SSLNG στην Νορβηγία.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της αγοράς SSLNG στην Νορβηγία είναι η εγκατάσταση υγροποίησης στην περιοχή Risavika, η οποία κατασκευάστηκε το 2010 από την εταιρεία Skangas. Έχει χωρητικότητα 0.3 mtpa ενώ επίσης λειτουργεί και ως τερματικό ανεφοδιασμού πλοίων που λειτουργούν με LNG (Mering et al., 2015).

Η Φινλανδία αποτελεί μια ενδιαφέρουσα περίπτωση χώρας που δεν έχει αναπτυχθεί ανάλογα (τουλάχιστον μέχρι στιγμής) η αγορά SSLNG παρά τη ραγδαία ανάπτυξη της αγοράς φυσικού αερίου. Χαρακτηριστικά, το πρώτο τερματικό εισαγωγής κατασκευάστηκε το 2016, ενώ το δεύτερο, το οποίο ξεκίνησε να λειτουργεί το 2018, είναι το μεγαλύτερο της Σκανδιναβίας. Ωστόσο, η αύξηση της φορολογίας στο φυσικό αέριο έχει οδηγήσει στην πιο περιορισμένη χρήση του, ειδικά στις μικρότερες πόλεις στο εσωτερικό της Φινλανδίας. Εδώ παρατηρείται και η εξάρτηση της ανάπτυξης της αγοράς SSLNG από την αγορά LNG και από τη σχέση της τιμής του φυσικού αερίου με άλλους τύπους καυσίμων. Η μεγαλύτερη χρήση σε αστική περιοχή παρατηρείται στο Ελσίνκι, όπου χρησιμοποιείται σε περίπου 20.000 σπίτια και καταστήματα. Εκτός από το Ελσίνκι, το φυσικό αέριο δεν χρησιμοποιείται για θέρμανση σε κανένα σχεδόν σημείο της Φινλανδίας.

Τέλος, αξίζει να γίνει αναφορά στην Ισπανία και στην συμβολή της στην ανάπτυξη της αγοράς small scale LNG στην Ευρώπη. Το σύστημα φυσικού αερίου στην Ισπανία έχει συμβάλλει αισθητά στην ανάπτυξη της δραστηριότητας της αγοράς SSLNG και στην ανανέωση των κανονισμών και λογιστικών ζητημάτων σχετικών με αυτή την αγορά. Συγκεκριμένα, η Ισπανία προωθεί ενέργειες SSLNG από το 1970 με ιδιαίτερη έμφαση στα φορτηγά μεταφοράς φυσικού αερίου. Αυτό την έχει φέρει σε θέση να είναι πλέον η πρώτη χώρα παγκοσμίως σε φορτηγά LNG με πάνω από 40.000 τέτοια φορτηγά να λειτουργούν αυτή τη στιγμή. Έτσι, το χερσαίο σύστημα φυσικού αερίου της Ισπανίας εφοδιάζει με φυσικό αέριο την Γαλλία, την Πορτογαλία, την Ελβετία και την Ιταλία (Mering et al., 2015).

Το πιο γνωστό και παλαιότερο τερματικό βρίσκεται στην Βαρκελώνη. Η λειτουργία του ξεκίνησε το 1973 και αρχικά φόρτωνε φορτηγά για διανομή φυσικού αερίου εντός της Ισπανίας. Πλέον αποτελεί σημαντική πηγή διανομής φυσικού αερίου για μικρότερα τερματικά στη Μεσόγειο. Όμοια με το τερματικό της Zeebrugge, αποτελεί κεντρικό τερματικό λόγω τόσο του μεγέθους του όσο και λόγω της ευνοϊκής του θέσης στη Μεσόγειο.

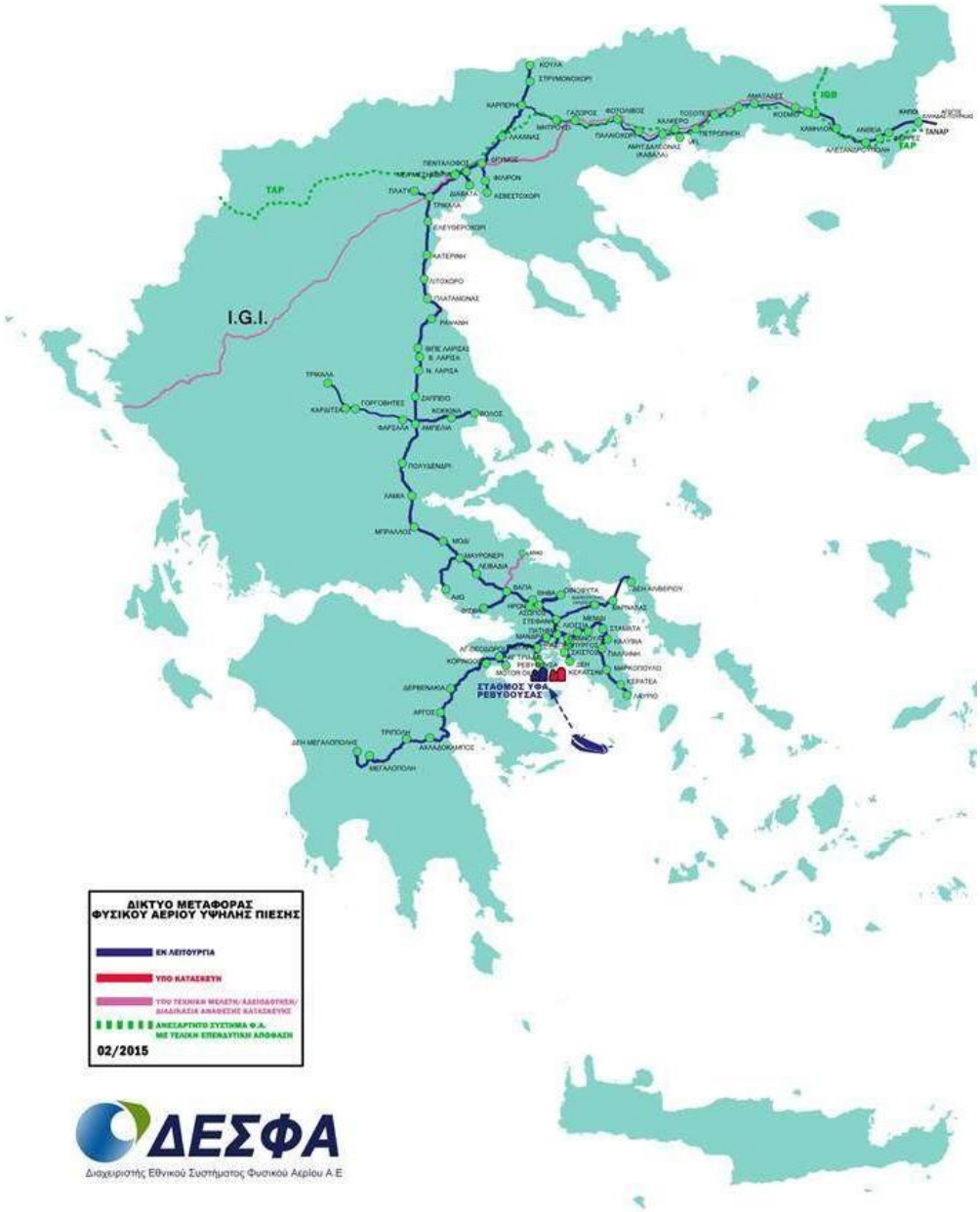
Αξίζει να αναφερθεί πως και άλλες χώρες της Μεσογείου έχουν διεισδύσει στην αγορά SSLNG, με κυριότερη την Ιταλία. Ωστόσο, η συμβολή τους σε αυτή την αγορά είναι ακόμα μικρή σχετικά με αυτή της Ισπανίας.

## 2.3 Small scale LNG στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει ένα τερματικό LNG, το οποίο βρίσκεται στο νησί της Ρεβυθούσας. Αυτή τη στιγμή διαθέτει τρεις δεξαμενές αποθήκευσης που έχουν συνολική χωρητικότητα 225.000 $m^3$, μετά από την τελευταία επέκταση, η οποία ολοκληρώθηκε στις 20 Νοεμβρίου του 2018. Σύμφωνα με μελέτη του ΔΕΣΦΑ, η Ρεβυθούσα θα μπορεί να καλύψει το 1/3 των εισαγωγών των χωρών της Βαλκανικής (συμπεριλαμβανομένης και της Ουγγαρίας και της Σλοβενίας), αφού πια με την τρίτη δεξαμενή, η διαθέσιμη δυναμικότητα για διαμετακόμιση αεριοποιημένου LNG θα φτάνει τα 5 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως.

*Σχήμα 8: Το τερματικό της Ρεβυθούσας*

Το τερματικό της Ρεβυθούσας κατασκευάστηκε το 1996 και είναι από τις σημαντικότερες υποδομές της χώρας, καθώς είναι ο μοναδικός τρόπος τροφοδοσίας της με φυσικό αέριο. Παρακάτω φαίνεται το εθνικό δίκτυο διανομής φυσικού αερίου.




*Σχήμα 9: Δίκτυο διανομής φυσικού αερίου στην Ελλάδα (Πηγή: ΔΕΣΦΑ)*

Η Ελλάδα δεν διαθέτει σύστημα SSLNG και έτσι δεν είναι δυνατή η διανομή φυσικού αερίου σε αρκετές περιοχές. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η Δυτική Ελλάδα δεν έχει πρόσβαση στο φυσικό αέριο. Η ευρύτερη αυτή περιοχή περιλαμβάνει αρκετές πυκνοκατοικημένες περιοχές και βιομηχανίες. Επιπλέον, υπάρχουν 53 νησιά με πληθυσμό πάνω από 1000 κατοίκους το κάθε ένα, τα οποία επίσης δεν έχουν πρόσβαση στο φυσικό αέριο.

Αυτό θα αλλάξει στο τέλος της χρονιάς, καθώς το πρόγραμμα Poseidon Med II, το οποίο ξεκίνησε το 2015 θα ολοκληρωθεί μέχρι τον Δεκέμβριο του 2020 (*Poseidon Med II, Naftemporiki.Gr,* n.d.). Το πρόγραμμα αυτό έχει προϋπολογισμό €53,3 εκατ. και χρηματοδοτείται κατά 50% από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Στόχος του προγράμματος είναι η δημιουργία μίας εφοδιαστικής αλυσίδας φυσικού αερίου σε περιοχές της Μεσογείου που προηγουμένως δεν είχαν πρόσβαση σε αυτό. Στο πρόγραμμα συμμετέχουν 26 εταιρείες από τρεις χώρες - μέλη της Ε.Ε. (Ελλάδα, Κύπρος, Ιταλία). Άλλοι στόχοι αφορούν την υιοθέτηση του LNG ως καύσιμο θαλάσσιων μεταφορών στην Ανατολική Μεσόγειο και την ανάδειξη της Ελλάδας ως βασικό κόμβο για τον ανεφοδιασμό πλοίων που κινούνται με LNG και για τη διανομή φυσικού αερίου στις περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου. Το πρόγραμμα αυτό αφορά έξι λιμάνια (Πειραιάς, Πάτρα, Ηράκλειο, Ηγουμενίτσα, Λεμεσός, Βενετία) και το τερματικό λιμάνι στη Ρεβυθούσα.

Στο πλαίσιο του προγράμματος, θα εγκατασταθεί μία νέα προβλήτα στο λιμάνι της Ρεβυθούσας,και συγκεκριμένα στο βορειοανατολικό τμήμα του, με σκοπό τη φόρτωση LNG σε πλοία μικρής κλίμακας. Τα μικρότερα πλοία θα εφοδιάζουν άλλα πλοία που κινούνται με LNG (πλοία μεταφοράς φορτίου, μεταφοράς εμπορευματοκιβώτιων, Ro-Pax), στο λιμάνι του Πειραιά κυρίως και ενδεχομένως σε άλλους λιμένες. Τα μεγαλύτερα πλοία θα προμηθεύουν δορυφορικές αποθήκες ΥΦΑ και σταθμούς διανομής σε άλλους λιμένες της Ελλάδας (όπως στην Πάτρα, όπως προβλέπεται στο πρόγραμμα Poseidon Med II), καθώς και νησιά μέσω εικονικών αγωγών (Πηγή: www.poseidonmedii.eu/).

Άλλη μία επένδυση που αφορά την Ελλάδα και συγκεκριμένα τα μεγαλύτερα νησιά είναι αυτή της Δημόσιας Επιχείρησης Αερίου (ΔΕΠΑ), η οποία το έχει εξασφαλίσει την επιχορήγηση της INEA (Φορέα Διαχείρισης Χρηματοδοτούμενων Έργων της Ε.Ε.) για το πρόγραμμα BlueHUBS, στο οποίο περιλαμβάνεται η συνχρηματοδότηση από την Ε.Ε. πλοίου LNG bunkering, που προτίθεται να κατασκευάσει η ΔΕΠΑ. Το πλοίο αυτό, χωρητικότητας 3.000 κυβικών μέτρων LNG περίπου, θα είναι το πρώτο πλοίο αυτού του είδους στην Ελλάδα και στην Ανατολική Μεσόγειο και θα μπορεί να ικανοποιήσει ανάγκες τροφοδοσίας πλοίων με LNG στο λιμάνι του Πειραιά, ενώ παράλληλα θα είναι σε θέση να μεταφέρει LNG και σε άλλα μεγάλα λιμάνια της χώρας, υποστηρίζοντας στην πράξη τη μετάβαση της Ελληνικής ναυτιλίας στη νέα εποχή υιοθέτησης νέων, περιβαλλοντικά φιλικών καυσίμων. Το πρόγραμμα, συνολικού προϋπολογισμού περίπου 66 εκατ. €, συγχρηματοδοτείται από την Ε.Ε. σε ποσοστό 30% και θα υλοποιηθεί την περίοδο 2019-2022.

## 2.4 Οι ενδιαφερόμενοι στην αγορά small scale LNG

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται αναλυτικότερα η αγορά small scale LNG και συγκεκριμένα οι ενδιαφερόμενοι, ο ρόλος τους στην εφοδιαστική αλυσίδα, οι συνηθέστεροι τύποι συμβολαίων που συναντώνται και τα βασικότερα επιχειρηματικά μοντέλα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1, η διανομή του φορτίου σε αυτή την αγορά μπορεί να γίνει με αρκετούς τρόπους.

Ένας τρόπος, ο οποίος φαίνεται και στο σχήμα, είναι να ξεκινήσει η διανομή από ένα τερματικό υγροποίησης μεγάλης κλίμακας. Από εκεί μπορεί να γίνει φόρτωση υγροποιημένου φυσικού αερίου σε συμβατικά πλοία LNGc, σε small scale LNGc και σε φορτηγά ή άλλα χερσαία μεταφορικά μέσα με τελικούς αποδέκτες είτε χρήστες του LNG είτε διανομείς. Στην περίπτωση που το LNG φορτώνεται σε μεγάλο – συμβατικό πλοίο, τότε μπορεί στη συνέχεια να μεταφερθεί σε ένα μεγάλο ή μικρό τερματικό εισαγωγής, στο οποίο γίνεται break bulk διαμερισμός του φορτίου (περισσότερα για το ζήτημα του break bulk αναφέρονται στο κεφάλαιο 4). Στη συνέχεια, το LNG φορτώνεται είτε σε μικρότερα πλοία είτε σε χερσαία μέσα μεταφοράς με τελικούς αποδέκτες πάλι χρήστες του LNG ή διανομείς.

Η αγορά small scale LNG είναι σχετικά καινούρια και έτσι υπάρχουν περισσότεροι ενδιαφερόμενοι, οι οποίοι παίζουν ρόλο σε αυτή, πέρα από αυτούς της συμβατικής αγοράς. Εκτός από τους εμπορικούς και λογιστικούς φορείς, οι κυβερνήσεις και οι ρυθμιστικοί φορείς διαδραματίζουν επίσης βασικό ρόλο στην εφοδιαστική αλυσίδα και επηρεάζουν το συνολικό κόστος.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιθανοί ρόλοι των ενδιαφερόμενων. Κάποιοι από αυτούς μπορούν να έχουν περισσότερους από ένα ρόλο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Οι προμηθευτές φυσικού αερίου και οι παραγωγοί LNG έχουν τους εξής ρόλους:

- Οι προμηθευτές φυσικού αερίου είτε έχουν και διαχειρίζονται το φυσικό αέριο είτε το πουλούν σε παραγωγούς LNG.
- Οι παραγωγοί LNG διαχειρίζονται τα τερματικά με σκοπό να υγροποιήσουν το φυσικό αέριο.
- Οι προμηθευτές LNG το διαθέτουν στην αγορά – στους παραλήπτες.

Για παράδειγμα, η εταιρεία Skangass στην Νορβηγία έχει στην κατοχή της το φυσικό αέριο όταν το παραλαμβάνει από προμηθευτές και έχει συμφωνία με την εταιρεία Lyse. Η συγκεκριμένη εταιρεία είναι ιδιοκτήτρια του τερματικού Risavika, το οποίο διατίθεται για υγροποίηση και επομένως παραγωγή LNG στην Skangass. Στη συνέχεια, η Skangass διαθέτει το LNG στην αγορά (Mering et al., 2015).

Οι ιδιοκτήτες πλοίων, οι διαχειριστές πλοίων και οι brokers έχουν τους εξής ρόλους:

- Οι ιδιοκτήτες πλοίων έχουν στην κατοχή τους τα LNGc.
- Οι διαχειριστές πλοίων διαχειρίζονται τα LNGc και έχουν αντίστοιχη συμφωνία με τους ιδιοκτήτες πλοίων.

- Οι ναυλωτές ενοικιάζουν τα πλοία από τους ιδιοκτήτες για μια συγκεκριμένη τιμή
- Οι brokers λειτουργούν ως διαμεσολαβητές μεταξύ των ιδιοκτητών και των ναυλωτών, οι οποίοι χρησιμοποιούν τα πλοία για να μεταφέρουν φορτίο.

Οι ιδιοκτήτες τερματικών, οι διαχειριστές τερματικών και οι κάτοχοι χωρητικότητας έχουν τους εξής ρόλους:

- Οι ιδιοκτήτες τερματικών έχουν στην κατοχή τους τα τερματικά και έχουν συμβόλαιο με τους διαχειριστές τερματικών.
- Οι διαχειριστές τερματικών λειτουργούν τα τερματικά και αντίστοιχα έχουν συμβόλαιο με τους ιδιοκτήτες.
- Οι κάτοχοι χωρητικότητας διαθέτουν συγκεκριμένη χωρητικότητα του τερματικού και χρησιμοποιούν το τερματικό για διαχείρηση του φορτίου τους.

Οι παραλήπτες LNG (για επαναεριοποίηση ή / και τελικοί χρήστες) έχουν τους εξής ρόλους:

- Οι παραλήπτες μπορεί να είναι οι τελικοί χρήστες και καταναλωτές του φυσικού αερίου.
- Οι παραλήπτες μπορεί επίσης να είναι διανομείς, οι οποίοι παραλαμβάνουν μια σχετικά μεγαλύτερη ποσότητα φυσικού αερίου και τη διαθέτουν σε καταναλωτές μικρότερης ποσότητας.

Όπως αναφέρθηκε, πολύ συχνά κάποιος ενδιαφερόμενος μπορεί να έχει περισσότερους από ένα ρόλο στην αγορά small scale LNG. Οι μεγάλοι παραγωγοί LNG ιδιαίτερα μπορεί να έχουν πολλούς ρόλους στην εφοδιαστική αλυσίδα. Οι διεθνείς εταιρείες πετρελαίου, για παράδειγμα, παρέχουν το φυσικό αέριομ παράγουν LNG στις δικές τους εγκαταστάσεις, διαθέτουν το LNG στους αντίστοιχους παραλήπτες, διαμοιράζουν μεγάλες ποσότητες LNG σε μικρότερες και τελικά το πουλούν σε μεγάλους χρήστες, όπως βιομηχανίες ή σε μικρότερους χρήστες. Οι έμποροι LNG μπορεί επίσης να έχουν αρκετές θέσεις στην εφοδιαστική αλυσίδα, ως προμηθευτές LNG, το οποίο διαθέτουν στους τελικούς χρήστες. Συμπληρωματικά, μπορεί να διαθέτουν χωρητικότητα σε μεγάλα ή μικρά τερματικά ή να παίζουν το ρόλο του ναυλωτή πλοίων LNGc. Οι έμποροι, ωστόσο, συνήθως δεν διαθέτουν οι ίδιοι τα περιουσιακά στοιχεία (π.χ. πλοία και τερματικά) που μπορεί να διαθέτουν οι μεγάλοι παραγωγοί.

Ακόμα μία κατηγορία ενδιαφερόμενων αποτελούν οι κυβερνητικοί και οι ρυθμιστικοί φορείς των χωρών. Αυτοί οι ενδιαφερόμενοι επηρεάζουν ολόκληρη την εφοδιαστική αλυσίδα του small scale LNG. Οι κανονισμοί στις αγορές φυσικού αερίου και στα τοπικά τερματικά που παραλαμβάνουν LNG παίζουν καθοριστικό ρόλο στην συνολική αγορά. Οι ρυθμιστικοί φορείς εξασφαλίζουν την ασφαλή παροχή LNG μιας χώρας και καθορίζουν την προσβασιμότητα και το κόστος παροχής LNG στη συγκεκριμένη χώρα. Σε πολλές χώρες οι αγορές φυσικού αερίου και γενικότερα η αγορά ενέργειας υπόκειται σε κανονισμούς, οι οποίοι περιορίζουν τα κέρδη των εγκαταστάσεων LNG.

Σε συνέχεια των παραπάνω, εξετάζονται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να υπάρξει κέρδος στην εφοδιαστική αλυσίδα small scale LNG. Αυτό γίνεται συνήθως με δύο τρόπους: με την κατοχή περιουσιακών στοιχείων ή με την ανταλλαγή του εμπορεύματος.

Ένας ιδιοκτήτης περιουσιακών στοιχείων (π.χ. τερματικά ή πλοία) μπορεί να τα χρησιμοποιήσει για δικό του όφελος αν του ανήκει και το εμπόρευμα. Υπάρχουν και οι περιπτώσεις στις οποίες περισσότεροι από ένας ενδιαφερόμενος έχουν ιδιοκτησία μιας εγκατάστασης. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρειάζεται να υπάρξει μία συμφωνία μεταξύ των ιδιοκτητών. Τέτοιες εταιρείες πολύ συχνά εφαρμόζουν ένα επιχειρηματικό μοντέλο που καλείται εμπορικό μοντέλο (merchant model). Το φυσικό αέριο σε αυτή την περίπτωση αγοράζεται από άλλους προμηθευτές. Για παράδειγμα, στην Νορβηγία, η εταιρεία Gasnor αγοράζει φυσικό αέριο για το τερματικό υγροποίησής της από άλλες αγορές – προμηθευτές (Mering et al., 2015).

Εναλλακτικά, ένας ιδιοκτήτης περιουσιακών στοιχείων, μπορεί να τα δώσει για χρήση σε τρίτους. Αυτό γίνεται τόσο με πλοία όσο και με τερματικά. Ένα παράδειγμα μπορεί να είναι ένας ιδιοκτήτης και διαχειρηστής πλοίων, ο οποίος διαχειρίζεται τα πλοία εκ μέρους του ναυλωτή. Άλλο ένα παράδειγμα αφορά την παραγωγή LNG, καθώς σε αυτό το κομμάτι της εφοδιαστικής αλυσίδας, ένας ιδιοκτήτης τερματικού υγροποίησης μπορεί να παρέχει το τερματικό του σε πελάτες, οι οποίοι να διαθέτουν το φυσικό αέριο και να θέλουν να το υγροποιήσουν.

Σε ότι αφορά τα συμβόλαια στην αγορά SSLNG, σχεδόν όλα τα πλοία είναι δεσμευμένα από μακροπρόθεσμα συμβόλαια (long term time charter contracts), δεν είναι ανεπτυγμένη η spot αγορά και έτσι δεν υπάρχει μεγάλη ευελιξία σε αυτό το κομμάτι (Bergen Energy, 2011).

Σε γενικές γραμμές, οι συμφωνίες – τα συμβόλαια για αγορά φυσικού αερίου μεταξύ του αγοραστή και του πωλητή, τόσο στην αγορά LNG όσο και στην αγορά small scale LNG, έχουν τις εξής μορφές (Πηγή: http://www.natgas.info/):

- Free – on board (FOB), στην οποία ο αγοραστής είναι υπεύθυνος για το φορτίο LNG κατά την φόρτωση στο τερματικό υγροποίησης. Ο αγοραστής χρησιμοποιεί είτε τα δικά του πλοία είναι ναυλώνει πλοία για τη μετακίνηση του LNG. Σε αυτή την περίπτωση, τα μεταφορικά έξοδα δεν περιλαμβάνονται στην τιμή του συμβολαίου.
- Cost, Insurance, and Freight (CIF), στην οποία ο αγοραστής αποκτά ιδιοκτησία του φορτίου LNG σε κάποιο σημείο του ταξιδιού, μεταξύ του τερματικού στο οποίο φορτώνεται στο LNG και του τερματικού στο οποίο καταλήγει. Ο πωλητής είναι υπεύθυνος για την μεταφορά του φορτίου. Τα έξοδα της ασφάλειας και της μεταφοράς συμπεριλαμβάνονται στην τιμή του συμβολαίου.
- Delivered Ex – Ship (DES), όπου ο αγοραστής αποκτά ιδιοκτησία του φορτίου μετά από τη μεταφορά του στο τερματικό εισαγωγής. Ο πωλητής είναι και σε αυτή την περίπωση υπεύθυνος για την μεταφορά του φορτίου. Τα έξοδα της ασφάλειας και της μεταφοράς συμπεριλαμβάνονται και εδώ στην τιμή του συμβολαίου.

Όπως αναφέρθηκε, στην αγορά small scale LNG εμφανίζονται σχεδόν αποκλειστικά συμβόλαια μεγάλης διάρκειας. Σε αυτά τα συμβόλαια ο ναυλωτής αναλαμβάνει το κόστος των κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX) και των λειτουργικών δαπανών (OPEX). Συγκεκριμένα, αυτά τα κόστη περιλαμβάνουν το κόστος ταξιδιού, τα μεσιτικά τέλη, τα λιμενικά τέλη, τα τέλη των καναλιών (αν υπάρχουν) και πιθανές πληρωμές για brokers και για ανεφοδιασμό. Επαναλαμβάνεται ότι τα συμβόλαια μικρότερης διάρκειας και η spot

αγορά δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην αγορά small scale LNG, αφού έχουν αναπτυχθεί ελάχιστα παρά τη γενικότερη ραγδαία ανάπτυξη της αγοράς.

Τα επιχειρηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην αγορά small scale LNG προέρχονται από τη συμβατική αγορά LNG και εφαρμόζονται σε σενάρια που αναλύονται παρακάτω:

Αρχικά, αναφέρεται ότι εφαρμόζονται στην παραγωγή small scale LNG. Οι λόγοι για παραγωγή LNG σε μικρά τερματικά υγροποίησης είναι οι εξής:

- Εξοικονόμιση ενέργειας
- Παροχή φυσικού αερίου σε απομακρυσμένες περιοχές
- Χρήση LNG ως καύσιμο μεταφοράς

Οι παραπάνω λόγοι αναλύθηκαν περισσότερο παραπάνω (ενότητα 2.1). Τα επιχειρηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι τα παρακάτω:

- Ολοκληρωμένα μοντέλα, στα οποία η επιχείρηση που παρέχει το φυσικό αέριο κατέχει και τις απαραίτητες εγκαταστάσεις για παραγωγή και το διαθέτει στον τελικό του προορισμό. Αν υπάρχουν περισσότεροι ενδιαφερόμενοι στις εγκαταστάσεις, τότε πρέπει να υπάρξουν και οι αντίστοιχες συμφωνίες.
- Εμπορικά μοντέλα, στα οποία το φυσικό αέριο παρέχεται από τρίτους και στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την παραπάνω.

Το LNG ως καύσιμο μεταφοράς αναφέρεται και παραπάνω ως λόγος ανάπτυξης της παραγωγής στην αγορά small scale LNG. Το LNG θεωρείται πιο οικολογικό από τις παραδοσιακές μορφές καυσίμων. Χρησιμοποιείται σε χερσαίες μεταφορές, σε φορτηγά και σε πλοία. Το LNG στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πιο ακριβό καύσιμο όταν συγκρίνεται με το πετρέλαιο, το diesel, το MGO και το CNG. Η κατασκευή εγκαταστάσεων υγροποίησης με σκοπό την παροχή LNG ως καύσιμο μεταφοράς είναι κάτι το οποίο γίνεται τα τελευταία χρόνια και αυτή η αγορά αναπτύσσεται ραγδαία στην Κίνα, στις ΗΠΑ αλλά και γενικότερα στον κόσμο. Ιδιαίτερα στην Κίνα έχει δημιουργηθεί εθνικό δίκτυο υγροποίησης φυσικού αερίου, με σκοπό τη χρήση του σε φορτηγά και χερσαίες μεταφορές, ώστε να μειωθούν οι ρύποι. Σε άλλες περιπτώσεις, το LNG χρησιμοποιείται κυρίως στις θαλάσσιες μεταφορές. Αυτό έχει οδηγήσει σε αυξημένη ζήτηση στην αγορά SSLNG σε χώρες της Βαλτικής και της Σκανδιναβικής. Ο λόγος είναι κυρίως το γεγονός ότι αυτές οι περιοχές έχουν χαρακτηριστεί Emissions Control Areas (ECAs) και υπάρχει η ανάγκη για μείωση των ρύπων από τις θαλάσσιες μεταφορές.

*Σχήμα 10: Περιοχές ελέγχου εκπομπών αερίων Emissions Control Areas (ECAs) (Πηγή: Global)*

Σε ορισμένες περιοχές είναι προτιμότερο οικονομικά να αναπτυχθούν τοπικές εγκαταστάσεις SSLNG για να παρέχουν LNG σε απομακρυσμένες περιοχές συγκριτικά με άλλες εναλλακτικές, όπως το να αναπτυχθεί δίκτυο αγωγών ή να υπάρχει παροχή από μεγαλύτερο δίκτυο LNG. Αυτά τα τερματικά συνήθως αναφέρονται ως τερματικά – δορυφόροι (satellite plants). Αυτά τα τερματικά χρησιμοποιούν συνήθως φορτηγά, LNG iso – containers ή μικρά LNGc για να προσεγγίσουν μικρότερους καταναλωτές φυσικού αερίου. Η πηγή του φυσικού αερίου μπορεί να είναι ένα συμβατικό τερματικό ή ένα μικρό τερματικό αεριοποίησης ή ένα μικρό τερματικό υγροποίησης.

# 3 Χαρακτηριστικά στοιχείων της αγοράς small scale LNG

Η τεχνολογία της αγοράς SSLNG παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς το μικρό μέγεθος των επιμέρους στοιχείων της επιτρέπει ταχύτερη εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Επιπλέον, το μικρότερο κόστος δίνει τη δυνατότητα στους ενδιαφερόμενους να επενδύουν με μεγαλύτερη ευκολία σε καινοτόμες ιδέες. Για παράδειγμα, τα περισσότερα τερματικά υγροποίησης φυσικού αερίου (περίπου το 80%) χρησιμοποιούν την τεχνολογία υγροποίησης C3MR, ενώ τα τερματικά SSLNG χρησιμοποιούν ένα ευρύτερο φάσμα τεχνολογιών (Mering et al., 2015). Αντίστοιχα, διαφορές παρατηρούνται και στα τερματικά εισαγωγής φυσικού αερίου και στα μικρότερα πλοία LNGc. Ωστόσο, συγκεκριμένα σε ότι αφορά τα τερματικά, για να παραμείνουν ανταγωνιστικά εφαρμόζουν πιο συγκεκριμένες τεχνολογίες και

χρησιμοποιούν πιο τυποποιημένα συστήματα αντί να υπάρχει βελτιστοποίηση και έρευνα για πιο αποτελεσματικά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφόρων στοιχείων της αγοράς SSLNG καθώς και οι διαφορές τους με τα αντίστοιχα της συμβατικής αγοράς LNG.

## 3.1 Πλοία SSLNGc

Τα πλοία LNGc κατασκευάζονται με βάση τους ίδιους κανονισμούς του IMO IGC Code και του Classification Society, ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Όπως και στα μεγάλα LNGc, έτσι και στα μικρότερα, το φυσικό αέριο που εξατμίζεται (boil - off gas) χρησιμοποιείται ως καύσιμο για πρόωση, ηλεκτρισμό και γενικά για διάφορες χρήσεις πάνω στο πλοίο. Επομένως, τα βασικά χαρακτηριστικά σχεδίασης δεν διαφέρουν από τα μικρά στα μεγαλύτερα LNGc, ενώ το ίδιο ισχύει και στους κανονισμούς ασφαλείας. Τα χαρακτηριστικά των πλοίων και οι διαφορές τους με τα μεγαλύτερα παρουσιάζονται παρακάτω:

Η βασικότερη διαφορά των πλοίων SSLNG σε σχέση με τα συμβατικά πλοία LNG παρατηρείται στη χρήση τους και, όπως έχει αναφερθεί, στη χωρητικότητά τους. Σύμφωνα με τον ορισμό που έχει αναφερθεί, η μέγιστη χωρητικότητα των πλοίων SSLNG είναι 60.000 $m^3$. Ωστόσο, παρατηρώντας τον παγκόσμιο στόλο SSLNG, τα περισσότερα πλοία έχουν χωρητικότητα από 10.000 $m^3$ έως 40.000 $m^3$. Το μικρότερο πλοίο αυτή τη στιγμή έχει χωρητικότητα 167 $m^3$ και χρησιμοποιείται ως πλοίο ανεφοδιασμού στο λιμάνι Stavanger της Νορβηγίας. Τα πλοία SSLNG χρησιμοποιούνται για μεταφορές φυσικού αερίου (συνήθως σε μικρότερες αποστάσεις) και για ανεφοδιασμό άλλων πλοίων. Οι μεταφορές μπορεί να είναι παράκτιες σε εθνικό ή τοπικό επίπεδο αλλά ορισμένες φορές γίνονται και ηπειρωτικά ταξίδια. Ο ανεφοδιασμός των πλοίων γίνεται συνήθως στο λιμάνι. Συγκεκριμένα, τα πλοία αυτά χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν LNG από ένα πλοίο σε ένα άλλο με σκοπό να χρησιμοποιηθεί συνήθως ως καύσιμο στο μεγαλύτερο πλοίο. Λόγω αύξησης της ζήτησης στη συγκεκριμένη αγορά αλλά και της ζήτησης του LNG ως καύσιμο, έχει αυξηθεί ραγδαία και η παραγωγή αυτών των πλοίων (bunker vessels).

Αξίζει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλοίων SSLNGc. Όπως αναφέρθηκε, όλα τα πλοία LNGc, ανεξεραίτως μεγέθους, πρέπει να υπακούν στους ίδιους κανονισμούς. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, οποιοδήποτε πλοίο μεταφέρει υγροποιημένα αέρια με πίεση που υπερβαίνει τα 2,8 bar και θερμοκρασία πάνω από 37,8 βαθμούς κελισίου, υπόκειται στους ίδιους κανονισμούς. Επιπλέον, από άποψη εφαρμοσμένων μεθόδων, οι κανονισμοί ασφαλείας δεν διαφέρουν από τα συμβατικά LNGc στα SSLNGc.

Ο διαχωρισμός μεταξύ των διαστάσεων των manifolds γίνεται ανάλογα με τη χωρητικότητα των πλοίων. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τους κανονισμούς, οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

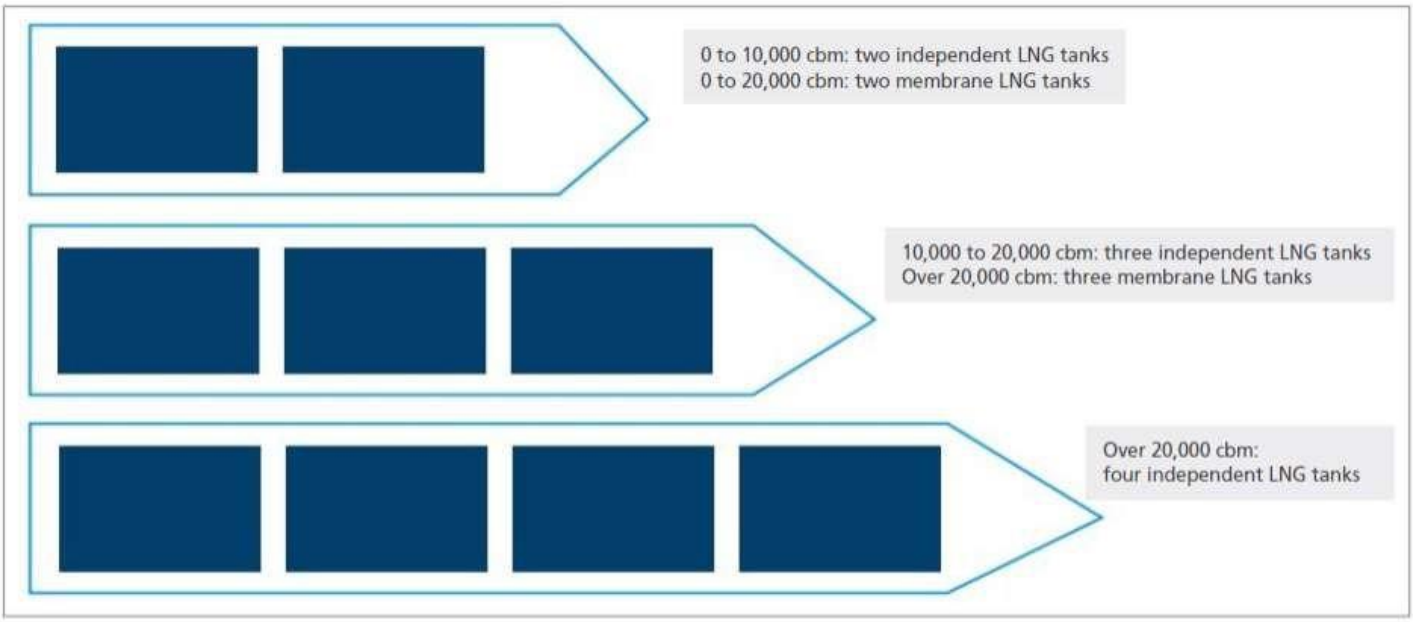
- Κατηγορία A: Μέχρι 60, 000 $m^3$
- Κατηγορία B: 60,001$m^3$ – 200,000 $m^3$
- Κατηγορία C: Περισσότερο από 200,001 $m^3$

Επομένως, τα πλοία SSLNGc μέχρι και μεσαίου μεγέθους LNGc έχουν manifolds διαφορετικών διαστάσεων από τα μεγαλύτερα πλοία.

*Πίνακας 1: Κατηγορίες manifolds (Πηγή: IGU)*

| LNG | | Diameter (in inches) | | Horizontal (in meters) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Liquid | Vapour | Horizontal Minimum | Horizontal Maximum |
| | A | 12 | 8 / 12 | 2.5 | 3.0 |
| | B | 16 | 12 / 16 | 3.0 | 3.5 |
| | C | 16 / 20 | 12 / 16 | 3.5 | 4.0 |

Σε ότι αφορά τις δεξαμενές, συνήθως τα LNGc με χωρητικότητα μέχρι 10.000 $m^3$ διαθέτουν δύο δεξαμενές στις οποίες αποθηκεύεται το φυσικό αέριο. Διατάξεις με τρεις δεξαμενές παρουσιάζονται σε μεγαλύτερα πλοία (συνήθως χωρητικότητας μέχρι 20.000 $m^3$), ενώ τέσσερεις δεξαμενές παρατηρούνται σε ακόμα μεγαλύτερα πλοία. Πλέον, για οικονομικούς λόγους, δύσκολα γίνεται η μετάβαση από τα πλοία με τρεις δεξαμενές σε τέσσερεις. Για αυτό τον λόγο, αν γίνει στο μέλλον δυνατή η διάταξη με τρεις δεξαμενές σε μεγαλύτερα πλοία (χωρητικότητας μεταξύ 30.000 και 40.000 $m^3$), τότε αυτά τα πλοία θα γίνουν πιο ανταγωνιστικά στην αγορά SSLNG. Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά οι πιθανές διατάξεις που αναφέρθηκαν (Lloyd's, 2015).




*Σχήμα 11: Πιθανές διατάξεις δεξαμενών σε μικρά LNGc (Πηγή: Lloyd's Register Marine)*

Μια ακόμα διαφορά των συμβατικών LNGc και των μικρότερων LNGc αφορά την επιτρεπόμενη πίεση στο πλοίο και κατά συνέπεια την επιλογή των δεξαμενών στο πλοίο. Τα μεγάλα πλοία χρησιμοποιούν τις εξής δεξαμενές (Lloyd's, 2015):

- IMO type A (max 0,7 barg)
- IMO type B (MOSS, max 0,7 barg)
- membrane (max 0,7 barg όμως στα περισσότερα LNGc μέχρι 0,25 barg)

Ο σχεδιασμός των μικρότερων πλοίων συνήθως δείχνει μία προτίμηση στις δεξαμενές IMO type C. Ειδικότερα, σε πλοία χωρητικότητας μέχρι 40.000 $m^3$, οι δεξαμενές τέτοιου τύπου δίνουν περισσότερες δυνατότητες στον σχεδιασμό του πλοίου. Άλλο ένα πλεονέκτημα των type C δεξαμενών είναι το γεγονός ότι δεν απαιτούν εγκατάσταση συστήματος διαχείρισης του boil - off gas, καθώς αυτό περιορίζεται στη δεξαμενή, αυξάνοντας την πίεση και την θερμοκρασία, μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη πίεση. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα αυτών των δεξαμενών είναι το αυξημένο βάρος τους σε σχέση με τις υπόλοιπες δεξαμενές που αναφέρονται παραπάνω. Άλλα μειονεκτήματα σε σχέση με τις ατμοσφαιρικές δεξαμενές είναι η ογκομετρική απόδοση και το περιορισμένο μέγεθος της δεξαμενής. Παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά του LNG σε συμπιεσμένες και σε ατμοσφαιρικές συνθήκες:

- Συμπιεσμένη αποθήκευση: Περιορισμός του boil – off gas, θερμοκρασία LNG -126˚C, πυκνότητα 363 kg/$m^3$
- Ατμοσφαιρική αποθήκευση: Απελευθέρωση του boil – off gas, θερμοκρασία LNG -162˚C, πυκνότητα 423 kg/$m^3$

*Σχήμα 12: IMO Type C Tank*

Άλλος ένας τύπος δεξαμενών που έχει εμφανιστεί στα μικρότερα LNGc είναι οι δεξαμενές μεμβράνης. Η μεγάλη εμπειρία που έχουν αποκτήσει πλέον οι σχεδιαστές με αυτόν τον τύπο δεξαμενής έχει οδηγήσει σε εκτενέστερη χρήση τους, καθώς χρησιμοποιούνται πολύ συχνά και στα συμβατικά LNGc. Σε σχέση με τις type C δεξαμενές αξιοποιούν καλύτερα τον χώρο του φορτίου και έτσι απαιτούνται λιγότερες δεξαμενές για τη μεταφορά του ίδιου φορτίου. Άλλου τύπου δεξαμενές που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία των συμβατικών LNGc (type B MOSS, type B prismatic) δεν έχουν βρει ακόμα χώρο στην βιομηχανία των SSLNG.

*Σχήμα 13: Το εσωτερικό μιας δεξαμενής μεμβράνης*

Η ταχύτητα στα μικρά LNGc συνήθως κυμαίνεται από 13 μέχρι 18,5 κόμβους. Το σύστημα πρόωσης έχει αλλάξει τα τελευταία χρόνια, καθώς η διάταξη του ατμοστροβίλου πλέον είναι παρωχημένη. Στη θέση της τα πλοία διαθέτουν κινητήρες dual - fuel που λειτουργούν με συνδυασμό φυσικού αερίου και heavy fuel oil (HFO) ή marine diesel oil (MDO). Λόγω αυτών των εξελίξεων της τεχνολογίας, μεσόστροφοι κινητήρες αυτών των διατάξεων αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στα μικρά LNGc στο μέλλον.

Οι κινητήρες dual – fuel μπορούν να λειτουργήσουν τόσο με αέρια όσο και με υγρά καύσιμα. Σε 'gas mode', οι κινητήρες λειτουργούν σύμφωνα με τον κύκλο του Otto. Το LNG που εξατμίζεται (boil – off gas) μεταφέρεται στον κινητήρα για την πρόωση του πλοίου. Γίνεται κυρίως καύση αέριου καυσίμου με μικρές ποσότητες MDO ως 'πιλοτικό καύσιμο' (pilot fuel). Η κατανάλωση MDO είναι συνήθως το 1 – 8 % της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου σε αυτή την περίπτωση και βοηθάει στην ανάφλεξη του φυσικού αερίου. Σε 'diesel mode', οι κινητήρες λειτουργούν σύμφωνα με τη διαδικασία Diesel, όπου το καύσιμο τροφοδοτείται σε κυλίνδρους στο τέλος της διαδρομής συμπίεσης και κάνουν χρήση αποκλειστικά MDO. Οι κινητήρες αυτοί κατά βάση λειτουργούν με αέρια καύσιμα και λιγότερο με υγρά. Σύμφωνα με την Wartsila, η αλλαγή μεταξύ των τρόπων λειτουργίας γίνεται αμέσως, μπορεί να γίνει εν κινήσει και χωρίς μείωση ισχύος ή ταχύτητας. Οι κινητήρες αυτοί είναι σχεδιασμένοι να έχουν την ίδια απόδοση, ανεξαρτήτως μεθόδου λειτουργίας. Επομένως, η αλλαγή μεταξύ 'gas mode' και 'diesel mode' γίνεται ανάλογα με το κόστος, τη διαθεσιμότητα και τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.

Ένας τομέας στον οποίο παρατηρούνται αρκετές διαφορές μεταξύ της συμβατικής αγοράς LNG και της αγοράς small scale LNG είναι αυτός της ασφάλειας (Mering et al., 2015). Οι βασικές εξελίξεις στον τομέα της ασφάλειας των SSLNGc παρατηρούνται στα εξής:

- Χαμηλού κόστους shut down εκτάκτου ανάγκης (low cost emergency shut down - ESD) που συνδέεται μεταξύ της ξηράς και του πλοίου.
- Μικρά συστήματα απελευθέρωσης εκτάκτου ανάγκης

Δεν είναι όλα τα συστήματα ασφαλείας διαθέσιμα ή τουλαχιστον εύκολα διαθέσιμα σε small scale αγορές LNG. Μια δυσκολία που παρουσιάζεται σε αυτή την αγορά είναι η εύρεση ποιοτικού και αξιόπιστου εξοπλισμού σε σχετικά χαμηλές τιμές.

Επιπροσθέτως, ένα σημαντικό ζήτημα αποτελούν οι αποστάσεις ασφαλείας κατά τη διάρκεια των διαδικασιών φόρτωσης και εκφόρτωσης των πλοίων. Σε αυτό το θέμα παρουσιάζονται ορισμένες δυσκολίες αν αναλογιστεί κανείς την ανάγκη χρήσης αρκετών πλοίων SSLNGc για ανεφοδιασμό κατά τη διάρκεια εμπορικών δραστηριοτήτων ή σε πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Λόγω της φύσεως των δραστηριοτήτων των SSLNGc εμφανίζονται επιπλέον δυσκολίες σε ότι αφορά την ασφάλεια. Οι κυριότερες δυσκολίες που παρουσιάζονται αρκετά συχνά αφορούν τη συσχέτιση των δραστηριοτήτων μεγάλης και μικρότερης κλίμακας (ειδικά όταν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στο ύψος εξάλων, το ύψος της προβλήτας και τις ταχύτητες φόρτωσης και εκφόρτωσης). Αυτές οι δυσκολίες καθιστούν απαραίτητη την εκπαίδευση του προσωπικού και την προμήθεια των απαραίτητων εξαρτημάτων που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των SSLNGc.

Μια ακόμα σημαντική διαφορά παρουσιάζεται στην ταχύτητα μεταφοράς φυσικού αερίου από και προς το πλοίο. Συγκεκριμένα, σε μικρά πλοία η ταχύτητα κυμαίνετε από 200 $m^3$/hour για πλοίο χωρητικότητας 10.000 $m^3$ έως 2.000 $m^3$/hour για πλοίο χωρητικότητας 30.000 $m^3$. Προφανώς, σε ακόμα μεγαλύτερα πλοία η ταχύτητα φόρτωσης φυσικού αερίου είναι ακόμα μεγαλύτερη και φτάνει μέχρι και τα 4.000 $m^3$/hour. Η ταχύτητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τον ρυθμό ροής υγρού, ο οποίος συνήθως είναι 7 – 10 μέτρα/δευτερόλεπτο (Mering et al., 2015).

Όπου οι βραχίονες μεταφοράς (marine transfer arms) χρησιμοποιούνται γενικά για συμβατικούς χερσαίους τερματικούς σταθμούς (παρά το γεγονός ότι η μεταφορά μέσω σωλήνων LNG είναι επίσης αξιόπιστη επιλογή), για μεταφορά μικρών ποσοτήτων ΥΦΑ με χαμηλούς ρυθμούς ροής, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν εύκαμπτοι σωλήνες.

Είναι προφανές ότι το κόστος κατασκευής ενός μικρού πλοίου LNGc είναι μικρότερο από αυτό ενός συμβατικού. Ωστόσο, το κόστος επένδυσης ανά τόνο LNG είναι μεγαλύτερο στα μικρά πλοία. Για παράδειγμα, το κόστος επένδυσης για ένα πλοίο χωρητικότητας 215.000 $m^3$ LNG ανέρχεται στα 250 εκατομμύρια δολάρια, για ένα πλοίο χωρητικότητας 135.000 $m^3$ LNG ανέρχεται στα 170 εκατομμύρια δολάρια, ενώ για ένα πλοίο χωρητικότητας 28.000 $m^3$ LNG ανέρχεται στα 80 εκατομμύρια δολάρια. Αναλογικά, το κόστος των συμβατικών πλοίων κυμαίνεται στα 2-5 χιλιάδες δολάρια/τόνο, ενώ στα μικρότερα είναι μεταξύ 5-15 χιλιάδες δολάρια/τόνο.

Το ίδιο ισχύει και για τα λειτουργικά κόστη, τα οποία είναι μεγαλύτερα ανά τόνο LNG και ανά ναυτικό μίλι σε σχέση με τα μεγαλύτερα LNGc. Ωστόσο, σε απόλυτα μεγέθη, τα μικρότερα LNGc έχουν λιγότερο πλήρωμα, μικρότερο κινητήρα και μικρότερη ταχύτητα. Επιπλέον, τα λιμενικά τέλη και διάφορες λειτουργίες στο λιμάνι (όπως ρυμουλκά, χειρισμός στην ακτή και άλλα) έχουν μικρότερο κόστος στα SSLNGc. Το μέσο κόστος λειτουργίας ανέρχεται στα 30.000 $/ημέρα για πλοίο χωρητικότητας 15.000 $m^3$ και στα 35.000 $/ημέρα για πλοίο χωρητικότητας 20.000 $m^3$. Παρακάτω φαίνονται συγκριτικά τα μεγέθη που έχουν αναφερθεί για διάφορες χωρητικότητες.

*Πίνακας 2: Κόστη για διάφορα LNGc (Πηγή: IGU)*

| Size $m^3$ | CAPEX million $ | CAPEX thousand $ per m3 | Typical crew number | Typical harbor cost (Europe) |
|---|---|---|---|---|
| 215.000 | 250 | 6 | 30 - 35 | 100 – 200k$ per visit |
| 135.000 | 170 | 6.5 | 25 - 35 | 75 – 150k$ per visit |
| 28.000 | 80 | 15 | 15 - 20 | 25 - 40k$ per visit |

Όπως έχει αναφερθεί, τα SSLNGc χρησιμοποιούνται και για τον ανεφοδιασμό μεγαλύτερων πλοίων που κινούνται με φυσικό αέριο. Παρ'όλο που αυτή η αγορά δεν έχει την ανάπτυξη που αναμενόταν, υπάρχουν σταθερά αρκετές επενδύσεις σε αυτόν τον τομέα. Όσο αυξάνεται η ενασχόληση των μεγάλων εταιρειών με την αγορά SSLNG και το ενδιαφέρον για πλοία που κινούνται με φυσικό αέριο, τόσο θα μεγαλώνει και η ανάγκη για αυτή τη χρήση των SSLNGc. Ειδικότερα, σε λιμάνια που έχουν περιορισμούς λόγω τεχνολογίας, λειτουργικούς ή εμπορικούς περιορισμούς, ο ανεφοδιασμός από μικρά πλοία προτιμάται από τον ανεφοδιασμό από φορτηγά ή από μια προβλήτα (jetty).

Γενικά, τα πλοία που χρησιμοποιούνται για ανεφοδιασμό είναι τα μικρότερα SSLNGc. Τα περισσότερα τέτοια πλοία που είτε είναι υπό κατασκευή είτε βρίσκονται σε χρήση αυτή τη στιγμή έχουν χωρητικότητα μεταξύ 650 $m^3$ και 6.500 $m^3$. Δεν υπάρχουν τεχνικοί περιορισμοί στο μέγεθος αυτών των πλοίων. Το μέγεθός τους καθορίζεται από τη ζήτηση και από τη χωρητικότητα των πλοίων που ανεφοδιάζονται. Καθώς το μέγεθος των συμβατικών LNGc όλο και αυξάνεται υπάρχουν σχέδια για κατασκευή μικρότερων πλοίων για ανεφοδιασμό με χωρητικότητα μέχρι 13.000 $m^3$.

*Σχήμα 14: Το πλοίο Coralius ανεφοδιάζει πλοία στο λιμάνι του Ρότερνταμ*

Πολλές φορές παρουσιάζονται δυσκολίες στην τεχνολογία ανεφοδιασμού, καθώς δεν υπάρχει πάντα συμβατότητα μεταξύ του SSLNGc και του προς ανεφοδιασμό πλοίου. Έτσι, εισάγεται η τεχνολογία του "loading arm", με την οποία έρχεται η λύση σε αυτό το πρόβλημα. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα πλοία, σε FSRU και σε διάφορα τερματικά. Έτσι, ήταν εύκολο να κατασκευαστεί ένα παρόμοιο σύστημα μικρότερης κλίμακας για να καλύψει αυτή την ανάγκη της αγοράς.

*Σχήμα 15: Loading arms*

Πολλά μεγάλα πλοία πλέον χρησιμοποιούν “dual fuel engines”, δηλαδή κινητήρες που λειτουργούν με δύο είδη καυσίμου (συχνά fuel oil και LNG). Έτσι, υπάρχει η ιδέα να κατασκευαστούν πλοία που να ανεφοδιάζουν αυτά τα πλοία και με τα δύο είδη καυσίμου που απαιτούνται. Ωστόσο, αυτά τα σχέδια δεν έχουν υλοποιηθεί ακόμα.

## 3.2 Τερματικά small scale LNG

Το μέγεθος των τερματικών LNG αυξάνεται σταδιακά, ώστε να μειώνεται το κόστος επεξεργασίας του φυσικού αερίου. Έτσι, για να παραμείνουν ανταγωνιστικά τα μικρότερα τερματικά, χρησιμοποιούν απλούστερη τεχνολογία και μεθόδους επεξεργασίας. Υπάρχουν onshore και offshore τερματικά. Τα offshore τερματικά είναι κυρίως τα FSRU, δηλαδή τα πλοία που χρησιμοποιούνται για αεριοποίηση του LNG. Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχουν small scale FSRU. Επομένως, παρακάτω εξετάζονται μόνο τα onshore τερματικά.

*Small scale τερματικά υγροποίησης*

Όπως και στη συμβατική αλυσίδα LNG, έτσι και εδώ το φυσικό αέριο υγροποιείται με σκοπό να μειωθεί ο όγκος του και να διευκολυνθεί η μετακίνησή του. Τα τμήματα (blocks) μιας small scale εγκατάστασης υγροποίησης μοιάζουν αρκετά με αυτά μιας συμβατικής εγκατάστασης.

Τα στάδια υγροποίησης σύμφωνα με τον IGU περιγράφονται παρακάτω (Mering et al., 2015).

Το φυσικό αέριο αρχικά διοχετεύεται μέσω ενός δικτύου τροφοδοσίας αερίου, το οποίο αποτελείται από έναν έλεγχο πίεσης, ο οποίος ακολουθείται από υγρό και στερεό διαχωρισμό και καταλήγει στον τελικό έλεγχο της θερμοκρασίας και της πίεσης. Στη συνέχεια, το αέριο περνάει από τα 'μπλοκ επεξεργασίας' (treating blocks), στα οποία αφαιρούνται οξέα αέρια, νερό και υδράργυρος. Ο σκοπος των treating blocks είναι να απομακρύνει τις ακαθαρσίες (συγκεκριμένα $CO_2$, $H_2S$, $H_2O$ και Hg), οι οποίες θα πάγωναν στις εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται κατά την υγροποίηση και θα είχαν αρνητική επίδραση στην επίδοση του εξοπλισμού, σε σημείο που είναι πιθανό να τον κατέστρεφαν.

Ανάλογα με τη σύνθεση του αερίου τροφοδοσίας και την εκτίμηση της ζήτησης, μια μονάδα εξαγωγής υγραερίου – LPG / συμπυκνώματος μπορεί να συμπεριληφθεί για τη δημιουργία εσόδων από τα βαρύτερα και πιο πολύτιμα συστατικά της τροφοδοσίας. Το φυσικό αέριο υγροποιείται και στη συνέχεια αποθηκεύεται και φορτώνεται στα πλοία.

Τα small scale τερματικά υγροποίησης κατασκευάζονται κυρίως με σκοπό την αξιοποίηση μικρότερων πηγών φυσικού αερίου, την εξοικονόμηση χρόνου στη μεταφορά του φυσικού αερίου και την ικανοποίηση αναγκών για μικρότερη ποσότητα φυσικού αερίου.

Πολλές εταιρείες έχουν αρχίσει να αναπτύσσουν τέτοια τερματικά, ενώ άλλες προτιμούν να εισάγουν τεχνολογίες που ικανοποιούν τη ζήτηση της small scale αγοράς σε μεγαλύτερα τερματικά. Τα περισσότερα πλοία SSLNGc ανεφοδιάζονται στα small scale τερματικά υγροποίησης για να αξιοποιήσουν την πιο απλή και συμπαγή σχεδίασή τους με σκοπό τη μείωση του κόστους και του χρόνου μεταφοράς. Τα μικρότερα τερματικά υπολογίζεται ότι έχουν πολύ μικρότερο χρόνο κατασκευής από τα συμβατικά, λόγω του μικρότερου μεγέθους και της μικρότερης πολυπλοκότητάς τους, ενώ παράλληλα και ο χρόνος σχεδιασμού τους είναι μικρότερος. Για παράδειγμα, το τερματικό Skangass, χωρητικότητας 0,3 MTPA κατασκευάστηκε σε 3 χρόνια, ενώ ο μέσος χρόνος που απαιτείται για μεγάλα τερματικά είναι 5 χρόνια (Sugawara & Nikaido, 2014).

Προφανώς το κόστος κατασκευής είναι μικρότερο από αυτό των μεγαλύτερων τερματικών. Ωστόσο, δεν ισχύει πάντα το ίδιο για το κόστος σε $/τόνο, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερο. Αυτό το μειονέκτημα αντισταθμίζεται, καθώς δεν απαιτούνται τόσο περίπλοκες κατασκευές ή επιπλέον στοιχεία στην εγκατάσταση, όπως αυτόνομη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της. Έτσι, το τελικό κόστος δεν είναι τόσο μεγάλο όσο θα μπορούσε να είναι σε αντίθετη περίπτωση.

Εκτός από τη χρήση τους στην παγκόσμια αγορά, τα small scale τερματικά υγροποίησης κατασκευάζονται και για τοπική χρήση. Πολύ συχνά το LNG χρησιμοποιείται ως εναλλακτικό καύσιμο, αντί για το diesel και άλλα καύσιμα, για βιομηχανική χρήση ή ως πηγή ενέργειας είτε ως τρόπος μείωσης του κόστους είτε γιατί το τερματικό βρίσκεται σε απομακρυσμένη περιοχή.

Ένα πολύ συχνό φαινόμενο τα τελευταία χρόνια είναι η κατασκευή small scale τερματικών υγροποίησης με σκοπό τον ανεφοδιασμό φορτηγών χερσαίων μέσων, τα οποία κινούνται με LNG ως καύσιμο. Αυτή η χρήση έχει αποκτήσει ραγδαία ανάπτυξη παγκοσμίως, αλλά κυρίως στις ΗΠΑ και στην Κίνα. Αυτές οι χώρες χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό το LNG σε φορτηγά. Ειδικά στην Κίνα, τα μικρότερα τερματικά υγροποίησης έχουν μεγάλη ανάπτυξη, καθώς είναι βασικός στόχος της κυβέρνησης η αντικατάσταση του diesel με LNG και κατά συνέπεια η μείωση των εκπομπών ρύπων από τα οχήματα.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια λίστα της IGU του 2014, στην οποία φαίνεται η ραγδαία ανάπτυξη αυτού του κλάδου, καθώς από τα 5 τερματικά που ενδεικτικά αναφέρονται, μόλις το ένα είχε ήδη κατασκευαστεί, ενώ τα υπόλοιπα είχαν δρομολογηθεί για τα επόμενα έτη και πλέον είναι σε λειτουργία.

*Πίνακας 3: Small scale τερματικά υγροποίησης (Πηγή: IGU)*

| Project | Country | Status | Original Capacity | Announced Start | Operator |
|---|---|---|---|---|---|
| Skangass LNG | Norway | Existing | 0.3 | 2010 | Lyse |
| Sengkang LNG T1 | Indonesia | Construction | 0.5 | 2014 | Energy World Corp. |
| Sengkang LNG T2 | Indonesia | Construction | 0.5 | 2014 | Energy World Corp. |
| Pacific Rubiales (Floating) | Colombia | Construction | 0.5 | 2015 | Exmar |
| PETRONAS FLNG | Malaysia | Construction | 1.2 | 2016 | PETRONAS |

Όπως και στη συμβατική αγορά LNG, πριν από την υγροποίησή του, το φυσικό αέριο χρειάζεται κάποια επεξεργασία. Τα βήματα αυτής της επεξεργασίας γίνονται για να αποτρέψουν τη διατάραξη της διαδικασίας στον κρυογενικό θάλαμο και για να εξασφαλισθεί ότι η ποιότητα του LNG πληροί τις προϋποθέσεις ως προς τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά (π.χ. ακαθαρσίες, θερμοκρασία, αριθμός μεθανίου). Στις περισσότερες περιπτώσεις, στις οποίες το αέριο των αγωγών λειτουργεί ως αέριο τροφοδοσίας στο τερματικό υγροποίησης, η προεπεξεργασία είναι λιγότερο απαιτητική και πολύπλοκη συγκριτικά με τη συμβατική αγορά LNG.

Ανάλογα και με τη σύσταση του φυσικού αερίου στο τερματικό, ο υδράργυρος, το διοξείδιο του άνθρακα, το νερό, οι βαριοί υδρογονάνθρακες και το άζωτο μπορεί να χρειαστεί να απομακρυνθούν. Ο υδράργυρος συνήθως διαχωρίζεται με προσρόφηση σε εμποτισμένο με θείο άνθρακα, μοριακά κόσκινα (ασήμι με πρόσμιξη) ή μεταλλικά σουλφίδια, το διοξείδιο του άνθρακα αφαιρείται συνήθως με φυσική διαδικασία πλύσης με διάλυμα αμίνης. Σε περίπτωση που η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα είναι χαμηλή, μπορεί επίσης να εφαρμοστεί διαδικασία προσροφητικού τύπου. Η αφυδάτωση γίνεται με μοριακά κόσκινα που χρησιμοποιούνται ως προσροφητικό. Οι βαριοί υδρογονάνθρακες απομακρύνονται μετά από μερική συμπύκνωση του αερίου τροφοδοσίας χρησιμοποιώντας μια μερική ροή του ψυκτικού κύκλου. Η απόρριψη του αζώτου μπορεί να επιτευχθεί με απλή ανάφλεξη του LNG πριν από την αποθήκευση. Ωστόσο, αυτό το απλό βήμα της διαδικασίας προκαλεί σημαντική περιεκτικότητα μεθανίου στο αέριο αζώτου (nitrogen tail gas). Σε περίπτωση που αυτη η πλούσια σε μεθάνιο ροή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εντός της εγκατάστασης υγροποίησης ή να δρομολογηθεί στο όριο της μπαταρίας της εγκατάστασης, θα πρέπει να εφαρμοστεί μια στήλη διαχωρισμού (separation column). Αυτή η συσκευή επιτρέπει την παραγωγή μιας σχεδόν καθαρής ροής αζώτου, η οποία ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Ορισμένοι προμηθευτές τεχνολογίας για τερματικά κατάφεραν να ενσωματώσουν στάδια απομάκρυνσης βαρέων υδρογονανθράκων και / ή αζώτου στις διαδικασίες υγροποίησης τους, γεγονός που ελαχιστοποιεί τις πρόσθετες επενδύσεις, μια πτυχή ιδιαίτερης σημασίας στην αγορά small scale LNG.

Σημαντικό είναι να γίνει και αναφορά στη διαδικασία υγροποίησης του φυσικού αερίου στην αγορά small scale LNG. Δύο βασικοί τύποι υγροποίησης χρησιμοποιούνται για υγροποίηση σε μικρή κλίμακα. Αυτοί είναι: οι διαδικασίες κύκλου επέκτασης (expansion cycle processes) και οι διαδικασίες μεικτού ψυκτικού μέσου (single mixed refrigerant processes). Και για τους δύο τύπους αυτών των βασικών διεργασιών ορισμένοι πάροχοι προσφέρουν επίσης ένα επιπλέον βήμα / κύκλο προ-ψύξης (pre-cooling step).

Οι διεργασίες κύκλου επέκτασης κάνουν χρήση ανοιχτών ή κλειστών επαναλήψεων με μονά ή πολλαπλά επίπεδα επέκτασης της πίεσης του αζώτου, του μεθανίου ή συνδυασμού των παραπάνω αερίων. Η ισεντροπική επέκταση των αερίων παρέχει την απαραίτητη ψύξη για την υγροποίηση του φυσικού αερίου.

Οι διαδικασίες μεικτού ψυκτικού μέσου χρησιμοποιούν διαφορετικό μίγμα ελαφρών υδρογονανθράκων και αζώτου, το οποίο είναι μερικώς συμπιεσμένο σε συνθήκες περιβάλλοντος και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την ψύξη της ροής του φυσικού αερίου.

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επιδρούν στην επιλογή της ιδανικής διαδικασίας υγροποίησης ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Σύμφωνα με τον IGU, οι δύο διαδικασίες οδηγούν σε περίπου ίδια έξοδα εγκατάστασης στα αντίστοιχα τερματικά. Επομένως, η βασική διαφορά τους εντοπίζεται στα έξοδα λειτουργίας και γενικά στη λειτουργικότητά τους.

Για project στα οποία αναμένονται υψηλές ετήσιες ώρες λειτουργίας κοντά στο όριο λειτουργίας του τερματικού, έρευνες έχουν δείξει ότι η τεχνολογία μεικτού ψυκτικού μέσου

έχει καλύτερη απόδοση από την τεχνολογία κύκλου επέκτασης και επομένως μικρότερα λειτουργικά κόστη. Τα βασικά μειονεκτήματα της τεχνολογίας μεικτού ψυκτικού μέσου είναι η μειωμένη απόδοση σε λειτουργίες μερικής φόρτωσης και οι αργοί χρόνοι εκκίνησης. Ωστόσο, στην περίπτωση που αναφέρθηκε αυτά τα μειονεκτήματα δεν είναι καθοριστικής σημασίας.

Αντίθετα, οι διαδικασίες κύκλου επέκτασης προτιμούνται σε εφαρμογές υγροποίησης με χαμηλές ετήσιες ώρες λειτουργίας και μεγάλο εύρος φόρτωσης. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η υγροποίηση του boil – off gas. Ο μικρός χρόνος εκκίνησης σε συνδυασμό με την ικανότητα καλής απόδοσης σε μερική φόρτωση και την γενικά πολύ καλή απόδοση του κύκλου επέκτασης αποτελούν τα βασικά πλεονεκτήματά του. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι το αυξημένο κόστος λειτουργίας σε σχέση με τις διαδικασίες μεικτού ψυκτικού μέσου. Ωστόσο, λόγω των περιορισμένων ωρών λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν και έτσι σε αυτές τις εφαρμογές προτιμάται ο κύκλος επέκτασης.

Όπως και τα συμβατικά τερματικά LNG, έτσι και τα small scale τερματικά απαιτούν διάφορα στοιχεία για τη σωστή λειτουργία των βασικών μονάδων επεξεργασίας. Επιπλέον, κάθε τερματικό πρέπει να ενσωματωθεί σε κατάλληλη υποδομή που παρέχει πρώτη ύλη και προσβασιμότητα για το προσωπικό και το υλικό. Πολλές εγκαταστάσεις LNG μικρής κλίμακας εποφελούνται από ήδη υπάρχοντα στοιχεία εγκαταστάσεων μεγαλύτερης κλίμακας (π.χ. λιμάνι, προβλήτα, δρόμοι πρόσβασης στην εγκατάσταση, ηλεκτρικές υποδομές, επεξεργασία νερού, στέγαση εργατικού δυναμικού, διοικητικά κτίρια). Με αυτό τον τρόπο μειώνονται τα κόστη κατασκευής αυτών των εγκαταστάσεων σε σχέση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις LNG μεγάλης κλίμακας.

Τα περισσότερα small scale τερματικά υγροποίησης λειτουργούν κυρίως με ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως δεν εγκαθίσταται ειδική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως στα συμβατικά τερματικά, αλλά η εγκατάσταση συνδέεται με το δημόσιο δίκτυο, το οποίο πρέπει να είναι κατάλληλο για να απορροφήσει τον επιπλέον φόρτο ενέργειας, κάτι το οποίο παρουσιάζει πρόβλημα σε λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές. Σε αυτήν την περίπτωση και εφόσον υπάρχει διαθέσιμο φθηνό φυσικό αέριο, ο κύριος συμπιεστής του ψυκτικού κύκλου μπορεί να οδηγείται από στρόβιλο αερίου ή / και ηλεκτρική ισχύς μπορεί να παράγεται με κινητήρες αερίου. Σε σπάνιες περιπτώσεις, ένας ατμοστρόβιλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για τον κύριο συμπιεστή, για παράδειγμα εάν υπάρχει περίσσεια ατμού από μια αεριοποίηση άνθρακα για παραγωγή φυσικού αερίου, όπως συμβαίνει σε μερικά κινέζικα έργα.

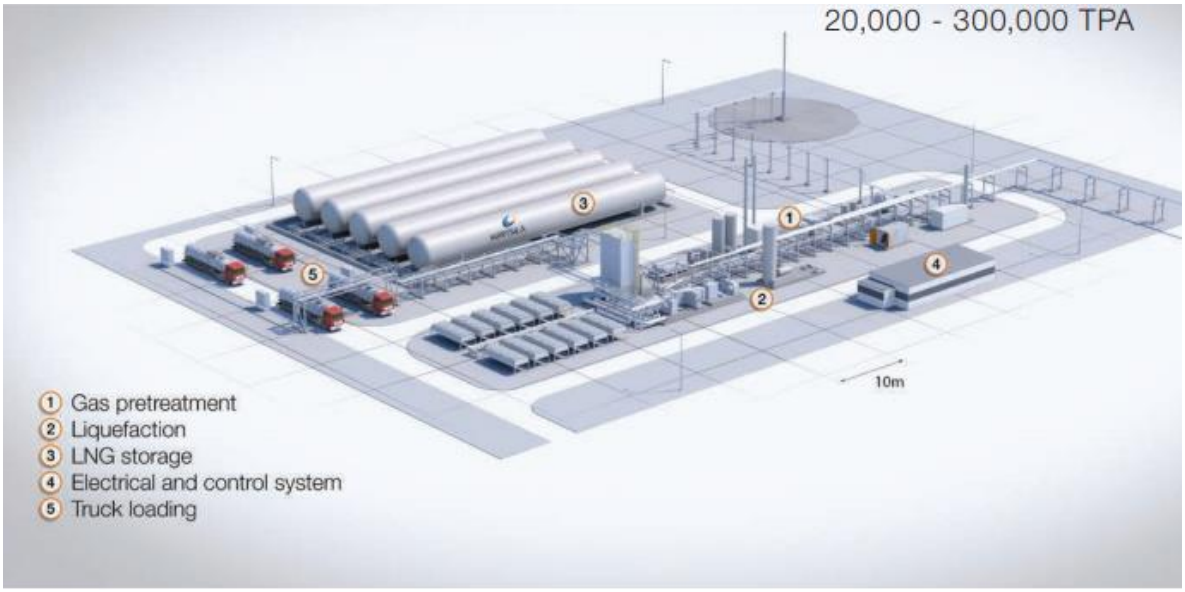
Η θέρμανση συνήθως παρέχεται από έναν κύκλο ζεστού λαδιού που περιλαμβάνει ένα θερμαντήρα λαδιού, ο οποίος λειτουργεί με καύσιμο αέριο που λαμβάνεται από αέριο επιστροφής δεξαμενής ή αέριο τροφοδοσίας. Υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ζεστό νερό ή ατμός κοντά στο εργοστάσιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό μέσο θέρμανσης.

Η ψύξη του ατμού γίνεται κυρίως με ψύξη αέρα. Εάν μια κατάλληλη πηγή νερού ψύξης είναι διαθέσιμη στο όριο της μπαταρίας στο εργοστάσιο, αυτό το μέσο μπορεί να ληφθεί υπόψη ως ένας εναλλακτικός παράγοντας ψύξης.

Για small scale τερματικά υγροποίησης LNG που βασίζονται σε μικτό κύκλο ψυκτικού

μέσου, απαιτούνται κάποια επιπλέον στοιχεία (π.χ. αιθάνιο ή αιθυλένιο, προπάνιο ή προπυλένιο, βουτάνιο, πεντάνιο), τα οποία συνήθως παράγονται στα συμβατικά τερματικά υγροποίησης LNG, σε ειδικά διαμορφωμένες μονάδες. Αντιθέτως, στα small scale τερματικά υγροποίησης LNG τα στοιχεία αυτά συνήθως αγοράζονται από πετροχημικές εγκαταστάσεις.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα σχέδιο small scale τερματικού υγροποίησης της Wartsila.




*Σχήμα 16: Small scale τερματικό υγροποίησης (Πηγή: Wartsila)*

*Small scale τερματικά εισαγωγής - αεριοποίησης*

Ιστορικά, τα τερματικά εισαγωγής – αεριοποίησης όλο ένα και μεγάλωναν με σκοπό να μειωθεί το κόστος αεριοποίησης και διαχείρησης μεγάλης ποσότητας LNG. Ωστόσο, πλέον τα μικρότερα τερματικά αεριοποίησης είναι πιο διαδεδομένα από τα μικρά τερματικά υγροποίησης. Αυτό ισχύει γιατί σε αυτά τα τερματικά το LNG επιστρέφει ξανά σε αέρια μορφή και είναι έτοιμο για χρήση. Έτσι, το φυσικό αέριο εισάγεται συνήθως από παγκόσμιες πηγές και μεγάλα τερματικά υγροποίησης σε μικρότερα τερματικά αεριοποίησης σε περιοχές με περιορισμένη ζήτηση και περιορισμούς στο μέγεθος της εγκατάστασης. Με σκοπό να παραμείνουν ανταγωνιστικά, τα μικρά τερματικά χρησιμοποιούν απλούστερες διαδικασίες και τεχνολογίες οι οποίες είναι εμπνευσμένες από άλλες βιομηχανίες φυσικού αερίου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ψεκαστήρες αέρα (air vaporizers). Η χρήση τους είναι δυνατή καθώς τα ίχνη (footprints) μικρής κλίμακας ψεκαστήρων είναι αποδεκτά για τον όγκο του LNG που διαχειρίζεται.

Υπάρχουν τερματικά στην ξηρά και υπεράκτια (onshore και offshore). Τα offshore

τερματικά είναι τα FSU (Floating Storage Unit) και τα FSRU (Floating Storage Regasification Unit). Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχουν τέτοια τερματικά μικρής κλίμακας και επομένως δεν θα εξεταστούν παρακάτω.

Παρακάτω φαίνεται ένας τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε να λειτουργήσει η αγορά SSLNG, με το φυσικό αέριο να εισάγεται από μεγάλο τερματικό υγροποίησης και να καταλήγει σε small scale τερματικό εισαγωγής. Στο σχήμα φαίνεται το μεγάλο τερματικό υγροποίησης, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση εφοδιάζει ένα πλοίο, το οποίο λειτουργεί με τη σειρά του σαν off shore τερματικό, από το οποίο μικρότερα πλοία αντλούν φυσικό αέριο (ship to ship delivery) και το μεταφέρουν σε μικρότερο τερματικό για χρήση.

*Σχήμα 17: Small scale LNG concept (Πηγή: Norgas Carriers)*

Τα small scale τερματικά αεριοποίησης λειτουργούν παρόμοια με τα FSRU και έχουν ίδια πλεονεκτήματα. Αυτά είναι η ταχύτητα κατασκευής, το κόστος κατασκευής και η ευελιξία. Αυτή τη στιγμή η Ιαπωνία διαθέτει τα περισσότερα small scale τερματικά αεριοποίησης,

πολλά εκ των οποίων λειτουργούν σαν δορυφόροι μεγαλύτερων τερματικών που είχαν κατασκευαστεί παλαιότερα σε κοντινές περιοχές. Η Ινδονησία έχει προτείνει την κατασκευή αρκετών "mini" τερματικών LNG για την εξυπηρέτηση των νησιών που δεν έχουν πρόσβαση στο δίκτυο φυσικού αερίου. Η ίδια πρόταση έχει γίνει και από διάφορες χώρες της Ευρώπης, τα νησιά των οποίων δεν έχουν αυτή τη στιγμή πρόσβαση σε φυσικό αέριο, με την Ευρωπαϊκή Ένωση να στηρίζει αυτές τις προσπάθειες.

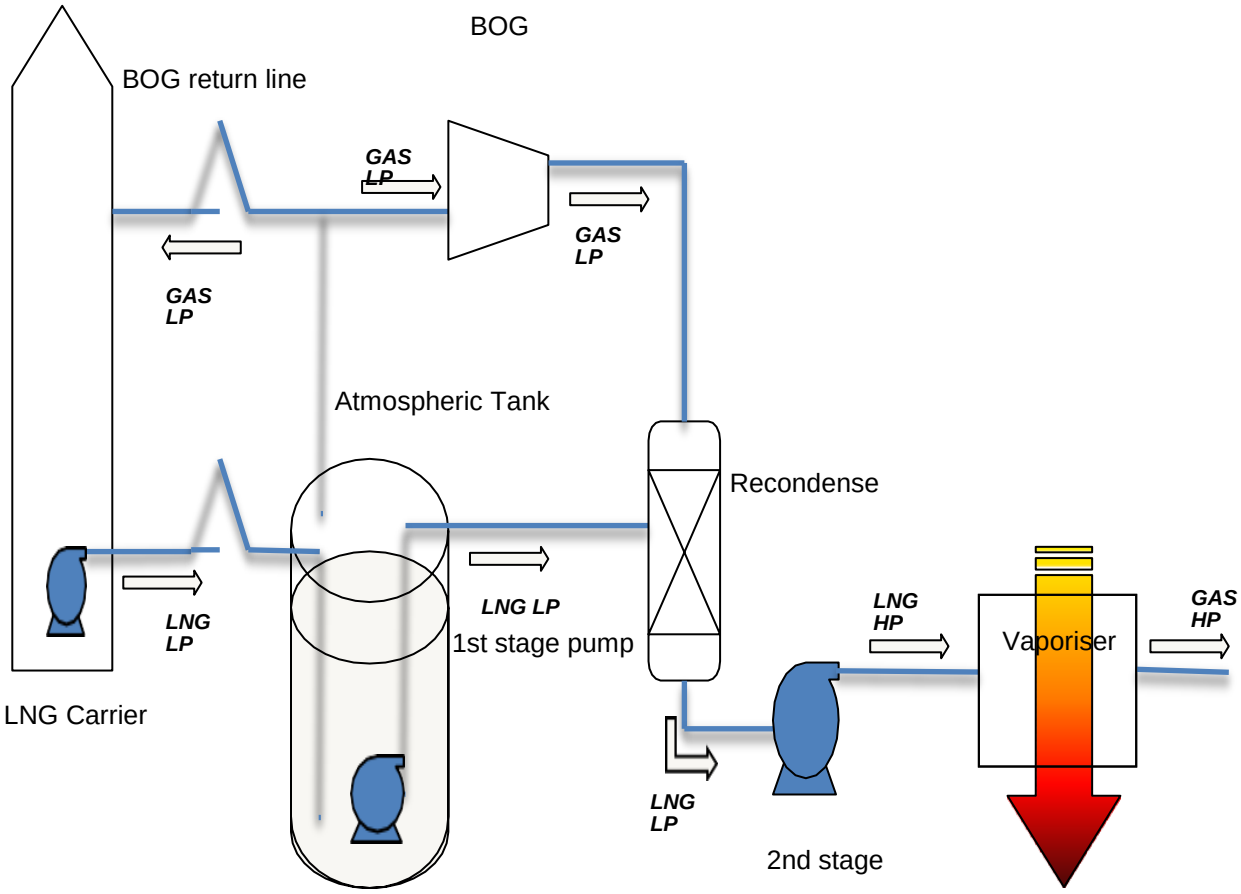
Όπως έχει αναφερθεί, υπάρχουν αρκετοί τρόποι να εισαχθεί φυσικό αέριο σε αυτά τα τερματικά. Στο τερματικό Fredrikstad της Νορβηγίας το LNG έρχεται από small scale τερματικό υγροποίησης και συγκεκριμένα από το Skangass LNG που επίσης βρίσκεται στην Νορβηγία. Στην Κίνα και στην Ιαπωνία, στις περισσότερες περιοχές το φυσικό αέριο έρχεται από μεγαλύτερα τερματικά, όπως το Malaysia LNG και το Bontang, με τη βοήθεια SSLNGc. Ένας τρίτος τρόπος αφορά την εισαγωγή LNG από μεγάλα, διεθνή τερματικά (hubs) σε μεγάλα εθνικά τερματικά. Στη συνέχεια το φυσικό αέριο μεταφέρεται σε SSLNGc ή σε φορτηγά και καταλήγει στα μικρότερα τερματικά αεριοποίησης. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται το LNG στη Χιλή και σε κάποιες περιοχές της Ιαπωνίας (Union, 2014).

Αυτά τα τερματικά πολύ συχνά δεν είναι επανδρωμένα. Στις λίγες περιπτώσεις που είναι, τότε το προσωπικό είναι ελάχιστο και ασχολείται με τη συντήρηση και την εκφόρτωση. Αντίθετα, στα συμβατικά τερματικά αεριοποίησης, το προσωπικό συχνά φτάνει μέχρι και τα 200 άτομα. Τα περισσότερα small scale τερματικά αεριοποίησης αποτελούνται από προκατασκευασμένα τμήματα που μεταφέρονται στον χώρο της εγκατάστασης. Αυτό συμβάλει στην ταχύτερη κατασκευή, ειδικά των δεξαμενών, οι οποίες αποτελούν το πιο χρονοβόρο τμήμα για κατασκευή στα συμβατικά τερματικά αεριοποίησης. Ακόμα, συμβάλει και στη μείωση του κόστους, καθώς η κατασκευή των απαραίτητων τμημάτων στις απομακρυσμένες περιοχές που κατασκευάζονται τα τερματικά αποτελεί αρκετά ακριβότερη μέθοδο από αυτή που αναφέρθηκε. Άλλο ένα χαρακτηριστικό των small scale τερματικά αεριοποίησης αφορά την ασφάλεια της κατασκευής. Λόγω του μικρότερου μεγέθους της κατασκευής, η κλίμακα των μέτρων ασφαλείας είναι και αυτή μικρότερη. Επιπλέον, λόγω της απλότητας της κατασκευής οι μέθοδοι ασφαλείας είναι απλούστερες, χωρίς όμως να μειώνεται το συνολικό επίπεδο ασφαλείας. Αυτή η απλότητα οδηγεί και σε μικρότερη ανάγκη συντήρησης, καθώς τα εξαρτήματα είναι λιγότερα και η κατασκευή τους δεν είναι τόσο σύνθετη όσο στα συμβατικά τερματικά. Επιπλέον, η ποσότητα LNG είναι προφανώς μικρότερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται κλιμακούμενα μέσα ασφαλείας και απλούστεροι μηχανισμοί, χωρίς να μειώνεται το επίπεδο ασφαλείας του τερματικού. Το ίδιο ισχύει και για τη συντήρηση, η οποία είναι επίσης μειωμένη, καθώς υπάρχουν λιγότερα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για πιο βαρυά χρήση (Wartsila, 2018).

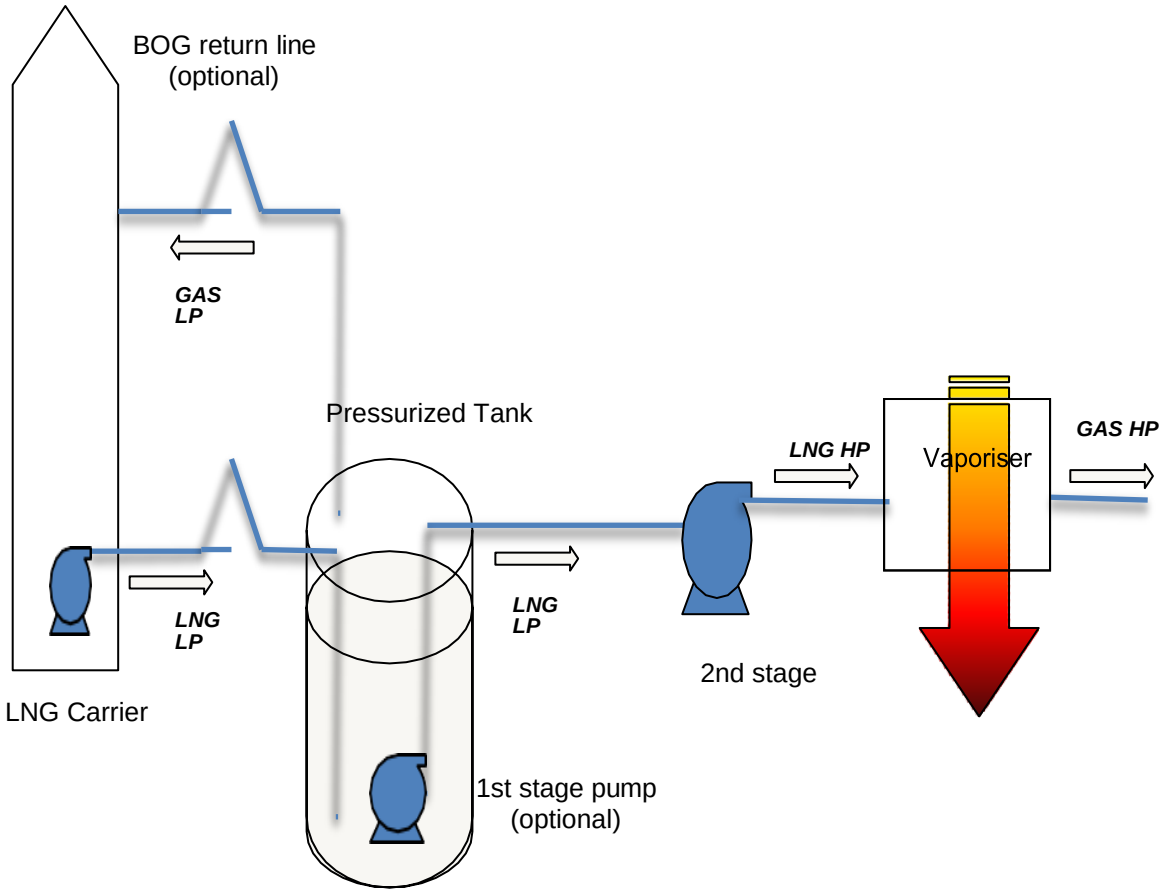
Ένα σημαντικό τεχνικό χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι πολύ συχνά η μεταφορά LNG γίνεται μέσω ενός εύκαμπτου σωλήνα, χρησιμοποιώντας έναν σύνδεσμο ξηρού διαλείμματος ως σύστημα αποσύνδεσης έκτακτης ανάγκης. Το boil - off gas που παράγεται με φυσικό τρόπο ή λόγω της επεξεργασίας LNG χειρίζεται σε μια δεξαμενή υπό πίεση έως ότου συμπυκνωθεί με το επόμενο υποψυγμένο παραδοθέν LNG ή με τη χρήση εφεδρικού υγρού αζώτου. Οι ψεκαστήρες αέρα (air vaporizers) είναι ο προτιμώμενος εξοπλισμός λόγω της απλότητάς τους και της απουσίας λειτουργικών δαπανών. Εγκαθίστανται σε μεγάλο αριθμό ώστε οι ψεκαστήρες να ξεπαγώσουν ενώ άλλοι είναι σε λειτουργία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα small scale τερματικά εισαγωγής αρχικά κατασκευάζονταν με σκοπό την αεριοποίηση του LNG (regasification terminals). Ωστόσο, πλέον έχουν τροποποιηθεί για να έχουν και άλλες χρήσεις. Αυτές είναι ο ανεφοδιασμός πλοίων (bunkering), το break bulk και ο ανεφοδιασμός φορτηγών.

Όπως συμπερένεται από τα παραπάνω, τα small scale τερματικά αεριοποίησης LNG έχουν γενικά απλούστερη διάταξη από τα συμβατικά. Αυτό φαίνεται και στις πρότυπες διατάξεις παρακάτω.




*Σχήμα 18: Συμβατικό τερματικό εισαγωγής – αεριοποίησης (Πηγή: Total, France)*




*Σχήμα 19: Small scale τερματικό εισαγωγής – αεριοποίησης (Πηγή: Total, France)*

## 3.3 Αποθήκευση LNG και boil - off gas

Στην αγορά του small scale LNG χρησιμοποιούνται περισσότεροι τύποι αποθήκευσης και διαχέιρησης του boil - off gas σε σχέση με τη συμβατική αγορά. Η αποθήκευση υπό πίεση (συνήθως με εύρος 3 – 10 barg) εμφανίζεται σχεδόν αποκλειστικά στην αγορά small scale LNG. Επιπλέον, ανοίγονται περισσότερες ευκαιρίες για διαφορετικούς τρόπους περιορισμού του boil - off gas, πέρα του κλασικού, που περιλαμβάνει την επανυγροποίησή του ή την μείωση της πίεσής του.

Συνήθως, οι δεξαμενές αποθήκευσης στην αγορά small scale LNG κυμαίνονται από 500 $m^3$ εώς 5.000 $m^3$. Ο συνηθέστερος τρόπος αποθήκευσης είναι με δεξαμενές αποθήκευσης υπό πίεση (pressurized storage tanks). Για δεξαμενές πάνω από 5.000 $m^3$ συνηθίζονται πιο συμβατικές τεχνολογίες. Παρ' όλο που αναφέρεται προηγουμένως ότι μικρής κλίμακας

FSRU δεν συναντούνται συχνά, μεγαλύτερης κλίμακας FSRU χρησιμοποιούνται στην αγορά small scale LNG για πλωτή αποθήκευση LNG (FSU) (Mering et al., 2015).

Οι διαφορετικοί τύποι δεξαμενών που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

*Πίεσης*

- Σφαιρικές δεξαμενές
- Κυλινδρικές δεξαμενές

*Ατμοσφαιρικές*

- Κυλινδρικές δεξαμενές
- Flat bottom

*Πλωτή αποθήκευση LNG (FSU)*

- Αποθήκευση εντός γάστρας (συνήθως ατμοσφαιρική αποθήκευση)
- Ποντόνια (μπορεί να περιλαμβάνουν σφαιρική - bullet αποθήκευση υπό πίεση)

Οι πλωτές δεξαμενές αποθήκευσης είναι ουσιαστικά ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα πλοία SSLNGc (ενότητα 3.1). Επομένως, δεν θα αναλυθούν περισσότερο σε αυτό το κομμάτι. Οι χερσαίες δεξαμενές αποθήκευσης διακρίνονται σε τρία επίπεδα ακεραιότητας (integrity levels) (Bouknight, 2015):

- Μονή μόνωση (single containment – SC), ένα επίπεδο ακεραιότητας
- Διπλή μόνωση (double containment – DC), δύο επίπεδα ακεραιότητας
- Πλήρης μόνωση (full containment – FC), πλήρης ακεραιότητα

Στις δεξαμενές SC το εξωτερικό τοίχωμα είναι κατασκευασμένο από μη κρυογονικό χάλυβα, ενώ και στις δεξαμενές DC ισχύει το ίδιο. Ωστόσο, στις δεξαμενές DC υπάρχει και ένας λάκκος αποθήκευσης ή τοίχος που μπορεί να διατηρεί το LNG κατά τη διάρκεια μιας διαρροής. Στις δεξαμενές FC το εξωτερικό τοίχωμα είναι κατασκευασμένο από κρυογονικό χάλυβα και σε περίπτωση που το εσωτερικό τοίχωμα διαρεύσει, τότε τα υγρά μπορούν να περιοριστούν. Αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με πολλούς κανονισμούς οι δεξαμενές SC πλέον δεν επιτρέπονται (Mering et al., 2015).

Υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που οδηγούν στην ορθότερη επιλογή δεξαμενών, ανεξάρτητα αν αυτές είναι συμβατικές ή μικρής κλίμακας. Οι πιο βασικοί είναι οι παρακάτω:

- Το μέγεθος επιλέγεται έτσι ώστε να λαμβάνει ολόκληρο το φορτίο που παραδίδεται από το πλοίο.
- Το μέγεθος θα είναι επομένως στην ίδια τάξη μεγέθους με αυτό του πλοίου που μεταφέρει LNG.
- Ο τύπος και το μέγεθος του πλοίου μεταφοράς θα επιλεγούν έτσι ώστε να έχουν εύλογη συχνότητα παράδοσης (υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν πλωτές οδοί ή /

και δρόμοι για το σκοπό αυτό).

- Θερμοδυναμική κατάσταση LNG (κρύο ή ζεστό ανάλογα με τις δυνατότητες του πελάτη για ρύθμιση ή αποδοχή της θερμοκρασίας LNG).

Λόγω της κρυογονικής φύσης του LNG, παρουσιάζεται δυσκολία αποθήκευσής του για περισσότερο από μερικές εβδομάδες. Οι δεξαμενές υπό πίεση προσφέρουν τη δυνατότητα εξοικονόμισης χρημάτων στην διαχείρηση του boil - off gas και χρόνου στην εγκατάσταση. Ωστόσο, τέτοιες δεξαμενές δεν αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή όταν ο πελάτης επιθυμεί κρύο LNG εκτός εάν εφαρμόζεται μια τεχνική στην οποία χρησιμοποιείται υγρό άζωτο για την υποψύξη του LNG.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι τύποι δεξαμενών που αναφέρθηκαν.

Οι κυλινδρικές δεξαμενές πίεσης προσφέρουν τη δυνατότητα διατήρησης της πίεσης και επομένως δεν υπάρχει ανάγκη διαχέιρησης του boil - off gas, κάτι που είναι απαραίτητο σε συμβατικά τερματικά. Ουσιαστικά, σε περίπτωση που το LNG παραδίδεται κρύο, τότε μια δεξαμενή τέτοιου τύπου μπορεί να διατηρήσει το boil - off gas για μία ή δύο εβδομάδες, μέχρι η νέα διανομή να βοηθήσει στην επανασυμπίεση του boil - off gas στη δεξαμενή υποδοχής. Μια άλλη μέθοδος διαχείρησης του boil - off gas είναι η μείωση της θερμοκρασίας του (αντί για την αύξηση της πίεσης), όμως αυτή η μέθοδος είναι πιο πολύπλοκη και πιο ακριβή.

Οι δεξαμενές αυτές έχουν μέχιστη χωρητικότητα 1.200 $m^3$ LNG με προοπτικές για επέκταση μέσα στα επόμενα χρόνια (Wartsila, 2018). Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η ταχύτητα κατασκευής, καθώς χρειάζονται περίπου 6 – 18 μήνες (χωρίς την εγκατάσταση). Επιπλέον, λόγω του τρόπου κατασκευής τους, μπορούν να κατασκευαστούν διαφορετικά κομμάτια σε διαφορετικές τοποθεσίες, πράγμα που καθιστά εύκολη τη μετακίνηση και συναρμολόγηση.

Το βασικό μειονέκτημα, όπως αναφέρθηκε είναι το μέγεθός τους. Τις περισσότερες φορές χρειάζονται αρκετές τέτοιες δεξαμενές, πράγμα που περιπλέκει το σύστημα αγωγών που μεταφέρουν το LNG στο τερματικό.

*Σχήμα 20: Κυλινδρική δεξαμενή πίεσης (Πηγή: Croft systems)*

Οι σφαιρικές δεξαμενές πίεσης εμφανίζονται πολύ σπάνια σε χερσαία τερματικά. Αναφέρονται εδώ για λόγους πληρότητας.

*Σχήμα 21: Σφαιρική δεξαμενή πίεσης (Πηγή: Linde Engineering)*

Οι ατμοσφαιρικές κυλινδρικές δεξαμενές (με flat bottom) συνήθως κατασκευάζονται απευθείας στον χώρο του τερματικού και συνήθως χρειάζονται 2 – 4 χρόνια για να κατασκευαστούν σε μεγάλη κλίμακα. Συνήθως είναι άδειες στην κορυφή τους. Σε θέματα μόνωσης η απόδοσή τους είναι εξαιρετική.

Οι ατμοσφαιρικές κυλινδρικές δεξαμενές δεν είναι ανταγωνιστικές με τις δεξαμενές πίεσης μικρής κλίμακας. Δεν αντέχουν την υψηλή πίεση, ενώ απαιτείται σύστημα διαχείρησης του boil - off gas. Ωστόσο, σε τερματικά μεγάλης κλίμακας τέτοιες δεξαμενές είναι πολύ συνηθισμένες.

*Σχήμα 22: Ατμοσφαιρικές flat bottom δεξαμενές μεγάλης κλίμακας (Πηγή: B&P Engineering)*

Αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν κάποιες νέες τεχνολογίες υπό ανάπτυξη σε ότι αφορά τις δεξαμενές μικρής κλίμακας, όπως οι ατμοσφαιρικές μη κυλινδρικές δεξαμενές. Αυτές οι δεξαμενές υπάρχει πιθανότητα να γεμίσουν το κενό μεταξύ των ατμοσφαιρικών δεξαμενών και των δεξαμενών πίεσης, από την άποψη ότι υπάρχουν εφαρμογές για τις οποίες οι πρώτες μπορεί να θεωρηθούν πολύ μεγάλες και οι δεύτερες πολύ μικρές. Σκοπός είναι να αξιοποιήσουν τα χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών δεξαμενών με κάποια πλεονεκτήματα των δεξαμενών πιέσεων, όπως την εύκολη μετακίνηση.

Όπως έχει αναφερθεί, σημαντικό μέρος του κόστους αποτελεί το σύστημα διαχείρησης του boil - off gas και παίζει μεγάλο ρόλο στην επιλογή μεταξύ ατμοσφαιρικών δεξαμενών και δεξαμενών πίεσης.

Σε ότι αφορά τις ατμοσφαιρικές δεξαμενές, το κόστος κυμαίνεται από 800 εώς 3.000 $/m$^3$. Παρατηρείται ότι το κόστος ανά m$^3$ μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της δεξαμενής. Οι δεξαμενές πίεσης έχουν γενικά μικρότερο κόστος.

Αξίζει να γίνει μεγαλύτερη αναφορά στο φαινόμενο του boil - off gas, το οποίο έχει αναφερθεί αρκετές φορές παραπάνω. Το boil - off gas είναι ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται συνήθως στην αποθήκευση LNG και όχι τόσο στην αποθήκευση άλλων υγρών φορτίων. Λόγω αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, τα ελαφρύτερα στοιχεία του LNG,

όπως το $N_2$ και το $CH_4$ εξατμίζονται. Οι συνήθεις ρυθμοί εξάτμισης είναι 0,1 – 0,5 % την ημέρα. Με την αφαίρεση του boil - off gas με τρόπους που έχουν αναφερθεί (επανασυμπίεση, επανυγροποίηση και άλλα) η πίεση και η θερμοκρασία της δεξαμενής παραμένουν σε σταθερά επίπεδα. Σε περίπτωση μη απελευθέρωσης του boil - off gas αυξάνεται όλο και περισσότερο η πίεση, πράγμα που δημιουργεί μεγάλο πρόβλημα στις δεξαμενές και ενεργοποιεί το σύστημα ασφαλείας. Όταν το boil - off gas ελευθερώνεται, ο αριθμός μεθανίου του LNG μειώνεται, καθώς γίνεται πιο βαρύ. Αυτό είναι σημαντικό για το LNG ως καύσιμο, επειδή οι περισσότεροι κινητήρες απαιτούν έναν ελάχιστο αριθμό μεθανίου.

Σε περίπτωση που δεν αφαιρεθεί το boil - off gas, διατηρείται υπό πίεση. Η πίεση μειώνεται με το άδειασμα της δεξαμενής και / ή με το επαναγέμισμα με το υποψυγμένο LNG. Το boil - off gas είναι ένα αρκετά σημαντικό στοιχείο στην εφοδιαστική αλυσίδα LNG και πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μεγαλύτερες κλίμακες, καθώς οι ποσότητες LNG είναι μεγαλύτερες και οι αποστάσεις μεταξύ τερματικών είναι επίσης μεγαλύτερες. Επομένως, η ποσότητα του boil - off gas σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αξιοσημείωτη. Σε περιπτώσεις μικρότερης κλίμακας, όπως κοντινές αποστάσεις ή small scale τερματικά αεριοποίησης, γίνεται αποθήκευση υπό πίεση. Έτσι, απαιτείται λιγότερη διαχείρηση του boil - off gas για διατήρηση της πίεσης στα επιθυμητά επίπεδα.

Το σύστημα διαχείρησης boil - off gas βοηθάει στην διατήρηση του LNG σε χαμηλή θερμοκρασία. Το κρύο LNG μπορεί να παραδοθεί σε όλους τους αγοραστές σε ατμοσφαιρική πίεση. Αντιθέτως, το LNG υπό πίεση και υψηλότερη θερμοκρασία μπορεί να παραδοθεί μόνο σε αγοραστές οι οποίοι έχουν τον ίδιο τύπο αποθήκευσης LNG εκτός αν προηγουμένως έχει αφαιρεθεί το boil - off gas.

## 3.4 Logistics – εφοδιαστική αλυσίδα small scale LNG

Μία βασική διαφορά της αγοράς small scale LNG με τη συμβατική αγορά LNG εντοπίζεται στη διαχείριση των αποθεμάτων και γενικότερα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα βήματα που ακολουθούνται και στις δύο περιπτώσεις είναι παρόμοια. Ωστόσο, κάθε βήμα γίνεται με διαφορετικό τρόπο λόγω της μεγαλύτερης ευελιξίας μεταφοράς της αγοράς μικρότερης κλίμακας (πλοία, φορτηγά), των μικρότερων αποστάσεων και του μεγαλύτερου αριθμού πελατών. Η εφοδιαστική αλυσίδα και στις δύο αγορές φαίνεται στον παρακάτω πίνακα και έτσι φαίνονται πιο καθαρά οι βασικές διαφορές τους.

*Πίνακας 4: Διαφορές της συμβατικής με τη small scale εφοδιαστική αλυσίδα LNG*

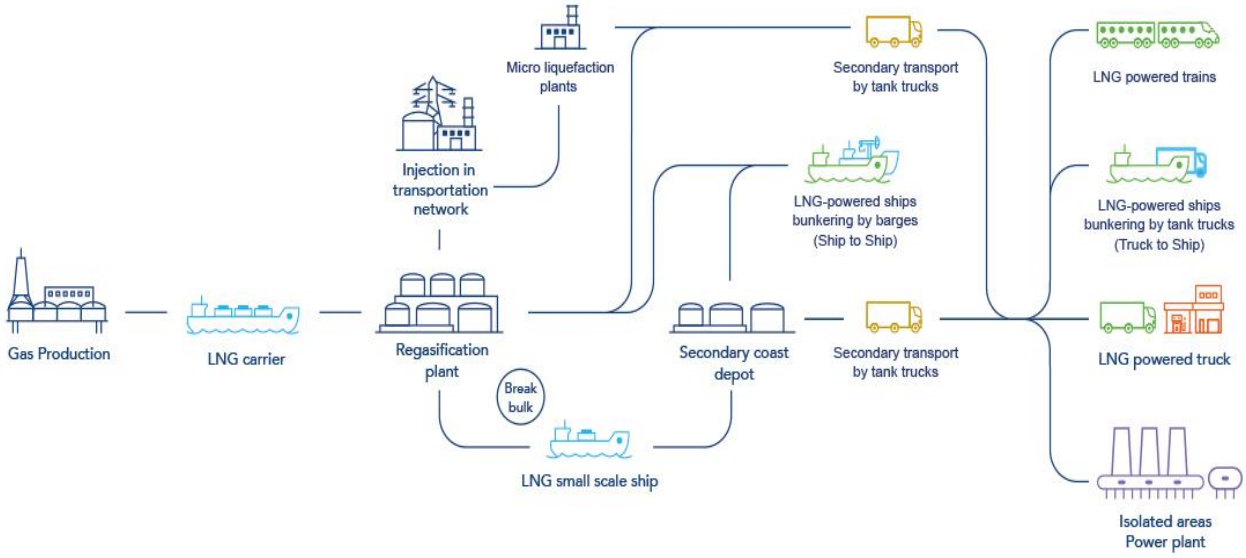
| **Στοιχείο** | **Συμβατική αγορά LNG** | **Small scale αγορά LNG** |
|---|---|---|
| Ανεφοδιασμός | Τερματικό υγροποίησης | Συμβατικό τερματικό / small scale τερματικό υγροποίησης |
| Αποθήκευση | Δεξαμενές στο τερματικό υγροποίησης | Δεξαμενές στο τερματικό υγροποίησης και στο τερματικό αεριοποίησης |
| Γραμμές μεταφοράς | Προβλήτα | Προβλήτα, μονάδα φόρτωσης φορτηγών |
| Εγκαταστάσεις φόρτωσης | Λιμάνι | Λιμάνι, προβλήτα, ship to ship, ship to truck |
| Μεταφορά | Συμβατικά πλοία LNGc | Small scale LNGc, φορτηγά, τρένα |
| Ζήτηση | Πελάτες στα τερματικά εισαγωγής – αεριοποίησης | Πελάτες στα small scale τερματικά εισαγωγής – αεριοποίησης ή απευθείας παράδωση |

Στην αγορά small scale LNG οι αποστάσεις είναι αρκετά μικρότερες συγκριτικά με τη συμβατική αγορά LNG, καθώς υπάρχει μια βέλτιστη περιοχή κάλυψης για συγκεκριμένες κλίμακες παραγωγής και διανομής. Επιπλέον, τα μικρότερα πλοία έχουν προφανώς λιγότερο χώρο για αποθήκευση καυσίμου. Ενδεικτικά, η ακτίνα λειτουργίας ενός πλοίου Qmax (περισσότερα από 266.000 $m^3$ LNG) είναι μεγαλύτερη από 20.000 ναυτικά μίλια, ενώ η ακτίνα ενός πλοίου χωρητικότητας 7.500 $m^3$ LNG είναι περίπου 1.500 – 2.500 ναυτικά μίλια (Mering et al., 2015).

Το κόστος διανομής στην αγορά small scale LNG είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το κόστος διανομής άλλων προϊόντων κυρίως λόγω του κρυογονικού εξοπλισμού που απαιτείται για τη διατήρηση του φυσικού αερίου σε υγρή μορφή.

Ένα πρόβλημα που παρατηρείται σε αυτή την αγορά αφορά την προτεραιότητα των πλοίων SSLNGc σε ότι αφορά το λιμάνι. Συνήθως δίνεται προτεραιότητα σε μεγαλύτερα πλοία και για αυτό το λόγο πολλές φορές υπάρχουν ειδικά διαμορφωμένες προβλήτες, με σκοπό να περιορίζεται η εμφάνιση αυτού του προβλήματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια εφοδιαστική αλυσίδα που περιλαμβάνει αρκετά από τα στοιχεία που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα.




*Σχήμα 23: Μία περίπτωση εφοδιαστικής αλυσίδας small scale LNG (Πηγή: Snam)*

# 4 Εισαγωγή στο split delivery

Με τον όρο split delivery χαρακτηρίζεται η μέθοδος, με την οποία ένα μεγάλο φορτίο χωρίζεται σε μικρότερες ποσότητες και διανέμεται σε περισσότερες περιοχές. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται τόσο σε χερσαίες όσο και σε θαλάσσιες μεταφορές. Η μέθοδος του split delivery χρησιμοποιείται συχνά για κάλυψη μεγαλύτερης ζήτησης, οικονομικότερη διανομή και καλύτερη διαχείριση του αποθέματος στις αποθήκες του σταθμού διανομής αλλά και στις αποθήκες των σταθμών παράδοσης του φορτίου.

Στην ναυτιλία χρησιμοποιείται με δύο βασικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η φόρτωση ενός πλοίου από πολλούς ενδιαφερόμενους και είναι γνωστός ως co-loading. Αυτή η μέθοδος αφορά είτε τη φόρτωση σε ένα λιμάνι και τη διανομή του φορτίου σε δύο ή περισσότερα, είτε την φόρτωση σε περισσότερα λιμάνια και την εκφόρτωση σε έναν κοινό προορισμό, είτε ένα συνδυασμό των παραπάνω.

Ο δεύτερος τρόπος, με τον οποίο επιτυγχάνεται το split delivery ονομάζεται break bulk. Γενικά αυτός ο ορισμός χρησιμοποιείται όταν ένα φορτίο διαχωρίζεται από ένα μεταφορικό μέσο σε περισσότερα. Συγκεκριμένα, στην ναυτιλία, αφορά την διαμέριση του φορτίου ενός μεγάλου πλοίου σε μικρότερα και στη συνέχεια η διανομή των επιμέρους φορτίων σε διαφορετικούς προορισμούς.

Επομένως, η βασική διαφορά αυτών των μεθόδων είναι ότι στην περίπτωση του co - loading η παράδοση του φορτίου γίνεται από ένα πλοίο, ενώ στην περίπτωση του break bulk το φορτίο διαχωρίζεται σε περισσότερα πλοία. Παρακάτω παρουσιάζεται η χρήση των δύο

μεθόδων στην αγορά LNG αλλά και γενικότερα καθώς και ορισμένα παραδείγματα της χρήσης τους.

Αρκετά συχνά γίνεται χρήση του co - loading στις χερσαίες μεταφορές. Αυτό συμβαίνει όταν το προϊόν μιας εταιρείας δεν καλύπτει ολόκληρο τον χώρο του μεταφορικού μέσου (less than truckload – LTL) και έτσι γίνεται φόρτωση από περισσότερες εταιρείες με κοινό προορισμό. Αυτό μειώνει τα έξοδα και τους χρόνους μεταφοράς, ενώ καθιστά πιο ευέλικτη την διαχείριση των αποθεμάτων. Επιπλέον, μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά και στις θαλάσσιες μεταφορές, καθώς τα πλεονεκτήματα είναι παρόμοια. Ωστόσο, όπως θα φανεί και παρακάτω, στην αγορά LNG συγκεκριμένα, η χρήση αυτής της μεθόδου είναι περιορισμένη.

Η βασική ανάγκη για split delivery στις χερσαίες μεταφορές προκύπτει όταν απαιτούνται περισσότερα από ένα οχήματα για τη μεταφορά του ζητούμενου φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι ένας πελάτης χρειάζεται να παραλάβει φορτίο περισσότερες από μία φορές. Σε περίπτωση που υπάρχουν αρκετοί τέτοιοι πελάτες μπορεί να εφαρμοστεί split delivery, ώστε να μειωθούν οι αποστάσεις και οι διαδρομές που απαιτούνται για την κάλυψη της ζήτησης. Αυτό οδηγεί πάλι στην φόρτωση του μεταφορικού μέσου με φορτίο περισσότερων πελατών. Για παράδειγμα, αν δύο πελάτες επιθυμούν να παραλάβει ο καθένας φορτίο που απαιτεί το 150% της χωρητικότητας ενός φορτηγού, τότε μπορεί να γεμίσει το φορτηγό με φορτίο του ενός, στη συνέχεια με φορτίο του άλλου και τέλος με φορτίο και των δύο. Έχει υπολογιστεί ότι τα οικονομικά οφέλη αυτής της μεθόδου μπορεί να είναι από ελάχιστα έως και το 30% των εξόδων μεταφοράς (Πηγή: https://www.packdeck.com). Από αυτό εξαρτάται και η χρήση της μεθόδου, καθώς η πολυπλοκότητα της εφαρμογής της είναι μεγάλη και έτσι αποφεύγεται αν τα κέρδη δεν είναι σημαντικά. Η μέθοδος αυτή μοιάζει αρκετά με την παραπάνω και δεν εφαρμόζεται ευρέως στην αγορά LNG.

Γενικότερα στην ναυτιλία η μέθοδος co-loading είναι αρκετά διαδεδομένη. Όπως στις χερσαίες μεταφορές αναφέρθηκε ο ορισμός less than track-load (LTL) έτσι και στις μεταφορές φορτίου σε containers, όταν το φορτίο που πρέπει να μεταφερθεί είναι μικρότερο από τη μεταφορική ικανότητα του container, τότε εισάγεται ο ορισμός less than container load (LCL). Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται χρήση co-loading. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια συγκεκριμένων εταιρειών μεταφοράς εμπορευμάτων, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν εταιρείες να μεταφέρουν τα προϊόντα τους συνεργατικά στο ίδιο πλοίο. Κάτι τέτοιο συμφέρει ιδιαίτερα εταιρείες που επιθυμούν να μεταφέρουν σχετικά μικρό φορτίο, καθώς υπό άλλες προϋποθέσεις θα έπρεπε να ναυλώσουν ολόκληρο το πλοίο. Σε αυτή την περίπτωση μπορούν να μοιραστούν τα έξοδα της ναύλωσης, μειώνοντας κατά πολύ τα έξοδα για την κάθε εταιρεία.

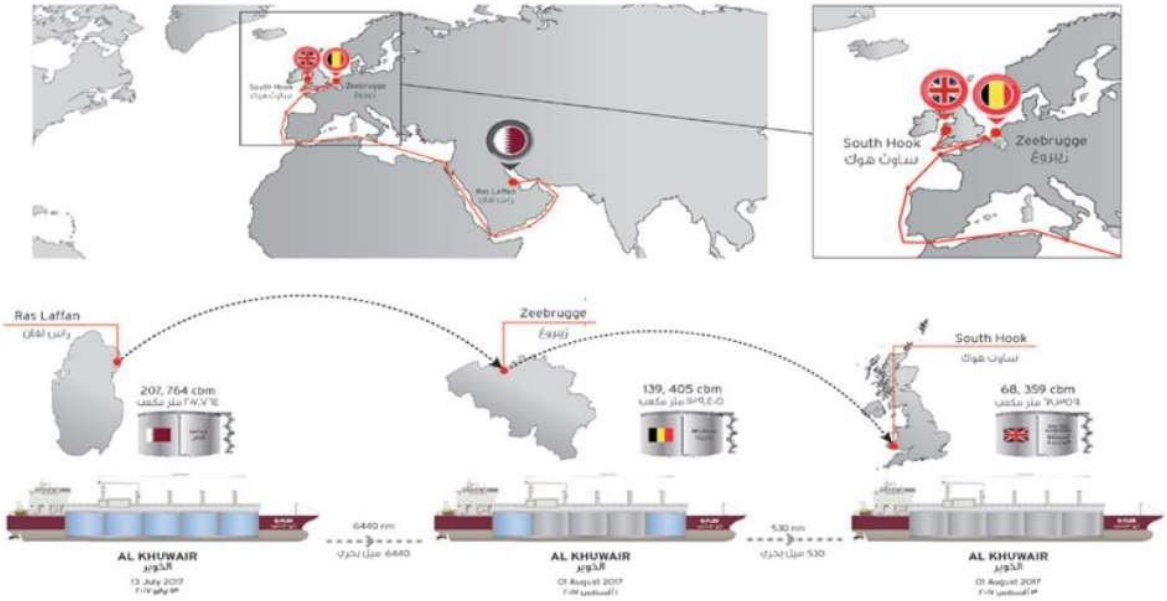
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στις Φιλιππίνες, όπου το 2015 υπογράφηκε μία συμφωνία, η οποία επιτρέπει σε πλοία του εξωτερικού να μεταφέρουν φορτίο σε περισσότερα από ένα λιμάνια της χώρας, με σκοπό την μείωση των εξόδων μεταφοράς. Η πρώτη εφαρμογή της συμφωνίας αφορούσε έξι εταιρείες, οι οποίες γέμισαν με φορτίο ένα φορτηγό πλοίο και το μετέφεραν στα λιμάνια της Μανίλα (Manila International Container Terminal, Manila South Harbor), ενώ στη συνέχεια οι ίδιες εταιρείες μετέφεραν φορτίο και σε άλλα μεγάλα λιμάνια στις Φιλιππίνες (Πηγή:

https://www.portcalls.com/).

Η φόρτωση ενός πλοίου LNGc από πολλούς ενδιαφερόμενους (co-loading) δεν συνηθίζεται. Είναι μια μέθοδος που παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες στην υλοποίησή της. Αυτές προκύπτουν στην κατανομή του κόστους της μεταφοράς ανάμεσα στους ενδιαφερόμενους και σε άλλα τυπικά θέματα, τα οποία περιπλέκουν αυτή τη διαδικασία. Τέτοια θέματα είναι ο συγχρονισμός των αναγκών των συνεργαζόμενων εταιρειών, η γενικότερη δυσκολία εύρεσης συνεργαζόμενων εταιρειών και η δυσκολία εύρεσης λύσεων σε οικονομικά θέματα που προκύπτουν. Οι δυσκολίες αυτές είναι προϊόν της μη ανάπτυξης αυτού του τομέα σε ό,τι αφορά την αγορά LNG. Το οικονομικό όφελος που προκύπτει από τη χρήση του co-loading είναι σημαντικό, ωστόσο τις περισσότερες φορές δεν είναι τόσο αξιοσημείωτο, ώστε να αγνοηθεί η περιπλοκότητα και η δυσκολία εφαρμογής αυτής της μεθόδου.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αφορά τον διαχωρισμό του φυσικού αερίου σε περισσότερα από ένα τερματικά είναι το φαινόμενο του 'sloshing'. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται όταν μια δεξαμενή LNG είναι γεμάτη μεταξύ 10% και 70% κατά το ύψος της. Σε τέτοια περίπτωση, λόγω των κυματισμών και των κινήσεων του πλοίου, μετακινείται το υγροποιημένο φυσικό αέριο στις ελεύθερες επιφάνειες, πράγμα που δημιουργεί υψηλές πιέσεις στην επιφάνεια της δεξαμενής. Αυτό το φαινόμενο είναι πολύ επικίνδυνο και είναι άλλος ένας λόγος για τον οποίο αποφεύγεται αυτή η μέθοδος του split delivery. Ωστόσο, υπάρχει τρόπος να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο. Οι δεξαμενές που πρόκειται να εκφορτώσουν LNG αδειάζουν εξ ολοκλήρου και έτσι δεν παραμένει φορτίο στα επικίνδυνα για sloshing ύψη.

Η πρώτη εφαρμογή του co-loading στην αγορά φυσικού αερίου έγινε το 2017 από τις εταιρείες Qatargas και RasGas. Οι δύο εταιρείες μετέφεραν φυσικό αέριο με το Q-Flex LNGc Al Khuwair, το οποίο φόρτωσαν στο τερματικό Ras Laffan του Κατάρ. Ο προορισμός του φορτίου ήταν το τερματικό Zeebrugge στο Βέλγιο και το τερματικό South Hook στο Ηνωμένο Βασίλειο. Συγκεκριμένα, εκφορτώθηκαν 139.405 κυβικά μέτρα LNG στο Βέλγιο και 68.359 κυβικά μέτρα στο Ηνωμένο Βασίλειο. Αξίζει να αναφερθεί, ωστόσο, ότι στη 1 Ιανουαρίου 2018 η RasGas συγχωνεύθηκε με την Qatargas, διαδικασία που ξεκίνησε το 2016 και ολοκληρώθηκε στην παραπάνω ημερομηνία (Πηγή: www.kallanishenergy.com).




*Σχήμα 24: Η πρώτη εφαρμογή co-loading LNG (Πηγή: Qatargas)*

Από την στιγμή που ολοκληρώθηκε το πρώτο co-loading πλοίου που μεταφέρει φυσικό αέριο, πολλά ακόμα παραδείγματα έχουν ακολουθήσει στην Μέση Ανατολή σε φορτία LNG αλλά και γενικότερα στην ναυτιλία. Αυτό συνέβη λόγω της απαγόρευσης πλοίων με σημαία του Κατάρ να έχουν πρόσβαση σε λιμάνια της Αιγύπτου, του Μπαχρέιν, των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων και της Σαουδικής Αραβίας (Tay et al., 2017). Το Κατάρ έχει μικρή παραγωγή φυσικού αερίου σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες της Μέσης Ανατολής και λόγω αυτής της απαγόρευσης αρκετές εταιρείες έχουν καταφύγει στην εξαγωγή φυσικού αερίου σε τερματικά με μικρότερη ζήτηση, πράγμα που ευνοεί την χρήση co-loading. Μεταξύ τερματικών της Ευρώπης δεν έχει γίνει εκτεταμένη χρήση αυτής της μεθόδου split delivery.

Ο συνηθέστερος τρόπος διαχωρισμού του φυσικού αερίου σε μικρότερες ποσότητες είναι με την μέθοδο του break bulk. Ο όρος αυτός αναφέρεται σε φορτίο, το οποίο μπορεί να φορτωθεί σε ένα πλοίο ξεχωριστά και όχι χύδην. Τέτοια παραδείγματα βρίσκονται σε κουτιά, containers, βαρέλια, σάκους και πολλά άλλα. Ωστόσο, αυτός ο όρος έχει καθιερωθεί και σε υγρά φορτία όπως το LNG (liquid bulk), καθώς το φορτίο θεωρείται ότι δεν είναι χύδην, αφού φορτώνεται σε δεξαμενές.

Με τον όρο break in bulk point αναφέρονται τα σημεία στα οποία το φορτίο διαμοιράζεται από ένα μεταφορικό μέσο σε ένα άλλο. Για παράδειγμα, στα λιμάνια το φορτίο μπορεί να μοιραστεί από ένα πλοίο σε άλλα ή από ένα πλοίο σε φορτηγά για τη χερσαία μεταφορά του φορτίου. Ιστορικά, η μεταφορά φορτίου με break bulk ήταν η πιο συνηθισμένη. Ωστόσο, από τη δεκαετία του 1960 και μετά η μεταφορά με αυτόν τον τρόπο σταδιακά μειώνεται, καθώς τα containers αποτελούν τον βασικό χώρο αποθήκευσης φορτίου πλέον. Αυτό συμβαίνει καθώς με τα containers η μεταφορά φορτίου έχει γίνει πολύ πιο γρήγορη και αποτελεσματική.

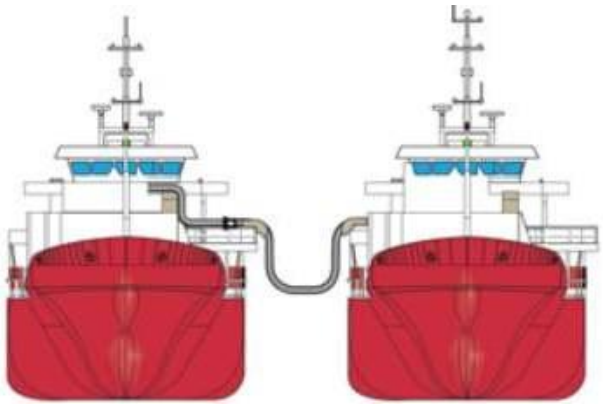
Παρ' όλο που η μεταφορά του φορτίου και η φόρτωσή του στο πλοίο γίνεται συχνά με τραίνο ή με φορτηγά, ο συνηθέστερος τρόπος είναι το φορτίο να έχει φτάσει και να έχει αποθηκευτεί στο λιμάνι πριν από την άφιξη του πλοίου. Όταν το πλοίο φτάνει στο λιμάνι, το φορτίο βγαίνει από τις αποθήκες και φορτώνεται με γερανούς ή άλλα μέσα. Με ανάλογο τρόπο γίνεται και η εκφόρτωση του πλοίου. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ χρονοβόρα και χρειάζεται πολλά εργατικά χέρια.

*Σχήμα 25: Φόρτωση χαρτιού υγείας στο λιμάνι Hamina στη Φινλανδία*

Όπως αναφέρθηκε, η αγορά break bulk έχει συρρικνωθεί σε κάποιο βαθμό λόγο της μεταφοράς φορτίου με containers. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα πολλές περιπτώσεις στις οποίες η αγορά break bulk παίζει σημαντικό ρόλο γενικότερα στην ναυτιλία. Ενδεικτικά, στο λιμάνι της Βαρκελώνης γίνεται σε μεγάλο βαθμό μεταφορά φορτίου με break bulk. Είναι το μεγαλύτερο λιμάνι της Ισπανίας σε ό,τι αφορά το διεθνές εμπόριο. Από τη Βαρκελώνη οι εταιρείες μπορούν να φτάσουν πάνω από 400 εκατομμύρια πελάτες σε κάτω από 48 ώρες. Οι βασικές περιοχές στις οποίες μεταφέρεται φορτίο από τη Βαρκελώνη είναι η Νότια και η Κεντρική Ευρώπη και η Βόρειος Αμερική. Παράλληλα, αποτελεί τη σύνδεση μεταξύ της Άπω Ανατολής και της Λατινικής Αμερικής. Το λιμάνι της Βαρκελώνης προσφέρει πάνω από 41.200 θέσεις εργασίας και από αυτό προέρχεται το 73% του εξωτερικού εμπορίου της Βαρκελώνης και το 24% της Ισπανίας γενικότερα (Πηγή: www.europe.breakbulk.com/).

Στην Αμερική, το λιμάνι του Houston είναι πρώτο σε φορτίο break bulk. Τα βασικά υλικά που μεταφέρονται είναι χάλυβας, ξύλο και εξαρτήματα παραγωγής αιολικής ενέργειας. Ειδικά από το τελευταίο έχει επωφεληθεί ιδιαίτερα η break bulk βιομηχανία στο Τέξας. Για παράδειγμα, το λιμάνι του Corpus Christi το 2015 δέχτηκε 70 πλοία που μετέφεραν εξαρτήματα παραγωγής αιολικής ενέργειας, καθώς αποτελεί περιοχή στην οποία μπορεί να αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό. Το λιμάνι του Houston διαθέτει 47 αποβάθρες με εξοπλισμό ανύψωσης βαρέος φορτίου. Το 2016 οι λιμενικές αρχές επένδυσαν 35 εκατομμύρια δολάρια στα break-bulk τερματικά στην ευρύτερη περιοχή (Πηγή: www.bisnow.com).

Ο διαχωρισμός του LNG από ένα μεγάλο πλοίο σε μικρότερα γίνεται με την τεχνολογία ship to ship (STS) (Sugawara & Nikaido, 2014). Με αυτή τη μέθοδο, ένα συνήθως μικρότερο πλοίο τοποθετείται δίπλα σε ένα μεγαλύτερο και έτσι μεταβιβάζεται ένα μέρος του φορτίου στο μικρότερο πλοίο. Τις περισσότερες φορές τα πλοία χρειάζεται να βρίσκονται σε λιμάνι για να γίνει αυτή η μεταφορά. Ωστόσο, αρκετές φορές η μεταφορά γίνεται και εν πλω, ειδικά σε περίπτωση που μεταφέρεται φυσικό αέριο, που χρησιμοποιείται ως καύσιμο, για ανεφοδιασμό. Η μεταφορά αυτή γίνεται με ειδικά διαμορφωμένες αντλίες, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



*Σχήμα 26: Ship to ship transfer*

*Σχήμα 27: Σύστημα Ship to ship transfer*

Αυτή η μέθοδος split delivery είναι πολύ διαδεδομένη και βοηθάει ιδιαίτερα την ανάπτυξη της αγοράς SSLNG. Τα μικρότερα πλοία μπορούν να παίρνουν φυσικό αέριο από τα μεγαλύτερα και να το μεταφέρουν σε μικρότερα τερματικά. Έτσι, υπάρχει πρόσβαση σε φυσικό αέριο σε απομακρυσμένες περιοχές, ενώ με αυτόν τον τρόπο υπάρχει και σύνδεση της συμβατικής αγοράς LNG με την αγορά SSLNG. Επιπλέον, η δημιουργία ενός δικτύου διανομής φυσικού αερίου καθίσταται δυνατή μέσω της ship to ship διανομής φυσικού αερίου.

Η τροποποίηση ενός συμβατικού τερματικού σε τερματικό που να υποστηρίζει δυνατότητες break bulk και SSLNG περιέχει και ορισμένες δυσκολίες. Ένα βασικό πρόβλημα είναι αυτό της συμβατότητας του εξοπλισμού SSLNG με ένα συμβατικό τερματικό, καθώς η διαφορά κλίμακας οδηγεί στην ανάγκη για εγκατάσταση διαφορετικού εξοπλισμούσε σχέση με τον συμβατικό (σωλήνες, αντλίες, χώροι για SSLNGc, φορτηγά). Άλλο ένα αξιοσημείωτο πρόβλημα βρίσκεται στην ποιότητα του LNG, ειδικά σε ότι αφορά τα πλοία που το χρησιμοποιούν ως καύσιμο και έχουν συγκεκριμένη απαίτηση σε περιεκτικότητα μεθανίου. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι κάθε εθνικό δίκτυο αερίου έχει διαφορετικές προδιαγραφές για την ποιότητα του LNG. Ο αυξημένος αριθμός των ενδιαφερόμενων αποτελεί ένα ακόμα εμπόδιο, καθώς κάνουν τη λειτουργία και τον καταμερισμό των ευθυνών και των εσόδων πιο περίπλοκα ζητήματα. Τέλος, υπάρχουν και ζητήματα αποθήκευσης, διατήρησης και διανομής του φυσικού αερίου που είναι πιθανόν να προκύψουν.

Η μέθοδος break-bulk συνδέεται άμεσα με την αγορά small scale LNG, καθώς είναι ο βασικός τρόπος με τον οποίο το φυσικό αέριο διανέμεται στα μικρότερα τερματικά. Για αυτό το λόγο, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της αγοράς SSLNG τα τελευταία χρόνια, πολλά

τερματικά έχουν αναπτύξει αυτή τη λειτουργία. Οι χώρες που έχουν αναπτύξει την μέθοδο break bulk ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις χώρες στις οποίες υπάρχει άνθιση της αγοράς SSLNG και είναι κυρίως η Κίνα, η Ιαπωνία, η Τουρκία, η Νορβηγία και κάποιες άλλες χώρες της Ευρώπης (Asia Pacific Energy Research Centre (APERC), 2019). Στον παρακάτω πίνακα της IGU παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα τερματικών Ευρωπαϊκών χωρών που υποστηρίζουν τη λειτουργία break bulk. Σημειώνεται ότι ορισμένα από αυτά τα τερματικά υποστηρίζουν τη λειτουργία αυτή σε ότι αφορά τη μεταφορά από πλοίο σε φορτηγά που μεταφέρουν φυσικό αέριο.

*Πίνακας 5: Ευρωπαϊκά τερματικά με break-bulk δυνατότητες (Πηγή: IGU)*

| Country | Terminal | Vessel reloading | Truck loading |
|---|---|---|---|
| Belgium | Zeebrugge | ✓ | ✓ |
| France | Fos Max | ✓ | ✗ |
| | Fos Tonkin | ✗ | ✓ |
| | Montoir | ✓ | ✓ |
| Netherlands | Gate | ✓ | ✓ |
| Portugal | Sinès | ✓ | ✓ |
| Spain | Cartagena, Barcelona, Huelva, Mugardos | ✓ | ✓ |
| | Bilbao, Sagunto, Gijon | ✗ | ✓ |

Μια εκτενής έρευνα που έγινε από τους *Siyuan Wang* και *Theo Notteboom* εστίασε σε οκτώ λιμάνια της Ευρώπης (μερικά από τα οποία αναφέρονται και στον παραπάνω πίνακα) και ανέλυσε τους λόγους για τους οποίους έχουν αναπτύξει δυνατότητες break bulk και ανεφοδιασμού πλοίων που κινούνται με υγροποιημένο φυσικό αέριο και γενικότερα τον τρόπο λειτουργίας τους. Τα λιμάνια στη Zeebrugge (Βέλγιο), στο Rotterdam (Ολλανδία) και στη Στοκχόλμη (Σουηδία) ήδη διέθεταν υποδομές για LNGc, ενώ τα υπόλοιπα λιμάνια (Antwerp – Βέλγιο, Βρέμη και Αμβούργο - Γερμανία, Gothenburg και Helsingborg – Σουηδία) ανέπτυξαν τις απαραίτητες υποδομές μόνο για αυτόν τον σκοπό. Μάλιστα, το λιμάνι της Zeebrugge ήταν από τα πρώτα λιμάνια εισαγωγής LNG στην Ευρώπη. Το συγκεκριμένο, όπως και αυτό του Rotterdam αρχικά είχαν κατασκευαστεί για να ικανοποιήσουν την χερσαία ζήτηση για φυσικό αέριο (σε βιομηχανίες, οικιακή χρήση και άλλα), ενώ το λιμάνι της Στοκχόλμης εξ αρχής λειτουργούσε για ανεφοδιασμό πλοίων και φορτηγών με φυσικό αέριο.

Τα λιμάνια στην Zeebrugge και στο Rotterdam έχουν αναπτύξει λειτουργίες break bulk που εκτός από το να ικανοποιούν τη ζήτηση των δικών τους λιμανιών, λειτουργούν και ως

λιμάνια – δορυφόροι για την κάλυψη της ζήτησης των κοντινών περιοχών. Στο λιμάνι της Antwerp αρχικά δεν κατασκευάστηκαν χερσαίες εγκαταστάσεις για τον ανεφοδιασμό των πλοίων. Αντίθετα, ο ανεφοδιασμός ξεκίνησε με την παραγγελία ενός πλοίου που θα ικανοποιούσε αυτόν τον σκοπό. Επομένως, γινόταν μόνο ship to ship μεταφορά LNG. Αυτή η λειτουργία του λιμανιού υπάρχει από το 2012 ενώ κανονική προβλήτα ανεφοδιασμού εγκαταστάθηκε μόλις το 2019.

Σε ό,τι αφορά τον ανεφοδιασμό σε αυτά τα λιμάνια, σχεδόν όλα χρησιμοποιούν πλέον τον ίδιο τρόπο για να τον πετύχουν. Συγκεκριμένα, για τον ανεφοδιασμό των πλοίων χρησιμοποιούν την ship to ship μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου, ενώ για τις χερσαίες μεταφορές και ορισμένες φορές για μικρά πλοία χρησιμοποιούν την μέθοδο truck to ship. Αργά ή γρήγορα, όλα τα παραπάνω λιμάνια ανέπτυξαν τις παραπάνω λειτουργίες, λόγω των κανονισμών Marpol Annex VI. Μάλιστα, τα οκτώ λιμάνια ανήκουν στην Βαλτική και στην Βόρεια θάλασσα, οι οποίες ανήκουν στις περιοχές ελέγχου εκπομπών αερίων ( Emission Control Areas – ECAs), πράγμα που επιτάχυνε τις διαδικασίες για ανάπτυξη των απαιτούμενων εγκαταστάσεων.

Όπως έχει αναφερθεί, το LNG μεταφέρεται από πλοίο σε πλοίο όχι μόνο ως φορτίο αλλά και ως καύσιμο. Το γεγονός αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της αγοράς LNG και του break bulk. Τα βασικότερα σημεία ανεφοδιασμού με κριτήριο το μέγεθος των πωλήσεων είναι η Σιγκαπούρη (42,4 εκατομμύρια κυβικά μέτρα), η Fujairah (24 εκατομμύρια κυβικά μέτρα), το Rotterdam (10,6 εκατομμύρια κυβικά μέτρα), το Hong Kong (7,4 εκατομμύρια κυβικά μέτρα) και το Antwerp (6,5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα) (IEE, 2018). Τα παραπάνω καλύπτουν το 60% των παγκόσμιων αναγκών για LNG ως καύσιμο. Στον παρακάτω πίνακα (Πηγή: DNV & ICCT Data from OIES) παρουσιάζονται και τα συνολικά ποσά LNG που καταναλώνονται ως καύσιμο ανά τύπο πλοίου.

*Πίνακας 6: Παγκόσμια κατανάλωση LNG ως καύσιμο (Πηγή: DNV)*

| Category | Fuel consumed (mte LNG ) | Number of vessels | Average consumption (mte LNG) |
|---|---|---|---|
| Container | 52.5 | 5,009 | 10,491 |
| Bulk carrier | 43.6 | 10,650 | 4,097 |
| Oil tanker | 31.6 | 6,395 | 4,938 |
| Chemical tanker | 14.2 | 4,720 | 2,999 |
| General cargo | 13.2 | 10,973 | 1,202 |
| LPG/LNG tankers | 12.7 | 1,687 | 7,509 |
| Cruise | 9.6 | 477 | 20,170 |
| Ferry (ro-ro and pax) | 10.2 | 5,288 | 1,933 |
| Vehicle/ro-ro | 11.4 | 2,236 | 5,658 |
| Service | 8.8 | 25,317 | 397 |
| Refrigerated | 3.8 | 4,876 | 779 |
| Offshore | 3.5 | 785 | 4,477 |
| Other + Unclassified | 23.0 | 21,021 | 1,094 |
| Total | 238.1 | 99,434 | 2,393 |

Στην Ασία υπάρχει μεγάλη άνθιση στον τομέα της χρήσης LNG ως καύσιμο. Για αυτό τον λόγο τα τελευταία αναπτύσσονται δυνατότητες break bulk στα περισσότερα λιμάνια. Ενδεικτικά, στην Yokohama (Ιαπωνία) το 2015 ξεκίνησε ο truck to ship μεταφορά LNG, ενώ το 2020 θα ξεκινήσει η ship to ship μεταφορά. Στην Shanghai εκτελούνται και οι δύο τρόποι μεταφοράς LNG και μάλιστα το 2018 εγκαταστάθηκε πλοίο με σκοπό τον ανεφοδιασμό άλλων με ship to ship μεταφορά. Το λιμάνι έχει χωρητικότητα 3 Mtpa. Η Fujairah είχε σκοπό να γίνει ένα βασικό σημείο ανεφοδιασμού LNG και παρ' όλο που η πρώτη ship to ship μεταφορά έγινε μόλις το 2017, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σήμερα είναι το δεύτερο σημείο ανεφοδιασμού παγκοσμίως. Το ίδιο ισχύει και στην Σιγκαπούρη, όπου μάλιστα η μεταφορά LNG γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με truck to ship μέθοδο. Ωστόσο, στη Σιγκαπούρη έχει γίνει παραγγελία για ένα πλοίο χωρητικότητας 7.500 κυβικά μέτρα με σκοπό την ship to ship μεταφορά LNG, το οποίο αναμένεται να είναι έτοιμο μέχρι το τέλος του 2020 (IEE, 2018). Τέλος, στην Νότια Κορέα το 2019 παραδόθηκαν δύο πλοία χωρητικότητας 7.500 κυβικά μέτρα το καθένα από την εταιρεία Samsung Heavy Industries (Πηγή: https://pulsenews.co.kr/). Το ένα χρησιμοποιείται για μεταφορά small scale LNG και το άλλο για ανεφοδιασμό πλοίων που χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο.

# 5 Μαθηματική μοντελοποίηση

Ο σκοπός του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύσσεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι η εύρεση του βέλτιστου μίγματος στόλου για διαμερισμό φορτίου LNG σε αγορά μικρής κλίμακας. Επιπλέον, υπολογίζεται το κόστος κατασκευής και λειτουργίας αυτού του στόλου, καθώς επίσης και οι διαδρομές που θα εκτελέσουν τα πλοία για την κάλυψη της ζήτησης. Εξετάζεται η σκοπία του ιδιοκτήτη του στόλου, ο οποίος παράλληλα τον διαχειρίζεται. Επομένως, το βέλτιστο μίγμα στόλου αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας του.

Το μαθηματικό μοντέλο που αναλύεται παρακάτω έχει ως σκοπό να αποτελέσει ένα εργαλείο που θα βοηθήσει τον χρήστη να πάρει αποφάσεις τόσο ως προς την δημιουργία ενός στόλου πλοίων SSLNGc αλλά και ως προς τη λειτουργία του. Συχνά στη βιβλιογραφία το πρόβλημα επιλογής βέλτιστου μίγματος στόλου αναφέρεται ως 'fleet size and mix vehicle routing problem' (FSMVRP). Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην φάση του αρχικού σχεδιασμού και της οικονομικής μελέτης εφικτότητας για ενδιαφερόμενους στην αγορά small scale LNG. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο αφορά ναυτιλιακές εταιρείες οι οποίες έχουν σκοπό να έχουν στην κατοχή τους και να διαχειρίζονται στόλο πλοίων SSLNGc και παράλληλα ενδιαφέρονται να εξερευνήσουν νέους πελάτες και περιοχές για διανομή LNG (δηλαδή περιοχές οι οποίες προηγουμένως μπορεί να μην είχαν πρόσβαση σε αυτό).

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθεί το συγκεκριμένο μοντέλο, καθώς επίσης και οι παράμετροι και οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται.

Αρχικά, πρέπει να ορίστουν κάποια στοιχεία που αφορούν το μοντέλο και χρησιμοποιούνται παρακάτω, καθώς επίσης και παραδοχές που έχουν γίνει για να μπορεί να υλοποιηθεί το μοντέλο. Αυτά τα στοιχεία αφορούν τον χρονικό ορίζοντα, τα ταξίδια και τα συμβόλαια για τα οποία λειτουργεί ο αλγόριθμος, καθώς επίσης και στοιχεία για τα πλοία από τα οποία επιλέγεται ο στόλος και τα τερματικά που εξετάζονται στο μοντέλο.

Τα πλοία, από τα οποία επιλέγεται το βέλτιστο μίγμα στόλου, έχουν κινητήρες dual - fuel, οι οποίοι καταναλώνουν φυσικό αέριο και MDO. Αυτή η παραδοχή γίνεται καθώς όπως έχει αναφερθεί παραπάνω (ενότητα 3.1), τα περισσότερα πλοία SSLNGc χρησιμοποιούν αυτά τα καύσιμα για πρόωση. Τα πλοία θεωρείται ότι έχουν σταθερή ταχύτητα σε όλη τη διάρκεια του ταξιδιού, τόσο σε κατάσταση στην οποία είναι μερικώς ή εντελώς φορτωμένα με LNG, όσο και σε κατάσταση που είναι άφορτα και επιστρέφουν στο κεντρικό τερματικό για ανεφοδιασμό (ballast voyage). Η κατανάλωση καυσίμων θεωρείται επίσης σταθερή, τόσο στα ταξίδια με φορτίο, όσο και στα ταξίδια με έρμα και στα λιμάνια. Επιπλέον, ο στόλος μπορεί να αποτελείται από ένα μόλις πλοίο, αν φυσικά αυτή είναι η βέλτιστη επιλογή και είναι αρκετό για κάλυψη της μηνιαίας ζήτησης, ή από περισσότερα, τα οποία μπορεί να είναι ίδια ή διαφορετικά μεταξύ τους. Επομένως, ο στόλος μπορεί να είναι είτε ομογενής είτε ετερογενής. Τέλος, η τιμή των καυσίμων θεωρείται σταθερή σε όλο τον χρονικό ορίζοντα.

Τα τερματικά που εισάγονται στο μοντέλο είναι τα τερματικά αεριοποίησης, στα οποία καταλήγει το LNG και ένα κεντρικό τερματικό, από το οποίο προέρχεται το LNG. Το

κεντρικό τερματικό δεν είναι απαραίτητα τερματικό υγροποίησης. Μπορεί να είναι ένα τερματικό στο οποίο έχει φτάσει LNG από άλλο τερματικό υγροποίησης και αποθηκεύεται εκεί τόσο για τοπική χρήση, όσο και για διανομή στα μικρότερα τερματικά αεριοποίησης που εισάγονται στο μοντέλο. Η χωρητικότητα του κεντρικού τερματικού δεν λαμβάνεται υπ' όψη στο μοντέλο, καθώς η ζήτηση των μικρών τερματικών είναι προφανώς μικρότερη από τη χωρητικότητά του. Ακόμα, χωρητικότητα των μικρότερων λιμανιών εισαγωγής δεν λαμβάνεται ως παράμετρος και έτσι θεωρείται ότι δεν θα αποτελέσει πρόβλημα κατά τη χρονική διάρκεια του προγράμματος. Αυτή η παραδοχή κρίνεται λογική, καθώς θεωρείται προφανές ότι η ζήτηση που θα εισαχθεί μπορεί να υποστηριχθεί από τα αντίστοιχα λιμάνια. Επιπλέον, το LNG που μεταφέρεται θεωρείται ότι έχει σταθερή σύσταση και έτσι δεν λαμβάνονται υπ' όψη τα χαρακτηριστικά του. Αυτό είναι λογικό, καθώς το LNG προέρχεται από ένα κεντρικό τερματικό. Παράλληλα, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν τεχνικοί περιορισμοί που εμποδίζουν τη συμβατότητα μεταξύ των λιμανιών.

Σε ότι αφορά τον χρονικό ορίζοντα, για την κατασκευή του μοντέλου ορίστηκε στα 10 έτη. Ορίστηκε μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς λαμβάνεται υπόψη το κόστος κατασκευής των πλοίων, το οποίο προφανώς θα αποτελούσε σχεδόν αποκλειστικό παράγοντα στην επιλογή του βέλτιστου μίγματος στόλου σε περίπτωση μικρού χρονικού ορίζοντα. Για τους υπολογισμούς το διάστημα αυτό χωρίστηκε σε μήνες και κάθε λιμάνι έχει δεδομένη ζήτηση, η οποία θα πρέπει να έχει ικανοποιηθεί μέχρι το τέλος του μήνα. Η μηνιαία ζήτηση κάθε λιμανιού παραμένει σταθερή σε όλο τον χρονικό ορίζοντα του αλγορίθμου. Στον παραπάνω χρονικό ορίζοντα όλα τα πλοία είναι ενεργά και δεν λαμβάνεται υπ' όψη η περίοδος συντήρησης των πλοίων. Επιπλέον, απαραίτητες διεργασίες, όπως ο ανεφοδιασμός των πλοίων, οι προμήθειες, ο ανεφοδιασμός με ανταλλακτικά και άλλα θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα κατά την παραμονή των πλοίων στα λιμάνια. Η παραμονή των πλοίων στα λιμάνια θεωρείται σταθερή κάθε φορά και ίση με μισή ημέρα.

Στο μοντέλο που κατασκευάστηκε υπάρχει ένα κεντρικό τερματικό ανεφοδιασμού, στο οποίο τα πλοία φορτώνουν τις δεξαμενές τους με LNG και το μεταφέρουν στα μικρότερα τερματικά δεδομένης ζήτησης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα ταξίδια που λαμβάνουν χώρα είναι τα εξής:

- Ταξίδια από το κεντρικό τερματικό στα μικρότερα για διανομή LNG.
- Ταξίδια μεταξύ των μικρών τερματικών για διανομή LNG με χρήση split delivery.
- Ταξίδια από ένα μικρότερο τερματικό στο κεντρικό για ανεφοδιασμό.

Στην αρχή κάθε μήνα, όλα τα πλοία έχουν ως σημείο εκκίνησης το κεντρικό τερματικό. Τα πλοία επιστρέφουν στο κεντρικό τερματικό για ανεφοδιασμό μόνο όταν έχουν αδειάσει εντελώς οι δεξαμενές τους (ή όταν τελειώσει ο μήνας), αφού διαφορετικά το υπολειπόμενο LNG θα μεταφερθεί σε άλλο λιμάνι. Επιπλέον, αμελητέα θεωρείται και η ποσότητα LNG που εξατμίζεται (boil - off gas), καθώς τα ταξίδια λαμβάνουν χώρα σε μικρές αποστάσεις και επομένως έχουν μικρότερη διάρκεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εξατμίζεται πολύ μικρή ποσότητα LNG. Όπως αναφέρεται και πιο πάνω (ενότητα 3.3), η ποσότητα LNG που εξατμίζεται είναι της τάξεως του 0,1 – 0,5 % ημερισίως και τα ταξίδια σε μικρές αποστάσεις μπορεί πολλές φορές να διαρκούν κάτω από μία ημέρα. Τέλος, το πρόβλημα του sloshing δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς τα πλοία γεμίζουν πλήρως τις δεξαμενές τους στο κεντρικό

τερματικό και στις περιπτώσεις που γίνεται split delivery θεωρείται ότι αδειάζουν συγκεκριμένες δεξαμενές όσο χρειάζεται για να μην παρουσιάζεται κάποιο πρόβλημα. Δηλαδή, όλες οι δεξαμενές είναι γεμάτες είτε μεταξύ 0 και 10% είτε μεταξύ 70 και 100%, ποσοστά πληρότητας μεταξύ των οποίων δεν παρουσιάζεται πρόβλημα, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 4.

Σε ότι αφόρα τα συμβόλαια, αυτά δεν συνδέονται άμεσα με τα πλοία. Επομένως, κάθε πλοίο μπορεί να μεταφέρει LNG σε πάνω από ένα λιμάνι και δεν είναι συγκεκριμένα τα λιμάνια στα οποία μπορεί να μεταβεί. Η ζήτηση κάθε συμβολαίου και επομένως κάθε λιμανιού είναι δεδομένη και πρέπει να ικανοποιείται κάθε μήνα. Ωστόσο, μέσα στο διάστημα του μήνα ένα λιμάνι μπορεί να παραλάβει φορτίο περισσότερες από μία φορές. Δηλαδή η ζήτηση δεν χρειάζεται να ικανοποιηθεί από μία μόνο διαδρομή. Αρκεί να ικανοποιηθεί εντός της χρονικής περιόδου του ενός μήνα με οποιοδήποτε τρόπο. Επομένως, δεν είναι σταθερή η ποσότητα LNG που μεταφέρεται σε κάθε διαδρομή προς ένα συγκεκριμένο τερματικό. Η ναυτιλιακή εταιρεία, η οποία έχει στην κατοχή της και διαχειρίζεται τον στόλο, επωμίζεται και τα λειτουργικά έξοδά του.

Σε αυτό το σημείο έχουν δοθεί όλες οι απαραίτητες παραδοχές που απαιτούνται για το μαθηματικό μοντέλο. Το μοντέλο χωρίζεται σε 4 βασικά βήματα, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

Αρχικά, εισάγονται τα δεδομένα στο πρόγραμμα από ένα αρχείο του excel. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τους τύπους πλοίων (για κάθε τύπο εισάγονται: χωρητικότητα, κόστος κατασκευής, ταχύτητα, κατανάλωση LNG ως καύσιμο και κατανάλωση MDO), τα τερματικά (για κάθε τερματικό εισάγεται η ζήτηση), τις αποστάσεις μεταξύ των τερματικών (συμπεριλαμβανόμενου και του κεντρικού τερματικού), την τιμή του LNG ως καυσίμου, την τιμή του MDO και τον συντελεστή r1 για τον υπολογισμό της καθαράς παρούσας αξίας. Τα δεδομένα αυτά θα χρειαστούν για τους υπολογισμούς των παρακάτω βημάτων. Επιπλέον, εισάγονται και οι χρονικές περίοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω ως παράμετροι. Αυτό γίνεται καθώς όπως αναφέρθηκε το μοντέλο λειτουργεί σε βάθος δεκαετίας χωρισμένο σε μήνες. Ωστόσο, αυτή η παραδοχή θα μπορούσε εύκολα να αλλάξει και να εξεταστεί μικρότερος ή μεγαλύτερος χρονικός ορίζοντας (π.χ. πενταετίας) ή ζήτηση που πρέπει να καλυφθεί σε περισσότερες ή λιγότερες ημέρες (π.χ. σε 20 ημέρες). Τέλος, εισάγεται και η αρχική θέση των πλοίων, η οποία όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι το κεντρικό τερματικό. Οι παράμετροι που εισάγονται σε αυτό το βήμα είναι οι παρακάτω:

- TH1, Χρονική περίοδος (μέρες) - στην προκειμένη περίπτωση είναι ίσο με 30
- TH2, Χρονική περίοδος (χρόνια) - στην προκειμένη περίπτωση είναι ίσο με 10
- r1, συντελεστής καθαράς παρούσας αξίας

Για τα πλοία:

- S, Ταχύτητες πλοίων που εισάγονται στο μοντέλο (km/h)
- Cap, Χωρητικότητες πλοίων που εισάγονται στο μοντέλο (κυβικά μέτρα LNG)

- NBC, Κόστος κατασκευής πλοίων που εισάγονται στο μοντέλο ($)
- $Cons_{LNG}$, Κατανάλωση LNG πλοίων που εισάγονται στο μοντέλο (tons/day)
- $Cons_{MDO}$, Κατανάλωση MDO πλοίων που εισάγονται στο μοντέλο (tons/day)
- Pos, θέση πλοίου τύπου v (στην αρχή όλα τα πλοία βρίσκονται στη θέση $Pos_v$ = 1, δηλαδή στο κεντρικό τερματικό)

Κάθε ένα από τα στοιχεία που αναφέρονται για τα πλοία αποτελούν πίνακες με τιμές για κάθε ένα από τα πλοία που εισάγονται. Για παράδειγμα, αν εισαχθούν 5 τύποι πλοίων, για την χωρητικότητα μπορεί ο πίνακας να έχει τη μορφή Cap = [3000 7500 10000 15000 30000]. Για τον πίνακα Pos αντίστοιχα στην αρχή θα είναι Pos = [1 1 1 1 1].

Για τα τερματικά:

- D, Ζήτηση τερματικών που εισάγονται στο μοντέλο χρονική περίοδο TH1 (κυβικά μέτρα LNG)
- Dis, Αποστάσεις μεταξύ των τερματικών που εισάγονται στο μοντέλο (km)

Η ζήτηση αποτελεί πίνακα αντίστοιχο με αυτούς των πλοίων. Για παράδειγμα, για 4 τερματικά ο πίνακας μπορεί να έχει τη μορφή D = [10000 20000 25000 30000]. Αυτά είναι τα τερματικά στα οποία καταλήγει το LNG και δεν περιλαμβάνεται το κεντρικό τερματικό ανεφοδιασμού. Ωστόσο, για τον πίνακα των αποστάσεων δεν ισχύει αυτό, καθώς προφανώς πέρα από τις αποστάσεις των τερματικών μεταξύ τους χρειάζονται και οι αποστάσεις του κάθε τερματικού από το κεντρικό τερματικό. Επομένως, ο πίνακας Dis όταν υπάρχουν 4 τερματικά ζήτησης θα είναι ένας πίνακας 5x5.

Τέλος, για τα κόστη καυσίμων εισάγονται οι τιμές:

- $C_{LNG}$, Κόστος LNG ως καύσιμο ($/ton)
- $C_{MDO}$, Κόστος MDO ($/ton)

Στο δεύτερο βήμα του μοντέλου γίνονται κάποιοι αρχικοί υπολογισμοί, οι οποίοι θα χρειαστούν στη συνέχεια για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους. Με βάση τις επιμέρους ζητήσεις κάθε τερματικού υπολογίζεται η συνολική μηνιαία ζήτηση Z:

- Z, το άθροισμα των επιμέρους ζητήσεων σε χρονική περίοδο TH1, δηλαδή το άθροισμα των στοιχείων του πίνακα D σε χρονική περίοδο TH1

Στη συνέχεια, υπολογίζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί διαδρομών για τους τύπους πλοίων που έχουν εισαχθεί, οι οποίοι είναι αρκετοί για να καλύψουν τη συνολική μηνιαία ζήτηση με μία απόκλιση 20% από αυτή (δηλαδή μέχρι 1,2*Z) και μπαίνουν σε έναν πίνακα. Η απόκλιση εισάγεται στο μοντέλο με σκοπό να εξετασθούν και περιπτώσεις που δεν καλύπτεται ακριβώς η ζήτηση, αλλά μπορεί τελικά να είναι οι βέλτιστες. Αν για παράδειγμα ένας συνδυασμός καλύπτει ακριβώς μια ζήτηση 100.000 $m^3$ και ένας άλλος μπορεί να μεταφέρει 110.000 $m^3$, δεν μπορεί κανείς να γνωρίζει εξ αρχής ποίος από τους δύο θα είναι και ο βέλτιστος. Κάθε διαδρομή εννοείται ως το πλήρες άδειασμα των δεξαμενών ενός πλοίου. Οι πιθανοί

συνδυασμοί στους οποίους καταλήγει το πρόγραμμα υπολογίζονται με τη χρήση δυναμικού προγραμματισμού. Συγκεκριμένα, ακολουθείται μία αναδρομική διαδικασία, στο τέλος της οποίας η συνολική ποσότητα LNG που μεταφέρεται είναι μεταξύ της ζήτησης και του 1,2 της ζήτησης. Η διαφορά με τα περισσότερα προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού είναι ότι σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός διαδρομών (σε πρώτη φάση), αλλά όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί που ικανοποιούν την παραπάνω απαίτηση.

Τα χαρακτηριστικά προβλημάτων δυναμικού προγραμματισμού φαίνονται παρακάτω:

- Οι αποφάσεις πρέπει να λαμβάνονται διαδοχικά.
- Το πρόβλημα χωρίζεται σε βήματα και σε κάθε βήμα λαμβάνεται μία απόφαση.
- Κάθε βήμα έχει ορισμένες καταστάσεις, οι οποίες συνδέονται με αυτό.
- Το αποτέλεσμα της κατάστασης αυτή αποτελεί την νέα παρούσα κατάσταση, η οποία με τη σειρά της συνδέεται με το επόμενο βήμα.
- Η σειρά των αποφάσεων σε κάθε κατάσταση καταλήγουν σε ένα αποτέλεσμα – σκοπό, το οποίο εκφράζεται από μια αντικειμενική συνάρτηση.
- Οι αποφάσεις είναι διακριτές μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη απόφαση σε κάθε βήμα δεν εξαρτάται από τις αποφάσεις που έχουν παρθεί στα προηγούμενα βήματα. Αυτό μπορεί να συμβεί γιατί γνωρίζοντας την παρούσα κατάσταση, υπάρχει όλη η απαραίτητη γνώση των προηγούμενων καταστάσεων.
- Γίνεται χρήση αναδρομικής σχέσης, σύμφωνα με την οποία η διαδικασία επίλυσης ξεκινάει από το τέλος και προχωράει από βήμα σε βήμα, κάθε φορά βρίσκοντας τη βέλτιστη απόφαση στο αντίστοιχο βήμα, μέχρι να καταλήξει στην αρχή.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα που εξετάζεται, η αναδρομική σχέση παρουσιάζεται στην ζήτηση. Στην αρχή της διαδικασίας θεωρείται ότι έχει καλυφθεί ολόκληρη η ζήτηση και έχει απομείνει ζήτηση 0. Σε κάθε βήμα υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μιας διαδρομής οποιουδήποτε τύπου πλοίου που έχει εισαχθεί από τον χρήστη και ανάλογα με τον τύπο που επιλέχθηκε, προστίθεται η χωρητικότητά του στη ζήτηση. Οι αποφάσεις αυτές είναι διακριτές μεταξύ τους γιατί σε κάθε απόφαση υπάρχει διαθέσιμη η απαραίτητη πληροφορία των προηγουμένων, από την άποψη ότι είναι γνωστό το ποσό της ζήτησης που έχει απομείνει να καλυφθεί. Στο τέλος της διαδικασίας, υπάρχουν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί που έχουν καλύψει τη ζήτηση με μία απόκλιση 20% πάνω από αυτή. Αυτή είναι και η βασική διαφορά με τα τυπικά προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού. Στα περισσότερα προβλήματα το ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην εύρεση της βέλτιστης λύσης (είτε αυτή είναι από οικονομική άποψη είτε από οποιαδήποτε άλλη άποψη εξετάζεται ένα πρόβλημα). Εδώ ωστόσο, αρχικά ενδιαφέρει να βρεθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί διαδρομών και να αποκλειστούν οι συνδυασμοί που είτε δεν αρκούν για τη ζήτηση είτε την υπερκαλύπτουν.Ένα παράδειγμα της παραπάνω διαδικασίας είναι το εξής:

Έστω ότι υπάρχουν διαθέσιμα πλοία χωρητικότητας 10.000 $m^3$, 20.000 $m^3$ και 25.000 $m^3$ και συνολική ζήτηση 50.000 $m^3$. Στο πρότο βήμα έχει καλυφθεί ολόκληρη η ζήτηση. Υπάρχει η επιλογή για οποιοδήποτε από τα τρία πλοία. Από τη στιγμή που δεν υπάρχει βέλτιστη

επιλογή, και οι τρεις επιλογές είναι πιθανές. Στο επόμενο βήμα, υπάρχουν ήδη αποθηκευμένες τρεις επιλογές: να έχει απομείνει ζήτηση 10.000 $m^3$, 20.000 $m^3$ και 25.000 $m^3$. Για κάθε μία από αυτές υπάρχουν άλλες τρεις επιλογές. Δηλαδή, στην περίπτωση που έχει απομείνει ζήτηση 10.000 $m^3$, τότε στο δεύτερο βήμα μπορεί πάλι να επιλεγεί οποιοσδήποτε από τους τρεις τύπους πλοίων. Στην περίπτωση που έχει απομείνει ζήτηση 25.000 $m^3$ πάλι ισχύει το ίδιο. Ωστόσο, αν σε αυτή την περίπτωση στο δεύτερο βήμα επιλαγεί πάλι πλοίο χωρητικότητας 25.000 $m^3$, τότε έχει καλυφθεί η ζήτηση και έτσι υπάρχει ένας πιθανός συνδυασμός. Στην ίδια περίπτωση, αν έχει επιλαγεί στο πρώτο βήμα πλοίο 25.000 $m^3$ και στο δεύτερο πλοίο 20.000 $m^3$, τότε έχει απομείνει ζήτηση 45.000 $m^3$ (επαναλαμβάνεται πως στην αρχή έχει απομείνει ζήτηση 0 και έτσι σε κάθε βήμα απομένει περισσότερη ζήτηση). Εδώ, στο τρίτο βήμα υπάρχουν πάλι 3 επιλογές. Η επιλογή πλοίου 10.000 $m^3$ καταλήγει σε ζήτηση 55.000 $m^3$, η οποία είναι εντός του επιθυμιτού εύρους και έτσι αποθηκεύεται σαν πιθανός συνδυασμός. Η επιλογή πλοίου 20.000 $m^3$ καταλήγει σε ζήτηση 65.000 $m^3$, η οποία είναι δεν εντός του επιθυμιτού εύρους και έτσι απορρίπτεται. Το ίδιο ισχύει και για την επιλογή πλοίου 25.000 $m^3$. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται αντίστοιχα όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί.

Στη συνέχεια αποθηκεύονται όλοι αυτοί οι συνδυασμοί σε έναν πίνακα P. Στο επόμενο βήμα του αλγορίθμου επιλέγεται ο βέλτιστος από αυτούς τους συνδυασμούς. Αναλυτικότερα, για να κατασκευασθεί αυτός ο πίνακας εφαρμόζεται η διαδικασία δυναμικού προγραμματισμού που αναφέρθηκε και εισάγεται στο πρόγραμμα με τον παρακάτω τρόπο:

Υπολογίζεται ο πίνακας:

- $Max = \frac{Z}{Cap}$, μέγιστος αριθμός διαδρομών (ακέραιος) κάθε τύπου πλοίου που εισάγεται στο μοντέλο για κάλυψη της συνολικής ζήτησης

Για παράδειγμα, αν ένα πλοίο έχει χωρητικότητα 5.000 $m^3$ LNG και η συνολική ζήτηση είναι 50.000 $m^3$ LNG, τότε προφανώς οι μέγιστες διαδρομές που απαιτούνται για κάλυψη της ζήτησης από πλοίο τέτοιου τύπου είναι 10. Αντίστοιχα αν η ζήτηση ήταν 48.000 $m^3$ LNG, τότε πάλι οι μέγιστες διαδρομές θα ήταν 10 γιατί επιλέγεται ο αμέσως επόμενος ακέραιος. Αυτός είναι ένας πίνακας όμοιος με τους πίνακες που εισάγονται στο πρώτο βήμα για τα πλοία. Δηλαδή, αν εισαχθούν 5 τύποι πλοίων, τότε ο πίνακας προφανώς θα έχει και αυτός 5 στοιχεία. Ο πίνακας αυτός χρειάζεται για να υπάρχει ο μέγιστος αριθμός διαδρομών και έτσι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που θα χρειαστούν στη διαδικασία της εύρεσης των πιθανών συνδυασμών διαδρομών.

Στη συνέχεια, γίνονται επαναλήψεις για όλους τους τύπους πλοίων με αριθμούς από το 0 μέχρι το Max κάθε τύπου που υπολογίστηκε παραπάνω. Έτσι, για το πλοίο του παραπάνω παραδείγματος και για αυτή τη ζήτηση στην επανάληψη θα εισαχθούν από 0 εώς 10 διαδρομές. Δηλαδή, στους πιθανούς συνδυασμούς θα υπάρχουν από 0 διαδρομές πλοίου χωρητικότητας 5.000 $m^3$ LNG (δηλαδή δεν θα χρησιμοποιείται πλοίο τέτοιου τύπου) εώς 10 (δηλαδή θα χρησιμοποιούνται μόνο πλοία τέτοιου τύπου γιατί καλύπτουν όλη τη ζήτηση). Έτσι δημιουργείται ο πίνακας:

- P , πίνακας με αριθμό γραμμών ίσο με τους πιθανούς συνδυασμούς και αριθμό στηλών ίσο με τους τύπους πλοίων που έχει εισάγει ο χρήστης στο πρόγραμμα

Για κάθε γραμμή του πίνακα P ίσχυει ότι το άθροισμα του αριθμού των διαδρομών κάθε τύπου πλοίου επί τη χωρητικότητα του αντίστοιχου πλοίου πρέπει να είναι μεταξύ του Z και του 1,2*Z, δηλαδή η συνολική ποσότητα που μπορούν να μεταφέρουν τα πλοία σε χρονική περίοδο TH1 να είναι μεγαλύτερη ή ίση της συνολικής ζήτησης και μικρότερη ή ίση του 1,2*ζήτηση.

Για παράδειγμα, αν έχουν εισαχθεί πλοία με χωρητικότητες 7.500, 10.000 και 20.000 $m^3$ και η συνολική ζήτηση είναι 100.000 $m^3$, τότε ένας πιθανός συνδυασμός διαδρομών (άρα μια γραμμή του πίνακα P) είναι [0 4 3], δηλαδή 0 διαδρομές πλοίων 7.5000 $m^3$ , 4 διαδρομές πλοίων 10.000 $m^3$ και 3 διαδρομές πλοίων 20.000 $m^3$. Αυτό προκύπτει αφού 7.500*0 + 10.000*4 + 20.000*3 = 100.000. Άλλος ένας πιθανός συνδυασμός μπορεί να είναι [0 0 5] ή [10 3 0]. Αυτοί οι συνδυασμοί υπολογίζονται με τη διαδικασία δυναμικού προγραμματισμού που αναφέρθηκε παραπάνω και αποθηκεύονται στον πίνακα P.

Το τρίτο βήμα που ακολουθεί το μοντέλο αφορά την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού διαδρομών, ο οποίος θα οδηγήσει και στο ζητούμενο, που είναι ο βέλτιστος συνδυασμός πλοίων. Παρακάτω γίνεται η περιγραφή αυτού του βήματος και στη συνέχεια αναλύεται περισσότερο η διαδικασία με τους τύπους, τις μεταβλητές και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται.

Σε αυτό το βήμα υπολογίζονται διάφορα μεγέθη για κάθε συνδυασμό που βρέθηκε στο δεύτερο βήμα. Για κάθε συνδυασμό γίνεται μια επαναληπτική διαδικασία, στην οποία ανατίθεται κάποιο πλοίο σε κάποια διαδρομή μέχρι να ικανοποιηθεί η μηνιαία ζήτηση σε όλα τα τερματικά. Όλα τα πλοία έχουν ως αφετηρία το κεντρικό τερματικό, όπως έχει αναφερθεί.

Σε κάθε βήμα της επανάληψης επιλέγεται το μεγαλύτερο διαθέσιμο πλοίο και το τερματικό με τη μεγαλύτερη εναπομείνασα ζήτηση και το πλοίο αυτό στέλνεται στο αντίστοιχο τερματικό. Σε περίπτωση που η χωρητικότητα του πλοίου είναι μικρότερη από τη ζήτηση του τερματικού, τότε το πλοίο αδειάζει πλήρως τις δεξαμενές του και επιστρέφει στο κεντρικό τερματικό για ανεφοδιασμό. Στην αντίθετη περίπτωση, το πλοίο μεταφέρεται στο τερματικό της μεγαλύτερης ζήτησης και παραμένει εκεί, με σκοπό να ξανακληθεί σε επόμενο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας και να γίνει split delivery. Για παράδειγμα, αν η μέγιστη ζήτηση είναι 10.000 $m^3$ και το μεγαλύτερο πλοίο έχει 20.000 $m^3$ διαθέσιμα, τότε θα μεταβεί σε αυτό το λιμάνι και θα παραμείνει εκεί με τα υπολειπόμενα 10.000 $m^3$ στις δεξαμενές του. Σε κάθε περίπτωση, υπολογίζεται το κόστος της μετακίνησής του και προστίθεται στο συνολικό κόστος.

Επιπλέον, υπολογίζεται και η διάρκεια του κάθε ταξιδιού (συμπεριλαμβανόμενης και της παραμονής στα λιμάνια, η οποία έχει οριστεί σταθερή και ίση με μισή μέρα) και αποθηκεύεται, καθώς θα χρειαστεί στη συνέχεια. Στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας, έχει υπολογιστεί το συνολικό κόστος λειτουργίας του στόλου για ένα μήνα και οι συνολικές μέρες λειτουργίας για κάθε τύπο πλοίου. Όλα τα πλοία επιστρέφουν στην αρχική τους θέση, δηλαδή στο κεντρικό τερματικό, καθώς θεωρείται ότι ο κάθε μήνας είναι ίδιος με τον προηγούμενο και έτσι η αφετηρία του επόμενου μήνα για κάθε πλοίο πρέπει να είναι ίδια με αυτή του προηγούμενου.

Με τη χρήση του τύπου της καθαράς παρούσας αξίας υπολογίζεται το συνολικό κόστος λειτουργίας του στόλου για τον χρονικό ορίζοντα που έχει οριστεί (10 χρόνια). Με τις μέρες λειτουργίας που υπολογίστηκαν για κάθε τύπο πλοίου μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των πλοίων από κάθε τύπο που απαιτούνται για την διαδικασία. Για παράδειγμα, αν τα πλοία χωρητικότητας 20.000 $m^3$ ταξιδεύουν 50 μέρες συνολικά για να καλυφθεί η μηνιαία ζήτηση, τότε υπολογίζεται ότι ο αριθμός των πλοίων αυτού του τύπου που απαιτούνται είναι 2. Έτσι, κατασκευάζεται ένας πίνακας παρόμοιος με αυτόν του βήματος 2 (πίνακας P πιθανών συνδυασμών διαδρομών), ο οποίος όμως αντί για διαδρομές θα περιέχει τον αριθμό των πλοίων κάθε τύπου. Το κόστος κατασκευής των πλοίων προστίθεται στο κόστος λειτουργίας και έτσι προκύπτει το συνολικό κόστος για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Παρακάτω φαίνεται αναλυτικότερα η διαδικασία που ακολουθείται και οι τύποι που χρησιμοποιούνται.

Για κάθε συνδυασμό (δηλαδή για κάθε γραμμή του πίνακα P) ακολουθείται η εξής επαναληπτική διαδικασία: Στην αρχή κάθε επανάληψης γίνεται μια ανακατάταξη των συμβολαίων – τερματικών (contract ranking) και ανάθεση ενός συγκεκριμένου πλοίου στο αντίστοιχο τερματικό. Η διαδικασία αυτή γίνεται ως εξής: Ως 'σημαντικότερο' τερματικό, δηλαδή το τερματικό στο οποίο θα σταλεί πλοίο στο επόμενο βήμα ορίζεται το τερματικό με την μεγαλύτερη εναπομείνασα ζήτηση. Για παράδειγμα, μπορεί δύο τερματικά να έχουν ζήτηση 20.000 $m^3$ και 30.000 $m^3$ αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση θα σταλεί φορτίο πρώτα στο δεύτερο τερματικό. Όμως, αν σταλεί για παράδειγμα φορτίο 15.000 $m^3$ στο δεύτερο, τότε στο επόμενο βήμα οι εναπομείνασες ζητήσεις θα είναι 20.000 $m^3$ και 15.000 $m^3$ αντίστοιχα. Επομένως, στο επόμενο βήμα θα δοθεί προτεραιότητα στο πρώτο τερματικό. Σε περίπτωση που δύο τερματικά έχουν την ίδια ζήτηση, τότε επιλέγεται αυτό που είναι πιο κοντά στο πλοίο που θα επιλαγεί να εκτελέσει τη διαδρομή. Το πλοίο που επιλέγεται να εκτελέσει αυτή τη διαδρομή είναι αυτό με το περισσότερο διαθέσιμο φορτίο LNG. Αν η ποσότητα LNG πάνω στο πλοίο είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ζήτηση, τότε το πλοίο μεταφέρει LNG στο τερματικό και παραμένει εκεί με το υπολειπόμενο φορτίο, με σκοπό όταν το πρόγραμμα ξανακαλέσει το συγκεκριμένο πλοίο να γίνει split delivery. Διαφορετικά, αδειάζει το φορτίο του και επιστρέφει στο κεντρικό τερματικό για να ξαναγεμίσει με LNG. Κάθε φορά που το φορτίο μιας διαδρομής φτάνει το 0, τότε αφαιρείται μια διαδρομή του πλοίου. Σε συνέχεια παραδείγματος που αναφέρθηκε παραπάνω, αν ένα πλοίο χωρητικότητας 10.000 $m^3$ χρειαστεί να μεταφέρει ολόκληρο το φορτίο σε ένα τερματικό, τότε θα το μεταφέρει και στη συνέχεια θα επιστρέψει στο κεντρικό τερματικό. Οι διαδρομές που θα απομείνουν θα είναι [0 3 3]. Αντίθετα, αν το ίδιο πλοίο χρειαστεί να μεταφέρει μικρότερη ποσότητα από τις 10.000 $m^3$, τότε θα τις μεταφέρει στο αντίστοιχο τερματικό και θα παραμείνει εκεί με το υπόλοιπο φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση οι διαδρομές που απομένουν θα είναι [0 4 3], δηλαδή δεν θα έχουν μειωθεί, αφού δεν έχει αδιάσει πλήρως το φορτίο του πλοίου. Σε κάθε περίπτωση υπολογίζονται οι ημέρες που διαρκεί το ταξίδι που εκτελεί το πλοίο που επιλέχθηκε στην αντίστοιχη επανάληψη. Για αυτό το λόγο εισάγεται μια νέα μεταβλητή:

- Dur, πίνακας με τη συνολική διάρκεια ταξιδιού πλοίων κάθε τύπου

Αρχικά, αυτή η μεταβλητή μηδενίζεται για όλους τους τύπους πλοίων και σε κάθε βήμα αναλόγως με το τι τύπος πλοίου έχει επιλεχθεί και τη διάρκεια του ταξιδιού προστίθενται

ημέρες στο αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα. Επομένως, αν υπάρχουν 3 διαθέσιμοι τύποι πλοίων, ο πίνακας αυτός αρχικά θα είναι Dur = [0 0 0].

Στην περίπτωση στην οποία το πλοίο που επιλέγεται εκτελεί μία διαδρομή από το κεντρικό τερματικό σε ένα από τα υπόλοιπα τερματικά και στη συνέχεια παραμένει εκεί για split delivery (δηλαδή δεν αδειάζει πλήρως τις δεξαμενές του), τότε στο αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα Dur προστίθεται η τιμή $\frac{Dispos,r}{S*24}$+ 0.5, όπου Dis όπως αναφέρθηκε είναι η απόσταση μεταξύ των τερματικών με τους δείκτες στην προκειμένη περίπτωση να δείχνουν ότι το πλοίο μεταφέρεται από τη θέση του (Pos) στο τερματικό που το έστειλε το μοντέλο (r) και S η ταχύτητα του αντίστοιχου πλοίου. Ο πρώτος όρος διαιρείται με 24 ώστε το αποτέλεσμα να δίνεται σε ημέρες, ενώ στο τέλος προστίθεται το 0,5, καθώς το πλοίο έχει μεταβεί σε ένα λιμάνι και έτσι περνάει μισή μέρα εκεί (όπως αναφέρθηκε και παραπάνω).

Στην περίπτωση στην οποία το πλοίο που επιλέγεται εκτελεί μία διαδρομή από ένα τερματικό σε ένα άλλο και πίσω στο κεντρικό τερματικό (δηλαδή αδειάζει πλήρως τις δεξαμενές του), τότε στο αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα Dur προστίθεται η τιμή $\frac{Dispos,r}{S*24}$+$\frac{Dis1,r}{S*24}$ + 1. Ο νέος δείκτης που εισάγεται εδώ είναι ο δείκτης 1 (στον δεύτερο όρο της σχέσης), ο οποίος δηλώνει το κεντρικό τερματικό. Επιπλέον, εδώ προστίθεται μια ημέρα αντί για μισή, καθώς το πλοίο έχει μεταβεί σε δύο λιμάνια στο συγκεκριμένο ταξίδι και περνάει μισή ημέρα στο κάθε ένα. Αυτή η περίπτωση περιλαμβάνει δύο ύποπεριπτώσεις, στις οποίες όμως χρησιμοποιείται ο ίδιος τύπος και για αυτό το λόγο δεν αναφέρονται ξεχωριστά. Στην πρώτη περίπτωση, το πλοίο βρίσκεται αρχικά στο κεντρικό τερματικό και στη συνέχεια μεταφέρεται σε ένα άλλο τερματικό, στο οποίο αδειάζει πλήρως τις δεξαμενές του. Επομένως, στη συνέχεια θα επιστρέψει κατευθείαν στο κεντρικό τερματικό. Σε αυτή την περίπτωση, η μεταβλητή Pos (στον δείκτη) θα είναι ίση με 1, αφού το σημείο εκκίνησης είναι το κεντρικό τερματικό. Στην δεύτερη περίπτωση, το πλοίο μπορεί να έχει σημείο εκκίνησης ένα τερματικό εκτός του κεντρικού, στη συνέχεια να μεταβεί σε ένα άλλο τερματικό, στο οποίο να αδειάσει τις δεξαμενές του και να επιστρέψει στο κεντρικό τερματικό. Αυτό γίνεται μόνο σε περίπτωση που έχει προηγηθεί ένα ταξίδι και στη συνέχεια γίνεται split delivery, καθώς όπως έχει αναφερθεί το σημείο εκκίνησης όλων των πλοίων είναι το κεντρικό τερματικό.

Έστω ότι ένα πλοίο χωρητικότητας 20.000 $m^3$ LNG πρέπει να μεταφέρει 15.000 $m^3$ LNG σε ένα λιμάνι και 5.000 $m^3$ LNG σε ένα άλλο. Αρχικά, το πλοίο αυτό θα μεταφερθεί στο λιμάνι με τη μεγαλύτερη ζήτηση και η διάρκεια του ταξιδιού θα είναι $\frac{Dispos,r}{S*24}$+ 0.5 και η νέα θέση του (Pos) θα είναι αυτό το λιμάνι. Στη συνέχεια, θα μεταφερθεί στο λιμάνι με τη μικρότερη ζήτηση και η διάρκεια αυτού του ταξιδιού θα είναι $\frac{Dispos,r}{S*24}$+$\frac{Dis1,r}{S*24}$ + 1, ενώ η νέα θέση του πλοίου θα είναι το κεντρικό τερματικό.

Επιπλέον, εισάγεται μια νέα μεταβλητή:

- Cost, το κόστος των ταξιδιών στην περίοδο TH1

Η αρχική τιμή της είναι 0 και κάθε φορά που γίνεται ένα ταξίδι, προστίθεται το κόστος αυτού του ταξιδιού. Αυτό είναι ίσο με $(CLNG * ConsLNG + CMDO * ConsMDO) * Dur$, δηλαδή

το κόστος των καυσίμων ($/tn) επί την κατανάλωση του πλοίου (tn/day) που χρησιμοποιείται στο ταξίδι και όλο αυτό επί τη διάρκεια του ταξιδιού σε ημέρες.

Αυτή η επαναληπτική διαδικασία εκτελείται μέχρι να ικανοποιηθεί η ζήτηση (σε χρονική περίοδο TH1) σε όλα τα λιμάνια. Επομένως, μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία θα έχουν υπολογιστεί οι συνολικές μέρες λειτουργίας κάθε τύπου πλοίου καθώς και το λειτουργικό κόστος του στόλου για χρονική περίοδο TH1. Δηλαδή θα έχουν υπολογιστεί οι τελικές τιμές του πίνακα Dur και της μεταβλητής Cost.

Από την τιμή του Cost και με χρήση του συντελεστή καθαράς παρούσας αξίας (r1), ο οποίος έχει εισαχθεί στο πρώτο βήμα, υπολογίζεται το κόστος λειτουργίας του στόλου σε χρονικό ορίζοντα TH2:

- KPA = $\sum_{i=1}^{TH2} \frac{Cost*12}{(1+r1)^i}$

Από τις τιμές του πίνακα Dur θα υπολογιστούν τα πλοία κάθε τύπου που απαιτούνται για να καλυφθεί η ζήτηση και στη συνέχεια θα υπολογιστεί το συνολικό κόστος κατασκευής του στόλου. Εισάγεται ένας νέος πίνακας:

- Q= $\frac{Dur}{TH1}$, πίνακας με ένα στοιχείο για κάθε τύπο πλοίων που δηλώνει πόσα πλοία κάθε τύπου απαιτούνται για να καλυφθεί η συνολική ζήτηση σε χρόνο TH1

Οι τιμές αυτού του πίνακα πρέπει προφανώς να είναι ακέραιοι, αφού εκφράζουν αριθμό πλοίων. Υπενθυμίζεται ένα παράδειγμα που αναφέρθηκε και παραπάνω σχετικά με αυτόν τον πίνακα. Αν στον αλγόριθμο έχουν εισαχθεί πλοία χωρητικότητας 20.000 $m^3$ και σε έναν πιθανό συνδυασμό ταξιδεύουν 50 μέρες συνολικά για να καλυφθεί η μηνιαία ζήτηση, τότε υπολογίζεται ότι ο αριθμός των πλοίων αυτού του τύπου που απαιτούνται είναι 2.

Τώρα έγινε γνωστός ο αριθμός των πλοίων κάθε τύπου που απαιτούνται και εύκολα μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό κόστος κατασκευής του στόλου:

- NBtotal = NBC*Q, δηλαδή για κάθε τύπο πλοίου πολλαπλασιάζεται το κόστος κατασκευής με τον αριθμό των πλοίων αυτού του τύπου που απαιτούνται

Έτσι, με πρόσθεση του κόστους κατασκευής και του κόστους λειτουργίας υπολογίζεται το συνολικό κόστος:

- Ctotal = KPA + NBtotal

Υπενθυμίζεται ότι όλη η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω (για το βήμα 3) γίνεται για κάθε συνδυασμό του πίνακα P. Επομένως, αν υπάρχουν 50 συνδυασμοί, η παραπάνω διαδικασία θα γίνει 50 φορές. Κάτι που σημαίνει ότι υπάρχουν αντίστοιχα 50 διαφορετικά συνολικά κόστη.

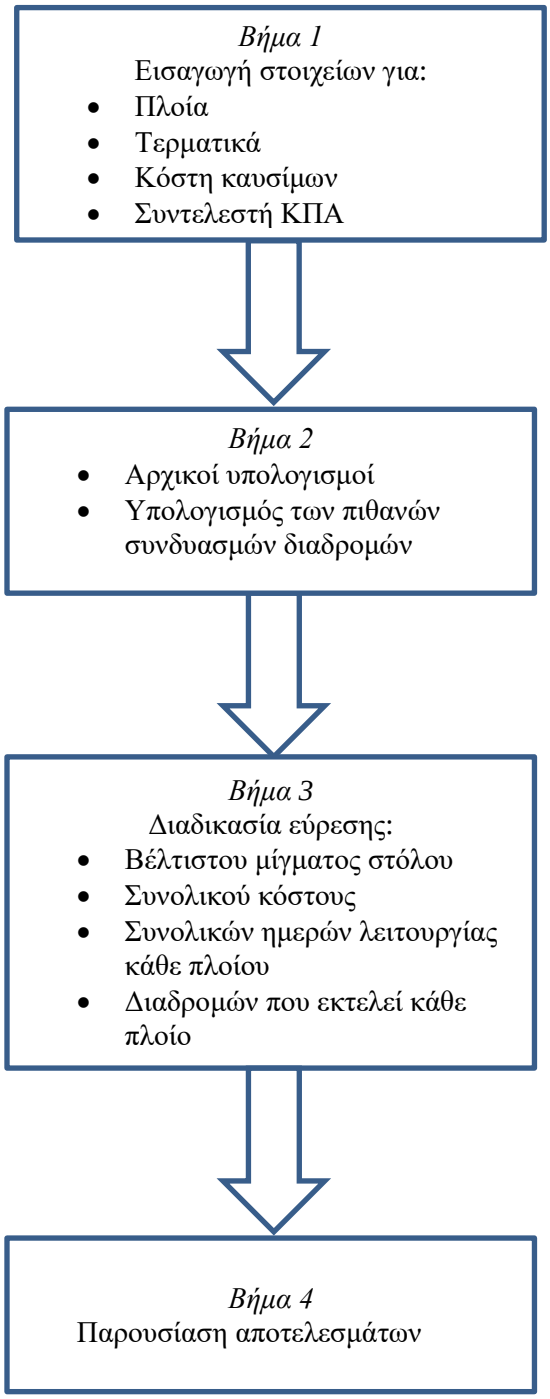
Στο τελευταίο βήμα έχουν ήδη υπολογιστεί τα κόστη για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς πλοίων. Επομένως, αρκεί να βρεθεί το ελάχιστο κόστος και ο συνδυασμός για τον οποίο αυτό επιτυγχάνεται. Αυτό εν μέρει γίνεται παράλληλα με το βήμα 3. Για κάθε συνδυασμό πλοίων, όταν υπολογίζεται το συνολικό κόστος (λειτουργίας και κατασκευής), συγκρίνεται με τα προηγούμενα που έχουν υπολογιστεί και σε περίπτωση που είναι μικρότερο από το

ελάχιστο, τότε θεωρείται ότι αυτό είναι το βέλτιστο. Όταν ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία θα έχουν υπολογιστεί το ελάχιστο κόστος και ο συνδυασμός για τον οποίο αυτό επιτυγχάνεται και εισάγονται σε νέες μεταβλητές:

- Ctotal,best, το ελάχιστο κόστος
- Qbest, ο συνδυασμός για τον οποίο το κόστος είναι ελάχιστο

Πέρα από τον βασικό σκοπό του μοντέλου, ο οποίος παρουσιάστηκε στα παραπάνω βήματα, το πρόγραμμα εκτελεί και κάποιους επιπλέον υπολογισμούς. Αρχικά, με την βοήθεια μιας μεταβλητής, η οποία θα ονομαστεί split, γίνεται γνωστό αν έχει γίνει split delivery στην βέλτιστη περίπτωση. Συγκεκριμένα, στην αρχή κάθε επανάληψης του βήματος 3 αυτή η μεταβλητή έχει την τιμή 0 και σε περίπτωση που έχει γίνει split delivery έστω και μία φορά, τότε θα πάρει την τιμή 1. Ακόμα, εισάγεται ένας πίνακας, ο οποίος για τη βέλτιστη περίπτωση δίνει τα λιμάνια τα οποία επισκέφθηκε ένας τύπος πλοίου τουλάχιστον μια φορά. Για παράδειγμα, αν έχουν εισαχθεί 3 τύποι πλοίων και 5 τερματικά (εκτός από το κεντρικό), τότε δημιουργείται ένας πίνακας 3x5, μόνο με μηδενικά στοιχεία. Αν ένα πλοίο μεταβεί σε ένα λιμάνι είτε μία είτε περισσότερες φορές, τότε το αντίστοιχο κελί παίρνει την τιμή 1. Επιπλέον, για την βέλτιστη επιλογή, κάθε διαδρομή αποθηκεύεται, ώστε στο τέλος ο χρήστης να γνωρίζει συνολικά τη διαδρομή που ακολούθησε κάθε πλοίο. Τέλος, παρουσιάζονται οι μέρες για τις οποίες χρησιμοποιήθηκε κάθε τύπος πλοίου και τα επιμέρους κόστη (λειτουργικά και κατασκευής).

Παρακάτω, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής, στο οποίο φαίνονται πιο συνοπτικά τα βήματα που περιγράφηκαν παραπάνω.


Βήμα 1
Εισαγωγή στοιχείων για:
Πλοία
Τερματικά
Κόστη καυσίμων
Συντελεστή ΚΠΑ
Βήμα 2
Αρχικοί υπολογισμοί
Υπολογισμός των πιθανών συνδυασμών διαδρομών
Βήμα 3
Διαδικασία εύρεσης:
Βέλτιστου μίγματος στόλου
Συνολικού κόστους
Συνολικών ημερών λειτουργίας κάθε πλοίου
Διαδρομών που εκτελεί κάθε πλοίο
Βήμα 4
Παρουσίαση αποτελεσμάτων

# 6 Μελέτη περίπτωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικότερα κάποιες περιπτώσεις, με σκοπό να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του μοντέλου που αναλύθηκε παραπάνω. Εξετάζεται η διανομή LNG σε small scale αγορά και συγκεκριμένα σε λιμάνια της Ελλάδας, τα οποία παραλαμβάνουν LNG από το κεντρικό τερματικό της Ρεβυθούσας, στο οποίο αποθηκεύεται LNG για χρήση σε όλη την Ελλάδα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο χρονικός ορίζοντας σε αυτές τις περιπτώσεις είναι 10 χρόνια. Τα πλοία από τα οποία γίνεται η επιλογή έχουν εύρος από small scale έως medium scale χωρητικότητες και τα χαρακτηριστικά τους βασίζονται σε ήδη υπάρχοντα πλοία, τα στοιχεία των οποίων υπάρχουν στο διαδίκτυο (Πηγή: www.clarksons.net/wfr/). Στον χρονικό ορίζοντα τα πλοία εκτελούν ταξίδια μεταξύ του κεντρικού τερματικού και των μικρότερων τερματικών και δεν υπάρχει περίοδος αδρανείας για κανένα από αυτά. Όλες οι απαραίτητες διεργασίες ανεφοδιασμού με καύσιμα και προμήθειες λαμβάνουν χώρα κατά την παραμονή των πλοίων στα λιμάνια και θεωρείται πως δεν υπάρχει περίοδος συντήρησης των πλοίων ή περίοδοσς που πρέπει να βγουν από τη θάλασσα (dry – docking). Τα διαθέσιμα πλοία καταναλώνουν LNG και MDO. Οι καταναλώσεις παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας των πλοίων. Τα χαρακτηριστικά των πλοίων που εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Για τα πλοία, το πρόγραμμα χρειάζεται τις καταναλώσεις τους σε LNG και MDO (τόνοι/ημέρα), τη χωρητικότητά τους (σε κυβικά μέτρα LNG), τη ταχύτητά τους (σε km/h) και το κόστος κατασκευής τους. Οι καταναλώσεις βασίζονται στους κινητήρες των πραγματικών πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν και στους καταλόγους των κατασκευαστών τους. Στις χωρητικότητες που αναγράφονται δεν συμπεριλαμβάνεται η ποσότητα LNG που καταναλώνεται για την πρόωση των πλοίων. Σημειώνεται ότι ως τιμές καυσίμων θεωρούνται: για LNG 400 $/tn (πηγή: www.hellenicshippingnews.com) και για MDO 390 $/tn (*EMEA Bunker Prices - Ship & Bunker*). Οι τιμές αυτές θεωρούνται σταθερές στην χρονική περίοδο των 10 ετών.

*Πίνακας 7: Διαθέσιμοι τύποι πλοίων για τη μελέτη περίπτωσης*

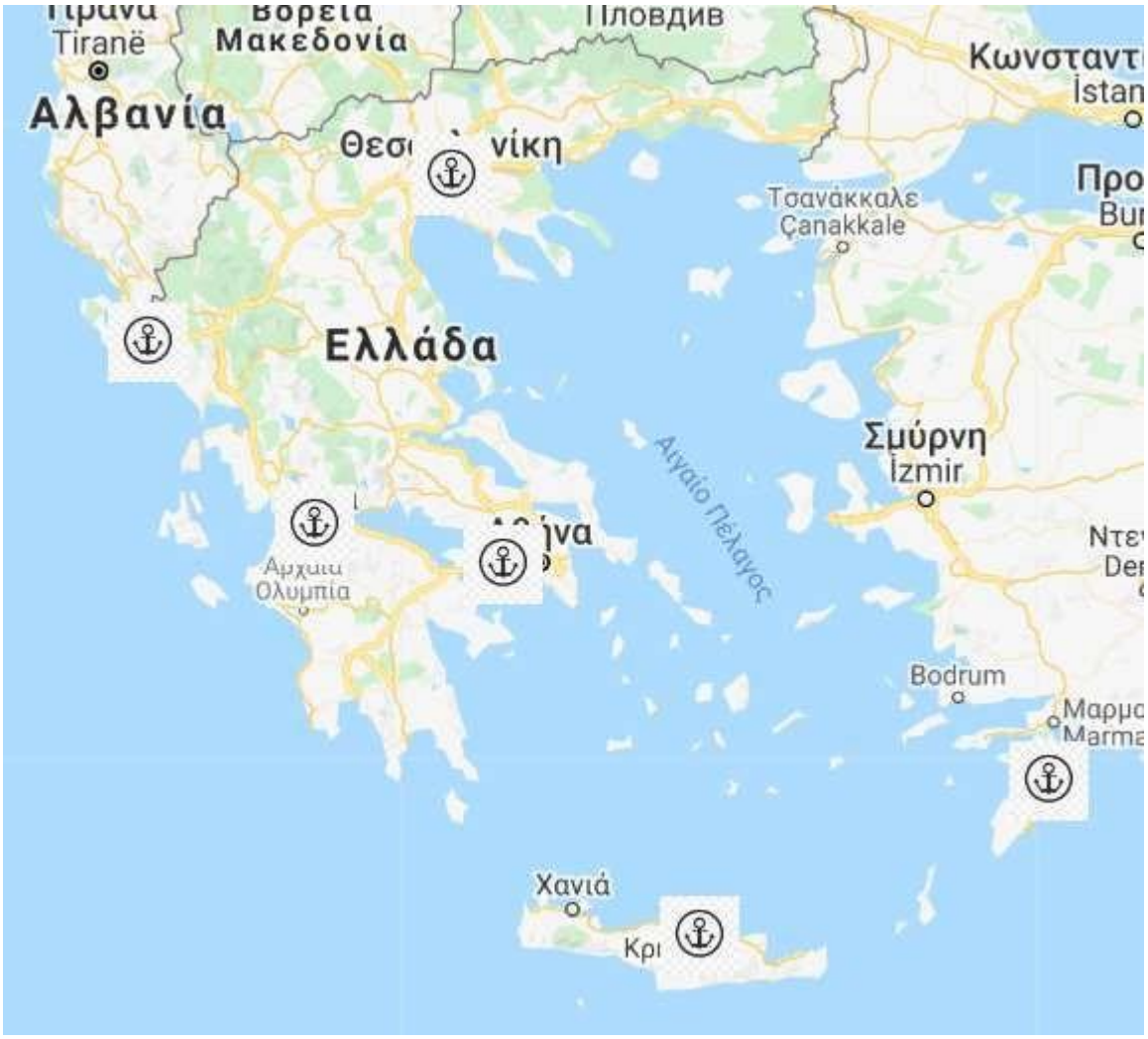
| Αριθμός πλοίου | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Χωρητικότητα (κυβικά μέτρα LNG) | 3000 | 7500 | 18000 | 20000 | 27500 | 28000 | 30000 | 45000 |
| Ταχύτητα (knots) | 13,5 | 13,5 | 15,5 | 15,5 | 18 | 16 | 16 | 16,9 |
| Ταχύτητα (km/h) | 25,0 | 25,0 | 28,7 | 28,7 | 33,3 | 29,6 | 29,6 | 31,3 |
| Κατανάλωση MDO (tn/day) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,9 | 0,9 | 0,5 | 1,5 |
| Κατανάλωση LNG (tn/day) | 8,5 | 10,3 | 31,3 | 24,7 | 52,9 | 54,3 | 44,5 | 90,4 |
| Κόστος Κατασκευής (εκ. $) | 25 | 38 | 74 | 62 | 67,5 | 83,4 | 76,7 | 85 |

Κεντρικό τερματικό στη μελέτη περίπτωσης είναι αυτό της Ρεβυθούσας και τα τερματικά που παραλαμβάνουν LNG βρίσκονται στο Ηράκλειο, στην Πάτρα, στην Ηγουμενίτσα, στη Θεσσαλονίκη και στη Ρόδο. Αναλύονται τρία σενάρια σχετικά με την μηνιαία ζήτηση κάθε λιμανιού σε LNG: ένα χαμηλής, ένα μέτριας και ένα υψηλής ζήτησης. Τα σενάρια αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Οι τιμές που δίνονται έχουν μονάδες κυβικών μέτρων. Το LNG φτάνει στο λιμάνι της Ρεβυθούσας από άλλη πηγή (π.χ. λιμάνι υγροποίησης εκτός Ελλάδας) και αποθηκεύεται εκεί είτε για χρήση είτε για τη διανομή που εξετάζεται σε αυτή τη μελέτη. Όπως έχει αναφερθεί στη μαθηματική μοντελοποίηση, η χωρητικότητα του κεντρικού τερματικού δεν λαμβάνεται υπ' όψη. Αυτή η παραδοχή αναφέρεται ξανά εδώ, καθώς το λιμάνι της Ρεβυθούσας έχει συνολική χωρητικότητα 225.000 $m^3$ LNG, η οποία υπερκαλύπτει την μηνιαία ζήτηση των μικρότερων τερματικών της μελέτης, ακόμα και στο σενάριο της υψηλής ζήτησης. Επομένως, η παραδοχή αυτή κρίνεται λογική στη συγκεκριμένη περίπτωση.

*Πίνακας 8: Ζήτηση τερματικών*

| **Τερματικό** | **Σενάριο 1** | **Σενάριο 2** | **Σενάριο 3** |
|---|---|---|---|
| **Ρεβυθούσα** | 33000 | 55000 | 90000 |
| **Ηράκλειο** | 10000 | 15000 | 25000 |
| **Πάτρα** | 5000 | 10000 | 15000 |
| **Ηγουμενίτσα** | 5000 | 10000 | 15000 |
| **Θεσσαλονίκη** | 10000 | 15000 | 25000 |
| **Ρόδος** | 3000 | 5000 | 10000 |

Στη συνέχεια παρουσιάζεται χάρτης με τα τερματικά που εξετάζονται στη μελέη περίπτωσης.




*Σχήμα 28: Τα τερματικά που αναφέρονται στην μελέτη περίπτωσης*

Επιπλέον, παρακάτω δίνονται οι αποστάσεις μεταξύ των τερματικών σε ναυτικά μίλια και στη συνέχεια σε χιλιόμετρα. Οι αποστάσεις δίνονται σύμφωνα με στοιχεία της ιστοσελίδας www.marinetraffic.com.

*Πίνακας 9: Αποστάσεις τερματικών σε ναυτικά μίλια*

| Τερματικό | Ρεβυθούσα | Ηράκλειο | Πάτρα | Ηγουμενίτσα | Θεσσαλονίκη | Ρόδος |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ρεβυθούσα** | 0 | 175,1 | 314,1 | 365,9 | 248 | 255,2 |
| **Ηράκλειο** | 175,1 | 0 | 304,2 | 376,8 | 350,4 | 165,9 |
| **Πάτρα** | 314,1 | 304,2 | 0 | 123,2 | 510,7 | 445,6 |
| **Ηγουμενίτσα** | 365,9 | 376,8 | 123,2 | 0 | 575,7 | 514,2 |
| **Θεσσαλονίκη** | 248 | 350,4 | 510,7 | 575,7 | 0 | 392,3 |
| **Ρόδος** | 255,2 | 165,9 | 445,6 | 514,2 | 392,3 | 0 |

*Πίνακας 10: Αποστάσεις τερματικών σε χιλιόμετρα*

| Τερματικό | Ρεβυθούσα | Ηράκλειο | Πάτρα | Ηγουμενίτσα | Θεσσαλονίκη | Ρόδος |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ρεβυθούσα** | 0 | 324,3 | 581,7 | 677,6 | 459,3 | 472,6 |
| **Ηράκλειο** | 324,3 | 0 | 563,4 | 697,8 | 648,9 | 307,2 |
| **Πάτρα** | 581,7 | 563,4 | 0 | 228,2 | 945,8 | 825,3 |
| **Ηγουμενίτσα** | 677,6 | 697,8 | 228,2 | 0 | 1066,2 | 952,3 |
| **Θεσσαλονίκη** | 459,3 | 648,9 | 945,8 | 1066,2 | 0 | 726,5 |
| **Ρόδος** | 472,6 | 307,2 | 825,3 | 952,3 | 726,5 | 0 |

## 6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

*Περίπτωση 1η*

Στην πρώτη περίπτωση που θα αναλυθεί οι επιμέρους ζητήσεις φαίνονται παρακάτω. Το συγκεκριμένο σενάριο αποτελεί το σενάριο χαμηλής ζήτησης. Η συνολική μηνιαία ζήτηση είναι 33.000 κυβικά μέτρα LNG.

*Πίνακας 11: Ζήτηση τερματικών στο σενάριο 1*

| **Τερματικό** | **Σενάριο 1** |
|---|---|
| **Ρεβυθούσα** | 33000 |
| **Ηράκλειο** | 10000 |
| **Πάτρα** | 5000 |
| **Ηγουμενίτσα** | 5000 |
| **Θεσσαλονίκη** | 10000 |
| **Ρόδος** | 3000 |

Όταν εκτελείται το πρόγραμμα, μελετώνται όλες οι περιπτώσεις που ικανοποιούν αυτή τη ζήτηση (ή και μέχρι 20% παραπάνω από τη ζήτηση) με τον χρονικό περιορισμό του ενός μήνα. Προκύπτει ότι **ένα πλοίο τύπου 1**, δηλαδή πλοίο χωρητικότητας 3.000 κυβικά μέτρα LNG καλύπτει τη συνολική ζήτηση σε 25 περίπου μέρες λειτουργίας. Σε αυτές περιλαμβάνεται και ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης και παραμονής του πλοίου στο λιμάνι. Επομένως, ο βέλτιστος συνδυασμός πλοίων σε αυτή την περίπτωση είναι αυτός, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από το πρόγραμμα. Το κόστος κατασκευής του πλοίου είναι *25.000.000 $*, ενώ το μηνιαίο κόστος λειτουργίας είναι *54.185 $*. Έτσι προκύπτει ότι το ετήσιο κόστος λειτουργίας είναι *650.220 $*. Θεωρώντας τον συντελεστή καθαράς παρούσας αξίας ίσο με 10%, το κόστος λειτουργίας σε βάθος δεκαετίας είναι ίσο με *3.995.297 $* και το συνολικό κόστος *28.995.297 $*. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω.

*Πίνακας 12: Βέλτιστος συνδυασμός και συνολικό κόστος*

| **Βέλτιστος συνδυασμός πλοίων** | **1x3000** |
|---|---|
| Συνολικό κόστος κατασκευής ($) | 25000000 |
| Μηνιαίο κόστος λειτουργίας ($) | 54185 |
| Ετήσιο κόστος λειτουργίας ($) | 650220 |
| Συνολικό κόστος λειτουργίας ($) | 3995297 |
| **Συνολικό κόστος ($)** | **28995297** |

Στην παραπάνω περίπτωση **γίνεται χρήση split delivery**. Το γεγονός αυτό παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του συγκεκριμένου πλοίου, καθώς χωρίς χρήση split delivery ένα πλοίο τύπου 1 δεν θα ήταν αρκετό για κάλυψη της συνολικής ζήτησης εγκαίρως (εντός των 30 ημερών). Τα βήματα με τα οποία ικανοποιείται η ζήτηση φαίνονται αναλυτικότερα παρακάτω. Σημειώνεται ότι τα βήματα αυτά προκύπτουν από την κατάταξη συμβολαίων που γίνεται στον αλγόριθμο και περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπενθυμίζεται ότι σε κάθε βήμα επιλέγεται το λιμάνι με την μεγαλύτερη εναπομένασα ζήτηση και το πλοίο με το περισσότερο διαθέσιμο φορτίο στις δεξαμενές του (στην προκειμένη περίπτωση έχουμε μόνο ένα και το βήμα αυτό παραβλέπεται) και αυτό το πλοίο εκτελεί το αντίστοιχο δρομολόγιο. Δίπλα από τη διαδρομή αναγράφεται η εναπομένασα ζήτηση του αντίστοιχου τερματικού και το εναπομείνον φορτίο του πλοίου για split delivery σε περίπτωση που υπάρχει τέτοιο.

- *Βήμα 1* : Ρεβυθούσα → Ηράκλειο → Ρεβυθούσα, Ηράκλειο = 7.000 $m^3$
- *Βήμα 2* : Ρεβυθούσα → Θεσσαλονίκη → Ρεβυθούσα, Θεσσαλονίκη =7.000 $m^3$
- *Βήμα 3* : Ρεβυθούσα → Ηράκλειο → Ρεβυθούσα, Ηράκλειο = 4.000 $m^3$
- *Βήμα 4* : Ρεβυθούσα → Θεσσαλονίκη → Ρεβυθούσα, Θεσσαλονίκη = 4.000 $m^3$
- *Βήμα 5* : Ρεβυθούσα → Πάτρα → Ρεβυθούσα. Πάτρα = 2.000 $m^3$
- *Βήμα 6* : Ρεβυθούσα → Ηγουμενίτσα → Ρεβυθούσα, Ηγουμενίτσα =2.000 $m^3$
- *Βήμα 7* : Ρεβυθούσα → Ηράκλειο → Ρεβυθούσα, Ηράκλειο = 1.000 $m^3$
- *Βήμα 8* : Ρεβυθούσα → Θεσσαλονίκη → Ρεβυθούσα, Θεσσαλονίκη = 1.000 $m^3$
- *Βήμα 9* : Ρεβυθούσα → Ρόδος → Ρεβυθούσα, Ρόδος = 0 $m^3$
- *Βήμα 10* : Ρεβυθούσα → Πάτρα, Πάτρα = 0 $m^3$ Το πλοίο παραμένει στην Πάτρα για spit-delivery και του έχουν απομείνει 1.000 $m^3$ στις δεξαμενές του.

- *Βήμα 11* : Πάτρα → Ηράκλειο → Ρεβυθούσα, Ηράκλειο = 0 $m^3$
- *Βήμα 12* : Ρεβυθούσα → Ηγουμενίτσα, Ηγουμενίτσα = 0 $m^3$ Το πλοίο παραμένει στην Ηγουμενίτσα για spit-delivery και του έχουν απομείνει 1.000 $m^3$ στις δεξαμενές του.
- *Βήμα 13* : Ηγουμενίτσα → Θεσσαλονίκη → Ρεβυθούσα, Θεσσαλονίκη = 0 $m^3$

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι διαδρομές στα βήματα 10-11 και στα βήματα 12-13. Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται χρήση split delivery και τα δρομολόγια που εκτελεί το πλοίο φαίνονται παρακάτω (πηγή: www.marinetraffic.com). Παρατηρείται ότι κυρίως στις πρώτες δύο εικόνες εξοικονομείται αρκετός χρόνος και μειώνονται αρκετά τα λειτουργικά έξοδα σε σχέση με την περίπτωση στην οποία δεν γίνεται χρήση split delivery. Αν δεν γινόταν split delivery, τότε το πλοίο θα χρειαζόταν να μεταφερθεί στο τερματικό της Ρεβυθούσας δύο φορές, μία για να μεταφέρει φορτίο στην Πάτρα και να ξαναγεμίσει τις δεξαμενές του και μία για να μεταφέρει φορτίο στο Ηράκλειο. Στην τρίτη και τέταρτη εικόνα πάλι φαίνεται ότι υπάρχει εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων, αλλά σε αρκετά μικρότερο βαθμό, αφού, όπως φαίνεται το πλοίο περνάει από το τερματικό της Ρεβυθούσας στον δρόμο από την Ηγουμενίτσα προς την Θεσσαλονίκη.

*Σχήμα 29: Διαδρομή στα βήματα 10-11*

*Σχήμα 30: Διαδρομή στα βήματα 10-11 χωρίς split delivery*

*Σχήμα 31: Διαδρομή στα βήματα 12-13*

*Σχήμα 32: Διαδρομή στα βήματα 12-13 χωρίς split delivery*

*Περίπτωση 2η*

Στη δεύτερη περίπτωση που θα αναλυθεί οι επιμέρους ζητήσεις φαίνονται παρακάτω. Το συγκεκριμένο σενάριο αποτελεί το σενάριο μέτριας ζήτησης. Η συνολική μηνιαία ζήτηση είναι 55.000 κυβικά μέτρα LNG.

*Πίνακας 13: Ζήτηση τερματικών στο σενάριο 2*

| **Τερματικό** | **Σενάριο 2** |
|---|---|
| **Ρεβυθούσα** | 55000 |
| **Ηράκλειο** | 15000 |
| **Πάτρα** | 10000 |
| **Ηγουμενίτσα** | 10000 |
| **Θεσσαλονίκη** | 15000 |
| **Ρόδος** | 5000 |

Σε αυτή την περίπτωση, η βέλτιστη επιλογή σύμφωνα με το πρόγραμμα είναι **ένα πλοίο τύπου 2**, δηλαδή χωρητικότητας 7.500 κυβικά μέτρα LNG. Ένα πλοίο τέτοιου τύπου καλύπτει την παραπάνω ζήτηση σε λίγο περισσότερο από 20 ημέρες λειτουργίας (20,3 για την ακρίβεια). Σε αυτές περιλαμβάνεται και ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης και παραμονής του πλοίου στο λιμάνι. Το κόστος κατασκευής του πλοίου είναι 38*.000.000 $*, ενώ το μηνιαίο κόστος λειτουργίας είναι *52.723 $*. Έτσι προκύπτει ότι το ετήσιο κόστος λειτουργίας είναι *632.676 $*. Θεωρώντας τον συντελεστή καθαράς παρούσας αξίας ίσο με 10%, το κόστος λειτουργίας σε βάθος δεκαετίας είναι ίσο με *3.887.485 $* και το συνολικό κόστος 41*.887.485 $*. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω.

*Πίνακας 14: Βέλτιστος συνδυασμός και συνολικό κόστος*

| **Βέλτιστος συνδυασμός πλοίων** | **1x7500** |
|---|---|
| Συνολικό κόστος κατασκευής ($) | 38000000 |
| Μηνιαίο κόστος λειτουργίας ($) | 52723 |
| Ετήσιο κόστος λειτουργίας ($) | 632676 |
| Συνολικό κόστος λειτουργίας ($) | 3887485 |
| **Συνολικό κόστος ($)** | **41887485** |

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι το κόστος λειτουργίας είναι μικρότερο από το κόστος λειτουργίας της πρώτης περίπτωσης, παρά το γεγονός ότι το πλοίο τύπου 2 έχει μεγαλύτερη κατανάλωση σε σχέση με το πλοίο τύπου 1. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτή την περίπτωση το πλοίο χρησιμοποιείται λιγότερες μέρες σε σχέση με την πρώτη. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται 20 ημέρες, ενώ στην πρώτη περίπτωση το πλοίο χρησιμοποιείται 25 ημέρες.

Στην παραπάνω περίπτωση **γίνεται χρήση split delivery**. Τα βήματα με τα οποία ικανοποιείται η ζήτηση φαίνονται αναλυτικότερα παρακάτω. Σημειώνεται ότι τα βήματα αυτά προκύπτουν από την κατάταξη συμβολαίων που γίνεται στον αλγόριθμο και περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Δίπλα από τη διαδρομή αναγράφεται η εναπομείνασα ζήτηση του αντίστοιχου τερματικού και το εναπομείναν φορτίο του πλοίου για split- delivery σε περίπτωση που υπάρχει τέτοιο.

- *Βήμα 1* : Ρεβυθούσα → Ηράκλειο → Ρεβυθούσα, Ηράκλειο = 7.500 $m^3$
- *Βήμα 2* : Ρεβυθούσα → Θεσσαλονίκη → Ρεβυθούσα, Θεσσαλονίκη = 7.500 $m^3$
- *Βήμα 3* : Ρεβυθούσα → Πάτρα → Ρεβυθούσα, Πάτρα = 2.500 $m^3$
- *Βήμα 4* : Ρεβυθούσα → Ηγουμενίτσα → Ρεβυθούσα, Ηγουμενίτσα = 2.500 $m^3$
- *Βήμα 5* : Ρεβυθούσα → Ηράκλειο → Ρεβυθούσα, Ηράκλειο = 0 $m^3$
- *Βήμα 6* : Ρεβυθούσα → Θεσσαλονίκη → Ρεβυθούσα, Θεσσαλονίκη = 0 $m^3$
- *Βήμα 7* : Ρεβυθούσα → Ρόδος, Ρόδος = 0 $m^3$ Το πλοίο παραμένει στην Ρόδο για spit-delivery και του έχουν απομείνει 2.500 $m^3$ στις δεξαμενές του.
- *Βήμα 8* : Ρόδος → Πάτρα → Ρεβυθούσα, Πάτρα = 0 $m^3$
- *Βήμα 9* : Ρεβυθούσα → Ηγουμενίτσα → Ρεβυθούσα, Ηγουμενίτσα = 0 $m^3$

Στα βήματα 7-8 γίνεται split delivery και το δρομολόγιο που εκτελεί το πλοίο φαίνεται παρακάτω (πηγή: www.marinetraffic.com). Στο δεύτερο σχήμα φαίνεται η διαδρομή που θα εκτελούσε το πλοίο σε περίπτωση που δεν επιτρεπόταν το split delivery. Όπως φαίνεται η απόσταση που διανύεται στην δεύτερη περίπτωση είναι μεγαλύτερη. Πράγματι, η συνολική απόσταση στη διαδρομή της πρώτης εικόνας είναι ίση με 1019,3 ναυτικά μίλια, ενώ στη δεύτερη εικόνα η συνολική απόσταση είναι ίση με 1309,1 ναυτικά μίλια.

*Σχήμα 33: Διαδρομή στα βήματα 7-8*

*Σχήμα 34: Διαδρομή στα βήματα 7-8 χωρίς split delivery*

Στο τέλος του βήματος 9, το πλοίο έχει στις δεξαμενές του 5.000 κυβικά μέτρα LNG. Ωστόσο, λόγω της διαδικασίας που ακολουθεί το πρόγραμμα, το πλοίο επιστρέφει στη Ρεβυθούσα για ανεφοδιασμό. Αυτό συμβαίνει καθώς, όπως περιγράφεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο τέλος του μήνα όλα τα πλοία του αντίστοιχου στόλου επιστρέφουν στο κεντρικό τερματικό για ανεφοδιασμό. Αυτή η παραδοχή έχει γίνει καθώς ο χρονικός ορίζοντας έχει χωριστεί σε μήνες και έτσι πρέπει αυτοί οι μήνες να είναι κοινοί μεταξύ τους.

*Περίπτωση 3η*

Στην τρίτη περίπτωση που θα αναλυθεί οι επιμέρους ζητήσεις φαίνονται παρακάτω. Το συγκεκριμένο σενάριο αποτελεί το σενάριο υψηλής ζήτησης. Η συνολική μηνιαία ζήτηση είναι 90.000 κυβικά μέτρα LNG.

*Πίνακας 15: Ζήτηση τερματικών στο σενάριο 3*

| **Τερματικό** | **Σενάριο 3** |
|---|---|
| **Ρεβυθούσα** | 90000 |
| **Ηράκλειο** | 25000 |
| **Πάτρα** | 15000 |
| **Ηγουμενίτσα** | 15000 |
| **Θεσσαλονίκη** | 25000 |
| **Ρόδος** | 10000 |

Σε αυτή την περίπτωση, η βέλτιστη επιλογή σύμφωνα με το πρόγραμμα είναι **ένα πλοίο τύπου 4**, δηλαδή χωρητικότητας 20.000 κυβικά μέτρα LNG. Ένα πλοίο τέτοιου τύπου καλύπτει την παραπάνω ζήτηση σε μόλις 10 ημέρες λειτουργίας. Σε αυτές περιλαμβάνεται και ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης και παραμονής του πλοίου στο λιμάνι. Το κόστος κατασκευής του πλοίου είναι 62*.000.000 $*, ενώ το μηνιαίο κόστος λειτουργίας είναι *47.548 $*. Έτσι προκύπτει ότι το ετήσιο κόστος λειτουργίας είναι *570.576 $*. Θεωρώντας τον συντελεστή καθαράς παρούσας αξίας ίσο με 10%, το κόστος λειτουργίας σε βάθος δεκαετίας είναι ίσο με *3.505.981 $* και το συνολικό κόστος 65*.505.981 $*. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω.

*Πίνακας 16: Βέλτιστος συνδυασμός και συνολικό κόστος*

| **Βέλτιστος συνδυασμός πλοίων** | **1x20000** |
|---|---|
| Συνολικό κόστος κατασκευής ($) | 62000000 |
| Μηνιαίο κόστος λειτουργίας ($) | 47548 |
| Ετήσιο κόστος λειτουργίας ($) | 570576 |
| Συνολικό κόστος λειτουργίας ($) | 3505981 |
| **Συνολικό κόστος ($)** | **65505981** |

Όπως και στην δεύτερη περίπτωση, έτσι και εδώ μειώνεται ακόμα περισσότερο το κόστος λειτουργίας. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι το πλοίο χρησιμοποιείται μόλις 10 ημέρες, αρκετές εκ των οποίων τις περνάει στο λιμάνι για φορτοεκφόρτωση και άλλες ενέργειες.

Στην περίπτωση αυτή **γίνεται χρήση split delivery**, όπως και στις παραπάνω. Τα βήματα με τα οποία ικανοποιείται η ζήτηση φαίνονται αναλυτικότερα παρακάτω. Σημειώνεται ότι τα βήματα αυτά προκύπτουν από την κατάταξη συμβολαίων που γίνεται στον αλγόριθμο και περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Δίπλα από τη διαδρομή αναγράφεται η εναπομείνασα ζήτηση του αντίστοιχου τερματικού και το εναπομείνον φορτίο του πλοίου για split- delivery σε περίπτωση που υπάρχει τέτοιο.

- *Βήμα 1* : Ρεβυθούσα → Ηράκλειο → Ρεβυθούσα, Ηράκλειο = 5.000 $m^3$
- *Βήμα 2* : Ρεβυθούσα → Θεσσαλονίκη → Ρεβυθούσα, Θεσσαλονίκη = 5.000 $m^3$
- *Βήμα 3* : Ρεβυθούσα → Πάτρα, Πάτρα = 0 $m^3$ Το πλοίο παραμένει στην Ρόδο για spit-delivery και του έχουν απομείνει 5.000 $m^3$ στις δεξαμενές του.
- *Βήμα 4* : Ρεβυθούσα → Ηγουμενίτσα, Ηγουμενίτσα =0 $m^3$ Το πλοίο παραμένει στην Ηγουμενίτσα για spit-delivery και του έχουν απομείνει 5.000 $m^3$ στις δεξαμενές του.
- *Βήμα 5* : Ρεβυθούσα → Ρόδος, Ρόδος = 0 $m^3$ Το πλοίο παραμένει στην Ρόδο για spit-delivery και του έχουν απομείνει 10.000 $m^3$ στις δεξαμενές του.
- *Βήμα 6* : Ρόδος → Ηράκλειο, Ηράκλειο = 0 $m^3$ Το πλοίο παραμένει στο Ηράκλειο για spit-delivery και του έχουν απομείνει 5.000 $m^3$ στις δεξαμενές του.
- *Βήμα 7* : Ηράκλειο → Θεσσαλονίκη → Ρεβυθούσα, Θεσσαλονίκη = 0 $m^3$

Σημειώνεται ότι τα βήματα αυτά ακολουθεί ο αλγόριθμος για την ικανοποίηση της συνολικής ζήτησης. Παρατηρείται ότι στο τέλος της διαδικασίας το πλοίο έχει μείνει στην Πάτρα στο *βήμα 3* και στην Ηγουμενίτσα στο *βήμα 4*, πράγμα που προφανώς δεν είναι σωστό. Όταν ένα πλοίο έχει παραμείνει σε λιμάνι διαφορετικό του κεντρικού τερματικού, στο τέλος της διαδικασίας επιστρέφει στο κεντρικό. Επομένως, υπάρχουν και επιπλέον βήματα, όπου έστω στο *βήμα 8* το πλοίο επιστρέφει από την Πάτρα στη Ρεβυθούσα και στο *βήμα 9* το πλοίο επιστρέφει από την Ηγουμενίτσα στη Ρεβυθούσα. Επαναλαμβάνεται ότι με αυτή τη σειρά ακολουθεί ο αλγόριθμος τα παραπάνω βήματα. Στην πραγματικότητα η σειρά θα ήταν: *Βήμα 1 → Βήμα 2 → Βήμα 3 → Βήμα 8 → Βήμα 4 → Βήμα 9 → Βήμα 5 → Βήμα 6 →Βήμα 7.* Επομένως, τελικά το μαθηματικό μοντέλο ακολουθεί τις διαδρομές που πρέπει να εκτελεσθούν για να ικανοποιηθεί η ζήτηση. Ωστόσο, κάποια βήματα δεν γίνονται με χρονική σιερά και έτσι πρέπει να γίνει ανακατάταξή τους για την καταγραφή των διαδρομών με τη σωστή σειρά.

Στα βήματα 5-7 γίνεται split delivery και το δρομολόγιο που εκτελεί το πλοίο φαίνεται παρακάτω (πηγή: www.marinetraffic.com). Στο δεύτερο σχήμα φαίνεται η διαδρομή που θα εκτελούσε το πλοίο σε περίπτωση που δεν επιτρεπόταν το split delivery. Όπως φαίνεται η απόσταση που διανύεται στην δεύτερη περίπτωση είναι μεγαλύτερη. Πράγματι, η συνολική απόσταση στη διαδρομή της πρώτης εικόνας είναι ίση με 1037,5 ναυτικά μίλια, ενώ στη δεύτερη εικόνα η συνολική απόσταση είναι ίση με 1360,8 ναυτικά μίλια.

*Σχήμα 35: Διαδρομή στα βήματα 5-7*

*Σχήμα 36: Διαδρομή στα βήματα 5-7 χωρίς split delivery*

## 6.2 Ανάλυση Ευαισθησίας

Σε τέτοιας φύσεως προβλήματα, όπως το παραπάνω, αξίζει να γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας, δηλαδή μια μελέτη, στην οποία με αλλαγές στις παραμέτρους του προβλήματος παρατηρείται αν επηρεάζονται ή όχι τα τελικά αποτελέσματα. Με μια τέτοια ανάλυση δίνονται στοιχεία για το κατά πόσο μπορούν να μεταβληθούν οι παράμετροι σε κάθε περίπτωση και να μην επιφέρουν αλλαγές στο βέλτιστο αποτέλεσμα.

Στις παραπάνω περιπτώσεις γίνεται ανάλυση ευαισθησίας με μεταβλητές το κόστος κτήσης των πλοίων και τα κόστη των καυσίμων. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπ' όψη αυξομειώσεις της τάξεως του 5, 10, 15 και 20% στις παραπάνω τιμές και εξετάζεται αν με τις νέες τιμές να προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα. Προφανώς αναμένεται να υπάρχουν διαφορετικά αποτελέσματα σε ότι αφορά το κόστος κτήσης και λειτουργίας του στόλου (αναλόγως αν μεταβάλλεται το κόστος κτήσης ή το κόστος λειτουργίας αντίστοιχα). Ωστόσο, περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η πιθανότητα να βρεθεί διαφορετικό βέλτιστο μίγμα στόλου σε περίπτωση που μεταβληθούν οι παραπάνω τιμές.

*Περίπτωση 1η*

Στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται ότι το κόστος κατασκευής που υπολογίστηκε αρχικά είναι το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους σε βάθος δεκαετίας (περίπου το 86%). Επομένως, αναμένεται ανεξάρτητα από τις αυξομειώσεις των καυσίμων και του κόστους κατασκευής, η βέλτιστη επιλογή να παραμένει η ίδια, δηλαδή το πλοίο χωρητικότητας 3.000 $m^3$. Πράγματι, εκτελώντας το πρόγραμμα για όλες τις περιπτώσεις, το βέλτιστο αποτέλεσμα παρέμεινε αυτό, δηλαδή **ένα πλοίο τύπου 1**. Τα συνολικά κόστη σε βάθος δεκαετίας ανάλογα με την περίπτωση φαίνονται παρακάτω. Παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των τιμών στις στήλες, δηλαδή στις περιπτώσεις με σταθερό κόστος κατασκευής και μεταβλητό το κόστος των καυσίμων, είναι σχετικά μικρή, ενώ στις γραμμές, δηλαδή στις περιπτώσεις με μεταβλητό το κόστος κατασκευής και σταθερό το κόστος των καυσίμων, η διαφορά είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το κόστος κατασκευής αποτελεί πολύ μεγαλύτερο ποσοστό του ολικού κόστους.

*Πίνακας 17: Ανάλυση ευαισθησίας για την πρώτη περίπτωση*

| Κόστος κατασκευής/ Κόστος καυσίμου (% μεταβολής από τα αρχικά) | -20 | -15 | -10 | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -20 | 23196237 | 24446237 | 25696237 | 26946237 | 28196237 | 29446237 | 30696237 | 31946237 | 33196237 |
| -15 | 23396002 | 24646002 | 25896002 | 27146002 | 28396002 | 29646002 | 30896002 | 32146002 | 33396002 |
| -10 | 23595767 | 24845767 | 26095767 | 27345767 | 28595767 | 29845767 | 31095767 | 32345767 | 33595767 |
| -5 | 23795532 | 25045532 | 26295532 | 27545532 | 28795532 | 30045532 | 31295532 | 32545532 | 33795532 |
| 0 | 23995297 | 25245297 | 26495297 | 27745297 | **28995297** | 30245297 | 31495297 | 32745297 | 33995297 |
| 5 | 24195062 | 25445062 | 26695062 | 27945062 | 29195062 | 30445062 | 31695062 | 32945062 | 34195062 |
| 10 | 24394826 | 25644826 | 26894826 | 28144826 | 29394826 | 30644826 | 31894826 | 33144826 | 34394826 |
| 15 | 24594591 | 25844591 | 27094591 | 28344591 | 29594591 | 30844591 | 32094591 | 33344591 | 34594591 |
| 20 | 24794356 | 26044356 | 27294356 | 28544356 | 29794356 | 31044356 | 32294356 | 33544356 | 34794356 |

*Περίπτωση 2η*

Όπως και στην πρώτη περίπτωση, το κόστος κατασκευής που υπολογίστηκε είναι το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους σε βάθος δεκαετίας. Επομένως, αναμένεται ανεξάρτητα από τις αυξομειώσεις των καυσίμων και του κόστους κατασκευής, η βέλτιστη επιλογή να παραμένει η ίδια, δηλαδή **ένα πλοίο τύπου 2** (χωρητικότητας 7.500 $m^3$). Πράγματι, εκτελώντας το πρόγραμμα για όλες τις περιπτώσεις, το βέλτιστο αποτέλεσμα παρέμεινε αυτό. Η συνολική ζήτηση μπορεί να καλυφθεί και από δύο μικρότερα πλοία τύπου 1 (χωρητικότητας 3.000 κυβικά μέτρα LNG). Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση το κόστος κατασκευής θα ήταν ίσο με 50.000.000 $, δηλαδή πολύ μεγαλύτερο από το βέλτιστο. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που θα γινόταν η επιλογή ενός πλοίου μεγαλύτερου από αυτό που επιλέχθηκε, καθώς πάλι το κόστος κατασκευής θα ήταν αρκετά μεγαλύτερο από το βέλτιστο. Τα συνολικά κόστη σε βάθος δεκαετίας ανάλογα με την περίπτωση φαίνονται παρακάτω. Παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των τιμών στις στήλες, δηλαδή στις περιπτώσεις με σταθερό κόστος κατασκευής και μεταβλητό το κόστος των καυσίμων, είναι σχετικά μικρή, ενώ στις γραμμές, δηλαδή στις περιπτώσεις με μεταβλητό το κόστος κατασκευής και σταθερό το κόστος των καυσίμων, η διαφορά είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το κόστος κατασκευής αποτελεί πολύ μεγαλύτερο ποσοστό του ολικού κόστους.

*Πίνακας 18: Ανάλυση ευαισθησίας για τη δεύτερη περίπτωση*

| Κόστος κατασκευής/ Κόστος καυσίμου (% μεταβολής από τα αρχικά) | -20 | -15 | -10 | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -20 | 33509990 | 35409990 | 37309990 | 39209990 | 41109990 | 43009990 | 44909990 | 46809990 | 48709990 |
| -15 | 33704364 | 35604364 | 37504364 | 39404364 | 41304364 | 43204364 | 45104364 | 47004364 | 48904364 |
| -10 | 33898738 | 35798738 | 37698738 | 39598738 | 41498738 | 43398738 | 45298738 | 47198738 | 49098738 |
| -5 | 34093113 | 35993113 | 37893113 | 39793113 | 41693113 | 43593113 | 45493113 | 47393113 | 49293113 |
| 0 | 34287485 | 36187485 | 38087485 | 39987485 | **41887485** | 43787485 | 45687485 | 47587485 | 49487485 |
| 5 | 34481861 | 36381861 | 38281861 | 40181861 | 42081861 | 43981861 | 45881861 | 47781861 | 49681861 |
| 10 | 34676236 | 36576236 | 38476236 | 40376236 | 42276236 | 44176236 | 46076236 | 47976236 | 49876236 |
| 15 | 34870610 | 36770610 | 38670610 | 40570610 | 42470610 | 44370610 | 46270610 | 48170610 | 50070610 |
| 20 | 35064985 | 36964985 | 38864985 | 40764985 | 42664985 | 44564985 | 46464985 | 48364985 | 50264985 |

Στις πρώτες δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι ο βέλτιστος συνδυασμός πλοίων παραμένει σταθερός παρά τη μεταβολή του κόστους κατασκευής και του κόστους καυσίμων. Το κόστος καυσίμων είναι σχετικά χαμηλό (στις παραπάνω περιπτώσεις κυμαίνεται από 10 έως 15%) και έτσι η συνάρτηση κόστους δεν μεταβάλλεται αρκετά ώστε να καταλήξει σε διαφορετικό αποτέλεσμα. Ο κύριος λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι οι αποστάσεις μεταξύ των λιμανιών είναι μικρές και έτσι ο χρόνος τον οποίο το πλοίο περνάει στο λιμάνι (μισή μέρα σε κάθε τερματικό) είναι συγκρίσιμος με τον χρόνο του ταξιδιού. Αντίθετα, σε ταξίδια μεγάλων αποστάσεων, το πλοίο μπορεί να ταξιδεύει πολλές ημέρες και η παραμονή του στο λιμάνι να είναι αντίστοιχη με αυτή που έχει θεωρηθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση. Επιπλέον, αν παρατηρήσει κανείς τον πίνακα με τους διαθέσιμους τύπους πλοίων θα δει ότι σε περιπτώσεις που υπάρχει σχετικά χαμηλή ζήτηση, όπως στις πρώτες δύο περιπτώσεις, η επιλογή πλοίου είναι σχετικά εύκολη, καθώς η διαφορά σε κόστος κατασκευής και σε χωρητικότητα μεταξύ των τριών πρώτων τύπων πλοίων είναι αρκετά μεγάλη.

Μία περίπτωση που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι να αυξηθεί το κόστος κατασκευής του πλοίου τύπου 2 κατά 20% και τα κόστη κατασκευής όλων των υπόλοιπων πλοίων να μειωθούν κατά 20%, με τα κόστη καυσίμων να παραμένουν ίδια με τα αρχικά (για LNG 400 $/tn και για MDO 390 $/tn). Έτσι τα κόστη κατασκευής είναι αυτά που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 19: Νέα κόστη κατασκευής*

| Τύπος πλοίου | Κόστος κατασκευής (εκ.$) |
|---|---|
| 1 | 20,00 |
| 2 | 45,60 |
| 3 | 59,20 |
| 4 | 49,60 |
| 5 | 54,00 |
| 6 | 66,72 |
| 7 | 61,36 |
| 8 | 68,00 |

Σε αυτή την περίπτωση, η βέλτιστη επιλογή είναι η κατασκευή **δύο πλοίων τύπου 1** (χωρητικότητας 3.000 κυβικά μέτρα LNG το καθένα). Η περίπτωση κατασκευής ενός πλοίου τύπου 2 φαίνεται στον πίνακα της μελέτης ευαισθησίας και το συνολικό κόστος είναι 49.487.485 $. Αντίθετα, η περίπτωση κατασκευής δύο πλοίων τύπου 1 με κόστος κατασκευής 20.000.000 $ το καθένα οδηγεί σε συνολικό κόστος 47.993.675$, μικρότερο από την επιλογή ενός πλοίου τύπου 2. Στην προκειμένη το συνολικό κόστος κατασκευής είναι 40.000.000 $ και το κόστος λειτουργίας σε βάθος δεκαετίας είναι 7.993.675 $. Το κόστος λειτουργίας είναι μεγαλύτερο από την περίπτωση του ενός πλοίου τύπου 2, καθώς τώρα τα πλοία χρησιμοποιούνται περίπου 23 ημέρες το καθένα. Ωστόσο, το συνολικό κόστος είναι μικρότερο και έτσι με τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα επιλέγεται η κατασκευή δύο πλοίων τύπου 1.

*Περίπτωση 3η*

Όπως στις πρώτες δύο περιπτώσεις, έτσι και εδώ το κόστος κατασκευής που υπολογίστηκε είναι το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους σε βάθος δεκαετίας. Ο βέλτιστος συνδυασμός, ο οποίος είναι η επιλογή **ενός πλοίου τύπου 4**, δεν αλλάζει παρά τις μεταβολές του κόστους κατασκευής και του κόστους καυσίμων. Τα συνολικά κόστη σε βάθος δεκαετίας ανάλογα με την περίπτωση φαίνονται παρακάτω.

*Πίνακας 20: Ανάλυση ευαισθησίας για την τρίτη περίπτωση*

| Κόστος κατασκευής/ Κόστος καυσίμου (% μεταβολής από τα αρχικά) | -20 | -15 | -10 | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -20 | 52404784 | 55504784 | 58604784 | 61704784 | 64804784 | 67904784 | 71004784 | 74104784 | 77204784 |
| -15 | 52580083 | 55680083 | 58780083 | 61880083 | 64980083 | 68080083 | 71180083 | 74280083 | 77380083 |
| -10 | 52755383 | 55855383 | 58955383 | 62055383 | 65155383 | 68255383 | 71355383 | 74455383 | 77555383 |
| -5 | 52930682 | 56030682 | 59130682 | 62230682 | 65330682 | 68430682 | 71530682 | 74630682 | 77730682 |
| 0 | 53105981 | 56205981 | 59305981 | 62405981 | **65505981** | 68605981 | 71705981 | 74805981 | 77905981 |
| 5 | 53281280 | 56381280 | 59481280 | 62581280 | 65681280 | 68781280 | 71881280 | 74981280 | 78081280 |
| 10 | 53456579 | 56556579 | 59656579 | 62756579 | 65856579 | 68956579 | 72056579 | 75156579 | 78256579 |
| 15 | 53631878 | 56731878 | 59831878 | 62931878 | 66031878 | 69131878 | 72231878 | 75331878 | 78431878 |
| 20 | 53807177 | 56907177 | 60007177 | 63107177 | 66207177 | 69307177 | 72407177 | 75507177 | 78607177 |

Η ζήτηση μπορεί να καλυφθεί και από μεγαλύτερα πλοία προφανώς, αλλά λόγω κόστους κατασκευής απορρίπτονται. Για τον ίδιο λόγο απορρίπτεται και το πλοίο τύπου 3, το οποίο παρ' όλο που έχει μικρότερη χωρητικότητα έχει αρκετά μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και η διαφορά στα κόστη καυσίμων δεν είναι αρκετή. Ωστόσο, αν εξετασθούν τα κόστη σε κάθε πιθανό συνδυασμό πλοίων που παράγει ο αλγόριθμος, θα παρατηρηθεί ότι η διαφορά μεταξύ της επιλογής ενός πλοίου τύπου 3 και δύο πλοίων, εκ των οποίων το ένα είναι τύπου 1 και το άλλο τύπου 2 είναι σχετικά μικρή. Μεταβάλλοντας το κόστος κατασκευής του πλοίου τύπου 4 κατά 5% (δηλαδή το νέο κόστος κατασκευής είναι 65,1 εκατομμύρια δολάρια) και διατηρώντας τα υπόλοιπα κόστη κατασκευής και τα κόστη καυσίμων ίδια με τα αρχικά (για LNG 400 $/tn και για MDO 390 $/tn) ο αλγόριθμος καταλήγει στο ίδιο αποτέλεσμα, παρ' όλο που το κόστος κατασκευής είναι μεγαλύτερο από την περίπτωση στην οποία επιλέγεται ένα πλοίο τύπου 1 και ένα πλοίο τύπου 2. Σε αυτή την περίπτωση το συνολικό κόστος κατασκευής και των δύο πλοίων είναι 63 εκατομμύρια δολάρια. Ωστόσο, το κόστος των καυσίμων σε βάθος δεκαετίας για τη λειτουργία δύο πλοίων είναι μεγαλύτερο από αυτό της λειτουργίας ενός πλοίου τύπου 4. Σε αυτό παίζει σημαντικό ρόλο και το γεγονός ότι το πλοίο τύπου 4 χρειάζεται να είναι σε λειτουργία μόλις 10 ημέρες ανά μήνα, ενώ τα πλοία τύπου 1 και 2 χρειάζονται πολύ περισσότερες ημέρες για την κάλυψη της ίδιας ζήτησης. Μεταβάλλοντας, όμως, λίγο περισσότερο το κόστος κατασκευής του πλοίου τύπου 4 (νέο κόστος κατασκευής = 68,2 εκατομμύρια δολάρια), τότε η βέλτιστη επιλογή είναι **ένα πλοίο**

**τύπου 1 και ένα πλοίο τύπου 2**. Στην προκειμένη **γίνεται χρήση split delivery**. Το πλοίο τύπου 1 επισκέπτεται τα λιμάνια της Πάτρας, της Ηγουμενίτσας και της Ρόδου, ενώ το πλοίο τύπου 2 θα χρειαστεί να επισκεφθεί όλα τα λιμάνια. **Γίνεται και εδώ χρήση split- delivery**. Τα επιμέρους κόστη και το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ στον αμέσως επόμενο πίνακα φαίνονται τα συνολικά κόστη στην περίπτωση που θα επιλεγόταν το πλοίο τύπου 4 με κόστος κατασκευής 68,2 εκατομμύρια δολάρια.

*Πίνακας 21: Συνδυασμός και συνολικό κόστος*

| **Συνδυασμός πλοίων** | **1x3000 1x7500** |
|---|---|
| Συνολικό κόστος κατασκευής ($) | 63000000 |
| Μηνιαίο κόστος λειτουργίας ($) | 89831 |
| Ετήσιο κόστος λειτουργίας ($) | 1077972 |
| Συνολικό κόστος λειτουργίας ($) | 6623733 |
| **Συνολικό κόστος ($)** | **69623733** |

*Πίνακας 22: Συνδυασμός και συνολικό κόστος*

| **Συνδυασμός πλοίων** | **1x20000** |
|---|---|
| Συνολικό κόστος κατασκευής ($) | 68200000 |
| Μηνιαίο κόστος λειτουργίας ($) | 47548 |
| Ετήσιο κόστος λειτουργίας ($) | 570576 |
| Συνολικό κόστος λειτουργίας ($) | 3505981 |
| **Συνολικό κόστος ($)** | **71705981** |

# 7 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία προτείνεται το βέλτιστο μίγμα στόλου για διαμερισμό φορτίου LNG σε μικρή κλίμακα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κατασκευής και λειτουργίας σε βάθος δεκαετίας. Αρχικά παρουσιάζονται γενικά στοιχεία της αγοράς small scale LNG, με έμφαση στις αγορές της Κίνας, της Ευρώπης και της Ελλάδας. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στους ρόλους – ενδιαφερόμενους που εμφανίζονται στην αγορά και στα συμβόλαια που συναντώνται συνήθως. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα επιμέρους στοιχεία της εφοδιαστικής αλυσίδας small scale LNG, η οποία περιλαμβάνει τα πλοία, τα τερματικά, τον τρόπο αποθήκευσης του φορτίου και την διαδικασία που ακολουθείται για τη διανομή του φορτίου. Γίνεται ακόμα αναφορά στις μεθόδους split delivery, καθώς γίνεται χρήση του στο μαθηματικό μοντέλο και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην εξοικονόμιση χρημάτων και χρόνου μεταφοράς φορτίου.

Κατασκευάστηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος δέχεται δεδομένα σχετικά με τα πλοία και τα τερματικά ζήτησης και ως αποτέλεσμα εξάγει το βέλτιστο μίγμα στόλου για την κάλυψη της ζήτησης αυτών των τερματικών. Στο μοντέλο που προτείνεται υπάρχει ένα κεντρικό τερματικό, από το οποίο διέρχονται τα πλοία και μοιράζουν το LNG στα υπόλοιπα τερματικά. Δίνεται και η δυνατότητα split delivery, με σκοπό την περαιτέρω μείωση του κόστους.

Στη συνέχεια έγινε μελέτη περίπτωσης με βάση υποθετικά τερματικά SSLNG στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, ως κεντρικό τερματικό θεωρείται αυτό της Ρεβυθούσας και ως τερματικά ζήτησης αυτά του Ηρακλείου, της Πάτρας, της Ηγουμενίτσας, της Θεσσαλονίκης και της Ρόδου. Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις, στις οποίες η συνολική ζήτηση είναι διαφορετική κάθε φορά (χαμηλή, μέτρια και υψηλή). Παρατηρείται ότι ο βασικότερος παράγοντας για την επιλογή του βέλτιστου μίγματος είναι το κόστος κατασκευής των πλοίων του εκάστοτε στόλου, καθώς αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους.

Ένας ακόμα παράγοντας που παρουσιάζει ενδιαφέρον, ειδικά αν συγκριθεί με πλοία και ταξίδια μεγαλύτερης κλίμακας, είναι αυτός του κόστους των καυσίμων. Όπως φαίνεται στα παραπάνω παραδείγματα, τα καύσιμα αποτελούν σχετικά μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους. Αυτό συμβαίνει καθώς οι αποστάσεις είναι σχετικά μικρές και έτσι, τα πλοία περνούν ένα σημαντικό ποσοστό του χρόνου τους στα λιμάνια. Ως αποτέλεσμα, το κόστος καυσίμων δεν αποτελεί τόσο σημαντικό παράγοντα στην επιλογή των πλοίων όσο το κόστος κατασκευής τους. Ωστόσο, όπως φαίνεται στην τρίτη περίπτωση και συγκεκριμένα στην μελέτη ευαισθησίας, όσο μεγαλώνει η ζήτηση τόσο μεγαλύτερη επίδραση έχουν τα έξοδα των καυσίμων στην επιλογή του βέλτιστου στόλου.

Ειδική αναφορά αξίζει να γίνει στη χρήση split delivery στο μαθηματικό μοντέλο. Η χρήση split delivery επιτρέπει, εκτός από την εξοικονόμιση χρημάτων, την εξοικονόμιση χρόνου ταξιδιών. Αυτός ο παράγοντας είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, όπως φαίνεται και στα παραδείγματα της μελέτης περίπτωσης. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση, σε περίπτωση που δεν επιτρεπόταν η χρήση split delivery στο μοντέλο, ένα πλοίο τύπου 1 δεν θα αρκούσε για την κάλυψη της συνολικής μηνιαίας ζήτησης, αφού θα χρειαζόταν

περισσότερο από ένα μήνα για να διανέμει ολόκληρο το φορτίο.

Στις περιπτώσεις που αναλύθηκαν παραπάνω, έγινε και μελέτη ευαισθησίας με αυξομειώσεις του κόστους κατασκευής και του κόστους καυσίμων. Αυτή η μελέτη δεν επηρέασε τα τελικά αποτελέσματα σε ό,τι αφορά το βέλτιστο μίγμα στόλου, καθώς όπως αναφέρθηκε, το κόστος καυσίμων, στο οποίο υπάρχει διακύμανση από μίγμα σε μίγμα, είναι σχετικά χαμηλό ποσοστό του συνολικού κόστους, ενώ η αυξομείωση του κόστους κατασκευής των πλοίων αναμένεται να μην αλλάξει το βέλτιστο μίγμα αφού μεταβάλλονται ανάλογα τα κόστη όλων των διαθέσιμων τύπων πλοίων. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται ότι στην περίπτωση που μεταβάλλεται το κόστος κατασκευής μόνο ενός τύπου πλοίου, ο αλγόριθμος μπορεί να οδηγηθεί σε διαφορετικά αποτελέσματα, όπως στην τρίτη περίπτωση.

Συνοψίζοντας, οι μελέτες περίπτωσης που παρουσιάζονται δείχνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο, το οποίο καταλήγει σε σχετικά ακριβή αποτελέσματα που αφορούν το βέλτιστο μίγμα στόλου στον οποίο αξίζει να επενδύσει κάποιος, ο οποίος ενδιαφέρεται να ασχοληθεί με την αγορά small scale LNG και τη διανομή φορτίου LNG σε περιοχές μικρότερης ζήτησης.

## 7.1 Περαιτέρω έρευνα

Ο αλγόριθμος που περιγράφεται παραπάνω αποτελεί μια καλή προσέγγιση για τα πλοία που απαιτούνται για το διαμερισμό φορτίου LNG σε small scale περιβάλλον. Ωστόσο, με περαιτέρω έρευνα θα μπορούσαν να γίνουν καλύτερες εκτιμήσεις με την απαλοιφή κάποιων από τις παραδοχές που έχουν γίνει. Μία παραδοχή, για την οποία θα μπορούσε να γίνει μεγαλύτερη ανάλυση είναι αυτή του boil - off gas, το οποίο ενδεχομένως να διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Άλλη μία σημαντική παραδοχή που έχει γίνει είναι αυτή του sloshing. Η εισαγωγή αυτών των δύο παραμέτρων θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Το ίδιο ισχύει και για την εισαγωγή επιπλέον παραμέτρων στο συνολικό κόστος λειτουργίας του στόλου.

Τέλος, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η εφαρμογή ενός τέτοιου αλγορίθμου σε περιπτώσεις αγοράς μεγαλύτερης κλίμακας. Έτσι θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη τα διαφορετικά είδη LNG, η συμβατότητα μεταξύ λιμανιών και πλοίων καθώς επίσης και περισσότερα από ένα κεντρικά τερματικά. Το ίδιο ισχύει και στην δυνατότητα split delivery που υπάρχει στον αλγόριθμο, η οποία ορισμένες φορές μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη και σε πλοία και αποστάσεις μεγάλης κλίμακας.

# Βιβλιογραφία


Agra, A., Christiansen, M., Delgado, A., & Simonetti, L. (2014). Hybrid heuristics for a short sea inventory routing problem. *European Journal of Operational Research*, *236*(3), 924–935. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.042

Asia Pacific Energy Research Centre (APERC). (2019). *Small-scale LNG in Asia-Pacific*. *September*, 78. http://apec.org/Publications/2019/09/Small-scale-LNG-in-Asia-Pacific

Bergen Energy. (2011). Small scale LNG economics. *LNG Fuel Forum – 20th September 2011 Stockholm*, *September*, 1–17.

Bittante, A., Pettersson, F., & Saxén, H. (2018). Optimization of a small-scale LNG supply chain. *Energy*, *148*(June), 79–89. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.120

Bortfeldt, A., & Yi, J. (2020). The Split Delivery Vehicle Routing Problem with three-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, *282*(2), 545–558. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.024

Bouknight, H. (2015). *LNG Storage Solutions :*

Chen, M. (2014). The Development of Chinese Gas Pricing: Drivers, Challenges and Implications for Demand. In *Oies* (Issue July). https://www.oxfordenergy.org/2014/07/the-development-of-chinese-gas-pricing-drivers-challenges-and-implications-for-demand/

Chu Van, T., Ramirez, J., Rainey, T., Ristovski, Z., & Brown, R. J. (2019). Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *70*(April), 123–134. https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001

Department, J. S. (2012). Deception Tactics for Network Interdiction: A Multiobjective Approach. *Networks*, *60*(1), 45–58. https://doi.org/10.1002/net

*EMEA Bunker Prices - Ship & Bunker*. (n.d.). Retrieved August 13, 2020, from https://shipandbunker.com/prices/emea

Hennig, F., Nygreen, B., Christiansen, M., Fagerholt, K., Furman, K. C., Song, J., Kocis, G. R., & Warrick, P. H. (2012). Maritime crude oil transportation - A split pickup and split delivery problem. *European Journal of Operational Research*, *218*(3), 764–774. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.046

IEE, I. of E. E. J. (2018). *The Future of Asian LNG 2018*. *October*.

Lloyd's. (2015). *Small-scale LNG ships report by Lloyd's Register - issuu*. https://issuu.com/lr_marine/docs/small-scale_lng_ships_1015

Mering, W., Gomes, I., Tholen, H., Fiandaca, G., Gómez De La Fuente, J., Schiewe, T., Tijhuis, M., Adotti, C., Nishizaka, Y., Aziz Al-Mannai, A., Impuesto, F., Wittermans, F., Rujinarong, S., Panumart, H., Dhosapol, S., Singh, G. S. P., Jain, M., Purgina, A.,

Alderson, A., … Roho Bianco, A. (2015). Small scale LNG. *International Gas Union World Gas Conference Papers*, *2*(June), 909–992.

Mutlu, F., Msakni, M. K., Yildiz, H., Sönmez, E., & Pokharel, S. (2016). A comprehensive annual delivery program for upstream liquefied natural gas supply chain. *European Journal of Operational Research*, *250*(1), 120–130. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.031

*Poseidon Med II| naftemporiki.gr*. (n.d.). Retrieved August 13, 2020, from https://www.naftemporiki.gr/finance/story/1410570/poseidon-med-ii-sxediazontas-mia-oloklirómeni-kai-biosimi-efodiastiki-alusida-gia-ton-anefodiasmo-ploion-me-ygropoiimeno-fusiko-aerio-lng

Sugawara, E., & Nikaido, H. (2014). Properties of AdeABC and AdeIJK efflux systems of Acinetobacter baumannii compared with those of the AcrAB-TolC system of Escherichia coli. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *58*(12), 7250–7257. https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14

Tay, M., Khasawneh, R., Jaganathan, J., & Gamal, R. (2017). *UAE re-imposes port ban on Qatari-linked oil tankers - Reuters*. https://www.reuters.com/article/us-gulf-qatar-oil/uae-re-imposes-port-ban-on-qatari-linked-oil-tankers-idUSKBN18Z0P9

Union, I. G. (2014). *World LNG Report -2014 Edition International Gas Union*.

Wang, S., & Notteboom, T. (2015). The role of port authorities in the development of LNG bunkering facilities in North European ports. *WMU Journal of Maritime Affairs*, *14*(1), 61–92. https://doi.org/10.1007/s13437-014-0074-9

Wartsila. (2018). *Small-and medium-scale LNG terminals*. https://www.wartsila.com/docs/default-source/Power-Plants-documents/lng/small-and-medium-scale-lng-terminals_wartsila.pdf

**Πηγές στο διαδίκτυο**

https://www.packdeck.com

https://www.portcalls.com/

www.kallanishenergy.com

www.bisnow.com

www.hellenicshippingnews.com

www.marinetraffic.com

www.europe.breakbulk.com

https://pulsenews.co.kr/

https://en.ndrc.gov.cn/

www.poseidonmedii.eu/

http://www.natgas.info/

https://www.clarksons.net/wfr/