



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

Διπλωματική Εργασία

Διαμόρφωση Μοντέλου Προσομοίωσης Λειτουργίας Πλωτής Μονάδας
Αποθήκευσης και Αεριοποίησης (FSRU) με Χρήση Simulink

Ανδρουλάκης Εμμανουήλ

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Δ. Β. Λυρίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλη: Ν. Π. Βεντικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Ι. Κολέτσος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2020

Ευχαριστίες

Μετά από μια εντατική περίοδο, η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας πραγματοποιήθηκε. Ήταν μια περίοδος έντονης μάθησης για μένα, όχι μόνο στην επιστημονική γνώση, αλλά και σε προσωπικό επίπεδο. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με στήριξαν και βοήθησαν τόσο πολύ κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, Δημήτρη Β. Λυρίδη. Το γραφείο του κ. Λυρίδη ήταν πάντα ανοιχτό κάθε φορά που είχα ερωτήματα πάνω στο αντικείμενο της διπλωματικής. Ήταν ανοιχτός στις ιδέες μου αλλά όποτε χρειαζόταν με κατεύθυνε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον Χρήστο Παπαλεωνίδα για την υποστήριξη και ενθάρρυνση που έδειξε κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας της διπλωματικής εργασίας μου. Οι συνεχείς συναντήσεις που είχαμε με βοήθησαν στο μέγιστο στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής. Το τελικό αποτέλεσμα της διπλωματικής εργασίας μου δεν θα ήταν αυτό το επίπεδο, αν δεν με βοηθούσε.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και τους συμφοιτητές μου για τη φιλία και τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μας στο ΕΜΠ. Δεν μπορώ να εκφράσω πόσο ευγνώμων είμαι στους συμφοιτητές μου, Γιώργο Ανδρεάδη, Νικόλαο Αφεντούλη, Νικόλαο Βασιλειάδη και Αντώνη Κουζουπη για τη βοήθειά τους, τις συμβουλές και τη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια αυτών των ετών. Οι γνώσεις μου πάνω στο αντικείμενο αυτής της διπλωματικής δεν θα ήταν σε αυτό το επίπεδο χωρίς αυτούς.

Τέλος, πρέπει να εκφράσω τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και στις αδελφές μου. Αυτό το ταξίδι δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την αγάπη και την υποστήριξή τους. Είμαι εξαιρετικά ευγνώμων για την αγάπη τους, τη φροντίδα και τις θυσίες για την ανατροφή, την εκπαίδευση και την προετοιμασία μου για το μέλλον μου.

Σύνοψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνώνται θέματα μοντελοποίησης μιας πλωτής μονάδας αποθήκευσης και επαναεριοποίησης (FSRU, Floating Storage Regasification Unit) φυσικού αερίου (LNG) με την χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Simulink εφαρμόζοντας το σε συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης. Παράλληλα παρουσιάζονται στοιχεία και τάσεις της αγοράς του LNG και της χρήσης FSRU στην εφοδιαστική αλυσίδα καθώς και τεχνικά στοιχεία για την λειτουργία του. Κατανοώντας τα παραπάνω ο αναγνώστης θα έχει σαφή εικόνα αφενός της αγοράς του LNG και αφετέρου των τεχνικών στοιχείων και της λειτουργίας του FSRU σαν σύστημα υποδοχής LNG.

Αρχικά στα εισαγωγικά κεφάλαια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου και LNG, όπως η θερμοκρασία η πυκνότητα και το ιξώδες, ενώ εντοπίζονται οι περιοχές του πλανήτη όπου εξορύσσεται φυσικό αέριο. Θίγονται τα ζητήματα της αποθήκευσης και μεταφοράς του LNG (Liquefied Natural Gas) σε πλοία, ενώ παράλληλα γίνεται ανάλυση για τα είδη δεξαμενών και μεγεθών των πλοίων μεταφοράς LNG (LNGC - LNG Carriers). Αναλύεται η παγκόσμια αγορά του LNG και οι προοπτικές της, παραθέτοντας διαγράμματα και εικόνες που παρουσιάζουν τη ζήτηση του LNG και τις εμπορικές ροές μεταξύ χωρών. Στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή της εννοίας FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) και της λειτουργίας του ως τερματικού σταθμού αποθήκευσης LNG και επαναεριοποίησης του. Παρουσιάζονται εταιρίες που έχουν επενδύσει σε τέτοιες μονάδες, βασικά οικονομικά στοιχεία των FSRU (CAPEX-OPEX), ο παγκόσμιος στόλος και τα έργα FSRU υπό κατασκευήν για το 2019.

Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται τα τεχνικά ζητήματα και οι λειτουργίες του FSRU. Παραθέτονται τα τεχνικά στοιχεία μιας μονάδας FSRU (αντλίες, σωλήνες εναλλάκτες θερμότητας) και οι αρχές λειτουργίας καθενός, ενώ ταυτόχρονα επεξηγείται η διαδικασία της αεριοποίησης του LNG. Ακόμα πραγματοποιείται περιγραφή διαδικασιών εκφόρτωσης και φόρτωσης LNG από ένα LNGC σε ένα FSRU, οι οποίες βασίζονται σε manuals πραγματικών πλοίων. Οι συγκεκριμένες διαδικασίες παρουσιάζονται και μέσω ενός διαγράμματος στο οποίο ορίζονται τα τεχνικά στοιχεία που παίζουν σημαντικό ρόλο στη φόρτωση ή την εκφόρτωση.

Για την μοντελοποίησης της μονάδας FSRU (Κεφάλαιο 4ο) με την χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του Simulink αρχικά πραγματοποιείται μια εισαγωγή στο συγκεκριμένο προγραμματιστικό περιβάλλον. Επεξηγείται πως λειτουργεί το Simulink και ποιες είναι οι δυνατότητες του. Στη συνέχεια αναλύονται το πως λειτουργεί το μοντέλο και πως προσομοιώθηκε κάθε τεχνική παράμετρος (αντλίες, βαλβίδες κλπ.).

Με την ολοκλήρωση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε η μελέτη περίπτωσης (Κεφάλαιο 5ο). Η μελέτη περίπτωσης στην πραγματικότητα αποτελείται από τρία σενάρια-περιπτώσεις αλληλουχίας φορτοεκφορτώσεων. Κάθε ένα σενάριο-περίπτωση αφορά διαφορετικό προφίλ ζήτησης αερίου από την κατανάλωση, διαφορετικό σετ τεχνικών παραμέτρων φόρτωσης-εκφόρτωσης και αποσκοπεί στον να παρουσιάσει τις δυνατότητες του μοντέλου στην πρόβλεψη της διακύμανσης όγκου και παροχών ώστε να είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας του LNG. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροών του LNG σε διάφορα σημεία του συστήματος αλλά και διαγράμματα του όγκου του LNG που βρίσκεται σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο.

Συμπερασματικά, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο την πλήρη αποτύπωση μιας μονάδας FSRU (τεχνικά στοιχεία, οικονομικά στοιχεία κλπ.) ώστε μέσω της δημιουργίας ενός μοντέλου Simulink να βοηθήσει στην πλήρη κατανόηση και ρεαλιστικής

απεικόνιση της λειτουργίας του FSRU σε μια αλληλουχία φόρτο-εκφορτώσεων LNG. Και βέβαια η προσομοίωση και η κατανόηση είναι το πρώτο στάδιο για την βελτιστοποίηση σε κάθε μελέτη.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Σύνοψη.....	2
Νομενκλατούρα	6
Λίστα εικόνων.....	7
Λίστα πινάκων.....	9
Λίστα διαγραμμάτων.....	10
Εισαγωγή	12
2.Επικαιροποιημένα στοιχεία αγοράς LNG και FSRU.....	13
2.1 Φυσικό Αέριο	13
2.2 LNG	14
2.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά LNG	14
2.2.2 Αποθήκευση και Μεταφορά LNG	15
2.2.3 Παγκόσμιο εμπόριο LNG και προοπτικές	15
2.2.4 Εμπορικές ροές LNG	17
2.2.5 Πλοία LNG.....	18
2.3 Floating Storage Regasification Unit (FSRU)	19
2.3.1 Εισαγωγή FSRU.....	19
2.3.2 Έργα πλωτής αποθήκευσης και επαν-αεριοποίησης (FSRU)	21
2.3.3 Βασικές Εταιρείες	21
2.3.4 Επενδύσεις-Κεφαλαιουχικός εξοπλισμός ενός FSRU	24
2.3.5 Κόστος Μετατροπής	25
2.3.6 Κόστος νέας κατασκευής FSRU.....	25
2.3.7 Λειτουργικές δαπάνες (OPEX) ενός FSRU	27
2.3.8 Περίοδος Μίσθωσης	28
2.3.9 Τιμές μίσθωσης	28
3.Περιγραφή διαδικασιών FSRU κατά τη φόρτωση, εκφόρτωση και αεριοποίηση LNG ..	29
3.1 Τεχνικά στοιχεία FSRU	29
3.1.1 Τεχνολογία ενός FSRU.....	29
3.1.2 Συστήματα αποθήκευσης φορτίου	29
3.1.3 Σωλήνες- Βραχίονες εκφόρτωσης LNG	31
3.1.4 Αγωγοί φορτίου	31
3.1.5 Αντλίες.....	32
3.2 Αεριοποίηση.....	35
3.3 Vaporizers.....	37
3.3.1 Γενικά στοιχεία ενός vaporizer	37
3.3.2 Open rack vaporizer (ORV)	38

3.3.3 Shell and tube vaporizer (STV).....	39
3.3.4 Intermediate fluid vaporizer (IFV).....	40
3.3.5 Submerged combustion vaporizer (SCV).....	42
3.4 Διαδικασίες φόρτωσης - εκφόρτωσης.....	43
3.4.1 Απομάκρυνση του νερού	43
3.4.2 Προκαταρκτικές επικοινωνίες	43
3.4.3 Ψύξη σωληνώσεων	44
3.4.4 Λειτουργία φόρτωσης του FSRU	45
3.4.5 Εκφόρτωση LNGC και Φόρτιση FSRU	46
3.4.6 Διαδικασία εκφόρτωσης LNG με επιστροφή ατμών	46
3.4.7 Αποστράγγιση / καθαρισμός.....	47
3.5 Βήματα φόρτωσης με επιστροφή ατμών	50
3.6 Βήματα εκφόρτωσης LNG από το LNGC στο FSRU με επιστροφή ατμών	54
4. Περιγραφή Μοντέλου Προσομοίωσης Λειτουργίας FSRU	60
4.1 Περιβάλλον του Simulink.....	60
4.2 Περιγραφή μοντέλου	63
5.Μελέτη περίπτωσης.....	78
5.1 Πρώτη περίπτωση: Μια μόνο φόρτωση LNG στο FSRU	78
5.2 Δεύτερη περίπτωση: Τρεις φορτώσεις LNG στο FSRU από ίδια LNGC	85
5.3 Τρίτη περίπτωση: Τρεις φορτώσεις LNG στο FSRU από διαφορετικά LNGCs	92
6.Συμπεράσματα και προτάσεις για Μελέτη.....	96
6.1 Συμπεράσματα.....	96
6.2 Προτάσεις για μελέτη	99
7.Παράρτημα	100
8.Βιβλιογραφία	102

Νομενκλατούρα

LNG: Liquefied Natural Gas

FSRU: Floating Storage and Regasification Unit

BOG: Boil off gas

MT: Metric Tonnes

m³: cubic meters

m³/hr: cubic meter per hour

mtpa: millions of tonnes per annum

tpa: tonnes per annum

EEA: European Environment Agency

IGU: International Gas Union

IEA: International Energy Agency

OPEX: Operational expenditure

CAPEX: Capital Expenditure

YOY: year over year

HP: high pressure

LP: low pressure

HD: high duty

LD: low duty

ORV: Open Rack Vaporizer

STV: Shell and Tube Vaporizer

IFV: Intermediate Fluid Vaporizer

SVC: Submerged Combustion Vaporizer

ESD: Emergency Shut Down

CCR: Cargo control room

BY: Βαλβίδα υγρού

BA: Βαλβίδα αερίου

BΨ: Βαλβίδα ψεκασμού

BΣ: Βαλβίδα συμπιεστή

Λίστα εικόνων

- Εικόνα 1. Ροές ζήτησης LNG μεταξύ χωρών από Αύγουστο 2018 μέχρι Ιούλιο 2019
- Εικόνα 2. Παγκόσμιος στόλος πλοίων μεταφοράς LNG
- Εικόνα 3. LNGC αγκυροβολημένο σε μονάδα FSRU
- Εικόνα 4. Submerged buoy system
- Εικόνα 5. Surface system
- Εικόνα 6. Μονάδα FSRU τύπου Moss
- Εικόνα 7. Δεξαμενή φορτίου τύπου Moss
- Εικόνα 8. Θέση αντλιών στις δεξαμενές
- Εικόνα 9. Τυπική αντλία LP και η καμπύλη της
- Εικόνα 10. Τυπική αντλία HP και η καμπύλη της
- Εικόνα 11. Τεχνικά στοιχεία μονάδας FSRU
- Εικόνα 12. Σύστημα Recondenser
- Εικόνα 13. ORV vaporizer
- Εικόνα 14. Σύστημα ORV
- Εικόνα 15. Σύστημα STV
- Εικόνα 16. Σύστημα IFV
- Εικόνα 17. Σύστημα SCV
- Εικόνα 18. Διαδικασίες φόρτωσης LNG σε ένα FSRU
- Εικόνα 19. Διαδικασία εκφόρτωσης LNGC
- Εικόνα 20. Σύστημα σωληνώσεων, βαλβίδων, δεξαμενών και αντλιών ενός LNGC και FSRU
- Εικόνα 21. Διαδικασίες ψύξης στο FSRU
- Εικόνα 22. Θέση βαλβίδας BY14
- Εικόνα 23. Θέση βαλβίδων BΨ1,2,3,4
- Εικόνα 24. Διαδικασία φόρτωσης LNG στο FSRU
- Εικόνα 25. Θέση βαλβίδας BA11
- Εικόνα 26. Θέση βαλβίδων BΣ7,9,10,12
- Εικόνα 27. Θέση βαλβίδας BA11
- Εικόνα 28. Θέση βαλβίδας BA4
- Εικόνα 29. Διαδικασία ψύξης LNGC

- Εικόνα 30. Θέση βαλβίδων ΒΨ34,33
- Εικόνα 31. Θέση βαλβίδων ΒΨ5,4,3,2,1
- Εικόνα 32. Διαδικασία εκφόρτωσης LNG από το LNGC
- Εικόνα 33. Μπλοκ πολλαπλασιασμού στο Simulink
- Εικόνα 34. Παράδειγμα υποσυστήματος στο Simulink
- Εικόνα 35. Παράδειγμα με μπλοκ Scope
- Εικόνα 36. Παράδειγμα με μπλοκ To Workspace
- Εικόνα 37. Γενικό διάγραμμα μοντέλου
- Εικόνα 38. Γενική διάταξη Simulink
- Εικόνα 39. Διάγραμμα ροής με τα input και output του μοντέλου
- Εικόνα 40. Εσωτερικό του υποσυστήματος LNGC1
- Εικόνα 41. Παράμετροι του μπλοκ (MAX Pump Flow of Tank 4)
- Εικόνα 42. Εσωτερικό του υποσυστήματος use of valve over time
- Εικόνα 43. Παράμετροι των Switch μπλοκ στο υποσύστημα LNGC1
- Εικόνα 44. Εσωτερικό του υποσυστήματος FSRU
- Εικόνα 45. Εσωτερικό του υποσυστήματος FSRU TANK VALVE
- Εικόνα 46. Εσωτερικό του υποσυστήματος FSRU TANK
- Εικόνα 47. Εσωτερικό του chart
- Εικόνα 48. Διάταξη των μπλοκ της μεταβλητής ελέγχου
- Εικόνα 49. Κώδικας αρχικοποίησης για την πρώτη περίπτωση
- Εικόνα 50 Κώδικας αρχικοποίησης για τη δεύτερη περίπτωση
- Εικόνα 51. Κώδικας αρχικοποίησης για τη τρίτη περίπτωση

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά LNG

Πίνακας 2. Περιοχές που εξετάζονται για επενδύσεις FSRU

Πίνακας 3. CAPEX ενός FSRU

Πίνακας 4. Κόστη και άλλα χαρακτηριστικά ανά FSRU

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά του FSRU και του LNGC για την πρώτη περίπτωση

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά του FSRU και των LNGC για την δεύτερη περίπτωση

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά του FSRU και των LNGC για την τρίτη περίπτωση

Λίστα διαγραμμάτων

- Διάγραμμα 1. Εξαγωγές LNG ανά χωρά σε MT
- Διάγραμμα 2. Εισαγωγές LNG ανά χωρά σε MT
- Διάγραμμα 3. Παγκόσμιος στόλος FSRU ανά εταιρία
- Διάγραμμα 4. Παγκόσμιος στόλος FSRU ανά έτος
- Διάγραμμα 5. Σχέση παραγωγής αέριας φάσης LNG με τη θερμοκρασία της θάλασσας
- Διάγραμμα 6. Μορφή της ροής LNG μιας δεξαμενής του LNGC προς FSRU
- Διάγραμμα 7. Μορφή της συνολικής ροής LNG του LNGC προς FSRU
- Διάγραμμα 8. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.1
- Διάγραμμα 9. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 1.1
- Διάγραμμα 10. Συνολική ροή LNG από τα LNGC (μόνο ένα) προς το FSRU ως προς τον χρόνο για την περίπτωση 1
- Διάγραμμα 11. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.1
- Διάγραμμα 12. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.1
- Διάγραμμα 13. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.2
- Διάγραμμα 14. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 1.2
- Διάγραμμα 15. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.2
- Διάγραμμα 16. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.2
- Διάγραμμα 17. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.1
- Διάγραμμα 18. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 2.1
- Διάγραμμα 19. Συνολική ροή LNG από τα LNGC προς το FSRU ως προς τον χρόνο για την περίπτωση 2
- Διάγραμμα 20. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.1
- Διάγραμμα 21. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.1
- Διάγραμμα 22. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.2
- Διάγραμμα 23. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 2.2

Διάγραμμα 24. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.2

Διάγραμμα 25. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.2

Διάγραμμα 26. Συνολική ροή LNG από τα LNGC προς το FSRU ως προς τον χρόνο για την περίπτωση 3

Διάγραμμα 27. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 3

Διάγραμμα 28. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 3

Διάγραμμα 29. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 3

Διάγραμμα 30. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 3

Εισαγωγή

Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια, με το μερίδιο του φυσικού αερίου να αυξάνεται σταθερά κάθε χρόνο. Η συνεχής συζήτηση για τη βιωσιμότητα και την καθαρή ενέργεια οδήγησε την παγκόσμια αγορά στην αύξηση της ζήτησης του φυσικού αερίου. Ως αποτέλεσμα, το φυσικό αέριο αποτελεί σήμερα μια σημαντική πηγή ενέργειας λόγω των χαμηλότερων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο.

Αναμένεται ότι τα έτη έως το 2050 φυσικά το αέριο θα αποτελέσει σημαντικό μέρος της μετάβασης από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα (δηλαδή άνθρακα και πετρελαίου) σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. αιολική και ηλιακή ενέργεια) (IEA, 2019). Παραδοσιακά, το φυσικό αέριο τροφοδοτείται από τις περιοχές παραγωγής αερίου στις περιοχές που καταναλώνουν φυσικό αέριο μέσω αγωγών. Ωστόσο, η παροχή αερίου μέσω αγωγών περιέχει μερικές ατέλειες και περιορισμούς (όπως το περιορισμένο βάθος). Το υγροποιημένο φυσικό είναι πολύ πιο εύκολο στη μεταφορά, λόγω της υγρής μορφής του αλλά και στη διαφορά της πυκνότητας του με το φυσικό αέριο (600 φορές μεγαλύτερη άρα 600 φορές μικρότερος όγκος μεταφοράς για την ίδια ποσότητα).

Επί του παρόντος, οι μεταφορές του υγροποιημένου αερίου μέσω θάλασσας είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος μεταξύ σταθμών φυσικού αερίου και παραδοσιακών τερματικών σταθμών υγροποιημένου φυσικού αερίου. Δεδομένου ότι η τεχνική της πλωτής παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης αερίου συνεχίζει να αναπτύσσεται αυτά τα χρόνια, πολλές νέες φόρμες φόρτωσης και εκφόρτωσης έχουν αναπτυχθεί. Μια παραπάνω μονάδα αποτελεί μια πλωτή μονάδα υγροποιημένου φυσικού αερίου και μπορεί να υποκαταστήσει τον παραδοσιακό τερματικό σταθμό εξαγωγής, ενεργώντας ως μονάδα υγροποίησης και αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου στη θάλασσα.

2.Επικαιροποιημένα στοιχεία αγοράς LNG και FSRU

2.1 Φυσικό Αέριο

Το φυσικό αέριο είναι ένα αέριο μείγμα υδρογονανθράκων με σχετικά μικρό αριθμό ατόμων άνθρακα. Εξάγεται από υπόγειες κοιλότητες και εξαιτίας των ιδιοτήτων του θεωρείται οικολογικό καύσιμο. Κύριο συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο ενώ συστατικά του αποτελούν επίσης το αιθάνιο, το προπάνιο και το βουτάνιο. Είναι άοσμο, άχρωμο και αόρατο ενώ ακόμα είναι ελαφρύτερο από τον αέρα.

Χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, και σαν καύσιμο στην βιομηχανία και στον οικιακό τομέα. Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, ειδικά από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 και έπειτα, το φυσικό αέριο υπερτερεί σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές επιλογές. Το μερίδιο των καυσίμων στην συνολική ηλεκτροπαραγωγή της Ευρώπης για το 2010 ήταν: άνθρακας 24,7%, πετρέλαιο 2,6%, φυσικό αέριο 23,6%, πυρηνικά καύσιμα 27,4%, ανανεώσιμες πηγές 20,9%, άλλα καύσιμα 0,7% (ΕΕΑ, 2013). Η χρήση φυσικού αερίου αυξήθηκε ιδιαίτερα μετά το 2000, όταν εισήλθαν σε ευρεία χρήση στην Ευρώπη σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου οι οποίοι χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ως καύσιμο και παράγουν ενέργεια μέσω αεριοστρόβιλου. Το φυσικό αέριο αποτελεί μια σχετικά νέα, καινοτόμα πηγή ενέργειας με πολλά πλεονεκτήματα. Θεωρείται το πλέον αποδοτικό και οικονομικό καύσιμο, με πρακτικά, μετρήσιμα οφέλη τόσο για όσους το χρησιμοποιούν όσο και για την οικονομία και την κοινωνία συνολικότερα. Μια εξαιρετικά σημαντική πτυχή της χρήσης του, με θετικές συνέπειες για το σήμερα και το μέλλον, είναι η περιβαλλοντική λόγω του ότι εκπέμπει πολύ λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα ανά παραγόμενη θερμική μονάδα, συγκρινόμενο με τα παράγωγα του πετρελαίου και άνθρακα. Αυτό εκτός από το θετικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του φυσικού αερίου δίνει παράλληλα και θετικά οικονομικά αποτελέσματα, αφού μειώνει τον φόρο διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ emissions tax) όπου τουλάχιστον αυτός επιβάλλεται από την ισχύουσα νομοθεσία (πχ. Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της αγοράς δικαιωμάτων ρύπων κλπ.)

Τα κοιτάσματα φυσικού αερίου συνήθως βρίσκονται μακριά από τα σημεία κατανάλωσης, συνεπώς είναι αναγκαίο να μεταφερθεί στον προορισμό κατανάλωσης. Η μεταφορά του φυσικού αερίου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η γεωπολιτικές ισορροπίες, οι συμφωνίες μεταξύ κρατών, οι κανονισμοί ασφαλείας κ.α. Το φυσικό αέριο μεταφέρεται σε δύο καταστάσεις αέρια ή υγρή. Σε αέρια κατάσταση μεταφέρεται με αγωγούς κυρίως υπό υψηλή πίεση, ενώ σε υγρή κατάσταση μεταφέρεται με πλοία σε ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες και σε υψηλή πίεση. Λόγω της χαμηλής πυκνότητάς του, δεν είναι οικονομικό να μεταφέρεται οδικώς με οχήματα ενώ οι αγωγοί φυσικού αερίου δεν είναι πρακτικοί στους ωκεανούς, δηλαδή μέσω υποθαλάσσιων αγωγών, καθώς το αέριο χρειάζεται να ψύχεται και να συμπιέζεται. Για σχετικά μικρές όμως αποστάσεις είναι εφικτή η λύση υποθαλάσσιων αγωγών.

Οι χώρες που αναμένεται να έχουν την περισσότερη ανάπτυξη στη παραγωγή φυσικού αερίου είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Ρωσία και οι χώρες της Αφρικής. Βέβαια υπάρχουν και πολλά άλλα κράτη που ερευνούν νέα κοιτάσματα στον Αραβικό Κόλπο, την Αυστραλία, την Νότιο Αμερική και τις Νότιες χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Την παγκόσμια κυριαρχία στη ζήτηση φυσικού αερίου την κατέχει η Νότια Ασία και κυρίως η Κίνα. Τα τελευταία χρόνια η Κίνα έχει επενδύσει στο χώρο του φυσικού αερίου χτίζοντας νέους τερματικούς σταθμούς και σταθμούς αεριοποίησης.

2.2 LNG

2.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά LNG

Προσπαθώντας να αναλύσουμε την αγορά του φυσικού αερίου θα πρέπει πρώτα να γνωρίσουμε και να ορίσουμε το προϊόν Liquefied Natural Gas (LNG). Ως LNG ορίζεται λοιπόν το υγροποιημένο φυσικό αέριο που έχει ψυχθεί στους -160°C , σε κατάσταση μιας ατμοσφαιρικής πίεσης, που είναι και η φυσική κατάσταση στην οποία συμπυκνώνεται, με ταυτόχρονη μείωση του όγκου του και μετατροπή του στην υγρή φάση. Κατά την υγροποιημένη του μορφή το φυσικό αέριο είναι άοσμο, άχρωμο, μη τοξικό και μη διαβρωτικό. Η υγροποίησή του (με ειδικές διεργασίες), προκαλεί μείωση του όγκου του έως και 600 φορές (σε σύγκριση με τον όγκο στην αέρια κατάστασή καθιστώντας ιδιαίτερα οικονομικά συμφέρουσα την μεταφορά του. Αξιοσημείωτο είναι ότι η πυκνότητά του LNG είναι περίπου η μισή από αυτή του νερού. Συνήθης μονάδα μέτρησης του φυσικού αερίου σε υγρή μορφή είναι ο μετρικός τόνο (Metric Ton, MT).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά LNG

Θερμοκρασία βρασμού	-160C° με -162C°
Μοριακό βάρος	16 με 19 g/mol
Πυκνότητα	425-485 kg/m ³
Θερμοχωρητικότητα	2,2-3.7 KJ/kg/C ^o
Ιξώδες	0,11-0,18 mPa*s

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) αποδείχθηκε βιώσιμη πηγή ενέργειας το 1917 στη Δυτική Βιρτζίνια των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (Ingfacts.org 2019) . Ακολούθησε η δημιουργία της πρώτης εμπορικής μονάδας υγροποίησης η οποία κατασκευάστηκε το 1941. Τον Ιανουάριο του 1959, το πρώτο δεξαμενόπλοιο LNG του κόσμου το Methane Pioneer μετέφερε το πρώτο φορτίο υγροποιημένου φυσικού αερίου από το Lake Charles της Λουϊζιάνα στο Canvey Island του Ηνωμένου Βασιλείου. Γεγονός που απέδειξε ότι μεγάλες ποσότητες υγροποιημένου φυσικού αερίου μπορούν να μεταφερθούν με ασφάλεια μέσω θαλάσσης. Σήμερα περίπου το ένα τρίτο του φυσικού αερίου διακινείται μέσω υγροποιημένης μορφής. Επακόλουθο της αυξητικής τάσης της αγοράς του LNG ήταν η κατασκευή τερματικών σταθμών αποθήκευσης όπου απαιτείται σε συγκεκριμένα σημεία της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η διαδικασία για την δημιουργία του εμπορεύσιμου προϊόντος LNG ξεκινά με την προεπεξεργασία του φυσικού αερίου που εισέρχεται στο σύστημα. Στόχος είναι η απομάκρυνση ανεπιθύμητων προσμίξεων όπως π.χ. υδραργύρου και υδρογονανθράκων με αλυσίδα μεγαλύτερης των 4 ατόμων άνθρακα. Στη συνέχεια το αέριο εισέρχεται στη μονάδα υγροποίησης όπου ψύχεται μεταξύ -145°C και -163°C . Η βασική διεργασία περιλαμβάνει την κυκλοφορία του αερίου σε εναλλάκτες θερμότητας οι οποίοι ψύχουν και τελικά υγροποιούν το αέριο .Το LNG στη συνέχεια αποθηκεύεται σε ειδικές μονωμένες δεξαμενές με ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας , έτοιμο να μεταφορτωθεί για να μεταφερθεί στον τελικό του προορισμό όπου απαιτούνται αντίστοιχες δεξαμενές υποδοχής και αποθήκευσης του. Οι συνθήκες ασφαλείας είναι ιδιαίτερα αυστηρές, όπως και οι διαδικασίες συντήρησης των εγκαταστάσεων είναι αυστηρά σχολαστικές.

2.2.2 Αποθήκευση και Μεταφορά LNG

Για την αποθήκευση του LNG χρησιμοποιούνται δεξαμενές αποθήκευσης. Οι συγκεκριμένες δεξαμενές χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος και αυστηρά μέτρα ασφαλείας. Η κατάλληλη επιλογή μηχανημάτων, οργάνων ελέγχου, υλικών κλπ. είναι αναγκαία για την αποφυγή αστοχίας. Το μέγεθος αποθήκευσης των τερματικών σταθμών ποικίλλει. Υπάρχουν εγκαταστάσεις με δυνατότητα αποθήκευσης μερικών χιλιάδων κυβικών μέτρων αλλά και τερματικοί σταθμοί με δυνατότητα αποθήκευσης 100.000m³ και άνω. Η μεταφορά του φυσικού αερίου πραγματοποιείται με πλοία τα οποία είναι ειδικά σχεδιασμένα για τις απαιτήσεις μεταφοράς. Όπως έχει προαναφερθεί η μεταφορά του φυσικού αερίου πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες υπό πίεση γεγονός που παρουσιάζει ιδιαίτερους κινδύνους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα μέτρα ασφαλείας και οι περιορισμοί που λαμβάνονται να είναι ιδιαίτερα αυστηροί και η προσέγγιση τέτοιων πλοίων να επιτρέπεται μόνο σε ειδικές προβλήτες που παρέχουν σε υψηλό βαθμό συστήματα ασφαλείας, πρόβλεψης και αντιμετώπισης έκτακτων συνθηκών.

Η χωρητικότητα των πλοίων υπολογίζεται σε κυβικά μέτρα υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Με δεδομένο ότι υπό τις συνθήκες αυτές ένα κυβικό μέτρο υγρού φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε 600 κυβικά μέτρα φυσικού αερίου, ένα πλοίο χωρητικότητας 120.000 m³ μπορεί να μεταφέρει περίπου 70.000.000 m³ φυσικού αερίου μετά από επαν-αεροποίηση.

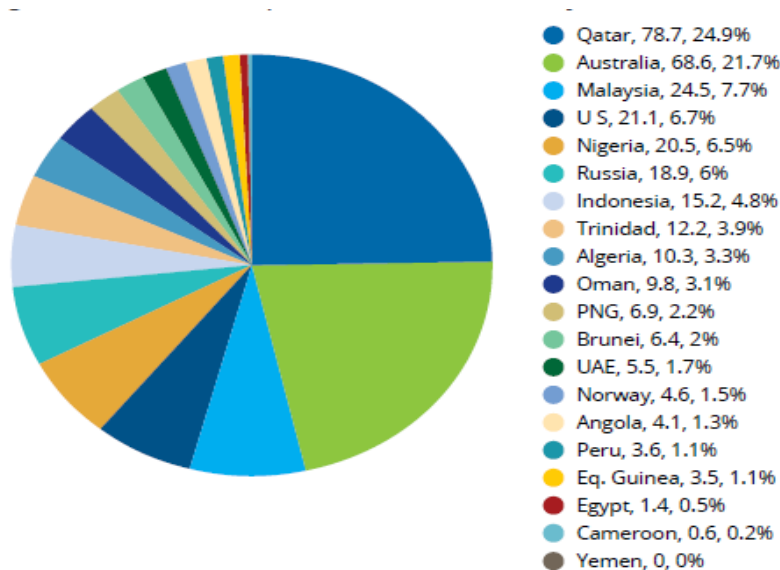
Τα πλοία LNG διακρίνονται σε:

- LNG μεμβράνης
- LNG σφαιρικών δεξαμενών
- Prismatic

Στα LNG τύπου μεμβράνης οι δεξαμενές έχουν κοινό τοίχωμα με την γάστρα του πλοίου ενώ στα LNG σφαιρικών δεξαμενών υπάρχουν συνήθως τέσσερις με πέντε σφαιρικές δεξαμενές αλουμινίου οι οποίες προεξέχουν από το κατάστρωμα. Τέλος τα Prismatic LNG αποτελούνται από ανεξάρτητα containers αλουμινίου που βρίσκονται εντός της γάστρας.

2.2.3 Παγκόσμιο εμπόριο LNG και προοπτικές

Το 2018, για πέμπτο συνεχές έτος, το παγκόσμιο εμπόριο LNG έφτασε σε ιστορικό υψηλό διακινηθέντων ποσοτήτων, φθάνοντας τους 316,5 εκατομμύρια τόνους (MT). Αυτό σηματοδοτεί αύξηση 28,2 MT σε σχέση με το 2017, και αύξηση 9,8% σε ετήσια βάση (year-on-year) (IGU, 2019). Η Αυστραλία πρωταγωνίστησε στις εξαγωγές με αύξηση (+12,2 MT) ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες ήταν και πάλι ο δεύτερος μεγαλύτερος αναπτυσσόμενος 'παίκτης' LNG προσθέτοντας επιπλέον 8,2 MT. Χώρες-μεγάλοι καταναλωτές που οδήγησαν στη παγκόσμια ανάπτυξη της αγοράς του LNG είναι η Νότια Κορέα, η Ινδία και το Πακιστάν, οι οποίες συνέβαλαν συνολικά αύξησαν κατά 12,8 (MT) στις εισαγωγές. Ο Ειρηνικός ωκεανός συνεχίζει να είναι η βασική κινητήρια δύναμη της ανάπτυξης του εμπορίου. Οι εμπορικές ροές εντός του Ειρηνικού υποστηριζόμενες από την αυξημένη Αυστραλιανή παραγωγή και την Κινεζική ζήτηση φτάνουν στο ρεκόρ των διακινούμενων 134,2 MT.



Διάγραμμα 1. Εξαγωγές LNG ανά χώρα σε MT (IGU, 2019)

Παρόλο όμως που η Ασία-Ειρηνικός έχει αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία στη διακίνηση του LNG και συνεπώς στο παγκόσμιο εμπόριο τα τελευταία χρόνια, το Κατάρ παρέμεινε το μεγαλύτερο κράτος στις εξαγωγές LNG. Το Κατάρ είχε μερίδιο 25% των συνολικών παγκόσμιων εξαγωγών LNG το 2018 (78,7 MT). Η Αυστραλία ήταν δεύτερη με 22% της παγκόσμιας προσφοράς (68,6 MT εξαγωγών). Οι νέες αγορές εξακολουθούν να διαδραματίζουν σχετικά μικρό ρόλο στην αύξηση της ζήτησης του LNG, με όλους τους νέους εισαγωγείς να ανέρχονται μόλις σε αύξηση 1,3 εκατ. τόνους το 2018.

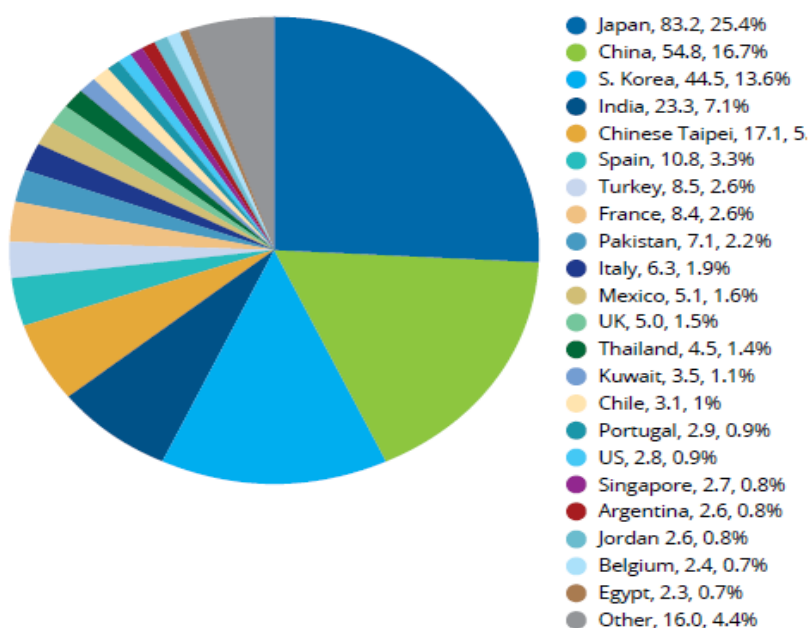
Το 2018 η Ασία - Ειρηνικός παρέμεινε η μεγαλύτερη περιοχή εισαγωγής με μεγάλη διαφορά, αν και το μερίδιό τους στο παγκόσμιο εμπόριο υποχώρησε κάτω από το 50% στο 48% για πρώτη φορά από τα μέσα της δεκαετίας του '70. Αυτό είναι το πέμπτο συνεχόμενο έτος μείωσης στο μερίδιο αγοράς της περιοχής, το οποίο οφείλεται κυρίως στην συνεχόμενη ανάκαμψη στις Ευρωπαϊκές εισαγωγές. Η ζήτηση στην Ασία-Ειρηνικό εξακολουθεί να καθοδηγείται από την Ιαπωνία (83,2 MT), με τη Νότια Κορέα (44,5 MT) να φτάνει σε νέο ετήσιο ρεκόρ εισαγωγών κατά τη διάρκεια του 2018. Παρόλη την υψηλή παραγωγή από την Αυστραλία, το εμπόριο του Ειρηνικού μειώθηκε το 2018, δεδομένης της χαμηλότερης παραγωγής από άλλες χώρες-περιφερειακές παραγωγούς και τις σχετικά μειωμένες εισαγωγές στην Ιαπωνία. Εντούτοις, το ενδοπεριφερειακό εμπόριο ανήλθε σε 81,8 τόνους το 2018.

Στην Ιαπωνία, οι εισαγωγές μειώθηκαν κατά τι (-0,6 MT YOY), δεδομένου των μειωμένων απαιτήσεων από τον τομέα της ενέργειας. Η αγορά της Ιαπωνίας παραμένει η μοναδική που αντιπροσωπεύει πάνω από το ένα τέταρτο του συνολικού παγκόσμιου εμπορίου. Η Νότια Κορέα, η οποία ήταν η δεύτερη μεγαλύτερη αγορά το 2016, έδειξε ισχυρή αύξηση εισαγωγών LNG αυξάνοντας τις εισαγωγές κατά 6,4 MT το 2018. Ο ψυχρός χειμώνας του 2017-2018, καθώς και η μικρή διαθεσιμότητα άνθρακα και πυρηνικής ενέργειας υποστήριξε τις εισαγωγές LNG στην αγορά. Οι εισαγωγές της Ιαπωνίας και της Νότιας Κορέας προέρχονται κυρίως από την Αυστραλία, αλλά και το Κατάρ και τη Μαλαισία

Το Μπαγκλαντές και ο Παναμάς έγιναν εισαγωγείς LNG κατά τη διάρκεια του 2018 με τους πρώτους τους τερματικούς σταθμούς που τέθηκαν σε λειτουργία. Στο Μπαγκλαντές, ένας υπεράκτιος τερματικός σταθμός άρχισε να προμηθεύει το περιφερειακό δίκτυο φυσικού

αερίου, ενώ στον Παναμά ένας επίγειος τερματικός σταθμός παρέχει LNG για χρήση ηλεκτροπαραγωγής με φυσικό αέριο.

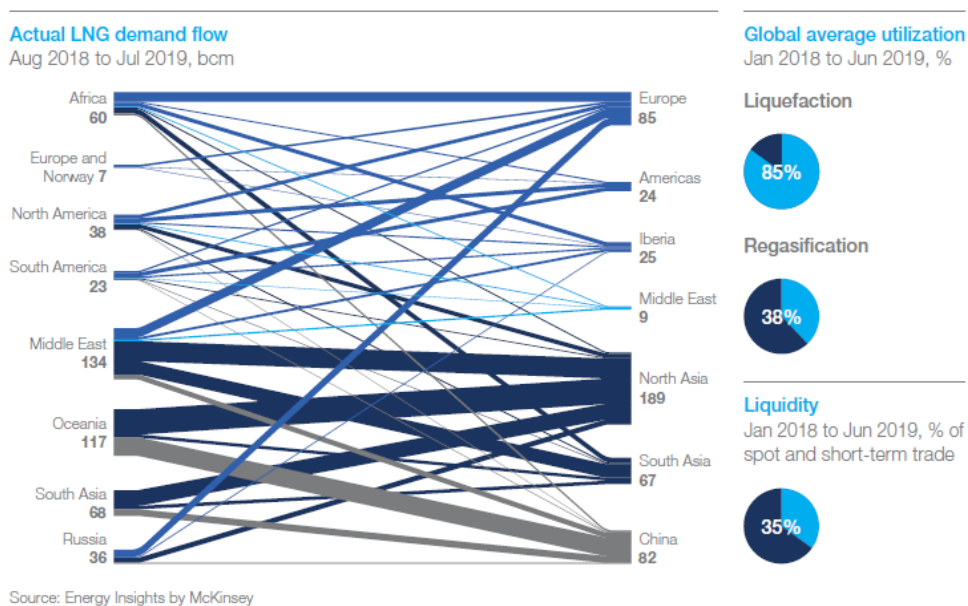
Οι ευρωπαϊκές εισαγωγές αυξήθηκαν για τέταρτη συνεχή χρονιά το 2018, φθάνοντας τα 50,0 MT (+ 7,3% ΥΟΥ). Υψηλότερες εισαγωγές απαιτήθηκαν, συνακόλουθο της πτώσης των εγχώριων παραγωγών, κυρίως στην Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Η Ισπανία συρρικνώθηκε κατά το 2018 λόγω των αυξημένων εισαγωγών αερίου μεσώ αγωγών. Οι ισχυρότερες αυξήσεις στις εισαγωγές LNG ήταν αγορές στη Βορειοδυτική Ευρώπη, με το Βέλγιο (+1,4 MT), τις Κάτω Χώρες (+1,3 MT) και τη Γαλλία (+0,9 MT) να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στην περιοχή το 2018.



Διάγραμμα 2. Εισαγωγές LNG ανά χώρα σε MT (IGU 2019)

2.2.4 Εμπορικές ροές LNG

Η μεγαλύτερη παγκόσμια εμπορική ροή υγροποιημένου φυσικού αερίου εξακολουθεί να είναι εντός του Ειρηνικού, μια τάση που είναι απίθανο να αλλάξει βραχυπρόθεσμα στην αγορά λόγω της υψηλής αύξησης της ζήτησης στην Ασία και την αύξηση της προσφοράς από την Αυστραλία. Το εμπόριο μεταξύ Μέσης Ανατολής και Ειρηνικού ήταν το δεύτερο μεγαλύτερο λόγω του ρόλου του Κατάρ σαν βασικού προμηθευτή της Ιαπωνίας, της Νότιας Κορέας και της Κίνας. Το ενδο-Ατλαντικό εμπόριο παρέμεινε η τρίτη μεγαλύτερη περιοχή ροών LNG ποσοτικά. Τέλος το εμπόριο Ατλαντικού-Ειρηνικού αυξήθηκε κατά 11,6 τόνους κατά τη διάρκεια του 2018, καθιστώντας την τέταρτη μεγαλύτερη διαδρομή.



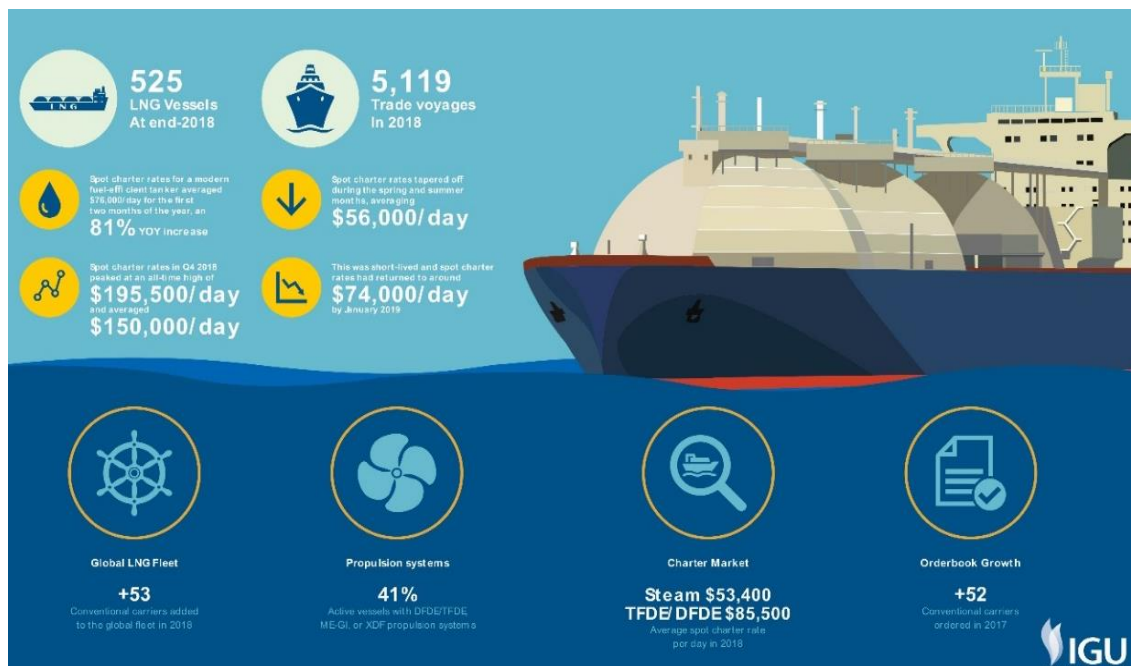
Εικόνα 1. Ροές ζήτησης LNG μεταξύ χωρών από Αύγουστο 2018 μέχρι Ιούλιο 2019 (McKinsey, 2019)

Η κύρια περιοχή διακίνησης εξακολουθεί να είναι εντός του Ειρηνικού το οποίο ήταν 134,2 ΜΤ. Για να αντιληφθούμε τη διαφορά η συνολική ροή Ειρηνικού-Μέσης Ανατολής και Ειρηνικού-Ατλαντικού συνολικά ήταν μόλις 2,2 ΜΤ το 2018. Επιπλέον ο Ειρηνικός προσέλκυσε περισσότερο LNG από τον Ατλαντικό, γεγονός που οφείλεται στις υψηλότερες ροές LNG από τις Ηνωμένες Πολιτείες στην Ασία μέσω της διώρυγας του Παναμά. Οι ροές εντός και προς τη Μέση Ανατολή παραμένουν σχετικά μικρές, σε αντιδιαστολή με τις πολύ υψηλές ροές από τη Μέση Ανατολή προς σχεδόν όλες τις υπόλοιπες αγορές.

2.2.5 Πλοία LNG

Αποτέλεσμα της διαρκούς ανάπτυξης των ροών του φυσικού αερίου είναι η αύξηση του παγκόσμιου στόλου LNG. Στο τέλος του 2018 ο παγκόσμιος στόλος LNG αποτελούνταν από 525 πλοία (IGU, 2019). Ο παραπάνω αριθμός πλοίων αποτελείται από πλοία που είναι ενεργά, πλοία που είναι σε αδράνεια και πλοία FSRU. Από το παγκόσμιο στόλο LNG το 2018 τα 44 είναι FSRU και τα 5 πλωτές μονάδες αποθήκευσης. Το 2018 ο συνολικός παγκόσμιος στόλος LNG αυξήθηκε κατά 11.5% με αποτέλεσμα η δυναμικότητα (capacity) να αυξηθεί κατά 26.2 mtpa.

Η μέση χωρητικότητα αποθήκευσης ανά πλοίο μεταφοράς LNG αυξάνεται κάθε χρόνο. Λόγω των οικονομικών κλίμακας από το 2010 υπήρξε μια ώθηση να κατασκευάζονται ολοένα και μεγαλύτερα πλοία. Κατά τη διάρκεια του 2018 τα newbuildings, οι παραδόσεις και οι παραγγελίες νέων κατασκευών δείχνουν ότι η αγορά κατευθύνεται σε μέγεθος πλοίων μεταξύ 170.000 κυβικών μέτρων (cm) και 180.000 cm. Ενώ ένα άλλο ακόμα κριτήριο κατασκευής είναι το νέο ανώτατο όριο της επέκτασης του καναλιού του Παναμά. Το 2018 κορεατικά ναυπηγεία εισήγαγαν νέο σχεδιασμό Neoramax για πλοία LNG με χωρητικότητα 200.000 cm. Η μέση χωρητικότητα αποθήκευσης LNG για τα newbuildings που παραδόθηκαν κατά τη διάρκεια του 2018 ήταν λίγο πάνω από 171.000 cm.



Εικόνα 2. Παγκόσμιος στόλος πλοίων μεταφοράς LNG (IGU, 2019)

2.3 Floating Storage Regasification Unit (FSRU)

2.3.1 Εισαγωγή FSRU

Η ραγδαία ανάπτυξη της αγοράς του LNG και η συνεχής αύξηση της ζήτησης φυσικού αερίου έχει δημιουργήσει νέες απαιτήσεις στη μεταφορά και την αποθήκευσή του. Οι απαιτήσεις της αγοράς ως προς τη μεταφορά και αποθήκευση και η τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων ετών στη βιομηχανία του φυσικού αερίου συνέβαλαν στη δημιουργία ενός νέου τύπου πλοίου, του FSRU. Το FSRU ορίζεται ως ένας πλωτός σταθμός υποδοχής, προσωρινής αποθήκευσης και επαν-αεριοποίησης υγροποιημένου φυσικού αερίου (Floating Storage Regasification Unit - FSRU) και μέσω των χαρακτηριστικών και πλεονεκτημάτων του αναμένεται να πρωταγωνιστήσει στην αγορά του φυσικού αερίου

Μετά από περισσότερα από 15 χρόνια χρήσης και λειτουργίας, το FSRU είναι αποδεδειγμένα μια πολύ αξιόπιστη λύση στην αποθήκευση και την επαν-υγροποίηση του LNG. Το FSRU είναι επίσης μια πολύ ευέλικτη λύση εφόσον η μετεγκατάσταση μετά από μια περίοδο λειτουργίας από μία θέση σε μια άλλη είναι εφικτή. Τα FSRU έχουν θεωρηθεί ως ανταγωνιστική εναλλακτική λύση σε σύγκριση με τους τερματικούς σταθμούς στην ξηρά, με κύρια οφέλη να είναι το μειωμένο κόστος, η ταχύτερη και πιο ευέλικτη υλοποίηση επένδυσης αποθήκευσης. Ακόμα και η αδειοδότηση της επένδυσης αποθήκευσης αναμένεται να είναι λιγότερο χρονοβόρα

Δεδομένου ότι οι τερματικοί σταθμοί επαν-αεριοποίησης είναι συνήθως κοντά στους καταναλωτές, τα FSRU εγκαθίστανται συχνά σε λιμενικές εγκαταστάσεις ή εντός προστατευόμενης θαλάσσιας περιοχής. Η ευελιξία ήταν η αρχική προσέγγιση για τα FSRU, διότι υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως οι σύντομες αποστάσεις από τα δίκτυα φυσικού αερίου ή από σταθμούς παραγωγής αερίου.

Η ανάπτυξη και η εξέλιξη των FSRU ξεκίνησε πριν 18 χρονιά το 2001 όταν η El Paso Corp. συνεργάστηκε με την Excelerate Energy με στόχο να κατασκευάσουν το πρώτο πλοίο FSRU στα πλαίσια του Gulf Gateway Project (excelerateenergy.com) . Αυτή την στιγμή υπάρχουν 44 πλοία που λειτουργούν ως FSRU, τα υπόλοιπα λειτουργούν ως δεξαμενόπλοια υδροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) (Oxford Institute of energy studies, 2019). Ο υψηλός ρυθμός ανάπτυξης των πλοίων FSRU τα τελευταία χρόνια προσέφερε καταπληκτικές ευκαιρίες όσον αφορά την πώληση LNG σε νέες αγορές. Το χαμηλό κόστος επένδυσης αποθήκευσης, ο γρήγορος προγραμματισμός και υλοποίηση αποθηκευτικών χώρων LNG και η εμπορική ευελιξία, αποτελούν τους παράγοντες της ταχείας ανάπτυξης του FSRU σε σχέση με τους τερματικούς σταθμούς ξηράς.

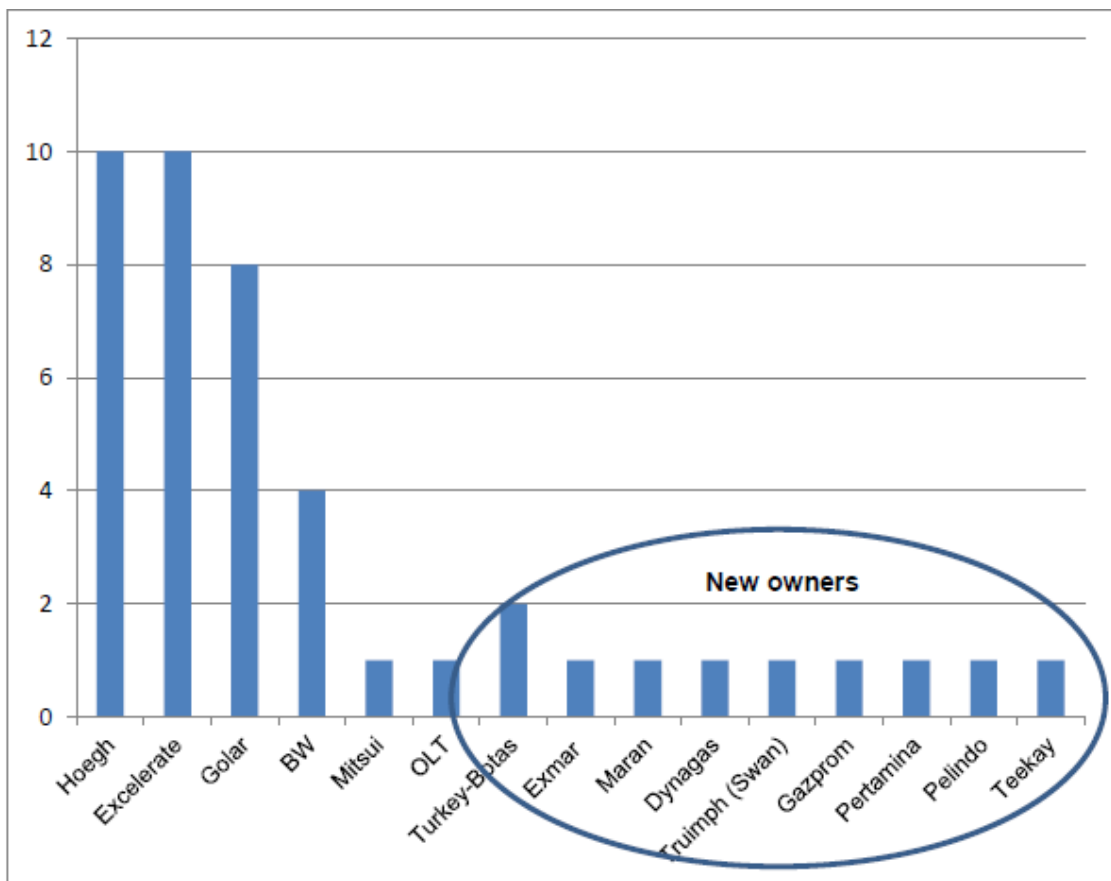
Παρά το γεγονός ότι τα πρώτα FSRUs βασίστηκαν σε δεξαμενόπλοια χωρητικότητας 130,000m³ με ταχύτητα παραγωγής αερίου 2-3 mtpa (metric tons per annum), τα πιο πρόσφατα πλοία είναι αρκετά μεγαλύτερα, τυπικά 173,000 m³ και παράγουν 6 mtpa. Τα πλοία που είναι τώρα υπό κατασκευή προσφέρουν ισοδύναμες ικανότητες με ένα τερματικό σταθμό ξηράς. Επιπλέον το κόστος μίας νέας FSRU κυμαίνεται από 50-60% ενός τερματικού σταθμού ξηράς και μπορεί να ολοκληρωθεί στον μισό χρόνο. Οι νέες κατασκευές κοστίζουν συνήθως 240-300 εκατομμύρια δολάρια και ολοκληρώνονται σε 27-36 μήνες. Τα FSRU που βασίζονται στη μετατροπή δεξαμενοπλοίων LNG κοστίζουν λιγότερο από 100-130 εκατομμύρια δολάρια ενώ η μετατροπή χρειάζεται περίπου 18 μήνες.

Το 2019 η αγορά των πλοίων FSRU έχει επιβραδυνθεί σε σχέση με την ταχεία περίοδο ανάπτυξης της περιόδου 2015-2017. Το 2015-2017 δεκαπέντε νέα πλοία εισήλθαν στην αγορά αντιπροσωπεύοντας αύξηση κατά 60% του μεγέθους του στόλου. Μια ακόμα ενδιαφέρουσα αλλαγή είναι ότι το 2019 ο αριθμός των ιδιοκτητών υπερδιπλασιάστηκε από έξη σε δεκαπέντε. Οι εννιά εταιρείες από τις δεκαπέντε είναι εταιρείες ενέργειας και όχι εταιρείες leasing (χρηματοδοτικής μίσθωσης)- γεγονός που δείχνει την σημασία που αποδίδουν οι εταιρείες ενέργειας στην καινοτομική λύση των FSRU στην αλυσίδα διακίνησης (logistics) και όχι απλά στη θαλάσσια μεταφορά, που αποτελεί τμήμα της. ▽

Τα δυο τελευταία χρόνια έχουν σημειωθεί αρκετές αλλαγές στην αγορά του FSRU. Συγκεκριμένα οι σταθμοί στο Άμπου Ντάμπι, στην Αργεντινή και στην Αίγυπτο έκλεισαν ενώ ταυτόχρονα έξι καινούργιοι σταθμοί τέθηκαν σε λειτουργία - Καλίνινγκραντ, Τζαμάικα, Πακιστάν, Μπαγκλαντές(2) και Ινδονησία. Ακόμα εννιά νέοι σταθμοί είναι υπό κατασκευή και δέκα πλοία λειτουργούν ως δεξαμενόπλοια και όχι ως τερματικοί σταθμοί. Λόγω της εισαγωγής φυσικού αερίου από τη Βολιβία και της μειωμένης ζήτησης LNG στη Νότια Αμερική για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πολλά FSRU έχουν εγκαταλείψει την αγορά της Νότιας Αμερικής και έχουν μεταφερθεί σε νέα έργα. Ένας ακόμη παράγοντας της απομάκρυνσης των FSRUs από την νότια Αμερική είναι ότι η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας στη Βραζιλία έχει επίσης αυξηθεί με τις βροχοπτώσεις να επιστρέφουν μετά από πολλά χρόνια ξηρασίας. Η μείωση του αριθμού των νέων έργων FSRU έχει οδηγήσει σε υπέρβαση της προσφοράς πλοίων, οπότε τα προαναφερθέντα δέκα λειτουργούν πλέον εναλλακτικά ως δεξαμενόπλοια αποθήκευσης υδροποιημένου φυσικού αερίου και όχι ως τερματικοί σταθμοί.

2.3.2 Έργα πλωτής αποθήκευσης και επαν-αεριοποίησης (FSRU)

Οι κύριοι ιδιοκτήτες FSRU αναφέρονται συχνά ως φορείς παροχής υπηρεσιών και είναι όλες οι καθιερωμένες εταιρείες δεξαμενόπλοιων LNG. Οι κορυφαίες εταιρείες είναι οι Golar LNG, Höegh LNG και Exceletrate Energy. Πριν δυο χρόνια εισήλθαν στην αγορά δυο πολύ γνωστές εταιρείες στον χώρο του φυσικού αερίου η BW Gas και η Mitsui O.S.K. Lines (MOL). Σήμερα η τρέχουσα ιδιοκτησία στόλου FSRU έχει υπερδιπλασιαστεί σε σχέση με το 2017 από έξι σε δεκαπέντε εταιρείες. Οι νέες αυτές εταιρείες των οποίων ο στόλος δεν ξεπερνά τα δυο πλοία φαίνεται να προτιμούν να κατέχουν και να εκμεταλλεύονται τα δικά τους πλοία αντί να τα μισθώνουν.



Διάγραμμα 3. Παγκόσμιος στόλος FSRU ανά εταιρία (Oxford Institute of energy studies, 2019)

2.3.3 Βασικές Εταιρείες

Exceletrate Energy

Η Exceletrate Energy εδρεύει στις Η.Π.Α. και ήταν πρωτοπόρος στην καινοτομία που έφερε η χρήση FSRU, συμμετέχοντας στο έργο Gulf Gateway στον Κόλπο του Μεξικού. Διαθέτει επί του παρόντος 10 σκάφη FSRU που λειτουργούν είτε ως FSRU είτε ως LNG carriers.

Golar LNG

Η Golar LNG εδρεύει στη Νορβηγία και διαθέτει 16 δεξαμενόπλοια LNG και 8 FSRUs. Το 2017 μετέτρεψε τρία δεξαμενόπλοια LNG σε πλωτά (FLNG).

Höegh LNG

Η Höegh LNG εδρεύει στη Νορβηγία και διαθέτει 10 FSRU. Διαθέτει 2 ακόμα LNG Carriers.

MOL

Η Mitsui O.S.K. Lines (MOL) εδρεύει στην Ιαπωνία και είναι μια μεγάλη ναυτιλιακή εταιρεία που καλύπτει το πλήρες φάσμα από φορτηγά μέχρι και επιβατηγά πλοία. Αυτή τη στιγμή λειτουργεί 18 δεξαμενόπλοια LNG και ένα FSRU - το Punta de Sayago με έδρα την Ουρουγουάη.

BW Gas

Η BW Gas είναι μέλος του ομίλου BW με έδρα τη Νορβηγία. Είναι ένας από τους μεγαλύτερους παρόχους FPSO και έχει 25 χρόνια εμπειρίας. Διαθέτει 25 δεξαμενόπλοια LNG και 4 FSRU.

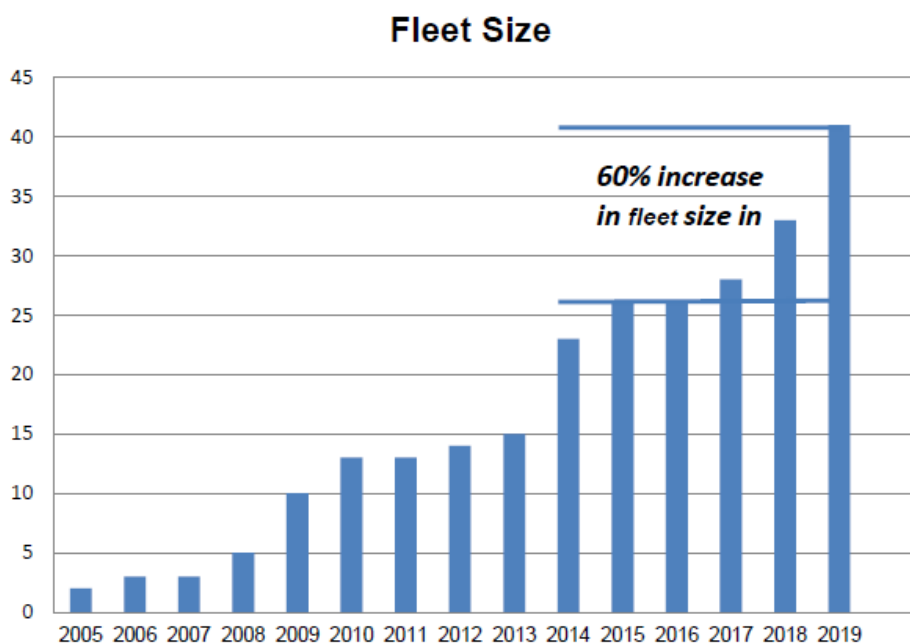
Maran Gas Maritime

Η Maran Gas Maritime εδρεύει στην Ελλάδα και είναι μέλος του ομίλου Maran Tankers και το 2020 θα έχει ένα FSRU. Όπως και οι άλλοι ιδιοκτήτες FSRUs, είναι μια ναυτιλιακή εταιρεία LNG και επί του παρόντος διαθέτει στόλο από 31 δεξαμενόπλοια LNG

Teekay LNG

Η Teekay Gas εισήλθε στην ναυτιλιακή αγορά LNG το 2004 και είναι πλέον ένας από τους μεγαλύτερους ανεξάρτητους ιδιοκτήτες στον κόσμο με 50 δεξαμενόπλοια LNG.

Με βάση την ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά φυσικού αερίου κατά την περίοδο 2014-2015, οι μεγάλες εταιρείες χρηματοδοτικής μίσθωσης αποφάσισαν να επενδύσουν σε νέα πλοία. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα όμως το 2015 με 2017 σημειώθηκε στασιμότητα με αύξηση μόνο ενός επιπλέον FSRU, γεγονός που επιβεβαιώνει την επιβράδυνση της ανάπτυξης της ναυπήγησης πλωτών τερματικών σταθμών εκείνη την περίοδο. Σήμερα μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει επανάκαμψη στην ταχεία ανάπτυξη του στόλου η οποία βασίζεται στην εισαγωγή νέων εταιρειών παικτών στην βιομηχανία του FSRU.



Διάγραμμα 4. Παγκόσμιος στόλος FSRU ανά έτος (Oxford Institute of energy studies, 2019)

- 2005-2008 Σταδιακή ανάπτυξη καθώς ουσιαστικά δημιουργήθηκε ο τομέας.
- 2009-2013 Ταχεία ανάπτυξη το 2009 και στη συνέχεια μια αργή περίοδος μέχρι το 2013.
- 2014-2017 Ταχεία ανάπτυξη το 2014 και στη συνέχεια αργή έως το 2016.
- 2017-2019 Ταχεία ανάπτυξη με τον στόλο να αυξάνεται κατά 60% σε μόλις τέσσερα χρόνια.

Οι εταιρείες Höegh, Golar LNG και Excelebrate - έχουν αυξήσει τους στόλους τους FSRU από είκοσι δύο πλοία το 2017 σε είκοσι οκτώ το 2019, οι περισσότερες από αυτές δεν έχουν βρει έργα τερματικών εισαγωγών και χρησιμοποιούν τα υπόλοιπα FSRU ως LNG carriers. Αυτό είναι μία ένδειξη ότι η βιομηχανία του FSRU, που παραδοσιακά λειτουργεί με χρηματοδοτικές μισθώσεις, φαίνεται να επιβραδύνεται, καθώς πολλά από τα σκάφη τους λειτουργούν τώρα ως δεξαμενόπλοια μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου και όχι ως τερματικών σταθμών. Σε αυτή τη χρονική περίοδο, αυτές οι εταιρείες είναι απίθανο να παραγγείλουν νέα σκάφη, τουλάχιστον μέχρις ότου να τεθεί σε λειτουργία ένα νέο έργο. Αυτή η πρόσφατη επιβράδυνση για τις εταιρείες χρηματοδοτικής μίσθωσης μπορεί εν μέρει να οφείλεται στην πρόσφατη μεγάλη ζήτηση φυσικού αερίου από την Κίνα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη διάθεση ελάχιστης ποσότητας LNG για την spot αγορά.

Αυτή τη στιγμή, σύμφωνα με δημοσιευμένες μελέτες, υπάρχουν 30 πιθανές περιπτώσεις όπου εξετάζεται η σκοπιμότητα για επενδύσεις σε FSRU σε διάφορες περιοχές. Οι περισσότερες από αυτές τις ευκαιρίες συνδέονται με την αυξημένη ζήτηση και ανάγκη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 2. Περιοχές που εξετάζονται για επενδύσεις FSRU

Region	Countries	Comments and References
Central & South America	Chile, Brazil (2)	Chile (delayed), Brazil
Europe & North Africa	Germany, Croatia, Tunisia, Turkey (2)	Wilhelmshaven, Germany, Rabat, Tunisia, Krk, Croatia (Golar LNG), Turkey- Hatay/Dortyol and Gallipoli
Middle East	UAE, Pakistan, Lebanon (3)	Sharjah. ⁵⁷ Pakistan – power shortages. Lebanon - switch from oil firing to gas
Central & Southern Africa	South Africa (2), Guinea-Bissau	South Africa, Guinea Bissau
India & Pakistan	Pakistan, India (2)	Pakistan 3 rd FSRU, India East Coast - Kakinada and Krishnapatnam
South East Asia	Thailand, Myanmar (3), Vietnam (2), Indonesia (2), Philippines	Gulf of Thailand, Myanmar, Vietnam, Indonesia, Philippines
Far East	China (3)	Multiple FSRUs for China according to Höegh
Australia	Australia (2)	NSW and Victoria

2.3.4 Επενδύσεις-Κεφαλαιουχικός εξοπλισμός ενός FSRU

Το CAPEX (CAPital EXpenditure – δαπάνες κεφαλαιουχικού εξοπλισμού) δηλαδή η επένδυση σε ένα νέο FSRU συνήθως είναι μόνο το 60% ενός τερματικού σταθμού ξηράς ενώ ταυτόχρονα ο χρόνος παράδοσης του FSRU είναι αρκετά μικρότερος. Ένας τερματικός σταθμός ξηράς 3 mtpa με μια δεξαμενή αποθήκευσης 180.000 m³ ανάλογα με το τοπικό κόστος εργασίας κατασκευής είναι πιθανό να κοστίσει 700-800 εκατομμύρια δολάρια. Αντίθετα ένα πλοίο FSRU με την ίδιες χωρητικότητες κοστίζει 400-500.

Πίνακας 3. CAPEX ενός FSRU (Oil & Gas IQ, 2019)

Component	3 mtpa, 180,00 m3 storage	
	Onshore	FSRU (new build)
Jetty including piping	80	80
Unloading lines	100	N/A
Tanks 1x180,000 m3	180	in FSRU
FSRU Vessel	N/A	250
Process plant	100	in FSRU
Utilities	60	in FSRU
Onshore interface/infrastructure	N/A	30
CAPEX	520	360
Contingency 30% Onshore, 10% FSRU	156	36
Owners's Costs	74	54
Total CAPEX	750	450

Ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή ενός τερματικού εξαρτάται από την κατασκευή των δεξαμενών, η οποία είναι τυπικά 36-40 μήνες. Οι νέες κατασκευές FSRU συνήθως χρειάζονται 27-36 μήνες. Ωστόσο, το πραγματικό πλεονέκτημα είναι εάν ένα FSRU είναι άμεσα διαθέσιμο π.χ. μεταβίβαση από άλλο έργο.

2.3.5 Κόστος Μετατροπής

Η μετατροπή ενός υπάρχοντος δεξαμενόπλοιου LNG κοστίζει περίπου 100-110 εκατομμύρια δολάρια συν το κόστος αγοράς του δεξαμενόπλοιου. Η μετατροπή ενός LNGC σε FSRU έχει το πλεονέκτημα ότι ολοκληρώνεται σε 18 μήνες σε σύγκριση με 36 μήνες για την κατασκευή ενός νέου πλοίου LNG. Η μετατροπή ενός παλαιότερου δεξαμενόπλοιου LNG θέτει το συνολικό κόστος αρκετά πιο χαμηλά εφόσον η αξία ενός παλιού πλοίου LNGC είναι χαμηλότερη .

2.3.6 Κόστος νέας κατασκευής FSRU

Το FSRU μπορεί να είναι είτε μια νέα κατασκευή ή η μετατροπή ενός υπάρχοντος δεξαμενόπλοιου LNG. Μια νέα κατασκευή FSRU με χαρακτηριστικά 173.000 m³ και 6 mtpa θα κοστίσει σήμερα στην περιοχή των \$ 240-280m. Το κόστος των νέων πλοίων έχει μειωθεί λόγω του υψηλού ανταγωνισμού μεταξύ των τριών βασικών κορεατικών ναυπηγείων - DSME, Hyundai και Samsung.

Πίνακας 4. Κόστη και άλλα χαρακτηριστικά ανά FSRU (Oxford Institute of energy studies, 2019)

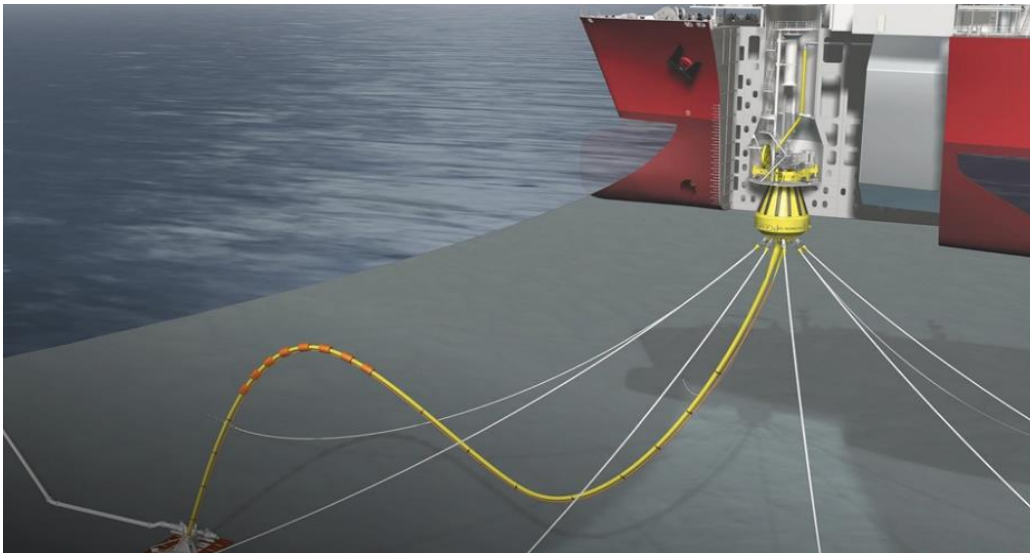
Vessel	Owner	Storage m ³	Send-out mtpa	Send-out mmscfd	Shipyard	Order Placed	Order Value \$m
Giant (FSRU#7)	Höegh	170,000	6.2	750	Hyundai	Jun-11	236
Gallant (FSRU#8)	Höegh	170,000	4.1	500	Hyundai	Jun-11	250
Independence	Höegh	170,000	3.2	384	Hyundai	Jun-11	250
FSRU#9	Höegh	170,000	8.3	1,000	Hyundai	Jan-17	236
FSRU#10	Höegh	170,000	8.3	1,000	Samsung	Jan-17	270
Experience	Excelerate	173,400	8.3	1,000	DSME	Aug-11	280

Η υποδομή που χρειάζεται ένα shore-based FSRU περιλαμβάνει την προβλήτα για την πρόσδεση του πλοίου, τη μεταφορά LNG από το δεξαμενόπλοιο τροφοδοσίας και τα συστήματα σωληνώσεων που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση του επαναεριοποιημένου LNG με το δίκτυο αερίου, όπως φαίνεται στον πίνακα 4. Την κατασκευή της υποδομής διαχειρίζεται η Λιμενική Αρχή, ή ο διαχειριστής του λιμανιού, ή ο εισαγωγέας του φυσικού αερίου χρησιμοποιώντας τοπικούς εργολάβους. Μια τέτοια κατασκευή μπορεί να κοστίζει 50-100 εκατομμύρια δολάρια, αλλά εάν απαιτείται νέο λιμάνι ή κυματοθραύστης τότε το κόστος αυξάνεται . Στην εικόνα 3 φαίνεται η διάταξη του GNL Escobar που συνδέεται με το δίκτυο φυσικού αερίου με αγωγό 40 km x 30 ". Το κόστος αυτής της υποδομής ήταν υψηλό στα 140-150 εκατ. \$ και οφείλεται στον μακρύ αγωγό προς το δίκτυο φυσικού αερίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος ενός shore-based FSRU είναι απόλυτα εξειδικευμένο και εξαρτάται από την τοποθεσία στις υφιστάμενες λιμενικές εγκαταστάσεις και το μήκος του αγωγού που απαιτείται για σύνδεση με τον πελάτη ή με το δίκτυο φυσικού αερίου. Οι χερσαίοι αγωγοί θα έχουν διάμετρο 24-30 "και συνήθως κοστίζουν \$ 2-3m ανά km ⁴².



Εικόνα 3. LNGC αγκυροβολημένο σε μονάδα FSRU (accelerateenergy.com)

Για την σύνδεση του FSRU με το δίκτυο όταν βρίσκεται σε ανοιχτή θάλασσα, το πλοίο αγκυροβολεί και συνδέεται με το σύστημα υποδοχής επαναεριομένου φυσικού αερίου με δυο τρόπους, είτε ενός submerged buoy system εικόνα 4 ,είτε ενός surface system εικόνα 5. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος ενός τερματικού σταθμού ανοικτής θάλασσας είναι σχετικό με την τοποθεσία του σταθμού και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος του αγωγού για τη σύνδεση με το δίκτυο πελατών ή το δίκτυο φυσικού αερίου. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί φυσικού αερίου είναι κατά κανόνα διαμέτρου 24-30 ιντσών και κοστίζουν 3-4 εκατομμύρια δολάρια ανά χιλιόμετρο.



Εικόνα 4. submerged buoy system (nov.com)



Εικόνα 5. Surface system (interfaxenergy.com, 2019)

2.3.7 Λειτουργικές δαπάνες (OPEX) ενός FSRU

Οι λειτουργικές δαπάνες (Operational Expenditure) δηλαδή το κόστος λειτουργίας ενδέχεται να καλύπτουν τα ακόλουθα:

- Παροχή προσωπικού στο σκάφος (λειτουργία μονάδας επαναεριοποίησης και μονάδα ελέγχου της διασύνδεση με την ξηρά)
- Προσωπικό των κεντρικών γραφείων
- Καύσιμα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού
- Συντήρηση και επιθεώρηση
- Ανταλλακτικά
- Χημικά και λιπαντικά
- Ασφάλιση
- Λιμενικά τέλη
- Ρυμουλκά για εφοδιασμό δεξαμενόπλοιων
- Σκάφη εξυπηρέτησης για μονάδες FSRU
- Κόστος χρηματοδότησης

Το προσωπικό στο FSRU και όσοι βρίσκονται στην ξηρά εργάζονται ανά βάρδιες ώστε να καλύπτεται λειτουργία 24 ωρών, 365 ημερών ανά έτος (shift pattern). Το προσωπικό λειτουργίας ενός FSRU είναι τυπικά 20-28 άτομα συν 4 που βρίσκονται στις χερσαίες εγκαταστάσεις. Στα FSRU που ταξινομούνται ως πλοία απαιτείται πλήρες θαλάσσιο πλήρωμα, συνήθως 27 ναυτικών. Τα FSRU που ταξινομούνται ως εγκαταστάσεις ανοικτής θάλασσας πιθανότατα απαιτούν μόνο 20 άτομα. Όσον αφορά το κόστος για το πλήρωμα περιλαμβάνονται όλες οι παροχές προσωπικού, η τροφοδοσία/ενδιαίτηση καθώς και τα μεταφορικά τους.

Το BOG (Boiled Off Gas), δηλαδή οι η αέρια φάση (εξάτμιση) προερχόμενη από το LNG, απαιτείται να χρησιμοποιηθεί ως (αέριο) καύσιμο. Η συντήρηση και η επιθεώρηση καλύπτουν τις απαιτήσεις ρουτίνας καθώς και τις απαιτούμενες επιθεωρήσεις. Εάν το πλοίο είναι ταξινομημένο ως εγκατάσταση ανοικτής θάλασσας πρέπει να πραγματοποιηθούν υποβρύχιες επιθεωρήσεις, ενώ δεν χρειάζεται επιθεώρηση dry dock κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Εάν το σκάφος ταξινομηθεί ως πλοίο, τότε ανάλογα με την κατηγορία του μπορεί να απαιτηθεί dry docking όπως και σε ένα συμβατικό πλοίο.

Τα έξοδα ανταλλακτικών καλύπτουν την παροχή ανταλλακτικών για συντήρηση. Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και για τα χημικά και λιπαντικά που απαιτούνται για τη λειτουργία του FSRU. Το συμβόλαιο ασφάλειας του σκάφους καλύπτεται από τον πλοιοκτήτη και περιλαμβάνει υποχρεώσεις τρίτου μέρους (3rd party liabilities). Τα λιμενικά τέλη καλύπτουν τη λειτουργία του FSRU και συμπεριλαμβάνουν τα δεξαμενόπλοια και τα ρυμουλκά. Τέλος υπηρεσιακά σκάφη απαιτούνται για τη λειτουργία των FSRU που βρίσκονται σε ανοικτή θάλασσα και τα παράκτια που δεν συνδέονται με προβλήτα ή γέφυρα με την ακτή.

Το λειτουργικό κόστος (OPEX) εκτιμάται γενικά στο 2,5% του CAPEX (capital expenditure-κεφαλαιουχικές δαπάνες) ανά έτος. Αν υποθέσουμε το κόστος 350 εκατομμυρίων \$ (275 εκατομμύρια δολάρια για FSRU + 75 εκατομμύρια δολάρια για την υποδομή) αυτό θα οδηγούσε σε OPEX της τάξης των 8,75 εκατομμυρίων δολαρίων/ έτος, δηλ. 24.000 δολάρια / ημέρα.

Το πραγματικό κόστος σε \$ / ημέρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία, τη διαμόρφωση (ανοικτή θάλασσα ή λιμάνι) και την χωρητικότητα του σκάφους. Παράδειγμα για δυναμικότητα 5 mtpa, ισοδύναμη με 6,2 t / h (150 t / d) για ανοικτό βρόχο ή 14,8 t / h (335 t / d) για κλειστό βρόχο. Για τιμή LNG 10\$ / mmbtu (500\$ / t), αυτό προσθέτει 72.000\$ / d και 167.000\$ / d αντίστοιχα στα λειτουργικά έξοδα.

2.3.8 Περίοδος Μίσθωσης

Τα πρώτα FSRU ήταν συνήθως μισθωμένα σε συμβόλαια 10-15 χρόνων. Αυτό παρείχε στον πλοιοκτήτη / επενδυτή αίσθηση ασφάλειας για την ανάκτηση των κεφαλαιουχικών δαπανών και των εξόδων του FSRU κατά τη διάρκεια της μίσθωσης. Η ανάλυση των πρώτων FSRU δείχνει ότι η ελάχιστη περίοδος επωφελούς μίσθωσης (breakeven) ήταν 10 χρόνια. Η βιωσιμότητα της επένδυσης υπολογιζόταν με βάση την ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου και του κόστους χρηματοδότησης καθώς και του κόστους λειτουργίας για 8 χρόνια και τα υπόλοιπα 2 έτη ως κέρδος. Το εύρος των περιόδων μίσθωσης σήμερα κυμαίνεται πλέον από 5 έως 20 έτη και εξαρτάται από την χρονική στιγμή της επένδυσης και τα επίπεδα (τρέχοντα και εκτιμώμενα) τιμών και ζήτησης τού φυσικού αερίου.

2.3.9 Τιμές μίσθωσης

Η κύρια διαφορά μεταξύ FSRUs και τερματικών σταθμών στην ξηρά είναι ότι τα FSRU συνήθως μισθώνονται παρά αγοράζονται. Η χρηματοδοτική μίσθωση πραγματοποιείται κατά κανόνα σε ημερήσια βάση, η οποία υπολογίζεται με βάση την ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου του σκάφους, τις πληρωμές τόκων δανείου (έξοδα χρηματοδότησης) και το κόστος πλοιοκτήτη. Τα ποσά μίσθωσης κυμαίνονται συνήθως από 110.000 έως 160.000 δολάρια την ημέρα. Το κόστος λειτουργίας (OPEX) πρέπει να προστεθεί και κυμαίνεται συνήθως από 20 έως 45.000 \$ / ημέρα, με συνολικό κόστος 130-205.000 \$ / ημέρα. Τέλος υπήρξε μια πρόσφατη τάση για τη σύναψη ενός συνολικού κόστους χρήσης (tolling fee), όπου η πληρωμή βασίζεται στο επανυγροποιημένο LNG και εκφράζεται σε \$ / mmbtu, δηλαδή σε τιμή ανά θερμογόνο δύναμη παραδιδόμενου τελικού αερίου καυσίμου

3. Περιγραφή διαδικασιών FSRU κατά τη φόρτωση, εκφόρτωση και αεριοποίηση LNG

3.1 Τεχνικά στοιχεία FSRU

3.1.1 Τεχνολογία ενός FSRU

Τα FSRU χρησιμοποιούν ουσιαστικά την ίδια τεχνολογία για την αεριοποίηση του LNG με έναν τερματικό σταθμό ξηράς. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο εξοπλισμός είναι προσαρμοσμένος και κατάλληλος για την κατασκευή σε ναυπηγείο και τη θαλάσσια λειτουργία. Για ένα νεόκτιστο FSRU, ο εξοπλισμός αεριοποίησης είναι κανονικά ενσωματωμένος στο σκάφος ενώ, στην περίπτωση της μετατροπής ενός LNGC σε FSRU, για την ελαχιστοποίηση του χρόνου μετατροπής, ο εξοπλισμός κατασκευάζεται κανονικά ως ξεχωριστή μονάδα και προσαρμόζεται κατάλληλα στο δεξαμενόπλοιο.

Οι μονάδες FSRU μπορούν να χαρακτηριστούν από νηογνώμονα είτε ως πλοία είτε ως εγκαταστάσεις ανοικτής θάλασσας. Στην περίπτωση εγκατάστασης ανοικτής θάλασσας, μπορούν να ταξινομηθούν ως κινητές (με πρόωση) ή σταθερές (χωρίς πρόωση) μονάδες. Τα πλοία που έχουν ταξινομηθεί στην ξηρά συνήθως βασίζονται σε ειδικές συνθήκες και ρυθμίζονται από εθνικές προδιαγραφές και πρότυπα. Τα περισσότερα FSRU χαρακτηρίζονται ως πλοία για να παρέχουν την ευελιξία να λειτουργούν είτε ως FSRU είτε LNGC. Αντίστοιχα, η σχεδίαση ενός FSRU πρέπει να ικανοποιεί τα παραπάνω χαρακτηριστικά για την βέλτιστη και απρόσκοπτη λειτουργία του. Επίσης η νομοθεσία είναι αρκετά αυστηρή σε θέματα που αφορούν:

- Μέγεθος
- Σύστημα αεριοποίησης (ανοιχτού ή κλειστού βρόχου)
- Εκπομπές καυσαερίων
- Διαχείριση φυσικού αερίου
- Χρονικά διαστήματα Drydock
- Προδιαγραφές αποβάθρας (mooring)
- Σημαία / Φόροι

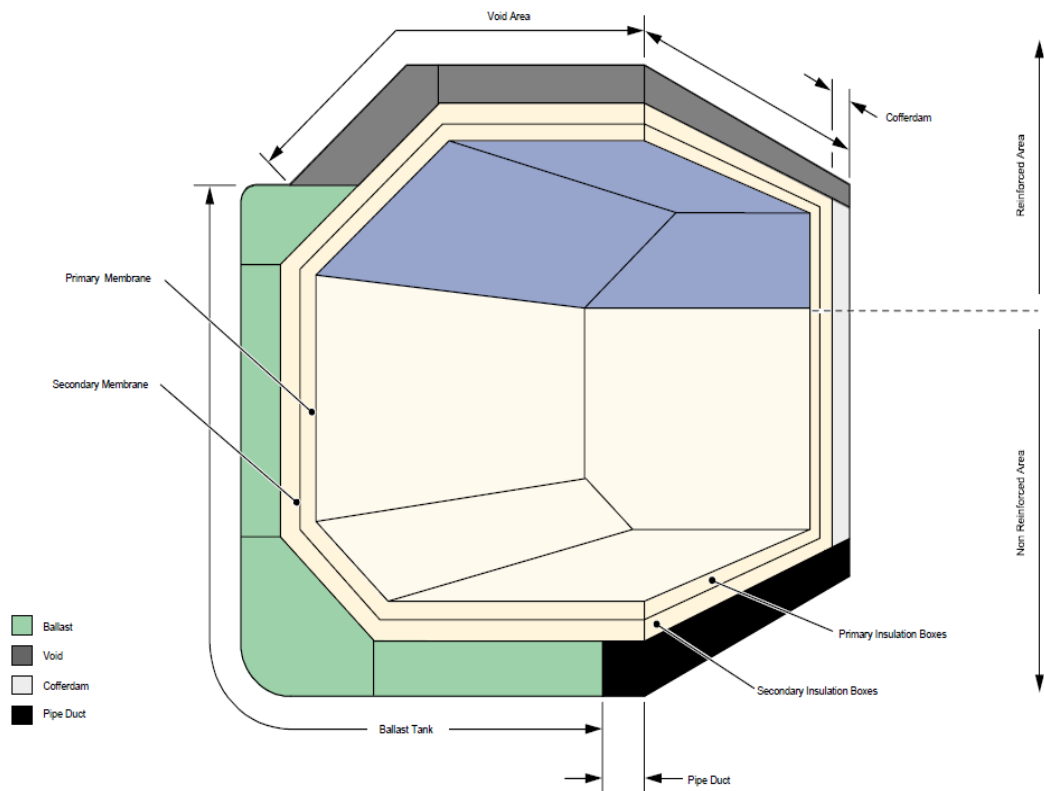
3.1.2 Συστήματα αποθήκευσης φορτίου

Η γάστρα και οι δεξαμενές ενός FSRU είναι ίδια με αυτή ενός κανονικού δεξαμενόπλοιου LNG. Τα πλοία κατασκευάζονται με διπλή χαλύβδινη γάστρα και χρησιμοποιούν δεξαμενές είτε τύπου μεμβράνης είτε τύπου σφαιρικές (Moss) δεξαμενές. Οι δεξαμενές μεμβράνης έχουν ευνοηθεί για τη δημιουργία νέων FSRU εφόσον δεν υπάρχουν κενά μεταξύ των δεξαμενών, γεγονός χαρακτηριστικό που προσδίδει μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης φορτίου για ένα δεδομένο μέγεθος πλοίου. Επίσης, στα πλοία τύπου μεμβράνης το κατάστρωμα παρέχει πιο πολύ χώρο για τις εγκαταστάσεις επανααεριοποίησης όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Στην περίπτωση των σφαιρικών δεξαμενών, οι εγκαταστάσεις επανααεριοποίησης πρέπει να τοποθετούνται είτε μεταξύ των σφαιρικών δεξαμενών ή στη πλώρη.



Εικόνα 6. Μονάδα FSRU τύπου Moss (bairmaritime.com, 2019)

Το LNG μέσω των αγωγών που ενώνουν το LNGC και το FSRU μεταφέρεται και αποθηκεύεται μέσα στις δεξαμενές σε θερμοκρασία -160 C . Οι δεξαμενές του FSRU είναι κρυογενικές δεξαμενές και είναι σχεδιασμένες για εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Οι δεξαμενές αυτές είναι με διπλά τοιχώματα με ενδιάμεση ειδική θερμομόνωση και είναι κατασκευασμένες για να διατηρούν το LNG σε υγρή κατάσταση εμποδίζοντας το βρασμό. Τα εξωτερικά τοιχώματα των δεξαμενών είναι ενίοτε κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα βελτιώνοντας την μόνωση σε σχέση με τον χάλυβα, παρά την ύπαρξη θερμογεφυρών από τις μεταλλικές στηρίξεις στις κατασκευές. Παρά την ισχυρή θερμομόνωση, μικρής έκτασης εξάτμιση εξακολουθεί να συμβαίνει λόγω της χαμηλής διαρροής θερμότητας.



Εικόνα 7. Δεξαμενή φορτίου τύπου Moss (DSME)

3.1.3 Σωλήνες- Βραχίονες εκφόρτωσης LNG

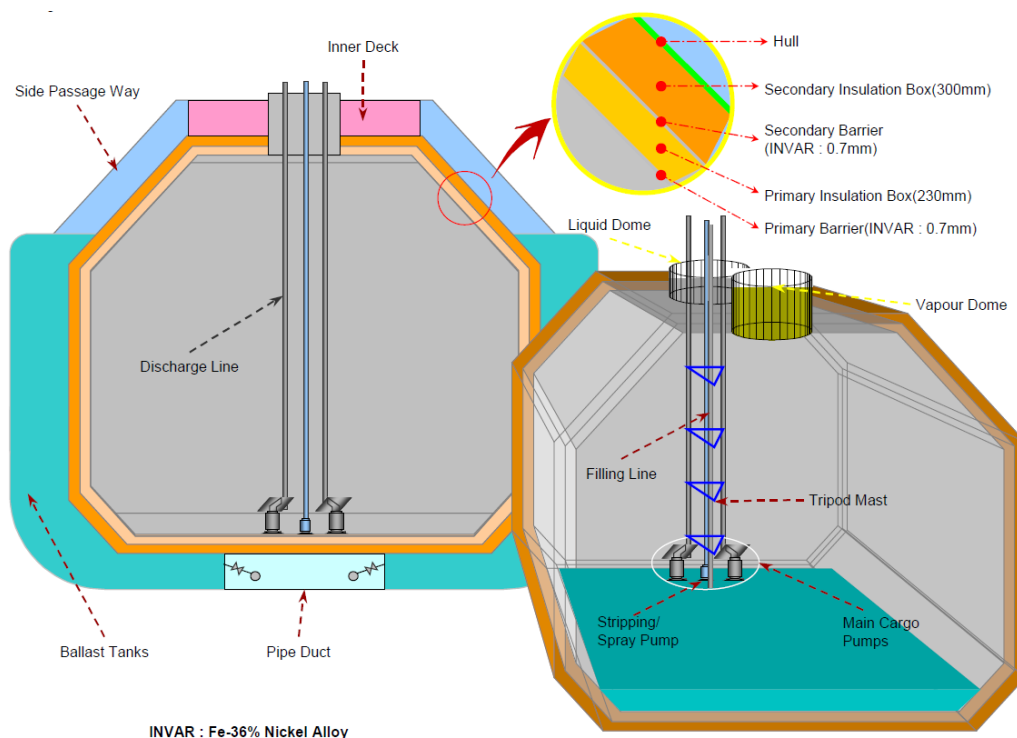
Το LNG μεταφέρεται συνηθέστερα από το δεξαμενόπλοιο τροφοδοσίας προς το FSRU με τη χρήση ειδικών συστημάτων. Αυτά τα συστήματα είναι δύο ειδών, βραχίονες εκφόρτωσης και κρυογενικές μάνικες. Η ικανότητα μεταφοράς ενός απλού σωλήνα είναι $4000\text{m}^3/\text{hr} - 6000\text{m}^3/\text{hr}$ και η διάμετρος τους κυμαίνεται από 40 έως 60 εκατοστά. Συνήθως σε κάθε εκφόρτωση χρησιμοποιούνται τρία με τέσσερα συστήματα σωληνώσεων για την μεταφορά του LNG, και επιπλέον ένα για την ανατροφοδότηση του BOG. Αυτές οι σωληνώσεις είναι αρκετά εύκαμπτες και αποτελούν μέρος του εξοπλισμού του FSRU. Πάνω από 1.000 εκφορτώσεις έχουν ολοκληρωθεί μέχρι σήμερα με χρήση εύκαμπτων σωλήνων. Ακόμα ένας άλλος τρόπος εκφόρτωσης είναι με την χρήση κρυογενικώς μονωμένων σωλήνων “cryogenic hoses” οι οποίοι είναι πολύ αποδοτικοί όσον αφορά την ταχύτητα ρευστού και άρα το χρόνο εκφόρτωσης (για την ίδια διάμετρο και το ίδιο αντλητικό συγκρότημα) και παράλληλα μειώνουν τις θερμικές απώλειες. Το κύριο πλεονέκτημα των εύκαμπτων σωλήνων είναι ότι είναι πολύ φθηνότεροι από τους κρυογενικούς, το μειονέκτημα όμως είναι ότι η εκφόρτωση διαρκεί περισσότερο και δημιουργεί περισσότερο BOG.

3.1.4 Αγωγοί φορτίου

Τα LNGC/FSRU είναι εφοδιασμένα με σωληνώσεις υγρών και ατμών που βρίσκονται στο μέσο του πλοίου. Αυτές οι σωληνώσεις συνδέονται με κεφαλές υγρών και ατμών που οδηγούν σε κάθε δεξαμενή φορτίου. Η σωληνώση υγρού επεκτείνεται μέχρι το κάτω μέρος κάθε δεξαμενής φορτίου όπου είναι η υγρή φάση, ενώ οι σωληνώσεις ατμού στο υψηλότερο όπου είναι η αέρια.

Οι αγωγοί φορτίου δεν επιτρέπεται να είναι κάτω από το επίπεδο του καταστρώματος. Επομένως, όλες οι σωλήνες που συνδέονται με τις δεξαμενές πρέπει να περνάνε μέσω των δεξαμενών φορτίου στο κύριο κατάστρωμα. Οι βαλβίδες ανάσχεσης ατμών τοποθετούνται επίσης στη δεξαμενή. Οι ανεμιστήρες είναι εγκατεστημένοι σε ασφαλές ύψος και σε ασφαλείς αποστάσεις από τους χώρους ενδιαίτησης καθώς και από άλλους χώρους όπως οι gas-safe ζώνες.

Πρέπει να προβλεφθεί στον σχεδιασμό και την τοποθέτηση/εφαρμογή των σωληνώσεων μεταφοράς φορτίου, ώστε να επιτρέπεται η θερμική διαστολή και συστολή τους. Αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα χρησιμοποιώντας τη φυσική γεωμετρία των σωληνώσεων, ανάλογα με την περίπτωση. Επί πλέον πρέπει να αποφεύγεται προσεκτικά η διάβρωση της θάλασσας διαφορετικά ενδέχεται να υπάρχουν διαρροές. Επιπλέον, πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι πρέπει να υπάρχουν ισχυρές στηρίξεις στις σωληνώσεις ώστε να αντιστέκονται στην πλευρική ή κατακόρυφη μετατόπιση από τις πιέσεις που ασκούνται πάνω τους λόγω των κυματισμών.



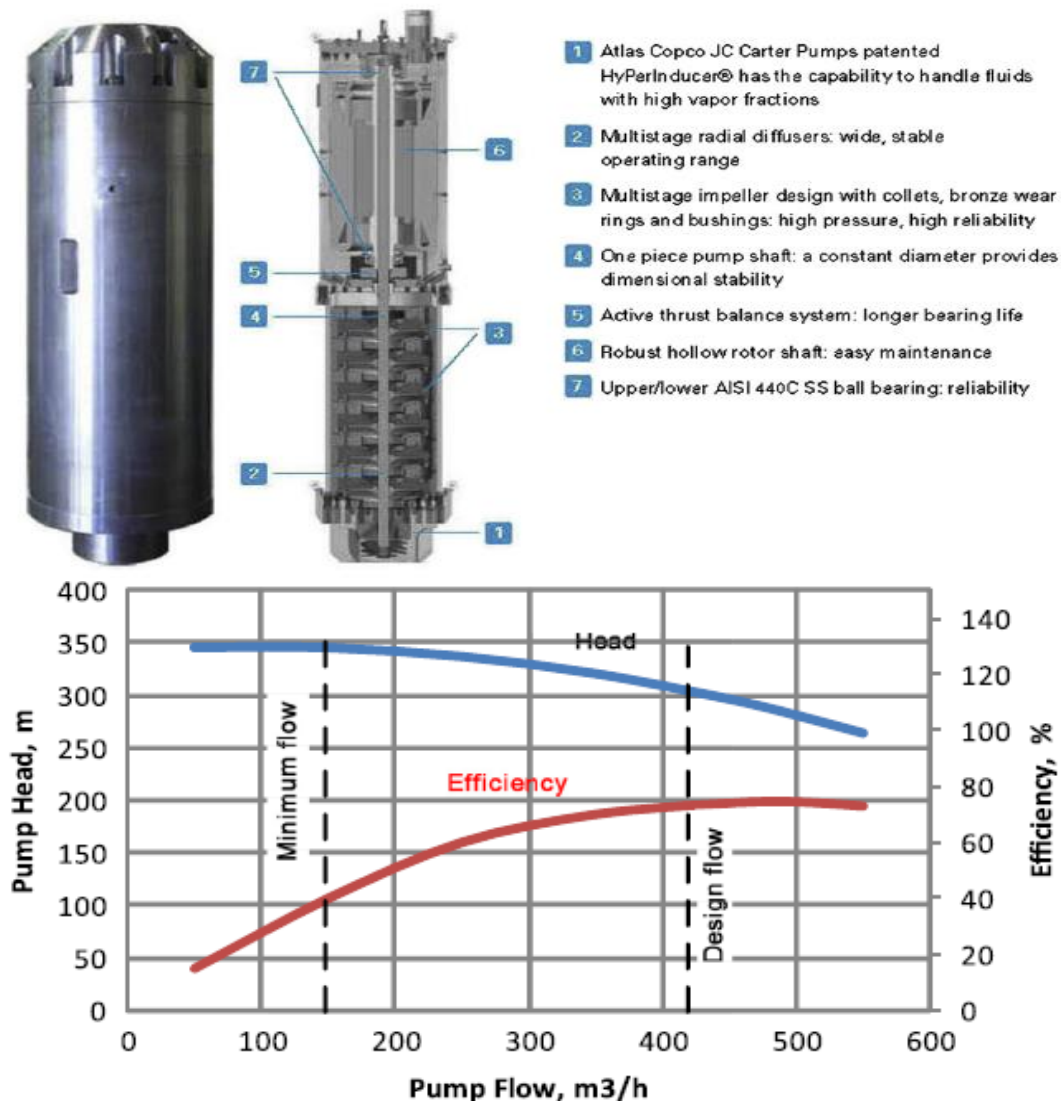
Εικόνα 8. Θέση αντλιών στις δεξαμενές (DSME)

3.1.5 Αντλίες

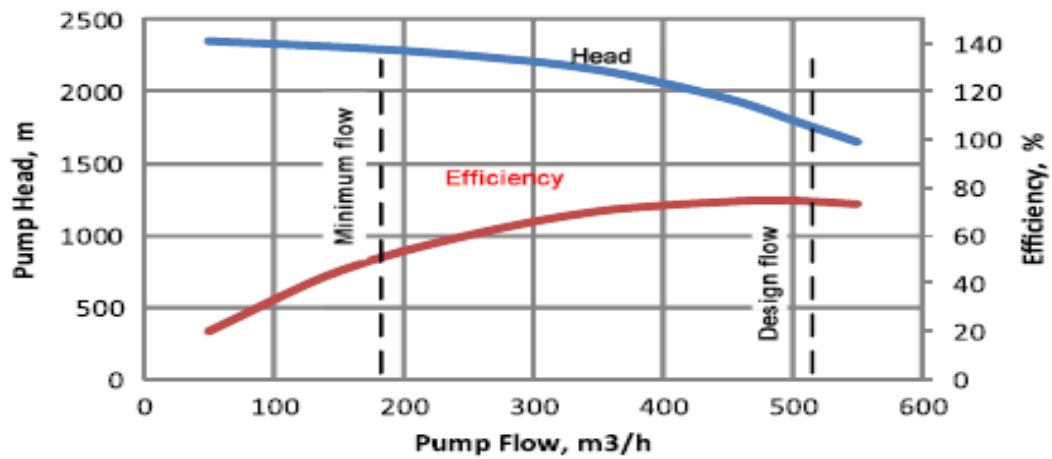
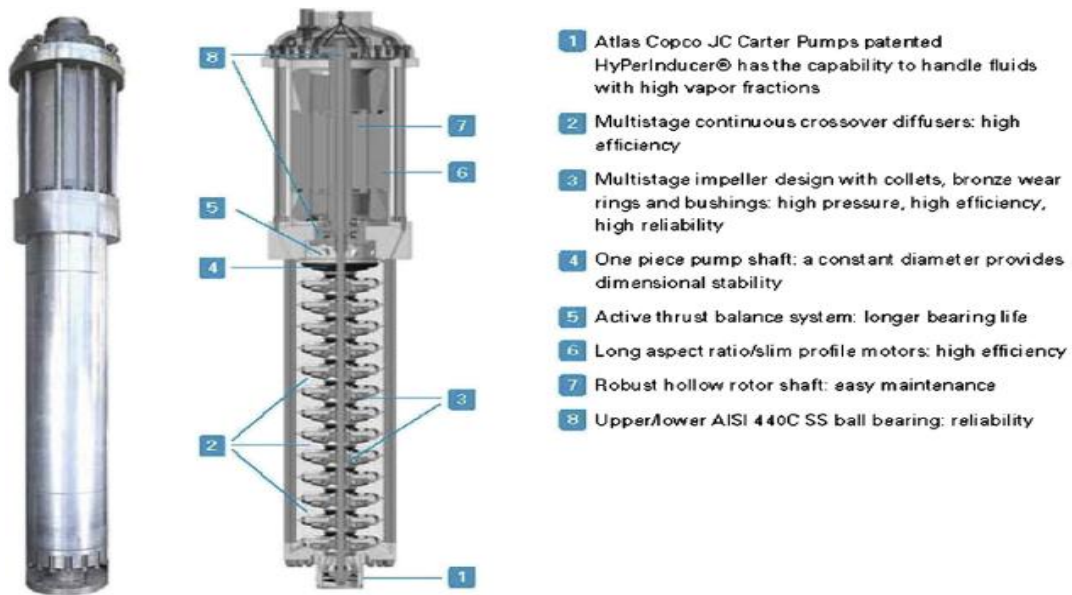
Η βυθιζόμενη αντλία ηλεκτρικού κινητήρα (submerged electric motor pump SEMP) χρησιμοποιείται περισσότερο σε εφαρμογές LNG. Ο κινητήρας και τα ηλεκτρικά καλώδια της αντλίας βυθίζονται μαζί με την αντλία στη δεξαμενή εφόσον το LNG είναι διηλεκτρικό υγρό.

Η χαμηλής πίεσης αντλία (LP low pressure pump) (Εικόνα 9) εγκαθίσταται κάθετα μέσα στη δεξαμενή. Το βάρος της αντλίας ανοίγει μια βαλβίδα αναρρόφησης με ελατήριο, η οποία χρησιμοποιείται για την αφαίρεση και την εγκατάσταση της αντλίας. Η αντλία LP είναι συνήθως σχεδιασμένη για να εκφορτίζεται σε πίεση 8 έως 10 barg. Μια τυπική καμπύλη λειτουργίας παρουσιάζεται στην εικόνα 9. Η αντλία θα πρέπει να λειτουργεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στη ροή σχεδιασμού για τη μέγιστη απόδοση της. Όταν η αντλία λειτουργεί με ροή

λιγότερη από την ροή σχεδιασμού, η απόδοση της πέφτει και η θερμοκρασία του υγρού αυξάνεται σχετικά, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στον επανασυμπυκνωτή (re-condenser) του BOG. Η υψηλής πίεσης αντλία (HP) λαμβάνει ρευστό από τον επανασυμπυκνωτή BOG συνήθως σε πίεση περίπου 8 barg και αυξάνει την πίεση ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις πίεσης, σε 80 έως 120 barg. Μια τυπική καμπύλη αντλίας εμφανίζεται στην εικόνα 10.

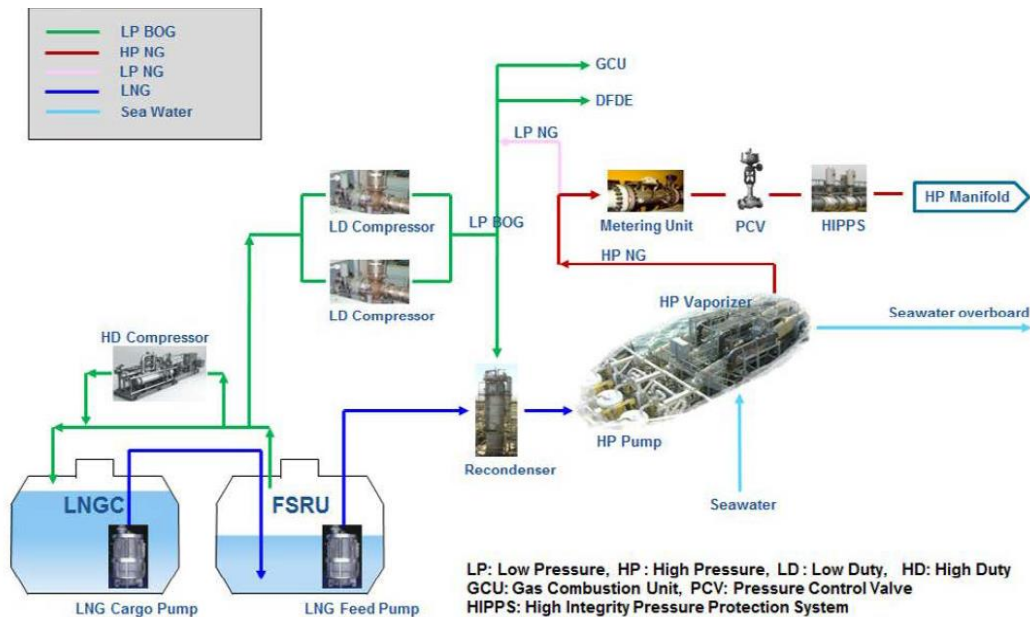


Εικόνα 9. Τυπική αντλία LP και η καμπύλη της (Handbook of Liquefied Natural Gas, 2014)



Εικόνα 10. Τυπική αντλία HP και η καμπύλη της (Handbook of Liquefied Natural Gas, 2014)

3.2 Αεριοποίηση



Εικόνα 11. Τεχνικά στοιχεία μονάδας FSRU

Ένας από τους βασικούς στόχους του FSRU και από τους λόγους κατασκευής και οικονομικής βιωσιμότητας του είναι η ικανότητα αδιάκοπης αεριοποίησης του LNG και παροχής αερίου στο τοπικό δίκτυο που εξυπηρετεί. Η παραπάνω διεργασία πραγματοποιείται με την σωστή διάταξη και τα τεχνικά στοιχεία που θα αναφερθούν παρακάτω.

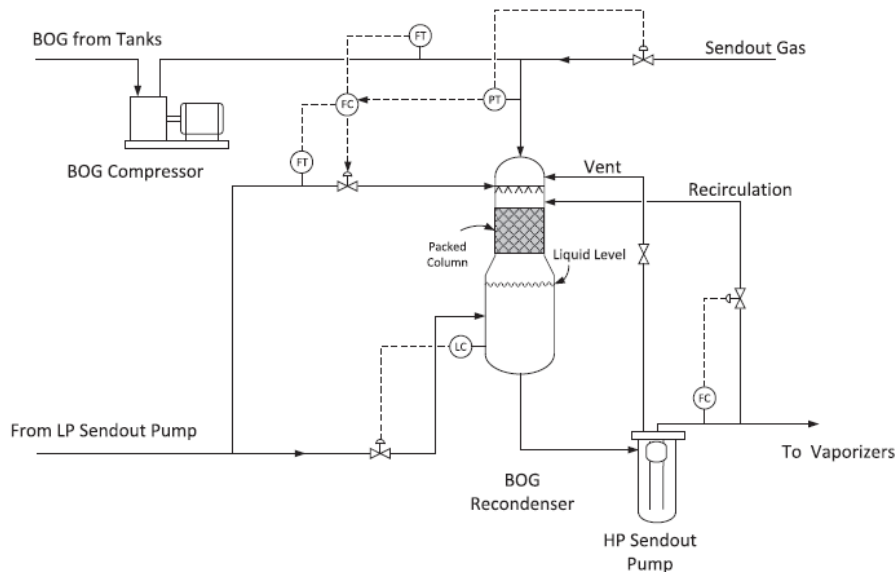
Η αεριοποίηση είναι η διεργασία μετατροπής του φυσικού αερίου LNG από την υγρή στην αέρια κατάσταση. Στην αέρια κατάσταση, το φυσικό αέριο περνάει από ποιοτικό έλεγχο (ανάλυση, οσμή, κλπ.) πριν να τροφοδοτηθεί στο σύστημα μεταφοράς του φυσικού αερίου προς κατανάλωση. Καθώς το φυσικό αέριο είναι άοσμο και εύφλεκτο, προτίθενται χημικές ενώσεις για να αποκτήσει τεχνητή οσμή, για την πιο εύκολη ανίχνευση διαρροής του. Αυτό γίνεται κυρίως με έγχυση τετραϋδροθειοφαινίου (THT) στο LNG προτού διανεμηθεί (αέρια φάση) στα δίκτυα κατανάλωσης.

Το σύστημα συμπίεσης και επανασυμπύκνωσης (Compressor and recondensing system) χρησιμοποιείται για τη συλλογή της αέριας φάσης και των απωλειών λόγω natural boil-off στις δεξαμενές τόσο του LNGC όσο και του FSRU και την όδευση του προς το σύστημα επανααεριοποίησης και κατόπιν στο δίκτυο κατανάλωσης. Αυτό το σύστημα ανακύκλωσης κρατάει υψηλά την πίεση στην υπερκείμενη αέρια φάση των δεξαμενών (LNGC και FSRU) και παράλληλα αποτρέπει κάθε είδους διαφυγή LNG από το σύστημα.

Οι αντλίες υψηλής πίεσης χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν το LNG από το σύστημα Recondenser στο σύστημα αεριοποίησης. Ο Recondenser είναι ένα σύστημα στο οποίο το LNG από τις δεξαμενές, και το BOG από τους συμπιεστές συλλέγονται πριν προχωρήσουν για τη διαδικασία αεριοποίησης. Ο Recondenser βοηθά επίσης στη διατήρηση του αερίου σε υγρή κατάσταση.

Ο BOG recondenser εξυπηρετεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Συμπύκνωση του BOG, διατηρώντας τις δεξαμενές αποθήκευσης σε χαμηλή πίεση
- Εξυπηρετεί ως δοχείο ανάμειξης (mixing drum) και αναρρόφησης για την αντλία HP (suction pump)
- Διατήρηση σταθερής πίεσης αναρρόφησης και διασφάλιση επαρκούς NPSH (απαιτούμενου καθαρού θετικού ύψους αναρρόφησης) για τη λειτουργία της αντλίας HP.



Εικόνα 12. Σύστημα Recondenser (Handbook of Liquefied Natural Gas, 2014)

Ένα τυπικό σύστημα BOG recondenser φαίνεται στην εικόνα 12. Το BOG από τη δεξαμενή αποθήκευσης συμπιέζεται πρώτα από έναν συμπιεστή (BOG compressor) σε περίπου 8 barg. Ο συμπιεστής μπορεί να είναι ένας φυγοκεντρικός ή παλινδρομικός συμπιεστής. Μια ποσότητα LNG τροφοδοτείται για τη συμπύκνωση του BOG σε κορεσμένο υγρό στην κεφαλή του επανασυμπυκνωτή και καταιώνίζεται ερχόμενο σε επαφή με την παροχή από τον συμπιεστή BOG. Το υπόλοιπο της ποσότητας LNG αναμειγνύεται με το συμπύκνωμα στο κατώτερο τμήμα του επανασυμπυκνωτή. Το σύστημα σχεδιασμού και ελέγχου της διαδικασίας της αντλίας BOG recondenser / HP πρέπει να διαθέτει σύστημα αντλίας αποστράγγισης, σταθερή ροή και επαρκές NPSH για τη λειτουργία της αντλίας HP. Μερικές από τις βασικές παραμέτρους ελέγχου είναι:

- Ο ρυθμός ροής υγρού που ελέγχεται από έναν ελεγκτή στάθμης/ροής με βάση το BOG.
- Η κύρια αποστολή LNG πρέπει να τροφοδοτείται στο κάτω τμήμα του επανασυμπυκνωτή για να υπάρχει αδιάλειπτη και επαρκής ποσότητα υγρού στην αντλία αποστολής HP.
- Η στάθμη υγρού στον επανασυμπυκνωτή θα πρέπει να διατηρείται σε συγκεκριμένο επίπεδο, διασφαλίζοντας για τις διεργασίες επαρκή μεταφορά θερμότητας.
- Η εξαέρωση από την αντλία αποστολής HP κατευθύνεται προς την κορυφή του επανασυμπυκνωτή και πρέπει να είναι εμποδίζεται η αποστράγγιση και επανεισαγωγή υγρής φάσης πίσω στην αναρρόφηση της αντλίας, για να αποφευχθεί η συσσώρευση υγρών.

- Η διαφορά ύψους μεταξύ του επανασυμπυκνωτή και της αντλίας πρέπει να είναι επαρκής για την διατήρηση του NPSHR της αντλίας αποστολής HP.

Οι ροές της αέριας φάσης, δηλαδή το BOG, που δημιουργούνται στις δεξαμενές LNG ποικίλλουν σημαντικά τόσο κατά την διάρκεια φορτοεκφόρτωσης όσο και κατά την αποθήκευση του LNG. Αυτοί οι ατμοί πρέπει να συμπιεστούν και να συμπυκνωθούν στον επανασυμπυκνωτή (BOG recondenser) για να διατηρηθεί η δεξαμενή σε χαμηλή πίεση. Η ροή του BOG κατά την εκφόρτωση του πλοίου μεταβάλλεται λόγω:

1. Μεταφορά θερμότητας στις δεξαμενές αποθήκευσης LNG, στον εξοπλισμό και στις σωληνώσεις με αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας της υγρής φάσης
2. Της διαρκούς απαγωγής του BOG από τις δεξαμενές αποθήκευσης LNG στο LNGC και στο FSRU λόγω της εκφόρτωσης, της φόρτωσης και της διανομής στο δίκτυο κατανάλωσης.
3. Της διαρκώς μεταβαλλόμενης και διαφορετικής στάθμης της υγρής φάσης στις δεξαμενές του LNGC και του FSRU

Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης του LNG ο ρυθμός παραγωγής ατμού είναι σημαντικά χαμηλότερος. Όπως αναφέρθηκε το BOG παράγεται κυρίως λόγω διαρροής θερμότητας στις δεξαμενές αποθήκευσης και είναι τυπικά 0,05% του συνολικού όγκου ανά ημέρα.

Τέλος ο vaporizer είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος δέχεται στο ένα ρεύμα (όπου η θερμοκρασία του ρευστού αυξάνεται) το LNG που μέσω της μεταφοράς θερμότητας μετατρέπεται από υγρό σε αέριο. Όσον αφορά το άλλο ρεύμα (στο οποίο η θερμοκρασία του ρευστού μειώνεται) Υπάρχουν δυο τύποι εναλλακτών θερμότητας για την αεριοποίηση του LNG, οι ανοιχτού κύκλου και οι κλειστού κύκλου. Στους εναλλάκτες ανοιχτού κύκλου το ψυχόμενο ρεύμα είναι το θαλασσινό νερό το οποίο μετά αποβάλλεται πίσω στον θαλάσσιο αποδέκτη, ενώ στο κλειστού κύκλου το ψυχόμενο μέσο θερμαίνεται με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού και επαναανατροφοδοτείται στον εναλλάκτη. Ακολουθούν τα κυρία μέρη ενός συστήματος αεριοποίησης LNG

3.3 Vaporizers

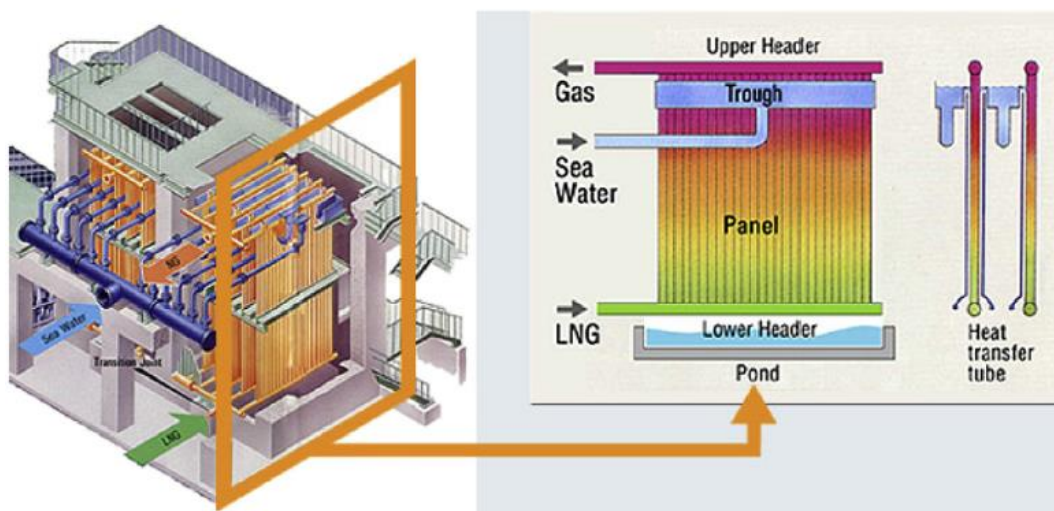
3.3.1 Γενικά στοιχεία ενός vaporizer

Η βέλτιστη επιλογή ενός συστήματος αεριοποίησης LNG καθορίζεται από την θέση του σταθμού, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, και τις συνθήκες λειτουργίας. Πρέπει να συμμορφώνεται με τους νόμους και κανονισμούς που ισχύουν στη χώρα λειτουργίας του FSRU και παράλληλα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας. Σήμερα, στη βιομηχανία υγροποίησης LNG χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι: Οι Open rack vaporizers (ORV) περίπου 70% και οι Submerged Combustion Vaporizers (SCV) περίπου 20% (Mokhatab, Mak, Valappil, Wood, 2014). Εκτός από αυτά τα δυο είδη έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλοι τύποι όπως ο Ambient Air Vaporizer(AAV), ο Shell and Tube Exchange Vaporizer (STV) και ο Intermediate Fluid Vaporizer(IFV). Όσο και να φαίνεται ότι η επιλογή ενός AAV είναι η βέλτιστη όσον αφορά το λειτουργικό κόστος (OPEX) και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς, είναι επίσης η πιο ακριβή σε κεφαλαιουχικό εξοπλισμό (CAPEX), απαιτώντας μεγαλύτερο αρχικό κόστος ενώ είναι και πιο εξαρτώμενη από τις μεταβολές του περιβάλλοντος. Η επιλογή του vaporizer είναι συγκεκριμένη για κάθε έργο FSRU πρέπει να αξιολογείται κατά περίπτωση.

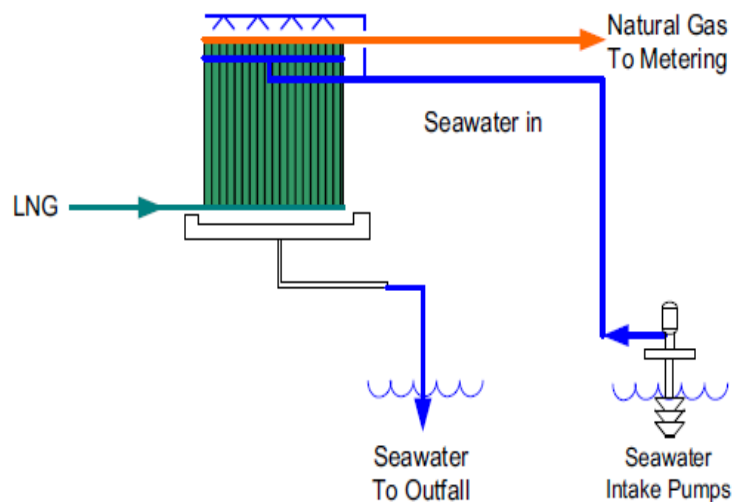
3.3.2 Open rack vaporizer (ORV)

Είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που χρησιμοποιεί το νερό ως πηγή θερμότητας. Η πηγή νερού για αυτές τις μονάδες εξαρτάται από τη θέση του σταθμού και την ποσότητα νερού που είναι διαθέσιμη. Τα FSRU λόγω της ιδιότητας τους να βρίσκονται στη θάλασσα διαθέτουν απεριόριστη πρόσβαση σε θαλασσινό νερό. Αυτές οι μονάδες είναι κατασκευασμένες από κράματα αλουμινίου, παρέχοντας έτσι τη μηχανική αντοχή για τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες του LNG. Προστασία από διάβρωση χρησιμοποιείται σε επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το θαλασσινό νερό με ειδικές επικαλύψεις στο εξωτερικό των πτερυγίων εναλλαγής θερμότητας.

Η μηχανική κατασκευή των μονάδων ORV είναι αρκετά απλή. Οι σωλήνες είναι διατεταγμένοι σε πάνελ, και το θαλασσινό νερό ως μέσο θέρμανσης θερμαίνει το LNG μέσω των πολλαπλών σωληνώσεων εκροής (Σχήματα 1-30 και 1-31). Αυτό το χαρακτηριστικό παρέχει ευκολία πρόσβασης για σκοπούς συντήρησης. Η συντήρηση αυτών των μονάδων είναι επίσης απλή, καθώς δεν υπάρχουν πολλά κινητά μέρη και όργανα. Η μονάδα εκκινεί και διακόπτεται από ένα σταθμό χειρισμού χωρίς την παρέμβαση χειριστή. Η συντήρηση μιας τέτοιας μονάδας είναι πολύ συχνή καθώς οι σωλήνες πρέπει να καθαρίζονται τακτικά. Το φορτίο λειτουργίας σε αυτές τις μονάδες μπορεί να ρυθμιστεί μεταβάλλοντας τις ροές του θαλασσινού νερού και του LNG. Ανάλογα με το σχεδιασμό της μονάδας, είναι δυνατή η απομόνωση τμημάτων (τόσο για λειτουργία όσο και για συντήρηση) οπότε μπορεί να μεταβληθεί το φορτίο της μονάδας αν χρειαστεί.



Εικόνα 13. ORV vaporizer (Tokyo Gas Co)



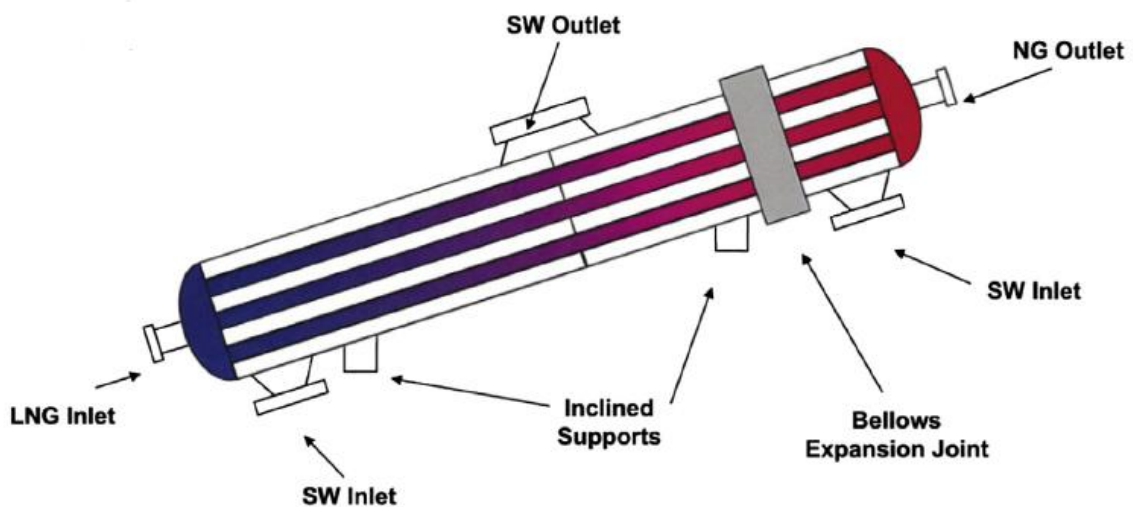
Εικόνα 14. Σύστημα ORV (Handbook of Liquefied Natural Gas, 2014)

Οι μονάδες αυτές είναι αξιόπιστες και ασφαλείς. Η διαρροή αερίου μπορεί να ανιχνευθεί πολύ γρήγορα και η μονάδα μπορεί να διακόψει τη λειτουργία της άμεσα και με ασφάλεια. Όμως η επιλογή ενός συστήματος θέρμανσης με χρήση θαλασσινού νερού πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα ζητήματα:

- Η ποιότητα του θαλασσινού νερού πρέπει να είναι κατάλληλη για τη λειτουργία του ORV
- Ο σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος ORV και να ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις της παρακείμενης θαλάσσιας ζωής κατά την λειτουργία της εγκατάστασης.
- Η θερμοκρασία εξόδου του θαλασσινού νερού πρέπει να συμμορφώνεται με τους τοπικούς κανονισμούς. Η πτώση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού περιορίζεται συνήθως στους 5 °C.
- Πρέπει να μελετηθεί η θέση της εισροής και της εκροής θαλασσινού νερού για να μην υπάρχει ανακυκλοφορία κρύου (αποβαλλόμενου) θαλασσινού νερού.

3.3.3 Shell and tube vaporizer (STV)

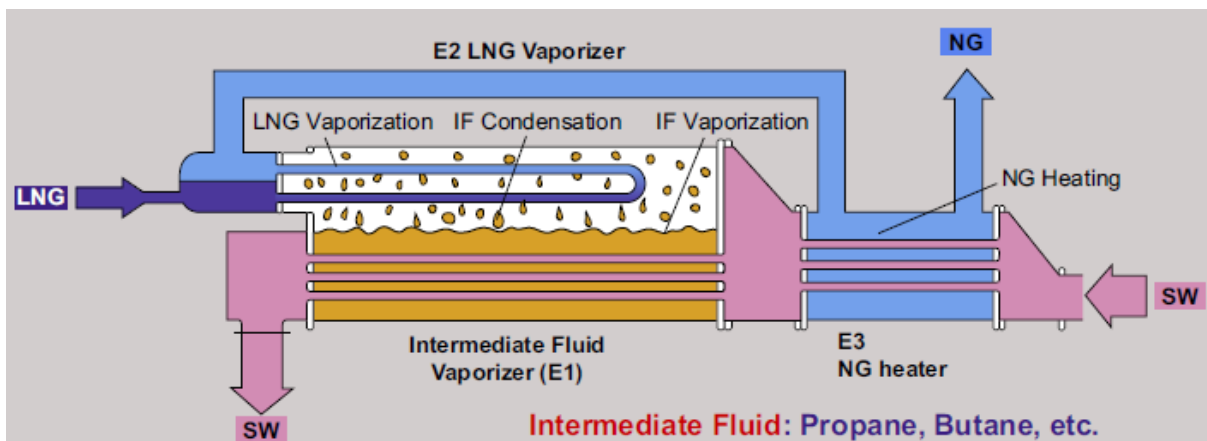
Οι STV μπορούν να λειτουργούν σε λειτουργία ανοιχτού βρόγχου, κλειστού βρόγχου ή συνδυασμού. Στη διαμόρφωση ανοιχτού βρόγχου, το θαλασσινό νερό αντλείται από την θάλασσα προς το STV για να αεριοποιήσει το LNG. Το STV λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όπως το ORV (εικόνα 15). Το κέλυφος του εναλλάκτη είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο υλικό που αντέχει σε υψηλές πιέσεις, και ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από τιτάνιο ή άλλα κατάλληλα υλικά για να λειτουργεί με θαλασσινό νερό. Το κόστος υλικών του STV είναι ακριβό, αλλά το μέγεθος είναι σχετικά συμπαγές, γεγονός που είναι επιθυμητό σε μια μονάδα FSRU.



Εικόνα 15. Σύστημα STV (CB&I)

3.3.4 Intermediate fluid vaporizer (IFV)

Ο IFV χρησιμοποιεί ένα ενδιάμεσο υγρό μεταφοράς θερμότητας (heat transfer fluid HTF) σε κλειστό κύκλωμα (βρόχο) για τη μεταφορά θερμότητας από μια πηγή θερμότητας στον ναροριζερ. Το ρευστό που ψύχεται μπορεί να είναι αιθυλενογλυκόλη ή προπυλενογλυκόλη. Η μεταφορά θερμότητας για αεριοποίηση LNG πραγματοποιείται σε εναλλάκτη κελύφους και σωλήνα (shell and tube).



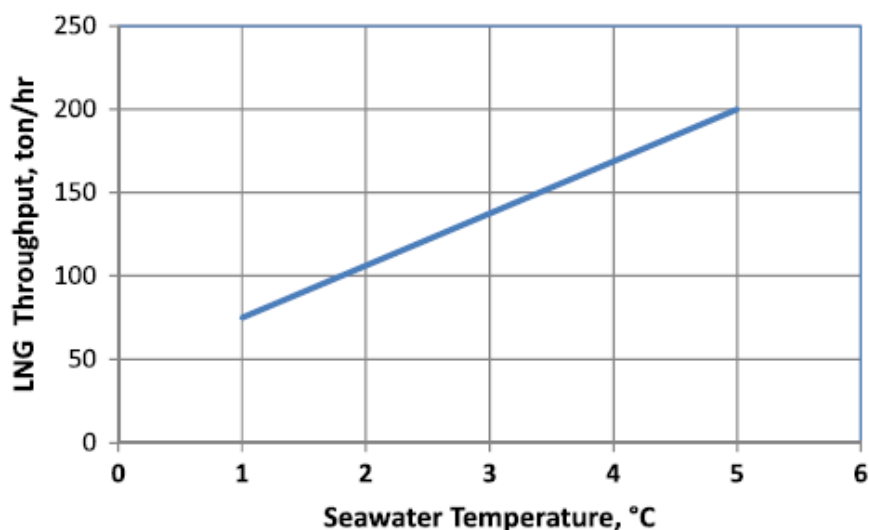
Εικόνα 16. Σύστημα IFV (Handbook of Liquefied Natural Gas, 2014)

1. Γλυκόλη-Νερό ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας Το υγρό μεταφοράς θερμότητας γλυκόλης-νερού χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του LNG στο σύστημα IFV. Ένα γενικό σκίτσο διεργασίας αυτού του συστήματος φαίνεται στην εικόνα 16. Οι αεριοποιητές με ψυχόμενο ρευστού γλυκόλης-νερού έχουν πολύ συμπαγή σχεδιασμό λόγω των υψηλών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας. Ένα σύστημα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής μπορεί να τοποθετηθεί στον καυστήρα που χρησιμοποιείται για

την αναθέρμανση του ρευστού ψύξης (του κλειστού κυκλώματος) για να μειωθούν οι εκπομπές CO και NOx για συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

2. Hydrocarbon ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προπάνιο ή βουτάνιο ως υγρό μεταφοράς θερμότητας. Το προπάνιο ή το βουτάνιο εξατμίζονται στην πλευρά του κελύφους ενός εναλλάκτη κελύφους / σωλήνα χρησιμοποιώντας θαλασσιο ύδωρ ως πηγή θερμότητας. Το εξατμισμένο υγρό στη συνέχεια συμπυκνώνεται στο STV που τροφοδοτεί θερμότητα στο LNG. Η χρήση ενός τέτοιου ρευστού δεν δημιουργεί προβλήματα κατάψυξης του θαλασσινού νερού που συναντώνται με άλλα ενδιάμεσα υγρά.

Ένα πλεονέκτημα με τη χρήση προπάνιου ως υγρού μεταφοράς θερμότητας στο IFV είναι ότι όταν το θαλασσιο νερό πέφτει σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία, οι εναλλάκτες μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν, έστω και με μειωμένο ρυθμό. Χρησιμοποιώντας το προπάνιο ως το ενδιάμεσο ρευστό η απόδοση του IFV μπορεί να διατηρηθεί ακόμα και όταν η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού μειωθεί στους 5 °C. Η μονάδα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί μέχρι 1° C θερμοκρασία θαλασσινού νερού, αλλά με πολύ χαμηλή απόδοση. Η σχέση παραγωγής αέριας φάσης LNG με τη θερμοκρασία της θάλασσας σε ένα σύστημα με προπάνιο είναι σχεδόν γραμμική, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5 (Mokhatab, Mak, Valappil, Wood, 2014)



Διάγραμμα 5. Σχέση παραγωγής αέριας φάσης LNG με τη θερμοκρασία της θάλασσας (Mokhatab, Mak, Valappil, Wood, 2014)

3.3.5 Submerged combustion vaporizer (SCV)

Το (SCV) απαιτεί περίπου 1,5% του συνολικού εξαερωμένου LNG ως καύσιμο (αναθέρμανσης του υγρού κλειστού κυκλώματος που χρησιμοποιείται στον εναλλάκτη), γεγονός που προσθέτει σημαντικό κόστος λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, οι SCV χρησιμοποιούνται μόνο όταν δεν υπάρχει άλλη πηγή θερμότητας. Τα SCVs μπορούν επίσης να σχεδιαστούν για να χρησιμοποιούν BOG.

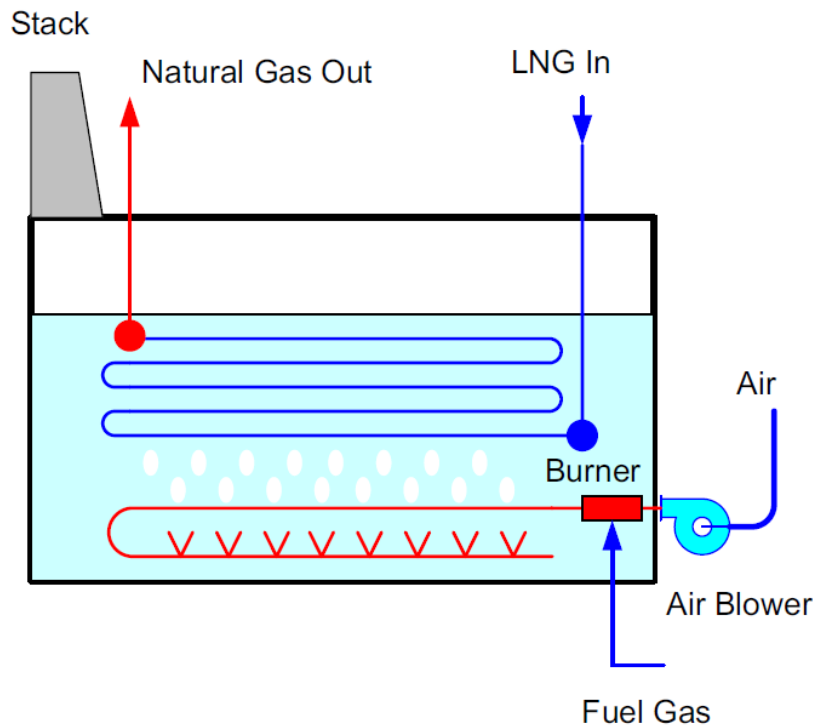
Σε ένα SCV, το LNG ρέει μέσω ενός πηνίου-σωλήνα κατασκευασμένου από ανοξείδωτο χάλυβα που είναι βυθισμένο σε νερό (εικόνα 17). Το νερό στο λουτρό θερμαίνεται με άμεση επαφή με τα καυσαέρια που εξέρχονται από έναν καυστήρα. Ένα SCV μπορεί να σχεδιαστεί για να τροφοδοτεί με αέριο με ρυθμό 200 Million Standard Cubic Feet (MMSCF) ανά ημέρα. Η μονάδα είναι συμπαγής και δεν απαιτεί μεγάλη έκταση για εγκατάσταση.

Τα καυσαέρια από τον καυστήρα διαχέονται μέσα στο νερό μέσω ενός διανομέα που βρίσκεται κάτω από τους σωλήνες μεταφοράς θερμότητας. Αυτό προκαλεί ταχεία κυκλοφορία νερού μέσω των σωλήνων με αποτέλεσμα την πολύ υψηλή θερμική αποτελεσματικότητα (πάνω από 98%) και την υψηλή ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας. Δεδομένου ότι το υδατόλουτρο διατηρείται πάντοτε σε σταθερή θερμοκρασία, το σύστημα αντιμετωπίζει καλά τις διακυμάνσεις του φορτίου και μπορεί να ξεκινήσει και να τερματιστεί γρήγορα.

Αυτές οι μονάδες είναι αξιόπιστες και ασφαλείς. Οι διαρροές αερίου μπορούν να ανιχνευθούν γρήγορα και η μονάδα μπορεί να κλείσει με ασφάλεια. Δεν υπάρχει κίνδυνος έκρηξης, λόγω του ότι η θερμοκρασία του λουτρού νερού παραμένει κάτω από το σημείο ανάφλεξης του φυσικού αερίου.

Το νερό είναι όξινο καθώς η περιεκτικότητα του καυσαερίου σε όξινο αέριο συμπυκνώνεται. Χρησιμοποιούνται πρόσθετα στο νερό του λουτρού για τον έλεγχο του pH και για την προστασία των σωλήνων από τη διάβρωση.

Για να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές NO_x, μπορούν να χρησιμοποιηθούν καυστήρες χαμηλού NO_x για να ικανοποιηθεί το όριο των 40 ppm NO_x. Σε αυστηρότερες απαιτήσεις εκπομπών οι εκπομπές NO_x μπορούν να μειωθούν περαιτέρω με τη χρήση συστήματος SCR (selective catalytic reduction) ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές των 5 ppm, αυξάνοντας όμως το κόστος αρκετά.



Εικόνα 17. Σύστημα SCV (Handbook of Liquefied Natural Gas, 2014)

3.4 Διαδικασίες φόρτωσης - εκφόρτωσης

Πριν αρχίσουν οι εργασίες φόρτωσης-εκφόρτωσης, οι διαδικασίες προετοιμασίας πρέπει να συζητηθούν και να ακολουθηθούν διεξοδικά. Απαιτείται κατάλληλη ανταλλαγή πληροφοριών και πρέπει τα μέτρα ασφαλείας να τηρηθούν με μεγάλη αυστηρότητα. Είναι σημαντικό οι δεξαμενές του FSRU να έχουν ελεγχθεί και είναι καθαρές και να έχει αφαιρεθεί υγρασία που μπορεί να βρίσκεται στις δεξαμενές. Μόλις ολοκληρωθεί η επιθεώρηση, η δεξαμενή φορτίου σφραγίζεται καλά και η διαδικασία ξήρανσης με αέρα ξεκινάει.

3.4.1 Απομάκρυνση του νερού

Το στέγνωμα του συστήματος διακίνησης φορτίου σε οποιοδήποτε LNGC/FSRU είναι απαραίτητο. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι ατμοί νερού και το ελεύθερο νερό πρέπει να απομακρυνθούν. Εάν αυτό δεν γίνει, η υπολειμματική υγρασία μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σχηματισμού πάγου εντός του συστήματος φορτίου.

Οποιαδήποτε μέθοδος και αν υιοθετηθεί για την ξήρανση, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την επίτευξη των σωστών συνθηκών. Βλάβη των βαλβίδων και των αντλιών λόγω πάγου μπορεί συχνά να προκύψει από ανεπαρκώς αποξηραμένο σύστημα. Ακόμα η προσθήκη αντιψυκτικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μια τέτοια διαδικασία όμως δεν πρέπει να υποκαταστήσει την πλήρη ξήρανση.

3.4.2 Προκαταρκτικές επικοινωνίες

Αμέσως ή το συντομότερο δυνατόν μετά την αναχώρηση του LNGC προς τον τερματικό σταθμό / FSRU, θα πρέπει να σταλθεί ένα έγγραφο το οποίο θα περιέχει όλες τις σχετικές πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα, την ποιότητα και τη σύνθεση του φορτίου και οι συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργούν οι δεξαμενές του LNGC. Επιπλέον, η ειδοποίηση αυτή πρέπει να περιλαμβάνει οποιαδήποτε αίτημα παροχής μέσω και παροχών, καθώς και οποιεσδήποτε πληροφορίες επηρεάζουν τη μεταφορά του LNG

3.4.3 Ψύξη σωληνώσεων

Ο θερματικός σταθμός ή το FSRU πριν ξεκινήσει η φόρτωση θα πρέπει να ενημερωθεί για να ξεκινήσει την άντληση με βραδύ ρυθμό για περίπου 15 λεπτά, προκειμένου να ψυχθούν σταδιακά οι σωληνώσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με την αργή αύξηση της ταχύτητας άντλησης μέχρι να κρυώσει το σύστημα σωληνώσεων του υγρού και οι κεφαλές ψεκασμού (διαρκεί περίπου 15 με 20 λεπτά). Οι πιέσεις των δεξαμενών φορτίου πρέπει να παρακολουθούνται στενά και, εάν απαιτείται, πρέπει να ρυθμίζεται ο συμπιεστής HD (high duty), ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση ατμών. Προκειμένου να αποφευχθεί η υψηλή τάση στις σωληνώσεις (συρρίκνωση στο κάτω μέρος της σωληνώσεως περισσότερο από την κορυφή και συνεπώς πρόκληση παραμορφώσεων και ρωγμών), οι σωληνώσεις πρέπει να ψυχθούν και να πληρωθούν όσο το δυνατόν γρηγορότερα.

Οι κύριοι λόγοι για την ψύξη των σωληνώσεων πριν την εκφόρτωση του LNG είναι:

1. Για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα δημιουργίας διαρροών στις ενώσεις των σωληνώσεων ή σε άλλα τμήματα του αγωγού καθώς συστέλλονται όταν περάσει το LNG.
2. Να μειωθεί η πιθανότητα δημιουργίας τάσεων και φορτίων στους φυσητήρες, καθώς οι σωλήνες συστέλλονται γρήγορα.
3. Για να αποφευχθεί ο σχηματισμός BOG στους αγωγούς κατά την εισαγωγή του φορτίου. Εάν το LNG εισαχθεί σε ένα ζεστό αγωγό, το αρχικό φορτίο θα εξατμιστεί, δημιουργώντας μεγάλη πίεση που μπορεί να εμποδίζει τη φόρτωση του υγρού. Ακόμα είναι πιθανόν το BOG να συμπυκνώνεται πολύ γρήγορα καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί κενό με συνέπεια βλάβη των σωληνώσεων, των βαλβίδων ή των συνδέσεων επιτρέποντας στο υγρό να διαρρεύσει κατά μήκος του αγωγού.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύνδεση του συστήματος φορτοεκφόρτωσης. Η παραπάνω διαδικασία πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή λόγω των κινήσεων μεταξύ των πλοίων (θαλάσσιοι κυματισμοί κλπ.). Ακόμα οι υπεύθυνοί σε αυτές τις μονάδες πρέπει να είναι σίγουροι για την σωστή σύνδεση των σωληνώσεων για την αποφυγή ατυχήματος

Μετά τη σύνδεση του συστήματος φορτοεκφόρτωσης, ο αέρας μέσα στις σωληνώσεις πρέπει να καθαριστεί. Αέριο άζωτο N_2 οδηγείται στους βραχίονες φόρτωσης από τις γραμμές έγχυσης και στη συνέχεια πιέζεται μέχρι περίπου 4 έως 6 bar.

Μετά την συμπίεση, η βαλβίδα εξαερισμού ανοίγει για να απελευθερώσει τον αέρα και το αέριο άζωτο N_2 στην ατμόσφαιρα. Ενώ αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται δύο ή τρεις φορές, διεξάγεται ταυτόχρονα μια δοκιμή διαρροής με διάλυμα σαπουνιού. Ο καθαρισμός του αέρα τελειώνει όταν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο του καθαρισμένου αέρα πέσει κάτω από 2%. Τελος με παρόμοιο τρόπο όπως στις προηγούμενες σωληνώσεις πραγματοποιείται η ψύξη αυτών των σωληνώσεων.

3.4.4 Λειτουργία φόρτωσης του FSRU

Το LNG φορτώνεται μέσω των σωληνώσεων φόρτισης σε μια κεντρική σωλήνωση (header βλ. εικόνα 20) και στη συνέχεια καθοδηγείται στους σωλήνες για την πλήρωση της δεξαμενής. Το BOG και ο εκτοπισμένος ατμός φεύγουν από κάθε δεξαμενή μέσω της αναρρόφησης ατμού προς την κεντρική σωλήνωση (header) ατμού (βλ. εικόνα 20). Ο ατμός αρχικά κινείται ελεύθερα στις σωληνώσεις, καθώς αυξάνεται η πίεση της δεξαμενής, ένας συμπιεστής τίθεται σε λειτουργία για να αυξήσει τη ροή του αερίου και να περιορίσει την πίεση του ατμού και της δεξαμενής φορτίου. Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός φόρτωσης, είναι σημαντικό να παρακολουθούνται οι πιέσεις της δεξαμενής και ένας συμπιεστής HD να βρίσκεται σε αναμονή. Εάν οι συμπιεστές δεν είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν στον όγκο του BOG και του εκτοπισμένου αερίου, θα πρέπει να μειωθεί ο ρυθμός φόρτωσης.

Όταν όλες οι σωληνώσεις και οι βαλβίδες έχουν ψυχθεί πλήρως, το σκάφος μπορεί να αρχίσει να αυξάνει την ταχύτητα φόρτωσης στην ταχύτητα που έχει συμφωνηθεί με το FSRU. Η εκφόρτωση πρέπει να ξεκινήσει σύμφωνα με το σχέδιο φορτίου και το φορτίο πρέπει να κατανέμεται ομοιόμορφα κατά τη φόρτωση.

Οι συμπιεστές HD πρέπει να έχουν ρυθμιστεί σύμφωνα με την ταχύτητα φόρτωσης, ώστε να διασφαλίζεται ότι η τάση ατμών της δεξαμενής παραμένει σε ασφαλή επίπεδα κάτω από την πίεση ανύψωσης των βαλβίδων εκτόνωσης.

Στις δεξαμενές τύπου Moss απαιτείται η διακύμανση της θερμοκρασίας (με ιδιαίτερη αναφορά στον ισημερινό) να παραμείνει εντός ορισμένων ορίων, επομένως οι θερμοκρασίες των δεξαμενών πρέπει να παρακολουθούνται στενά. Οι ωριαίες θερμοκρασίες πρέπει να καταγράφονται ώστε το σκάφος να μπορεί να επαληθεύσει ότι η θερμοκρασία παρέμεινε εντός των ανοχών των κατασκευαστών.

Οι δείκτες θέσης των βαλβίδων πρέπει να επαληθεύονται κατά τις τοπικές ενδείξεις σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Οι κινήσεις του πλοίου πρέπει να παρακολουθούνται επιμελώς ενώ η κίνηση αναφορικά με τις σωληνώσεις φόρτωσης να παρακολουθείται ακόμα πιο στενά.

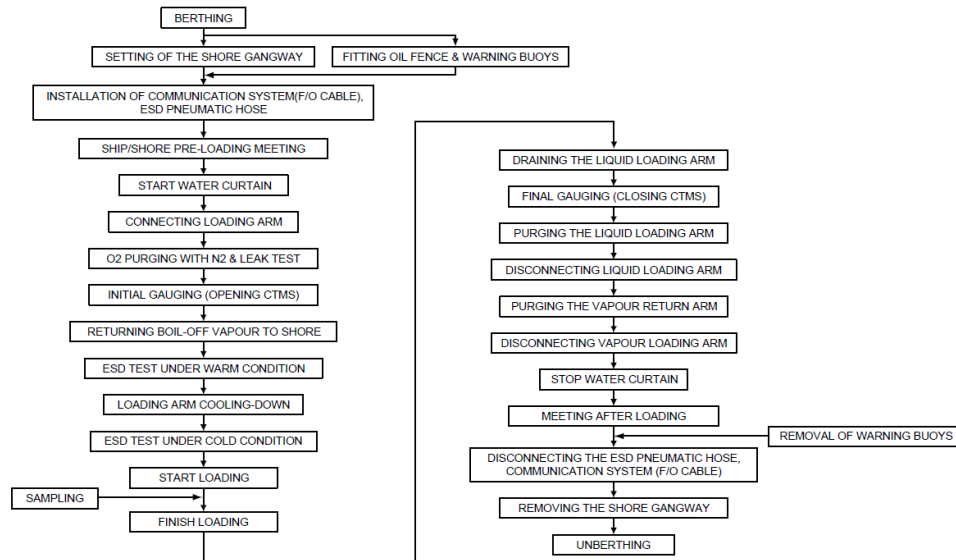
Καθώς το FSRU προσεγγίζει την ολοκλήρωση της φόρτωσης, οι δεξαμενές θα πρέπει να γεμίσουν σύμφωνα με το σχέδιο φορτίου κλιμακωτά, συνήθως αυτό θα αυξήσει τον χρόνο φόρτωσης 10 έως 15 λεπτά για κάθε δεξαμενή. Ο σταθμός FSRU πρέπει να ενημερώνεται εγκαίρως και σύμφωνα με τη συμφωνημένη διαδικασία, σύμφωνα με την οποία το πλοίο θα χρειαστεί να μειώσει τη ταχύτητα φόρτωσης στο τέλος της διαδικασίας. Η ειδοποίηση θα πρέπει να γίνει τουλάχιστον 30 λεπτά πριν από τη μείωση της ταχύτητας.

Ταυτόχρονα με τη λειτουργία φόρτωσης εκτελείται ο αφερματισμός του FSRU. Πριν ξεκινήσει όλες οι επιφάνειες έρματος πρέπει να ελέγχονται οπτικά και να έχουν επιβεβαιωθεί ότι είναι απαλλαγμένες από λάδια ή άλλους ρύπους. Αυτός ο έλεγχος πρέπει να διενεργείται μέσω επιθεώρησης των δεξαμενών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις δεξαμενές έρματος που βρίσκονται δίπλα στις δεξαμενές καυσίμου. Οι υπεύθυνοί που θα επιθεωρήσουν τις δεξαμενές πρέπει να είναι αρκετά προσεκτικοί, γιατί ακόμα και αν υπάρχουν συστήματα ανίχνευσης αερίων ενδέχεται να μην υποδεικνύουν την παρουσία υδρογονανθράκων ιδιαίτερα σε μικρές ποσότητες.

Η εκφόρτωση του έρματος πραγματοποιείται αρχικά με την βοήθεια της βαρύτητας έως ότου η στάθμη των δεξαμενών προσεγγίσει την ίσαλο του σκάφους, Όταν συμβεί αυτό χρησιμοποιούνται οι αντλίες έρματος.

Το έρμα πρέπει να ρυθμίζεται έτσι ώστε να διατηρείται έμπυρμη διαγωγή ώστε να είναι πιο εύκολη η διαχείριση των δεξαμενών έρματος. Ο ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να διατηρεί το πλοίο σε απόσταση μικρότερη από 1 μέτρο από το βύθισμα άφιξης ή όπως καθορίζεται από τις τοπικές αρχές. Ο αφερματισμός πρέπει κανονικά να ολοκληρωθεί πριν από την έναρξη της συμπλήρωσης των δεξαμενών φορτίου.

Η παρακάτω φωτογραφία απεικονίζει την σειρά των διεργασιών σε μια φόρτωση.



Εικόνα 18. Διαδικασίες φόρτωσης LNG σε ένα FSRU

3.4.5 Εκφόρτωση LNGC και Φόρτιση FSRU

Το υγρό LNG αντλείται χρησιμοποιώντας δύο βυθιζόμενες αντλίες που βρίσκονται στο κάτω μέρος κάθε δεξαμενής. Η πίεση της δεξαμενής φορτίου μειώνεται καθώς το επίπεδο του LNG πέφτει στη δεξαμενή. Αντίστροφα, η πίεση της δεξαμενής που δέχεται το LNG αυξάνεται με την παραλαβή του LNG.

Χρησιμοποιώντας τη διαφορά πίεσης μεταξύ των δεξαμενών φορτίου, το αέριο LNG στη δεξαμενή που δέχεται το LNG στέλνεται στη δεξαμενή φορτίου του σκάφους. Ωστόσο, όταν το LNG εκφορτώνεται με υψηλότερο ρυθμό, η πίεση στη δεξαμενή φορτίου του σκάφους μειώνεται, ως εκ τούτου, το αέριο LNG μεταφέρεται στη δεξαμενή φορτίου του πλοίου με βοηθητικά συστήματα, για να διατηρηθεί η πίεση της δεξαμενής.

3.4.6 Διαδικασία εκφόρτωσης LNG με επιστροφή ατμών

Πριν από την εκκίνηση της αντλίας φόρτισης, πρέπει να γίνει βέβαιο ότι όλες οι βαλβίδες εξαγωγής υγρών είναι κλειστές και όλες οι βαλβίδες πλήρωσης είναι ανοιχτές. Επίσης, πρέπει να ενημερωθεί το μηχανοστάσιο ώστε να γίνει βέβαιο ότι υπάρχει επαρκής ισχύς από τις γεννήτριες ρεύματος. Οι αντλίες εκφόρτωσης ξεκινάνε τη λειτουργία τους σύμφωνα με τις καθιερωμένες οδηγίες. Είναι σημαντικό να γνωρίζει ο παραλήπτης του LNG

(το FSRU) το πότε οι αντλίες θα ενεργοποιηθούν και τις επακόλουθες αλλαγές στις πιέσεις των δεξαμενών που περιμένουν.

Η συνήθης διαδικασία είναι να ξεκινήσουν δύο αντλίες ανακυκλοφορία σε μία δεξαμενή και στη συνέχεια, να ξεκινήσει η εκφόρτωση από τη δεξαμενή. Αυτό συνήθως διαρκεί 5 λεπτά. Μια παρόμοια διαδικασία εφαρμόζεται στη συνέχεια στις άλλες δεξαμενές με περίοδο 5 λεπτών μεταξύ κάθε δεξαμενής. Αφού όλες οι αντλίες λειτουργούν με φορτίο 60%, τότε αργά αυξάνονται με τη σειρά τους στο μέγιστο καθορισμένο φορτίο.

Καθώς πέφτει η πίεση στη δεξαμενή, στέλνεται BOG πίσω στο πλοίο LNGC που διατηρεί την πίεση της δεξαμενής του σε συμφωνημένο επίπεδο. Τα πιο σημαντικά στοιχεία που παρακολουθούνται κατά την εκφόρτωση είναι:

1. Επίπεδο δεξαμενής φορτίου
2. Πίεση δεξαμενής φορτίου
3. Φορτίο αντλίας και πίεση εκφόρτωσης
4. Βύθισμα και διαγωγή του πλοίου

Εάν σχεδιάζεται να αδειάσουν αρκετές δεξαμενές, συνιστάται η διατήρηση των επιπέδων της κάθε δεξαμενής ελαφρώς διαφορετικά σύμφωνα με τις καθιερωμένες διαδικασίες "ramp down". Τέλος ζητείται από τον ακροδέκτη λήψης να σταματήσει η επιστροφή BOG για την διατήρηση επαρκούς πίεσης της δεξαμενής. Μετά την αποφόρτιση, τουλάχιστον μία βαλβίδα πλήρωσης διατηρείται ανοικτή για να αποφευχθεί η συμπίεση του υγρού. Η εκκένωση υγρών και ο καθαρισμός με ατμό των σωληνώσεων πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση της εκφόρτωσης του φορτίου. Μετά την ολοκλήρωση του καθαρισμού, εκτελούνται οι ακόλουθες εργασίες.

1. Τελική μέτρηση μετά την εκφόρτωση
2. Αποσύνδεση σωληνώσεων και απόψυξη (εάν είναι απαραίτητο)

Σε σπάνιες περιπτώσεις, μπορεί να χρειαστεί να εκφορτωθεί το LNG χωρίς τη χρήση επιστροφής BOG. Σε αυτή την περίπτωση, το LNG αφαιρείται από την κύρια γραμμή υγρού. Ο ρυθμός εξάτμισης ρυθμίζεται για να διατηρηθεί μια σταθερή πίεση δεξαμενής.

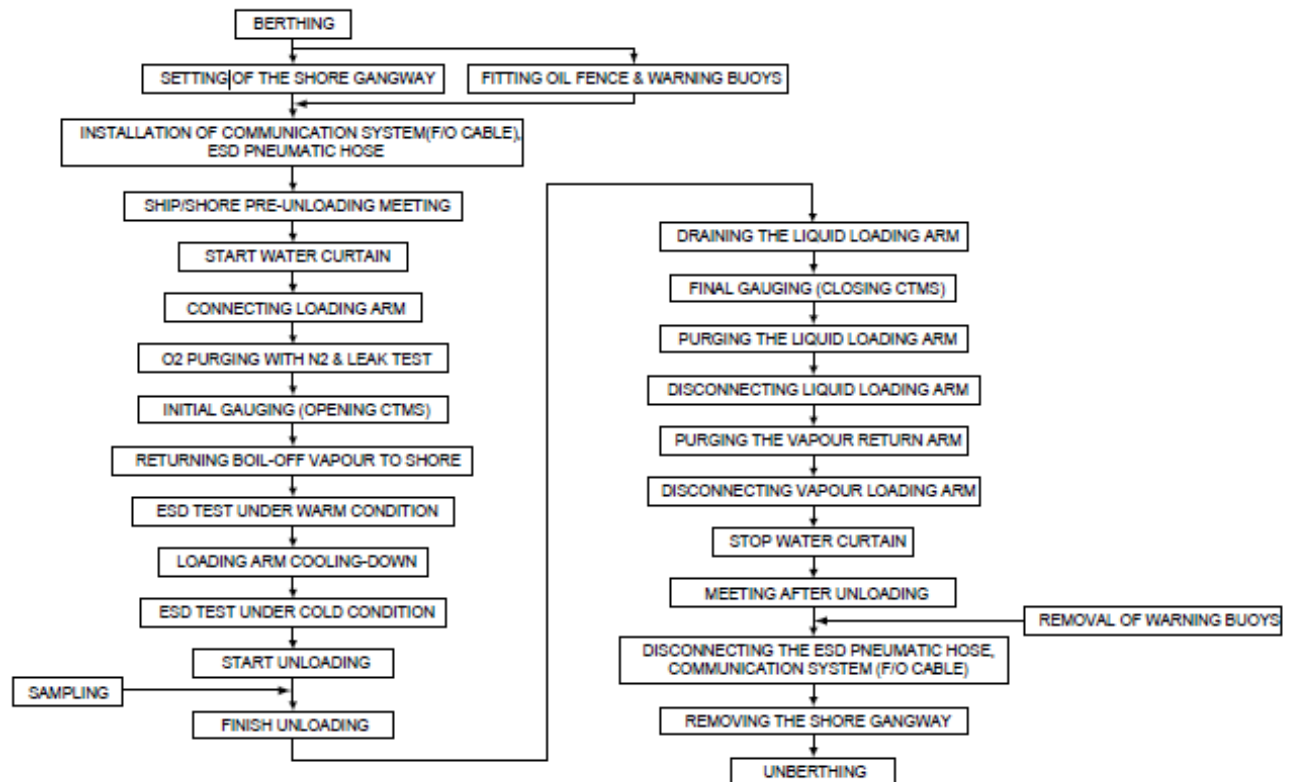
3.4.7 Αποστράγγιση / καθαρισμός

Οι διαδικασίες αποστράγγισης / καθαρισμού των σωληνώσεων είναι οι ίδιες ανεξάρτητα από το εάν το πλοίο έχει φορτώσει ή εκφορτώσει. Αυτό γίνεται με τη χρήση μεθόδου "runch" αζώτου. Μετά την ολοκλήρωση της φόρτωσης ή της εκφόρτωσης, αυτή η λειτουργία πραγματοποιείται πριν από την αποσύνδεση των βραχιόνων (σωλήνων) υγρού και ατμού.

Με την ολοκλήρωση, οι βαλβίδες ESD πρέπει να είναι κλειστές. Στη συνέχεια, το τερματικό αυξάνει την πίεση μέσα στους βραχίονες σε ένα ορισμένο επίπεδο (συνήθως περίπου 4 kg / cm²). Κατόπιν ανοίγει η βαλβίδα ψεκασμού ψυκτικού και το υγρό και ο ατμός LNG τροφοδοτείται στις δεξαμενές φορτίου μέσω της γραμμής ψεκασμού με πίεση αζώτου (N₂). Οι ατμοί στον βραχίονα ατμού τροφοδοτούνται στις δεξαμενές φορτίου μέσω της κεφαλής ατμού από το αέριο N₂ που τροφοδοτείται από το τερματικό. Η αποστράγγιση πραγματοποιείται κανονικά αυξάνοντας την πίεση τους βραχίονες ένα προς ένα.

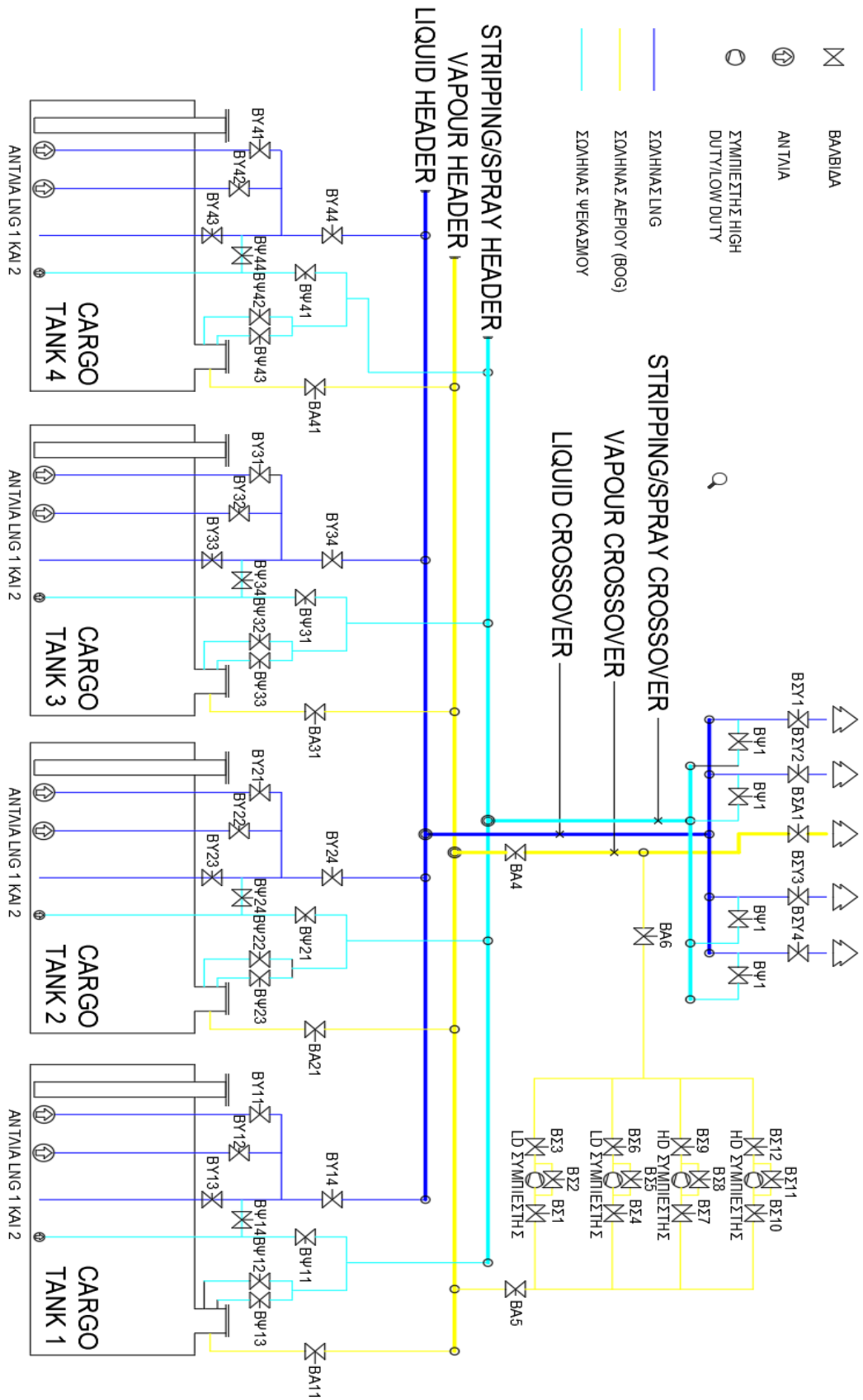
Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ο βραχίονας είναι εντελώς απαλλαγμένος από υγρό και το επίπεδο υδρογονανθράκων είναι κάτω από 1% κατ 'όγκο. Η επιτρεπόμενη

συγκέντρωση υδρογονανθράκων μπορεί να διαφέρει από τερματικό σε τερματικό. Καθώς η πίεση αυξάνεται στη γραμμή του υγρού, το υγρό θα οδηγηθεί μέσω της κύριας σωλήνωσης ψεκασμού/ ψύξης στη δεξαμενή φορτίου.



Εικόνα 19. Διαδικασία εκφόρτωσης LNGC

Στη συνέχεια με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCad παρουσιάζεται ένα σχέδιο σε απλούστευση, για τις ανάγκες αυτής της μελέτης, που απεικονίζει τα κύρια τεχνικά στοιχεία και τις σωληνώσεις που συμμετέχουν σε μια φόρτωση και εκφόρτωση. Στο συγκεκριμένο σχέδιο για την απλοποίηση του, κάθε σωλήνας χαρακτηρίζεται από ένα χρώμα (μπλε, κυανό, κίτρινο), ώστε να γίνεται πιο εύκολη η αναγνώριση κάθε σωλήνα. Με βάση το σχέδιο και τις διεργασίες που επεξηγούνται ο αναγνώστης μπορεί να κατανοήσει πλήρως τη σειρά των διεργασιών που παίρνουν μέρος σε μια φόρτωση και εκφόρτωση ενός LNGC/FSRU. Η συγκεκριμένη διάταξη και τα βήματα που επεξηγούνται σε κάθε διεργασία είναι η βάση στην πραγματοποίηση του simulation που θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.



Εικόνα 20. Σύστημα σωληνώσεων, βαλβίδων, δεξαμενών και αντλιών ενός LNGC και FSRU

3.5 Βήματα φόρτωσης με επιστροφή ατμών

Προετοιμασίες φόρτωσης

Όλες οι εργασίες φόρτωσης του φορτίου ελέγχονται και παρακολουθούνται από το CCR (cargo control room) του πλοίου. Η φόρτωση του LNG και η ταυτόχρονη απομάκρυνση του έρματος πρέπει να παρακολουθούνται και να ελέγχονται συνέχεια ώστε να ικανοποιούνται τα ακόλουθα:

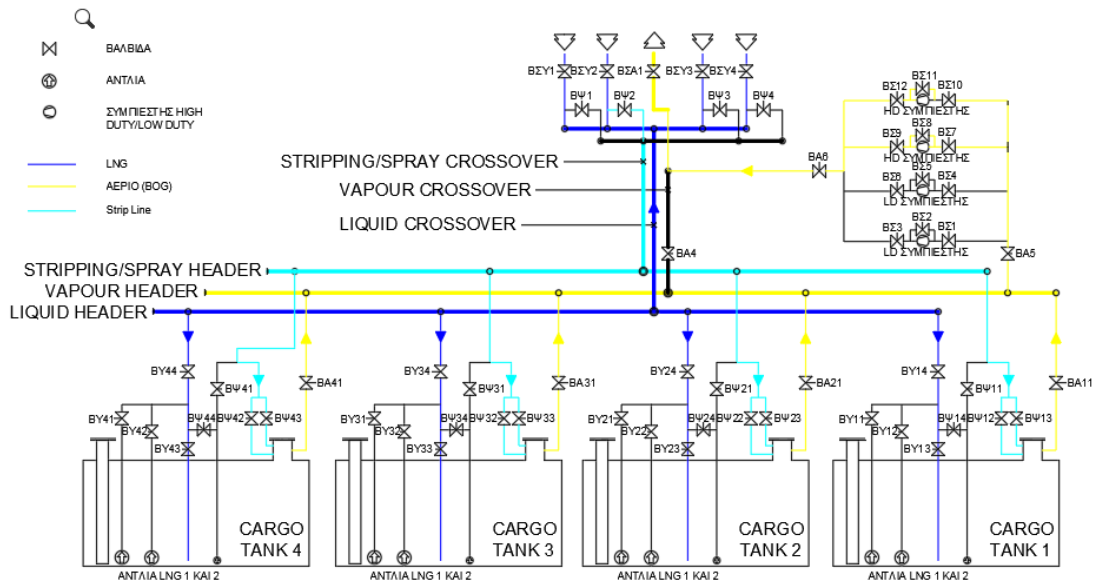
- Οι δεξαμενές φορτίου να γεμίζουν ομοιόμορφα.
- Η διαγωγή να ελέγχεται και το πλοίο να διατηρείται ισοβύθιστο
- Οι δεξαμενές φορτίου να γεμίζουν μέχρι τα όρια που δίδονται από τους πίνακες φόρτωσης (98,5%)

Ένας αξιωματικός πρέπει να είναι πάντα παρών στο CCR όταν μεταφέρεται το φορτίο. Επίσης πρέπει να υπάρχει στο κατάστρωμα ένα μέλος του πληρώματος για τακτικό έλεγχο.

Ενέργειες πριν από την φόρτωση

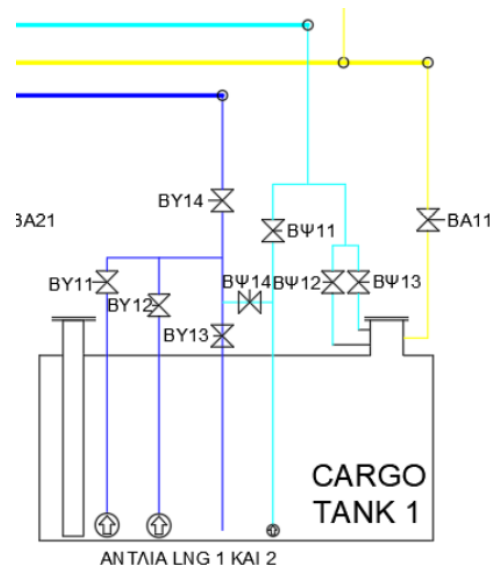
1. Σύνδεση του καλώδιου επικοινωνίας
2. Δοκιμή τηλεφώνου
3. Σύνδεση των σωληνώσεων φόρτωσης LNG και ατμού.
4. Βεβαίωση ότι οι συναγερμοί έχουν απενεργοποιηθεί
5. Έλεγχος στις σωληνώσεις για στεγανότητα, με δοκιμή με σάπωνες σε κάθε σύνδεσμο

Διαδικασίες ψύξης

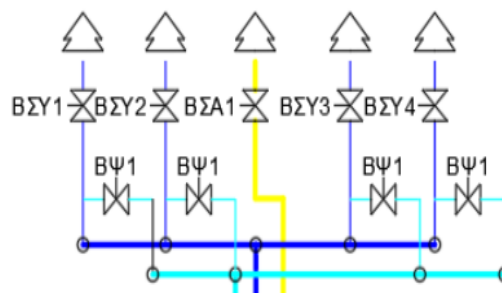


Εικόνα 21. Διαδικασίες ψύξης στο FSRU

1. Άνοιγμα βαλβίδων ΒΨ1,2,3,4 και ΒΥ14,24,34,44



Εικόνα 22. Θέση βαλβίδας ΒΥ14



Εικόνα 23. Θέση βαλβίδων ΒΨ1,2,3,4

2. Άνοιγμα των βαλβίδων ΒΨ12 ΒΨ13 για να επιτρέψετε την παροχή LNG:
3. Άνοιγμα της βαλβίδας ΒΣΑ1
4. Άνοιγμα των βαλβίδων ΒΣΥ2 και ΒΨ1 οι οποίες θα επιτρέψουν στο υγρό να εισέλθει στο κύριο σύστημα
5. Υποθέτοντας ότι ο βραχίονας φόρτωσης (loading arm) είναι το πρώτο σημείο που πρέπει να ψυχθεί. Οι βαλβίδες ΒΨ14,44 και ΒΨ13,43 των δεξαμενών φορτίου 1 και 4 ανοίγουν
6. Ενημέρωση ότι το πλοίο είναι έτοιμο για παραλαβή LNG

Η άντληση πρέπει να ξεκινήσει με αργό ρυθμό για περίπου 15 λεπτά, προκειμένου να ψυχθούν σταδιακά οι σωληνώσεις. Ο ρυθμός άντλησης αυξάνεται σταδιακά μέχρι να ψυχθεί πλήρως το σύστημα.

7. Οι βαλβίδες ΒΨ14,44 ΚΛΠ των δεξαμενών ανοίγουν πλήρως

Μετά την ολοκλήρωση της ψύξης των συστημάτων μεταφοράς φορτίου

8. Οι βαλβίδες ΒΣΥ1,2,3,4 και οι βαλβίδες.
9. Ενημέρωση να αυξηθεί ο ρυθμός φόρτωσης στο μέγιστο επιτρεπτό.

Σε κάθε δεξαμενή πρέπει οι βαλβίδες να παραμείνουν ανοιχτές ώστε να μην προκύψει υπερπίεση λόγω θέρμανσης των σωληνώσεων

10. Ένας HD compressor πρέπει να λειτουργεί ώστε να ρυθμίζει την παροχή για να διατηρείται η τάση ατμών της δεξαμενής στα 50 mbar

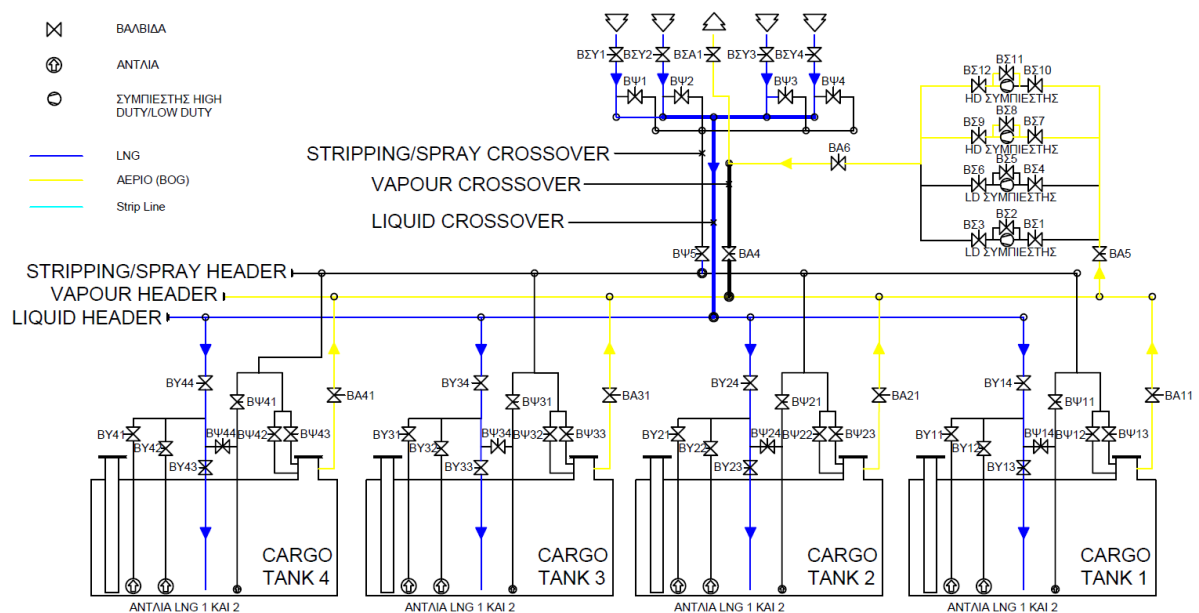
Έλεγχοι που πρέπει να γίνουν πριν από τη φόρτωση

- Έλεγχος λειτουργίας όλων των βαλβίδων δεξαμενών φορτίου και των βαλβίδων ESD (emergency shut down)
- Έλεγχος λειτουργίας βαλβίδων έρματος. Έλεγχος συμπιεστών HD, αντλιών έρματος, και των συστημάτων θέρμανσης.

Προφυλάξεις ασφαλείας

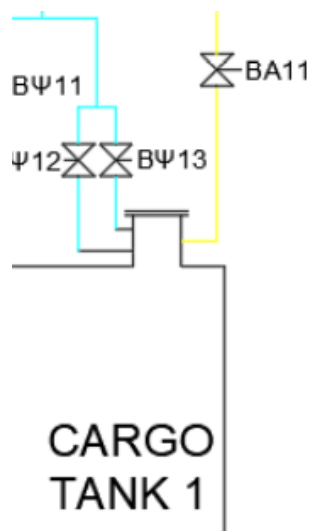
- Προετοιμασία εξοπλισμού πυρόσβεσης.
- Προετοιμασία για λειτουργία των δύο συμπιεστών HD για χρήση.

Φόρτωση LNG στο FSRU



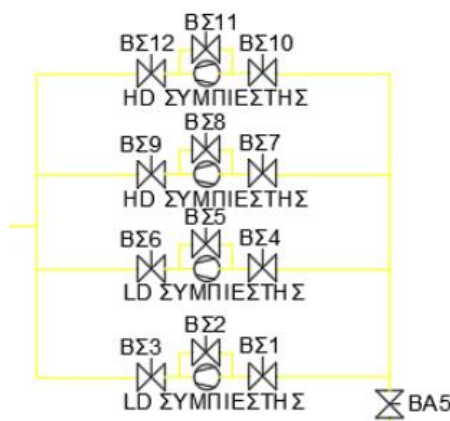
Εικόνα 24. Διαδικασία φόρτωσης LNG στο FSRU

1. Ολοκλήρωση της διαδικασίας ψύξης-cooldown operation
2. Άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής αερίου στους θόλους των δεξαμενών φορτίου BA11,21,31,41



Εικόνα 25. Θέση βαλβίδας BA11

3. Άνοιγμα βαλβίδων ΒΣ7,9,10,12 στους συμπιεστές HD



Εικόνα 26. Θέση βαλβίδων ΒΣ7,9,10,12

4. Έλεγχος σύνδεσης των σωληνώσεων υγρών και ατμών.
5. Επιθεωρήσεις ασφαλείας και συμπλήρωση της σχετικής λίστας ελέγχου
6. Άνοιγμα της βαλβίδα πλήρωσης της δεξαμενής φορτίου No4 (BY43) και της δεξαμενής φορτίου no1 (BY13)
7. Άνοιγμα της βαλβίδα πλήρωσης της δεξαμενής φορτίου No2 (BY23) και της δεξαμενής φορτίου no3 (BY33).
8. Αύξηση του ρυθμού φόρτωσης.
9. Αφερματισμός. Διατήρηση του βυθίσματος, της διαγωγής και των τάσεων εντός των επιτρεπτών ορίων, ελέγχοντας το έρμα θαλασσινού νερού.
10. Έλεγχος των πιέσεων της δεξαμενής προκειμένου να επιτευχθεί πίεση περίπου 80 mbar. Άνοιγμα της βαλβίδας BA5 για την εξαγωγή αερίου προς στους συμπιεστές και τη βαλβίδα BA6 στην έξοδο του συμπιεστή.
11. Ρύθμιση των ανοιγμάτων στις βαλβίδες για να διατηρείτε ομοιόμορφη κατανομή στις δεξαμενές.
12. Όταν οποιαδήποτε δεξαμενή προσεγγίζει το 98,5%, πρέπει να γίνει ενημέρωση.
13. Κλείσιμο της βαλβίδας όταν γεμίσει η δεξαμενή στο σωστό όριο.

14. Πριν από τη συμπλήρωση της πρώτης δεξαμενής φορτίου, πρέπει να ζητείται να μειωθεί η ταχύτητα φόρτωσης και να συνεχίσει να μειώνεται όταν συμπληρώνετε κάθε επόμενη δεξαμενή. Όταν μια δεξαμενή βρίσκεται στο επιθυμητό επίπεδο, κλείνεται η αντίστοιχη βαλβίδα φόρτωσης: Νο1 δεξαμενή φορτίου BY13, δεξαμενή φορτίου Νο2 BY23, δεξαμενή φορτίου Νο3 BY33 . Είναι βολικό να τερματιστεί η φόρτωση από τη δεξαμενή φορτίου Νο4. Για ευκολία στην αποστράγγιση της γραμμής, αφήστε τη δεξαμενή να έχει χωρητικότητα +50m³
15. Η φόρτωση πρέπει να σταματήσει όταν η τελική δεξαμενή φορτίου φθάσει την χωρητικότητα σύμφωνα με το γράφημα πληρώσεως, μείον την έξτρα χωρητικότητα που αναφέρθηκε για την αποστράγγιση της γραμμής. Τέλος αφήνετε ανοιχτή τη βαλβίδα φόρτωσης φορτίου Νο4 BY43.
16. Με την ολοκλήρωση της αποστράγγισης των σωληνώσεων φόρτωσης πρέπει να κλείνουν οι βαλβίδες ESD. Οι γραμμές του δέκτη είναι τώρα υπό πίεση με πίεση 2 bar στα 3 bar με άζωτο.
17. Ανοίγονται οι βαλβίδες αποστράγγισης πολλαπλών σωληνώσεων ΒΨ1,2,3,4 για να επιτρέψουν στο άζωτο να ξεπλύνει το υγρό στη δεξαμενή φορτίου Νο 4. Οι βαλβίδες κλείνουν όταν η πίεση αζώτου έχει πέσει στα 0 mbar. Επαναλαμβάνεται η λειτουργία 3 φορές ή έως ότου δεν παραμείνει υγρό στις σωληνώσεις.
18. Η βαλβίδα φόρτωσης της δεξαμενής αριθ. 4 (BY43) αφήνεται ανοιχτή έως ότου η σωλήνωση επιστρέψει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
19. Ολοκλήρωση της λειτουργία de-ballasting.
20. Αποσύνδεση των σωληνώσεων.

3.6 Βήματα εκφόρτωσης LNG από το LNGC στο FSRU με επιστροφή ατμών

Κατά την κανονική εκφόρτωση χρησιμοποιούνται μόνο οι κύριες αντλίες φορτίου και μια ποσότητα του LNG διατηρείται στις δεξαμενές για χρήση ψύξης. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης, το BOG επανακυκλοφορείτε για να διατηρεί την πίεση στις δεξαμενές φορτίου.

Με την κατάλληλη διαχείριση του έρματος το πλοίο διατηρείται εντός του απαιτούμενου ορίου βύθισης και διαγωγής. Εάν απαιτείται το πλοίο να έχει συγκεκριμένη διαγωγή για να αδειάσει μια δεξαμενή φορτίου τότε μέσω του έρματος πραγματοποιείται η κατάλληλη διαγωγή. Κάθε δεξαμενή εκφορτώνεται περίπου σε επίπεδο 0.37 m. Η ποσότητα που διατηρείται στις δεξαμενές ποικίλλει ανάλογα με το μήκος του ταξιδιού, ο αναμενόμενος χρόνος πριν τη φόρτωση και ο εκτιμώμενος όγκος BOG που χρειάζεται το πλοίο για την λειτουργία του. Μια αντλία σταματάει σε επίπεδο περίπου 1.0 m για να αποφευχθεί ο στροβιλισμός στον πυθμένα της δεξαμενής που δημιουργεί διαταραχή στην αναρρόφηση.

Προετοιμασίες για την εκφόρτωση

Θεωρείται ότι όλες οι βαλβίδες είναι κλειστές πριν από την εκκίνηση.

Προκαταρκτική προετοιμασία:

Έλεγχοι που πρέπει να γίνουν πριν από την έναρξη των εργασιών φορτίου:

- Έλεγχος λειτουργίας όλων των βαλβίδων των δεξαμενών και πολλαπλών βαλβίδων ESD.
- Έλεγχος λειτουργίας βαλβίδων έρματος.
- Έλεγχος λειτουργίας των συστημάτων έκτακτης διακοπής λειτουργίας (ESDS).

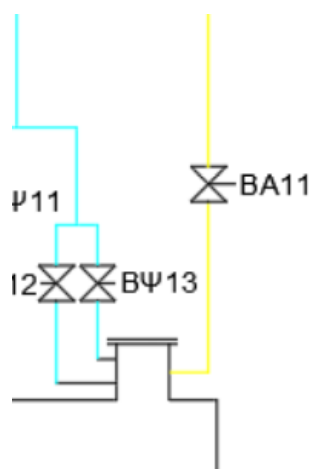
Προφυλάξεις ασφαλείας:

- Έλεγχος ότι οι ψεκασμοί για την κουρτίνα νερού του σκάφους είναι σε λειτουργία.
- Προετοιμασία εξοπλισμού πυρόσβεσης.

Θόλοι δεξαμενών φορτίου

Άνοιγμα των ακόλουθων βαλβίδων

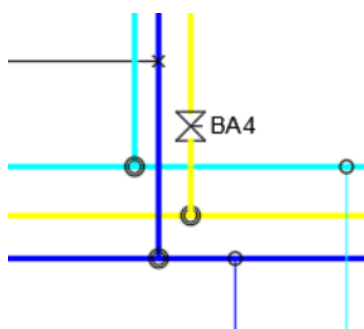
- BA11 (δεξαμενή αριθ. 1)
- BA21 (δεξαμενή αριθ. 2)
- BA31, 302 (δεξαμενή αριθ. 3)
- BA41, 402 (δεξαμενή αριθ. 4)



Εικόνα 27. Θέση βαλβίδας BA11

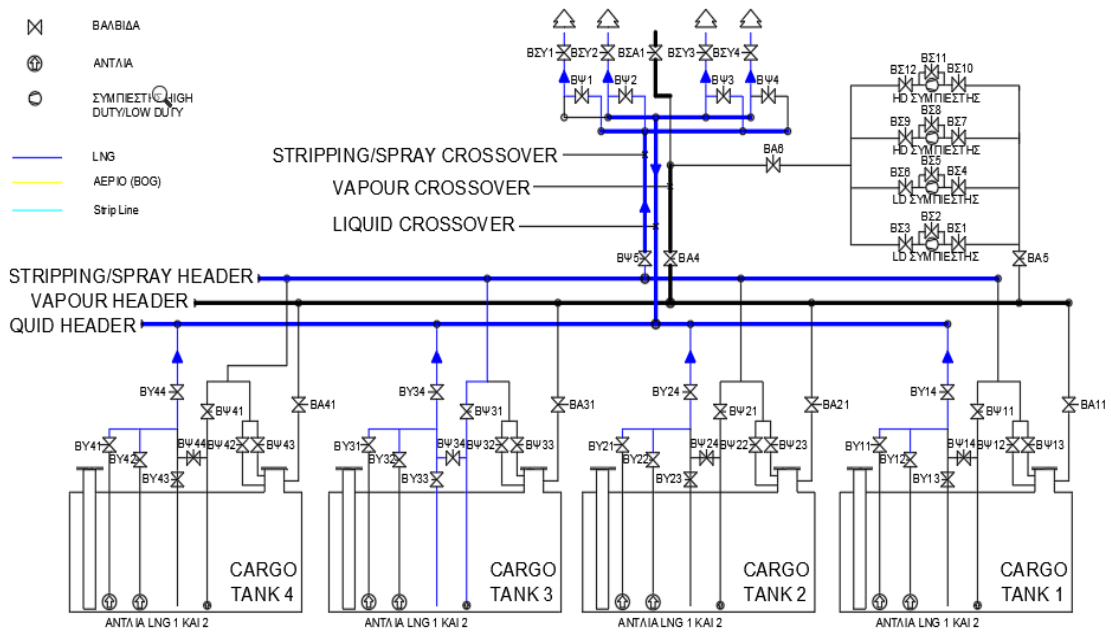
Αυτές οι βαλβίδες πρέπει να είναι ανοικτές ανά πάσα στιγμή όταν το πλοίο έχει φορτίο.

- Άνοιγμα της βαλβίδας BA4.



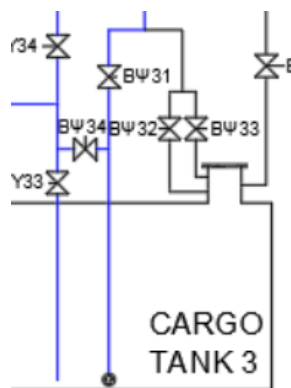
Εικόνα 28. Θέση βαλβίδας BA4

Διαδικασίες ψύξης



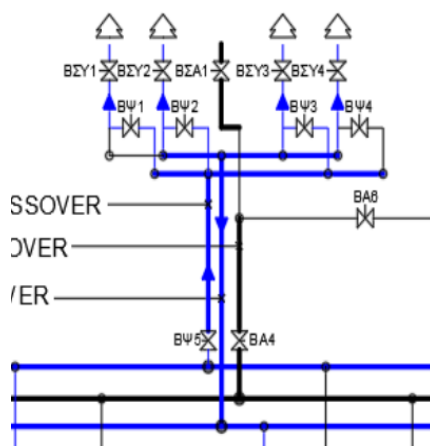
Εικόνα 29. Διαδικασία ψύξης LNGC

1. Άνοιγμα της βαλβίδας ΒΨ31 στο 30% και άνοιγμα της βαλβίδας επιστροφής ΒΨ34,33 στο 100%.



Εικόνα 30. Θέση βαλβίδων ΒΨ34,33

2. Άνοιγμα της βαλβίδας ΒΨ5,4,3,2,1



Εικόνα 31. Θέση βαλβίδων ΒΨ5,4,3,2,1

3. Εκκίνηση της αντλίας ψεκασμού Νο.3.
4. Η πίεση και ο ρυθμός ροής του υγρού πρέπει να ελέγχονται από τη βαλβίδα ΒΨ34.
5. Όταν οι σωληνώσεις έχουν κρυώσει στους -100°C , ανοίγονται οι βαλβίδες ΒΨ4,3,2,1.
6. Ο ρυθμός ψύξης ελέγχεται από τις βαλβίδες που αναφέρθηκαν στο βήμα 5.

Η ψύξη είναι πλήρης όταν οι σωληνώσεις είναι περίπου στους $-100 \sim -130^{\circ}\text{C}$.

7. Η αντλία ψεκασμού Νο 3. και οι Βαλβίδες κλείνουν. Άνοιγμα της βαλβίδας ΒΨ34 για να αποστραγγιστεί η γραμμή.
8. Κλείσιμο της βαλβίδας ΒΨ34.

Μετά την ολοκλήρωση της ψύξης του συστήματος ακολουθεί η εκφόρτωση.

8. Είναι σημαντικό να διατηρούνται οι δεξαμενές σε πίεση τουλάχιστον 100 mbar για την αποφυγή της σπηλαίωσης. Εάν η πίεση της δεξαμενής πέφτει στα 60 mbar, πρέπει να αυξηθεί η επιστροφή αερίου.
9. Εκκίνηση λειτουργίας ερματισμού. Η διαγωγή του πλοίου πρέπει να είναι μέσα στα επιτρεπόμενα όρια ελέγχοντας τα διάφορα επίπεδα δεξαμενών έρματος.

Οι κύριες αντλίες φορτίου σε κάθε δεξαμενή πρέπει να σταματάνε όταν η στάθμη του υγροποιημένου αερίου φτάσει σε ένα κατώτατο όριο, περίπου 1, m στη δεξαμενή αριθ. 4 και 0,3 m σε δεξαμενές αριθ. 1, 2 και 3 (για ένα τυπικό LNGC). Τα παραπάνω δεδομένα είναι μόνο για αναφορά. Στη πραγματικότητα η στάθμη που θα σταματήσουν οι αντλίες πρέπει να προσδιορίζεται με βάση την ποσότητα που απαιτείται για να διατηρηθούν οι δεξαμενές σε ψυχρή κατάσταση, και να αποφευχθούν δυσλειτουργίες στην λειτουργία των βυθιζόμενων αντλιών.

Μετά την ολοκλήρωση της εκφόρτωσης:

10. Αποστράγγιση των σωληνώσεων.
11. Διακοπή της επιστροφής αερίου.

Τα παραπάνω βήματα αντιστοιχούν στις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης ενός manual LNGC, και οι διαδικασίες είναι τυποποιημένες βάση των κανονισμών SIGGTO. Όπως έχει προαναφερθεί στην εργασία η βασική διαφορά ενός LNGC με ένα FSRU είναι η διαδικασία της αεριοποίησης που μπορεί να πραγματοποιήσει το FSRU. Για την πραγματοποίηση του simulation είναι απαραίτητη η γνώση της παραπάνω διάταξης και της σειράς των βημάτων που αναφέρονται σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια της εργασίας και με βάση τα παραπάνω θα μοντελοποιηθεί η λειτουργία ενός FSRU κατά την εκφόρτωση LNG από ένα LNGC σε αυτό και κατά την αεριοποίησή του.

4. Περιγραφή Μοντέλου Προσομοίωσης Λειτουργίας FSRU

Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού μοντέλου, μέσα από το οποίο θα γίνεται προσομοίωση της λειτουργίας ενός FSRU κατά μέγιστη χρονική περίοδο ενός μήνα. Ο χρήστης γνωρίζοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φορτοεκφορτώσεων θα μπορεί να υπολογίσει τους χρόνους που θα ολοκληρώνεται η κάθε διαδικασία. Ταυτόχρονα δημιουργώντας σενάρια θα μπορεί να προβλέψει και να μελετήσει διάφορες καταστάσεις. Η διάταξη στην οποία βασίζεται η δημιουργία του μοντέλου είναι η ίδια με αυτή που παρουσιάζεται στο τέλος του κεφαλαίου 2.

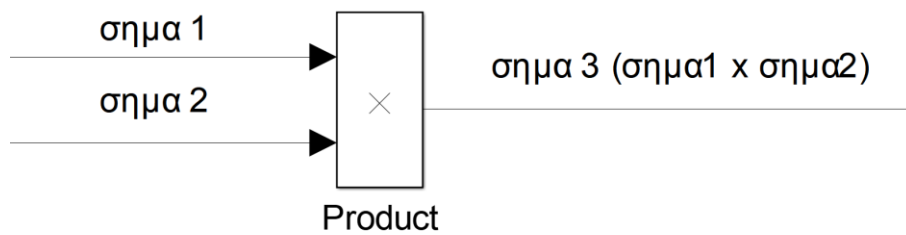
4.1 Περιβάλλον του Simulink

Το λογισμικό για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τα προγράμματα MATLAB και Simulink. Το MATLAB είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού με έμφαση στην αριθμητική υπολογιστική. Έχει αναπτυχθεί από την MathWorks στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και θεωρείται επαγγελματικό εργαλείο προγραμματισμού. Το Simulink είναι ένα εργαλείο σχεδιασμού και προσομοίωσης το οποίο διαθέτει ένα περιβάλλον διαγράμματος με drag-and-drop interface. Το Simulink χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση λογισμικού ελέγχου, αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος, μηχανικών συστημάτων και συστημάτων επικοινωνίας. Τα μοντέλα συστημάτων δημιουργούνται χρησιμοποιώντας λειτουργικές μονάδες, που προέρχονται από μια βιβλιοθήκη μπλοκ (block). Οι προγραμματιστές μπορούν να δημιουργήσουν τα δικά τους λειτουργικά μπλοκ, είτε σχεδιάζοντάς τα σε Simulink είτε κωδικοποιώντας τα χρησιμοποιώντας το MATLAB. Το Simulink είναι ευρέως γνωστό για δοκιμές προσομοίωσης και αυτό οφείλεται στα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Το Simulink είναι ένα αρκετά απλό περιβάλλον γραμμικού προγραμματισμού και ο χρήστης απαλλάσσεται από τον προγραμματισμό κειμένου. Το μοντέλο παρουσιάζεται γραφικά στο Simulink ως ένα σύνολο μπλοκ.
- Τα αναπτυγμένα μοντέλα του Simulink μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης στις βιβλιοθήκες που σχετίζονται με το θέμα, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται σε άλλα μοντέλα.
- Ο χρόνος προσομοίωσης είναι αρκετά γρήγορος.

Το Simulink είναι προσβάσιμο με την εκκίνηση του Matlab και το άνοιγμα του Simulink πραγματοποιείται στο κυρίως μενού του MATLAB.

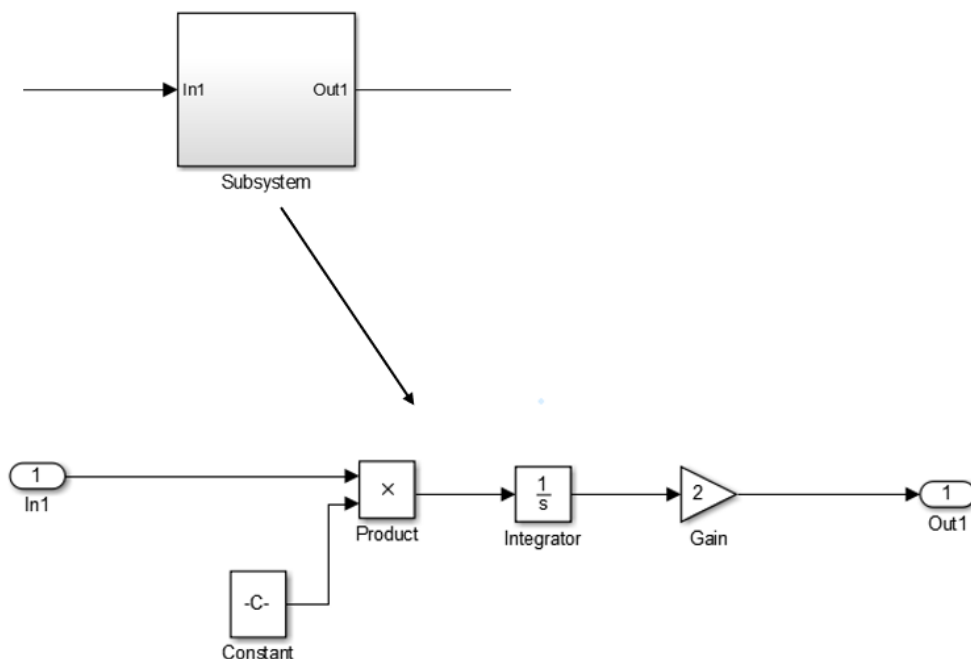
Όπως προαναφέρθηκε το Simulink περιέχει ένα πλήθος βιβλιοθηκών με μπλοκς (blocks) τα οποία μπορούν να εκτελέσουν ενέργειες όπως πολλαπλασιασμός. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ένα μπλοκ πολλαπλασιασμού δυο σημάτων.



Εικόνα 33. Μπλοκ πολλαπλασιασμού στο Simulink

Με το παραπάνω παράδειγμα είναι εύκολο στον αναγνώστη να καταλάβει την γενικότερη χρήση ενός μπλοκ. Ένα μπλοκ στο Simulink μπορεί να είναι απλό όπως ο πολλαπλασιασμός δυο σημάτων, άλλα μπορεί να είναι και σύνθετο.

Ακόμα, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει υποσυστήματα τα οποία πραγματοποιούν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Για παράδειγμα ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ένα υποσύστημα το οποίο να πολλαπλασιάζει το σήμα με μια σταθερή μεταβλητή (C) στη συνέχεια να το ολοκληρώνει και τέλος να διπλασιάζει τη τιμή του. Ένα τέτοιο υποσύστημα παρουσιάζεται στη στην επόμενη εικόνα.

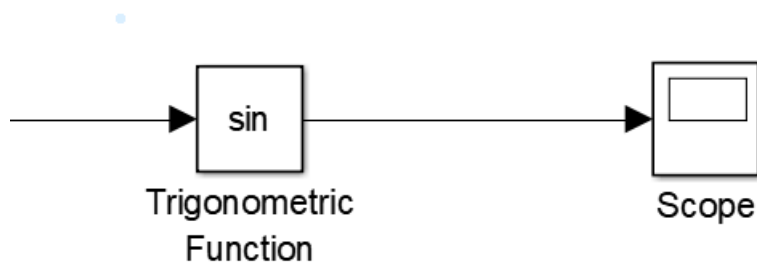


Εικόνα 34. Παράδειγμα υποσυστήματος στο Simulink

Αφότου καθοριστεί το μοντέλο ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς αυτή τρέχει. Επίσης, είναι αρκετά εύκολο να αλλάξουν οι παράμετροι. Το Matlab και το Simulink μπορούν να λειτουργούν παράλληλα, μέσω ενός κώδικα Matlab γίνεται αρκετά εύκολη η αρχικοποίηση των μεταβλητών της προσομοίωσης. Το Simulink

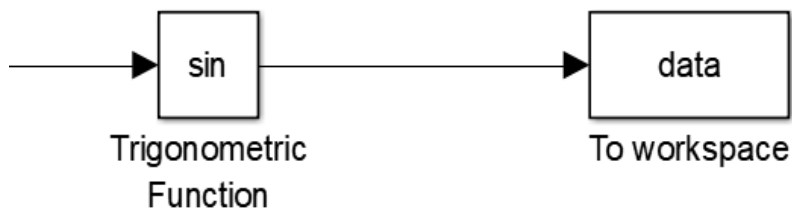
χρησιμοποιείται κυρίως για την παρουσίαση ενός διαγράμματος ή την δημιουργία ενός πίνακα τιμών.

Για να παρουσιάσει ο χρήστης τα αποτελέσματα του ή να τα αποθηκεύσει θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσει τα μπλοκ που πραγματοποιούν τις συγκεκριμένες ενέργειες. Το μπλοκ που παρουσιάζει ένα διάγραμμα είναι το μπλοκ: scope. Υπάρχουν αρκετά είδη μπλοκ scope, το πιο γνωστό και χρήσιμο είναι το απλό scope το οποίο κατασκευάζει το διάγραμμα ενός σήματος σε σχέση με το χρόνο. Στη εικόνα 35 παρουσιάζεται μια διάταξη μπλοκ που δημιουργεί τη συνάρτηση $\sin(\text{σήματος})$ και τη σχεδιάζει. Πατώντας πάνω στο μπλοκ του Scope προβάλετε το επιθυμητό διάγραμμα.



Εικόνα 35. Παράδειγμα με μπλοκ Scope

Ακόμα υπάρχει και η δυνατότητα ο χρήστης να αποθηκεύσει τα δεδομένα του στο workspace του Matlab. Ένα αντίστοιχο παράδειγμα με αυτό του scope παρουσιάζεται στην εικόνα 36 στο οποίο κάθε στοιχείο αποθηκεύεται στη μεταβλητή data.



Εικόνα 36. Παράδειγμα με μπλοκ To Workspace

4.2 Περιγραφή μοντέλου

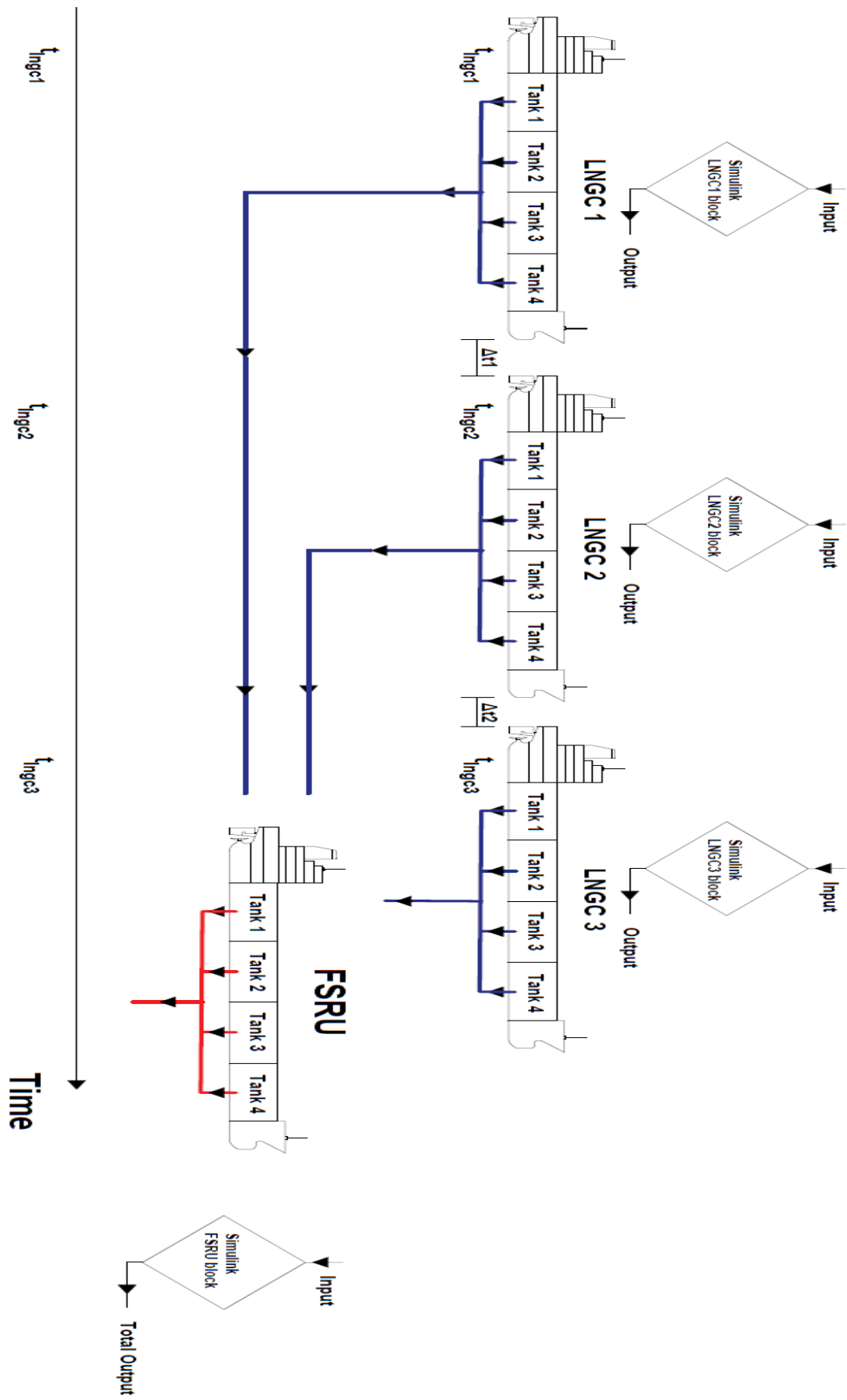
Για την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου αρχικά παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο ο αναγνώστης θα κατανοήσει τη γενική λειτουργία και διάταξη του Simulink. Η διάταξη του Simulink ακολουθεί τη λογική της δημιουργίας μιας συνολικής ροής LNG. Ο χρήστης πρέπει να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά κάθε πλοίου αλλά και το χρόνο προσέλευσης καθενός (t_{Ingc}). Γνωρίζοντας τα παραπάνω το Simulink δημιουργεί την συνολική ροή που δέχεται το FSRU ως προς το χρόνο ολοκληρώνοντας το αρχικό στάδιο της προσομοίωσης.

Εφόσον τα input του LNG είναι γνωστά στη συνέχεια ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει την κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή αν η εκφόρτωση και η φόρτωση του LNG προς το FSRU πραγματοποιήθηκε ομαλά ή αν υπήρξαν επιπλοκές στις βαλβίδες και αντλίες. Ο χρήστης με αυτό τον τρόπο ορίζει την χρονική αλληλουχία των στοιχείων του μοντέλου δημιουργώντας το σενάριο που θέλει να μελετήσει

Τέλος ορίζονται και ορίζονται και οι ποσότητες φυσικού αερίου που πρέπει να προσφέρει η μονάδα στον χρόνο. Αυτές οι ποσότητες πρέπει να μετατραπούν σε ροές LNG προς αεριοποίηση.

Έχοντας όλα τα παραπάνω στοιχεία ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει σενάρια λειτουργίας στο Simulink με τελικό αποτέλεσμα διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται ο όγκος κάθε δεξαμενής του FSRU ως προς το χρόνο.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ο χρόνος στον οποίο κάθε LNGC πραγματοποιεί την εκφόρτωση του LNG δεν πρέπει να συμπίπτει με κάποιο άλλο. Με άλλα λόγια σε ένα FSRU είναι δυνατή η φόρτωση LNG μόνο από ένα LNGC. Στην εικόνα 37 η θέση κάθε LNGC δηλώνει τη χρονική στιγμή που θα ξεκινήσει η εκφόρτωση του. Αντίθετα η θέση του FSRU δεν έχει συσχέτιση με το χρόνο (το FSRU λειτουργεί συνέχεια).



Εικόνα 37. Γενικό διάγραμμα μοντέλου

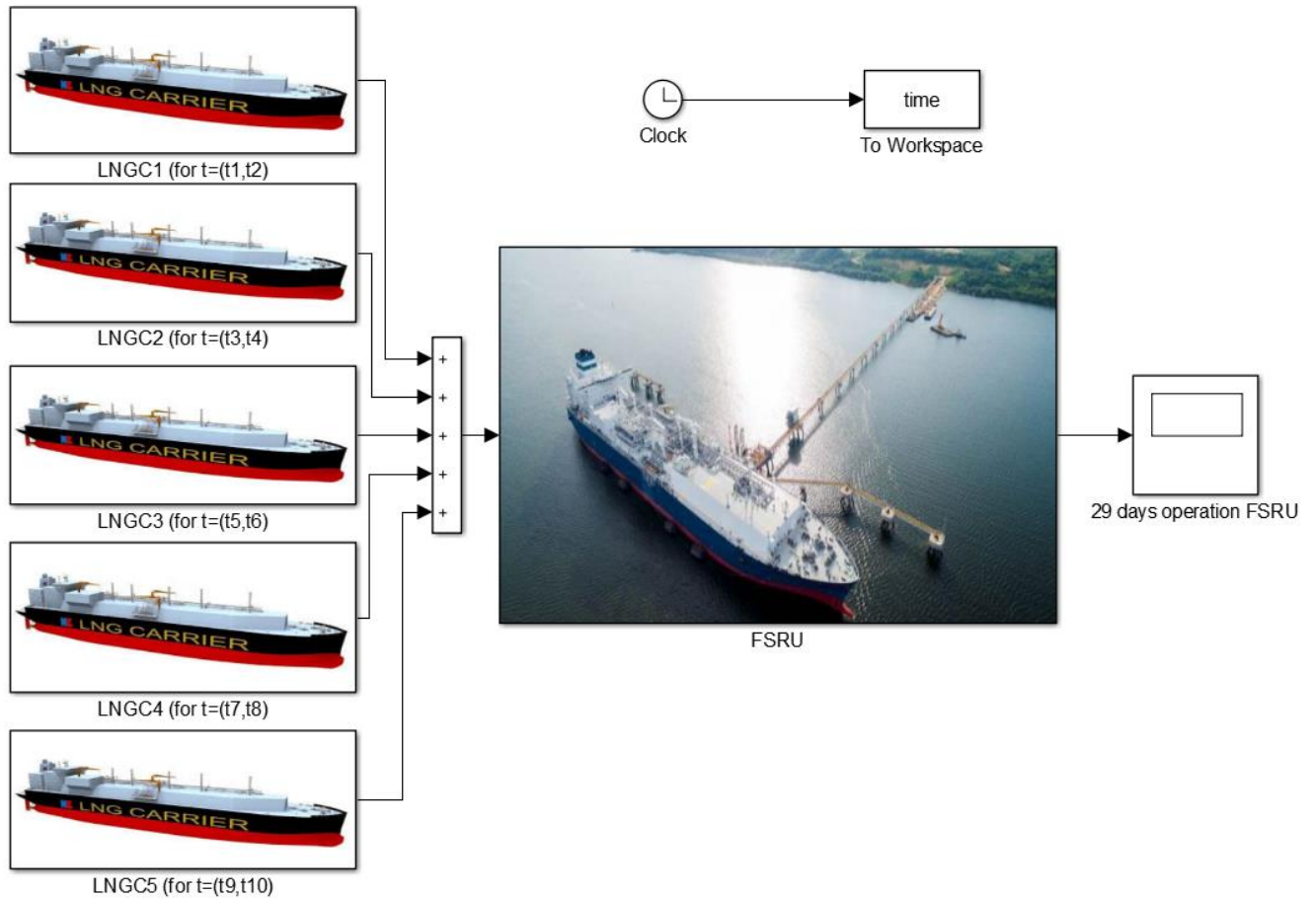
Το μοντέλο αποτελείται από δυο βασικά υποσυστήματα (subsystems), το υποσύστημα του LNGC με τα χαρακτηριστικά του που σε μια χρονικά προκαθορισμένη στιγμή εκφορτώνει το LNG στο FSRU, και το υποσύστημα του FSRU. Ταυτόχρονα για τον καθορισμό των τεχνικών στοιχείων (μέγιστη ροή αντλιών, όγκος δεξαμενών κλπ.) χρησιμοποιείται ένας κώδικας MATLAB στον οποίο αρχικοποιούνται όλες οι μεταβλητές. Ο συγκεκριμένος κώδικας καθιστά την προσομοίωση πολύ άμεση για τον χρήστη εφόσον η αλλαγή των δεδομένων γίνεται αρκετά γρηγορά και εύκολα. Συγκεκριμένα κάθε μεταβλητή αφορά τα χαρακτηριστικά των πέντε πλοίων/εκφορτώσεων LNGC και του FSRU. Οι μεταβλητές που αφορούν τα LNGC είναι:

- η παροχή κάθε αντλίας σε κάθε δεξαμενή,
- η στάθμη πλήρωσης κάθε δεξαμενής πριν την εκφόρτωση (σε ποσοστό),
- και η ολική χωρητικότητα κάθε δεξαμενής.

Ακόμα οι μεταβλητές που αφορούν το FSRU είναι ακριβώς οι ίδιες με το LNGC με την προσθήκη:

- της μέγιστης ροής LNG προς αεριοποίηση, και
- του ορίου στο οποίο η εκφόρτωση LNG προς αεριοποίηση του FSRU σταματάει.

Η βασική αρχή της προσομοίωσης στο Simulink είναι η σωστή κατανομή των ροών του LNG σε μια φορτοεκφόρτωση μέσω των σημάτων και των μπλοκ του Simulink. Στο μοντέλο Simulink που αναπτύχθηκε τα μπλοκ και τα σήματα παριστάνουν τους σωλήνες, τις αντλίες και τις βαλβίδες του LNGC και του FSRU. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 2.5×10^6 δευτερόλεπτα δηλαδή περίπου 29 μέρες. Οι 29 ημέρες θεωρούνται μια ικανοποιητική περίοδος χρόνου για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας μιας μονάδας FSRU, κατά την οποία δύναται να λάβουν χώρα πολλές διαδικασίες φορτοεκφορτώσεων μεταξύ του FSRU και LNGCs. Το εργαλείο στην παρούσα μορφή του προσομοιώνει 5 διαδοχικές εκφορτώσεις με χρονική απόσταση 6 μέρες. Λόγω της δομής του στο Simulink έχει δυνατότητα επέκτασης με παραπάνω μπλοκ ώστε να προσομοιώνει και σενάρια μέχρι LNGC ανά δυο μέρες. Στην εικόνα 38 παρουσιάζεται η γενική διάταξη του Simulink με τα πέντε πλοία/εκφορτώσεις LNGC και τη μονάδα FSRU όπως προαναφέρθηκε.



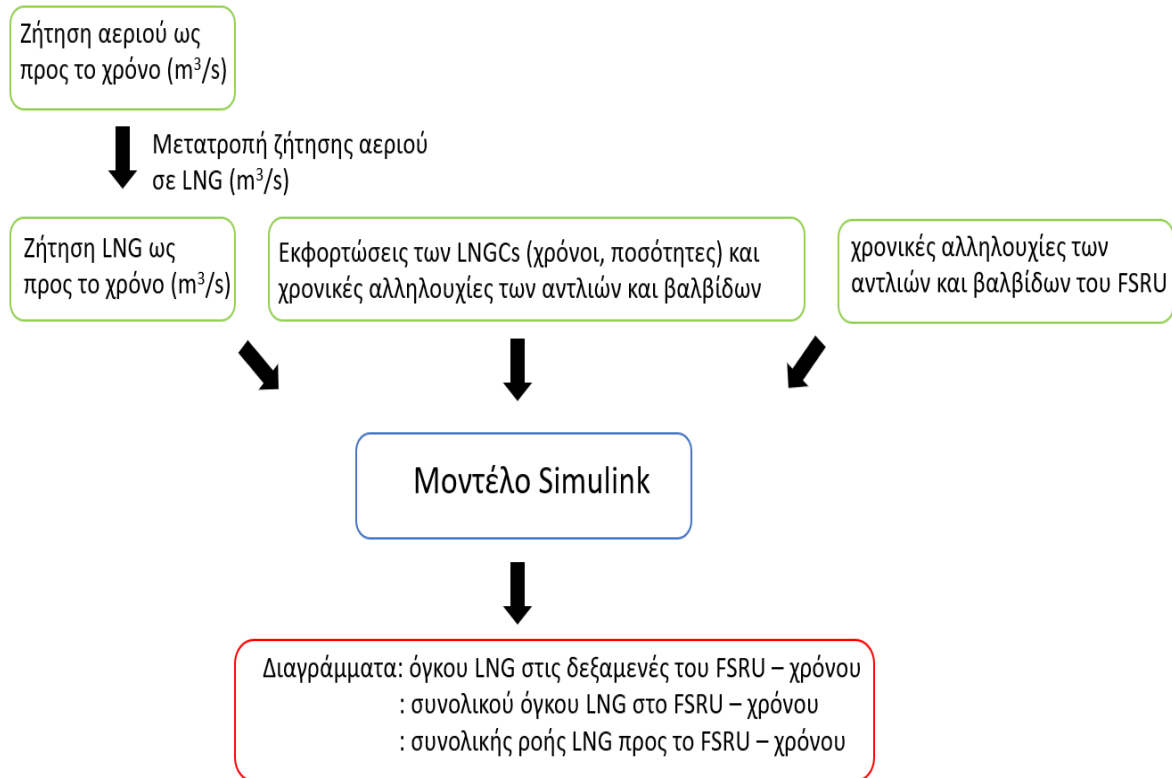
Εικόνα 38. Γενική διάταξη Simulink

Στη συγκεκριμένη διάταξη φαίνεται ευκρινώς πως κάθε ροή-σήμα που προέρχεται από ένα υποσύστημα-LNGC προστίθεται με συνέπεια να έχουμε μια επαλληλία ροών προς το FSRU. Η γενική ιδέα της προσομοίωσης είναι η ολοκλήρωση της συνολικής ροής που φτάνει σε κάθε δεξαμενή του FSRU εφόσον είναι γνωστή η σχέση:

$$V(T) = \int_{t_{start}}^{t_{end}} Q(t)dt$$

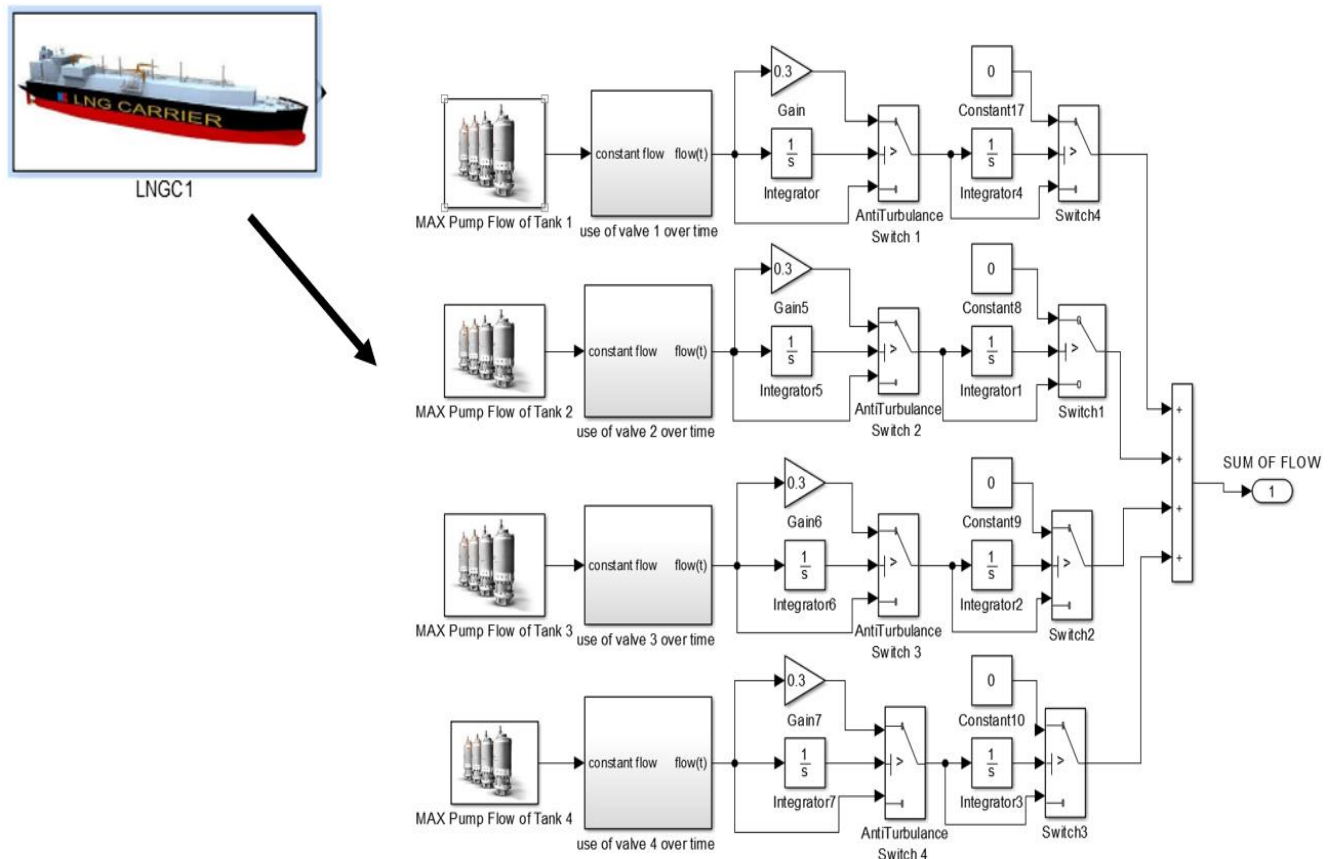
,οπού $V(T)$ είναι ο όγκος (m^3) του ρευστού που περνάει μια διατομή σε μια χρονική περίοδο $T=t_{end}-t_{start}$ (s), και $Q(t)$ είναι η παροχή του ρευστού (m^3/s). Στη συνέχεια η ροή - σήμα εισέρχεται στο υποσύστημα του FSRU στο οποίο επεξεργάζεται και παρουσιάζεται στο τελευταίο μπλοκ (1 month operation FSRU). Το συγκεκριμένο μπλοκ είναι ένα μπλοκ scope το οποίο εμφανίζει το διάγραμμα χρόνου – σήματος.

Στη συνέχεια παραθέτετε ένα διάγραμμα ροής το οποίο παρουσιάζει τι πρέπει να θέσει ο χρήστης σαν input στο μοντέλο του Simulink και τι αποτέλεσμα θα έχει. Η παραπάνω εικόνα βοηθάει τον αναγνώστη να γνωρίσει καλύτερα τα εισαγωγικά μεγέθη του μοντέλου.



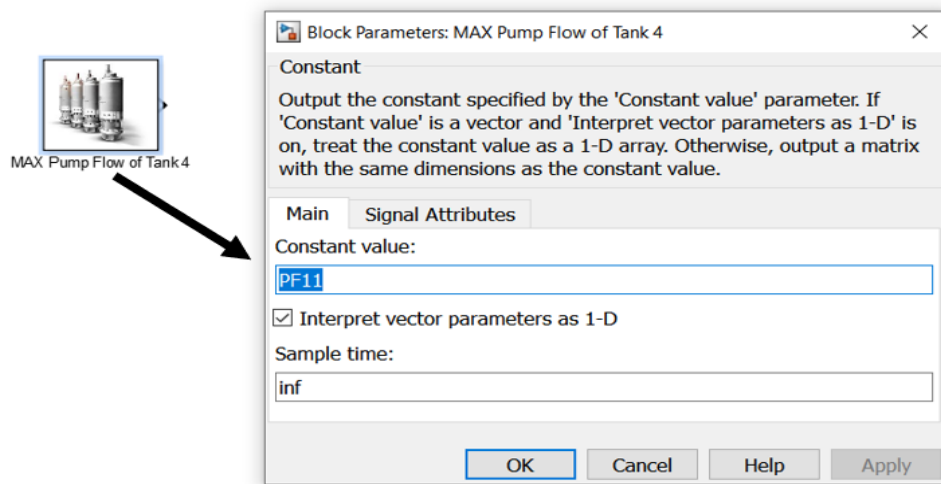
Εικόνα 39. Διάγραμμα ροής με τα input και output του μοντέλου

Για την καλύτερη κατανόηση της προσομοίωσης θα γίνει επεξήγηση κάθε υποσυστήματος ξεκινώντας με το υποσύστημα LNGC1. Τα υποσυστήματα LNGC 2, 3, 4 και 5 είναι ακριβώς ίδια με αυτό με μόνη διαφορά το χρονικό διάστημα που λειτουργεί το κάθε υποσύστημα το οποίο είναι επιλογή του χρήστη.



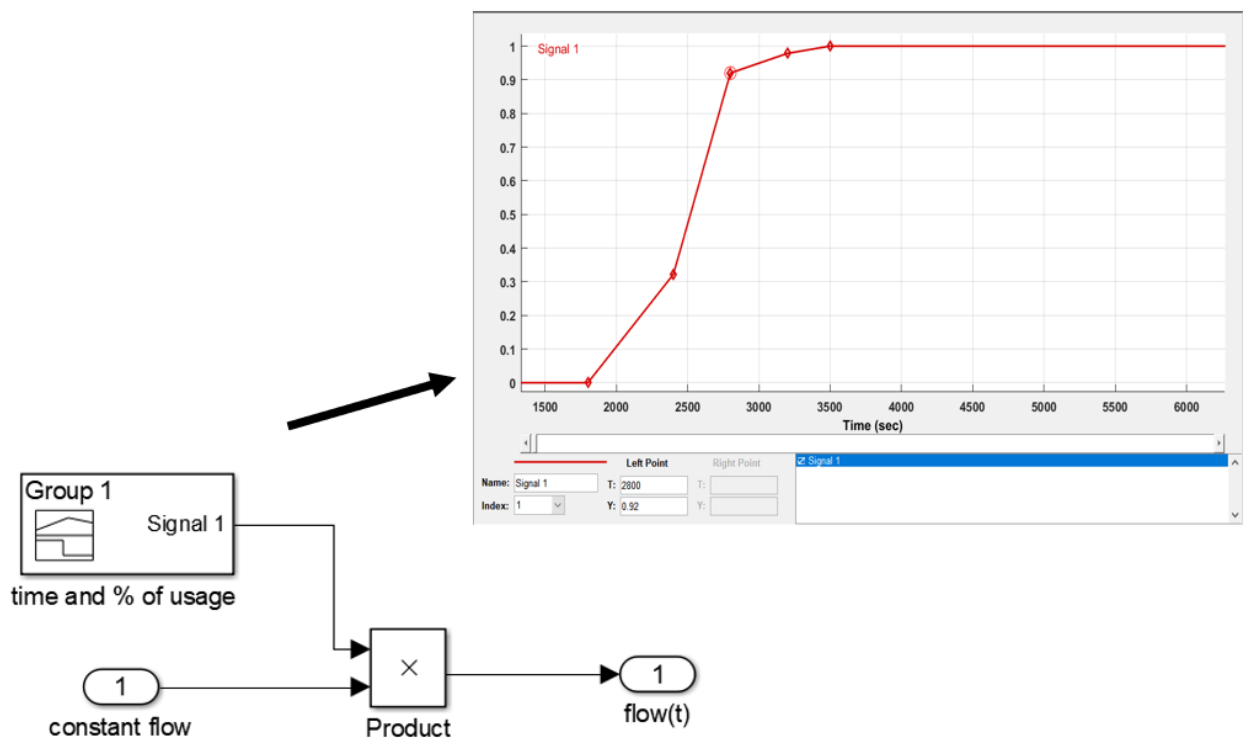
Εικόνα 40. Εσωτερικό του υποσυστήματος LNGC1

Σε κάθε υποσύστημα υπάρχουν τα μπλοκ “MAX rump flow of Tank i ” ($i=1, \dots, n$), τα οποία θέτουν ένα σήμα το οποίο παίρνει τη μέγιστη τιμή της παροχής της αντλίας εκφόρτωσης κάθε δεξαμενής. Επιλέγοντας το μπλοκ μπορεί να γίνει η εισαγωγή της παραμέτρου που θέλει ο χρήστης (“constant value”) η οποία όμως παραμένει σταθερή ως προς το χρόνο.



Εικόνα 41. Παράμετροι του μπλοκ (MAX Pump Flow of Tank 4)

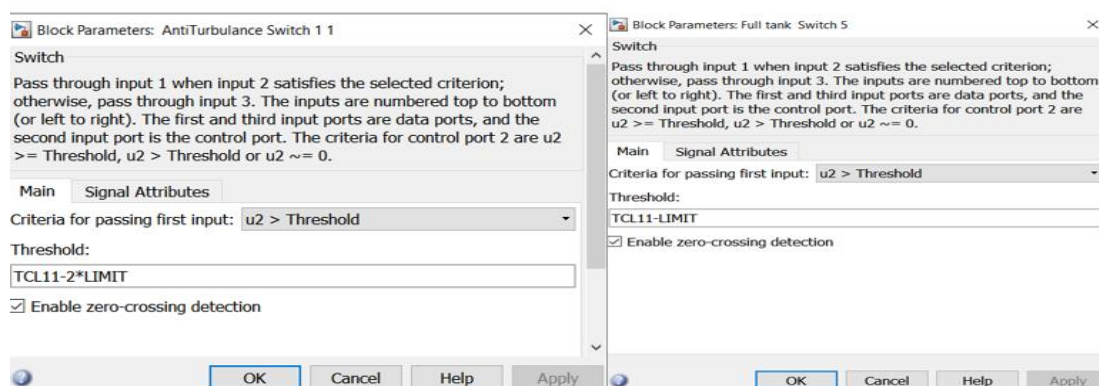
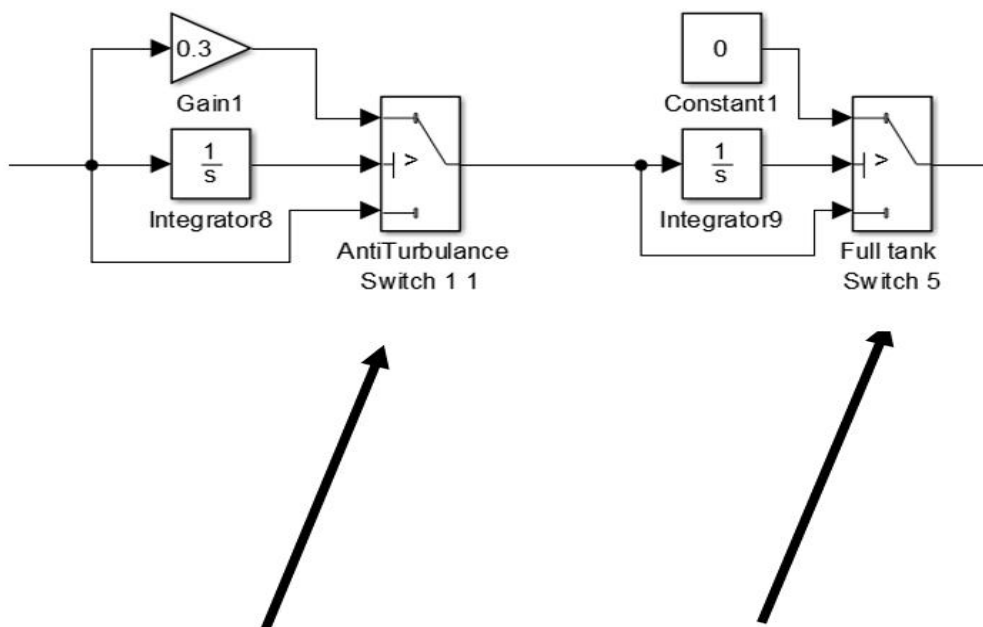
Το σήμα στη συνέχεια εισέρχεται στο μπλοκ-use of valve over time στο οποίο η ροή παίρνει τη μορφή συνάρτησης ως προς τον χρόνο. Αυτό συμβαίνει για την ρεαλιστική προσέγγιση της προσομοίωσης. Όπως έγινε γνωστό στο δεύτερο κεφάλαιο οι αντλίες σε μια εκφόρτωση δεν λειτουργούν στο 100% σε όλη τη διάρκεια γιατί μπορεί να προκύψουν διάφορες επιπλοκές και προσαρμογές που αφορούν τις πιέσεις και την διαγωγή του πλοίου. Η ολοκλήρωση της χρονικής αλληλουχίας πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό του σήματος της ροής με ένα νέο σήμα-χρονική αλληλουχία το οποίο δημιουργεί ο χρήστης με βάση το σενάριο που θέλει.



Εικόνα 3. Εσωτερικό του υποσυστήματος use of valve over time

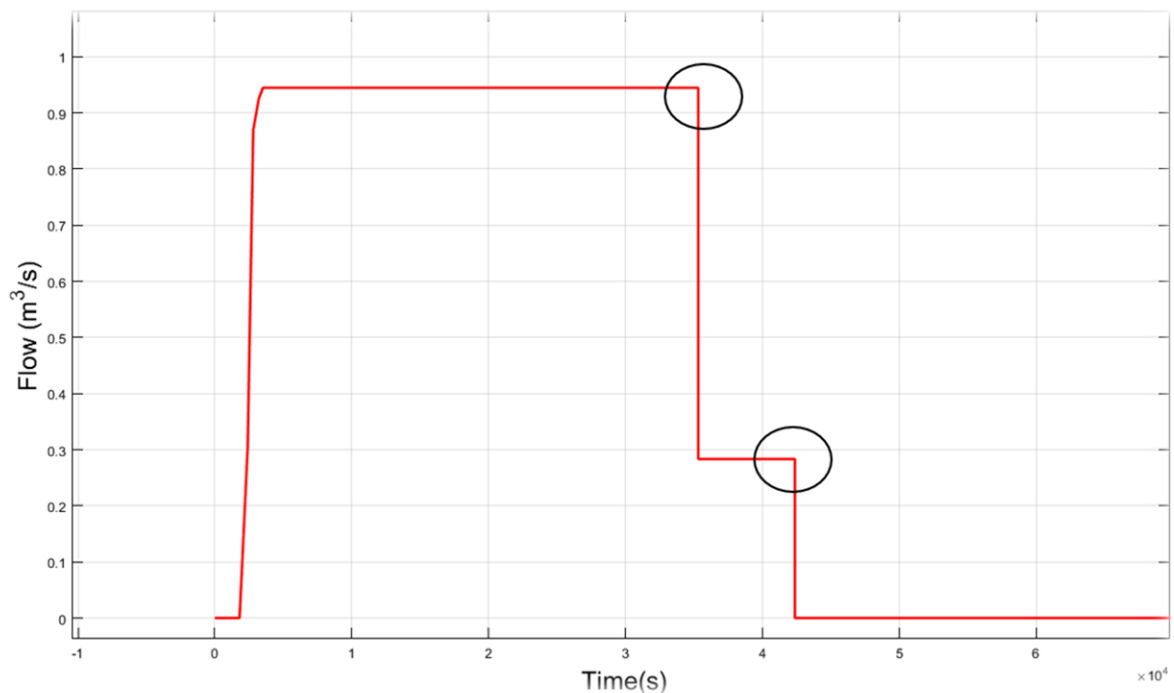
Η συγκεκριμένη διάταξη των μπλοκ χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στο Simulink ώστε η προσομοίωση να γίνει συνάρτηση του χρόνου. Το μπλοκ: time and % of usage είναι μια συνάρτηση-σήμα $f(t)$ το οποίο παίρνει ότι μορφή θέλει ο χρήστης εισάγοντας σημεία δύο μεταβλητών (χρόνος, %). Όπως φαίνεται στην εικόνα 42 ορίζεται η συνάρτηση-σήμα ώστε να προσομοιαστεί η εκκίνηση της αντλίας στη δεξαμενή 1 του LNGC1. Ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει τη συνάρτηση που θέλει για κάθε αντλία ώστε να έχει το θεμιτό αποτέλεσμα.

Εφόσον έχει οριστεί η πραγματική ροή της αντλίας σε συνάρτηση ως προς το χρόνο στη συνέχεια το σήμα θα χρειαστεί να περάσει από δυο μπλοκ: switch. Τα μπλοκ switch χρησιμοποιούνται για την αλλαγή του σήματος όταν ένα σήμα ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή ή ένα άλλο σήμα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τα δυο switch χρησιμοποιούνται για να μειωθεί η ροή της αντλίας όταν η δεξαμενή του LNGC φτάσει ένα συγκεκριμένο όριο, οπότε διακόπτεται η ροή τελείως.



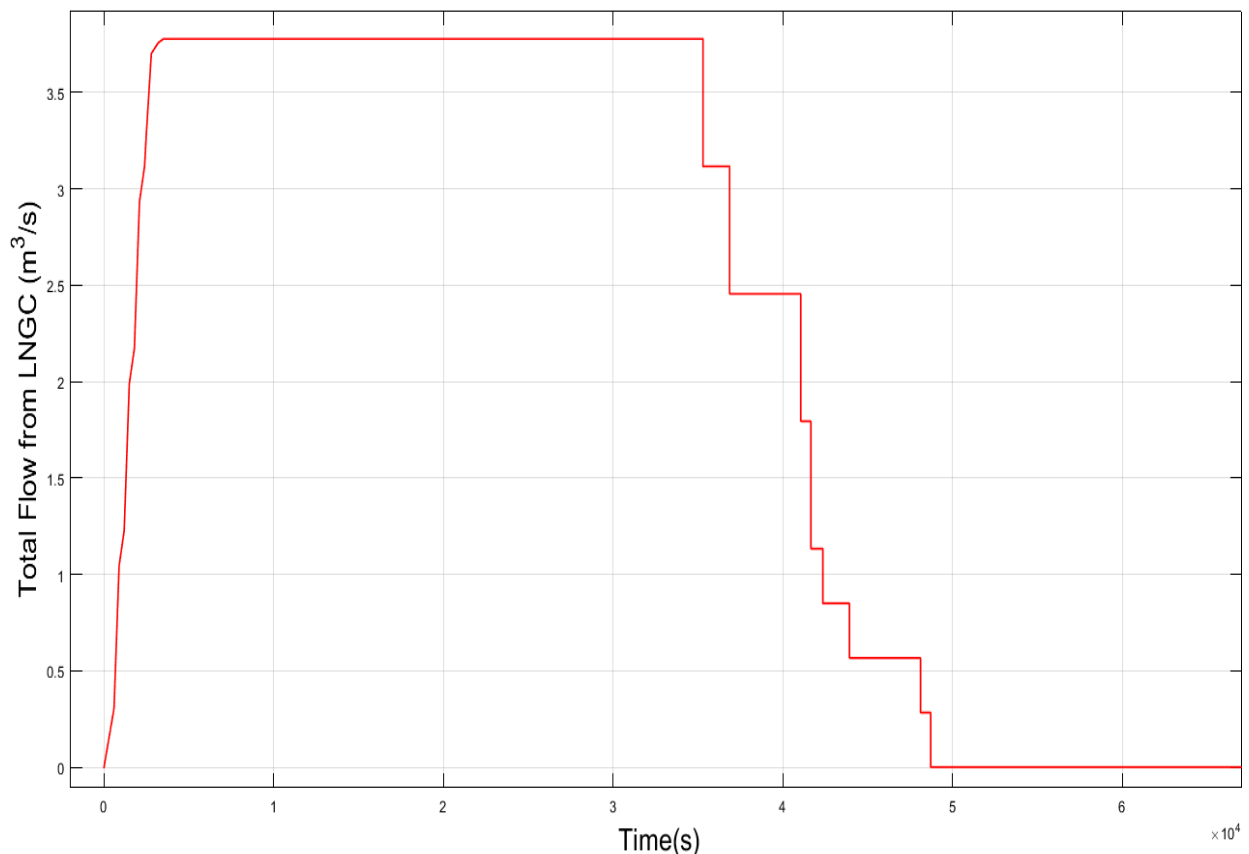
Εικόνα 43. Παράμετροι των Switch μπλοκ στο υποσύστημα LNGC1

Το μπλοκ του switch έχει τρία input, μια παράμετρο (threshold), και ένα output. Τα δυο input είναι τα σήματα από τα οποία το μπλοκ θα 'αποφασίσει' ποιο από τα δυο θα είναι το output, ενώ το τρίτο input είναι η τιμή που συγκρίνει το μπλοκ με την παράμετρο (threshold) για να πραγματοποιηθεί η 'απόφαση'. Στην εικόνα 43 παρουσιάζονται τα δυο switch της δεξαμενής 1 του LNGC1. Και για τα δυο switch το input σύγκρισης είναι η ολοκλήρωση της ροής του LNG, δηλαδή ο συνολικός όγκος που έχει περάσει. Η παράμετρος (threshold) επιλέγεται από το χρήστη και είναι χαρακτηριστικό του κάθε πλοίου (FSRU/LNGC). Στο διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η μορφή της ροής LNG χρησιμοποιώντας όλα τα μπλοκ που προαναφέρθηκαν. Με το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι αρκετά εύκολο να κατανοηθεί η λειτουργία των switch στα κυκλωμένα σημεία.



Διάγραμμα 6. Μορφή της ροής LNG μιας δεξαμενής του LNGC προς FSRU

Τέλος, προστίθενται τα σήματα από τις τέσσερις δεξαμενές, ώστε να δημιουργηθεί η συνολική ροή ως προς το FSRU για την πλήρη προσομοίωση της εκφόρτωσης κάθε LNGC που ελλιμενίζεται σε αυτό. Η μορφή αυτή παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Η μορφή της συνολικής ροής είναι λογικό να έχει την συγκεκριμένη διάταξη εφόσον είναι το άθροισμα τεσσάρων ροών από δεξαμενές με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Εφόσον έχει δημιουργηθεί η ροή του LNG προς το FSRU ακολουθεί η επεξήγηση του υποσυστήματος FSRU.

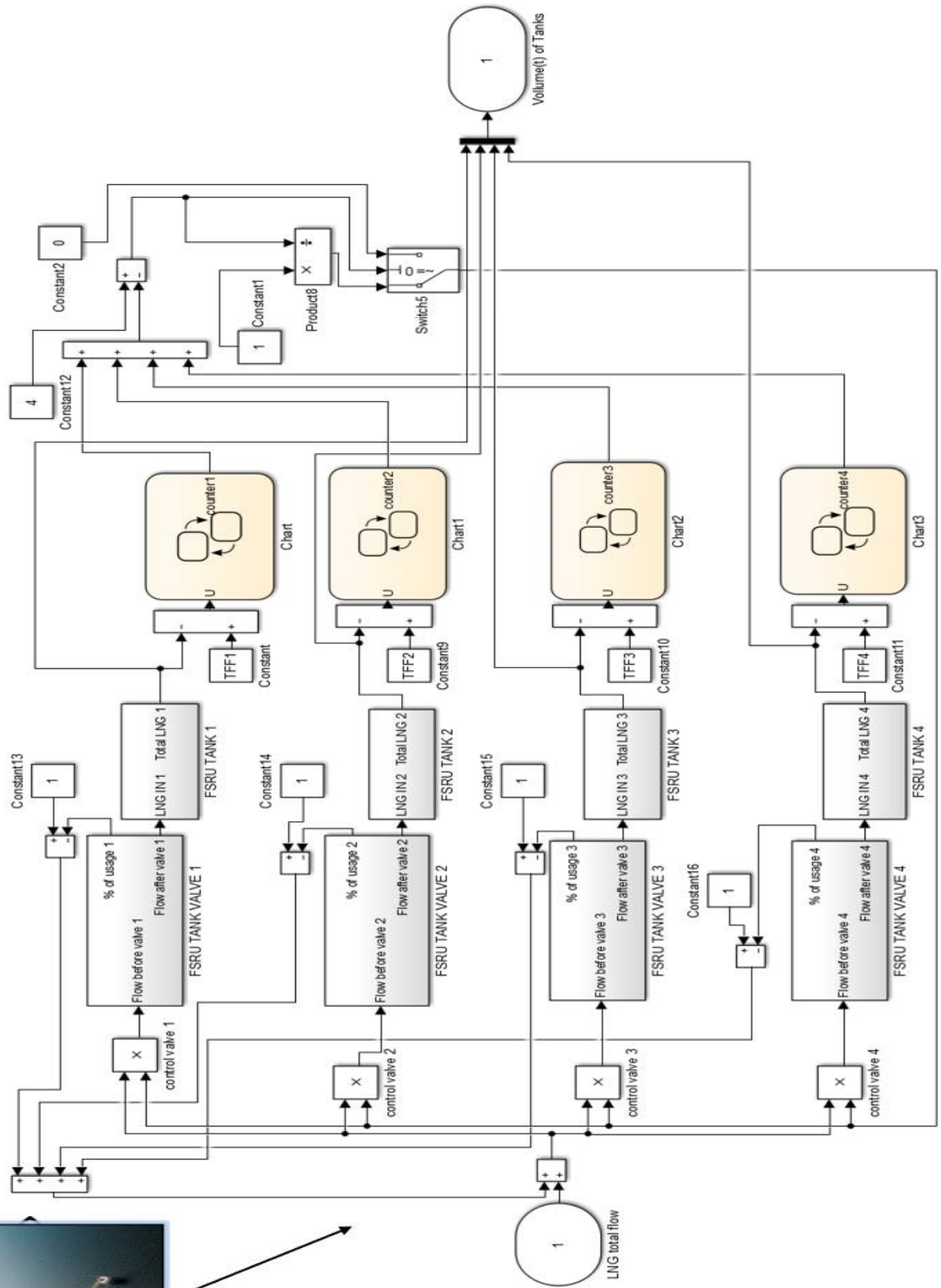


Διάγραμμα 7. Μορφή της συνολικής ροής LNG του LNGC προς FSRU

Σκοπός αυτού του υποσυστήματος FSRU είναι η προσομοίωση πλήρωσης των δεξαμενών του FSRU ως προς τον χρόνο και η εκκένωσή τους λόγω της αεριοποίησης του LNG. Όπως και για τα μπλοκ των LNGC έτσι και σε αυτό το μπλοκ υπάρχει επαναληψιμότητα όσον αφορά τις τέσσερις δεξαμενές του FSRU. Συγκεκριμένα για την προσομοίωση υπάρχουν στο FSRU τέσσερις δεξαμενές και κάθε μια από αυτές έχει τη δικιά της σειρά από μπλοκ όπως φαίνεται στην εικόνα 44 . Η βασική αρχή στην οποία βασίζεται η διάταξη των μπλοκ είναι ότι η μάζα Δm_1 που περνάει από μία διατομή A_1 του σωλήνα σε χρόνο Δt να είναι ίση με τη μάζα Δm_2 που περνάει στο ίδιο χρονικό διάστημα από μία άλλη διατομή του σωλήνα A_2 . Είναι δηλαδή το ισοζύγιο μάζας.



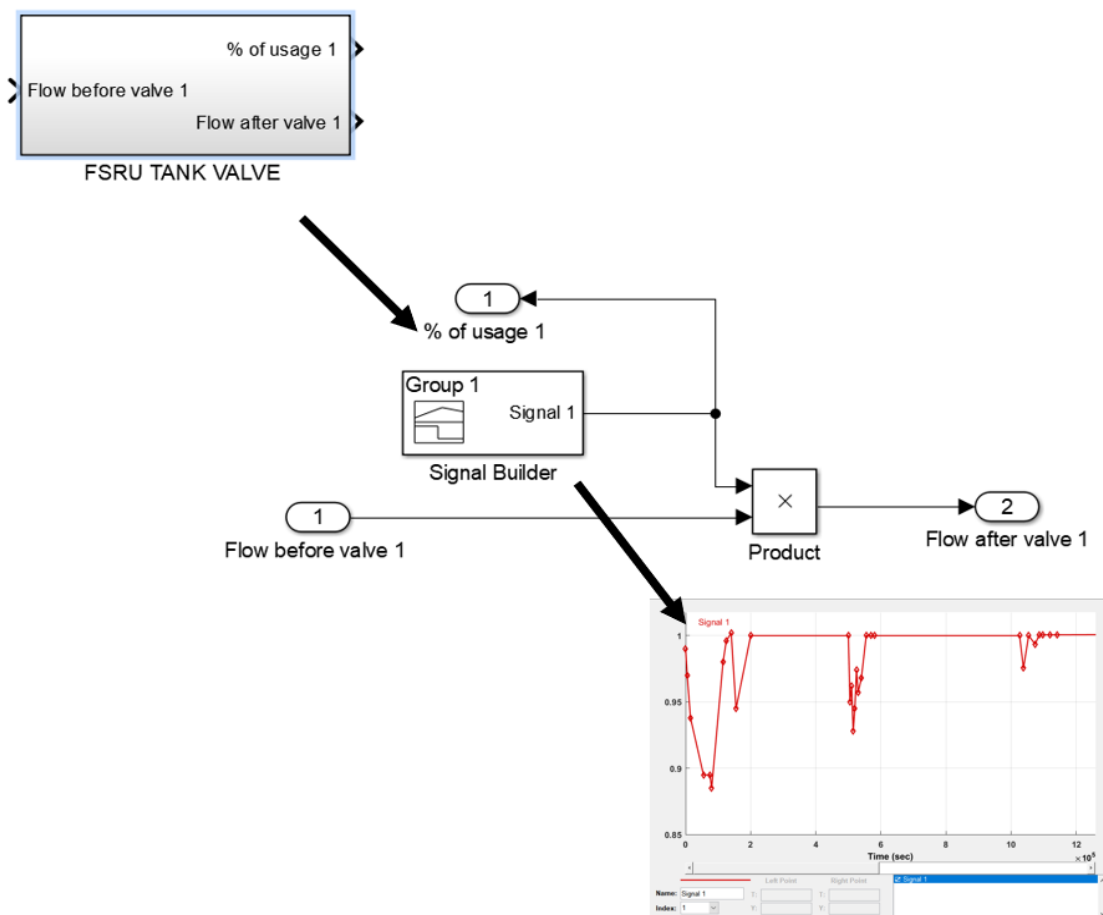
FSRU1



Εικόνα 44. Εσωτερικό του υποσυστήματος FSRU

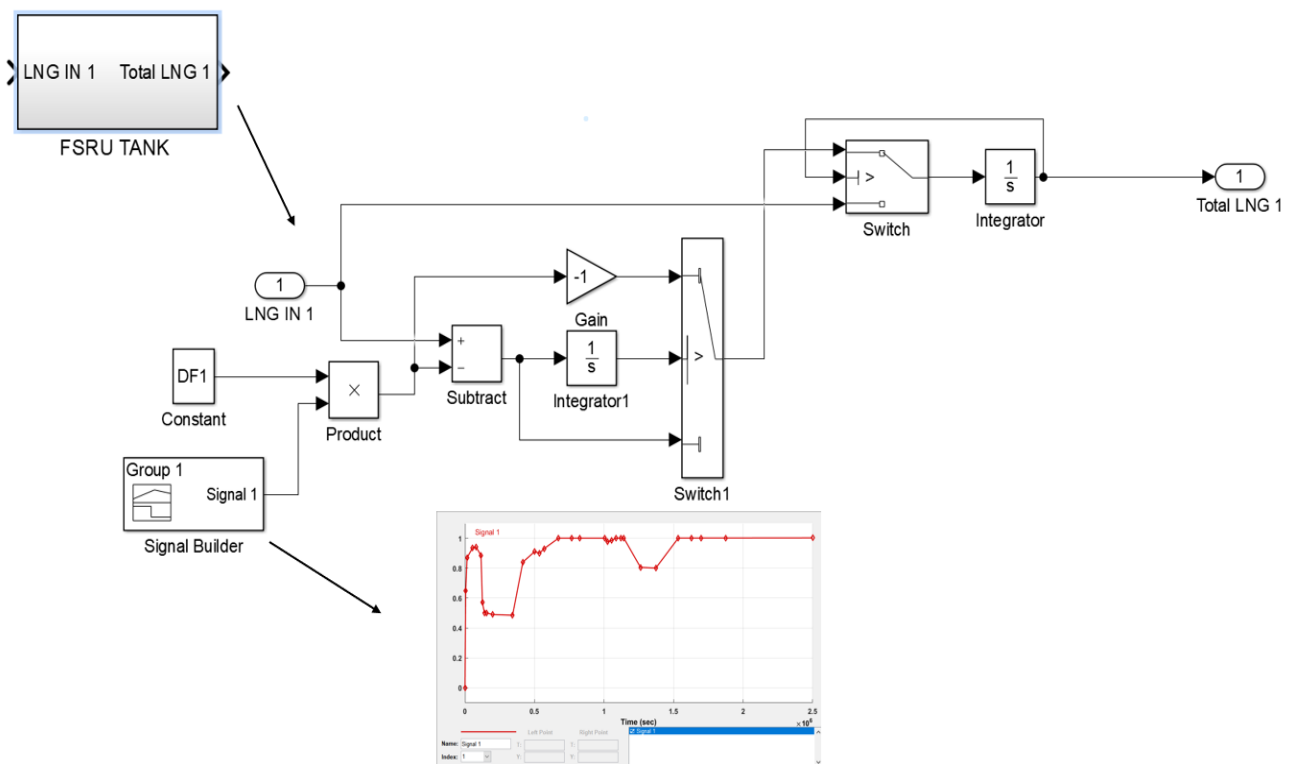
Αρχικά εισέρχεται στο υποσύστημα η συνολική ροή του LNG όπως επεξηγήθηκε προηγουμένως. Στόχος είναι η επεξεργασία του σήματος αυτού σε σχέση με τις δεξαμενές που είναι εφικτό να γεμίσουν, δηλαδή σε περίπτωση που μια δεξαμενή του FSRU έχει γεμίσει πρέπει η ροή να μετατοπιστεί προς τις υπόλοιπες δεξαμενές ικανοποιώντας το ισοζύγιο μάζας. Αυτό επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας το σήμα με μια μεταβλητή ελέγχου η οποία θα εξηγηθεί στην συνέχεια. Εφόσον γνωρίζουμε την ροή προς κάθε δεξαμενή, το σήμα της ροής εισέρχεται στο υποσύστημα FSRU tank valve στο οποίο ο χρήστης καθορίζοντας τη συνάρτηση που θα ακολουθήσει η βαλβίδα προσομοιάζει τη ροή του LNG που εισέρχεται στη δεξαμενή. Αυτό συμβαίνει με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως έγινε και στα μπλοκ των LNGC με την μόνη διάφορα ότι το χρονικό διάστημα λειτουργίας είναι ολόκληρος ο χρόνος προσομοίωσης.

Σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας η συνολική συσσώρευση μάζας σε ένα συστήματος πρέπει να είναι μηδενική, συνεπώς για να ικανοποιείται η αρχή στο σύστημα προστέθηκε μια ανατροφοδότηση η οποία θα επανεισάγει στο σύστημα την 'περίσσεια' του LNG που προκύπτει από το μπλοκ της βαλβίδας. Η διάταξη που πραγματοποιεί την παραπάνω διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 44 πάνω αριστερά



Εικόνα 45. Εσωτερικό του υποσυστήματος FSRU TANK VALVE

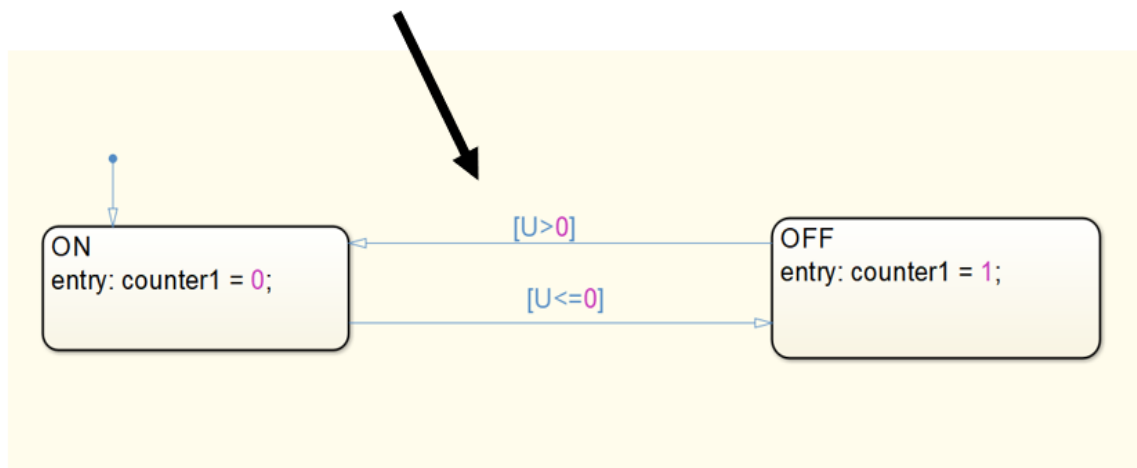
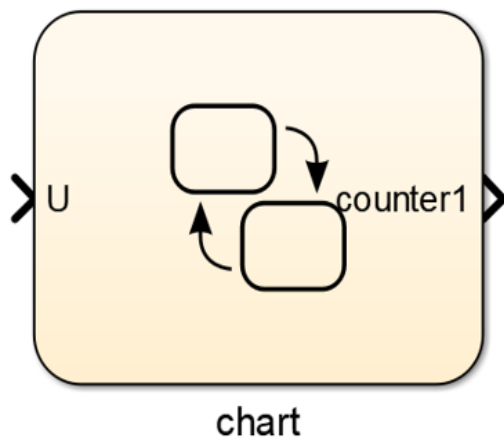
Το σήμα στη συνέχεια εισέρχεται στο υποσύστημα FSRU Tank το οποίο προσομοιάζει το τι συμβαίνει σε μια δεξαμενή FSRU. Η βασική αρχή είναι η ολοκλήρωση της ροής του LNG που εισέρχεται στη δεξαμενή, λαμβάνοντας υπό όψη και τη ροή του LNG προς αεριοποίηση (έξοδος του συστήματος). Στο σύστημα εισάγονται τα χαρακτηριστικά της αντλίας αεριοποίησης και η χρονική αλληλουχία λειτουργίας της τα οποία δημιουργούν τη ροή του LNG προς αεριοποίηση. Συγκρίνοντας με την χρήση switch τον συνολικό όγκο στην δεξαμενή με το όριο ελάχιστης πλήρωσης της δεξαμενής, το σύστημα αποφασίζει ποια θα πρέπει να είναι η τελική ροή που εισέρχεται στη δεξαμενή. Τέλος, η τελική ροή ολοκληρώνεται στο χρόνο με αποτέλεσμα το σήμα-ροή να μετατραπεί σε σήμα-όγκου. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στη δεξαμενή του FSRU η ροή του LNG μπορεί να είναι αρνητική δηλαδή να υπάρχει μόνο ροή εξαγωγής LNG προς αεριοποίηση.



Εικόνα 46. Εσωτερικό του υποσυστήματος FSRU TANK

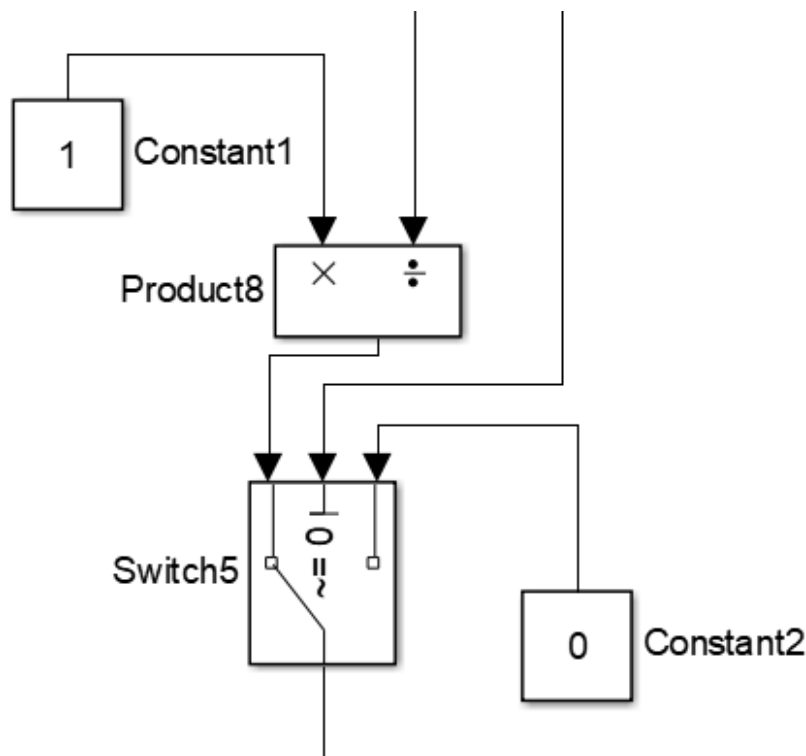
Ομοίως με το μπλοκ του LNGC το σήμα του όγκου πρέπει να ελέγχεται να μην ξεπεράσει την χωρητικότητα της δεξαμενής. Συνεπώς το σήμα της ροής 'περνάει' από ένα switch συγκρίνοντας την τιμή του όγκου με την ελάχιστη ποσότητα που μπορεί να είναι γεμάτη η δεξαμενή. Η ελάχιστη ποσότητα που πρέπει να είναι γεμάτη η δεξαμενή του FSRU είναι επιλογή του χρήστη και είναι χαρακτηριστικό του FSRU.

Η τελευταία φάση του FSRU μπλοκ είναι ο 'έλεγχος' της ροής στη περίπτωση που μια ή παραπάνω δεξαμενές γεμίσουν. Η συνολική ροή LNG προς το FSRU εξαρτάται μόνο από το LNGC. Το υποσύστημα του FSRU μπορεί να επέμβει μόνο στη κατανομή του στις δεξαμενές. Το μπλοκ του FSRU έχει 4 charts (1 ανά δεξαμενή) τα οποία ελέγχουν μια μεταβλητή. Η μεταβλητή αυτή ελέγχου η οποία πολλαπλασιάζεται με τη συνολική ροή του LNG, προσομοιάζει το φαινόμενο της γεμάτης δεξαμενής. Ένα chart αποτελεί ένα μπλοκ στο Simulink το οποίο ταυτόχρονα με την προσομοίωση ελέγχει αν ικανοποιείται μια σχέση που έχει θέσει ο χρήστης. Συνεπώς, το chart επιτρέπει στο Simulink σε πραγματικό χρόνο προσομοίωσης να αλλάζει η τιμή μιας μεταβλητή. Η συγκεκριμένη λειτουργία καθιστά το Simulink πολύ δυνατό και ευέλικτο εργαλείο εφόσον το ίδιο το πρόγραμμα μπορεί να επεμβαίνει στην προσομοίωση. Μέσα στο μπλοκ του chart ο χρήστης επιλέγει την σχέση που πρέπει να ικανοποιείται σε προγραμματιστική γραφή. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση χρειαζόμαστε μια μεταβλητή η οποία θα παίρνει τιμές από το 1 ή 0 υποδηλώνοντας αν η δεξαμενή είναι γεμάτη ή όχι.



Εικόνα 47. Εσωτερικό του chart

Στην εικόνα 47 φαίνονται οι σχέσεις στο εσωτερικό του chart στις οποίες όταν η δεξαμενή του FSRU είναι γεμάτη η μεταβλητή παίρνει την τιμή 0. Αυτό σημαίνει για κάθε δεξαμενή και στο τέλος οι τέσσερις μεταβλητές προστίθενται. Στη συνέχεια στο Simulink το συγκεκριμένο σήμα-μεταβλητή εφόσον έχει πάρει την τιμή [αναλόγως, πχ. 0.25 ή 0.33 ή 0.5 ή 0] 'περνάει' από μια διάταξη μπλοκ η οποία 'ελέγχει' η μεταβλητή όταν είναι 0 να γίνει 1. Ο μη μηδενισμός πραγματοποιείται με ένα switch όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 48. Διάταξη των μπλοκ της μεταβλητής ελέγχου

Η ολοκλήρωση του ελέγχου της πλήρωσης κάθε δεξαμενής πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό /διαίρεση της μεταβλητής ελέγχου με την συνολική ροή του LNG. Συγκεκριμένα όταν όλες οι δεξαμενές είναι άδειες η συνολική ροή πολλαπλασιάζεται με 0.25 (25% της ροής σε κάθε δεξαμενή) ενώ άμα μια δεξαμενή γεμίσει η ροή πολλαπλασιάζεται με 0.33 και ούτω καθεξής.

Συμπερασματικά η συγκεκριμένη προσομοίωση απαιτεί από τον χρήστη να γνωρίζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε LNGC/FSRU αλλά και την συμπεριφορά κάθε στοιχείου με βάση το σενάριο που προσομοιάζεται. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει πως κατανέμεται ο όγκος κάθε δεξαμενής του FSRU ως προς το χρόνο. Το συγκεκριμένο μοντέλο Simulink μπορεί να βοηθήσει σε αρχικό στάδιο τον προγραμματισμό των φορτοεκφορτώσεων ενός FSRU, ενώ ακόμα με την ικανότητα δημιουργίας σεναρίων ο χρήστης μπορεί να έχει πλήρη εικόνα της ευαισθησίας (sensitivity) του συστήματος. Η προσομοίωση των δεξαμενών και των βαλβίδων όπως αναφέρθηκε πραγματοποιείται με προγραμματιστικά 'τρικ' για τα οποία χρειάζεται καλή γνώση πάνω στο πρόγραμμα του Simulink και πλήρους κατανόηση τους. Στη συνέχεια της εργασίας θα παρουσιαστούν μερικά σενάρια με ρεαλιστικά δεδομένα, ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει πλήρη εικόνα της λειτουργίας φορτοεκφόρτωσης του FSRU, μέσα από τη λειτουργία του προτεινόμενου μοντέλου.

5.Μελέτη περίπτωσης

Μετά την ολοκλήρωση του Simulink, το τελευταίο μέρος της εργασίας είναι η μελέτη περίπτωσης. Συγκεκριμένα στη παρούσα εργασία θα μελετηθούν τρεις περιπτώσεις

- Μία φόρτωση από ένα LNGC στο FSRU σε περίοδο ενός μήνα.
- Τρεις εκφορτώσεις LNG στο FSRU από πανομοιότυπα LNGCs σε περίοδο ενός μήνα.
- Τρεις εκφορτώσεις LNG στο FSRU από διαφορετικής μεταφορικής ικανότητας LNGC σε περίοδο ενός μήνα.

Για να γίνει αντιληπτό στον αναγνώστη πόσο επηρεάζει η ζήτηση προς αεριοποίηση το σύστημα, για κάθε μία από τις πρώτες δυο περιπτώσεις θα εξετασθούν δυο υποπεριπτώσεις. Σε αυτές θα διαφοροποιείται η παράμετρος της ζήτησης LNG προς αεριοποίηση.

Για τα παραπάνω σενάρια ο χρήστης πρέπει να ξέρει την χωρητικότητα κάθε δεξαμενής που αφορά την εκφόρτωση, τα χαρακτηριστικά των αντλιών, αλλά και να έχει αποφασίσει το προφίλ της ρύθμισης παροχής της κάθε βαλβίδας.

Κάθε περίπτωση θα βοηθήσει τον αναγνώστη να κατανοήσει τη λειτουργία ενός FSRU. Σε κάθε περίπτωση γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Κάθε LNGC θα είναι πλήρως γεμάτο πριν την εκφόρτωση
- Το FSRU την στιγμή που ξεκινά η προσομοίωση θεωρείται ότι είναι άδειο.
- Κάθε πλοίο LNGC και το FSRU θα αποτελείται από τέσσερις δεξαμενές και το σύστημα σωληνώσεων θα ακολουθεί τη διάταξη που επεξηγήθηκε στο 2^ο κεφάλαιο.

5.1 Πρώτη περίπτωση: Μια μόνο φόρτωση LNG στο FSRU

Στη συγκεκριμένη περίπτωση πραγματοποιείται μόνο μια φόρτωση LNG στο FSRU η οποία ξεκινάει χρονικά όταν αρχίζει και η προσομοίωση. Τα χαρακτηριστικά του LNGC και του FSRU που προσομοιώνονται παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά του FSRU και του LNGC για την πρώτη περίπτωση

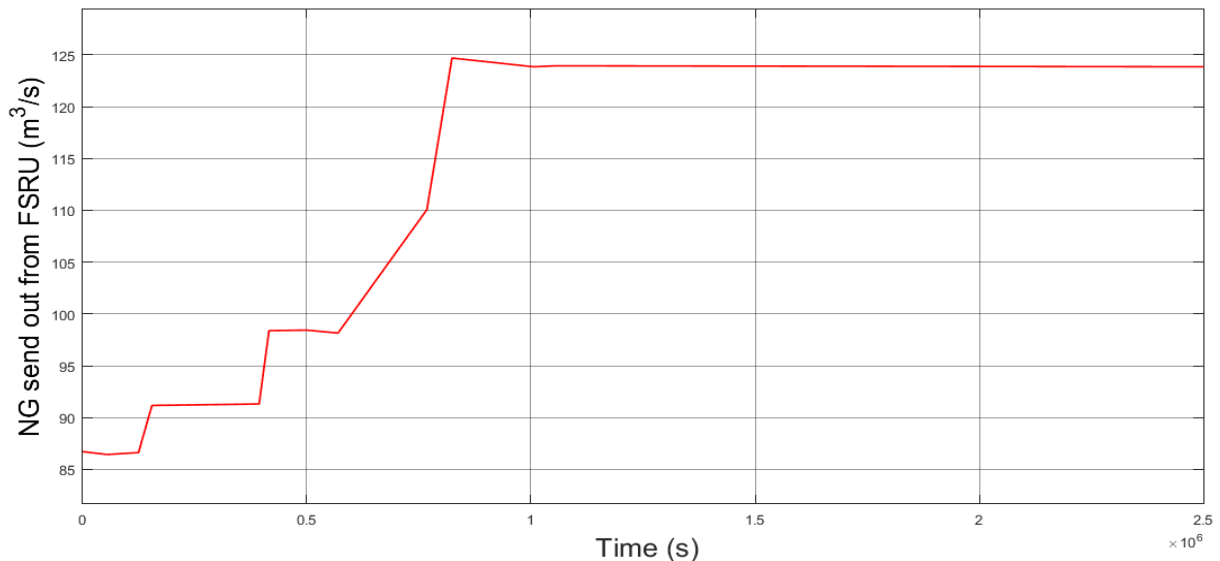
Χαρακτηριστικά	FSRU	LNGC 1
Tank 1 capacity (m ³)	35,000	35,000
Tank 2 capacity (m ³)	42,182	42,182
Tank 3 capacity (m ³)	42,182	42,182
Tank 4 capacity (m ³)	37,096	37,096
Pump 1 flow rate (m ³ /s)	0.083	0.94
Pump 2 flow rate (m ³ /s)	0.083	0.94
Pump 3 flow rate (m ³ /s)	0.083	0.94
Pump 4 flow rate (m ³ /s)	0.083	0.94
Tank lower limit (m ³)	2,000	2,000

Από τα παραπάνω στοιχεία παρατηρείται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση οι δεξαμενές του FSRU και του LNGC έχουν ίδια χωρητικότητα . Όπως έχει προγραμματιστεί η διαδικασία

στο Simulink η λειτουργία των αντλιών για την εξαγωγή του LNG προς το σύστημα αεριοποίησης ξεκινάει όταν η πλήρωση κάθε δεξαμενής του FSRU φτάσει στο όριο που επιτρέπεται (tank lower limit). Η αρχικοποίηση των συγκεκριμένων μεγεθών/παραμέτρων πραγματοποιείται σε ένα πρόγραμμα στο Matlab (βλ. Παράρτημα).

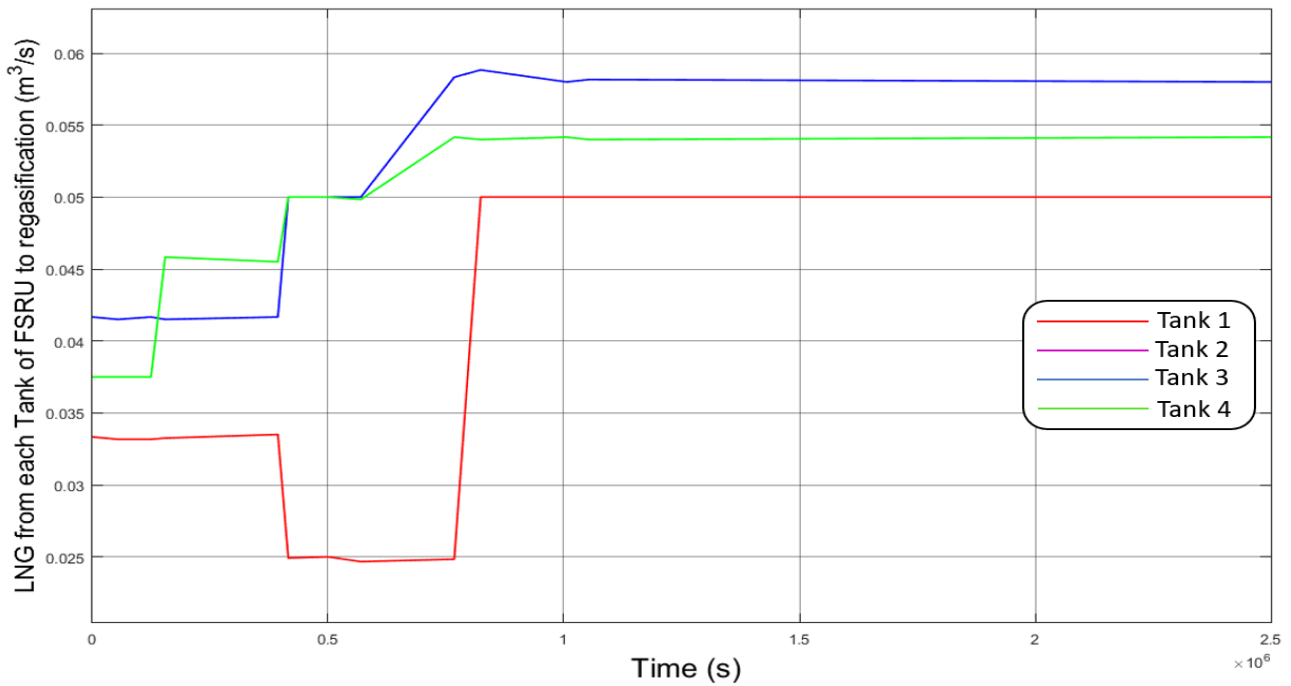
Για να προσομοιωθεί πλήρως η πρώτη περίπτωση πρέπει ο χρήστης να ορίσει τις συναρτήσεις λειτουργίας κάθε αντλίας και βαλβίδας. Αυτό πραγματοποιείται με την εισαγωγή σημείων στα συγκεκριμένα μπλοκ του Simulink όπως εξηγήθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο.

Στη συνέχεια εισάγεται η παροχή του φυσικού αερίου που πρέπει να δίνεται στο δίκτυο της ξηράς με το οποίο συνδέεται το FSRU.



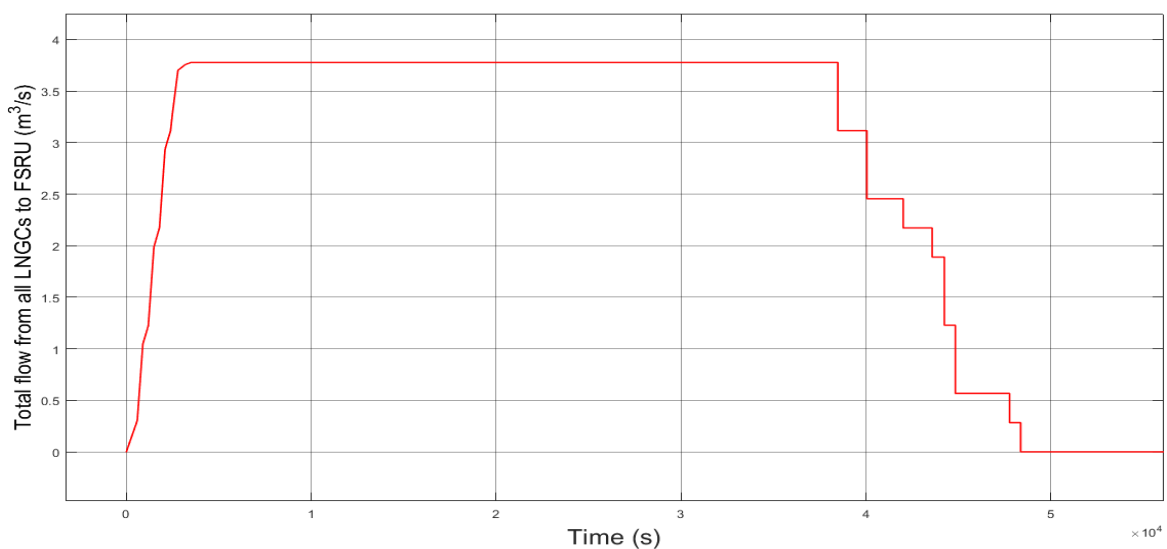
Διάγραμμα 8. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.1

Από το παραπάνω διάγραμμα, ο χρήστης του εργαλείου προσομοίωσης μπορεί να ορίσει τον ρυθμό αεριοποίησης από το FSRU, ενώ, στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται το προφίλ εκφόρτωσης κάθε δεξαμενής του FSRU.



Διάγραμμα 9. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 1.1

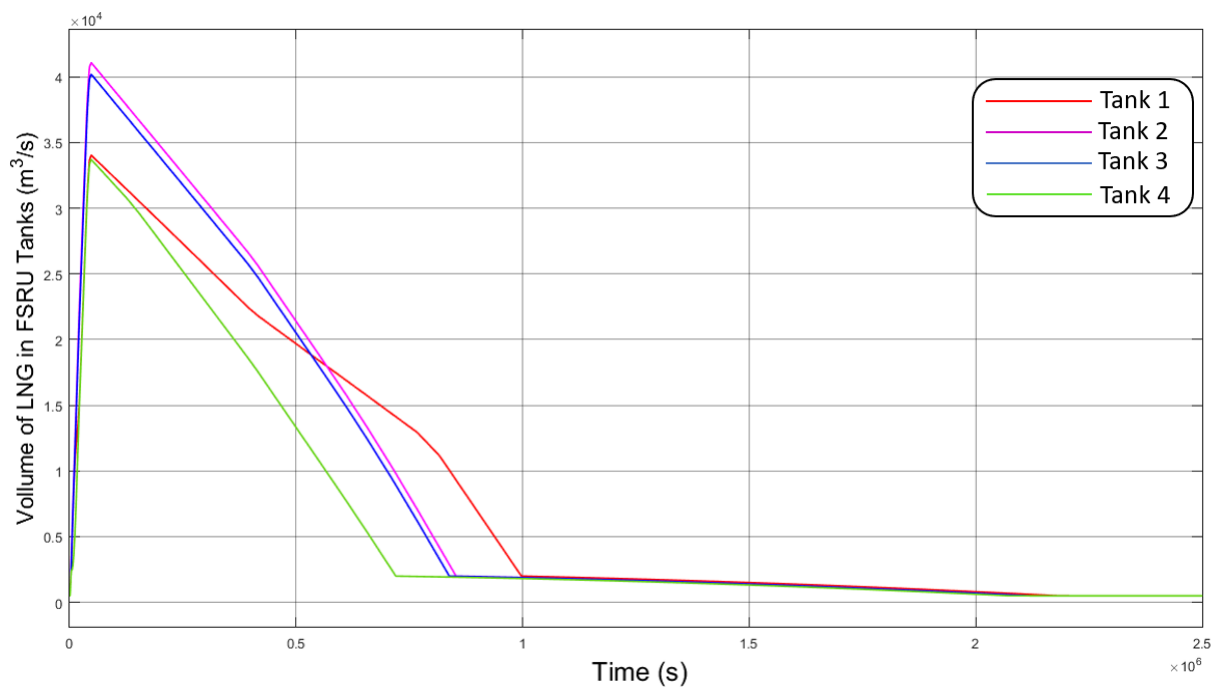
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα 10 της συνολικής ροής (αθροιστικά και από τις τέσσερις δεξαμενές) που κατευθύνεται από το LNGC στο FSRU. Η μορφή της ροής στο διάγραμμα είναι αύξουσα στην αρχή, με διαφορετικές κλίσεις λόγω της σταδιακής εισαγωγής του LNG με τον τρόπο που επιτρέπει την ομαλή επίτευξη της επιθυμητής χαμηλής θερμοκρασίας. Στη συνέχεια η ροή είναι σταθερή ως προς τον χρόνο. Τέλος η ροή μειώνεται κλιμακωτά λόγω της απότομης εφαρμογής των Switch στο Simulink, δηλαδή για κάθε δεξαμενή πρέπει, ή να μειωθεί ξαφνικά η ροή της, ή να θεωρηθεί ότι η δεξαμενή άδειασε.



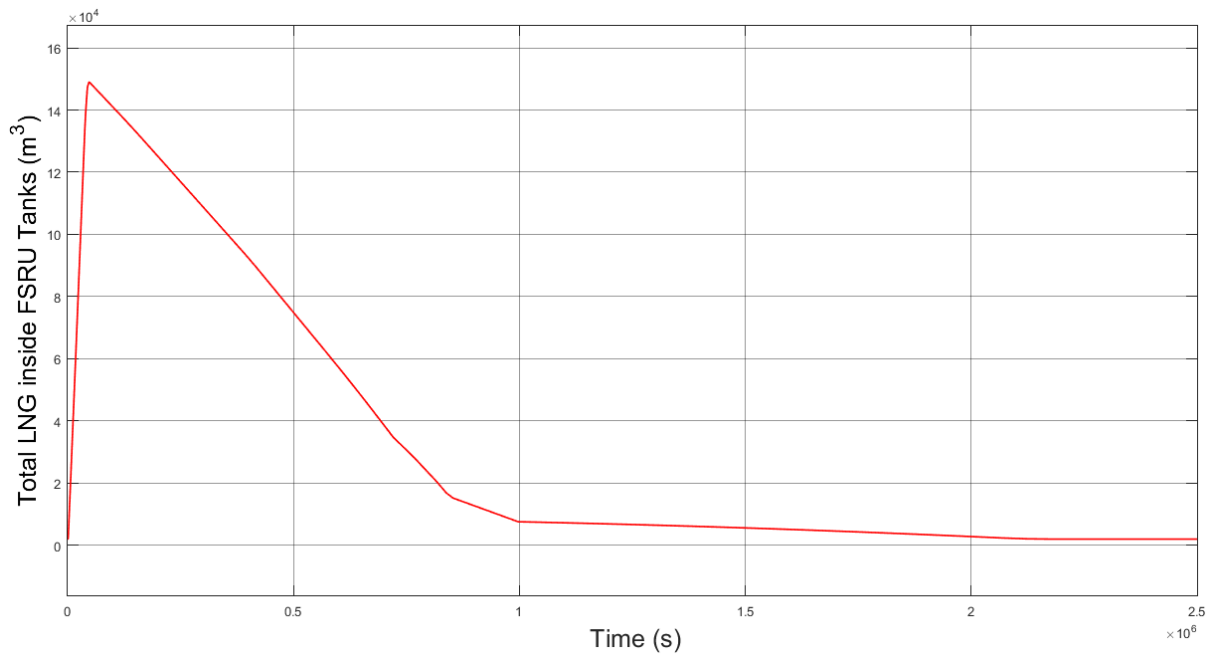
Διάγραμμα 10. Συνολική ροή LNG από τα LNGC (μόνο ένα) προς το FSRU ως προς τον χρόνο για την περίπτωση 1

Τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τους όγκους του LNG που υπάρχει σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο και του συνολικού όγκου LNG που βρίσκεται μέσα στο FSRU. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι το κυρίως ζητούμενο της μοντελοποίησης με βάση το οποίο ο αναγνώστης μπορεί να έχει μια πλήρη εικόνα του όγκου του LNG εντός των δεξαμενών του FSRU κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα (1 μήνας).

Στο διάγραμμα 11 με τους όγκους του LNG σε κάθε δεξαμενή του FSRU φαίνονται τέσσερις φάσεις λειτουργίας της μονάδας. Αρχικά σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα το FSRU γεμίζει με LNG χωρίς να έχει ξεκινήσει η αεριοποίηση. Όταν ξεπεραστεί το όριο της δεξαμενής μετά το οποίο η αεριοποίηση μπορεί να λάβει χώρα τότε βρισκόμαστε στη δεύτερη φάση και η καμπύλες στο διάγραμμα αλλάζουν ελαφρώς κλίση. Η τρίτη φάση ξεκινάει με το που τελειώσει η εκφόρτωση του LNG από το LNGC1 και τότε το FSRU βρίσκεται στην κατάσταση μόνο αεριοποίησης, η συγκεκριμένη φάση τελειώνει όταν η στάθμη κάθε δεξαμενής του FSRU φτάσει στο όριο αποφυγής δίνης από την αντλία αναρρόφησης.



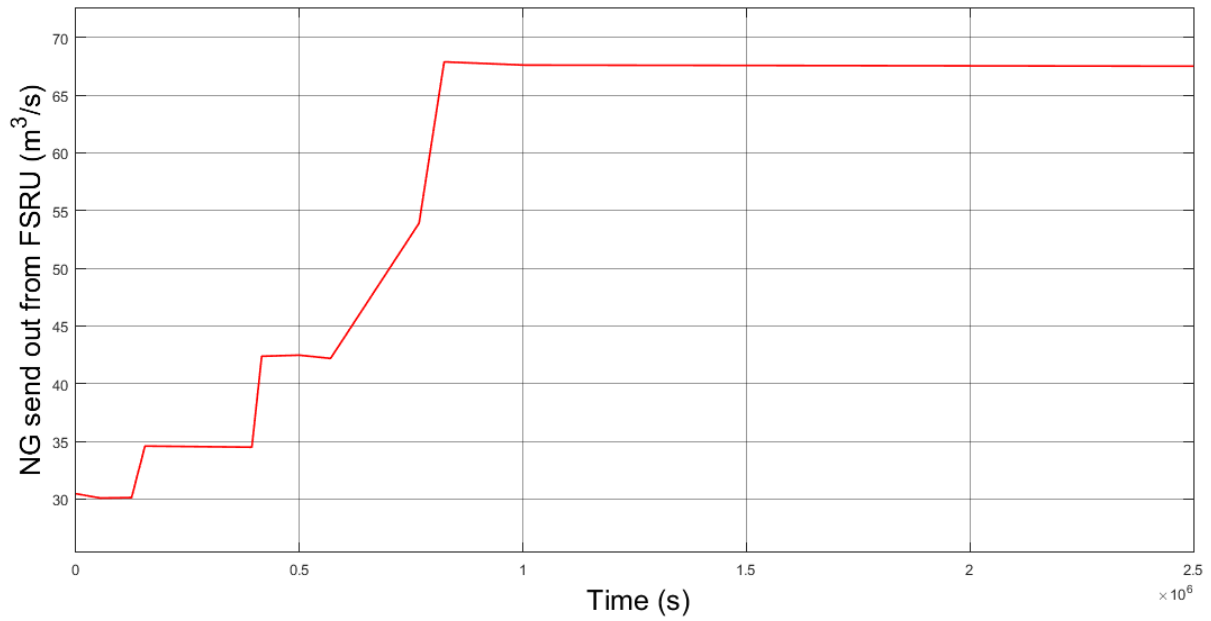
Διάγραμμα 11. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.1



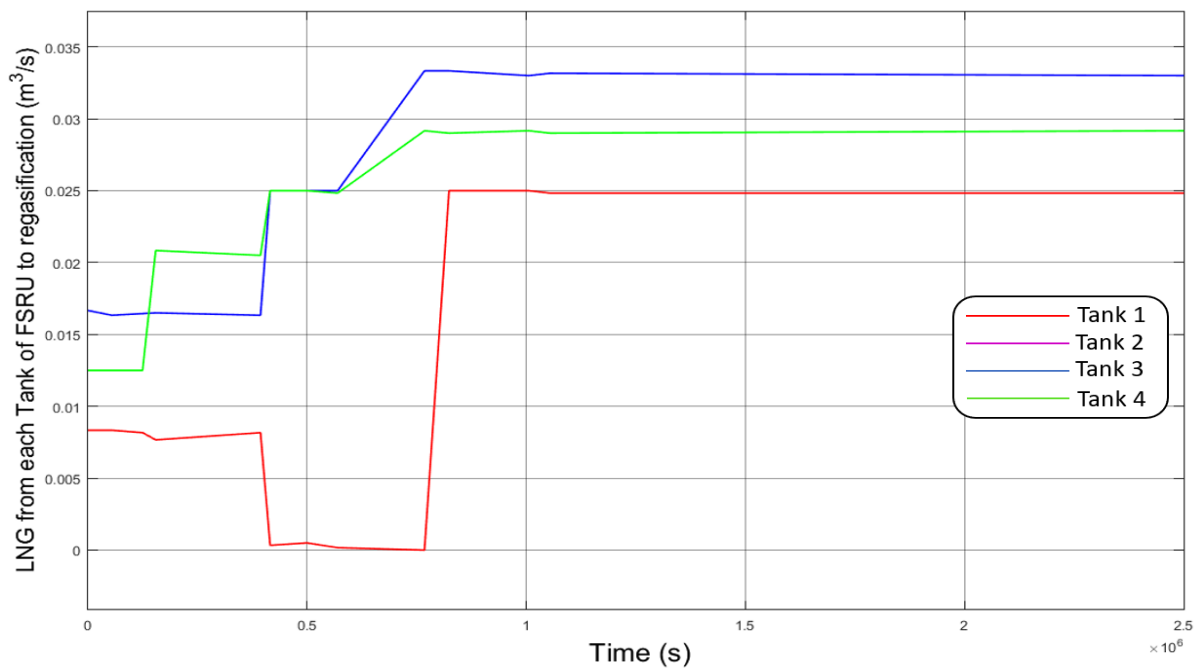
Διάγραμμα 12. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.1

Στο διάγραμμα 11 γίνεται κατανοητό το ζητούμενο της προσομοίωσης. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει τα σενάρια εκφόρτωσης και αεριοποίησης που χρειάζεται και στη συνέχεια μελετάει κάθε περίπτωση ως προς το αν είναι εφικτή, και στη συνέχεια μπορεί να διερευνήσει ποια είναι οικονομικά συμφέρουσα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η εκφόρτωση στο FSRU μπορεί να είναι οικονομικά συμφέρουσα αν πραγματοποιηθεί σε διάστημα 700.000s (δηλαδή 8 μέρες) εφόσον σε αυτό το σημείο η δεξαμενή 4 φτάνει στο lower tank limit και η ζήτηση προς αεριοποίηση δεν ικανοποιείται.

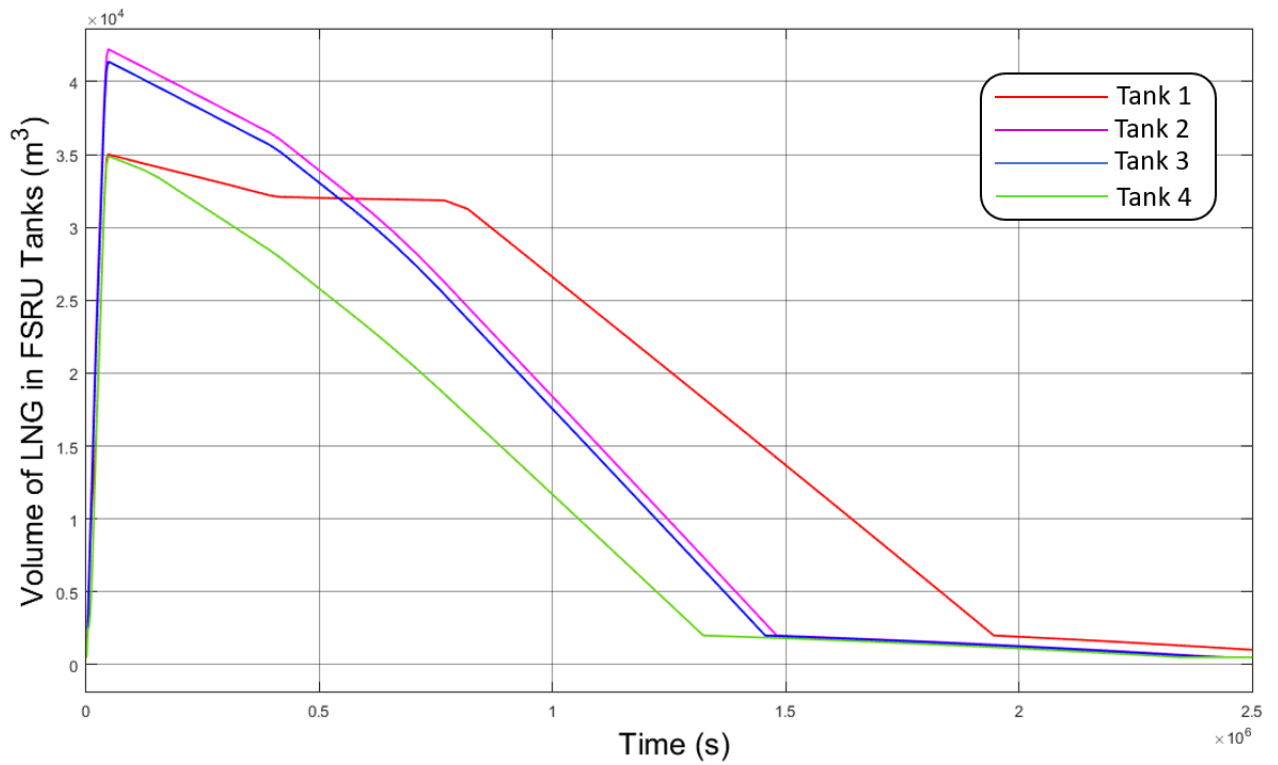
Στη συνέχεια θα επαναληφθεί το πρώτο σενάριο με τα ίδια ακριβώς μεγέθη με τη μόνη διαφορά (η υποπερίπτωση όπως προαναφέρθηκε) η παροχή LNG προς αεριοποίηση, λόγω αυξημένης ζήτησης φυσικού αερίου. Αυτό μπορεί να συμβεί για παράδειγμα σε μία αστική περιοχή το καλοκαίρι, όπου δεν υπάρχει ζήτηση για οικιακή θέρμανση.



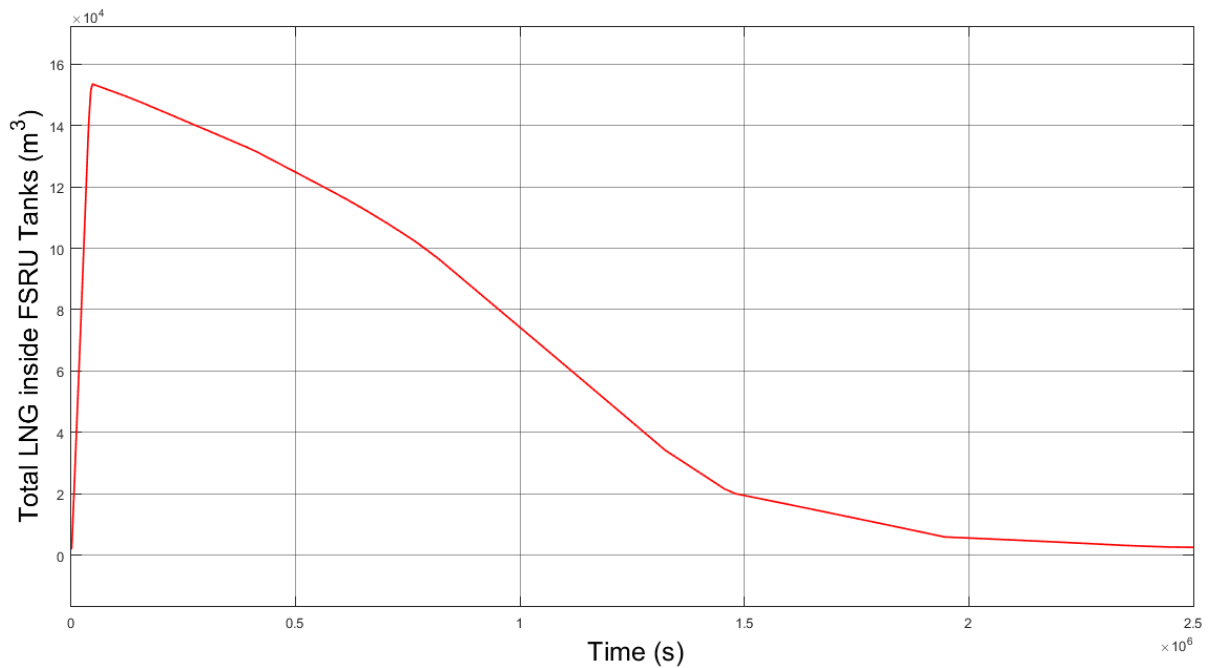
Διάγραμμα 13. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.2



Διάγραμμα 14. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 1.2



Διάγραμμα 15. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.2



Διάγραμμα 16. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.2

Σε αυτή την υποπερίπτωση η εκφόρτωση στην μονάδα του FSRU μπορεί να λειτουργήσει παραπάνω μέρες από την προηγούμενη (σχεδόν 13 μέρες). Αυτό το αποτέλεσμα είναι πολύ λογικό εφόσον η ζήτηση του LNG μειώθηκε.

5.2 Δεύτερη περίπτωση: Τρεις φορτώσεις LNG στο FSRU από ίδια LNGC

Το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης αφορά τρεις μεταφορτώσεις LNG από τρία ίδια LNGC. Σε αυτή την περίπτωση θα γίνει πιο κατανοητή στο χρήστη η λειτουργία του FSRU και το πόσο σημαντικός είναι ο χρονικός προγραμματισμός στις συγκεκριμένες μονάδες. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του FSRU και των LNGC επιλέχθηκαν ίδια με την πρώτη περίπτωση και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Οι χρονικές στιγμές που επιλέχθηκαν να ξεκινήσουν οι εκφορτώσεις των LNGCs είναι: 0s για το LNGC1, 800.000s (περίπου 9 μέρες) για το LNGC2 και 1.500.000s (περίπου 18 μέρες), για το LNGC3.

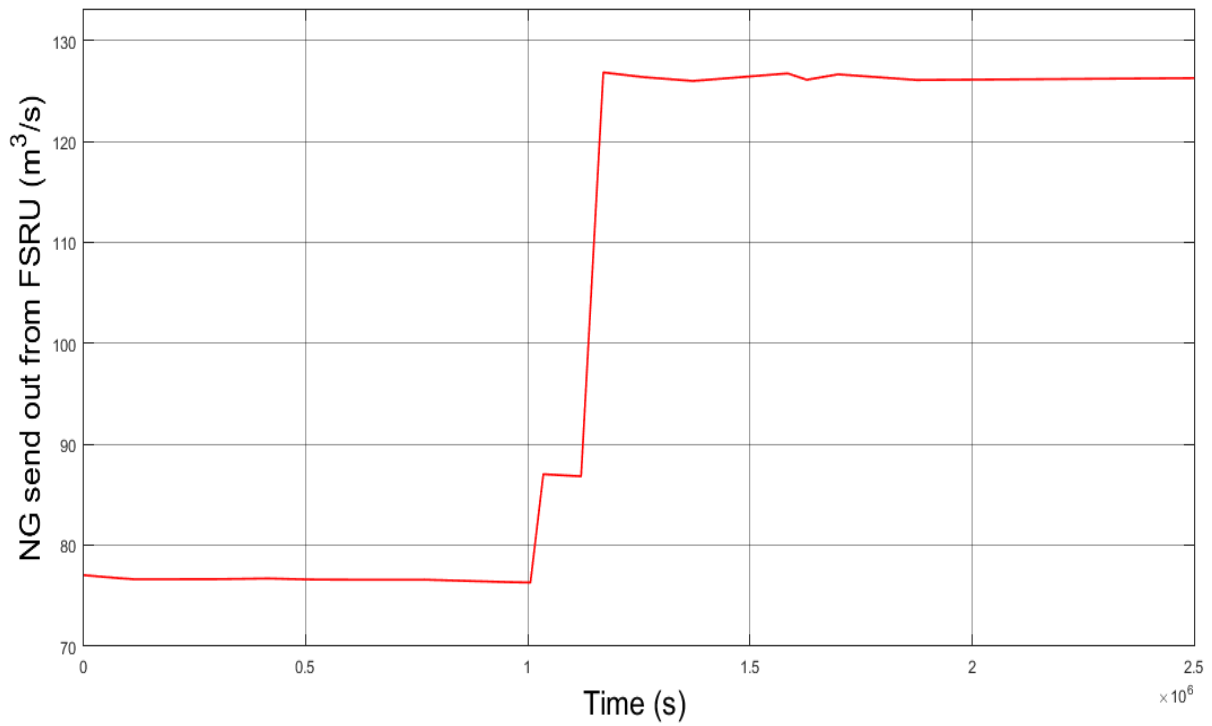
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά του FSRU και των LNGC για την δεύτερη περίπτωση

Χαρακτηριστικά	FSRU	LNGC 1	LNGC 2	LNGC 2
Tank 1 capacity (m ³)	35,000	35,000	35,000	35,000
Tank 2 capacity (m ³)	42,182	42,182	42,182	42,182
Tank 3 capacity (m ³)	42,182	42,182	42,182	42,182
Tank 4 capacity (m ³)	37,096	37,096	37,096	37,096
Pump 1 flow (m ³ /s)	0.083	0.94	0.94	0.94
Pump 2 flow (m ³ /s)	0.083	0.94	0.94	0.94
Pump 3 flow (m ³ /s)	0.083	0.94	0.94	0.94
Pump 4 flow (m ³ /s)	0.083	0.94	0.94	0.94
Tank limit	2,000	2,000	2,000	2,000

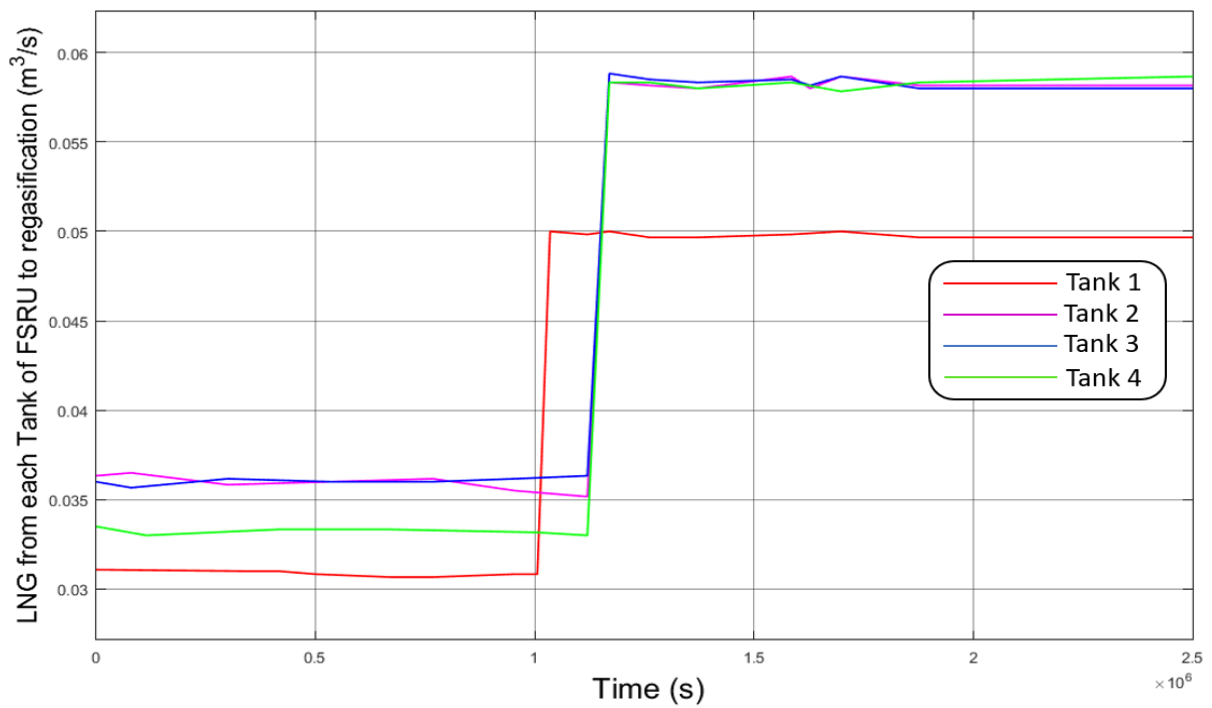
Το πρόγραμμα στο Matlab που αρχικοποιεί τις τιμές είναι το ίδιο με το Σενάριο 1 με τη διαφορά ότι έχουν προστεθεί οι τιμές για τα LNGC1 , LNGC2 και LNGC3. Οι τιμές των μεγεθών και ο κώδικας παρουσιάζονται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Ο τρόπος με τον οποίο κάθε δεξαμενή του κάθε LNGC ξεκινάει την εκφόρτωση είναι ίδιος με το πρώτο σενάριο (Ο χρήστης αποφασίζοντας τις στιγμές των φορτώσεων και εκφορτώσεων θα πρέπει να ορίσει τις χρονικές αλληλουχίες των βαλβίδων και των αντλιών. Οι χρονικές αλληλουχίες πρέπει να επιλεγθούν προσεκτικά και να ακολουθούν μια λογική ως προς τον χρόνο. Συγκεκριμένα οι βαλβίδες και οι αντλίες πρέπει να λειτουργούν μόνο όταν υπάρχει ροή LNG από τα LNGCs προς το FSRU.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χρονικές αλληλουχίες ζήτησης/εκφόρτωσης φυσικού αερίου προς στο σύστημα αλλά και της ροής LNG που ζητάτε από κάθε δεξαμενή. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω οι χρονικές στιγμές που επιλέχθηκαν να ξεκινήσουν οι εκφορτώσεις των LNGC είναι: 0s για το LNGC1, 800.000s (περίπου 9 μέρες), 1.500.000s (περίπου 18 μέρες), και είναι ρεαλιστικές για μια πραγματική λειτουργία φόρτο-εκφορτώσεων με αντίστοιχο προγραμματισμό από τα Chartering Depts.

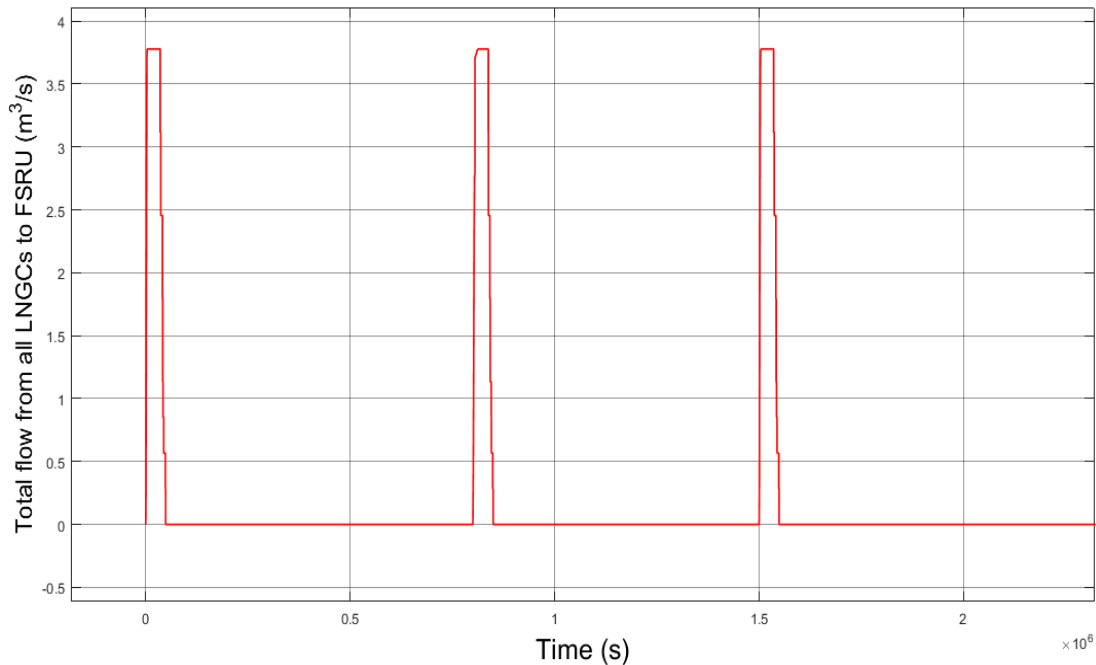


Διάγραμμα 17. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.1



Διάγραμμα 18. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 2.1

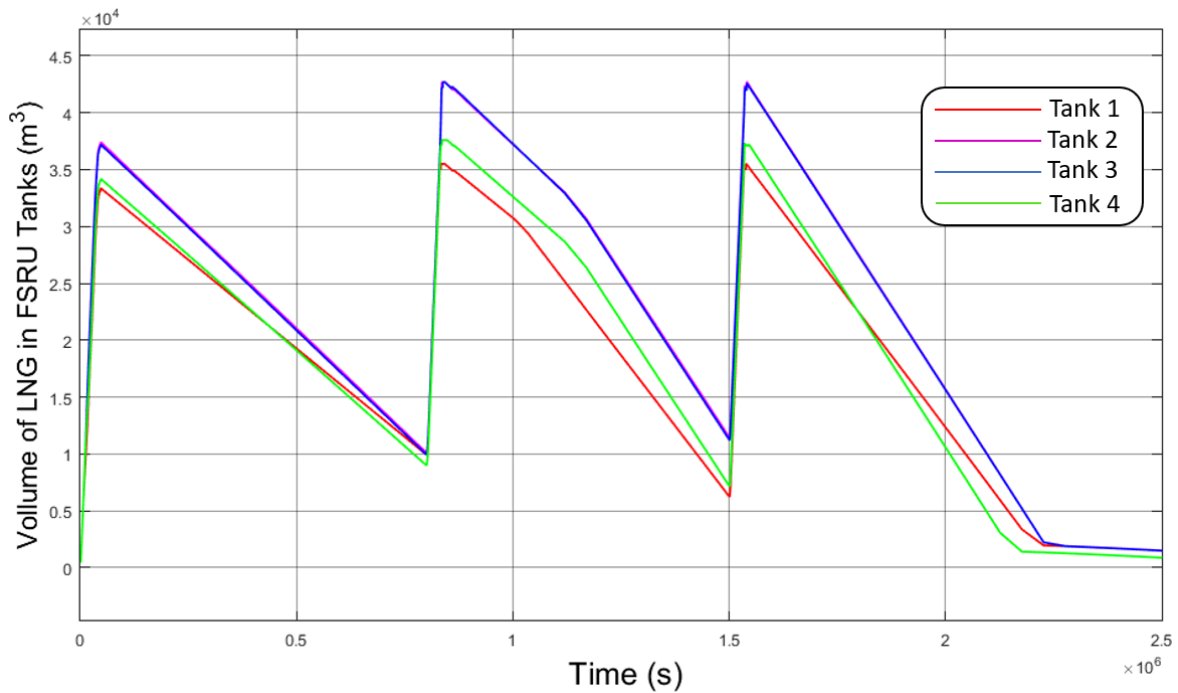
Η συνολική ροή μεταφόρτωσης του LNG προς το FSRU είναι το άθροισμα των τριών ροών από τα LNGCs (που πραγματοποιούνται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα). Ο καθορισμός του συνολικού προφίλ ροής βασίζεται στα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης, σχετικά με τις ποσότητες και τις ροές του LNG αλλά και τις χρονικές αλληλουχίες του συστήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα της συνολικής ροής μεταφόρτωση του LNG στο FSRU στο χρόνο:



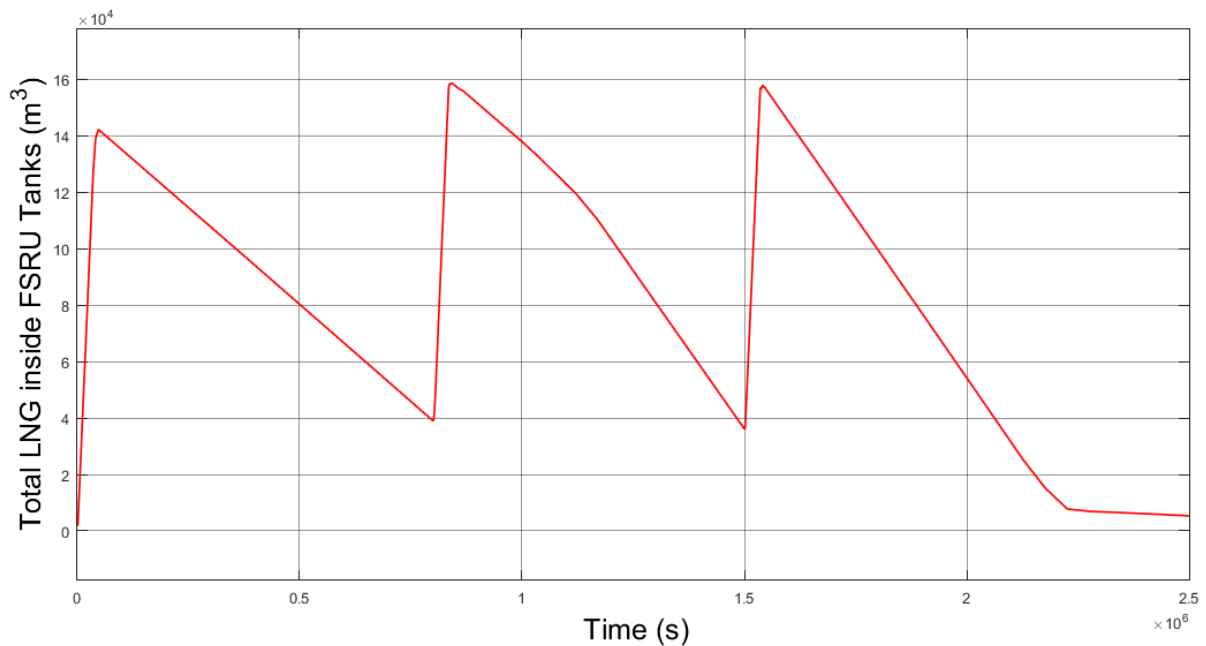
Διάγραμμα 19. Συνολική ροή LNG από τα LNGC προς το FSRU ως προς τον χρόνο για την περίπτωση 2

Οι διαφορές από εκφόρτωση σε εκφόρτωση οφείλονται στη διαφορετική συμπεριφορά των βαλβίδων και αντλιών και δεν μπορούν να εντοπισθούν με το μάτι λόγω της μικρής κλίμακας αποτύπωσης στο διάγραμμα. Οι εκφορτώσεις φαίνονται περίπου όμοιες μεταξύ τους ενώ στην πραγματικότητα είναι διαφορετικές.

Τέλος παρουσιάζεται το διάγραμμα 20 με τους όγκους LNG κάθε δεξαμενής του FSRU ως προς το χρόνο και του συνολικού όγκου LNG.



Διάγραμμα 20. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.1

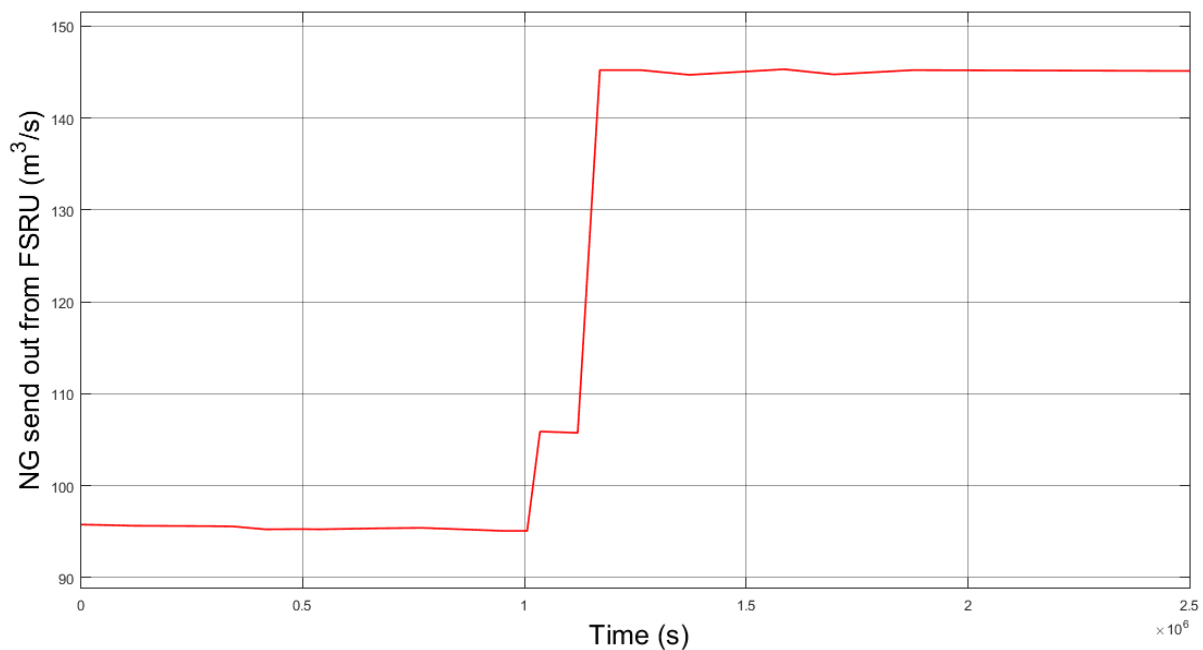


Διάγραμμα 21. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.1

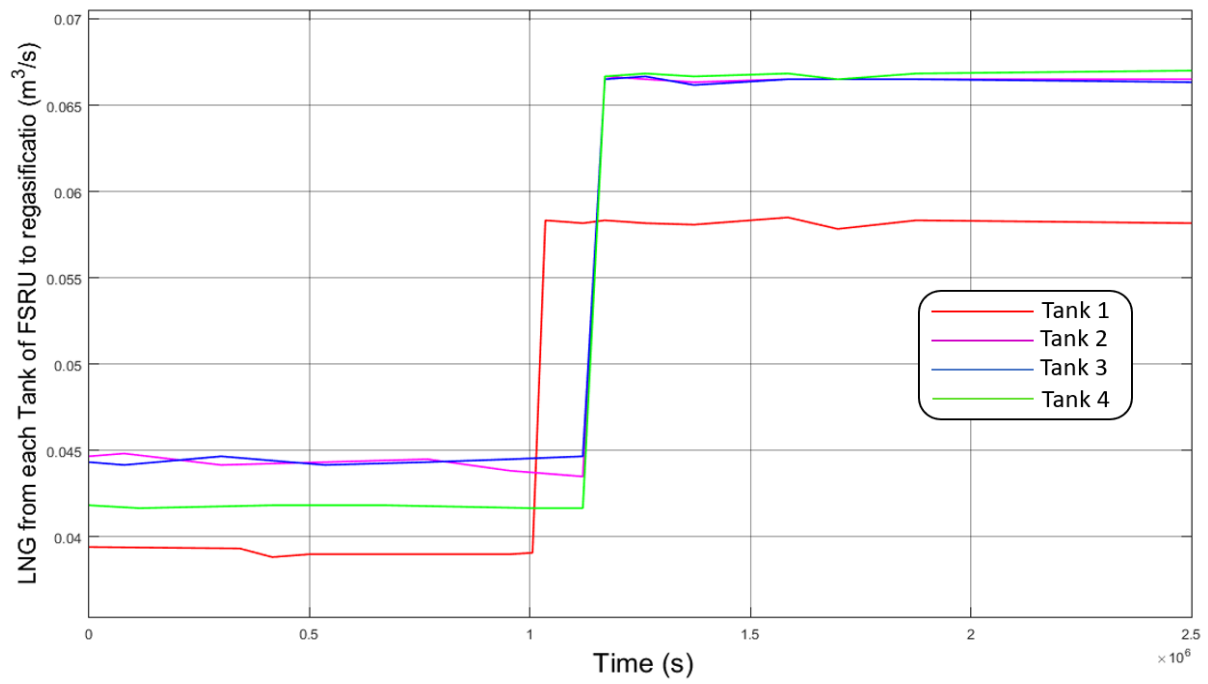
Από το διάγραμμα 20 γίνεται κατανοητό ότι ο συγκεκριμένος προγραμματισμός φορτοεκφορτώσεων είναι εφικτός να εφαρμοστεί. Οι δεξαμενές του FSRU σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης δεν αδειάζουν πλήρως και συνεπώς η ροή που οδεύει προς αεριοποίηση ικανοποιείται πάντα αδιαλείπτως. Επιπλέον όμως, αν μελετηθεί το διάγραμμα, γίνεται φανερό ότι η συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να βελτιωθεί (παραδείγματος χάριν να μετατοπισθούν χρονικά οι εκφορτώσεις αν αυτό είναι οικονομικά συμφέρον), εφόσον όταν φτάνουν τα LNGC2 και LNGC3 υπάρχει ακόμα αρκετό LNG στις δεξαμενές του FSRU. Από

τα παραπάνω ο χρήστης μπορεί να καταλήξει σε αποφάσεις, ή να αλλάξει τους χρόνους προσέλευσης των LNGC ή να αλλάξουν τα μεγέθη των LNGC δηλαδή η ποσότητα LNG που μεταφέρουν τα LNGC2 και LNGC3 να μειωθεί (μικρότερα πλοία). Αυτή η δυνατότητα είναι και το πιο ενδιαφέρον αποτέλεσμα της προσομοίωσης αφού δίνει την δυνατότητα στο χρήστη (πχ. στα Chartering Depts) να κάνουν βελτιστοποιήσεις στο στόλο ή στις ναυλώσεις LNGCs με σημαντικό οικονομικό αποτέλεσμα όσον αφορά τις επιλογές τους.

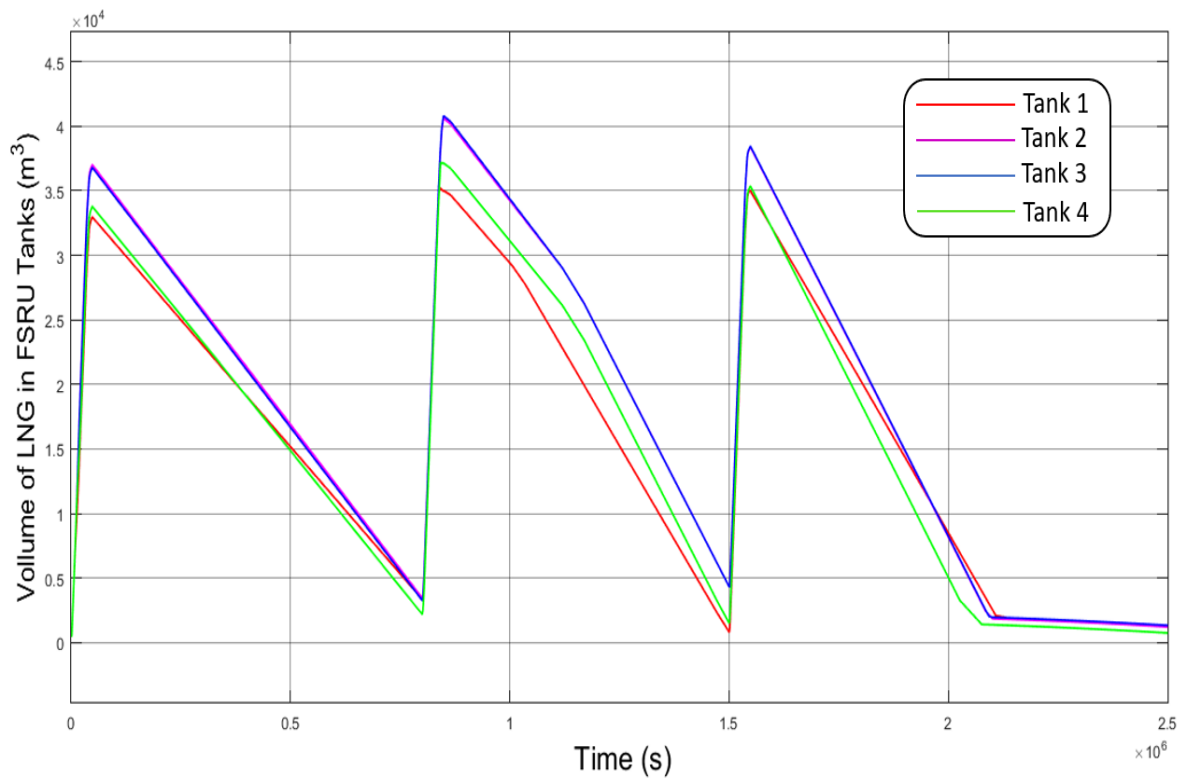
Επόμενο στάδιο του δεύτερου σεναρίου είναι η μελέτη ακριβώς της ίδιας υποπερίπτωσης όπως και στο προηγούμενο σενάριο, με την αλλαγή της ροής προς τους καταναλωτές/ ζήτησης προς αεριοποίηση. Χωρίς να αλλάξει κανένα άλλο μέγεθος επιλέχθηκε να αυξηθεί σε κάθε χρονική στιγμή 10% η ροή προς αεριοποίηση (10% αύξηση σε σχέση με την μέγιστη ροή της αντλίας). Σαν παράδειγμα αναφέρεται ότι μια τέτοια περίπτωση μπορεί να προκύψει όταν υπάρχουν έργα συντήρησης σε άλλο σύστημα προμήθειας LNG για το ίδιο δίκτυο κατανάλωσης, οπότε πρέπει να προγραμματισθεί αυξημένη ροή από το FSRU για ένα χρονικό διάστημα. Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



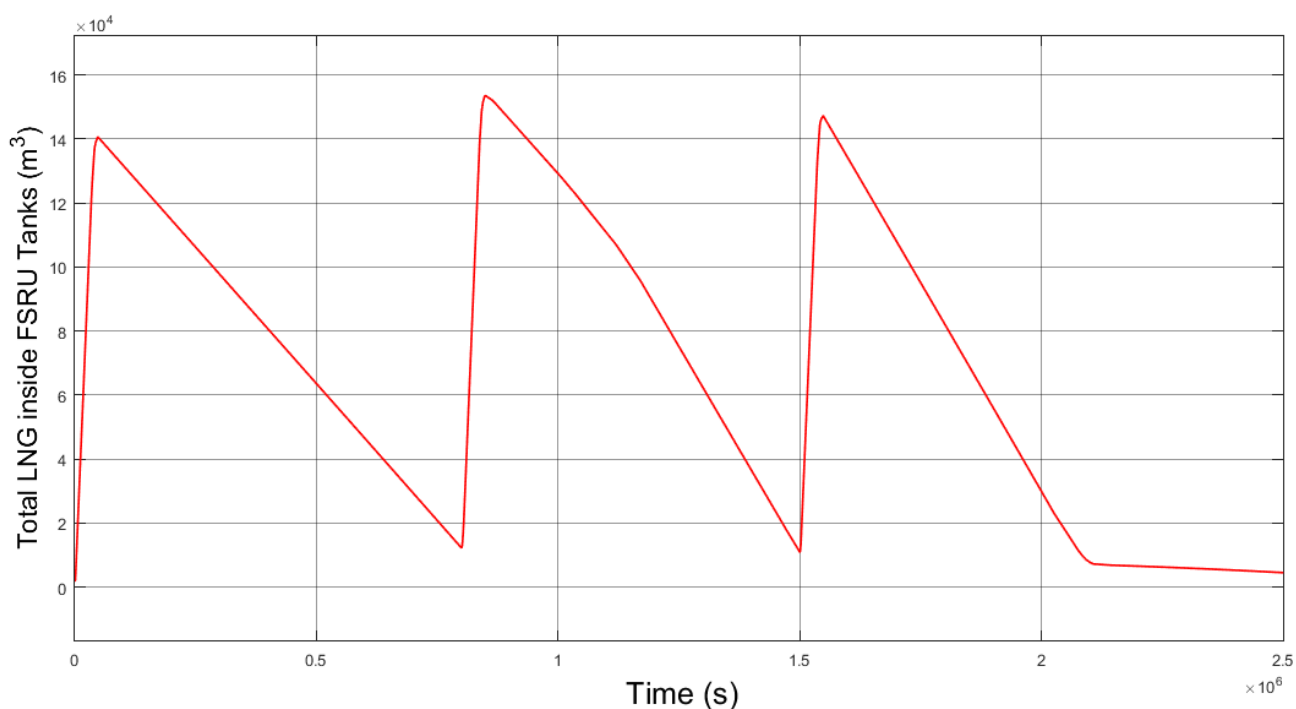
Διάγραμμα 22. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.2



Διάγραμμα 23. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 2.2



Διάγραμμα 24. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.2



Διάγραμμα 25. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 2.2

Από το διάγραμμα 24 με τους όγκους του LNG στις δεξαμενές γίνεται αντιληπτό ότι για το συγκεκριμένο προφίλ κατανάλωσης LNG οι συγκεκριμένες μεταφορτώσεις είναι μια αρκετά καλή επιλογή χρήσης του στόλου των LNGCs (καλύτερη από την προηγούμενη). Είναι φανερό ότι αυτή η περίπτωση εκφορτώσεων μπορεί να βελτιστοποιηθεί ακόμη περισσότερο εφόσον οι δεξαμενές του FSRU δεν έχουν αδειάζουν πλήρως. Με αυτό το σενάριο ο αναγνώστης έχει πλήρη κατανόηση του πως μπορεί να λειτουργήσει το μοντέλο και πως μπορεί να επιτευχθεί ο βέλτιστος προγραμματισμός μεταφορτώσεων και αεριοποίησης LNG.

5.3 Τρίτη περίπτωση: Τρεις φορτώσεις LNG στο FSRU από διαφορετικά LNGCs

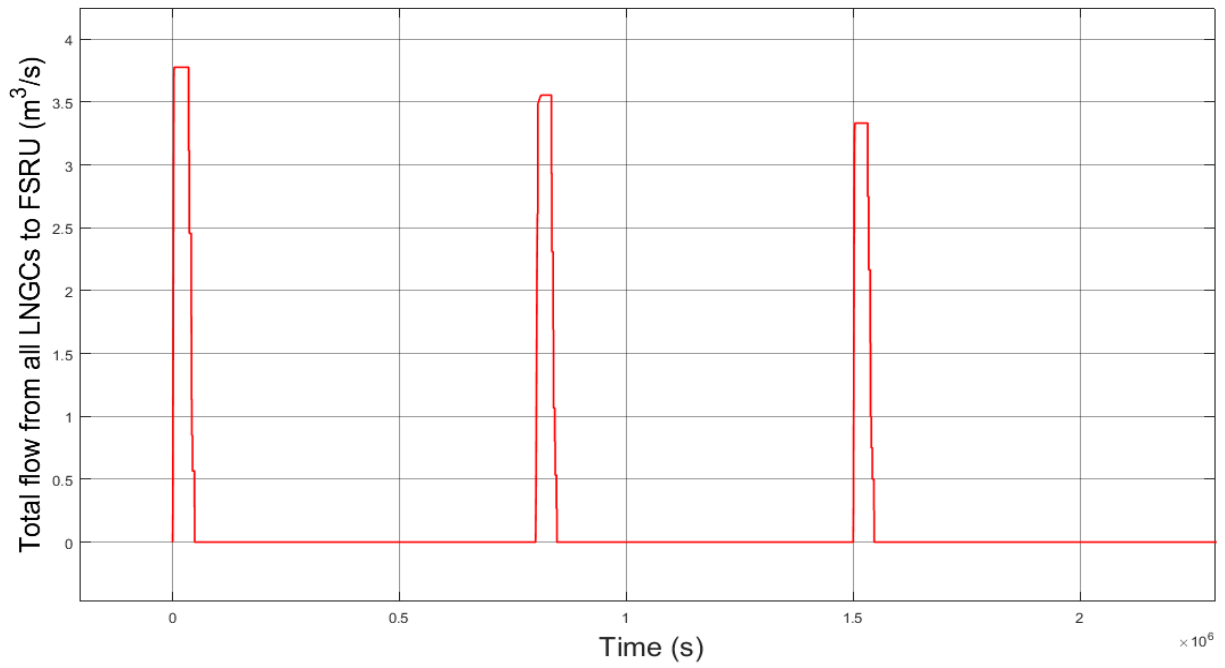
Το τρίτο σενάριο προσομοίωσης αφορά τρεις μεταφορτώσεις LNG από τρία διαφορετικά LNGCs. Σε αυτή την περίπτωση θα γίνει πιο κατανοητή στο χρήστη η αλληλουχία μεταφορτώσεων του LNG και το πόσο σημαντικός είναι ο χρονικός προγραμματισμός αυτών. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του FSRU και των LNGCs επιλέχθηκαν στη βάση πραγματικών χαρακτηριστικών των LNGC που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Οι χρονικές στιγμές που επιλέχθηκαν να ξεκινήσουν οι εκφορτώσεις των LNGC είναι ίδιες με τη δεύτερη περίπτωση και είναι: 0s για το LNGC1, 800.000s (περίπου 9 μέρες) για το LNGC2 και 1.500.000s (περίπου 18 μέρες) για το LNGC3.

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά του FSRU και των LNGC για την τρίτη περίπτωση

Χαρακτηριστικά	FSRU	LNGC 1	LNGC 2	LNGC 2
Tank 1 capacity (m ³)	35,000	35,000	30,360	28,380
Tank 2 capacity (m ³)	42,182	42,182	37,260	34,830
Tank 3 capacity (m ³)	42,182	42,182	37,260	34,830
Tank 4 capacity (m ³)	37,096	37,096	33,120	30,960
Pump 1 flow (m ³ /s)	0.083	0.94	0.88	0.83
Pump 2 flow (m ³ /s)	0.083	0.94	0.88	0.83
Pump 3 flow (m ³ /s)	0.083	0.94	0.88	0.83
Pump 4 flow (m ³ /s)	0.083	0.94	0.88	0.83
Tank limit	2,000	2,000	2,000	2,000

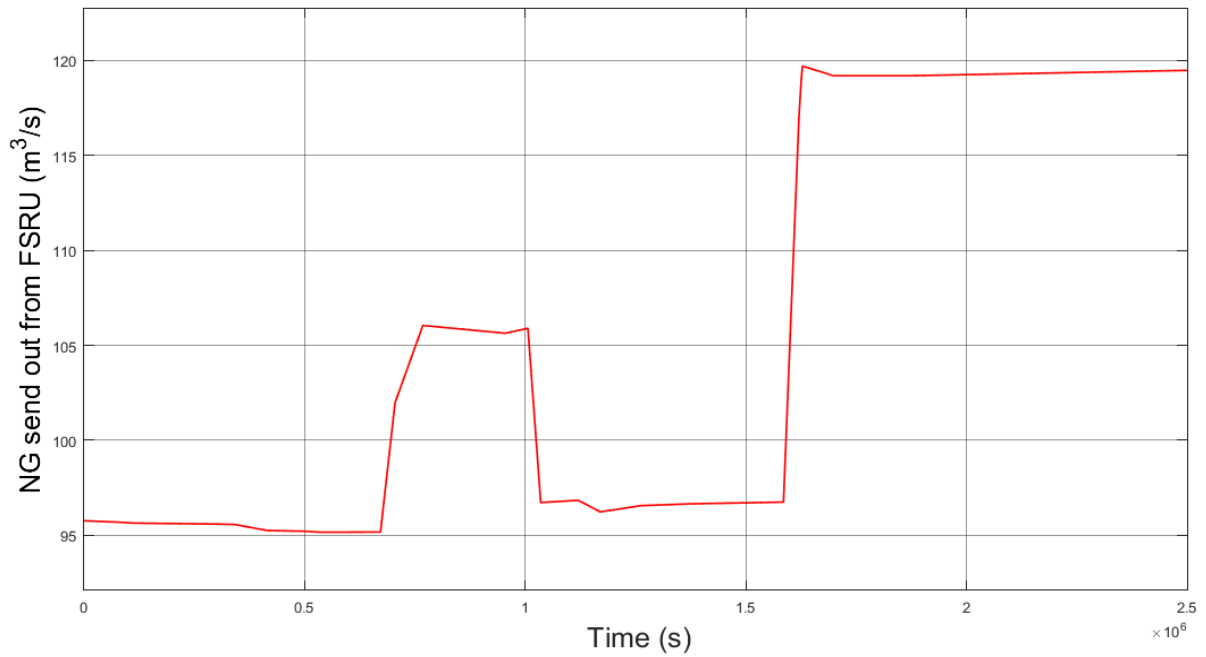
Το πρόγραμμα στο Matlab που αρχικοποιεί τις τιμές (βλ. παράρτημα) είναι το ίδιο με το σενάριο 1 με τη διαφορά ότι έχουν προστεθεί οι τιμές για το LNGC1 και LNGC2

Οι χρονικές αλληλουχίες για αυτό το σενάριο επιλέχθηκαν ίδιες με την υποπερίπτωση του 2ου σεναρίου (δηλαδή ίδιο με το σενάριο 2 αλλά με 20% αύξηση στην ζήτηση προς αεριοποίηση). Σκοπός είναι μέσω του συγκεκριμένου σεναρίου να γίνει εμφανές πως θα επηρεάσει η αλλαγή των LNGC, συνεπώς τα μόνα μεγέθη που άλλαξαν είναι οι χωρητικότητες και οι αντλίες των LNGC. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η συνολική ροή του LNG προς στο FSRU ως προς τον χρόνο. Η αλλαγή των μεγεθών στα LNGC είναι εμφανέστατη στο διάγραμμα 26 εφόσον τόσο η μέγιστη ροή LNG αλλά και η συνολική ποσότητα του LNG που εκφορτώνεται, είναι διαφορετική από LNGC σε LNGC.

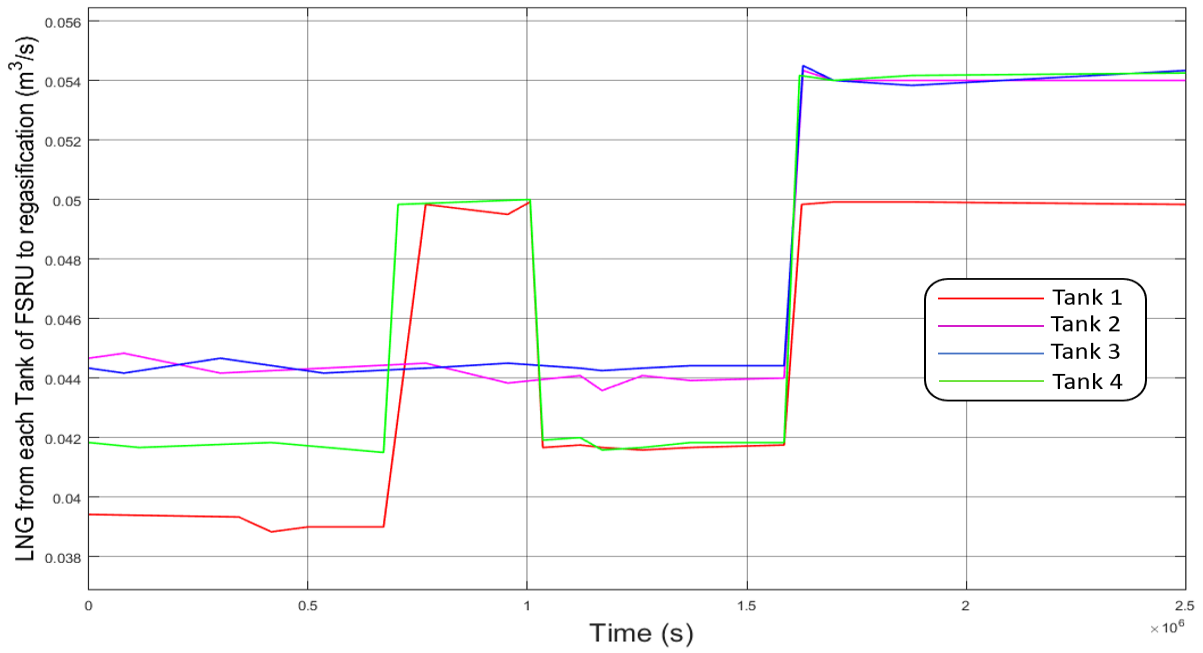


Διάγραμμα 26. Συνολική ροή LNG από τα LNGC προς το FSRU ως προς τον χρόνο για την περίπτωση 3

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ζήτησης φυσικού αερίου και LNG

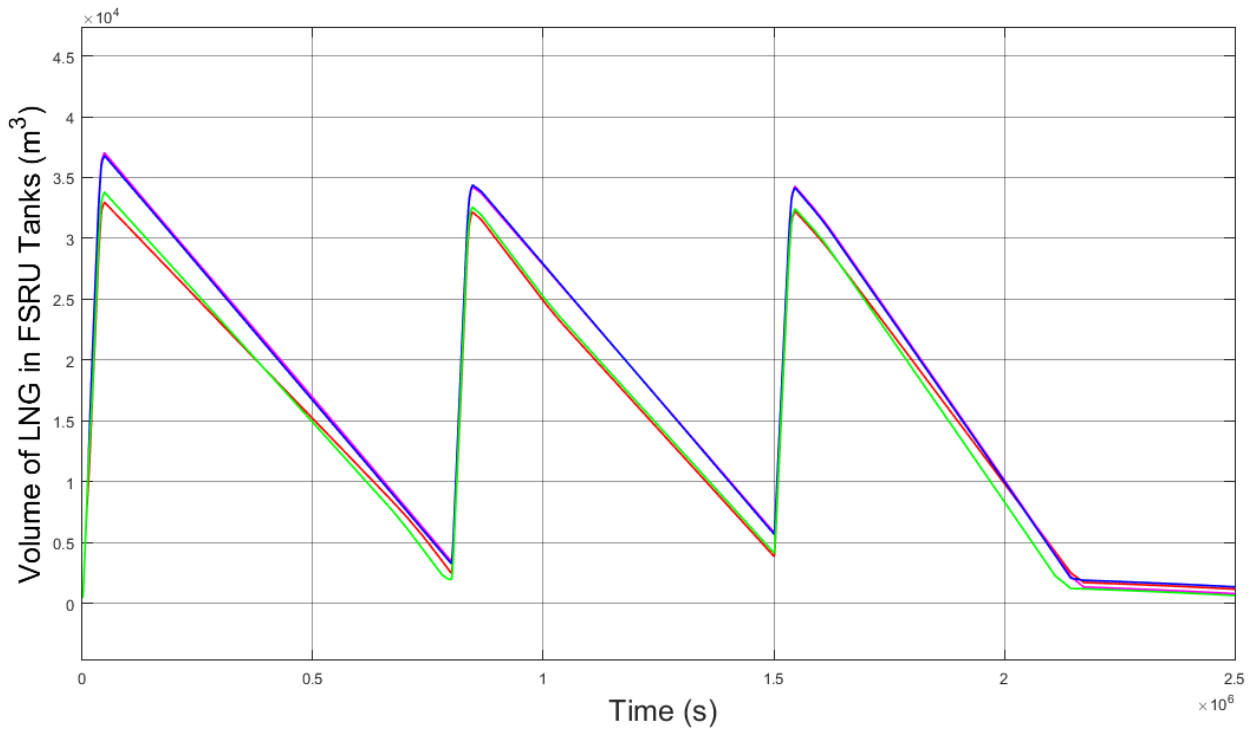


Διάγραμμα 27. Ζητούμενη ροή φυσικού αερίου ως προς τον χρόνο για την περίπτωση 3

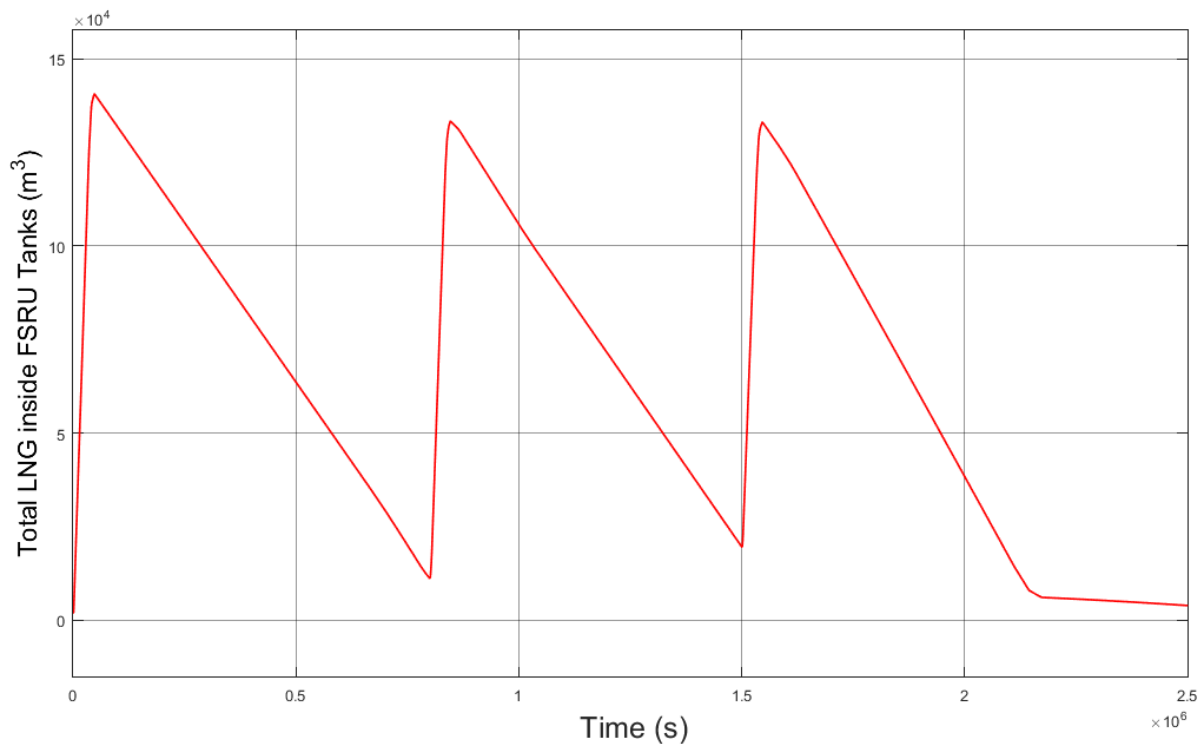


Διάγραμμα 28. Ροή LNG κάθε δεξαμενής προς αεριοποίηση ως προς το χρόνο στην περίπτωση 3

Τέλος παρουσιάζεται τα δυο διαγράμματα των όγκων.



Διάγραμμα 29. Όγκος LNG μέσα σε κάθε δεξαμενή του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 3



Διάγραμμα 30. Συνολικός όγκος LNG μέσα στο FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 3

Από τα διαγράμματα 29 και 30 γίνεται εμφανές ότι η συγκεκριμένη ζήτηση αερίου με τον συγκεκριμένο προγραμματισμό εκφορτώσεων (χρόνοι εκφόρτωσης και μεγέθη LNGC) το σενάριο μπορεί να θεωρηθεί βέλτιστο. Οι δεξαμενές του FSRU φτάνουν σε ένα ικανοποιητικό σημείο πριν ξαναγεμίσουν. Ακόμα οι δεξαμενές αδειάζουν και γεμίζουν ομοιόμορφα. Για να βελτιωθεί ακόμα πιο πολύ η περίπτωση θα πρέπει ο χρήστης να αλλάξει τις ροές του LNG προς αεριοποίηση από δεξαμενή σε δεξαμενή ώστε η εκφόρτωση του FSRU να πραγματοποιείται όσο γίνεται πιο ομοιόμορφα στο χρόνο.

Συμπερασματικά το μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι ένα χρήσιμο εργαλείο προγραμματισμού μιας μονάδας FSRU με τον χρήστη να μπορεί να μελετήσει πληθώρα σεναρίων λειτουργίας.

6. Συμπεράσματα και προτάσεις για Μελέτη

6.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία το κύριο θέμα είναι η ανάλυση μιας μονάδας FSRU και γενικότερα της αγοράς LNG. Αρχικά, αναφέρεται η τεχνική περιγραφή και οι χρήσεις του LNG. Συνοπτικά, το LNG είναι ένα διαυγές, άχρωμο και μη τοξικό υγρό το οποίο σχηματίζεται όταν το φυσικό αέριο ψύχεται στους $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ (πίνακας 1), μειώνοντας τον όγκο του 600 φορές, διευκολύνοντας την αποθήκευση και την αποστολή του. Ο βασικός τρόπος μεταφοράς του LNG πραγματοποιείται μέσω θάλασσάς σε ειδικώς διαμορφωμένα πλοία γνωστά ως LNGC (LNG Carriers). Τα είδη των LNGC κατανέμονται ανάλογα με το είδος των δεξαμενών, μεμβράνης, σφαιρικών δεξαμενών ή Prismatic.

Την τελευταία δεκαετία οι ποσότητες LNG που διακινούνταν (MT) σημείωναν κάθε χρόνο αύξηση σε ετήσια βάση 9.8%. Οι χώρες με την μεγαλύτερη εξαγωγή LNG για το 2019 ήταν το Κατάρ η Αυστραλία και η Μαλαισία από τις οποίες προέρχεται πάνω από μισό LNG του παγκοσμίου εμπορίου (συνολικά 54.3%) (IGU, 2019). Ακόμα οι χώρες με την μεγαλύτερη εισαγωγή φυσικού αερίου για το 2019 ήταν η Ιαπωνία η Κίνα και η Νότιος Κορέα. Από τα παραπάνω καταλήγουμε ότι η κύρια περιοχή διακίνησης LNG είναι ο Ειρηνικός ωκεανός (143.2 MT) (McKinsey, 2019).

Η ανάπτυξη και εξέλιξη των μονάδων FSRU ξεκίνησε το 2001 και σήμερα υπάρχουν 44 FSRU εν λειτουργία (Oxford Institute of Energy studies, 2019). Ένα τυπικό FSRU έχει χωρητικότητα 172.000 m^3 και έχει την ικανότητα παραγωγής φυσικού αερίου έως 6 mtpa. Το κόστος (230-300 εκατομμύρια δολάρια) μιας τυπικής μονάδας FSRU ανέρχεται στο 50-60% ενός τερματικού σταθμού ξηράς και μπορεί να ολοκληρωθεί στο μισό χρόνο. Τα δυο τελευταία χρόνια έχουν σημειωθεί αρκετές αλλαγές στην αγορά του FSRU με γνωστές εταιρίες στο χώρο να επενδύουν σε αυτό γεγονός που οδήγησε στο να διπλασιαστούν οι μονάδες σε σχέση με το 2017.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε μια μονάδα FSRU είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται σε ένα τερματικό σταθμό ξηράς. Η μοναδική διαφορά του εξοπλισμού είναι η κατάλληλη διαμόρφωση του στη γάστρα του πλοίου. Ταυτόχρονα η μοναδική διαφορά ενός FSRU με ένα LNGC είναι η ικανότητα του FSRU να αεριοποιεί το LNG. Με άλλα λόγια τα FSRU αποτελούν πλοία μεταφοράς LNG (LNGC) τα οποία μπορούν να εκτελέσουν όλες τις ενέργειες ενός τερματικού σταθμού. Τα τεχνικά στοιχεία που μετέχουν στην αεριοποίηση του LNG μπορούν να χωρισθούν σε δυο κομμάτια, το σύστημα συμπίεσης και επανασυμπύκνωσης (compressor and recondensing system) το οποίο συλλέγει την αέρια φάση και τις απώλειες λόγω natural boil off (BOG) και τις συμπυκνώνει και το σύστημα vapORIZER το οποίο είναι ένας ειδικός εναλλάκτης θερμότητας στον οποίο πραγματοποιείται η αεριοποίηση. Υπάρχουν αρκετά είδη εναλλακτων θερμότητας για τη χρήση αεριοποίησης LNG. Οι δυο κύριες κατηγορίες είναι οι ανοιχτού και κλειστού τύπου. Στη διαμόρφωση του ανοιχτού βρόχου, το θαλασσινό νερό αντλείται από την θάλασσά και αποτελεί το μέσο της μεταφοράς θερμότητας. Αντίθετα σε έναν κλειστού τύπου εναλλάκτης το μέσο μεταφοράς θερμότητας δεν είναι το θαλασσινό νερό αλλά ένα άλλο ρευστό το οποίο εκτελεί έναν 'κλειστό κύκλο'. Υπάρχουν αρκετά είδη εναλλακτων θερμότητας για ένα FSRU και η επιλογή γίνεται με βάση οικονομικών κριτηρίων αλλά και των συνθηκών του περιβάλλοντος που θα βρίσκεται το FSRU.

Πριν από τις διαδικασίες φόρτωσης ενός FSRU και εκφόρτωσης ενός LNGC πρέπει να πραγματοποιηθούν συγκεκριμένες διαδικασίες προετοιμασίας. Πρέπει να απομακρυνθεί το νερό και η υγρασία σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος διακίνησής του φορτίου για την αποφυγή της παγιοποίησης του. Επίσης πρέπει να ολοκληρωθούν οι προκαταρτικές επικοινωνίες μεταξύ LNGC και FSRU στις οποίες ανταλλάσσονται οι σχετικές πληροφορίες για την ποσότητα, την ποιότητα, και την σύνθεση του φορτίου. Η προετοιμασία ολοκληρώνεται με την ψύξη των σωληνώσεων η οποία επιτυγχάνεται με την αργή άντληση και ψεκασμού LNG και διαρκεί περίπου 15 λεπτά.

Η φόρτωση του FSRU με LNG ξεκινάει όταν όλες οι σωληνώσεις και οι βαλβίδες έχουν ψυχθεί πλήρως. Ο ατμός BOG (boil-off gas) που παράγεται πρέπει να οδηγείται πίσω στο LNGC. Ακόμα πρέπει να ικανοποιούνται τα όρια των δεξαμενών που έχουν ορίσει οι κατασκευαστές της μονάδας ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα ως προς τις πιέσεις. Ταυτόχρονα με τη λειτουργία φόρτωσης εκτελείται ο αφερματισμός του FSRU. Το έρμα πρέπει να ρυθμίζει τη διαγωγή (trim) και το βύθισμα όπως καθορίζεται από τις τοπικές αρχές.

Η εκφόρτωση του LNGC ξεκινάει με την εκκίνηση των αντλιών φόρτωσης σύμφωνα με τις καθιερωμένες οδηγίες. Τα πιο σημαντικά στοιχεία που παρακολουθούνται είναι το επίπεδο δεξαμενής φορτίου, η πίεση της δεξαμενής, φορτίο της αντλίας και το βύθισμα/διαγωγή του LNGC. Το BOG που στέλνεται πίσω διατηρεί την πίεση των δεξαμενών σε ασφαλές επίπεδο. Η εκφόρτωση και η φόρτωση ολοκληρώνεται με την αποστράγγιση και τον καθαρισμό των σωληνώσεων.

Από τα βήματα φόρτωσης και εκφόρτωσης που παρουσιάζονται στις εικόνες 21 και 32 και επεξηγούνται στο τέλος του τρίτου κεφαλαίου γίνεται αντιληπτό ότι οι παραπάνω διαδικασίες είναι αρκετά πολύπλοκες. Καταρχάς από το σχέδιο διάταξης των σωληνώσεων, βαλβίδων και δεξαμενών FSRU/LNGC (εικόνα 20) γίνεται αντιληπτό ότι η διάταξη αυτών είναι αρκετά συνθέτη. Ακόμα μελετώντας τις ενέργειες κάθε διαδικασίας γίνεται σαφές πως κάθε βαλβίδα σε κάθε φόρτωση/εκφόρτωση πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένες χρονικές αλληλουχίες ώστε να πραγματοποιηθούν σωστά οι διεργασίες.

Για την πραγματοποίηση του ζητούμενου μοντέλου της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον του Simulink. Το Simulink μέσω της απλότητας του ως γραφικό περιβάλλον αλλά και της πληθώρας επίλογων (βιβλιοθήκες, μπλοκ κλπ.) αποδείχθηκε ένα πολύ δυνατό εργαλείο για την πραγματοποίηση του μοντέλου. Από την περιγραφή του μοντέλου στο κεφάλαιο 4 έγινε αντιληπτό ότι παρόλο που η ιδέα και οι κανόνες 'πίσω' από το μοντέλο είναι απλές η πραγματοποίηση του ήταν αρκετά δύσκολη.

Στο μοντέλο του Simulink έπρεπε να προσομοιασθούν όλα τα τεχνικά στοιχεία ενός LNGC και FSRU που εμπλέκονται στη μεταφορά του LNG (αντλίες, βαλβίδες, δεξαμενές κλπ.) με σκοπό την προσομοίωση τους. Η βασική αρχή της προσομοίωσης ήταν το ισοζύγιο μάζας στο σύστημα το οποίο με προγραμματίστηκα 'τρικ' εφαρμόζεται παντού. Το πιο δύσκολο κομμάτι της δημιουργίας του μοντέλου ήταν το φαινόμενο της πλήρωσης των δεξαμενών στη φόρτωση του FSRU. Το μοντέλο έπρεπε να ελέγχει κάθε πλήρωση δεξαμενής ενώ ταυτόχρονα μεταβλητές ελέγχου 'ελέγχαν' και 'διόρθωναν' το ισοζύγιο μάζας.

Τέλος πραγματοποιήθηκαν τρεις μελέτες περίπτωσης στο μοντέλο. Στόχος ήταν η γνωριμία του αναγνώστη με την λειτουργία μιας μονάδας FSRU αναλύοντας διάφορα σενάρια λειτουργίας. Τα μεγέθη κάθε LNGC και FSRU εισάγονταν στο μοντέλο μέσω ενός κώδικα Matlab (βλ. παράρτημα) ενώ ταυτόχρονα έπρεπε και για κάθε περίπτωση να οριστούν οι χρονικές αλληλουχίες κάθε βαλβίδας, αντλίας και ζήτησης φυσικού αερίου. Η πρώτη περίπτωση ήταν μια μόνο φόρτιση LNG στο FSRU, η δεύτερη τρεις φορτώσεις LNG στο FSRU από ίδια LNGC και η τρίτη τρεις φορτώσεις LNG στο FSRU από διαφορετικά LNGCs. Και για τις τρεις περιπτώσεις ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 2,500,000 δευτερόλεπτα δηλαδή περίπου 29 ημέρες. Η εκφόρτωση του πρώτου LNGC και στις τρεις περιπτώσεις ξεκίνησε με την αρχή της προσομοίωσης (0s), ενώ για την δεύτερη και τρίτη προσομοίωση το 2^ο και 3^ο LNGC ήρθαν στις χρονικές στιγμές 800,000 s και 1,500,000 sec. Τέλος για να υπάρξει πλήρης κατανόηση της δυνατότητας του μοντέλου για τις πρώτες δυο περιπτώσεις θα επαναληφθεί η προσομοίωση με διαφορετική κατανάλωση προς αεριοποίηση.

Από την πρώτη περίπτωση γίνεται αντιληπτό το πως γεμίζει και αδειάζει από LNG ένα FSRU. Στο διάγραμμα 11 παρουσιάζεται ο όγκος LNG κάθε δεξαμενής του FSRU ως προς το χρόνο για την περίπτωση 1.1 ενώ παράλληλα στο διάγραμμα 15 για την περίπτωση 1.2. Στην περίπτωση 1.2 λόγω αλλαγής της κατανάλωσης το διάγραμμα είναι διαφορετικό και γίνεται κατανοητό ότι η μονάδα σε αυτή την περίπτωση λειτουργεί περισσότερο χρόνο. Συνεπώς μέσω του πρώτου παραδείγματος γίνεται αντιληπτή η σημασία της ζήτησης προς αεριοποίηση σε μια μονάδα FSRU.

Στη δεύτερη περίπτωση λόγω των τριών LNGCs η προσομοίωση γίνεται πιο ρεαλιστική εφόσον πραγματοποιούνται τρεις εκφορτώσεις LNG (βλ. διάγραμμα 19). Και οι δυο περιπτώσεις (2.1 και 2.2) είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν, εφόσον μελετώντας τα διαγράμματα 20 και 24 διαπιστώνεται ότι καμία δεξαμενή δεν αδειάζει (η ζήτηση προς αεριοποίηση ικανοποιείται). Συγκρίνοντας όμως τα δυο διαγράμματα καταλήγουμε στο ότι η περίπτωση 2.2 για το συγκεκριμένο προφίλ κατανάλωσης LNG είναι η καλύτερη επιλογή χρήσης του στόλου των LNGCs.

Στη τρίτη περίπτωση με την εισαγωγή τριών διαφορετικών LNGCs γίνεται ασύλληπτο και το πως επηρεάζει η μεταφορική ικανότητα των LNGC τη μονάδα. Και αυτή η περίπτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί λόγω της μη πλήρωσης των δεξαμενών. Από τα διαγράμματα 29 και 30 γίνεται εμφανές ότι η συγκεκριμένη ζήτηση αερίου με τον συγκεκριμένο προγραμματισμό εκφορτώσεων (χρόνοι εκφόρτωσης και μεγέθη LNGC) το σενάριο μπορεί να θεωρηθεί βέλτιστο. Οι δεξαμενές του FSRU φτάνουν σε ένα ικανοποιητικό σημείο πριν ξαναγεμίσουν. Ακόμα οι δεξαμενές αδειάζουν και γεμίζουν ομοιόμορφα.

Συμπερασματικά το συγκεκριμένο μοντέλο Simulink μπορεί να βοηθήσει σε αρχικό στάδιο τον προγραμματισμό των φορτοεκφορτώσεων ενός FSRU, ενώ ακόμα με την ικανότητα δημιουργίας σεναρίων ο χρήστης μπορεί να έχει πλήρη εικόνα της ευαισθησίας (sensitivity) του συστήματος. Η προσομοίωση των δεξαμενών και των βαλβίδων όπως αναφέρθηκε πραγματοποιείται με προγραμματιστικά 'τρικ' για τα οποία χρειάζεται καλή γνώση πάνω στο πρόγραμμα του Simulink και πλήρης κατανόηση τους.

6.2 Προτάσεις για μελέτη

Η προσομοίωση μιας μονάδας FSRU στο Simulink όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα ήταν αρκετά επιτυχής, και τα αποτελέσματα μπορούν να φανούν αρκετά χρήσιμα σε μελέτες. Σε συγκριτική μελέτη όμως με μια πραγματική μονάδα FSRU μπορεί να παρουσιαστούν διαφορές οι οποίες οφείλονται σε παραμέτρους οι οποίοι δεν πάρθηκαν. Αρχικά στο μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνεται η δημιουργία του BOG στις δεξαμενές. Η παρουσία του BOG στο μοντέλο θα επηρεάσει τις ροές του LNG τροποποιώντας τα αποτελέσματα. Προτείνεται λοιπόν για μελλοντική μελέτη η ένταξη του BOG στο Simulink ως μία νέα ροή στο σύστημα.

Ακόμα μια πρόταση για μελλοντική μελέτη είναι η προσθήκη της παραμέτρου του καιρού. Ο καιρός είναι μια αρκετή σημαντική παράμετρος για την λειτουργία μιας FSRU μονάδας, εφόσον επηρεάζει τις εκφορτώσεις των LNGC και η μονάδα δεν αποδίδει τη ζήτηση του φυσικού αερίου. Εισάγοντας παραμέτρους όπως το σημαντικό ύψος κύματος, τα μποφόρ κλπ. η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της μονάδας θα είναι ακόμα πιο ακριβής και η ευαισθησία (sensitivity) ακόμα υψηλότερη.

Τέλος ακόμα μια πρόταση για επέκταση του μοντέλου είναι ο συνδυασμός του μοντέλου με οικονομικές μετρήσεις και στοιχεία ώστε να δίνεται στο χρήστη και μια οικονομική εικόνα κάθε περίπτωσης. Συγκεκριμένα προτείνεται η δυνατότητα εισαγωγής του κόστους κάθε μεγέθους και τα οικονομικά στοιχεία των ναυλώσεων ώστε να δημιουργείται ένα πλήρες οικονομικό προφίλ της λειτουργίας του FSRU. Με την παραπάνω προσθήκη η κάθε μελέτη περίπτωσης θα έχει και οικονομικό χαρακτήρα και η λήψη αποφάσεων θα είναι πιο εύκολη.

7. Παράρτημα

```

1 - PF11=3400/3600; PF12=3400/3600; PF13=3400/3600; PF14=3400/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC1 TANK 1,2,3,4%
2 - PF21=0/3600; PF22=0/3600; PF23=0/3600; PF24=0/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC2 TANK 1,2,3,4%
3 - PF31=0/3600; PF32=0/3600; PF33=0/3600; PF34=0/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC3 TANK 1,2,3,4%
4 - PF41=0/3600; PF42=0/3600; PF43=0/3600; PF44=0/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC4 TANK 1,2,3,4%
5 - PF51=0/3600; PF52=0/3600; PF53=0/3600; PF54=0/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC5 TANK 1,2,3,4%
6 - FRL11=100; FRL12=100; FRL13=100; FRL14=100; %FILLING RATIO(%) OF LNGC1 TANK 1,2,3,4%
7 - FRL21=0; FRL22=0; FRL23=0; FRL24=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC2 TANK 1,2,3,4%
8 - FRL31=0; FRL32=0; FRL33=0; FRL34=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC3 TANK 1,2,3,4%
9 - FRL41=0; FRL42=0; FRL43=0; FRL44=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC4 TANK 1,2,3,4%
10 - FRL51=0; FRL52=0; FRL53=0; FRL54=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC5 TANK 1,2,3,4%
11 - TCL11=35000; TCL12=42182; TCL13=42182; TCL14=37096.0; %TANK CAPACITY OF LNGC1 TANK 1,2,3,4%
12 - TCL21=0; TCL22=0; TCL23=0; TCL24=0; %TANK CAPACITY OF LNGC2 TANK 1,2,3,4%
13 - TCL31=0; TCL32=0; TCL33=0; TCL34=0; %TANK CAPACITY OF LNGC3 TANK 1,2,3,4%
14 - TCL41=0; TCL42=0; TCL43=0; TCL44=0; %TANK CAPACITY OF LNGC4 TANK 1,2,3,4%
15 - TCL51=0; TCL52=0; TCL53=0; TCL54=0; %TANK CAPACITY OF LNGC5 TANK 1,2,3,4%
16 - TFL11=TCL11*FRL11/100;TFL12=TCL12*FRL12/100;TFL13=TCL13*FRL13/100;TFL14=TCL14*FRL14/100;%TANK FILLING OF LNGC1%
17 - TFL21=TCL21*FRL21/100;TFL22=TCL22*FRL22/100;TFL23=TCL23*FRL23/100;TFL24=TCL24*FRL24/100;%TANK FILLING OF LNGC2%
18 - TFL31=TCL31*FRL31/100;TFL32=TCL32*FRL32/100;TFL33=TCL33*FRL33/100;TFL34=TCL34*FRL34/100;%TANK FILLING OF LNGC3%
19 - TFL41=TCL41*FRL41/100;TFL42=TCL42*FRL42/100;TFL43=TCL43*FRL43/100;TFL44=TCL44*FRL44/100;%TANK FILLING OF LNGC4%
20 - TFL51=TCL51*FRL51/100;TFL52=TCL52*FRL52/100;TFL53=TCL53*FRL53/100;TFL54=TCL54*FRL54/100;%TANK FILLING OF LNGC5%
21 - FRF1=100;FRF2=100;FRF3=100;FRF4=100; %FILLING RATIO OF FSRU TANK1%
22 - TCF1=35000; TCF2=42182; TCF3=42182; TCF4=37096.0; %TANK CAPACITY OF FSRU TANK 1,2,3,4%
23 - TFF1=TCF1*FRF1/100;TFF2=TCF2*FRF2/100;TFF3=TCF3*FRF3/100;TFF4=TCF4*FRF4/100; %TANK FILLING OF FSRU%
24 - LIMIT=2000; %FSRU TANK LIMIT FOR GAS DISCHARGE%
25 - DF1=300/3600; DF2=300/3600; DF3=300/3600; DF4=300/3600; %DISCHARGE FLOW FOR GAS TANK1,2,3,4%
26 - counter1=0;
27 - totalcounter=4;
28 - state=[4,3,2,1];

```

Εικόνα 49. Κώδικας αρχικοποίησης για την πρώτη περίπτωση

```

1 - PF11=3400/3600; PF12=3400/3600; PF13=3400/3600; PF14=3400/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC1 TANK 1,2,3,4%
2 - PF21=3400/3600; PF22=3400/3600; PF23=3400/3600; PF24=3400/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC2 TANK 1,2,3,4%
3 - PF31=3400/3600; PF32=3400/3600; PF33=3400/3600; PF34=3400/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC3 TANK 1,2,3,4%
4 - PF41=0/3600; PF42=0/3600; PF43=0/3600; PF44=0/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC4 TANK 1,2,3,4%
5 - PF51=0/3600; PF52=0/3600; PF53=0/3600; PF54=0/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC5 TANK 1,2,3,4%
6 - FRL11=100; FRL12=100; FRL13=100; FRL14=100; %FILLING RATIO(%) OF LNGC1 TANK 1,2,3,4%
7 - FRL21=100; FRL22=100; FRL23=100; FRL24=100; %FILLING RATIO(%) OF LNGC2 TANK 1,2,3,4%
8 - FRL31=100; FRL32=100; FRL33=100; FRL34=100; %FILLING RATIO(%) OF LNGC3 TANK 1,2,3,4%
9 - FRL41=0; FRL42=0; FRL43=0; FRL44=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC4 TANK 1,2,3,4%
10 - FRL51=0; FRL52=0; FRL53=0; FRL54=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC5 TANK 1,2,3,4%
11 - TCL11=35000; TCL12=42182; TCL13=42182; TCL14=37096.0; %TANK CAPACITY OF LNGC1 TANK 1,2,3,4%
12 - TCL21=35000; TCL22=42182; TCL23=42182; TCL24=37096.0; %TANK CAPACITY OF LNGC2 TANK 1,2,3,4%
13 - TCL31=35000; TCL32=42182; TCL33=42182; TCL34=37096.0; %TANK CAPACITY OF LNGC3 TANK 1,2,3,4%
14 - TCL41=0; TCL42=0; TCL43=0; TCL44=0; %TANK CAPACITY OF LNGC4 TANK 1,2,3,4%
15 - TCL51=0; TCL52=0; TCL53=0; TCL54=0; %TANK CAPACITY OF LNGC5 TANK 1,2,3,4%
16 - TFL11=TCL11*FRL11/100;TFL12=TCL12*FRL12/100;TFL13=TCL13*FRL13/100;TFL14=TCL14*FRL14/100;%TANK FILLING OF LNGC1%
17 - TFL21=TCL21*FRL21/100;TFL22=TCL22*FRL22/100;TFL23=TCL23*FRL23/100;TFL24=TCL24*FRL24/100;%TANK FILLING OF LNGC2%
18 - TFL31=TCL31*FRL31/100;TFL32=TCL32*FRL32/100;TFL33=TCL33*FRL33/100;TFL34=TCL34*FRL34/100;%TANK FILLING OF LNGC3%
19 - TFL41=TCL41*FRL41/100;TFL42=TCL42*FRL42/100;TFL43=TCL43*FRL43/100;TFL44=TCL44*FRL44/100;%TANK FILLING OF LNGC4%
20 - TFL51=TCL51*FRL51/100;TFL52=TCL52*FRL52/100;TFL53=TCL53*FRL53/100;TFL54=TCL54*FRL54/100;%TANK FILLING OF LNGC5%
21 - FRF1=100;FRF2=100;FRF3=100;FRF4=100; %FILLING RATIO OF FSRU TANK1%
22 - TCF1=35000; TCF2=42182; TCF3=42182; TCF4=37096.0; %TANK CAPACITY OF FSRU TANK 1,2,3,4%
23 - TFF1=TCF1*FRF1/100;TFF2=TCF2*FRF2/100;TFF3=TCF3*FRF3/100;TFF4=TCF4*FRF4/100; %TANK FILLING OF FSRU%
24 - LIMIT=2000; %FSRU TANK LIMIT FOR GAS DISCHARGE%
25 - DF1=300/3600; DF2=300/3600; DF3=300/3600; DF4=300/3600; %DISCHARGE FLOW FOR GAS TANK1,2,3,4%
26 - counter1=0;
27 - totalcounter=4;
28 - state=[4,3,2,1];

```

Εικόνα 50 Κώδικας αρχικοποίησης για τη δεύτερη περίπτωση

```

1 - PF11=3400/3600; PF12=3400/3600; PF13=3400/3600; PF14=3400/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC1 TANK 1,2,3,4%
2 - PF21=3200/3600; PF22=3200/3600; PF23=3200/3600; PF24=3200/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC2 TANK 1,2,3,4%
3 - PF31=3000/3600; PF32=3000/3600; PF33=3000/3600; PF34=3000/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC3 TANK 1,2,3,4%
4 - PF41=0/3600; PF42=0/3600; PF43=0/3600; PF44=0/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC4 TANK 1,2,3,4%
5 - PF51=0/3600; PF52=0/3600; PF53=0/3600; PF54=0/3600; %PUMP FLOW FROM LNGC5 TANK 1,2,3,4%
6 - FRL11=100; FRL12=100; FRL13=100; FRL14=100; %FILLING RATIO(%) OF LNGC1 TANK 1,2,3,4%
7 - FRL21=0; FRL22=0; FRL23=0; FRL24=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC2 TANK 1,2,3,4%
8 - FRL31=0; FRL32=0; FRL33=0; FRL34=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC3 TANK 1,2,3,4%
9 - FRL41=0; FRL42=0; FRL43=0; FRL44=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC4 TANK 1,2,3,4%
10 - FRL51=0; FRL52=0; FRL53=0; FRL54=0; %FILLING RATIO(%) OF LNGC5 TANK 1,2,3,4%
11 - TCL11=35000; TCL12=42182; TCL13=42182; TCL14=37096.0; %TANK CAPACITY OF LNGC1 TANK 1,2,3,4%
12 - TCL21=30360; TCL22=37260; TCL23=37260; TCL24=33120; %TANK CAPACITY OF LNGC2 TANK 1,2,3,4%
13 - TCL31=28380; TCL32=34830; TCL33=34830; TCL34=30960; %TANK CAPACITY OF LNGC3 TANK 1,2,3,4%
14 - TCL41=0; TCL42=0; TCL43=0; TCL44=0; %TANK CAPACITY OF LNGC4 TANK 1,2,3,4%
15 - TCL51=0; TCL52=0; TCL53=0; TCL54=0; %TANK CAPACITY OF LNGC5 TANK 1,2,3,4%
16 - TFL11=TCL11*FRL11/100;TFL12=TCL12*FRL12/100;TFL13=TCL13*FRL13/100;TFL14=TCL14*FRL14/100;%TANK FILLING OF LNGC1%
17 - TFL21=TCL21*FRL21/100;TFL22=TCL22*FRL22/100;TFL23=TCL23*FRL23/100;TFL24=TCL24*FRL24/100;%TANK FILLING OF LNGC2%
18 - TFL31=TCL31*FRL31/100;TFL32=TCL32*FRL32/100;TFL33=TCL33*FRL33/100;TFL34=TCL34*FRL34/100;%TANK FILLING OF LNGC3%
19 - TFL41=TCL41*FRL41/100;TFL42=TCL42*FRL42/100;TFL43=TCL43*FRL43/100;TFL44=TCL44*FRL44/100;%TANK FILLING OF LNGC4%
20 - TFL51=TCL51*FRL51/100;TFL52=TCL52*FRL52/100;TFL53=TCL53*FRL53/100;TFL54=TCL54*FRL54/100;%TANK FILLING OF LNGC5%
21 - FRF1=100;FRF2=100;FRF3=100;FRF4=100; %FILLING RATIO OF FSRU TANK1%
22 - TCF1=35000; TCF2=42182; TCF3=42182; TCF4=37096.0; %TANK CAPACITY OF FSRU TANK 1,2,3,4%
23 - TFF1=TCF1*FRF1/100;TFF2=TCF2*FRF2/100;TFF3=TCF3*FRF3/100;TFF4=TCF4*FRF4/100; %TANK FILLING OF FSRU%
24 - LIMIT=2000; %FSRU TANK LIMIT FOR GAS DISCHARGE%
25 - DF1=300/3600; DF2=300/3600; DF3=300/3600; DF4=300/3600; %DISCHARGE FLOW FOR GAS TANK1,2,3,4%
26 - counter1=0;
27 - totalcounter=4;
28 - state=[4,3,2,1];

```

Εικόνα 51. Κώδικας αρχικοποίησης για τη τρίτη περίπτωση

8.Βιβλιογραφία

1. Chroni, D., Master Thesis, (2013), "Simulation of the discharging/loading procedure of tankers"
2. McGuire, White, (2000) "Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals", Third Edition, SIGGTO
3. Mokhatab, S., Mak, J., Valappil, J., Wood, D., (2014), "Handbook of Liquefied Natural Gas"
4. International gas union (2019), "World LNG report"
5. International energy agency (2019), "World Energy Outlook 2019"
6. LNG TERMINAL 'REVITHOUSSA' Marine Procedures Manual, (2017)
7. Oil % Gas IQ (2019), "The FSRU Market Report 2019 and Beyond"
8. LNG Carrier Masters's Marine Services Manual, Port of Rotterdam
9. Mohd Shariq Khan, Surya Effendy, I.A. Karimi, Aref Wazwaz (2019), "Improving design and operation at LNG regasification terminals through a corrected storage tank model"
10. Mario R. Eden, Marianthi Ierapetritou and Gavin P. Towler, (2018), "Dynamic simulation of a LNG Regasification Terminal and Management of Boil-off Gas"
11. Dorde Dobrota, Branko Lalic, Ivan Komar, (2013), "Problem of Boil-off in LNG Supply Chain"
12. McKinsey (2019), "Global gas & LNG outlook to 2035"
13. The Oxford Institute for energy studies (2017), "The Outlook for Floating Storage and Regasification Units (FSRUs)"
14. The Oxford Institute for energy studies (2019), "Floating LNG Update – Liquefaction and Import Terminals"
15. Manos Migadis, (2017), "FSRU Must have items", DYNAGAS LTD.
16. MARAN GAS MARITIME INC. (2016), "MGM & FSRU Market Overview"
17. Enrico Briano, Claudia Caballini, Davide Modula, Poberto Revetria, Alessandro Testa, (2010), "A System Dynamics approach for managing the LNG procurement for an Offshore platform feeding a power plant"
18. Ian M. Trotter, Marilia Fernandes Maciel Gomes, Marcelo Jose Braga, Bjorn Brochmann, Ole Nikolai Lie, (2015), "Optimal LNG (liquefied natural gas) regasification scheduling for import terminals with storage"
19. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
20. <https://lngfacts.org/about-lng/history-of-lng/>
21. <https://exceleerateenergy.com/project/gnl-escobar-2/>
22. <https://www.vesselfinder.com/news/16495-Exceleerate-Energy-and-Maran-Gas-Maritime-Execute-Agreement-for-FSRU>
23. <https://www.nov.com/products/submerged-turret-loading>
24. <https://interfaxenergy.com/article/33853/indonesia-offers-to-collaborate-on-cambodian-lng-project>
25. <https://www.bairdmaritime.com/work-boat-world/offshore-world/offshore-extraction-and-processing/offshore-processing-storage/mol-signs-long-term-charter-with-hong-kong-lng-terminal-for-fsru/>
26. <https://www.tokyo-gas.co.jp/en/index.html>
27. <http://www.liquefiedgascarrier.com/LNG-discharging.html>
28. <http://www.liquefiedgascarrier.com/preparation-for-LNG-discharging.html>

29. <http://www.liquefiedgascarrier.com/drying-tanks.html>