

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Τμήμα Χημικών Μηχανικών**

**ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

**«Εκτίμηση επικινδυνότητας κατά τη μεταφορά  
Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου σε  
υγραεριοφόρο πλοίο μέσω χερσαίου τερματικού  
σταθμού»**



**Επιβλέπουσα καθηγήτρια : Μ. Κροκίδα**

**Φοιτήτρια : Βολάκη Φωτεινή**

**Αθήνα 2020**

## *ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ*

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες ΕΔΙΠ κ. Παναγιώτου Νίκο και κα. Κάρμα Σοφία, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση τους κατά τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να απευθύνω ευχαριστίες στη ναυτιλιακή εταιρία Minerva Marine Inc., για τη διάθεση χρήσιμου υλικού από τα υπό ναυπήγηση LNG δεξαμενόπλοιά της.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για τη στήριξη και συμπαράσταση καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

# ~ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ~

Περίληψη

Εισαγωγή

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Ενεργειακές ανάγκες 21<sup>ου</sup> αιώνα .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ενεργειακές προκλήσεις του 21 <sup>ου</sup> αιώνα με γνώμονα την κλιματική αλλαγή .....	1
1.2 Το Φυσικό Αέριο ως εναλλακτικό καύσιμο .....	2
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο.....</b>	<b>3</b>
2.1 Ορισμός.....	3
2.2 Αλυσίδα παραγωγής LNG .....	3
2.2.1 Εξόρυξη και Παραγωγή.....	4
2.2.2 Καθαρισμός και Υγροποίηση .....	4
2.2.3 Μεταφορά .....	7
2.2.4 Αποθήκευση και Διανομή.....	9
2.2.5 Επαναεριοποίηση .....	9
2.3 Ιδιότητες και σύσταση LNG .....	10
2.3.1 Χημική σύσταση .....	10
2.3.2 Σημείο βρασμού.....	11
2.3.3 Πυκνότητα και ειδικό βάρος.....	13
2.3.4 Αναφλεξιμότητα.....	13
2.3.5 Θερμοκρασία αυτανάφλεξης και φλόγας .....	16
2.4 Αέριο από το βρασμό LNG (Boil – off gas) .....	17
2.5 Κίνδυνοι που συνδέονται με το LNG .....	17
2.5.1 Κηλίδα LNG σε έδαφος και νερό χωρίς ανάφλεξη.....	18
2.5.2 Ανάφλεξη και Πυρκαγιές .....	19
2.5.3 Έκρηξη αερίου νέφους (Vapor Cloud Explosion VCE).....	22
2.5.4 Έκρηξη εκτονώμενου ατμού ζέοντος υγρού (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion BLEVE) .....	23
2.5.5 Κίνδυνος ανατροπής (Rollover).....	24
2.5.6 «Χτύπημα» (Sloshing).....	25
2.6 Παραδείγματα ατυχημάτων με LNG .....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Τεχνολογία Υγραεριοφόρων Πλοίων LNG .....</b>	<b>27</b>
3.1 Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια (IGC Code).....	27

3.2 Γενικά χαρακτηριστικά των υγραεριοφόρων πλοίων LNG.....	28
3.3 Σύστημα αποθήκευσης φορτίου που ορίζει ο Κώδικας.....	28
3.4 Τεχνικές προδιαγραφές κατασκευής και εξοπλισμού.....	30
3.4.1 Κατασκευή Δεξαμενών .....	31
3.4.1.1 Ανεξάρτητη Πρισματική Δεξαμενή, Τύπου Α.....	32
3.4.1.2 Ανεξάρτητη Πρισματική Δεξαμενή, Τύπου Β (SPB).....	32
3.4.1.3 Ανεξάρτητη Σφαιρική Δεξαμενή, Τύπου Β (Moss – Rosenberg).....	33
3.4.1.4 Ανεξάρτητη Κυλινδρική ή Διπλού Λοβού Δεξαμενή, Τύπου C.....	34
3.4.1.5 Δεξαμενή Μembrάνης.....	36
3.4.1.6 Οι πλέον χρησιμοποιούμενες.....	37
3.4.2 Σύστημα Σωληνώσεων .....	39
3.4.3 Εξοπλισμός του συστήματος αποθήκευσης φορτίου .....	41
3.4.3.1 Αντλίες.....	41
3.4.3.2 Συμπιεστές.....	43
3.4.3.3 Εναλλάκτες θερμότητας.....	43
3.4.3.4 Γεννήτρια αδρανούς αερίου, ξηρού αέρα ή αζώτου.....	44
3.4.3.5 Εξατμιστήρες.....	45
3.5 Επικίνδυνες Περιοχές .....	45
3.6 Συστήματα ελέγχου και συστήματα ασφαλείας .....	49
3.6.1 Σύστημα Απενεργοποίησης Έκτακτης Ανάγκης (ESD).....	49
3.6.2 Πυρασφάλεια .....	50
3.6.3 Συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς .....	52
3.7 Το LNG ως καύσιμο .....	53
3.7.1 Sulfur Cap 2020 .....	53
3.7.2 Διαχείριση του αερίου από τον βρασμό του LNG.....	53
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Χερσαίος Τερματικός Σταθμός LNG .....</b>	<b>56</b>
4.1 Τεχνολογία Χερσαίου Τερματικού Σταθμού .....	56
4.2 Δεξαμενές αποθήκευσης LNG τερματικού σταθμού .....	60
4.3 Διαχείριση του αερίου από τον βρασμό του LNG .....	63
4.4 Συστήματα ελέγχου και συστήματα ασφαλείας τερματικού σταθμού .....	65
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Διαδικασίες φορτω-εκφόρτωσης.....</b>	<b>68</b>
5.1 Έλεγχος συμβατότητας μεταξύ πλοίου και χερσαίου τερματικού σταθμού LNG.....	68
5.2 Ελλιμενισμός πλοίου .....	69

5.3 Διαδικασία φόρτωσης στο πρώτο ταξίδι.....	70
5.3.1 Ξήρανση.....	70
5.3.2 Αδρανοποίηση.....	71
5.3.3 Καθαρισμός.....	73
5.3.4 Ψύξη .....	74
5.4 Διαδικασία φόρτωσης εκτός του πρώτου ταξιδιού .....	75
5.5 Διαδικασία εκφόρτωσης .....	79
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Σενάρια ατυχημάτων κατά τη φορτω-εκφόρτωση LNG από χερσαίο τερματικό σταθμό σε πλοίο και εφαρμογή του λογισμικού ALOHA .....</b>	<b>83</b>
6.1 Γραφική ανάλυση σεναρίων ατυχημάτων LNG .....	83
6.2 Οριακές τιμές επιπτώσεων και ζώνες ασφαλείας.....	86
6.3 Ανάλυση σεναρίων ατυχημάτων .....	89
6.3.1 Ατύχημα 1: Οπή στη δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς και πλοίου.....	89
6.3.2 Ατύχημα 2: Ολική διάρρηξη δεξαμενής αποθήκευσης ξηράς και πλοίου .....	91
6.3.3 Ατύχημα 3: Οπή στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG και επιστροφής ατμών.....	92
6.3.3.1 Γρήγορη Μετάβαση Φάσης (Rapid Phase Transition RPT).....	93
6.3.4 Ατύχημα 4: Ολική διάρρηξη βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG και επιστροφής ατμών.....	86
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Αποτελέσματα και σχολιασμός.....</b>	<b>97</b>
7.1 Σενάριο ατυχημάτων 1: Οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς .....	97
7.2 Σενάριο ατυχημάτων 2: Ολική διάρρηξη δεξαμενής ξηράς.....	108
7.3 Σενάριο ατυχημάτων 3: Οπή στη δεξαμενή αποθήκευσης του πλοίου .....	118
7.4 Σενάριο ατυχημάτων 4: Ολική διάρρηξη δεξαμενής αποθήκευσης πλοίου.....	126
7.5 Σενάριο ατυχημάτων 5: Οπή στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG.....	132
7.6 Σενάριο ατυχημάτων 6: Ολική διάρρηξη βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG	139
7.7 Σενάριο ατυχημάτων 7: Οπή στον βραχίονα επιστροφής ατμών LNG .....	145
7.8 Σενάριο ατυχημάτων 8: Ολική διάρρηξη βραχίονα επιστροφής ατμών LNG .....	152
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Συμπεράσματα .....</b>	<b>158</b>

*Παραρτήματα*

*Βιβλιογραφία*

## ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΘΕΜΑΤΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εμφανίζει στοιχεία πρωτοτυπίας καθώς:

- 1) Αποτελεί μία από τις πρώτες εργασίες που κάνει χρήση του υπολογιστικού προγράμματος ALOHA για μοντελοποίηση κινδύνων που προέρχονται από διαφυγή LNG, με ικανοποιητικά αποτελέσματα, στη χώρα μας.
- 2) Τα σενάρια που επεξεργάστηκαν αποτελούν τα σενάρια εκείνα, τα οποία κατά κανόνα περιλαμβάνονται στα εγκεκριμένα Σχέδια Αντιμετώπισης Έκτακτης Ανάγκης Θαλάσσιας Ρύπανσης (Shipboard Marine Pollution Emergency Plan - SMPEP) των δεξαμενοπλοίων μεταφοράς LNG, στα οποία όμως λείπει η ποσοτικοποιημένη διαρροή και οι συνθήκες πρόκλησης και περιγράφονται μόνο τρόποι περιορισμού και αντιμετώπισης της. Επομένως τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν, στα σχέδια αυτά των πλοίων για πληρέστερη και ποσοτικοποιημένη περιγραφή των σεναρίων ατυχημάτων και ίσως και πιο αποτελεσματική αντιμετώπισή τους.
- 3) Τα αποτελέσματα της εργασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά το σχεδιασμό ενός νέου χερσαίου τερματικού σταθμού, καθώς είναι χρήσιμα για την κατάρτιση της μελέτης ασφαλείας της εγκατάστασης για τη διαμόρφωση του σχετικού ΣΑΤΑΜΕ ή αναβάθμιση του υπάρχοντος.
- 4) Η αναγνώριση των σεναρίων της εργασίας έλαβε υπόψη την οριοθέτηση των επικίνδυνων περιοχών ως προς την συγκέντρωση ατμών LNG, όπως αυτές αποτυπώνονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της διεθνούς σύμβασης SOLAS και τις σχετικές εγκυκλίους του IMO (Gas Dangerous Zones) και την εφαρμογή τους σε υπό κατασκευή ή πρόσφατα κατασκευασμένα ναυπηγημένα πλοία (Minerva Marine Inc.)
- 5) Χρησιμοποιήθηκαν οι εθνικές θεσμοθετημένες οριακές τιμές έκθεσης, για να εξαχθούν συμπεράσματα με βάση τα σενάρια ατυχημάτων.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η εκτίμηση επικινδυνότητας κατά την φόρτωση και εκφόρτωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου ΥΦΑ σε πλοίο από χερσαίο τερματικό σταθμό και το αντίστροφο, με τη βοήθεια του προγράμματος μοντελοποίησης κινδύνων, ALOHA. Αρχικά παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για το LNG, όπως η αλυσίδα παραγωγής, όλες οι ιδιότητες και η σύστασή του, καθώς και τα φαινόμενα που μπορούν να προκύψουν λόγω πιθανής διαρροής του από τις αντίστοιχες δεξαμενές αποθήκευσης. Στη συνέχεια αναλύεται η τεχνολογία ενός τυπικού υγραεριοφόρου πλοίου LNG καθώς και του χερσαίου τερματικού σταθμού, και συγκεκριμένα το σύστημα αποθήκευσης φορτίου αυτών, ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητή η διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης, που ακολουθεί. Στο υπολογιστικό μέρος της εργασίας μελετώνται οκτώ διαφορετικά σενάρια ατυχημάτων, διαρροής LNG ή ολικής διάρρηξης των δεξαμενών αποθήκευσης και των βραχιόνων φορτω-εκφόρτωσης. Οι κίνδυνοι που προσδιορίζονται με τη βοήθεια του λογισμικού ALOHA είναι η τοξικότητα, η θερμική ακτινοβολία και η υπερπίεση λόγω ωστικού κύματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξετάζεται τόσο η απελευθέρωση LNG σε ξηρή επιφάνεια, όσο και σε υγρή, όπου στην τελευταία μελετάται το φαινόμενο της γρήγορης μετάβασης φάσης. Σε κάθε περίπτωση, εξετάζονται οι αντίστοιχες επιπτώσεις που προκύπτουν από την μοντελοποίηση, ενώ απεικονίζονται διαγραμματικά και αριθμητικά οι επικίνδυνες ζώνες - ζώνες ασφαλείας. Μετά την καταγραφή λοιπόν των πιο πιθανών σεναρίων ατυχημάτων, ως τμήμα μελέτης ασφάλειας της εγκατάστασης και μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε ότι το δυσμενέστερο σενάριο, τόσο για την ίδια την εγκατάσταση αλλά και την παρακείμενη περιοχή, είναι η ολική διάρρηξη της δεξαμενής ξηράς, λόγω υπερπλήρωσης. Επιπλέον, η αύξηση της πληρότητας της δεξαμενής καθώς και η μείωση του ύψους της οπής από τον πυθμένα επεκτείνουν τις ζώνες επικινδυνότητας, ενώ ο τετραπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα στα σενάρια κατά τα οποία δημιουργείται οπή, μειώνει τις αποστάσεις των ζωνών. Τέλος παρατηρήθηκε πως η διαρροή LNG στο νερό αποτελεί δυσμενέστερο σενάριο απ'ότι η διαρροή σε ξηρή επιφάνεια και ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε διαφορετικούς κινδύνους, λόγω της μεταβολής της κατάστασης του αποθηκευμένου LNG.

Λέξεις- κλειδιά: Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο, υγραεριοφόρο πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ, διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης, χερσαίος τερματικός σταθμός, κίνδυνος, ζώνες επικινδυνότητας

## **ABSTRACT**

The subject of the present bachelor's thesis is the assessment of risk that may appear, while loading and unloading Liquefied Natural Gas LNG from an LNG Gas Tanker to a terminal, and the opposite, with the help of the hazard modeling program, ALOHA. At first, general LNG data are presented, such as the LNG value chain, all its properties and composition, as well as the phenomena that may occur due to its possible leakage, from the storage tanks. Then, the technology of a typical LNG Carrier and a typical LNG terminal are analyzed, and in particular their cargo storage system, in order to understand better the loading and unloading process that follows. In the computational part of the work, eight different scenarios of accidents are studied, leakage of LNG or total fracture of storage tanks and (un)loading arms. The risks that are determined with the help of ALOHA software, are toxicity, thermal radiation and overpressure due to shock. It is worth noticing, that both LNG release on dry and wet surface is considered, where in the last case, the phenomenon that is studied is rapid phase transition. In each case, the corresponding consequences resulting from the modeling are examined, while the dangerous zones - safety zones are depicted diagrammatically and numerically. After recording the most probable accident scenarios, as part of the safety study of the installation, and after comparing the results, most adverse scenario in terms of the effects, both for the installation and for the adjacent area, is resulting to be the total rupture of the terminal tank, due to overfilling. In addition, increasing the fullness of the tank and decreasing the height of the hole from the bottom, the danger zones are expanding, while the quadrupling of the air velocity in the scenarios where a hole is created reduces the distances of the zones. Finally it was observed, that the leakage of LNG into the water, is a worse scenario than the leakage in dry surface, and that the increase in temperature leads to different risks, due to change in the state of the stored LNG.

**Key-words:** Liquefied Natural Gas, LNG Gas Tanker, loading-unloading operation, LNG terminal, hazard, threat zones



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γεγονός ότι το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) κερδίζει συνεχώς έδαφος τα τελευταία χρόνια ως προς τη χρήση του σαν εναλλακτικό καύσιμο παγκοσμίως, λόγω του ότι θεωρείται πιο φιλικό προς το περιβάλλον. Ειδικότερα στον τομέα της ναυτιλίας, όλο και περισσότερα υγραεριοφόρα πλοία ναυπηγούνται δεδομένου ότι χρειάζονται τον μισό χρόνο περίπου χρόνο για να κατασκευαστούν από ό,τι ένας επίγειος τερματικός σταθμός, ενώ οι απαιτήσεις για διακίνηση LNG σε διάφορες χώρες συνεχώς αυξάνονται. Ο στόλος του LNG αριθμεί σήμερα 600 πλοία εκ των οποίων 500 στο νερό και 100 υπό ναυπήγηση. Όπως εκτιμούν οικονομικοί αναλυτές, το εμπόριο του LNG θα αυξάνει κατά 3% το λιγότερο ανά χρόνο φθάνοντας το 2030 από τα 290 εκατομμύρια τόνους στα 425 εκ. τόνους. Παρόλα αυτά η ασφαλής μεταφορά LNG αποτελεί μια σημαντική πρόκληση, ενώ κρίσιμο ρόλο παίζουν τόσο οι θέσεις των δεξαμενών, όσο και των δικτύων ανεφοδιασμού.

Αντικείμενο λοιπόν της διπλωματικής εργασίας είναι να γίνει εκτίμηση επικινδυνότητας κατά την μεταφορά LNG σε/από υγραεριοφόρα πλοία μέσω χερσαίων τερματικών σταθμών, αποσκοπώντας στην εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων για τους πιθανούς αποδέκτες.

Αναλυτικά οι κύριοι στόχοι της πτυχιακής είναι οι εξής:

- 1) η περιγραφή της κατάστασης του LNG, της επεξεργασίας που υφίσταται μέχρι να είναι έτοιμο για μεταφορά, καθώς και όλων των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του
- 2) η μελέτη όλων των πιθανών κινδύνων που σχετίζονται με το LNG
- 3) η ανάλυση της τεχνολογίας ενός δεξαμενοπλοίου μεταφοράς LNG και ολόκληρου του συστήματος αποθήκευσης φορτίου που περιέχει, σύμφωνα με τον Διεθνή Κώδικα για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια (IGC Code)
- 4) ο εντοπισμός και η αποτύπωση όλων των επικινδύνων περιοχών πάνω στο πλοίο LNG
- 5) η ανάλυση της τεχνολογίας ενός τυπικού χερσαίου τερματικού σταθμού και του εξοπλισμού που περιέχει
- 6) η λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας φόρτωσης και εκφόρτωσης LNG σε πλοίο και σε χερσαίο τερματικό σταθμό
- 7) η πραγματοποίηση ανάλυσης επικινδυνότητας, με τη μέθοδο της Fault Tree Analysis ανάλογα με την κατάσταση του LNG και άλλες σημαντικές παραμέτρους, ώστε να επιλεχθούν τα σενάρια ατυχημάτων που θα μελετηθούν
- 8) η παρουσίαση και η μελέτη οκτώ σεναρίων ατυχημάτων κατά τη φορτω-εκφόρτωση LNG, με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου ALOHA
- 9) η εύρεση πραγματικών δεδομένων, όσον αφορά τις παραμέτρους διαστασιολόγησης, συνθήκες αποθήκευσης, μετεωρολογικά δεδομένα και οριακές τιμές, για εισαγωγή στο πρόγραμμα, ώστε να ανταποκρίνονται τα σενάρια ατυχημάτων σε πραγματικές συνθήκες
- 10) η πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας για κάθε σενάριο
- 11) και τέλος η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ο σχολιασμός και η εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτά, με σκοπό τη συμβολή στη μελέτη ασφαλείας της εγκατάστασης, προς διαμόρφωση και του σχετικού ΣΑΤΑΜΕ (Γενικό Σχέδιο Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης)

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Ενεργειακές ανάγκες 21<sup>ου</sup> αιώνα

## 1.1 Ενεργειακές προκλήσεις του 21<sup>ου</sup> αιώνα με γνώμονα την κλιματική αλλαγή

Η ενέργεια είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας που θα επηρεάσει τη μορφή της κοινωνίας μας τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Το κόστος και η διαθεσιμότητα της ενέργειας επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της ζωής, την υγεία των εθνικών οικονομιών, τις σχέσεις μεταξύ των εθνών και τη σταθερότητα του περιβάλλοντος.

Μερικοί από τους βασικούς στόχους του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), που συμβαδίζουν και με τους Ευρωπαϊκούς στόχους, για την περίοδο 2021-2030, είναι η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, η αύξηση της συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην κατανάλωση ενέργειας και η επίτευξη σημαντικής εξοικονόμησης ενέργειας στην τελική κατανάλωση.<sup>[1]</sup> Η άμεση σχέση του πρώτου στόχου με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, τον καθιστά τον κυριότερο και μακροπρόθεσμο στόχο έως το έτος 2050, όπου προσδοκείται να επιτευχθεί μια μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, της τάξης του 85-90% κάτω από τα επίπεδα του 1990.

Η κλιματική αλλαγή που οφείλεται άμεσα η έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες και διακρίνεται από την «κλιματική μεταβλητότητα» που έχει φυσικά αίτια, όπως ορίστηκε στη Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές, αναφέρεται κυρίως σε μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών που εκτείνονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Μία από αυτές είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη, η αύξηση δηλαδή της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και των ωκεανών της γης, που οφείλεται στη δέσμευση ενός ποσοστού ηλιακής ακτινοβολίας, που έχει μετατραπεί σε θερμότητα, από τα αέρια του θερμοκηπίου και την επανεκπομπή του πίσω στη γη.<sup>[3]</sup>

Η συνεχής χρήση των ορυκτών καυσίμων συντελεί στην αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων αυτών (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, χλωροφθοράνθρακες, όζον κ.α.) στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, που μπορεί να αποβεί καταστροφική τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για ολόκληρο το οικοσύστημα. Για την αντιμετώπιση λοιπόν αυτών των προκλήσεων, υιοθετείται μια νέα αναπτυξιακή στρατηγική, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, που στοχεύει να μετατρέψει την ΕΕ σε μια δίκαιη και ευημερούσα κοινωνία, με μια σύγχρονη οικονομικά αποδοτική και ανταγωνιστική οικονομία, όπου δεν θα υπάρχουν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2050 και όπου η οικονομική ανάπτυξη αποσυνδέεται από τη χρήση πόρων. Τα βασικά στοιχεία της συμφωνίας αυτής είναι η παροχή καθαρής, προσιτής και ασφαλούς ενέργειας, η κινητοποίηση της βιομηχανίας για μια καθαρή κυκλική οικονομία, η διατήρηση και αποκατάσταση των οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας και η δημιουργία ενός περιβάλλοντος χωρίς τοξικά.<sup>[4]</sup>

Εστιάζοντας και πάλι στην επείγουσα πρόκληση της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, μία από τις λύσεις του φαινομένου που προτείνει το Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ (WEF), είναι η καθαρή ισχύς, που αποτελεί την κεντρική ιδέα της απανθρακοποίησης και των στόχων παραγωγής ηλεκτρισμού. Βασισμένη σε αυτή, παραθέτει διάφορες τεχνολογικές καινοτομίες, που θα επηρεάσουν την επόμενη δεκαετία, μειώνοντας σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.<sup>[5]</sup>

## 1.2 Το Φυσικό Αέριο ως εναλλακτικό καύσιμο

Ένα από τα βασικά μέσα για την επίτευξη των στόχων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, αποτελεί η διεύρυνση της χρήσης του φυσικού αερίου στην τελική κατανάλωση λόγω των χρηστικών, οικονομικών καθώς και περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων του. Το φυσικό αέριο ουσιαστικά αποτελεί μια «γέφυρα» που συνδέει το σημερινό κυριαρχούμενο από ορυκτά καύσιμα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, από το οποίο επιδιώκεται σταδιακή απεξάρτηση, με το μελλοντικό των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.<sup>[1]</sup>

Με χρήσεις στην ηλεκτροπαραγωγή, τη βιομηχανία, τον οικιακό και εμπορικό τομέα, την αυτοκίνηση και τη γεωργία, το φυσικό αέριο αποτελεί την καθαρότερη πηγή πρωτογενούς ενέργειας μετά τις ΑΠΕ κυρίως για δύο λόγους. Αφενός παρουσιάζει αυξημένο βαθμό απόδοσης κατά την καύση του και συνεπώς επιτυγχάνεται ανάλογη εξοικονόμηση ενέργειας κατά την παραγωγή της θερμικής ενέργειας, αφετέρου οι εκπεμπόμενοι ρύποι είναι σημαντικά χαμηλότεροι σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Επιπλέον, παρουσιάζει πολύ χαμηλότερο κόστος σε σχέση με άλλες συμβατικές τεχνολογίες, παρέχει πολλαπλές δυνατότητες προμήθειας, μεταφοράς και αποθήκευσης και αποτελεί πρώτη ύλη για παραγωγή υδρογόνου.<sup>[1]</sup>

Αναγκαία λοιπόν είναι η ανάπτυξη υποδομών μεταφοράς και διανομής, ώστε να δοθεί η δυνατότητα πρόσβασης στη χρήση φυσικού αερίου σε μεγαλύτερα ποσοστά τελικών καταναλωτών, αφού ως ενδιάμεσο καύσιμο το φυσικό αέριο θα χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε όλους τους τομείς τελικής κατανάλωσης τα επόμενα χρόνια.

Ο ρόλος της παγκόσμιας ναυτιλιακής βιομηχανίας είναι ιδιαίτερα σημαντικός στη μεταφορά ενέργειας και το υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas, LNG) έχει τεθεί στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων φυσικού αερίου, μεταξύ περιοχών που μεσολαβεί θάλασσα, προκάλεσε άνοδο στην αγορά των υγραεριοφόρων πλοίων, δεξαμενοπλοίων που μεταφέρουν το φυσικό αέριο σε υγρή μορφή, τα τελευταία χρόνια και υπάρχουν προοπτικές για μεγαλύτερη και ταχύτερη εξέλιξη του συγκεκριμένου κλάδου. Ο στόλος LNG αριθμεί σήμερα 600 πλοία εκ των οποίων 500 στο νερό και 100 υπό ναυπήγηση με συμμετοχή κυρίως Ελλήνων και Κινέζων πλοιοκτητών που πρωταγωνιστούν σε αυτήν την ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά.<sup>[2]</sup>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο

### 2.1 Ορισμός

Ως Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (Liquefied Natural Gas, LNG) ορίζεται το φυσικό αέριο που έχει ψυχθεί ως τους  $-160^{\circ}\text{C}$  σε κατάσταση ατμοσφαιρικής πίεσης στην οποία συμπυκνώνεται και μετατρέπεται σε υγρό. Η μετατροπή αυτή είναι προσωρινή και στοχεύει στην διευκόλυνση της αποθήκευσης και διανομής του φυσικού αερίου, καθώς σε υγρή μορφή το φυσικό αέριο καταλαμβάνει το 1/600 του χώρου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως όταν η μεταφορά μέσω αγωγών δεν είναι εφικτή για ποικίλους λόγους.

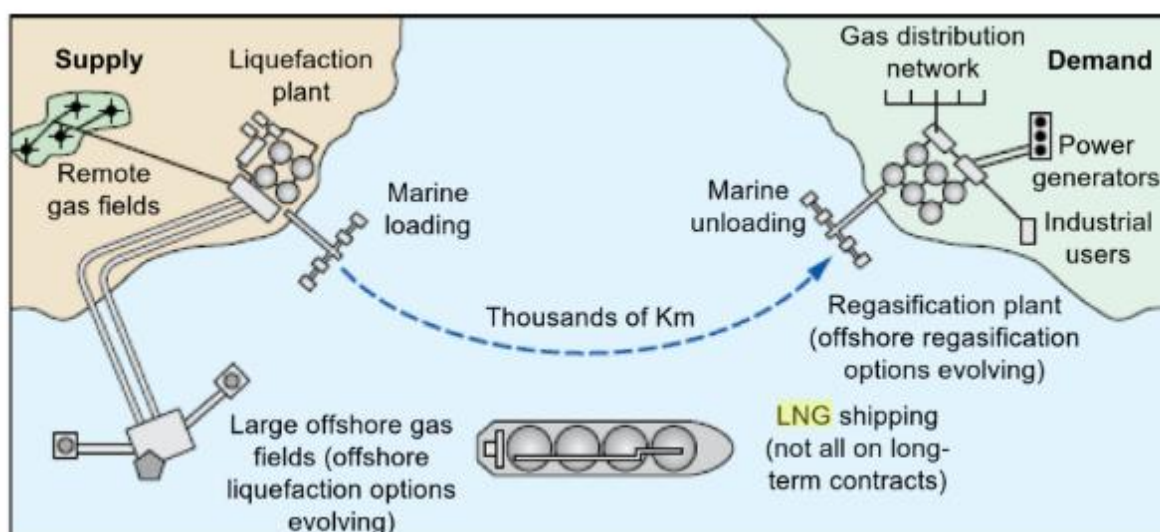
Αξίζει να σημειωθεί πως το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο δεν είναι συμπιεσμένο αέριο, αλλά κρυογενικό υγρό, το οποίο σχηματίζεται με ψυκτικά και δεν αποθηκεύεται υπό πίεση. Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο επιτυγχάνει μεγαλύτερη μείωση όγκου σε σχέση με το συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), έτσι ώστε η πυκνότητα ενέργειας του LNG να είναι 2,4 φορές υψηλότερη από αυτή του CNG ή 60% αυτής του πετρελαίου κίνησης.<sup>[6]</sup>

### 2.2 Αλυσίδα παραγωγής LNG

Για να είναι το LNG διαθέσιμο για χρήση σε μια χώρα, οι εταιρίες ενέργειας θα πρέπει να επενδύσουν σε διάφορες εγκαταστάσεις που συνδέονται και εξαρτώνται η μία από την άλλη.

Η αλυσίδα του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG value chain) αποτελείται από μια σειρά τεσσάρων αλληλεξαρτώμενων δραστηριοτήτων που συνδέουν το φυσικό αέριο στο έδαφος με τον τελικό καταναλωτή. Αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 και αναλύονται παρακάτω:<sup>[7]</sup>

- 1) Εξόρυξη και Παραγωγή Φυσικού Αερίου
- 2) Υγροποίηση και Καθαρισμός
- 3) Μεταφορά
- 4) Αποθήκευση και Διανομή



Εικόνα 1: Αλυσίδα Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου<sup>[7]</sup>

## 2.2.1 Εξόρυξη και Παραγωγή

Η εξόρυξη του φυσικού αερίου από την επιφάνεια της γης είναι το πρώτο βήμα της διαδικασίας. Ανάλογα τη θέση και το βάθος της εξόρυξης επιλέγονται διαφορετικές μεθοδολογίες γεώτρησης, με την προϋπόθεση βέβαια ότι μετά τον εντοπισμό του αερίου με ηλεκτρομαγνητικές και σεισμικές μελέτες, το μέγεθος του ταμιευτήρα και η ποιότητα του αερίου κρίνονται ικανοποιητικά και οικονομικά αξιοποιήσιμα.<sup>[8]</sup>

Στο φρέαρ της γεώτρησης τοποθετούνται ειδικά μηχανήματα που επιτρέπουν με ακουστικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους να προσδιορίσουν την πίεση, την θερμοκρασία, το πορώδες, την περιεκτικότητα σε νερό και την διαστρωμάτωση των γεωλογικών διατάξεων, ενώ ταυτόχρονα συλλέγονται δείγματα εδάφους ή βράχων για περαιτέρω έρευνα. Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών θα καθορίσει αν το υπό έρευνα κοίτασμα είναι και εμπορικά αξιοποιήσιμο. Η επιτυχής ολοκλήρωση των ερευνητικών εργασιών επιτρέπει την κατασκευή γεώτρησης για την εξόρυξη του αερίου. Η γεώτρηση που θα επιλεγθεί απαιτεί μια μόνιμη κατασκευή από ατσάλι, το οποίο προστατεύει από τις ωθήσεις των γαιών, και αποτελεί την είσοδο των εξορυκτικών μηχανισμών. Μεταξύ του ατσαλένιου περιβλήματος και της γης παρεμβάλλεται εγχεόμενο μπετόν, ώστε να αποτελέσουν ένα σώμα, και έτσι το φυσικό αέριο λόγω της πίεσης βρίσκει διέξοδο και οδηγείται στην επιφάνεια της πλατφόρμας.<sup>[9]</sup>

Στη θέση της εξόρυξης του φυσικού αερίου, εγκαθίσταται χαλύβδινος αγωγός μεταφοράς υψηλών αντοχών. Το αέριο μεταφέρεται με την επίτευξη διαφοράς πίεσης στην αρχή και το τέλος του αγωγού, ενώ κατά μήκος υπάρχουν βαλβίδες και αντλίες που διασφαλίζουν αυτή την διαφορά πίεσης, η οποία μειώνεται λόγω ύπαρξης τριβών.<sup>[9]</sup>

## 2.2.2 Καθαρισμός και Υγροποίηση

### Καθαρισμός Φυσικού Αερίου

Το φυσικό αέριο που εξάγεται από το έδαφος ονομάζεται «Feed» και είναι ακατέργαστο, επομένως η επεξεργασία του είναι απαραίτητη προτού καταναλωθεί και στοχεύει στην απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών (νερό, υδρόθειο, βαρείς υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα κ.α.) και στην ανάκτηση άλλων με οικονομική αξία (ήλιο, υγραέριο και συστατικά ελαφριάς νάφθας).<sup>[10][11]</sup>

Μέσω του αγωγού που περιγράφηκε στη φάση της εξόρυξης, το φυσικό αέριο μεταφέρεται στον σταθμό υγροποίησης όπου λαμβάνουν χώρα δύο κύριες διεργασίες, ο καθαρισμός του φυσικού αερίου και η υγροποίηση του.

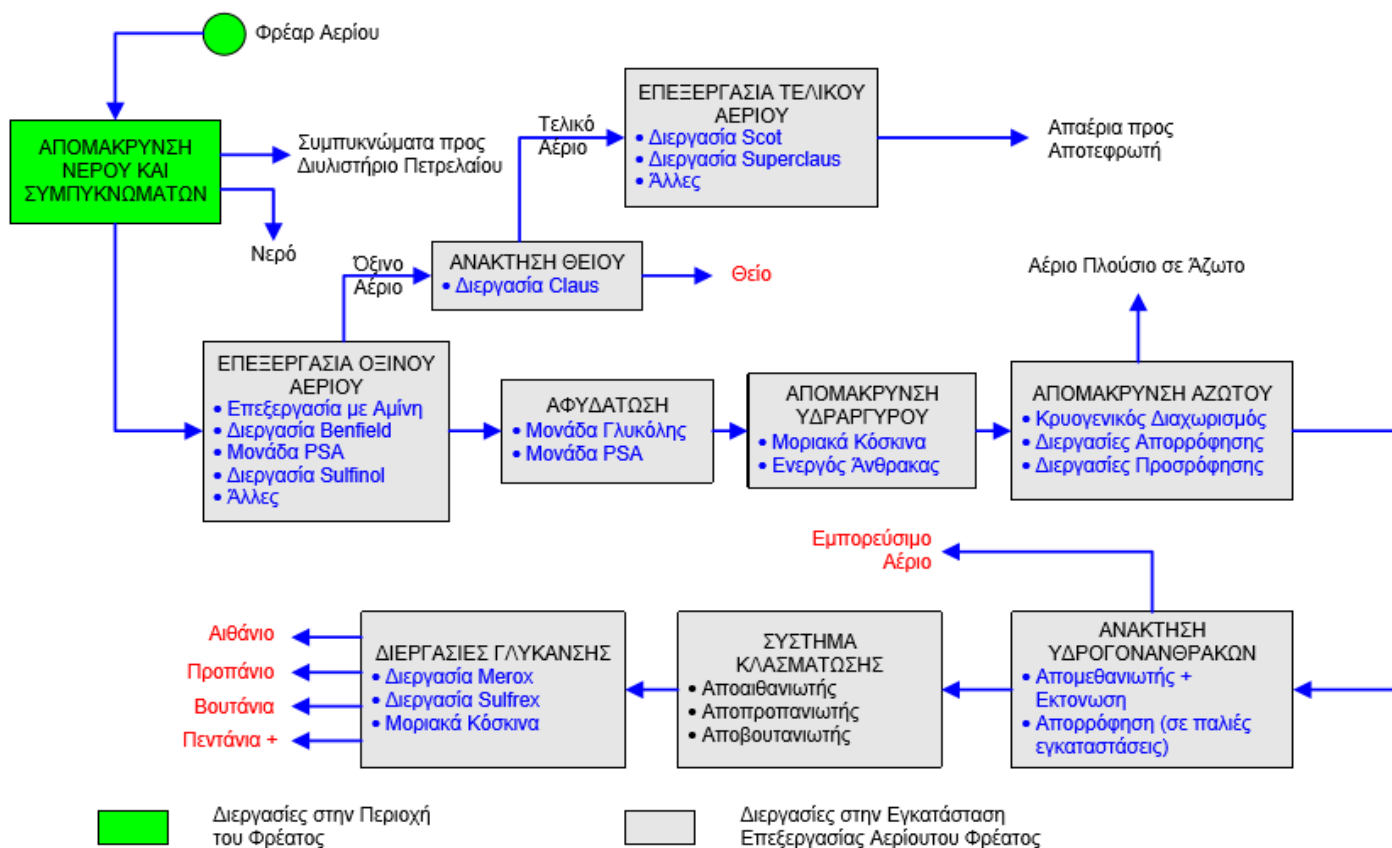
Αρχικά πραγματοποιείται αφυδάτωση του φυσικού αερίου για να αποφευχθεί η δημιουργία υγρής φάσης και επομένως η διφασική ροή στον αγωγό. Οι μέθοδοι αφυδάτωσης είναι ψύξη ή αλλιώς κρυογενική αφυδάτωση, απορρόφηση από κάποιο διαλύτη, επιφανειακή προσρόφηση σε κάποιο στερεό σώμα ή συνδυασμός αυτών. Η κρυογενική αφυδάτωση απομακρύνει το νερό και τους βαρείς υδρογονάνθρακες με προσθήκη αναστολέα σχηματισμού ιδρυτών. Για την απορρόφηση του νερού συνήθως χρησιμοποιείται ως διαλύτης η γλυκόλη, που είναι πλήρως αναμίξιμη με αυτό, έχει μεγάλη προσροφητική ικανότητα και αναγεννάται εύκολα, και σε μερικές περιπτώσεις η ενεργοποιημένη αλουμίνα που απορροφά νερό ακόμα καλύτερα. Αφυδάτωση με προσρόφηση πραγματοποιείται όταν το ποσοστό της υγρασίας είναι μικρό και

χρησιμοποιούνται μοριακά κόσκινα, silica gel κ.α. Γενικά ένα σημείο δρόσου του νερού της τάξης των  $-8^{\circ}\text{C}$  στην πίεση των αγωγών είναι επαρκές.<sup>[11][12]</sup>

Κάθε κοίτασμα φυσικού αερίου περιέχει και βαρύτερους υδρογονάνθρακες σε υγρή μορφή, οι οποίοι αποτελούν τα λεγόμενα υγρά φυσικού αερίου (Natural Gas Liquid, NGL) που είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμα. Ο κύριος τρόπος απομάκρυνσης αυτών είναι το καθάρισμα των αερίων με ένα ορυκτέλαιο. Μετά την αφυδάτωση με γλυκόλη, το αέριο εκτονώνεται και ψύχεται στους  $-5^{\circ}\text{C}$ , για καθάρισμα τυχόν υγρασίας και γλυκόλης. Έπειτα περνά με αντίστροφο ροή από ένα πύργο με ορυκτέλαιο, στην ίδια χαμηλή θερμοκρασία, κι έτσι οι βαρείς υδρογονάνθρακες απορροφώνται. Η ανάκτηση των υδρογονανθράκων γίνεται τόσο για οικονομικούς λόγους όσο και πρακτικούς, αφού έτσι αποφεύγεται η δημιουργία συμπυκνωμάτων στους αγωγούς χαμηλής πίεσης των συστημάτων διανομής.<sup>[11][12]</sup>

Στη συνέχεια λαμβάνουν χώρα διεργασίες απομάκρυνσης των όξινων συστατικών (υδρόθειο και διοξείδιο του άνθρακα), τα οποία μπορούν να υγροποιηθούν κατά την ψύξη του αερίου ή ακόμη και να σχηματίσουν δυσθερμαγωγό και αποφρακτικό πάγο και έτσι να αποκτήσουν διαβρωτικό ρόλο στους εναλλάκτες σε συνδυασμό με ίχνη υδραργύρου.<sup>[14]</sup> Η αποθείωση του αερίου γίνεται με τη βοήθεια βασικών διαλυτών (όπως η μονοαιθανολαμίνη) όταν το θείο υπερβαίνει τα  $0.0055 \text{ g/m}^3$  και είναι αναγκαία διότι εκτός από διαβρωτικό, το υδρόθειο κατά την καύση του δίνει διοξείδιο του θείου που είναι ατμοσφαιρικός ρυπαντής.<sup>[14]</sup> Το διοξείδιο του άνθρακα, απομακρύνεται με θερμό διάλυμα  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Η απομάκρυνση αυτή είναι απαραίτητη καθώς το διοξείδιο του άνθρακα παγώνει σε μια θερμοκρασία πάνω από το ατμοσφαιρικό σημείο βρασμού του LNG και παράλληλα δημιουργεί σταθερά ανθρακικά άλατα που δυσκολεύουν την αμίνη να δεσμεύσει το υδρόθειο.<sup>[12][13]</sup>

Τα βασικά στάδια επεξεργασίας του φυσικού αερίου, πριν αυτό υποβληθεί για υγροποίηση παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.



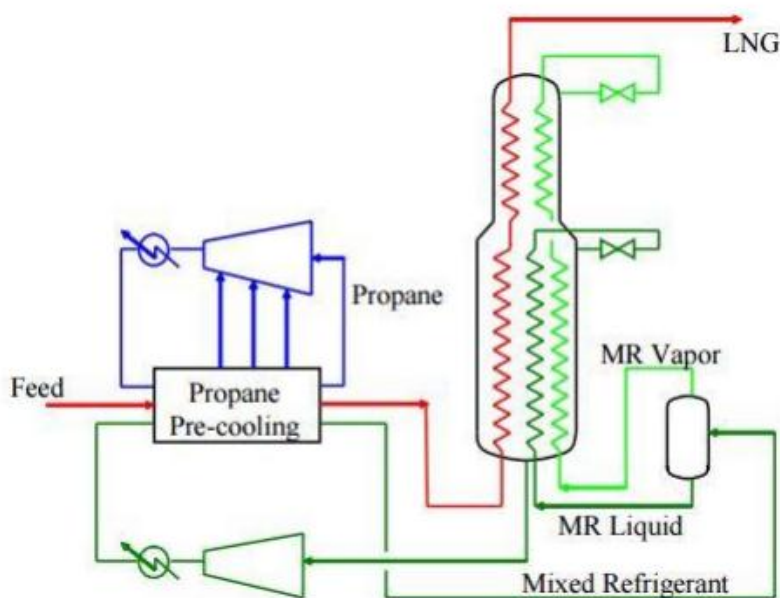
Εικόνα 2: Βασικά στάδια καθαρισμού φυσικού αερίου<sup>[11]</sup>

## Υγροποίηση Φυσικού Αερίου

Για να αποκτήσει τη μέγιστη μείωση όγκου, το φυσικό αέριο υγροποιείται μέσω κρυογενικής τεχνολογίας που καθιστά δυνατή την ψύξη του αερίου σε θερμοκρασία περίπου  $-162^{\circ}\text{C}$  ή  $-259^{\circ}\text{F}$  και ατμοσφαιρική πίεση. Υπάρχουν τρεις τρόποι παραγωγής ψύξης σε βιομηχανική κλίμακα: η ελεύθερη εκτόνωση (μέθοδος εκτόνωσης Joule-Thomson), εκτόνωση μέσω προσφοράς μηχανικού έργου (μέθοδος Claude) και μέσω διαδοχικών κύκλων συμπίκνωσης-εξάτμισης (κύκλος Pictet). Για την υγροποίηση του φυσικού αερίου, ιδιαίτερα σε μεγάλη κλίμακα, στην πράξη χρησιμοποιείται μόνο η τελευταία μέθοδος.<sup>[11]</sup>

Οι κύριες διεργασίες υγροποίησης του φυσικού αερίου είναι τέσσερις: (α) η μέθοδος C3MR, (β) Shell DMR, (γ) Cascade και (δ) Linde.

(α) Η μέθοδος C3MR βασίζεται στο προψυγμένο (pre-cooled) προπάνιο ως ψυκτικό μίγμα και αποτελείται από δύο βασικούς κύκλους ψύξης: τον κύκλο πρόψυξης και τον κύκλο υγροποίησης και υπόψυξης. Ο κύκλος πρόψυξης χρησιμοποιεί καθαρό προπάνιο σε τρία ή τέσσερα επίπεδα πίεσης και μπορεί να κρυώσει το αέριο διεργασίας ως τους  $-40^{\circ}\text{C}$ . Ο κύκλος υγροποίησης και υπόψυξης χρησιμοποιεί μικό ψυκτικό μέσο (MR) που αποτελείται από άζωτο, μεθάνιο, αιθάνιο και προπάνιο το οποίο χωρίζεται σε αέριο και υγρό ρεύμα. Το ψυκτικό χρησιμοποιείται για την υγροποίηση και υπόψυξη της τροφοδοσίας από συνήθως  $-35^{\circ}\text{C}$  στο εύρος θερμοκρασίας  $-150^{\circ}\text{C}$  έως  $-160^{\circ}\text{C}$ .<sup>[11]</sup>



**Εικόνα 3: Μέθοδος C3MR για υγροποίηση φυσικού αερίου<sup>[11]</sup>**

(β) Η μέθοδος DMR (Dual Mixed Refrigerant) δηλαδή διπλού ψυκτικού μέσου, είναι παραπλήσια της μεθόδου C3MR. Η μόνη διαφορά είναι η χρήση ενός δεύτερου ψυκτικού μέσου στη διαδικασία της πρόψυξης. Η χρήση δύο κύκλων με μικό ψυκτικό μέσο επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση της ισχύος σε ένα σχεδιασμό με δύο μηχανικούς συμπιεστές, καθώς και τη διατήρηση λειτουργίας αυτών στην καλύτερη δυνατή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα διακυμάνσεων της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και σε μεταβολές της σύστασης του αερίου

τροφοδοσίας. Η διαδικασία περιλαμβάνει δύο στάδια ψύξης του φυσικού αερίου. Το πρώτο στάδιο ψύχει το φυσικό αέριο μέχρι τους  $-50^{\circ}\text{C}$ , ενώ το δεύτερο μέχρι τους  $-160^{\circ}\text{C}$ .<sup>[11]</sup>

(γ) Κατά τη μέθοδο Cascade το επεξεργασμένο αέριο τροφοδοσίας ψύχεται και υγροποιείται στους  $162^{\circ}\text{C}$  χρησιμοποιώντας κατά σειρά ως ψυκτικά προπάνιο, αιθυλένιο και μεθάνιο.<sup>[11]</sup>

Γενικά όσα περισσότερα στάδια ψύξης περιλαμβάνει η υγροποίηση τόσο πιο αποδοτική είναι, αφού η χρήση πολλών πολυβάθμιων συμπιεστών και εναλλακτών, οδηγούν σε περισσότερες συμπυκνώσεις και εκτονώσεις και άρα περισσότερα στάδια πτώσης θερμοκρασίας με διαδοχικές ομαλές μεταβολές διαφοράς ενθαλπιών. Αντίθετα οι βίαιες μεταβολές συνθηκών, οδηγούν σε μεγάλη απώλεια ωφέλιμης ενέργειας και άρα μεγάλο απωλεσθέν έργο.

### 2.2.3 Μεταφορά

Το τρίτο στάδιο της αλυσίδας Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου είναι η μεταφορά του στους καταναλωτές. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι: με αγωγό και με δεξαμενόπλοια.

#### Με αγωγό

Γενικά είναι προτιμητέα η μεταφορά του φυσικού αερίου με αγωγούς μέσω συμπίεσης, γι' αυτό και το μεγαλύτερο μέρος του παγκόσμιου φυσικού αερίου παραδίδεται μέσω αγωγών. Επειδή η παροχή του αερίου με αγωγό, εκτός από τις φυσικές ιδιότητες του αερίου, είναι συνάρτηση της διαμέτρου και της πτώσης πίεσης, η οικονομική αριστοποίηση απαιτεί προσεκτικούς υπολογισμούς των πιέσεων και αντοχής του αγωγού. Πρέπει η διαφορά πιέσεων να είναι τέτοια, ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός υγρού. Σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την παροχή του αερίου είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία, η διάβρωση από προσμίξεις, η συμπιεστότητα και το ιξώδες. Η διάμετρος ενός αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου συνήθως κυμαίνεται από 0.8 μέχρι 1.2 μέτρα. Οι υποσταθμοί συμπίεσης που τοποθετούνται σε διαστήματα κατά μήκος του αγωγού, ώστε να επιτυγχάνεται συνεχώς η υψηλή πίεση, πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε το επιπλέον κόστος να καλύπτεται από βελτιωμένη παροχή.<sup>[12]</sup> Το φυσικό αέριο εισέρχεται σε αυτούς αφού πρώτα συμπιεστεί από στρόβιλο, μοτέρ ή κινητήρα. Οι σταθμοί μέτρησης εγκαθίστανται επίσης σε όλο το δίκτυο αγωγών για την παρακολούθηση της πίεσης, της ροής και των διαρροών.<sup>[15]</sup>

Το πολύπλοκο αυτό δίκτυο περιλαμβάνει τρεις τύπους αγωγών κατά μήκος της διαδρομής μεταφοράς:

- 1) Σύστημα αγωγών συλλογής : το σύστημα συλλογής περιλαμβάνει μικρούς αγωγούς χαμηλής πίεσης που μεταφέρουν ακατέργαστο φυσικό αέριο από το φρεάτιο στην εγκατάσταση επεξεργασίας.
- 2) Ενδοκρατικό / Διακρατικό σύστημα αγωγών: τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους είναι παρόμοια και έχουν και τον ίδιο στόχο, τη μεταφορά φυσικού αερίου από το εργοστάσιο επεξεργασίας στα κέντρα κατανάλωσης.
- 3) Σύστημα αγωγών διανομής: στόχος του συστήματος αυτού είναι η παροχή αερίου στους τελικούς καταναλωτές.<sup>[15]</sup>

Οι αγωγοί μεταφοράς Φυσικού Αερίου ανάλογα με την πίεση τους διακρίνονται σε (α) Αγωγούς υψηλής πίεσης (40 -100 bar), (β) Αγωγούς μέσης πίεσης (περίπου 20 bar) και (γ) Αγωγούς χαμηλής πίεσης (4-7 bar). Οι αγωγοί υψηλής και μέσης πίεσης μεταφέρουν οικονομικά μεγάλους όγκους αερίου, προσφέρουν ισορροπία στο σύστημα μεταφοράς και σχετική



ελαστικότητα, καθώς χρησιμεύουν και ως προσωρινοί χώροι αποθήκευσης του φυσικού αερίου. Το σύστημα τους αποτελείται από χαλύβδινους αγωγούς, μετρητικούς σταθμούς στα σημεία εισαγωγής αερίου στον αγωγό, παροχής αερίου σε πελάτες και σε σημεία ελέγχου, σταθμούς ρύθμισης πίεσης του αερίου, κυρίως σε διακλαδώσεις ή στα σημεία σύνδεσης με το δίκτυο μέσης πίεσης, σταθμούς ρύθμισης ροής του αερίου, βαννοστάσια, διατάξεις καθαρισμού του αερίου, μονάδες αφύγρανσης, όπου απαιτείται, συλλέκτες συμπυκνωμάτων και σταθμούς αποστολής και υποδοχής ξέστρων. Οι αγωγοί διανομής χαμηλής πίεσης χρησιμοποιούνται για την προμήθεια αερίου στις πόλεις επειδή, η χαμηλότερη πίεση αερίου προσφέρει μεγαλύτερη ασφάλεια, έχουν χαμηλότερο κόστος και τέλος η τελική χρήση αερίου γίνεται υπό ατμοσφαιρική πίεση. Αποτελούν ένα πολύ απλούστερο δίκτυο από αγωγούς πολυαιθυλενίου, που προσφέρει τη δυνατότητα ηλεκτρονικής παρακολούθησης, τηλεμετρίας, και μεταφοράς δεδομένων μέσω καλωδίων. Γενικά είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστή με ακρίβεια η θέση των αγωγών και αυτό γίνεται ευκολότερα στους αγωγούς υψηλής πίεσης.<sup>[11]</sup>

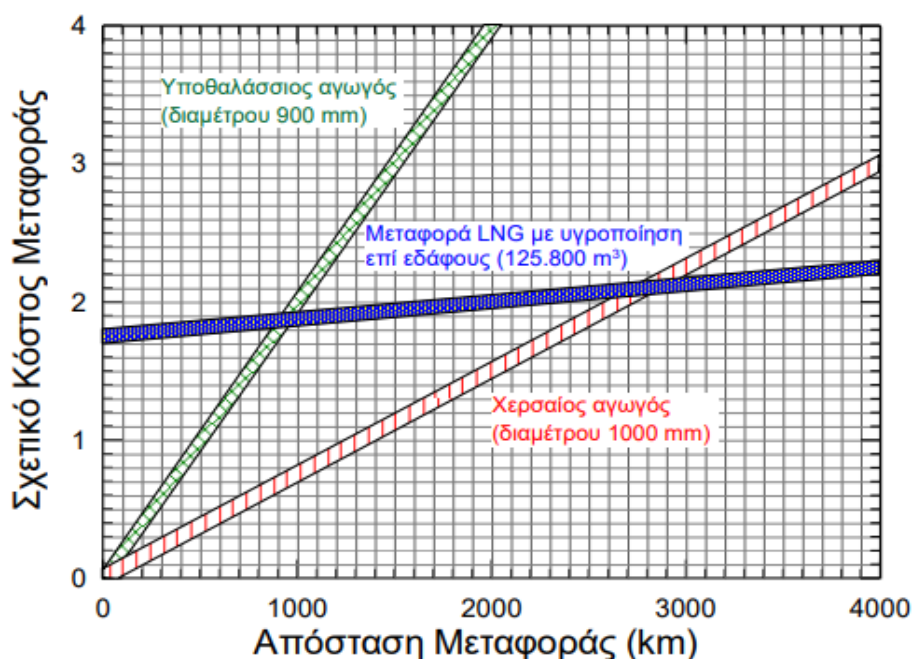
Τα σημαντικότερα δίκτυα μεταφοράς είναι των Η.Π.Α. (συνολικό μήκος περίπου 900.000 μιλίων), ο υποθαλάσσιος αγωγός από την Αλγερία προς την Γαλλία και ο αγωγός μεταφοράς από την Σιβηρία προς τις χώρες της Ευρώπης.<sup>[14]</sup>

#### Με δεξαμενόπλοια

Εάν δεν υπάρχει σωληνογραμμή μεταφοράς, το φυσικό αέριο υγροποιείται και η μεταφορά του LNG, γίνεται με ειδικά κατασκευασμένα δεξαμενόπλοια, LNG Carriers, τα οποία διαθέτουν κρυογονικές θερμικά μονωμένες εγκαταστάσεις για διατήρησή του ως υγρό, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες ενέργειας.<sup>[14]</sup> Σε σύγκριση με τους αγωγούς, η ναυτιλία Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου προτιμάται για τις διεθνείς μεταφορές, διότι όπως αναφέρθηκε το φυσικό αέριο σε υγρή μορφή καταλαμβάνει πολύ λιγότερο όγκο.<sup>[15]</sup>

Η τεχνολογία των υγραεριοφόρων πλοίων θα αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3 και όλο το σύστημα μεταφοράς φορτίου (φόρτωση και εκφόρτωση) στο Κεφάλαιο 5.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος μεταφοράς του φυσικού αερίου σίγουρα ταυτίζεται και με τον πιο οικονομικό. Το κόστος μεταφοράς εξαρτάται από τη δυναμικότητα, την απόσταση και τον τρόπο μεταφοράς. Οι διαθέσιμες επιλογές και οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτές, παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.<sup>[11]</sup>



**Εικόνα 4:** Σχετικό κόστος μεταφοράς φυσικού αερίου συναρτήσει απόστασης μεταφοράς<sup>[11]</sup>

## 2.2.4 Αποθήκευση και Διανομή

Η αποθήκευση του LNG γίνεται σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση σε μεγάλες κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές, χωρητικότητας 65.000 – 150.000 m<sup>3</sup>.<sup>[16]</sup> Σκοπός των δεξαμενών είναι η ελαχιστοποίηση της εξάτμισης του LNG (boil-off gas) κατά την αποθήκευσή του καθώς και η στεγανότητα έναντι διαρροών, γι'αυτό και έχουν εξαιρετικά ισχυρή κατασκευή με θερμική μόνωση. Διακρίνονται σε υπέργειες και υπόγειες. Οι τελευταίες εμφανίζουν χαμηλό ρυθμό εξάτμισης και σημαντικά μικρότερο κίνδυνο έναντι διαρροών, αλλά το κόστος κατασκευής τους είναι μεγαλύτερο.<sup>[11]</sup> Η τεχνολογία των δεξαμενών αποθήκευσης και γενικά ο χερσαίος τερματικός σταθμός που τις περιλαμβάνει μαζί με ένα σύνολο διεργασιών, θα περιγραφούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Η διανομή είναι το τελικό στάδιο της αλυσίδας LNG στο οποίο το αέριο διοχετεύεται μέσω αγωγών προς τους τελικούς καταναλωτές, ενώ ενδέχεται κάποιες ποσότητες να διοχετεύονται αυτούσιες στην αγορά με ειδικά τρέινα ή ειδικά φορτηγά μεταφοράς.<sup>[16]</sup>

## 2.2.5 Επαναεριοποίηση

Η επαναεριοποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου LNG που βρίσκεται σε θερμοκρασία -162°C, πίσω στο φυσικό αέριο σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία (πάνω από τους 0°C), η οποία πραγματοποιείται συνήθως μετά την εκφόρτωσή του από τα δεξαμενόπλοια σε έναν τερματικό σταθμό και αποθήκευση του, και πριν την διανομή του στις περιοχές ζήτησης μέσω αγωγών. Οι εγκαταστάσεις αεριοποίησης μπορούν να τοποθετηθούν τόσο στο έδαφος όσο και σε πλωτές φορτηγίδες. Ένας σταθμός αεριοποίησης στην ξηρά τυπικά αποτελείται από μια αποβάθρα ή προβλήτα, δεξαμενές αποθήκευσης και μονάδες αεριοποίησης.<sup>[18]</sup> Η επαναεριοποίηση πραγματοποιείται κάτω από υψηλές πιέσεις (60-100 bar) και ουσιαστικά επιτυγχάνεται κυρίως μέσω μεταφοράς θερμότητας στο Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο, συνήθως μέσω τουλάχιστον ενός εναλλάκτη θερμότητας. Τυπικά υπάρχουν δύο διαδικασίες που το σύστημα επαναεριοποίησης LNG μπορεί να χρησιμοποιήσει. Μία κοινή τεχνική είναι η καύση μιας μικρής ποσότητας LNG σε έναν βυθισμένο εξατμιστήρα καύσης, για την παραγωγή της θερμότητας που απαιτείται για την αεριοποίηση του ρεύματος Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου. Η άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί ανοικτούς εξατμιστήρες που εξατμίζουν το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο χρησιμοποιώντας θερμότητα από το νερό του περιβάλλοντος, όπως θαλασσινό νερό ή νερό ποταμού.<sup>[17]</sup> Ως θερμαντικό μέσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα ίδια τα καυσαέρια του φυσικού αερίου.<sup>[13]</sup> Στην πραγματικότητα το απαιτούμενο θερμικό φορτίο είναι περίπου 1.5-1.7% του ενεργειακού περιεχομένου του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου.<sup>[19]</sup>

Στην περίπτωση που η επαναεριοποίηση λαμβάνει χώρα πάνω στο ίδιο το πλοίο, το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο αποσύρεται από τις δεξαμενές αποθήκευσης και η πίεση του αυξάνεται με τη διέλευσή του μέσω αντλιών, ενώ το ίδιο παραμένει σε υγρή κατάσταση. Στη συνέχεια ρέει μέσω εξατμιστήρων επί του σκάφους για να περάσει στην αέρια φάση. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφεται η ανάγκη για δαπανηρές δεξαμενές αποθήκευσης στην ξηρά και εγκαταστάσεις μόνιμης επαναεριοποίησης στη θέση εκφόρτωσης. Επίσης δεδομένου ότι η πίεση του LNG ενισχύεται επί του σκάφους, ενώ εξακολουθεί να είναι υγρό, η ποσότητα της υποδύναμης του συμπιεστή που αλλιώς απαιτείται για τη ροή του ανανεωμένου φυσικού αερίου

μέσω των αγωγών στην ξηρά, μειώνεται σημαντικά.<sup>[20]</sup> Η διαδικασία αυτή θα περιγραφεί και σε επόμενα Κεφάλαια.

## 2.3 Ιδιότητες και σύσταση LNG

Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο είναι ένα άοσμο, άχρωμο, μη διαβρωτικό και μη εύφλεκτο κρυογονικό υγρό. Όσον αφορά την τοξικότητα, το LNG είναι μη τοξικό, το φυσικό αέριο που εκλύεται όμως από αυτό μπορεί να προκαλέσει ασφυξία λόγω της έλλειψης οξυγόνου σε έναν μη αεριζόμενο χώρο και μπορεί να αναφλεγεί αν αναμειχθεί με τις σωστές συγκεντρώσεις αέρα.<sup>[7]</sup> Μια βασική γνώση του LNG πρέπει να ξεκινά με την εξέταση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του, η οποία αποτελεί προϋπόθεση για την ακριβή εκτίμηση πιθανών κινδύνων. Οι βασικές ιδιότητες του είναι οι εξής:<sup>[21]</sup>

- 1) Χημική σύσταση
- 2) Σημείο βρασμού
- 3) Πυκνότητα και ειδικό βάρος
- 4) Αναφλεξιμότητα
- 5) Θερμοκρασία αυτανάφλεξης και φλόγας

### 2.3.1 Χημική σύσταση

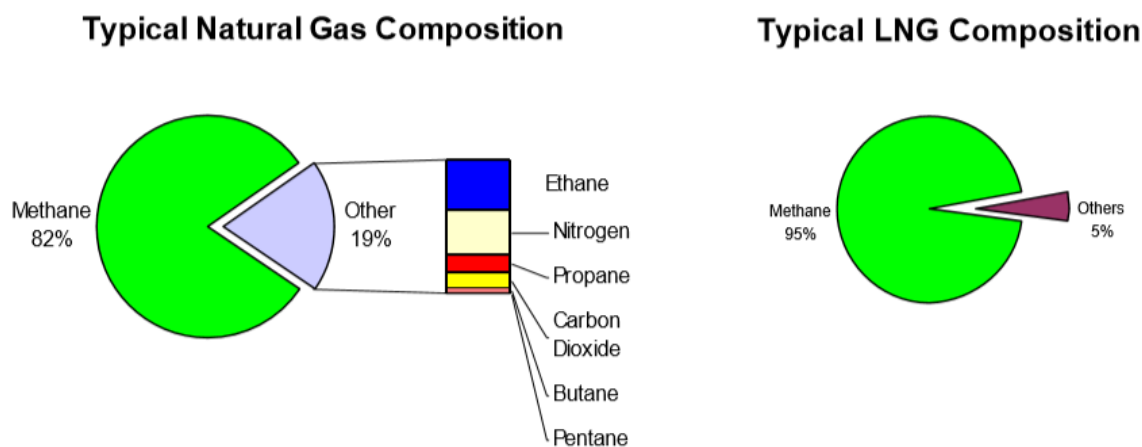
Η πραγματική σύσταση LNG κάθε σταθμού φόρτωσης, ποικίλει ανάλογα την αρχική του πηγή και την επεξεργασία (καθαρισμός/ υγροποίηση) που έχει υποστεί, αλλά το βασικό συστατικό του πάντα είναι το μεθάνιο. Περιλαμβάνει ακόμη μικρά ποσοστά βαρύτερων υδρογονανθράκων όπως αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο, πεντάνιο, πιθανόν ένα μικρό ποσοστό αζώτου και σε ελάχιστες περιπτώσεις ίχνη θείου και διοξειδίου του άνθρακα.<sup>[7]</sup>

Μια τυπική σύσταση LNG δίνεται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1: Παραδείγματα σύστασης LNG ανά πηγή προέλευσης<sup>[97]</sup>**

	Methane CH <sub>4</sub>	Ethane C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Pentane C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Nitrogen N <sub>2</sub>	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Standard	89.63	6.32	2.16	1.20	0	0.69	459
Arun	89.33	7.14	2.22	1.17	0.01	0.08	N/A
Arzew	88.0	7.95	2.37	1.05	0.03	0.60	466.9
Bintulu	91.23	4.3	2.95	1.4	0	0.12	457
Badak	91.09	5.51	2.48	0.88	0	0.03	N/A
Bonny	90.4	5.2	2.8	1.5	0.02	0.07	453
Das Island	84.83	13.39	1.34	0.28	0	0.17	465
Egypt	96.1	2.9	0.57	0.40	0.006	0.01	435
Equatorial Guinea	92.1	3.9	0.03	0	0.01	0	443
Lumut	89.4	6.3	2.8	1.3	0.05	0.05	463
Marsa el Braga	70.0	15	10	3.5	0.6	0.9	531
Point Fortin	96.2	3.26	0.42	0.07	0.01	0.008	433
Ras Lafan	89.5	6.33	2.49	1.26	0.08	0.34	463.7
T East Coast Associated Gas	89.7	4.0	2.1	1.2	0.9	0.3	N/A
N East Coast 'Wet' Gas	92.6	4.3	1.5	0.7	0.4	0.1	N/A
D East Coast 'Dry' Gas	99.4	0.2	0.1	0	0	0.2	N/A
Withnell	89.02	7.33	2.56	1.03	0	0.06	460
Yemen	93.12	5.89	0.84	0.12	0	0.03	445

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί πως η σύσταση του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου με τη σύσταση του φυσικού αερίου δεν είναι ίδιες και οι διαφορές τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.<sup>[22]</sup>



**Εικόνα 5:** Τυπικές συστάσεις LNG και φυσικού αερίου<sup>[22]</sup>

Για τους περισσότερους μηχανολογικούς υπολογισμούς (π.χ. απώλειες πίεσης σε αγωγούς) μπορεί να θεωρηθεί ότι οι φυσικές ιδιότητες του καθαρού μεθανίου αντιπροσωπεύουν αυτές του LNG. Για φαινόμενα μεταφοράς όμως, όπου απαιτείται ακριβής υπολογισμός της πυκνότητας και της θερμότητας, πρέπει να χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένες ιδιότητες βασισμένες στα πραγματικά συστατικά.<sup>[98]</sup>

Κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού, θερμότητα μεταφέρεται στο φορτίο LNG μέσω της μόνωσης της δεξαμενής στην οποία βρίσκεται αποθηκευμένο, προκαλώντας εξάτμιση ενός μέρους του, το λεγόμενο boil-off gas που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Η σύσταση του LNG μεταβάλλεται από αυτό το αέριο, διότι τα ελαφρύτερα συστατικά που έχουν μικρότερο σημείο βρασμού σε ατμοσφαιρική πίεση, εξατμίζονται πρώτα. Επομένως το LNG που εκφορτώνεται έχει μικρότερο ποσοστό σε άζωτο και μεθάνιο σε σχέση με την ποσότητα που φορτώνεται, και ελαφρώς μεγαλύτερο ποσοστό σε αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο, λόγω του μεθανίου και του αζώτου που βράζουν αντί των βαρύτερων συστατικών.<sup>[98]</sup>

### 2.3.2 Σημείο βρασμού

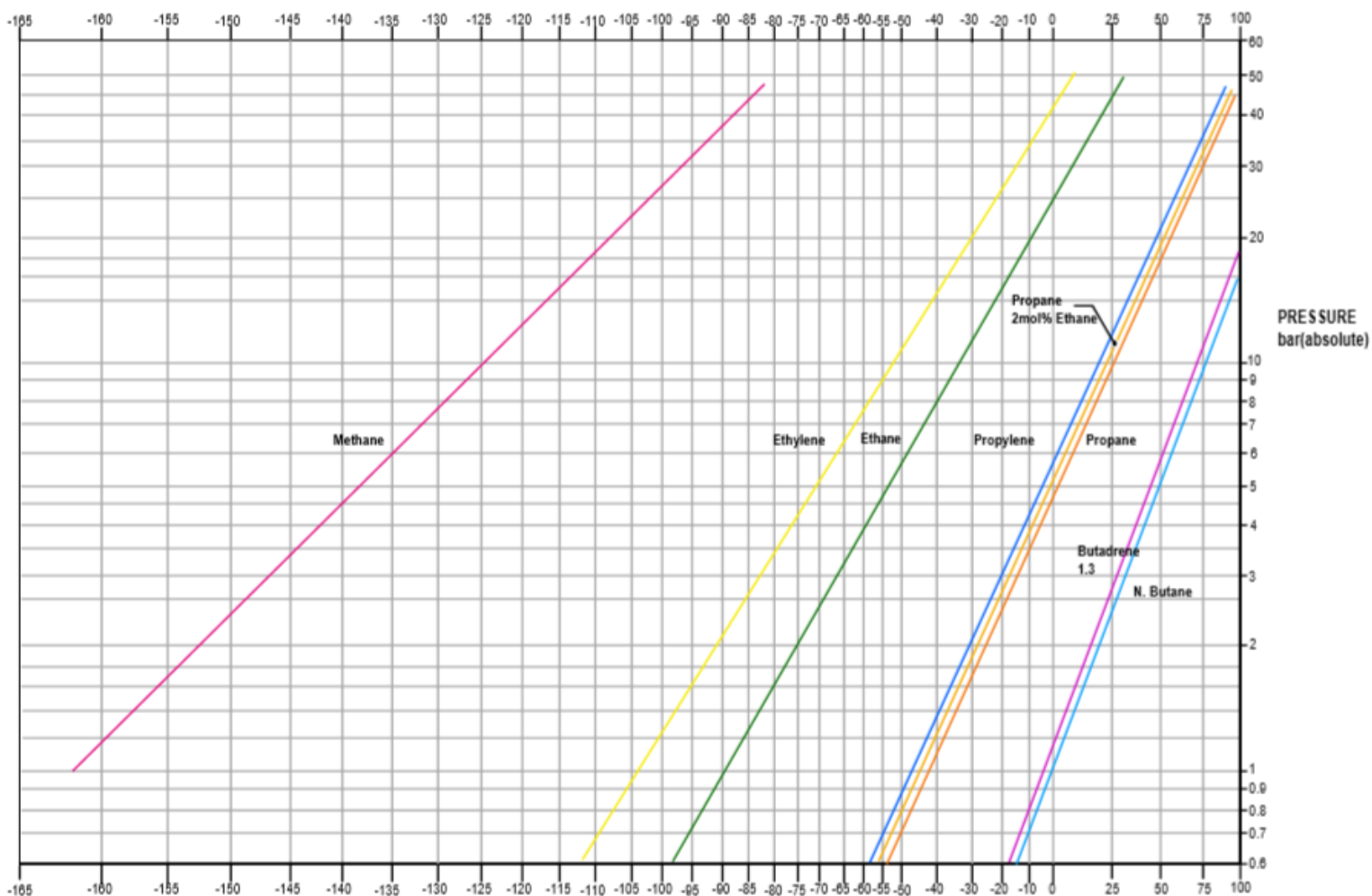
Το σημείο βρασμού είναι μία από τις σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες, καθώς καθορίζει πότε ένα αέριο μετατρέπεται σε υγρό. Σύμφωνα με τον Webster Merriman, ως σημείο βρασμού ορίζεται η θερμοκρασία στην οποία ένα υγρό βράζει, ή μετατρέπεται ακαριαία από υγρό σε αέριο ή ατμό σε ατμοσφαιρική πίεση. Το σημείο βρασμού του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου ποικίλει ανάλογα τη σύσταση του, αλλά συνήθως είναι  $-162^{\circ}\text{C}$  ( $-259^{\circ}\text{F}$ ). Όταν το ψυχρό LNG έρθει σε επαφή με θερμότερο αέρα, νερό ή το περιβάλλον αρχίζει να «βράζει» σε αυτή τη διεπιφάνεια, επειδή οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερες από το σημείο βρασμού του LNG. Η διαδικασία υγροποίησης κρυσώνει το φυσικό αέριο, ώστε να το μετατρέψει σε υγρό, ενώ η διαδικασία επαναεριοποίησης το θερμαίνει ώστε να το επαναφέρει στην αρχική του αέρια μορφή. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα σημεία βρασμού του νερού, του LNG και άλλων γνωστών αερίων.<sup>[21]</sup>

Πίνακας 2: Σημεία βρασμού νερού, LNG και γνωστών αερίων<sup>[21]</sup>

Fahrenheit (degrees F)	Celsius (degrees C)	Occurrence
212	100	Water Boils
31	-0.5	Butane Boils
-27	-33	Ammonia Boils
-44	-42	Propane Boils
<b>-259</b>	<b>-162</b>	<b>LNG Boils</b>
-298	-183	Oxygen Boils
-319	-195	Nitrogen Boils
-422	-252	Hydrogen Boils
-454	-270	Helium Boils
-460	-273	Absolute Zero

Το σημείο βρασμού του μεθανίου αυξάνεται με την πίεση. Αυτή η μεταβολή φαίνεται στην Εικόνα 6 για το καθαρό μεθάνιο, σε σχέση με το κανονικό εύρος πιέσεων επί του σκάφους (ο οριζόντιος άξονας είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου). Η παρουσία βαρύτερων συστατικών στο LNG αυξάνει το σημείο βρασμού του φορτίου σε δεδομένη πίεση.<sup>[98]</sup>

Η σχέση μεταξύ του σημείου βρασμού και της πίεσης του LNG ακολουθεί περίπου μια ευθεία γραμμή παράλληλη σε αυτήν του 100% καθαρού μεθανίου του διαγράμματος.<sup>[98]</sup>



Εικόνα 6: Διάγραμμα σημείου βρασμού συστατικών LNG συναρτήσει πίεσης<sup>[97]</sup>

### 2.3.3 Πυκνότητα και ειδικό βάρος

Η πυκνότητα είναι μια μέτρηση της μάζας ανά μονάδα όγκου και είναι απόλυτο μέγεθος. Επειδή το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο δεν είναι καθαρή ποσότητα, η πυκνότητά του ποικίλει ελαφρώς ανάλογα τη σύσταση του. Συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 430 - 470 kg/m<sup>3</sup>. Η πυκνότητα του LNG είναι μικρότερη από το μισό της πυκνότητας του νερού, γι'αυτό και επιπλέει αν χυθεί σε αυτό.<sup>[21]</sup>

Το ειδικό βάρος ενός υγρού είναι ο λόγος της πυκνότητάς του προς την πυκνότητα του νερού στους 15°C. Το ειδικό βάρος ενός αερίου είναι ο λόγος της πυκνότητάς του προς την πυκνότητα του αέρα στους 15°C. Είναι αντιληπτό πως οποιαδήποτε αέριο με ειδικό βάρος πάνω από 1.0 είναι βαρύτερο του αέρα. Το ειδικό βάρος του μεθανίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 0.554, επομένως είναι ελαφρύτερο από τον αέρα.<sup>[21]</sup>

Υπό συνθήκες περιβάλλοντος το LNG θα γίνει ατμός επειδή δεν υπάρχει περιοχή στη γη με θερμοκρασία -162°C. Καθώς το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο εξατμίζεται, οι ψυχροί ατμοί συμπυκνώνουν την υγρασία του αέρα προκαλώντας συχνά τον σχηματισμό ενός σύννεφου λευκού ατμού, μέχρις ότου το αέριο θερμανθεί, αραιωθεί και διασπαστεί. Για σχετική υγρασία υψηλότερη από 55% το σύννεφο που μπορεί να αναφλεγεί συμπεριλαμβάνεται πλήρως στο ορατό λευκό σύννεφο ατμών. Εάν όμως η σχετική υγρασία είναι μικρότερη από 55% το εύφλεκτο σύννεφο μπορεί να είναι εν μέρει ή τελείως έξω από το ορατό σύννεφο, πράγμα που σημαίνει ότι οι ατμοί θα μπορούσαν να αναφλεγούν ακόμη και αν η πηγή ανάφλεξης είναι απομακρυσμένη από το ορατό σύννεφο ατμών. Το μέγεθος του νέφους ατμών θα εξαρτηθεί από την ταχύτητα του αέρα, την κατεύθυνση και άλλες καιρικές συνθήκες. Αυτοί οι ψυχροί ατμοί σταδιακά θα ανέβουν ψηλότερα, καθώς θερμαίνονται επαρκώς από τον αέρα του περιβάλλοντος.<sup>[21]</sup>

Οι ατμοί αυτοί του LNG στη θερμοκρασία του σημείου βρασμού και σε ατμοσφαιρική πίεση έχουν σχετική πυκνότητα περίπου 1.8, που σημαίνει ότι όταν απελευθερωθούν αρχικά είναι βαρύτεροι από τον αέρα και παραμένουν κοντά στο έδαφος. Ωστόσο καθώς οι ατμοί του μεθανίου αρχίζουν γρήγορα να θερμαίνονται και να φτάνουν σε θερμοκρασίες των -110°C, η σχετική πυκνότητα του φυσικού αερίου θα γίνει μικρότερη της μονάδας και οι ατμοί ελαφρύτεροι. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος το φυσικό αέριο έχει ειδικό βάρος 0.6, που σημαίνει ότι οι ατμοί είναι ελαφρύτεροι του αέρα και θα υψωθούν γρήγορα. Οι ψυχροί ατμοί του LNG είναι πιθανότερο να συσσωρευτούν σε χαμηλές περιοχές μέχρι να ζεσταθούν. Επομένως η απελευθέρωση LNG που εμφανίζεται σε κλειστό χώρο θα τείνει να αντικαταστήσει τον αέρα (και το οξυγόνο) και να καταστήσει την περιοχή επικίνδυνη για αναπνοή.<sup>[21]</sup>

### 2.3.4 Αναφλεξιμότητα

Σύμφωνα με το τρίγωνο της καύσης, υπάρχουν τρία στοιχεία που μπορούν να συντηρήσουν φλόγα: το καύσιμο, ο αέρας (οξυγόνο) και η πηγή της ανάφλεξης (σπινθήρας). Για να οδηγήσουν οι συνθήκες αυτές σε πυρκαγιά, θα πρέπει το καύσιμο και το οξυγόνο να βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή αναλογιών (συγκεκριμένη ποσότητα ή συγκέντρωση) και η πηγή ανάφλεξης να έχει αρκετή ενέργεια ώστε να μπορεί να αναφλέξει το καύσιμο. Η εύφλεκτη αυτή περιοχή καθορίζεται από τα όρια αναφλεξιμότητας. Τα υγρά και τα στερεά δεν καίγονται (με εξαίρεση τις πυρκαγιές μετάλλων), εκπέμπουν όμως ατμούς και αέρια τα οποία αναμιγνύονται με τον αέρα και αναφλέγονται μόνο εάν η συγκέντρωσή τους βρίσκεται μεταξύ του Κατώτερου

και του Ανώτερου Ορίου Αναφλεξιμότητας (Lower Flammable Limit LFL και Upper Flammable Limit UFL) και συγχρόνως υπάρχει πηγή ανάφλεξης επαρκούς ισχύος. Στην περιοχή κάτω του LFL, το μίγμα είναι πολύ «φτωχό», δηλαδή χαμηλής περιεκτικότητας σε καύσιμο, και το αέριο δεν καίγεται. Στην περιοχή άνω του UFL το μίγμα είναι πολύ «πλούσιο», δηλαδή υψηλής περιεκτικότητας σε καύσιμο και το αέριο και πάλι δεν μπορεί να καεί. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας διευρύνεται και το εύρος αναφλεξιμότητας, γιατί αυξάνεται το ανώτερο όριο και μειώνεται το κατώτερο.<sup>[23]</sup>

Το φυσικό αέριο είναι εύφλεκτο, το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο όμως δεν είναι, λόγω της έλλειψης οξυγόνου στο υγρό. Απαιτούνται πολλοί παράγοντες για την έναρξη μιας πυρκαγιάς από ατμούς LNG όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το Κατώτερο Όριο Αναφλεξιμότητας για το μεθάνιο είναι 5% και το Ανώτερο όριο Αναφλεξιμότητας 15% κατ'όγκο στον αέρα (21% οξυγόνο). Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα όρια αναφλεξιμότητας του μεθανίου σε σύγκριση με άλλα καύσιμα.<sup>[21]</sup>

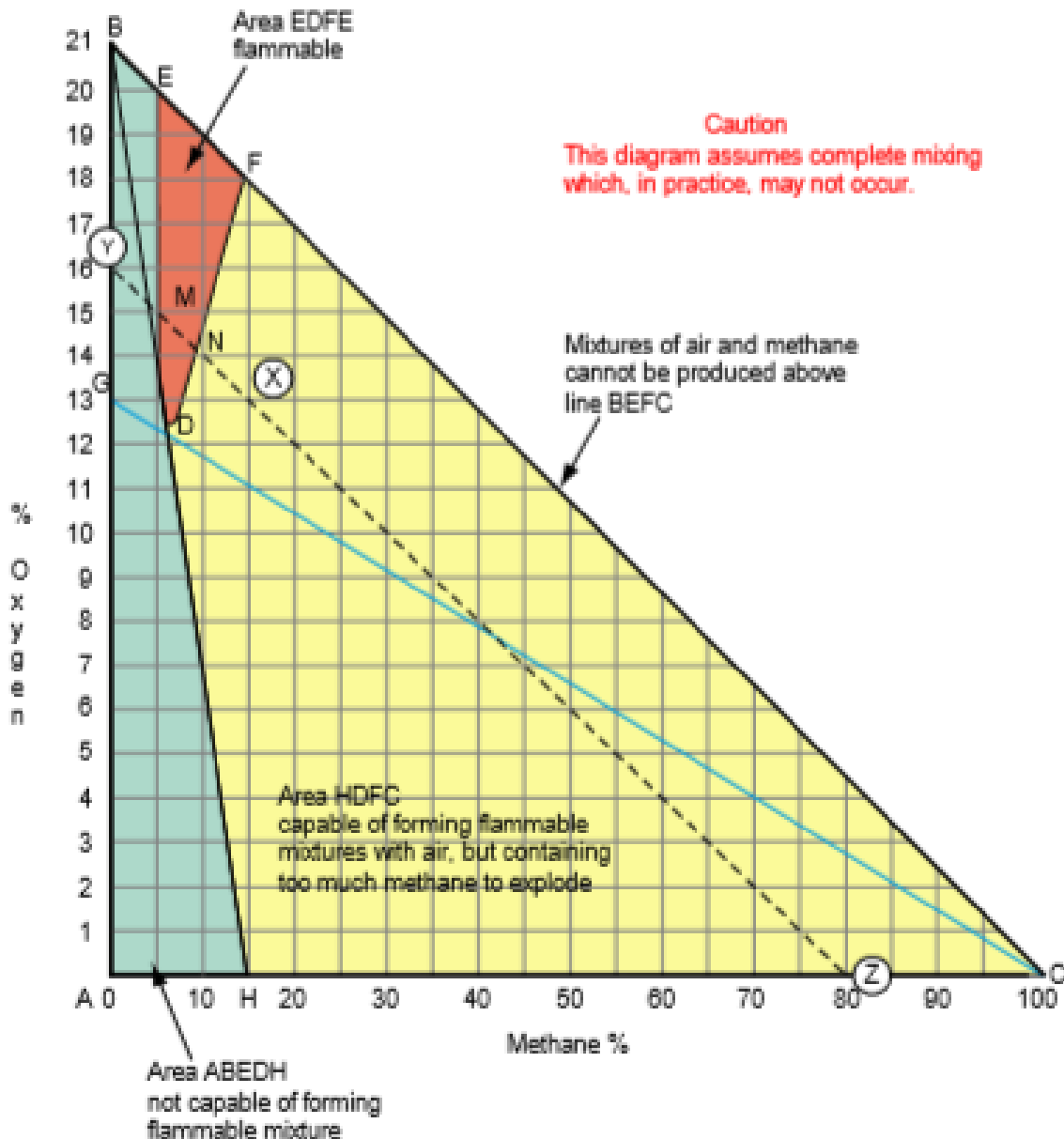
**Πίνακας 3: Όρια αναφλεξιμότητας μεθανίου και άλλων καυσίμων<sup>[21]</sup>**

Fuel	LFL	UFL
Methane	5.0	15.0
Butane	1.86	7.6
Kerosene	0.7	5.0
Propane	2.1	10.1
Hydrogen	4.0	75.0
Acetylene	2.5	>82.0

Υλικά τα οποία έχουν μεγάλο εύρος ορίων αναφλεξιμότητας είναι επικίνδυνα για τους ανταποκριτές έκτακτης ανάγκης, διότι υπάρχει μεγαλύτερος χρόνος που βρίσκονται εντός των εύφλεκτων ορίων. Για παράδειγμα το υδρογόνο και το ακετυλένιο έχουν πολύ ευρύ φάσμα και το ακετυλένιο μπορεί να καεί όταν οι ατμοί του είναι λίγο πάνω από το 2% μέχρι το 82% στον αέρα.<sup>[21]</sup>

Σε μια κλειστή δεξαμενή αποθήκευσης LNG, το ποσοστό του μεθανίου είναι ουσιαστικά 100% (κυρίως υγρό και μερικοί ατμοί). Οποιαδήποτε μικρή διαρροή ατμών LNG από δεξαμενή σε καλά αεριζόμενο χώρο είναι πιθανό να αναμειχθεί γρήγορα και να διαλυθεί σε λιγότερο από 5% μεθάνιο στον αέρα, οπότε δεν δημιουργείται εύφλεκτο μίγμα. Λόγω της ταχείας ανάμιξης μόνο μια μικρή περιοχή κοντά στη διαρροή θα είχε την απαραίτητη συγκέντρωση για να επιτρέψει την ανάφλεξη του καυσίμου.<sup>[21]</sup> Η Εικόνα 7 που ακολουθεί, απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της αναφλεξιμότητας και της σύστασης του αερίου/αέρα για όλα τα πιθανά μίγματα μεθανίου, αέρα και αζώτου, θεωρώντας πλήρη ανάμιξη, η οποία στην πράξη μπορεί να μην επιτευχθεί.





**Εικόνα 7: Διάγραμμα αναφλεξιμότητας μιγμάτων μεθανίου, αέρα και αζώτου<sup>[98]</sup>**

Ο κατακόρυφος άξονας A-B απεικονίζει μίγματα οξυγόνου-αζώτου χωρίς την παρουσία μεθανίου. Τα μίγματα κυμαίνονται από 0% οξυγόνο (100% άζωτο στο σημείο A) μέχρι 21% οξυγόνο (79% άζωτο στο σημείο B). Το σημείο B αντιπροσωπεύει και τη σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα. Ο οριζόντιος άξονας A-C απεικονίζει μίγματα μεθανίου-αζώτου χωρίς την παρουσία οξυγόνου. Αυτά κυμαίνονται από 0% μεθάνιο (100% άζωτο στο σημείο A) μέχρι 100% μεθάνιο (0% άζωτο στο σημείο C). Σε οποιαδήποτε σημείο του διαγράμματος, εντός του τριγώνου ABC, ένα μίγμα των τριών συστατικών (άζωτο, οξυγόνο και μεθάνιο) μπορεί να αναπαρασταθεί. Ο συνολικός όγκος αποτελείται από μια συγκεκριμένη ποσότητα καθενός συστατικού και από ένα σημείο στο διάγραμμα οι ποσότητες αυτές μπορούν να διαβαστούν. Το σημείο D για παράδειγμα μπορεί να διαβαστεί ως εξής: 12.2% οξυγόνο (άξονας A-B), 6.0% μεθάνιο (άξονας A-C) και 81.8% άζωτο (το υπόλοιπο).<sup>[98]</sup>



Σύμφωνα με την Εικόνα 7, υπάρχουν 3 βασικές περιοχές :

- 1) Ζώνη Ανάφλεξης, Περιοχή EDFE: Οποιοδήποτε μίγμα που αντιπροσωπεύεται από κάποιο σημείο εντός της περιοχής αυτής είναι εύφλεκτο.
- 2) Περιοχή HDFC: Οποιοδήποτε μίγμα που αντιπροσωπεύεται από κάποιο σημείο εντός της περιοχής αυτής είναι ικανό να σχηματίσει εύφλεκτο μίγμα όταν αναμειχθεί με τον αέρα, αλλά το περιεχόμενο σε μεθάνιο είναι πολύ υψηλό για να αναφλεγεί.
- 3) Περιοχή ABEDH: Οποιοδήποτε μίγμα που αντιπροσωπεύεται από κάποιο σημείο εντός της περιοχής αυτής δεν είναι ικανό να σχηματίσει εύφλεκτο μίγμα όταν αναμειχθεί με τον αέρα.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι το σημείο Y στον άξονα οξυγόνου-αζώτου επεκτείνεται σε μια ευθεία γραμμή μέχρι το σημείο Z στον άξονα μεθανίου-αζώτου. Αν ένα μίγμα οξυγόνου-αζώτου σύστασης Y, αναμειχθεί με ένα μίγμα μεθανίου-αζώτου σύστασης Z, η σύσταση του τελικού μίγματος θα απεικονίζεται από το σημείο X, το οποίο θα μετακινείται κατά μήκος της ευθείας Y-Z (από το σημείο Y στο σημείο Z) όσο προστίθεται μεγαλύτερη ποσότητα από το μίγμα Z. Στο παράδειγμα αυτό το σημείο X, που αντιπροσωπεύει μεταβαλλόμενες συστάσεις, περνάει τη ζώνη αναφλεξιμότητας EDF, όταν το περιεχόμενο του μίγματος σε μεθάνιο είναι μεταξύ του 5.5% (σημείο M) και του 9.0% (σημείο N).<sup>[98]</sup>

Ο ρυθμός ανόδου του ατμού LNG, εξαρτάται από την ποσότητα του απελευθερωμένου LNG, τις καιρικές συνθήκες και το σημείο που απελευθερώνεται (π.χ. περιορισμένη ή απεριόριστη περιοχή, υψόμετρο, επί ξηράς ή στο νερό κ.α.). Μια στρατηγική για τη διαχείριση των ατμών είναι η δημιουργία ενός ρεύματος νερού αντίθετο του αέρα, το οποίο βοηθά στην αποτροπή ή την εκτροπή των ατμών μακριά από τις πιθανές πηγές ανάφλεξης μέχρις ότου οι ατμοί ζεσταθούν και αραιωθούν σε μικρότερη συγκέντρωση εκτός των εύφλεκτων ορίων. Η εισαγωγή θερμότητας σε οποιαδήποτε μορφή θα ενισχύσει την εξάτμιση και τη διασπορά και μπορεί να μεταφερθεί από παθητικές πηγές όπως η ατμοσφαιρική υγρασία, κοιλότητες, δομές, λεκάνες απορροής κ.α. Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο εξατμίζεται πέντε φορές πιο γρήγορα στο νερό από ότι στο έδαφος, ανάλογα βέβαια και την κατάσταση του εδάφους. Μια άλλη στρατηγική για τη διαχείριση της αναφλεξιμότητας των ατμών του LNG είναι η χρήση εύκαμπτου σωλήνα νερού για την ταχύτερη θέρμανση του υγρού (αποφεύγοντας την επαφή με το ψυχρό LNG), αύξηση του ποσοστού εξάτμισης και έτσι μετατροπή των ατμών σε ελαφρύτερους ώστε να απομακρυνθούν από πηγές ανάφλεξης στο επίπεδο του εδάφους.<sup>[21]</sup>

### 2.3.5 Θερμοκρασία αυτανάφλεξης και φλόγας

Το σημείο αυτανάφλεξης μιας ουσίας είναι η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία η ουσία αναφλέγεται αυθόρμητα σε μια φυσιολογική ατμόσφαιρα, χωρίς εξωτερική πηγή θερμότητας, όπως για παράδειγμα φλόγα η σπινθήρα. Η θερμοκρασία αυτή απαιτείται για την παροχή της ενέργειας ενεργοποίησης που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η καύση και εξαρτάται από την πίεση και το μίγμα αέρα/καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης ή την αύξηση συγκέντρωσης οξυγόνου.

**Πίνακας 4: Θερμοκρασίες αυτανάφλεξης καυσίμων σε δεδομένες συνθήκες<sup>[21]</sup>**

	Natural Gas	Diesel Oil	Gasoline
Auto-ignition temperature	599°C	260-371°C	226-471°C

Σε ένα μίγμα αέρα/καυσίμου με περίπου 10% μεθάνιο στον αέρα, η θερμοκρασία αυτανάφλεξης είναι περίπου 599°C. Θερμοκρασίες υψηλότερες από την θερμοκρασία αυτανάφλεξης προκαλούν ανάφλεξη μετά από πολύ μικρό χρόνο έκθεσης σε αυτή την υψηλότερη θερμοκρασία. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης ορισμένων γνωστών καυσίμων σε συγκεκριμένες συνθήκες, υποδεικνύοντας ότι το ντίζελ και η βενζίνη αυτοαναφλέγονται σε σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες από το LNG.<sup>[21]</sup>

Η ακριβής θερμοκρασία αυτανάφλεξης του φυσικού αερίου ποικίλει ανάλογα τη σύστασή του. Αν αυξάνεται η συγκέντρωση βαρύτερων υδρογονανθράκων στο LNG ( η ποσότητα μεθανίου του φυσικού αερίου αρχίζει να εξατμίζεται ή να αφαιρείται από το μίγμα), η θερμοκρασία αυτανάφλεξης μειώνεται.<sup>[21]</sup>

Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία φλόγας. Καίγεται γρήγορα και είναι μια πολύ καλή πηγή θερμότητας σε σχέση με άλλα καύσιμα όπως η βενζίνη. Το μεθάνιο στο LNG έχει θερμοκρασία φλόγας 1330°C (2426°F) συγκριτικά με τη βενζίνη που έχει θερμοκρασία φλόγας 1027°C (1880°F), πράγμα που σημαίνει ότι το LNG καίγεται θερμότερα.<sup>[21]</sup>

## 2.4 Αέριο από το βρασμό LNG (Boil – off gas)

Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας αποθήκευσης του LNG (είτε σε δεξαμενή πλοίου είτε σε δεξαμενή ξηράς), θερμότητα εισρέει από το περιβάλλον προς το εσωτερικό της δεξαμενής. Ενισχυμένη μόνωση γύρω και κάτω από τη δεξαμενή είναι απαραίτητη για να ελαχιστοποιεί αυτή την εισροή θερμότητας και την συνεπαγόμενη αναπόφευκτη εξάτμιση.<sup>[24]</sup> Οι ατμοί που προέρχονται από το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο ονομάζονται boil-off gas και συγκεκριμένα οι παράγοντες που οδηγούν στην δημιουργία τους είναι οι εξής: (1) αποσυμπίεση του LNG, (2) εισροή θερμότητας από αντλίες, (3) μετατόπιση ατμών, (4) διαρροές θερμότητας από το περιβάλλον σε κοντέινερ και αγωγούς και (5) αυξημένη θερμοκρασία δεξαμενοπλοίων κατά τη φόρτωση LNG.

Οι διαρροές θερμότητας από το περιβάλλον στο Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο συμβαίνουν συνεχώς, αφού υπάρχει πάντα διαφορά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη θερμοκρασία του φορτίου, και μάλιστα με τρεις τρόπους, αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η θερμική διαρροή από μια πιο ζεστή δεξαμενή στο LNG οφείλεται στο θερμικό περιεχόμενο του μετάλλου της δεξαμενής, το οποίο εξαφανίζεται όταν επιτυγχάνεται κατάσταση ισορροπίας μεταξύ του μετάλλου και του LNG.<sup>[25]</sup> Γενικά σε έναν σταθμό φόρτωσης το BOG χρησιμοποιείται ως καύσιμο στη διαδικασία υγροποίησης, ενώ σε ένα σταθμό εκφόρτωσης είτε καίγεται είτε αποστέλλεται στη μονάδα επαναεριοποίησης.<sup>[27]</sup> Οι τεχνικές διαχείρισής του ανάλογα την περιοχή που δημιουργείται θα αναλυθούν περισσότερο στα Κεφάλαια 3,4 και 5.

## 2.5 Κίνδυνοι που συνδέονται με το LNG

Οι κίνδυνοι που συνδέονται με το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο οφείλονται στην ευφλεκτότητα του, την κρυογόνο θερμοκρασία του (-162°C) και τα χαρακτηριστικά διασποράς του ατμού που δημιουργείται. Επειδή κανένα από αυτά δεν αποτελεί πρόβλημα όταν το LNG περιέχεται σε κατάλληλες σχεδιασμένες δεξαμενές αποθήκευσης ή σωληνώσεις και εξοπλισμό, οι μελέτες ασφαλείας έχουν εστιάσει γενικά στις διαρροές LNG.<sup>[10]</sup>

## 2.5.1 Κηλίδα LNG σε έδαφος και νερό χωρίς ανάφλεξη

Όπως και το πετρέλαιο, έτσι και το LNG όταν απελευθερώνεται έξω από τον χώρο που το περιβάλλει, αρχίζει αμέσως να σχηματίζει μια κηλίδα και να εξαπλώνεται. Όπως περιγράφηκε και στο υποκεφάλαιο 2.3.3 η κηλίδα LNG που σχηματίζεται, θερμαίνεται από τις θερμοκρασίες του περιβάλλοντος και ξεκινά να εξατμίζεται. Μια ποικιλία μεταβλητών επηρεάζει την συμπεριφορά του LNG που έχει διαρρεύσει, καθώς και το πόσο επικίνδυνη μπορεί να γίνει η προκύπτουσα κατάσταση. Οι μεταβλητές αυτές σχετίζονται με το ποσό που απελευθερώνεται καθώς και τον ρυθμό απελευθέρωσης (στιγμιαίος ή συνεχής), τον χώρο που συμβαίνει η διαρροή και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, που επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο η κηλίδα απορροφά, εξαπλώνεται και εξατμίζεται και τέλος πως αναπτύσσεται η επικίνδυνη κατάσταση π.χ. η θέση των ατμών σε σχέση με τους κοντινούς πληθυσμούς, η παρουσία πηγής ανάφλεξης κ.α.<sup>[28]</sup>

Ο ρυθμός εξάτμισης του LNG ποικίλει ανάλογα την κατάσταση. Αν υπάρχει διαρροή στη γη, το υγρό θα εξατμιστεί τόσο γρήγορα όσο το επιτρέπει η μεταφορά θερμότητας από το υπόστρωμα. Εάν η διαρροή είναι περιορισμένη λόγω κάποιου φράγματος τότε το έδαφος θα παγώσει και θα επιβραδύνει την εξάτμιση. Αν από την άλλη πλευρά το LNG διαρρεύσει σε νερό (π.χ. θάλασσα) δεν μπορεί να περιοριστεί εύκολα. Αμέσως ψυχραίνει το νερό (ίσως δημιουργηθεί και πάγος) και εξαπλώνεται πλευρικά στην επιφάνειά του, λόγω μικρότερης πυκνότητας δεν βυθίζεται, μέχρι να αναμειχθεί με τον αέρα και τελικά να υψωθεί (Εικόνα 8).<sup>[29]</sup> Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο εξατμίζεται ταχύτερα αν χυθεί πάνω σε νερό από ότι αν χυθεί στο έδαφος. Όταν χυθεί στην ξηρά οι αρχικοί ρυθμοί εξάτμισης είναι περίπου  $3 \text{ m}^3/\text{min}$  ανά  $\text{m}^2$  LNG, ενώ στο νερό η εξάτμιση συμβαίνει 5 φορές πιο γρήγορα ( $15,2 \text{ m}^3/\text{min}$  ανά  $\text{m}^2$  LNG). Μετά τον αρχικό ρυθμό εξάτμισης και καθώς το LNG θερμαίνεται, ο ρυθμός εξάτμισης μειώνεται και παραμένει σε μια σταθερή κατάσταση του  $0,3 \text{ m}^3/\text{min}$  ανά  $\text{m}^2$  LNG. Σε σταθερή κατάσταση και με ήρεμο άνεμο μια βαθιά κηλίδα του  $0,3 \text{ m}$  θα εξατμιστεί περίπου σε 10 ώρες.<sup>[28]</sup>

Κατά την εξάτμιση οποιαδήποτε υγρασία στον αέρα θα παγώσει, προκαλώντας ομίχλη και οι ατμοί που σχηματίζονται θα αναμειχτούν με αυτή, καθιστώντας ορατό ένα λευκό σύννεφο ομίχλης (Εικόνα 9). Αρχικά οι ατμοί θα «αγκαλιάσουν» το έδαφος ή το νερό, αφού είναι πυκνότεροι από τον αέρα, και καθώς θερμαίνονται θα υψωθούν και θα διασκορπιστούν στην ατμόσφαιρα. Αν δεν υπάρχει ανάφλεξη, το σύννεφο ατμών θα παρασυρθεί από τον αέρα, μέχρι τα αποτελέσματα της διασποράς αραιώσουν τους ατμούς σε επίπεδα κάτω από την ελάχιστη συγκέντρωση που το κάνει εύφλεκτο, δηλαδή κάτω από το Κατώτερο Όριο Αναφλεξιμότητας LFL.<sup>[28]</sup>



**Εικόνα 8:** Σύννεφο ατμού LNG που δημιουργήθηκε για εκπαίδευση στο Τέξας<sup>[21]</sup>



**Εικόνα 9:** Σύννεφο ατμού LNG σε νερό<sup>[30]</sup>

### Ασφυξία και κρυογονικά εγκαύματα

Παρόλο που το ίδιο το LNG δεν είναι δηλητηριώδες, η έκθεση στο κέντρο του αερίου νέφους του μπορεί να οδηγήσει σε ασφυξία λόγω της έλλειψης οξυγόνου. Οι συγκεντρώσεις περίπου 50% κατ'όγκο (μεθανίου στον αέρα) προκαλούν προφανή συμπτώματα ασφυξίας, όπως δυσκολίας στην αναπνοή και ταχεία αναπνοή ταυτόχρονα καθώς η ικανότητα ανταπόκρισης σε συντονισμό μυών εξασθενεί. Επιπλέον η παρατεταμένη αναπνοή των ατμών μπορεί να προκαλέσει ζάλη, ναυτία απώλεια αισθήσεων και τελικά βλάβη των πνευμόνων. Ο κίνδυνος θανάτου από ασφυξία αυξάνεται πολύ περισσότερο για τους χειριστές που εργάζονται σε περιορισμένου χώρους, λόγω του ότι το LNG είναι άχρωμο και άοσμο.<sup>[46]</sup>

Κρυογονικά εγκαύματα μπορούν επίσης να προκληθούν όταν το ανθρώπινο σώμα έρθει σε άμεση επαφή με κρυογονικά υγρά, μέταλλα ή ψυχρά αέρια. Το ιξώδες των κρυογονικών υγρών είναι πολύ χαμηλό γεγονός που διευκολύνει την διείσδυσή τους σε πορώδη υλικά ή ρούχα και μάλιστα πολύ καλύτερα από ότι το νερό. Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία  $-162^{\circ}\text{C}$ , είναι εξαιρετικά επικίνδυνο και μπορεί να τραυματίσει σημαντικά έως θανάσιμα το προσωπικό ή οποιονδήποτε έρθει σε επαφή μαζί του.<sup>[71]</sup> Αν και η στιγμιαία επαφή μπορεί να είναι αβλαβής, η άμεση και εκτεταμένη έκθεση σε LNG μπορεί να καταστρέψει τους ιστούς του δέρματος και τα μάτια, προκαλώντας πόνο και φαγούρα, πολύ πιο γρήγορα από ότι η έκθεση στους ατμούς του. Παράλληλα μπορεί να προκαλέσει και άμεση κατάψυξη των υποδομών και εγκαταστάσεων που βρίσκονται δίπλα του, των οποίων τα μέταλλα, πλαστικά, ελαστικά και άλλα υλικά υπόκεινται σε θραύση και ρήξη.<sup>[46]</sup>

## **2.5.2 Ανάφλεξη και Πυρκαγιές**

### Flash fire

Αν μετά τη διαρροή του LNG στο έδαφος ή το νερό, οι ατμοί που δημιουργούνται από την εξάτμιση βρεθούν σε μια εύφλεκτη συγκέντρωση με τον αέρα, δηλαδή εντός των Ορίων Αναφλεξιμότητας που περιγράφηκαν παραπάνω, και υπάρχει πηγή ανάφλεξης, το σύννεφο ατμών θα αναφλεγεί πάνω από την κηλίδα του υγρού LNG προκαλώντας αυτό που ονομάζεται flash fire. Η ανάφλεξη αυτή του αερίου νέφους, όπως αλλιώς ονομάζεται, είναι παροδική και δεν διαρκεί πάνω από δέκα δευτερόλεπτα και ενώ είναι θανατηφόρα για τους ανθρώπους που βρίσκονται μέσα σε αυτή, η ολική θερμότητα που φτάνει σε κάποιο αντικείμενο κοντά σε αυτή είναι μικρότερη από αυτή που προέρχεται από ένα jet fire ή μια μακροχρόνια κηλίδα στην ίδια απόσταση. Παρόλο που ένα από τα γενικά χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς αυτής είναι η μεγάλη ταχύτητα εξάπλωσης της φλόγας, πειράματα έχουν αποδείξει ότι μια flash fire διαδίδεται με ταχύτητα 10 έως 20 m/s. Η πυρκαγιά αυτή μπορεί να σταθεροποιηθεί μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ως πυρκαγιά λίμνης (pool fire) ή γλώσσα φωτιάς (jet fire).<sup>[43]</sup>

### Pool fire

Η flash fire που δημιουργείται, ανάλογα με το διαθέσιμο οξυγόνο, κατευθύνεται στην αρχική περιοχή της διαρροής προς τα πίσω, και συνεχίζει να καίγεται πάνω από το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο που έχει συγκεντρωθεί στην επιφάνεια σχηματίζοντας αυτό που είναι γνωστό ως πυρκαγιά λίμνης (pool fire) (Εικόνα 10).<sup>[31]</sup> Στην Εικόνα 11, παρουσιάζεται αυτή η αλληλουχία των σεναρίων που προκύπτουν από τη διαρροή LNG από ένα δεξαμενόπλοιο και τελικά οδηγούν σε πυρκαγιά λίμνης. Μια πυρκαγιά λίμνης είναι μια φωτιά στροβιλώδους διάδοσης η οποία καίει πάνω από μία οριζόντια λίμνη εξατμιζόμενου καυσίμου, όπου το καύσιμο έχει χαμηλή αρχική

ορμή ή μηδενική. Η πυρκαγιά λίμνης μπορεί να είναι μια ταχέως εξαπλώμενη πυρκαγιά ή στατική πυρκαγιά και μπορεί επίσης να προκληθεί, όταν οι ατμοί του LNG αμέσως μετά την δημιουργία τους, αναφλεγούν αμέσως και πολύ κοντά στην κηλίδα που έχει σχηματιστεί.<sup>[13]</sup>

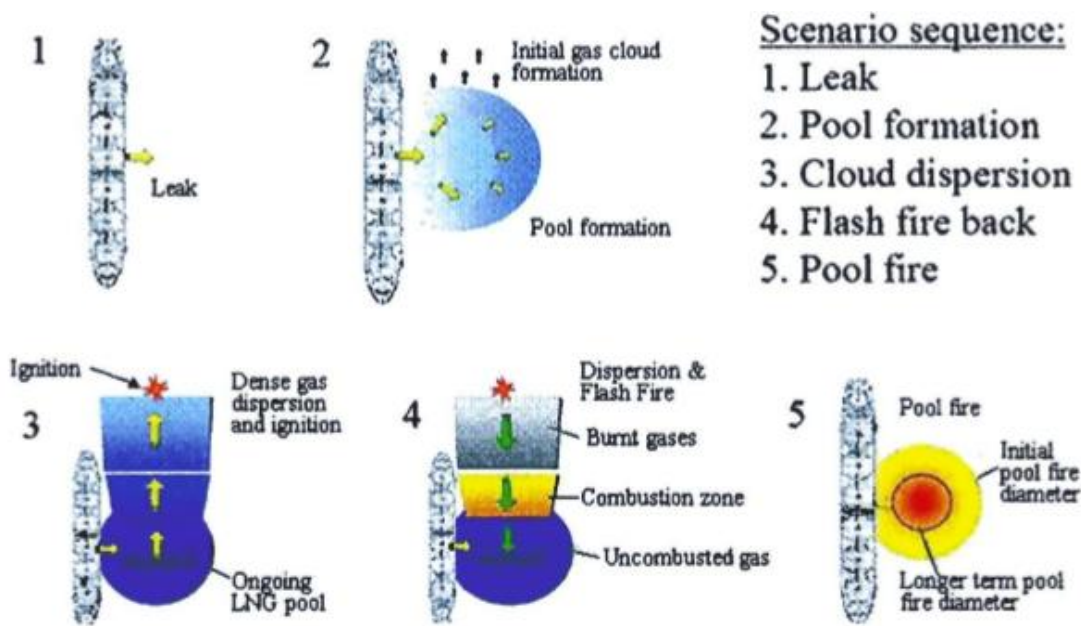
Όταν το μεθάνιο καίγεται, καίγεται με πολύ λίγο καπνό και όχι με τον μαύρο καπνό που σχετίζεται με τις πυρκαγιές πετρελαίου,<sup>[28]</sup> αλλά σύμφωνα με πειραματικές μελέτες, οι πυρκαγιές LNG αναπτύσσουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τις πυρκαγιές πετρελαίου ή βενζίνης ίδιου μεγέθους, καθώς και μεγαλύτερο ύψος φλόγας.<sup>[31]</sup> Η πυρκαγιά λίμνης που θα προκληθεί θα εξαπλωθεί, όπως εξαπλώνεται και η κηλίδα LNG, μακριά από την πηγή διαρροής και το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο θα συνεχίσει να εξατμίζεται και να παράγει ατμούς. Για να σβήσει θα πρέπει να αναλωθεί πρώτα όλο το LNG. Αν η κηλίδα δημιουργηθεί σε μια περιορισμένη έκταση, στην έκταση αυτή θα περιοριστεί και η πυρκαγιά η οποία θα καίγεται μέχρι να καταναλωθεί όλο το καύσιμο. Ανάλογα με το μέγεθος της λίμνης, το σχήμα, την ταχύτητα του ανέμου και την ακριβή σύσταση LNG, το ύψος της φλόγας μιας πυρκαγιάς λίμνης θα είναι περίπου 2-3 φορές τη διάμετρό της.<sup>[28]</sup>

Δεδομένου ότι η πυρκαγιά λίμνης αναπτύσσει πολύ υψηλές θερμοκρασίες σε μικρό χρονικό διάστημα, η θερμική ακτινοβολία μπορεί τραυματίσει ανθρώπους και να προκαλέσει ζημιά σε ιδιοκτησίες που βρίσκονται σε σημαντική απόσταση από αυτή. Μεγάλος αριθμός ειδικών συμφωνούν ότι ο πιο σοβαρός κίνδυνος Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου είναι η πυρκαγιά λίμνης LNG, ειδικά πάνω σε νερό,<sup>[13]</sup> όπου οι μη αδιαβατικές συνθήκες προκαλούν πρόσθετη μεταφορά θερμότητας από το υπόστρωμα του νερού και συνεπώς έναν υψηλότερο ρυθμό απόδοσης.<sup>[32]</sup> Η πυρκαγιά λίμνης σε θαλάσσιο υπόστρωμα δεν θα μελετηθεί στην παρούσα διπλωματική, καθώς σχετίζεται περισσότερο με ατυχήματα που μπορούν να συμβούν σε ένα πλωτό σταθμό LNG, ο οποίος αναλύεται σε άλλη πτυχιακή εργασία.



**Εικόνα 10:** Πυρκαγιά λίμνης LNG σε νερό (αριστερά) και έδαφος (δεξιά)<sup>[33]</sup>





**Εικόνα 11:** Διαρροή LNG, δημιουργία κηλίδας, ανάφλεξη αερίου νέφους και τελικά πυρκαγιά λίμνης<sup>[37]</sup>

### Jet fire

Η ανάφλεξη του αερίου νέφους (flash fire) του LNG μετά τη διαρροή του, μπορεί να οδηγήσει και σε αυτό που ονομάζεται jet fire ή αλλιώς γλώσσα φωτιάς (Εικόνα 12). Το jet fire είναι μια στροβιλώδης φλόγα διάχυσης, που σε αντίθεση με την πυρκαγιά λίμνης, προκύπτει από την καύση ενός καυσίμου το οποίο απελευθερώνεται συνεχώς με κάποια σημαντική ορμή προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Για παράδειγμα μπορεί να προκληθεί λόγω εκροής αερίου ή διασπασμένου μίγματος, από εξαρτήματα που λειτουργούν σε υψηλή πίεση (τυπικά πάνω από 2 bar) όπως αντλίες, βαλβίδες ή σωληνώσεις. Οι ιδιότητες μιας γλώσσας φωτιάς εξαρτώνται από τη σύνθεση του καυσίμου, τις συνθήκες, τον ρυθμό και τη γεωμετρία απελευθέρωσης, την κατεύθυνση και τις συνθήκες του περιβάλλοντος.<sup>[34]</sup> Μια οριζόντια προσανατολισμένη πυρκαγιά θα μπορούσε να συμβεί αν το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο, που έχει διαρρεύσει από την πλευρική επιφάνεια ενός σωλήνα, αναφλεγόταν ή πραγματοποιούταν ολοκληρωτική ρήξη του σωλήνα. Αυτό το είδος πυρκαγιάς είναι απίθανο να συμβεί σε μια δεξαμενή αποθήκευσης, καθώς το προϊόν δεν είναι αποθηκευμένο υπό πίεση (με εξαίρεση την υδραυλική πίεση κεφαλής) και στους χερσαίους τερματικούς σταθμούς υπάρχει μικρή αποθήκευση οποιωνδήποτε υγρών υπο πίεση. Ένα jet fire μπορεί να προκληθεί όμως, από υψηλής πίεσης εξατμιστήρες ή κατά τη διάρκεια των φορτω-εκφορτώσεων σε ένα δεξαμενόπλοιο υπό πίεση της αντλίας, ακόμα και όταν οι βαλβίδες απομόνωσης κλείσουν μια γραμμή υπό πίεση.<sup>[7]</sup> Η γλώσσα φωτιάς μπορεί να προσκρούσει σε κτίρια και σε εξοπλισμό επεξεργασίας και να δράσει σαν καμινέτο. Παράγει πολύ υψηλές ροές θερμότητας και μπορεί να συνεχίσει να καίγεται όταν έρθει σε επαφή με αντικείμενα. Το ύψος της πυρκαγιάς όμως είναι αρκετά περιορισμένο, και συνήθως δεν ξεπερνάει τα 50 m, οπότε ο κίνδυνος περιορίζεται μέσα στην εγκατάσταση LNG.<sup>[36]</sup>



Εικόνα 12: LNG Jet fire<sup>[35]</sup>

### 2.5.3 Έκρηξη αερίου νέφους (Vapor Cloud Explosion VCE)

Η έκρηξη αερίου νέφους (VCE) εμφανίζεται με την ανάφλεξη ενός εύφλεκτου μίγματος ατμών, αερίου, αερολύματος ή ομίχλης, στην οποία οι ταχύτητες φλόγας επιταχύνονται σε υψηλότερες ταχύτητες και προκαλούν υπερπίεση. Το καθαρό μεθάνιο δεν είναι γνωστό ότι προκαλεί ζημιογόνες υπερπίεσεις αν αναφλεγεί σε μία μη οριοθετημένη ανοιχτή περιοχή.<sup>[7]</sup> Πειραματικές μελέτες επιβεβαίωσαν ότι μια έκρηξη αερίου νέφους LNG, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο υπό συνθήκες μερικού περιορισμού ή σε περιοχές συμφόρησης. Οι τελευταίες ορίζονται από μια μεγάλη πυκνότητα εμποδίων όπως σωληνώσεις, αντλίες και άλλο παρόμοιο εξοπλισμό. Οι περιοχές αυτές συναντώνται σε εγκαταστάσεις υγροποίησης καθώς και σε τερματικούς σταθμούς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι η διαρροή LNG στη θάλασσα, ακόμη και αν έχει προκληθεί από σύγκρουση πλοίων, δεν θεωρείται ότι συμβαίνει σε περιορισμένη περιοχή. Τα καταστρώματα των σύγχρονων πλοίων LNG μπορούν να προσφέρουν περιοχές συμφόρησης με τον εξοπλισμό τους, αλλά και πάλι αυτό θα συμβαίνει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Σε συνδυασμό με την χαμηλή αντιδραστικότητα του φυσικού αερίου, οι πιθανότητες για μια έκρηξη αερίου νέφους LNG σε ανοιχτή απεριόριστη περιοχή είναι πολύ λίγες.<sup>[36]</sup>

Μόνο λοιπόν σε μια περιορισμένη ζώνη και σε συγκεκριμένες συνθήκες οι ταχύτητες φλόγας, που είναι μικρότερες από τις ηχητικές, επιταχύνουν ώστε να σχηματίσουν έκρηξη, η οποία πραγματοποιείται μόνο μέσα στα όρια της ζώνης αυτής. Ακόμα κι έτσι όμως έχει αρκετά μεγάλη επίδραση. Γενικά μια έκρηξη είναι λιγότερο καταστροφική από μια πυροκρότηση, η οποία συμβαίνει με περισσότερο αντιδραστικά αέρια, όπως το αιθυλένιο, και καίει όλο το καύσιμο μέσα σε ένα εύφλεκτο εύρος συμπεριλαμβανομένης και της περιοχής έξω από την ζώνη συμφόρησης.<sup>[7]</sup>

Μια έκρηξη αερίου νέφους μπορεί να συμβεί, λόγω της συσσώρευσης ατμών φυσικού αερίου σε εσωτερικούς χώρους ή μέσα σε κάθε κλειστό χώρο, όπως αναφέρθηκε στην πρώτη παράγραφο. Συχνά προκύπτει από διαρροή στις σωληνώσεις φυσικού αερίου σε ένα κτήριο. Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο διατηρείται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία και η ατμόσφαιρα μέσα σε μια χερσαία δεξαμενή αποθήκευσης, ένα φορτηγό ή σε θαλάσσιο φορέα είναι μηδενικής περιεκτικότητας σε οξυγόνο. Ακόμη και στη χειρότερη περίπτωση ανοίγματος της βαλβίδας κενού, ο αέρας που θα εισχωρήσει δεν θα είναι επαρκής ώστε οι ατμοί να αναφλεγούν. Επιπλέον οι γραμμές υγροποίησης και επαναεριοποίησης δεν επιτρέπονται εντός κτηρίων, στα οποία οι

εισροές αέρα είναι σπάνιες, διότι εκτείνονται πάνω από τα περισσότερα πυκνά σύννεφα ατμών του LNG.<sup>[36]</sup>

Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι σε ορισμένες εγκαταστάσεις LNG μπορούν να βρεθούν αποθηκευμένα σημαντικά ποσά ψυκτικών αερίων ή μιγμάτων που περιέχουν αιθάνιο, προπάνιο, ισοβουτάνιο κ.α., βαρύτερων υδρογονανθράκων που παράγονται από κάποια διεργασία συμπίκνωσης ως παραπροϊόντα, ακόμα και πετρελαϊκών προϊόντων. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα εκρήξεων αερίου νέφους σε περιοχές που περιλαμβάνουν αυτά τα προϊόντα υψηλότερου μοριακού βάρους.<sup>[38]</sup>

## 2.5.4 Έκρηξη εκτονώμενου ατμού ζέοντος υγρού (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion BLEVE)

Ως φαινόμενο BLEVE ορίζεται η έκρηξη αναβράζοντος υγρού διαστελλόμενου αερίου, η οποία προκαλείται από ρήξη ενός δοχείου που περιέχει υγρό υπό πίεση πάνω από το σημείο βρασμού του. Εάν ένα υγρό είναι σε έναν ασφαλισμένο χώρο (δεξαμενή) και υπερθερμανθεί ως αποτέλεσμα της εξωτερικής έκθεσης πυρκαγιάς, η πίεση στο εσωτερικό του δοχείου αυξάνεται. Με τον τρόπο αυτό προκαλείται άνοιγμα της βαλβίδας εκτόνωσης, η οποία επιτρέπει στον ατμό υπό πίεση να ξεφύγει. Καθώς η στάθμη του υγρού στο δοχείο μειώνεται, οι φλόγες προσκρούουν στα τοιχώματα πάνω από τη στάθμη του υγρού και έτσι το τοίχωμα θερμαίνεται ταχέως, αδυνατίζει και στη συνέχεια καταλήγει σε καταστροφή. Οι συνέπειες ενός φαινομένου BLEVE είναι: ωστικό κύμα υπερπίεσης, θερμική ακτινοβολία και θραύσματα που εκτινάσσονται σαν πύραυλος. Τα παραπάνω μπορούν να προκαλέσουν τραυματισμό και ζημιές σε κατασκευές ακόμα και θάνατο και είναι δυνατό να εμφανιστούν και σε μεγάλη απόσταση από την πηγή BLEVE.<sup>[42]</sup>

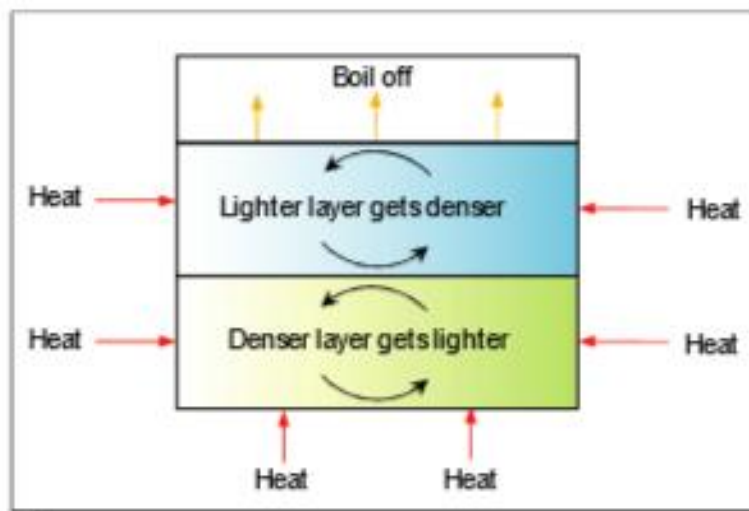
Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο δεν είναι υπό συνθήκες υψηλής πίεσης (αυτός είναι έτσι κι αλλιώς ο στόχος της υγροποίησης), οπότε υπάρχουν ελάχιστες πιθανότητες να δημιουργηθεί το φαινόμενο BLEVE. Ακόμη και σε περίπτωση άμεσης θερμικής εισόδου στο εσωτερικό της δεξαμενής αποθήκευσης LNG, είναι απίθανο η πίεση της δεξαμενής να φτάσει σε επαρκές σημείο ώστε να προκληθεί μεγάλη έκρηξη υγρού και επακόλουθο φαινόμενο BLEVE, αφού και το εξωτερικό σκυρόδεμα αποτελεί ένα αρκετά αποτελεσματικό φράγμα. Είναι πιθανό όμως με έναν λανθασμένο σχεδιασμό σε ένα φορτηγό μεταφοράς LNG, οι βαλβίδες εκτόνωσης να είναι ρυθμισμένες σε σημείο υψηλής πίεσης, επιτρέποντας έτσι σε μια θερμαινόμενη μεταλλική κατάσταση που της ασκείται αυτή η πίεση, να αναπτυχθεί σε φωτιά. Το ατύχημα αυτό συνέβη σε ένα φορτηγό μεταφοράς LNG στην Ισπανία το 2002,<sup>[7]</sup> και μάλιστα στις 14/6/2020 σημειώθηκε έκρηξη σε βυτιοφόρο στην Κίνα που μετέφερε LNG, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας μεγάλης πύρινης σφαίρας που οδήγησε στον θάνατο 19 ανθρώπων και την κατάρρευση κοντινών κατοικιών και εργοστάσιων.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η έκρηξη εκτονώμενου ζέοντος υγρού ακολουθείται από μια πύρινη σφαίρα (fireball), η οποία διαρκεί περίπου 20 με 40 δευτερόλεπτα, και η θερμική επίδραση της οποίας, ανάλογα τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, μπορεί να προκαλέσει μέχρι και εγκαύματα τρίτου βαθμού.



## 2.5.5 Κίνδυνος ανατροπής (Rollover)

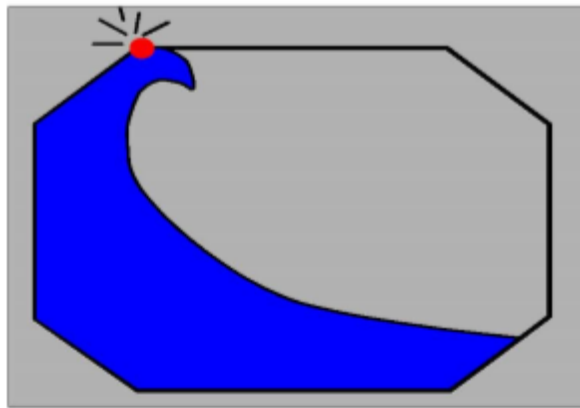
Η ανατροπή του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (rollover) αναφέρεται στην ταχεία απελευθέρωση ατμών LNG από τη δεξαμενή αποθήκευσης, που προκαλείται από διαστρωμάτωση (Εικόνα 13).<sup>[43]</sup> Οριζόντια στρώματα στο υγρό μπορούν να δημιουργηθούν κυρίως από εκλεκτική εξάτμιση πτητικών στην επιφάνεια ή από φόρτωση διαφορετικής πυκνότητας φορτίου. Για παράδειγμα αν εξατμίζεται εκλεκτικά μεθάνιο το εναπομένον επιφανειακό υγρό είναι βαρύτερο, λόγω μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε βαρύτερους υδρογονάνθρακες. Αν όμως εξατμίζεται άζωτο το επιφανειακό στρώμα γίνεται ελαφρύτερο από το κυρίως υγρό. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε στις ιδιότητες του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, η σύσταση του ποικίλει ανάλογα την περιοχή προέλευσής του και την επεξεργασία που έχει υποστεί, επομένως υπάρχει περίπτωση το πλοίο μεταφοράς LNG να προμηθευτεί διαφορετικό προϊόν κατά τη φόρτωση από αυτό που έχει ήδη αποθηκευμένο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία στρωμάτων υγρού στην δεξαμενή λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων. Από αυτά τα στρώματα μόνο το επιφανειακό μπορεί να αποδώσει με εξάτμιση την εισρέουσα θερμότητα. Τα βαρύτερα στρώματα που βρίσκονται χαμηλότερα αποθηκεύουν την θερμότητα και αυξάνεται η θερμοκρασία τους. Η θερμοκρασία των χαμηλότερων αυτών στρωμάτων μπορεί να είναι και υψηλότερη από την θερμοκρασία ισορροπίας στην επιφάνεια, χωρίς όμως να υπάρχει βρασμός, αφού ο βρασμός παρεμποδίζεται από το υδροστατικό φορτίο. Με άλλα λόγια η θερμοκρασία ισορροπίας του υγρού που βρίσκεται σε κάποιο βάθος, είναι υψηλότερη της θερμοκρασίας ισορροπίας ίδιας σύστασης υγρού στην επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θερμική υπερπλήρωση (thermal overfill) και αναφέρεται στην επιπλέον ενθαλπία που έχει το αποθηκευμένο υγρό σε σχέση με την ενθαλπία που θα είχε στη θερμοκρασία ισορροπίας στην επιφάνεια. Με την αύξηση της θερμοκρασίας ελαττώνεται η πυκνότητα των χαμηλότερων στρωμάτων και έρχεται κάποια στιγμή που οι πυκνότητες των γειτονικών στρωμάτων εξισώνονται. Όταν η εξίσωση των πυκνοτήτων και η ανάμειξη των γειτονικών στρωμάτων γίνει απότομα (rollover) η παγιδευμένη θερμότητα μετατρέπεται σε αέριο. Μεγάλες ποσότητες αερίου μπορούν να παραχθούν, οι οποίες προσπαθώντας να βρουν διέξοδο από την δεξαμενή, δημιουργούν υπερπίεσεις και βάζουν σε δοκιμασία την εγκατάσταση. Τέτοια φαινόμενα γίνονται καταστροφικά, όταν ο ρυθμός παραγωγής αερίου υπερβαίνει τις δυνατότητες των βαλβίδων ασφαλείας και έχουν ως αποτέλεσμα ρωγμές ή δομικά προβλήματα σε κάποιο σημείο της δεξαμενής που έχουν ως επακόλουθο την δημιουργία κηλίδων LNG στο έδαφος ή το νερό και επομένως όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, με την παρουσία βέβαια κατάλληλων συνθηκών.<sup>[24]</sup> Rollover μπορεί να δημιουργηθεί και όταν το φορτίο αποθηκεύεται για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς κυκλοφορία.



Εικόνα 13: Διαστρωμάτωση υγρού μέσα σε δεξαμενή αποθήκευσης LNG<sup>[97]</sup>

### 2.5.6 «Χτύπημα» (Sloshing)

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί ένας κίνδυνος, που δεν προέρχεται κυρίως από το ίδιο το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο, τις ιδιότητες και την συμπεριφορά του μετά από διαρροή, αλλά προκύπτει για κάθε δεξαμενόπλοιο που μεταφέρει υγρό φορτίο. Ο κίνδυνος αυτός, προκαλείται από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται από τα κύματα της θάλασσας στο κύτος του πλοίου και από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των τοιχωμάτων της δεξαμενής αποθήκευσης, λόγω κίνησης του υγρού. Η ροή λοιπόν γύρω από το σκάφος, που οφείλεται αποκλειστικά στις καιρικές συνθήκες καθώς και η ροή μέσα στις δεξαμενές, προκαλούν αυτό το «χτύπημα» ή αλλιώς sloshing (Εικόνα 14).<sup>[44]</sup>



**Εικόνα 14: "Χτύπημα" (sloshing) στην δεξαμενή αποθήκευσης LNG<sup>[37]</sup>**

Το φαινόμενο αυτό όχι μόνο μπορεί να προκαλέσει δομικές ζημιές σε όλα τα τοιχώματα της δεξαμενής, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα του πλοίου με αποτέλεσμα την εκτροπή του. Σημειώνεται πως όταν η δεξαμενή είναι μερικώς γεμάτη, μεγαλύτερο μέρος των τοιχωμάτων της είναι ευάλωτο στην πρόσκρουση του υγρού. Το πρόβλημα συναντάται μόνο στις δεξαμενές μεμβράνης, που θα εξεταστούν στο επόμενο κεφάλαιο, ενώ ο σφαιρικός και ο πρισματικός σχεδιασμός δεν υπόκεινται στις ίδιες επιπτώσεις.<sup>[45]</sup>

## 2.6 Παραδείγματα ατυχημάτων με LNG

Γενικά η βιομηχανία Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου έχει ένα εξαιρετικό ιστορικό ασφαλείας, σε σύγκριση με τα διυλιστήρια και άλλες πετροχημικές εγκαταστάσεις. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου, κατά τη διάρκεια ζωής του κλάδου, οκτώ θαλάσσια περιστατικά σε όλο τον κόσμο έχουν οδηγήσει σε διαρροή LNG, με αποτέλεσμα την καταστροφή ορισμένων σκαφών λόγω κρυογονικής θραύσης, αλλά δεν έχουν σημειωθεί πυρκαγιές φορτίου. Σημειώθηκαν επτά περιστατικά που δεν αφορούν διαρροή, τρία από αυτά στο έδαφος χωρίς όμως σημαντική απώλεια φορτίου, ενώ θανάσιμα ατυχήματα στα ειδικά δεξαμενόπλοια μεταφοράς LNG δεν έχουν καταγραφεί.<sup>[22]</sup> Τα πιο σημαντικά ιστορικά ατυχήματα Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου παγκοσμίως παρατίθενται παρακάτω.

### Κλήβελαντ, Οχάιο, 1944

Το 1939 κατασκευάστηκε στην Δυτική Βιρτζίνια το πρώτο εργοστάσιο Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου. Η εταιρία αερίου στο ανατολικό Οχάιο έχτισε μια δεύτερη εγκατάσταση στο Κλήβελαντ. Το σύστημα αυτό αιχμής λειτούργησε χωρίς κανένα ατύχημα, μέχρι το 1944, όπου η εγκατάσταση επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει μια μεγαλύτερη δεξαμενή. Η έλλειψη κραμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα, λόγω του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου, οδήγησε σε διάφορους συμβιβασμούς στον σχεδιασμό της νέας δεξαμενής. Η δεξαμενή απέτυχε λίγο μετά την τοποθέτησή της, επιτρέποντας στο LNG να διαφύγει σχηματίζοντας μια εξατμιζόμενη κηλίδα, η οποία αναφλέχθηκε οδηγώντας στο θάνατο 128 ανθρώπων στην γειτονική κατοικημένη περιοχή. Παράλληλα το σύννεφο ατμών που δημιουργήθηκε λόγω της εξάτμισης, γέμισε τους γύρω δρόμους και το σύστημα αποχέτευσης. Το συμπέρασμα του φορέα διερεύνησης ήταν, ότι δεν είχαν τηρηθεί οι κατάλληλες προφυλάξεις κατά την αποθήκευση του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου.<sup>[22]</sup>

### Cove Point, Μέρυλαντ, 1979

Τον Οκτώβριο του 1979, σημειώθηκε έκρηξη σε έναν ηλεκτρικό υποσταθμό στον τερματικό σταθμό του Cove Point. LNG διέρρευσε από μια ανεπαρκώς σφικμένη αντλία, εξατμίστηκε, πέρασε μέσα από 61 μέτρα υπόγειου ηλεκτρικού αγωγού και εισήχθη στον υποσταθμό. Επειδή το φυσικό αέριο ποτέ δεν ήταν αναμενόμενο να βρεθεί μέσα στον σταθμό, δεν υπήρχαν εγκατεστημένοι ανιχνευτές αερίου. Το μίγμα ατμών-αέρα αναφλέχθηκε οδηγώντας σε έκρηξη, που σκότωσε έναν χειριστή του κτηρίου, τραυμάτισε σοβαρά έναν δεύτερο και προκάλεσε υλικές ζημιές των τριών εκατομμυρίων. Αυτό ήταν ένα μεμονωμένο ατύχημα που προκλήθηκε από ένα συγκεκριμένο σύνολο περιστάσεων. Η εθνική επιτροπή για την ασφάλεια μεταφορών διαπίστωσε ότι ο τερματικός σταθμός σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σύμφωνα με όλες τις κατάλληλες ρυθμίσεις και κώδικες. Ωστόσο ως αποτέλεσμα του ατυχήματος αυτού, έγιναν τρεις σημαντικές αλλαγές στον σχεδιασμό της εγκατάστασης πριν από την εκ νέου λειτουργία του, οι οποίες ισχύουν πλέον σε ολόκληρο τον κλάδο Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου.<sup>[22]</sup>

### Skikda, Αλγερία, 2004

Ένας λέβητας ατμού που ήταν μέρος μιας μονάδας παραγωγής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου εξερράγη λειτουργώντας έτσι ως πηγή ανάφλεξης, πυροδοτώντας πιο ογκώδεις πυρκαγιές, οι οποίες κατέστρεψαν μέρος του εργοστασίου και προκάλεσαν 27 θανάτους, 74 τραυματισμούς και υλικές ζημιές εκτός των ορίων του εργοστασίου.<sup>[22]</sup>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Τεχνολογία Υγραεριοφόρων Πλοίων LNG**

### **3.1 Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια (IGC Code)**

Στο Υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί ο Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια (International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Liquefied Gases in Bulk , IGC Code). Σκοπός του κώδικα είναι η παροχή ενός διεθνούς προτύπου για την ασφαλή θαλάσσια μεταφορά χύδην υγροποιημένων αερίων και ορισμένων άλλων ουσιών που απαριθμούνται στο Κεφάλαιο 19 αυτού. Με την εξέταση της φύσης των μεταφερόμενων προϊόντων και των ιδιοτήτων τους (ευφλεκτότητα, διαβρωτικότητα, αντιδραστικότητα, τοξικότητα, τάση ατμών, χαμηλή θερμοκρασία κ.α.), ορίζει τα πρότυπα σχεδιασμού και κατασκευής των πλοίων που εμπλέκονται, καθώς και τον εξοπλισμό που πρέπει να φέρουν ώστε να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο για το πλοίο, το πλήρωμα και το περιβάλλον.<sup>[48]</sup>

Ο Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια έγινε υποχρεωτικός στο πλαίσιο της SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea – Σύμβαση για την ασφάλεια ζωής στη θάλασσα) Κεφάλαιο VII την 1<sup>η</sup> Ιουλίου του 1986. Η τρέχουσα έκδοση του κώδικα ισχύει για τα υγραεριοφόρα πλοία που κατασκευάστηκαν πριν ή μετά την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2016, ανεξαρτήτως μεγέθους. Ο κώδικας IGC υπόκειται σε επανεξέταση και τα υγραεριοφόρα που κατασκευάστηκαν πριν από την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2016 άλλα μετά την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 1986, είναι υποχρεωμένα να έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με την έκδοση του κώδικα που ίσχυε κατά την χρονική περίοδο κατασκευής τους. Τα υγραεριοφόρα που κατασκευάστηκαν πριν γίνει ο κώδικας υποχρεωτικός, θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του Κώδικα για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια (GC Code) ή τον Κώδικα για τα Υπάρχοντα Πλοία που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια (EGC Gas Code).<sup>[47]</sup>

Η βασική φιλοσοφία, είναι ότι για κάθε τύπο πλοίου, που σχετίζεται με τους κινδύνους των προϊόντων που καλύπτονται από τον Κώδικα, κάθε ένα από τα προϊόντα που μεταφέρει μπορεί να έχουν μία ή περισσότερες επικίνδυνες ιδιότητες. Ένας περαιτέρω κίνδυνος μπορεί να προκύψει όταν τα προϊόντα μεταφέρονται υπό κρυογονικές συνθήκες ή συνθήκες υπό πίεσης. Σοβαρές συγκρούσεις ή ρήξεις είναι δυνατό να προκαλέσουν βλάβες στη δεξαμενή αποθήκευσης φορτίου και να οδηγήσουν σε ανεξέλεγκτη απελευθέρωση προϊόντος και στη συνέχεια σε εξάτμιση και διασπορά αυτού. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να προκληθεί και κάταγμα του κύτους του πλοίου. Οι απαιτήσεις λοιπόν του Κώδικα IGC αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων αυτών στο μέτρο του εφικτού, με βάση τις σημερινές γνώσεις και τεχνολογίες.<sup>[48]</sup>

Ο Κώδικας IGC προορίζει να παράσχει ένα κοινό σύνολο κανονισμών, που θα επιτρέπουν την έκδοση πιστοποιητικού καταλληλότητας για ένα πλοίο, έτσι ώστε να αποδεικνύει την συμμόρφωση του με τον κώδικα. Το πιστοποιητικό αυτό θα πρέπει να γίνει αποδεκτό από τα έθνη στα οποία μπορεί να εμπορεύεται το πλοίο, ως εξασφάλιση της ασφάλειας κατασκευής του.

Όπως και με άλλα πιστοποιητικά, ο Κώδικας απαιτεί περιοδική επανεξέταση του πλοίου κατά τη διάρκεια ζωής του, για να διατηρηθεί η ισχύς του.<sup>[47]</sup>

### 3.2 Γενικά χαρακτηριστικά των υγραεριοφόρων πλοίων LNG

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές στον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός υγραεριοφόρου πλοίου, λόγω της ποικιλίας των φορτίων που χρησιμοποιούνται και του αριθμού των συστημάτων συγκράτησης αυτών. Ο Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια, κατατάσσει τα υγραεριοφόρα πλοία σε 3 κατηγορίες με βάση το βαθμό επικινδυνότητας των φορτίων που μεταφέρουν για το περιβάλλον.<sup>[31]</sup>

1. Πλοία τύπου 1 G (φορτίο πολύ μεγάλου κινδύνου)
2. Πλοία τύπου 2 G (φορτίο μειωμένης επικινδυνότητας)
3. Πλοία τύπου 2 PG ( πλοίο τύπου 2 G με μήκος μικρότερο από 150 μέτρα)
4. Πλοία τύπου 3 G (φορτίο ελάχιστης επικινδυνότητας)

Επίσης, ανάλογα με τις δυνατότητες που έχουν να αποθηκεύουν το φορτίο, τα Υγραεριοφόρα πλοία κατηγοριοποιούνται και ως εξής:<sup>[31]</sup>

1. Πλήρους πίεσης (fully pressurized ships)
2. Ημι-ψυκτικού / Ημι-πιεστικού τύπου (semi-refrigerated / semi-pressurized ship)
3. Πλήρους ψύξης (fully refrigerated ship)
4. Πλοίο μεταφοράς αιθυλενίου (ethylene ship)
5. Πλοίο μεταφοράς LNG (LNG ship)

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου 3, θα περιγραφεί αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας, η κατασκευή και ο εξοπλισμός που διαθέτουν τα πλοία μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (κατηγορία 5) , τα οποία με βάση την επικινδυνότητά τους ορίζονται ως πλοία τύπου 2 G.

Ένα τυπικό σύγχρονο πλοίο μεταφοράς LNG, έχει μήκος περίπου 300 μέτρα, πλάτος 43 μέτρα και ελάχιστο βάθος υδάτων 12 μέτρα όταν είναι πλήρως φορτωμένο. Τα πλοία ποικίλουν ως προς την χωρητικότητα φορτίου από 1.000 κυβικά μέτρα έως 267.000 κυβικά μέτρα συνολικά. Τα πλοία μικρότερου μεγέθους (1.000-25.000 m<sup>3</sup>) λειτουργούν σε ορισμένες περιοχές όπως η Νορβηγία και η Ιαπωνία και γενικά στην εγχώρια αγορά, τα πλοία μεσαίου μεγέθους έχουν χωρητικότητα 50.000 έως 100.000 m<sup>3</sup> και τα πλοία μεγάλου μεγέθους έχουν χωρητικότητα μεγαλύτερη από 100.000 m<sup>3</sup>. Η πλειοψηφία των πλοίων μεταφοράς LNG είναι μεταξύ 125.000 και 175.000 κυβικών μέτρων (συνολική χωρητικότητα) και είναι ικανά να αναπτύξουν ταχύτητες μέχρι 10 m/s (τα πετρελαιοφόρα λειτουργούν στους 7,7-10 m/s).<sup>[47]</sup>

Η ναυπήγηση ενός πλοίου Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου και το χρονικό διάστημα που χρειάζεται, εξαρτάται από το ναυπηγείο και το μέγεθος του πλοίου, αλλά τυπικά συνήθως διαρκεί 20 με 36 μήνες. Στις αρκτικές περιοχές, τα πλοία αυτά επιτρέπουν την μεταφορά LNG σε παγωμένα νερά, αλλά και σε στενά κανάλια όπως του Παναμά και του Σουέζ.<sup>[47]</sup>

### 3.3 Σύστημα αποθήκευσης φορτίου που ορίζει ο Κώδικας

Στην εργασία αυτή θα δοθεί περισσότερη έμφαση στο σύστημα αποθήκευσης του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου του δεξαμενοπλοίου από τα υπόλοιπα συστήματα που περιέχει, καθώς αυτό συμμετέχει στις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης από χερσαίο τερματικό σταθμό σε πλοίο και το αντίστροφο.

Όσον αφορά το σύστημα αποθήκευσης φορτίου του πλοίου, ο Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια, αρχικά ορίζει την ακριβή τοποθεσία του συναρτήσει του συνολικού του όγκου και του τύπου του πλοίου.<sup>[48]</sup> Η απομόνωση των χώρων φορτίου είναι ιδιαίτερα σημαντική, για αυτό και ο Κώδικας απαιτεί τον εσώκλειστο χώρο της κατασκευής του πλοίου στον οποίο εδράζονται τα μέσα αποθήκευσης φορτίου, να είναι διαχωρισμένος από τους χώρους των μηχανολογικών, της ενδιαίτησης, των σταθμών ελέγχου, των δεξαμενών πόσιμου νερού κ.α. Επίσης υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις για την απομόνωση του δικτύου σωληνώσεων του φορτίου από άλλες σωληνώσεις, με σκοπό την αποφυγή της μεταφοράς του φορτίου ή ατμών του, μέσω άλλων σωληνώσεων.<sup>[50]</sup>

Σύμφωνα με τον Κώδικα IGC, η διάρκεια σχεδιασμού του συστήματος αποθήκευσης φορτίου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από τη διάρκεια σχεδιασμού του πλοίου. Ακόμη τα συστήματα αυτά θα πρέπει να σχεδιάζονται με κατάλληλα περιθώρια ασφαλείας ώστε: (α) να αντέχουν τις προβλεπόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες για όλη τη διάρκεια σχεδιασμού τους, και τις κατάλληλες συνθήκες φόρτωσης, οι οποίες περιλαμβάνουν πλήρεις συνθήκες ομοιόμορφου και μερικού φορτίου, μερική πλήρωση εντός καθορισμένων ορίων και φορτία έρματος και (β) να είναι κατάλληλα για αβεβαιότητες όσον αφορά τα φορτία, τη δομική μοντελοποίηση, την κόπωση, την διάβρωση, τις θερμικές επιδράσεις, τη μεταβλητότητα των υλικών, τις ανοχές της γήρανσης και κατασκευής. Ο σχεδιασμός του συστήματος αποθήκευσης λαμβάνει υπόψη του σωστούς συνδυασμούς των ακόλουθων φορτίων: (α) εσωτερική πίεση, (β) εξωτερική πίεση, (γ) δυναμικά φορτία λόγω κίνησης του πλοίου, (δ) θερμικά φορτία, (ε) φορτία εκτοξεύσεως, (ζ) φορτία που αντιστοιχούν στις εκτροπές του πλοίου, (η) βάρος φορτίου και δεξαμενής και την αντίστοιχη αντίδραση, (θ) βάρος μόνωσης, (ι) φορτία πύργων και άλλων εξαρτημάτων και (κ) φορτία δοκιμής.<sup>[48]</sup> Τέλος το σχέδιο φύλαξης του φορτίου, πρέπει να αναπτύσσεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι μέγιστες πιέσεις του ατμού του καθώς και το μέγιστο επιτρεπτό όριο των βαλβίδων ανακούφισης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Κώδικα IGC.<sup>[50]</sup>

Οι δεξαμενές αποθήκευσης, εκτός από το ακριβές υλικό κατασκευής που ορίζει ο Κώδικας, πρέπει να είναι εφοδιασμένες με ένα δεύτερο πλήρες στεγανό φράγμα, ικανό να περιέχει με ασφάλεια όλες τις πιθανές διαρροές του πρωτογενούς φράγματος, της ίδιας δηλαδή της δεξαμενής, και σε συνδυασμό με το σύστημα θερμομόνωσης, να εμποδίζει τη μείωση της θερμοκρασίας της δομής του πλοίου σε μη ασφαλές επίπεδο. Το μέγεθος, το υλικό και η διαρρύθμιση του δεύτερου αυτού φράγματος εξαρτάται από τον τύπο της δεξαμενής που περιέχει το πλοίο. Τα συστήματα αποθήκευσης φορτίου, για τα οποία η πιθανότητα εμφάνισης δομικών βλαβών σε κρίσιμη κατάσταση έχει καθοριστεί ότι είναι εξαιρετικά χαμηλή, αλλά δεν μπορεί να αποκλειστεί η πιθανότητα διαρροών μέσω του πρωτογενούς φράγματος, εκτός από το δεύτερο φράγμα, θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα και με ένα σύστημα προστασίας διαρροής, ικανό για ασφαλή χειρισμό και διαχείριση της διαρροής. Αντίθετα, δεύτερο φράγμα δεν απαιτείται για δεξαμενές, όπου η πιθανότητα δομικών βλαβών και διαρροών μέσω του πρωτογενούς φράγματος είναι εξαιρετικά χαμηλή και μπορεί να αγνοηθεί π.χ. Δεξαμενή Τύπου

C, που θα μελετηθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Δεύτερο φράγμα επίσης δεν απαιτείται όταν η θερμοκρασία του φορτίου σε ατμοσφαιρική πίεση είναι ίση η μεγαλύτερη από τους  $-10^{\circ}\text{C}$ .<sup>[48]</sup>

Το πρωτεύον φράγμα (δεξαμενή) θεωρείται ότι βρίσκεται στην θερμοκρασία του φορτίου, ενώ όταν απαιτείται και δευτερεύον φράγμα, θεωρείται ότι βρίσκεται στην θερμοκρασία του φορτίου και σε ατμοσφαιρική πίεση.<sup>[48]</sup>

Θερμική μόνωση είναι απαραίτητη για την προστασία του κύτους του πλοίου από τις θερμοκρασίες κάτω από τις επιτρεπόμενες που ορίζει ο Κώδικας, αλλά και για να περιορίζεται η ροή θερμότητας μέσα στη δεξαμενή σε τέτοιο επίπεδο, ώστε να μπορεί να διατηρηθεί από το σύστημα ελέγχου πίεσης και θερμοκρασίας. Η αποτελεσματικότητα της μόνωσης και η φύση του φορτίου που μεταφέρεται, θα πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά κατά τον σχεδιασμό του πλοίου. Ένα μεγαλύτερο πάχος μόνωσης θα μειώσει την ποσότητα του φορτίου που εξατμίζεται και την χωρητικότητα της μονάδας επανυγροποίησης που απαιτείται, αλλά θα μειώσει τον όγκο κερδοφορίας του σκάφους.<sup>[48]</sup>

Η επαρκής πρόσβαση στις δεξαμενές του φορτίου, είναι απαραίτητη, ώστε να επιτρέπεται η εσωτερική επιθεώρησή τους, χωρίς την αφαίρεση οποιασδήποτε σταθερής δομής ή εξαρτήματος.<sup>[50]</sup>

### 3.4 Τεχνικές προδιαγραφές κατασκευής και εξοπλισμού

Ένα σύστημα αποθήκευσης φορτίου λοιπόν, είναι το σύνολο των ρυθμίσεων για τη φύλαξη του φορτίου, όπου περιλαμβάνονται τα εξής:

- Πρωτεύον φράγμα (η δεξαμενή φορτίου)
- Δευτερεύον φράγμα (αν υπάρχει)
- Συνδυασμένη θερμομόνωση
- Οποιοσδήποτε παρεμβαλλόμενους χώρους και
- Γειτονική δομή, αν είναι απαραίτητη, για την υποστήριξη των παραπάνω στοιχείων

Για τα φορτία που μεταφέρονται σε θερμοκρασίες μεταξύ  $-10^{\circ}\text{C}$  και  $-55^{\circ}\text{C}$ , το κύτος του δεξαμενοπλοίου μπορεί να λειτουργήσει ως δευτερεύον φράγμα και σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να αποτελεί και όριο του χώρου συγκράτησης.<sup>[51]</sup>

Όλα τα πλοία μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου είναι διπλού κύτους (Εικόνα 15), αλλά διαφέρουν ως προς τα συστήματα αποθήκευσης του φορτίου, τα οποία μπορεί να είναι ανεξάρτητα ή ενσωματωμένα στο πλοίο. Μια τυπική διάταξη δεξαμενών συνίσταται από τέσσερις έως έξι δεξαμενές κατά μήκος του άξονα του πλοίου. Τις δεξαμενές αποθήκευσης περιβάλλουν δεξαμενές έρματος, υδατοστεγείς θάλαμοι και κενά. Αυτές οι περιοχές είναι που δίνουν στο πλοίο το σχέδιο του διπλού τοιχώματος και προσφέρουν την αυξημένη ασφάλεια έναντι διαρροών. Οι κενοί χώροι ονομάζονται Cofferdams και εξυπηρετούν στο να διαχωρίζουν τις μεμβράνες των δεξαμενών και να μειώνουν την πιθανότητα μιας δεξαμενής να επηρεάσει τη γειτονική της. Οι χώροι αυτοί έχουν συγκεκριμένο μέγεθος (φάρδος όχι παραπάνω από 600 mm) και διατηρούνται περίπου σε θερμοκρασία  $5^{\circ}\text{C}$  και άνω, κατά τη διάρκεια εκφορτώσεως, για να είναι εύκολα προσβάσιμοι, να αποφεύγεται ο κίνδυνος διαβρώσεως ή σπάσιμο της λαμαρίνας λόγω απότομης μεταβολής της θερμοκρασίας και για να αποφευχθεί οποιαδήποτε βλάβη στη μόνωση.<sup>[53]</sup>





**Εικόνα 15:** Πλοίο διπλού κύτους<sup>[62]</sup>

### 3.4.1 Κατασκευή Δεξαμενών

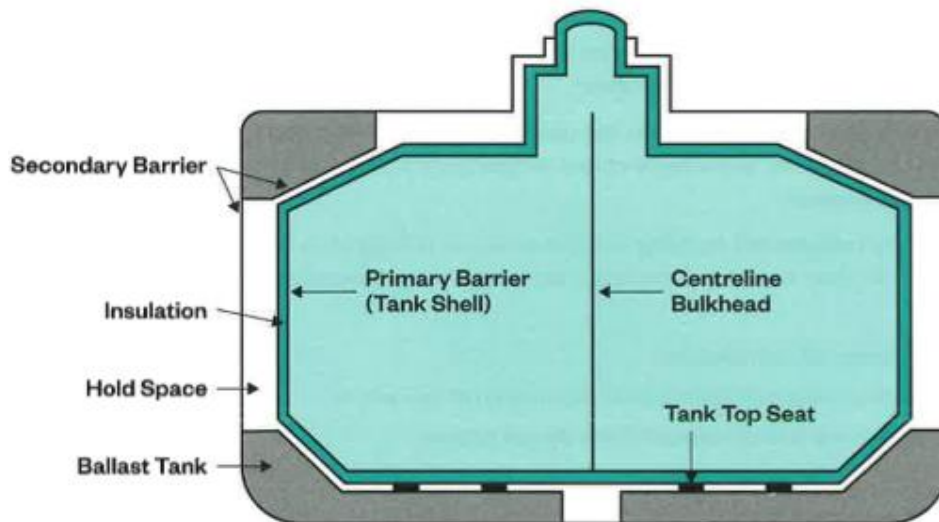
Ο Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια, ορίζει τους παρακάτω γενικούς τύπους δεξαμενών φορτίου:<sup>[49]</sup>

- **Ανεξάρτητες :** Αυτοσυντηρούμενες δεξαμενές, που δεν αποτελούν μέρος του κύτους του πλοίου και δεν είναι απαραίτητες στην αντοχή του. Υπάρχουν 3 κατηγορίες ανεξάρτητων δεξαμενών (Τύπος A, B και C) που βασίζονται κυρίως στην πίεση σχεδιασμού.
- **Δεξαμενές Μembrάνης :** Μη αυτοσυντηρούμενες δεξαμενές που αποτελούνται από ένα λεπτό υγρό και αέριο στρώμα (μεμβράνη), που στηρίζεται μέσω μόνωσης από τη γειτονική δομή του κύτους. Η πίεση σχεδιασμού για αυτές τις δεξαμενές είναι συνήθως λιγότερο από 0.25 bar, αλλά η τιμή αυτή μπορεί να αυξηθεί σε λιγότερο από 0.7 bar, αν οι σανίδες του κύτους και η αντοχή της μόνωσης είναι επαρκής.
- **Ημι-μεμβρανικές :** Αυτές αποτελούν μια παραλλαγή των δεξαμενών μεμβράνης που δεν χρησιμοποιούνται συχνά.
- **Αναπόσπαστες :** Οι δεξαμενές αυτές αποτελούν μέρος του κύτους του πλοίου και επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από τα φορτία που πιέζουν τη δομή του. Ο τύπος αυτός δεξαμενών συνήθως δεν επιτρέπεται για φορτία Υγροποιημένων Αερίων με σημείο βρασμού μικρότερο από  $-10^{\circ}\text{C}$ . Η πίεση σχεδιασμού για αυτές τις δεξαμενές είναι συνήθως λιγότερο από 0.25 bar, αλλά η τιμή αυτή μπορεί να αυξηθεί σε λιγότερο από 0.7 bar, αν οι σανίδες του κύτους και η αντοχή της μόνωσης είναι επαρκής. Η εμπορική τους χρήση είναι περιορισμένη.



### 3.4.1.1 Ανεξάρτητη Πρισματική Δεξαμενή, Τύπου Α

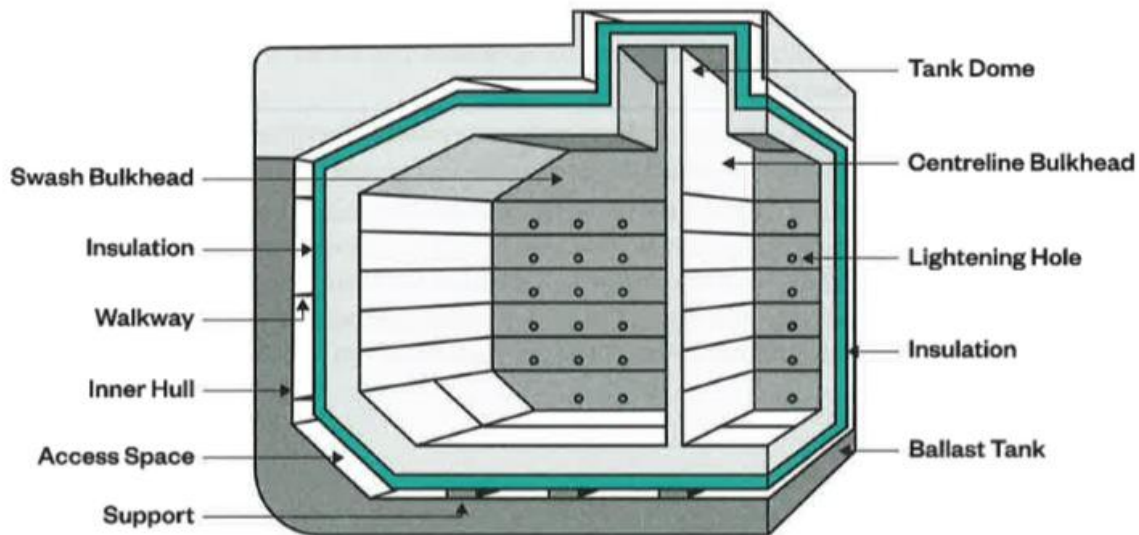
Αυτός ο τύπος δεξαμενής έχει σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας κλασσικές διαδικασίες δομικής ανάλυσης πλοίου. Οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες κυρίως από επίπεδες επιφάνειες αλουμινίου και έχουν μέγιστη πίεση σχεδιασμού 0.7 bar. Ένα κάθετο κεντρικό διάφραγμα χρησιμοποιείται με σκοπό να μειώσει το «χτύπημα» (sloshing), με τον χώρο ατμού όμως να παραμένει κοινός για όλη τη δεξαμενή. Επειδή το υλικό κατασκευής της δεξαμενής δεν είναι ανθεκτικό στη διάδοση ρωγμών, ένα δευτερεύον πλήρες φράγμα είναι απαραίτητο, με τέτοια χωρητικότητα, ώστε να συγκρατεί ολόκληρο τον όγκο της δεξαμενής σε οποιαδήποτε γωνία κλίσης. Η μόνωση παρέχεται με τη χρήση ενός επεξεργασμένου δευτερεύοντος φράγματος από ξύλο κόντρα πλακέ και αφρό πολουρεθάνης που τοποθετείται στο εσωτερικό του κύτους και μπορεί να συγκρατήσει διαρροές μέχρι και 15 μέρες.<sup>[49]</sup>



**Εικόνα 16:** Αυτοσυντηρούμενη Πρισματική Δεξαμενή Τύπου Α<sup>[49]</sup>

### 3.4.1.2 Ανεξάρτητη Πρισματική Δεξαμενή, Τύπου Β (SPB)

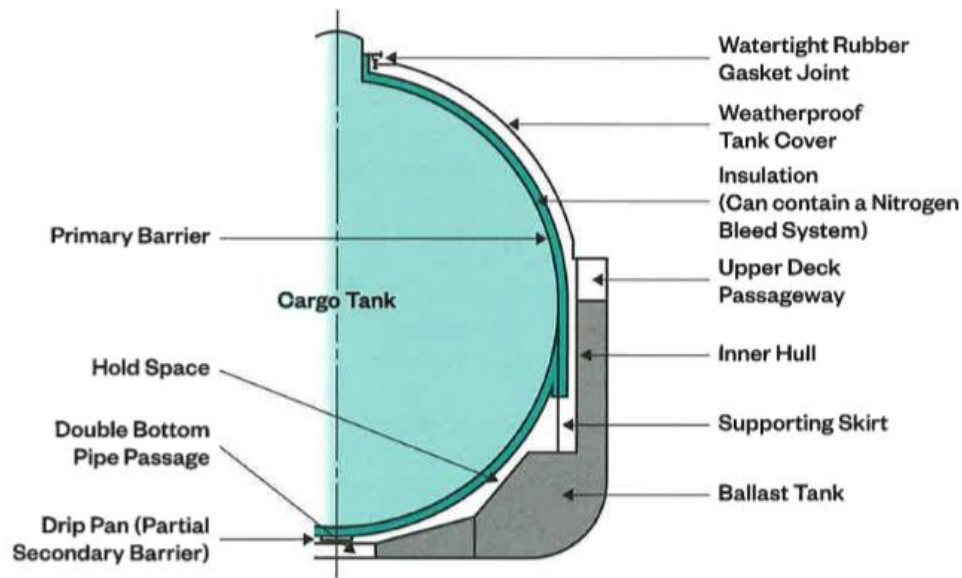
Αυτός ο τύπος δεξαμενής φορτίου έχει σχεδιαστεί με δοκιμές μοντέλου. Εξειδικευμένα εργαλεία ανάλυσης και μέθοδοι ανάλυσης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των τάσεων σε διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις, τη διάδοση των ρωγμών και τη διάρκεια ζωής της δομής. Η δεξαμενή είναι κατασκευασμένη με ενισχυμένη πλάκα από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα, έχει μέγιστη πίεση σχεδιασμού 0.7 bar και απαιτεί τη χρήση ενός μερικού δευτερεύοντος φραγμού. Η στήριξη επιτυγχάνεται με ενισχυμένα κόντρα πλακέ υποστηρίγματα, τα οποία επιτρέπουν την ελεύθερη επέκταση και τη συγκράτηση, αλλά συμβάλλουν αρνητικά στο συνολικό βάρος και κόστος. Το «χτύπημα» ελέγχεται από ένα κεντρικό κάθετο διάφραγμα καθώς και από ένα εγκάρσιο.<sup>[49]</sup> Πλεονέκτημα της δεξαμενής αυτής, είναι ότι κάνει χρήση του μέγιστου διαθέσιμου χώρου του φορτίου, αφήνοντας μικρότερα κενά ανάμεσα στις δεξαμενές εμπορεύματος και τις δεξαμενές έρματος.



**Εικόνα 17:** Ανεξάρτητη Πρισματική Δεξαμενή Τύπου Β<sup>[49]</sup>

### 3.4.1.3 Ανεξάρτητη Σφαιρική Δεξαμενή, Τύπου Β (Moss – Rosenberg)

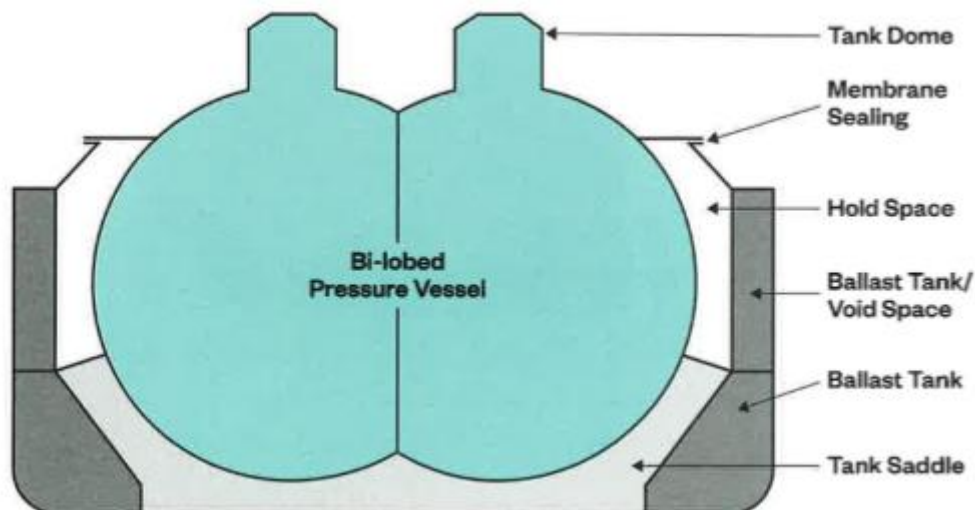
Αναφερόμενη συχνά ως Moss-Rosenberg ή Moss δεξαμενή, η διάταξη αυτή σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας τα ίδια εργαλεία και την ανάλυση με την ανεξάρτητη πρισματική δεξαμενή τύπου Β (SPB). Η δεξαμενή είναι κατασκευασμένη από κράμα αλουμινίου ή 9% χάλυβα νικελίου με εξωτερική μόνωση από αφρό πολουρεθάνης και μέγιστη πίεση σχεδιασμού 0.7 bar. Υποστηρίζεται από κυλινδρικά περιζώματα, κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό της δεξαμενής, που είναι προσαρτημένα στην περιφέρεια της σφαίρας και στηρίζονται στη δομή του πλοίου, αποτελώντας έτσι και τη μόνη σύνδεση της διάταξης με το κύτος του πλοίου. Μια σφαιρική προστασία από χαμηλής θερμοκρασίας υλικό, μπορεί να τοποθετηθεί μεταξύ της δεξαμενής αποθήκευσης και του εσωτερικού κύτους, με σκοπό να εκτρέψει οποιαδήποτε διαρροή σε ένα μονωμένο δοχείο συλλογής σταγόνων κάτω από τη δεξαμενή, το οποίο θεωρείται και το δευτερεύον φράγμα. Στο δοχείο αυτό βρίσκονται και ανιχνευτές θερμοκρασίας, με σκοπό να ανιχνεύσουν την παρουσία Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου. Πάνω από τον αφρό πολουρεθάνης, υπάρχει ένα λεπτό στρώμα ελασμάτων αλουμινίου για να διατηρείται στεγνή η μόνωση σε ατμόσφαιρα αζώτου, η οποία εμφανίζεται όταν ο χώρος φορτίου γεμίζει με αδρανές αέριο. Ένα εύκαμπτο υπόβαθρο επιτρέπει την ελεύθερη διαστολή και συστολή, ανάλογα τις θερμικές συνθήκες και τέτοιες αλλαγές διαστάσεων δεν αλληλεπιδρούν με την αρχική δομή του κύτους. Τέλος ένα μικρό τμήμα της δεξαμενής προεξέχει πάνω από το επίπεδο του κυρίου καταστρώματος, όπου και σε αυτό το σημείο προστατεύεται από ένα χαλύβδινο θόλο, λόγω των καιρικών συνθηκών.<sup>[49]</sup> Όλες οι σωληνώσεις προς τη δεξαμενή εισέρχονται από την κορυφή της και συνδέονται με αυτές του πλοίου με εύκαμπτα, πτυσσόμενα τμήματα. Η ιδέα πίσω από τον σχεδιασμό των δεξαμενών αυτών, είναι να υπάρχει μια δομή, στην οποία μπορεί να ανιχνευτεί μια ρωγμή πολύ πριν την πραγματική αποτυχία. Αυτό επιτρέπει και ένα χρονικό περιθώριο πριν συμβεί κάποιο ατύχημα. Για το λόγο αυτό αλλά και για την ικανότητά τους να ανεξαρτητοποιούνται σε περίπτωση αστοχίας στο κύτος του πλοίου, οι δεξαμενές Moss θεωρούνται οι πιο ασφαλείς στην αγορά της ναυτιλίας.<sup>[9]</sup>



**Εικόνα 18:** Ανεξάρτητη Σφαιρική Δεξαμενή Τύπου Β (Moss - Rosenberg)<sup>[49]</sup>

### 3.4.1.4 Ανεξάρτητη Κυλινδρική ή Διπλού Λοβού Δεξαμενή, Τύπου C

Η δεξαμενή αυτή έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί, ώστε να ανταποκρίνεται στα κριτήρια πίεσης του πλοίου. Η διαδικασία σχεδιασμού τροποποιείται για να συμπεριλάβει τη μηχανική θραύσης και τη διάδοση των ρωγμών. Η μέγιστη πίεση σχεδιασμού είναι 7 bar, για χρήση σε πλοία ημι-ψυκτικού / ημι-πιεστικού τύπου και 18 bar για χρήση σε πλοία πλήρους πίεσης.<sup>[49]</sup> Στις δεξαμενές αυτές δεν απαιτείται δευτερεύον φράγμα, και ο χώρος συγκράτησης μπορεί να γεμίσει με αδρανές αέριο ή ξηρό αέρα. Οι αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στον ίδιο χώρο, μπορούν να ανιχνεύσουν τη μεταβολή σύνθεσης του αδρανούς αερίου ή του ξηρού αέρα, λόγω των ατμών του καυσίμου, και έτσι οι διαρροές μπορούν να ανιχνευτούν και να αποφευχθούν.<sup>[51]</sup> Η Εικόνα 19 απεικονίζει τη διάταξη διπλού λοβού που χρησιμοποιείται σε πλοία πλήρους πίεσης. Στην περίπτωση των ημι-πιεστικών πλοίων, η μόνωση εφαρμόζεται στο εξωτερικό της δεξαμενής.<sup>[49]</sup>



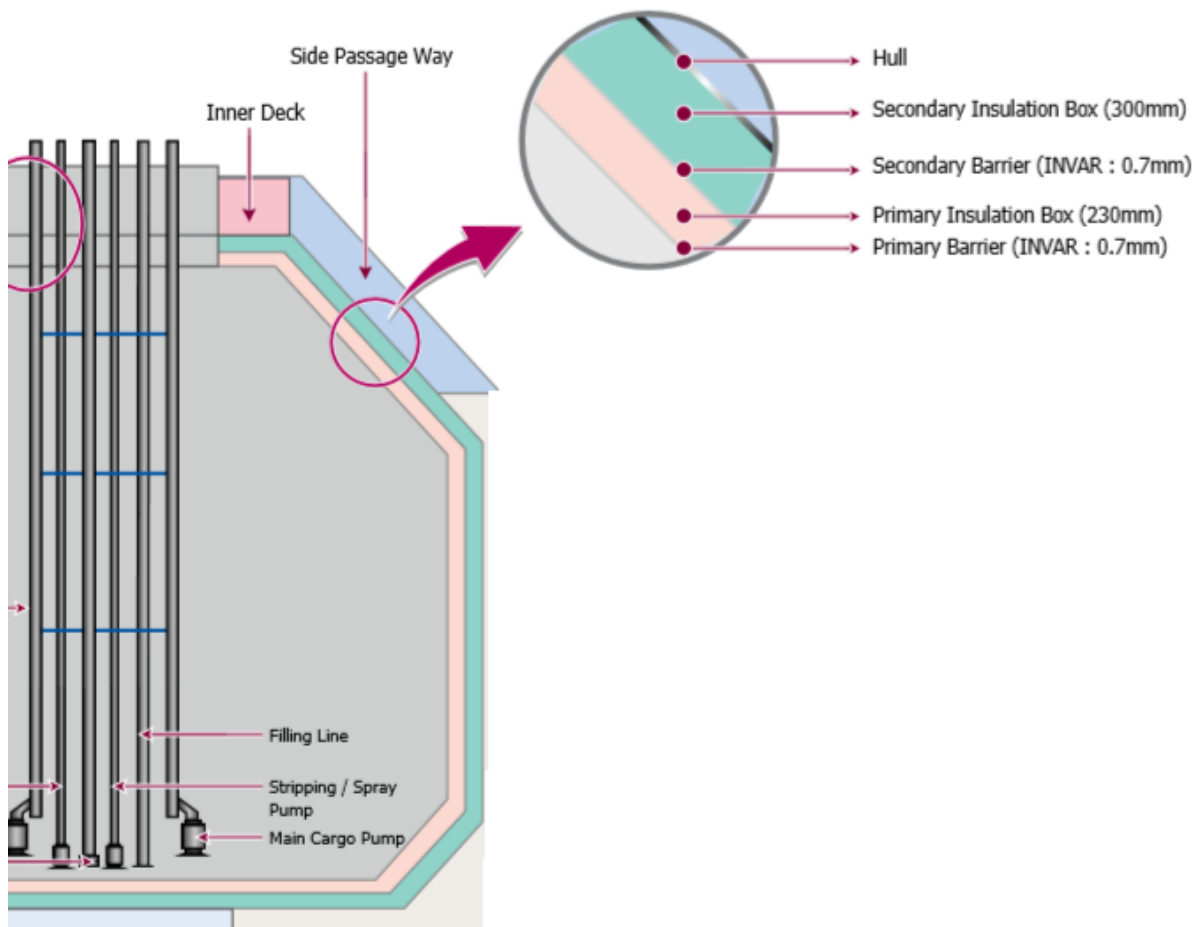
**Εικόνα 19:** Ανεξάρτητη Δεξαμενή Διπλού Λοβού, Τύπου C<sup>[49]</sup>

### 3.4.1.5 Δεξαμενή Μεμβράνης

Η δεξαμενή μεμβράνης είναι μια διάταξη αποθήκευσης φορτίου, η οποία περιλαμβάνει πρωτογενείς και δευτερογενείς φραγμούς, κατασκευασμένους από λεπτά υλικά υγρού και αερίου, που στηρίζονται στο εσωτερικό κύτος του πλοίου μέσω μόνωσης.<sup>[49]</sup> Πιο συγκεκριμένα, η έννοια του συστήματος αυτού, βασίζεται σε ένα πολύ λεπτό μεταλλικό πρωτεύον φράγμα (μεμβράνη – πάχος 0.7 έως 1.5 mm), το οποίο στηρίζεται μέσω μόνωσης. Ένα δευτερεύον φράγμα και ένα επιπλέον στρώμα μόνωσης είναι απαραίτητα για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα ολόκληρου του συστήματος. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο Κώδικας IGC αναφέρει ότι το δευτερεύον φράγμα πρέπει να είναι ικανό να περιέχει οποιαδήποτε διαρροή για χρονική περίοδο 15 ημερών, καθώς και να αποτρέπει τη μείωση της θερμοκρασίας της δομής του πλοίου σε ένα μη ασφαλές επίπεδο σε περίπτωση διαρροής. Επίσης το σύστημα μεμβράνης έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται θερμική διαστολή ή συστολή, χωρίς να αναπτύσσονται τεράστιες πιέσεις και τάσεις στην ίδια τη μεμβράνη.<sup>[98]</sup> Τέτοιες δεξαμενές δεν είναι αυτοσυντηρούμενες, όπως οι ανεξάρτητες, για αυτό και η εσωτερική γάστρα του πλοίου σχηματίζει τη φέρουσα κατασκευή. Σε οποιοδήποτε σύστημα δεξαμενών μεμβράνης, η τοποθέτηση ενός κεντρικού διαφράγματος δεν είναι πρακτική. Επιπλέον οι δεξαμενές μεμβράνης εκτείνονται πάνω από το κύριο κατάστρωμα και διαθέτουν ενισχυμένη μόνωση στο άνω και κάτω μέρος για να αντιστέκονται στις δυνάμεις εκτόξευσης που δημιουργούνται κατά το «χτύπημα» (sloshing). Υπάρχουν δύο κύρια συστήματα δεξαμενών μεμβράνης.<sup>[49]</sup>

#### Gaz Transport Membrane System / GT No 96

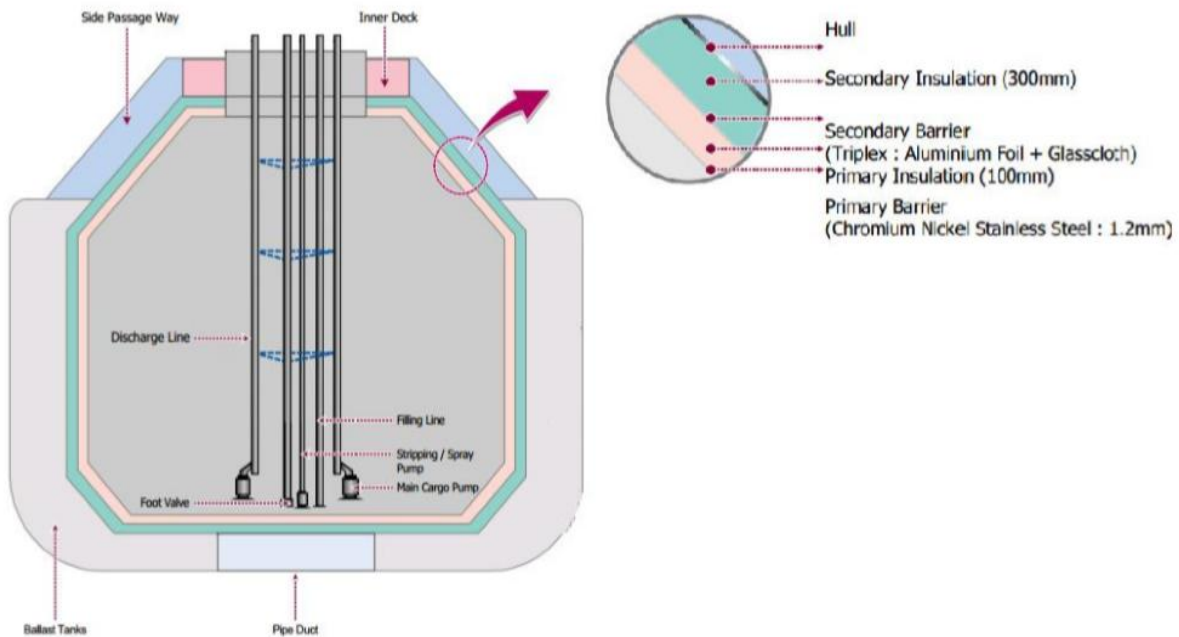
Ο πρωτογενής φραγμός είναι μια μεμβράνη Invar (36% χάλυβας νικελίου) με πάχος 0.7 χιλιοστά και φάρδος 500 χιλιοστά. Η μόνωση για το πρώτο αυτό στρώμα αποτελείται από κουτιά κόντρα πλακέ, που περιέχουν κοκκώδη περλίτη πάχους 200-300 mm, ο οποίος αναμιγνύεται με σιλικόνη για να καταστεί αδιαπέραστος στο νερό ή την υγρασία. Η κατασκευή αυτή επιτρέπει στις δεξαμενές να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις πρόσκρουσης και να απορροφούν την ενέργεια από την κίνηση του υγρού κατά τη φόρτωση και εκφόρτωση ή το «χτύπημα» του φορτίου, καθώς ο 36% χάλυβας νικελίου έχει πολύ μικρό συντελεστή επέκτασης, και η συστολή που προκαλείται από την ψύξη στην θερμοκρασία του φορτίου οδηγεί μόνο σε μέτριες καταπονήσεις (μηδενική θερμική συστολή). Ο δευτερεύον φραγμός και η μόνωσή του, ταυτίζονται με τα υλικά των πρώτων στρωμάτων και προσφέρουν 100% προστασία. Αξίζει να σημειωθεί πως το δεύτερο φράγμα δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί αυτούσιο στην εσωτερική γάστρα του πλοίου, γι'αυτό τα κουτιά κόντρα πλακέ που το διαμορφώνουν, είναι τοποθετημένα σε ειδικά σχοινιά, που αντέχουν το φορτίο, και ανάμεσα σε αυτά και την γάστρα του πλοίου βρίσκεται ένα είδος χαρτιού (kraft paper), που τελικά σταθεροποιεί το σύστημα. Οι χώροι της μόνωσης γεμίζονται με αέριο άζωτο (N<sub>2</sub>).<sup>[98]</sup>



**Εικόνα 20: Στρώματα Δεξαμενής Μembrάνης GTT No 96<sup>[98]</sup>**

### Technigaz Membrane System / TGZ Mark III

Το σύστημα TGZ Mark III, αναπτύχθηκε για να επιτύχει χαμηλότερο βρασμό φορτίου, μια τεχνική που προσφέρθηκε από το υπάρχον σύστημα Mark I, το οποίο εισήχθη το 1969. Το σύστημα αυτό διαθέτει ένα πρωτεύον φράγμα από ανοξείδωτο ατσάλι, που έχει άμεση επαφή με το υγρό φορτίο, με πάχος 1.2 mm και αυξημένες αυλακώσεις που διευκολύνουν την διαστολή και συστολή.<sup>[31]</sup> Η μόνωση που στηρίζει το πρωτεύον φράγμα αποτελείται από αφρό πολυουρεθάνης και εντός του αφρού υπάρχει ένα μεταλλικό έλασμα ανάμεσα σε δύο φύλλα υαλοβάμβακα, που ενεργεί ως δευτερεύον φράγμα. Το δεύτερο αυτό φράγμα ονομάζεται αλλιώς Triplex τοίχωμα και περιβάλλεται από δεύτερη μόνωση, η οποία υποστηρίζεται από τη δομή της γάστρας του πλοίου. Οι χώροι των δύο μονώσεων διατηρούνται ξηροί και σε αδρανποιημένη κατάσταση με την παροχή αζώτου, ενώ η πίεση διατηρείται λίγο πάνω από την ατμοσφαιρική, προκειμένου να αποφεύγεται να εισέλθει ατμοσφαιρικός αέρας εντός αυτών. Οι δεξαμενές αυτές έχουν συνήθως όριο πλήρωσης 98%.<sup>[98]</sup>



**Εικόνα 21: Στρώματα Δεξαμενής Μembrάνης GTT No 96<sup>[98]</sup>**

### 3.4.1.6 Οι πλέον χρησιμοποιούμενες δεξαμενές

Η πλειοψηφία των μεγάλων LNG πλοίων που πλέον σήμερα, έχουν σχεδιαστεί για τη μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου σε σφαιρικές δεξαμενές (Moss) ή σε δεξαμενές μεμβράνης. Τα μικρά πλοία LNG μεταφέρουν το φορτίο σε δεξαμενές μεμβράνης ή σε ανεξάρτητες δεξαμενές τύπου C. Τα πλοία LNG μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να λειτουργήσουν ως πλωτές μονάδες αποθήκευσης και επαναεριοποίησης. Τα πλεονεκτήματα των σφαιρικών δεξαμενών είναι τα εξής:

- 1) Επιτρέπουν την ύπαρξη διαστήματος μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής γάστρας του πλοίου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έρμα και ταυτόχρονα παρέχει προστασία στο φορτίο σε περίπτωση ζημιών από σύγκρουση στο πλάι.
- 2) Το σφαιρικό σχήμα επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή της τάσης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο θραύσης ή αποτυχίας.
- 3) Δεδομένου ότι η έννοια «Διαρροή πριν την αποτυχία» χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό, προϋποθέτει και εξασφαλίζει ότι το κύριο φράγμα (κέλυφος δεξαμενής) θα αποτύχει σταδιακά και όχι καταστροφικά.

Τα πλεονεκτήματα των δεξαμενών μεμβράνης είναι τα εξής:

- 1) Έχουν μικρότερη ολική χωρητικότητα, δηλαδή ο χώρος που καταλαμβάνεται στο εσωτερικό της γάστρας είναι μικρότερος για έναν δεδομένο όγκο φορτίου.
- 2) Εξαιτίας του παραπάνω λόγου, για συγκράτηση φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μέγιστος χώρος.
- 3) Δεδομένου ότι το ύψος των δεξαμενών πάνω από το κύριο κατάστρωμα είναι σημαντικά μικρότερο σε σύγκριση με αυτό των σφαιρικών δεξαμενών, οι δεξαμενές μεμβράνης επιτρέπουν την ορατότητα από τη γέφυρα πλοήγησης.
- 4) Είναι πιο οικονομικές από τις σφαιρικές δεξαμενές.<sup>[55]</sup>



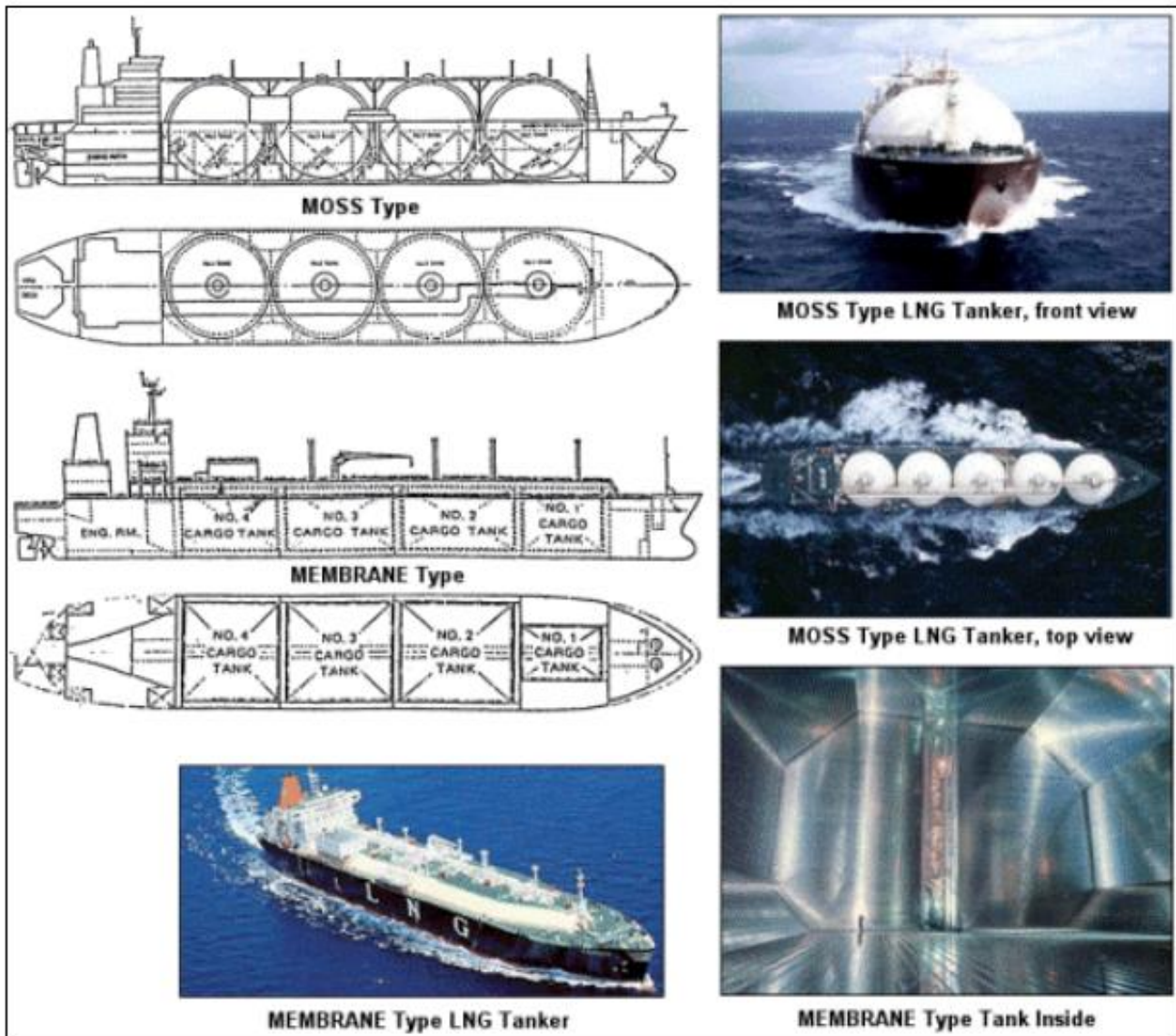


Εικόνα 22: TGZ Mark III



Εικόνα 23: GTT No 96





**Εικόνα 24:** LNG Carriers με σφαιρικές δεξαμενές και δεξαμενές μεμβράνης<sup>[61]</sup>

### 3.4.2 Σύστημα Σωληνώσεων

Τα συστήματα σωληνώσεων του φορτίου, ενός πλοίου Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

#### Γραμμή Υγρού (Liquid Line - Header)

Η γραμμή υγρού, αποτελείται από συγκολλημένες κρυογονικές σωληνώσεις από ανοξείδωτο χάλυβα, οι οποίες συνδέουν κάθε δεξαμενή φορτίου με τις απολήξεις των φορτίων (πολλαπλές) στο κατάστρωμα. Στο δοχείο υγρού κάθε δεξαμενής (liquid dome) υπάρχει και μια απόληξη που συνδέεται με τις γραμμές φόρτωσης και εκφόρτωσης της αντλίας φορτίου, ώστε να επιτρέπεται η μεταφορά φορτίου, καθώς και με την γραμμή ψεκασμού (spray line). Όλα τα τμήματα της γραμμής του υγρού έξω από τις δεξαμενές, είναι μονωμένα και καλυμμένα από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, για να λειτουργούν ως ένα στεγανό φράγμα ατμού.<sup>[45]</sup> Σε ορισμένα

σημεία της γραμμής του υγρού είναι τοποθετημένες κενές φλάντζες και σημεία δειγματοληψίας, για τη διευκόλυνση της αδρανοποίησης και του αερισμού του συστήματος.<sup>[31]</sup>

#### Γραμμή ατμού ( Vapor Line – Header)

Η γραμμή ατμού, αποτελείται από έναν κρυογονικό αγωγό ανοξείδωτου χάλυβα που συνδέει κάθε δεξαμενή φορτίου, μέσω μιας κοινής γραμμής, με την απόληξη του ατμού, το δωμάτιο των συμπιεστών (compressor room) και τον εμπρόσθιο στύλο εξαερισμού. Η γραμμή προς τον στύλο εξαερισμού, λειτουργεί ως βαλβίδα ασφαλείας σε όλες τις δεξαμενές και χρησιμοποιείται για έλεγχο της πίεσης της δεξαμενής κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας. Σε ορισμένα σημεία της γραμμής του ατμού είναι τοποθετημένες κενές φλάντζες και σημεία δειγματοληψίας, για τη διευκόλυνση της αδρανοποίησης και του αερισμού του συστήματος. Η μόνωση της γραμμής ατμού είναι ίδια με την γραμμή του υγρού.<sup>[45]</sup>

#### Γραμμή Ψεκασμού ( Spray Line – Header)

Η γραμμή ψεκασμού αποτελείται από έναν κρυογονικό αγωγό ανοξείδωτου χάλυβα που συνδέει την αντλία ψεκασμού κάθε δεξαμενής με την κεφαλίδα ψεκασμού και εξυπηρετεί τις ακόλουθες λειτουργίες παρέχοντας Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο:<sup>[45]</sup>

1. Στις ράγες ψεκασμού κάθε δεξαμενής, που χρησιμοποιούνται για ψύξη και παραγωγή αερίου.
2. Στην κύρια γραμμή υγρού, που χρησιμοποιείται για την ψύξη των γραμμών πριν από εργασίες φόρτωσης.
3. Στις γραμμές εκφόρτωσης, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία μεγάλου κύματος, με την έναρξη των αντλιών φορτίου.
4. Στους εξατμιστήρες για παραγωγή αερίου, που θα καταναλωθεί στους συμπιεστές και τους εναλλάκτες.

#### Γραμμή καυσίμου ( Fuel Gas Line)

Η γραμμή αυτή μεταφέρει το boil – off gas, που παράγεται μέσα στη δεξαμενή φορτίου, στους λέβητες του μηχανοστασίου για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Ο ατμός λαμβάνεται από την κεφαλίδα ατμού και μεταφέρεται στον συμπιεστή χαμηλής ισχύος.<sup>[45]</sup>

#### Γραμμή εξαερισμού (Vent Line)

Κατά τη διάρκεια κανονικών λειτουργιών, η πίεση στις δεξαμενές ελέγχεται από τη χρήση του boil – off gas στους λέβητες ως καύσιμο, ή μέσω του εμπρόσθιου αγωγού εξαερισμού και την κοινή γραμμή ατμού. Κάθε δεξαμενή διαθέτει επιπλέον ένα ανεξάρτητο μέσο εξαερισμού, το οποίο περιλαμβάνει δύο γραμμές που εξέρχονται από την κορυφή της δεξαμενής, στην δική τους βαλβίδα εκτόξευσης. Από εκεί το αέριο διέρχεται από μια γραμμή σε ένα σκελετό εξαερισμού όπου διασπείρεται στην ατμόσφαιρα. Σε ορισμένα σημεία της γραμμής εξαερισμού είναι τοποθετημένες κενές φλάντζες και σημεία δειγματοληψίας, για τη διευκόλυνση της αδρανοποίησης και του αερισμού του συστήματος. Οι τομές της γραμμής εξαερισμού, έξω από τις δεξαμενές, είναι μονωμένες με αφρό πολουρεθάνης και καλυμμένες με πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού.<sup>[45]</sup>

#### Γραμμή αδρανοποίησης / αερισμού (Inerting / Aeration Line)

Η γραμμή αυτή χρησιμοποιείται για την παροχή αδρανούς αερίου ή ξηρού αέρα στις δεξαμενές φορτίου και στους αγωγούς, και συνδέεται στην κεφαλή ατμού και υγρού.<sup>[45]</sup>

### 3.4.3 Εξοπλισμός του συστήματος αποθήκευσης φορτίου

Στο γεωμετρικό κέντρο κάθε οροφής δεξαμενής φορτίου, βρίσκεται ένα ανοιχτό δοχείο ατμού (vapor dome). Κάθε δοχείο ατμού είναι εξοπλισμένο με τα ακόλουθα:<sup>[98]</sup>

1. Μια γραμμή επιστροφής ατμού, για εφοδιασμό της δεξαμενής με ατμό κατά τη διαδικασία της εκφόρτωσης, για απομάκρυνση του ατμού από την δεξαμενή κατά την φόρτωση και εξαερισμού του boil-off gas όταν η δεξαμενή περιέχει φορτίο
2. Τη διάταξη της γραμμής ψεκασμού, για λόγους ψύξης
3. Δύο βαλβίδες εκτόνωσης κενού για εξαερισμό
4. Αισθητήρες πίεσης
5. Βαλβίδες ασφαλείας της γραμμής υγρού

Επιπροσθέτως, κάθε δεξαμενή περιέχει και ένα ανοιχτό δοχείο υγρού (liquid dome), που βρίσκεται τοποθετημένο κοντά στην κεντρική γραμμή του πλοίου, στο πίσω μέρος της δεξαμενής, και μέσα από αυτό περνάνε οι γραμμές του υγρού. Το δοχείο υγρού, υποστηρίζει ένα αιωρούμενο τρίποδο κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα, που διατηρείται στον πυθμένα της δεξαμενής με τη βοήθεια ενός πύργου άντλησης, που αποτελεί το στήριγμα και επιτρέπει τη θερμική διαστολή ή συστολή, ανάλογα και με το περιβάλλον της δεξαμενής. Το τρίποδο αποτελείται από τους κύριους αγωγούς εκφόρτωσης και την αντλία έκτακτης ανάγκης και υποστηρίζει την σκάλα πρόσβασης της δεξαμενής και άλλες σωληνώσεις και συστήματα ελέγχου.<sup>[98]</sup>

#### 3.4.3.1 Αντλίες

##### Αντλίες φορτίου

Τα πλοία μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου είναι συνήθως εξοπλισμένα με βυθιζόμενες, ηλεκτρικές, μονοβάθμιες ή δευτεροβάθμιες, φυγοκεντρικές αντλίες φορτίου, που λειτουργούν είτε μόνες τους είτε παράλληλα με τις υπόλοιπες, με ηλεκτροκινητήρα. Καθώς το LNG χρησιμεύει τόσο ως λιπαντικό αλλά και ως ψυκτικό (στις περιελίξεις του κινητήρα και στο ρουλεμάν της αντλίας και του κινητήρα), είναι εξαιρετικά σημαντικό οι αντλίες να μην επιτρέπεται να λειτουργούν σε ξηρή κατάσταση, ακόμη και για σύντομο χρονικό διάστημα.<sup>[31]</sup>

Οι αντλίες όπως και ο ηλεκτροκινητήρας, είναι τοποθετημένες στον πυθμένα κάθε δεξαμενής στο τέλος του τριπόδου. Συνήθως κάθε δεξαμενή είναι εξοπλισμένη με δύο κύριες αντλίες φορτίου, ενώ μια βοηθητική αντλία ή αντλία έκτακτης ανάγκης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση αποτυχίας των συνολικών κύριων αντλιών.<sup>[12]</sup> Η παροχή ισχύος στον κινητήρα της αντλίας γίνεται μέσω καλωδίων από χαλκό ή ανοξείδωτο χάλυβα, τα οποία τερματίζουν σε ένα κουτί στον θόλο της δεξαμενής.<sup>[49]</sup> Η κύρια αντλία φορτίου χρησιμοποιείται στην άντληση του LNG από μια συγκεκριμένη δεξαμενή σε χειρσαίο τερματικό σταθμό, σε άλλο πλοίο, ή σε κάποια άλλη δεξαμενή του πλοίου σε καθορισμένη πίεση.<sup>[52]</sup>

##### Αντλία ψεκασμού

Εκτός από τις κύριες αντλίες φορτίου, κάθε δεξαμενή περιλαμβάνει και μια αντλία ψεκασμού. Η αντλία αυτή έχει περιορισμένη χωρητικότητα, συνήθως περίπου 50 m<sup>3</sup>/hr, και αντλεί LNG το οποίο χρησιμοποιείται για τα εξής:<sup>[45] [52]</sup>

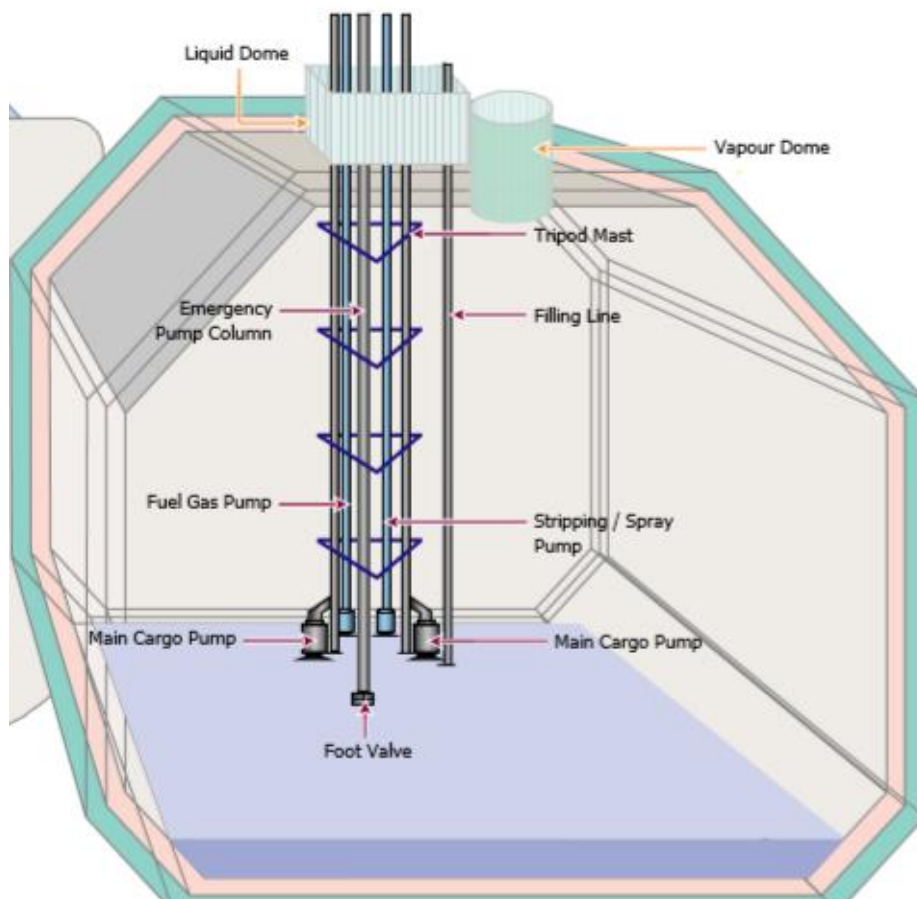
- 1) Ψύξη της γραμμής υγρού πριν από την εκφόρτωση
- 2) Ψύξη της δεξαμενής φορτίου κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού έρματος πριν την άφιξη σε τερματικό σταθμό για φόρτωση
- 3) Αποστράγγιση των δεξαμενών κατά τη διαδικασία εκφόρτωσης
- 4) Μεταφορά LNG σε χερσαίο τερματικό σταθμό, άλλο πλοίο ή άλλη δεξαμενή του πλοίου, όταν δεν λειτουργούν οι κύριες αντλίες φορτίου
- 5) Σε εξαιρετικές περιπτώσεις στους εξατμιστές, όταν απαιτείται εξαναγκασμένη εξάτμιση LNG στους λέβητες.

Όλες οι παραπάνω αντλίες περιέχονται σε αυτό που είναι γνωστό ως πύργος άντλησης, ο οποίος κρέμεται από την κορυφή της δεξαμενής και διατρέχει όλο το βάθος της. Παράλληλα περιέχει το σύστημα μέτρησης των δεξαμενών καθώς και τη γραμμή πλήρωσης, τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα κοντά στον πυθμένα της δεξαμενής. Όλες οι αντλίες φορτίου καταλήγουν σε έναν κοινό αγωγό, που εκτείνεται κατά μήκος του καταστρώματος του πλοίου και διακλαδώνεται σε κάθε πλευρά του σκάφους στους καταναμητές φορτίου που χρησιμοποιούνται για φόρτωση και εκφόρτωση.

#### Αντλία αερίου καυσίμου

Η αντλία αερίου καυσίμου, που είναι παρόμοια με τις κύριες αντλίες φορτίου, χρησιμοποιείται για την άντληση LNG από την δεξαμενή, το οποίο στέλνεται στον εξατμιστή για να μετατραπεί σε αέριο. Στη συνέχεια το αέριο καύσιμο τροφοδοτείται στις κύριες μηχανές, στους κινητήρες της κύριας γεννήτριας και στη μονάδα καύσης αερίου.<sup>[98]</sup>

Στην Εικόνα 25, παρουσιάζεται το εσωτερικό μια δεξαμενής μεμβράνης αποθήκευσης LNG, με όλο τον εξοπλισμό που περιέχει (αντλίες, σωληνώσεις, δοχεία κλπ.).



**Εικόνα 25: Εσωτερικό δεξαμενής αποθήκευσης LNG<sup>[98]</sup>**

### 3.4.3.2 Συμπιεστές

#### Υψηλής ισχύος, HD

Δύο φυγοκεντρικοί συμπιεστές υψηλής ισχύος, που κινούνται με ηλεκτρικό κινητήρα, βρίσκονται εγκατεστημένοι στο δωμάτιο των συμπιεστών (compressor room) στο κατάστρωμα. Οι κινητήρες τους βρίσκονται στο ηλεκτρικό μηχανοστάσιο, το οποίο διαχωρίζεται από το δωμάτιο των συμπιεστών με ένα ατσάλινο στεγανό διάφραγμα. Χρησιμοποιούνται για χειρισμό και επιστροφή των ατμών του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, που δημιουργήθηκαν κατά την ψύξη και φόρτωση, στην ξηρά, και την κυκλοφορία θερμαινόμενων ατμών μέσω των δεξαμενών κατά την προθέρμανση.<sup>[45]</sup> Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται και η διατήρηση της πίεσης της δεξαμενής εντός αποδεκτών ορίων. Ακόμη χρησιμοποιούνται για τη συμπίεση σε μια σφαιρική δεξαμενή φορτίου, αν μια εκφόρτωση είναι απαραίτητη, επειδή οι κύριες αντλίες φορτίου δεν είναι διαθέσιμες. Το αέριο απορρίπτεται μέσω της γραμμής αερίου στην κορυφή της δεξαμενής, όπου η προκύπτουσα πίεση, εξαναγκάζει το υγρό να εξέλθει από τον σωλήνα φόρτωσης υγρού. Οι συμπιεστές πρέπει να είναι κατάλληλοι τόσο για την επιστροφή των ατμών όσο και τη θέρμανση, και να είναι σε θέση να χειρίζονται ατμούς μεθανίου, αδρανές αέριο ή μίγμα αυτών. Συμπιεστές κάτω του κανονικού μεγέθους, θα οδηγήσουν σε εκτεταμένους χρόνους διακίνησης φορτίου, και ιδιαίτερα στην περίπτωση της ψύξης, το πλοίο παραμένει στην αποβάθρα για περισσότερο χρονικό διάστημα. Και για τα δύο καθήκοντα που αναφέρθηκαν, μπορεί να υποθεθεί ότι η μέγιστη χωρητικότητα μπορεί να επιτευχθεί με την εκτέλεση δύο συμπιεστών παράλληλα.<sup>[31]</sup>

#### Χαμηλής ισχύος, LD

Δεν είναι όλα τα πλοία εξοπλισμένα με συμπιεστές χαμηλής ισχύος, καθώς κάποια χρησιμοποιούν συμπιεστές υψηλής ισχύος για διπλό σκοπό. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές LD συμπιέζουν το ψυχρό αέριο (boil-off gas) από τις δεξαμενές φορτίου, σε ένα θερμοκρασιακό εύρος από -140°C έως -160°C. Η πίεση των ατμών στην δεξαμενή πρέπει να διατηρείται στα 45-180 mbar. Κατά τη διέλευση, ο ρυθμός του αερίου μπορεί να ποικίλει λόγω αλλαγών στην βαρομετρική πίεση, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τις συνθήκες στη θάλασσα, αλλά κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0.10%-0.15% του όγκου του φορτίου ανά ημέρα.<sup>[31]</sup> Ουσιαστικά οι συμπιεστές αυτοί, χειρίζονται τη διέλευση των ατμών, οι οποίοι συλλέγονται από μια κεφαλή ατμού που συνδέεται με κάθε δεξαμενή και στη συνέχεια διέρχονται μέσω ενός εναλλάκτη προς το μηχανοστάσιο, για να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο στους λέβητες.<sup>[45]</sup> Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιείται μόνο ένας από τους συμπιεστές τη φορά.<sup>[31]</sup>

### 3.4.3.3 Εναλλάκτες θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορούν να λειτουργήσουν είτε με θαλασσινό νερό, φρέσκο νερό, ατμό ή υγρό.<sup>[49]</sup> Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση των ατμών του LNG που παραδίδονται από τους συμπιεστές υψηλής ισχύος σε καθορισμένη θερμοκρασία, με σκοπό την θέρμανση των δεξαμενών φορτίου πριν την απελευθέρωση του αερίου. Μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση του boil - off gas που παρέχεται από τους συμπιεστές χαμηλής ισχύος ή από ελεύθερη ροή, πριν από την τροφοδοσία του στους λέβητες ή στην ατμόσφαιρα για αερισμό.<sup>[45]</sup> Οι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται στην πρώτη περίπτωση είναι συνήθως υψηλής ισχύος, ενώ στην δεύτερη περίπτωση χαμηλής ισχύος. Σε μερικά πλοία οι εναλλάκτες μπορούν

να χρησιμεύσουν και στη θέρμανση του αδρανούς αερίου, ώστε να εξασφαλιστεί καλύτερη διαφορά θερμοκρασίας από την στρωματοποίηση.<sup>[31]</sup>

### 3.4.3.4 Γεννήτρια αδρανούς αερίου, ξηρού αέρα ή αζώτου

Το αδρανές αέριο είναι ένα αέριο ή μίγμα αερίων, που περιέχει ανεπαρκή ποσότητα οξυγόνου για την υποστήριξη της καύσης. Πολλά πλοία Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, εφοδιάζονται με μια γεννήτρια αδρανούς αερίου, η οποία μπορεί να παράξει και ξηρό αέρα, το οποίο χρησιμοποιείται για την αδρανοποίηση και την απελευθέρωση αερίων από τη δεξαμενή φορτίου, τους αγωγούς φορτίου και των κενών χώρων όταν απαιτείται. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην καύση καυσίμου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και στον καθαρισμό και ξήρανση των καυσαερίων. Ολόκληρο το σύστημα αποτελείται από μια γεννήτρια αδρανούς αερίου, μια μονάδα πύργου καθαρισμού (scrubber), δύο φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες, μια μονάδα έγχυσης καυσίμου, έναν ξηραντήρα (τύπου ψύξης), και μια τελική μονάδα ξήρανσης (τύπου απορρόφησης) μαζί με σύστημα ελέγχου. Το αδρανές αέριο παράγεται με την καύση του πετρελαίου το οποίο τροφοδοτείται από την αντλία καυσίμου, με αέρα που παρέχεται από φυσητήρες, στο θάλαμο καύσης της γεννήτριας αδρανούς αερίου. Η καλή καύση είναι απαραίτητη για την παραγωγή ενός αδρανούς αερίου χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο, λιγότερο από 1%, καλής ποιότητας, χωρίς αιθάλη. Τα προϊόντα της καύσης είναι κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, νερό και μικρές ποσότητες οξυγόνου, μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του θείου και υδρογόνου, ενώ το παραγόμενο αδρανές αέριο αποτελείται κυρίως από 86% άζωτο και 14% διοξείδιο του άνθρακα. Τα καυτά αέρια που παράγονται ψύχονται έμμεσα στο θάλαμο καύσης με τη βοήθεια θαλασσινού νερού, από τις αντλίες έρματος, και ακολούθως η ψύξη πραγματοποιείται κυρίως στον πύργο καθαρισμού όπου τα οξείδια του θείου απομακρύνονται. Πριν από την παράδοση εκτός της γεννήτριας, τα σταγονίδια νερού και η παγιδευμένη υγρασία διαχωρίζονται από το αδρανές αέριο μέσω ενός διαχωριστήρα. Περαιτέρω απομάκρυνση νερού λαμβάνει χώρα στο στάδιο του ενδιάμεσου ξηραντήρα και σε τελικό στάδιο μέσω διαδικασίας απορρόφησης στην τελική μονάδα ξήρανσης.<sup>[45]</sup>

Η γεννήτρια αδρανούς αερίου μπορεί να παράγει και ξηρό αέρα με την ίδια χωρητικότητα, μόνο που σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει καύση στη γεννήτρια και δεν υπάρχει μέτρο για το περιεχόμενο οξυγόνο.<sup>[45]</sup>

Τα περισσότερα πλοία είναι εξοπλισμένα και με γεννήτριες παραγωγής αζώτου, εγκατεστημένες στο μηχανοστάσιο. Το αέριο άζωτο χρησιμοποιείται για την πίεση των χώρων μονώσεως, ως αέριο σφράγισης για τους συμπιεστές χαμηλής και υψηλής ισχύος, για κατάσβεση των πυρκαγιών και για καθαρισμό του συστήματος αερίου καυσίμου και διάφορων τμημάτων των σωληνώσεων του φορτίου. Όταν τα πλοία που διαθέτουν μόνο γεννήτρια αδρανούς αερίου, πρέπει να φορτώσουν οξυγονούχα φορτία, η παροχή αζώτου θα πρέπει να λαμβάνεται από την ξηρά, καθώς η ποιότητα του παραγόμενου αδρανούς αερίου από το πλοίο είναι ανεπαρκής. Η τροφοδοσία του γίνεται με οδικό όχημα ή πλωτή φορτηγίδα σε υγρή μορφή και για αυτό η χρήση ενός εξατμιστή αζώτου είναι απαραίτητη.<sup>[45]</sup>

### 3.4.3.5 Εξατμιστήρες

#### LNG Εξατμιστήρας

Ο εξατμιστήρας LNG είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας τύπου κελύφους σωλήνων, που βρίσκεται στο δωμάτιο συμπιεστών. Κατά τη διαδικασία της εκφόρτωσης ο όγκος των ατμών LNG που εκφορτώνεται πρέπει να αντικατασταθεί είτε από την ξηρά, είτε με χρήση του εξατμιστήρα ο οποίος χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου συνολικά στις ακόλουθες περιπτώσεις:<sup>[31]</sup>

- Όταν κατά την εκφόρτωση, στον ρυθμό σχεδιασμού, δεν υπάρχει η δυνατότητα επιστροφής ατμού από την ακτή. Εάν ο χειρσαίος τερματικός σταθμός δεν είναι σε θέση να παρέχει επιστροφή ατμών, υγρό LNG τροφοδοτείται στον εξατμιστήρα μέσω μιας αντλίας ψεκασμού. Ο παραγόμενος ατμός αφήνει τον εξατμιστήρα περίπου στους  $-140^{\circ}\text{C}$  και στη συνέχεια τροφοδοτείται στις δεξαμενές φορτίου μέσω της κεφαλής ατμού.
- Για αδρανοποίηση της δεξαμενής φορτίου και των χώρων μόνωσης, με εξάτμιση υγρού αζώτου, που προμηθεύεται από τον τερματικό σταθμό σε περίπτωση αποτυχίας της γεννήτριας αδρανούς αερίου. Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται μόνο κατά την αρχική αδρανοποίηση των δεξαμενών φορτίου ή κατά την πρώτη φόρτωση από τερματικό σταθμό μετά τον δεξαμενισμό του πλοίου.
- Για καθαρισμό των δεξαμενών φορτίου με ατμό, μετά την προσθήκη αδρανούς αερίου και πριν την ψύξη. Το LNG τροφοδοτείται από την ακτή στον εξατμιστήρα μέσω της γραμμής απομάκρυνσης / ψεκασμού. Ο ατμός που παράγεται στους  $20^{\circ}\text{C}$  διαβιβάζεται στις δεξαμενές φορτίου.

Η χωρητικότητα σχεδιασμού του εξατμιστήρα θα καθορίσει τον χρόνο που θα απαιτηθεί η αυτόματη φόρτωση του φορτίου με χειροκίνητη λειτουργία. Ο εξατμιστήρας LNG μπορεί να λειτουργήσει ως εξατμιστήρας εξαναγκασμού, όταν ο τελευταίος έχει αποτύχει.

#### Εξατμιστήρας εξαναγκασμού

Ο εξατμιστήρας εξαναγκασμού χρησιμοποιείται για την εξάτμιση LNG και τελικά την παροχή αερίου για καύση στους λέβητες, συμπληρώνοντας τους φυσικούς ατμούς που παράγονται (boil off). Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο τροφοδοτείται μέσω αντλίας ψεκασμού και η ροή ελέγχεται από μια αυτόματη βαλβίδα τροφοδοσίας, η οποία λαμβάνει σήμα από το σύστημα διαχείρισης αερίου του λέβητα. Ο εξατμιστήρας αυτός βρίσκεται εγκατεστημένος στο δωμάτιο συμπιεστών φορτίου (compressor room) και είναι εφοδιασμένος με ένα σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας, καθώς και σπειροειδή σύρματα για την προώθηση τυρβώδους ροής, εξασφαλίζοντας έτσι αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας και παραγωγή υπέρθερμου LNG ατμού στην έξοδο των σωλήνων.<sup>[31][45]</sup>

## 3.5 Επικίνδυνες Περιοχές

Γενικά ως επικίνδυνη περιοχή θεωρείται μια περιοχή, στην οποία η ατμόσφαιρα εκρηκτικού ή εύφλεκτου αερίου (σημείο ανάφλεξης κάτω από  $60^{\circ}\text{C}$ ), αναμένεται ή ενδέχεται να είναι παρούσα, σε ποσότητες που απαιτούνται ειδικές προφυλάξεις, για την κατασκευή, εγκατάσταση και χρήση ηλεκτρικών συσκευών.<sup>[54]</sup>



Σύμφωνα με τον Διεθνή Κώδικα για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό των Πλοίων που μεταφέρουν Χύδην Υγροποιημένα Αέρια, οι επικίνδυνες περιοχές ή ζώνες αερίου, είναι ζώνες στο ανοιχτό κατάστρωμα σε απόσταση 3 μέτρων από κάθε δεξαμενή, έξοδο αερίου ή ατμού, φλάντζες σωληνώσεων φορτίου, βαλβίδες φορτίου, εισόδους και ανοίγματα εξαερισμού στο δωμάτιο συμπιεστών (compressor room). Επίσης σε αυτές περιλαμβάνεται το ανοικτό κατάστρωμα πάνω από την περιοχή του φορτίου και 3 μέτρα προς τα εμπρός και πίσω από το χώρο φόρτωσης στο ανοικτό κατάστρωμα, μέχρι το ύψος των 2.4 μέτρων, καθώς και μια ζώνη σε απόσταση 2.4 μέτρων από το εξωτερικό του χώρου συστήματος φορτίου, όπου οι χώροι αυτοί εκτίθενται στις καιρικές συνθήκες. Ολόκληρο το σύστημα σωληνώσεων φορτίου και οι ίδιες οι δεξαμενές θεωρούνται επικίνδυνες ζώνες αερίου.<sup>[98]</sup>

Η περιοχή γύρω από τον αεραγωγό, στην οποία βρίσκεται η γραμμή αερίου καυσίμου προς το μηχανοστάσιο, δεν θεωρείται επικίνδυνη ζώνη υπό τον παραπάνω κώδικα. Όλος ο ηλεκτρικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στις περιοχές αυτές, είτε πρόκειται για σταθερή εγκατάσταση είτε για φορητή συσκευή, είναι πιστοποιημένο ως «safe type equipment». Αυτό περιλαμβάνει εγγενώς ασφαλή ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, εξοπλισμό ανθεκτικό στη φλόγα και εξοπλισμό τύπου πεπιεσμένου θαλάμου. Εξαιρέσεις από την απαίτηση αυτή ισχύουν όταν οι ζώνες έχουν πιστοποιηθεί ως ελεύθερες αερίου. Πιο συγκεκριμένα οι επικίνδυνες αυτές περιοχές αναλύονται ως εξής:<sup>[98]</sup>

#### Επικίνδυνες Περιοχές Ζώνης 0

Στην περιοχή αυτή, η ατμόσφαιρα εκρηκτικού αερίου είναι παρούσα συνεχώς ή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το εσωτερικό των δεξαμενών φορτίων και των σωληνώσεων των συστημάτων εκτόνωσης πίεσης ή άλλων συστημάτων εξαερισμού των δεξαμενών αυτών, σωληνώσεις και εξοπλισμός που περιέχει το φορτίο ή είναι ικανός να αναπτύξει εκρηκτικά μίγματα αερίων ή ατμών, ανήκει στην κατηγορία αυτή.

#### Επικίνδυνες Περιοχές Ζώνης 1

Στην περιοχή αυτή, η ατμόσφαιρα εκρηκτικού αερίου είναι πιθανό να δημιουργηθεί σε κανονική λειτουργία. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- 1) Δωμάτιο συμπιεστών
- 2) Κλειστούς ή ημίκλειστους χώρους ακριβώς πάνω από τις δεξαμενές φορτίου
- 3) Δεξαμενές έρματος, σωληνώσεις και κενοί χώροι δίπλα στις δεξαμενές φορτίου
- 4) Χώροι ή ημίκλειστοι χώροι στο ανοιχτό κατάστρωμα, σε απόσταση 3 μέτρων από κάθε δεξαμενή φορτίου, έξοδο αερίου ή ατμών, (γέφυρες δεξαμενών φορτίου, θυρίδες θέασης, ανοίγματα καθαρισμού δεξαμενών, σωλήνες ανίχνευσης, βαλβίδες φορτίου ατμού), βαλβίδα απόληξης φορτίου, φλάντζα σωλήνα φορτίου, εισοδοί και έξοδοι συστήματος εξαερισμού στο δωμάτιο συμπιεστών και το άνοιγμα της δεξαμενής φορτίου για απελευθέρωση πίεσης, που παρέχεται για να επιτραπεί η ροή μικρών όγκων μιγμάτων αερίων ή ατμών, που προκαλούνται από θερμική μεταβολή.
- 5) Χώροι ή ημίκλειστοι χώροι στο ανοιχτό κατάστρωμα, σε απόσταση 6 μέτρων, εντός ακτίνας κάθετου κυλίνδρου ακτίνας 6 μέτρων ή απεριορίστου ύψους και ημισφαιρίου ακτίνας 6 μέτρων, κάτω από οποιαδήποτε έξοδο αερίου φορτίου, που προορίζεται για τη διέλευση μεγάλου όγκου αερίου ή ατμού, κατά τη φόρτωση, εκφόρτωση και διεργασία έρματος.

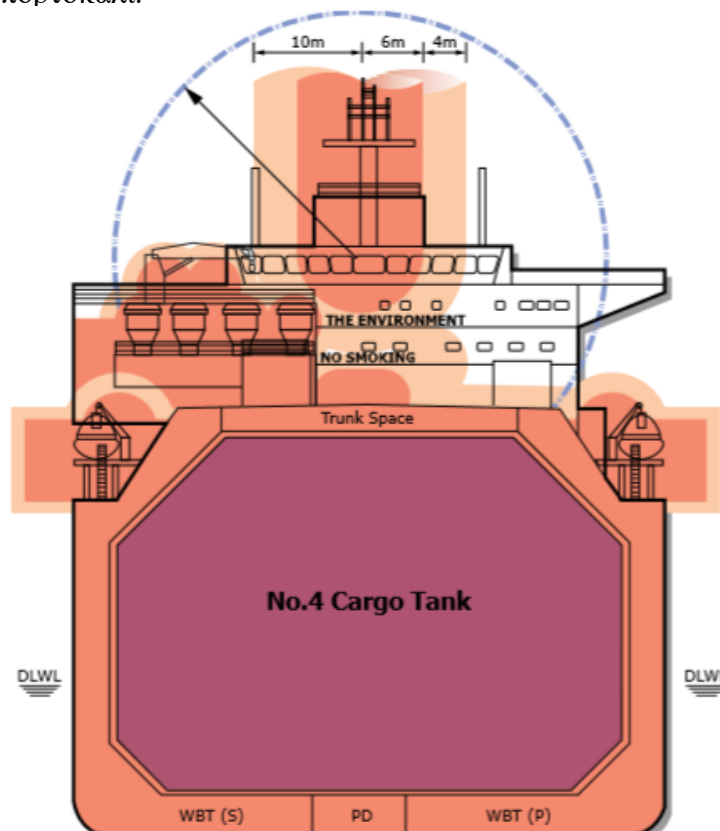
- 6) Χώροι στο ανοικτό κατάστρωμα πάνω από όλες τις δεξαμενές φορτίου (συμπεριλαμβανομένων και των δεξαμενών έρματος εντός του συστήματος αποθήκευσης φορτίου), σε όλο το πλάτος του πλοίου, συν 3 μέτρα εμπρός και πίσω από το εμπρόσθιο και οπίσθιο διάφραγμα της δεξαμενής φορτίου, μέχρι ύψος 2.4 μέτρα πάνω από το κατάστρωμα.
- 7) Χώροι ή ημίκλειστοι χώροι στο ανοικτό κατάστρωμα, σε απόσταση 1.5 μέτρου από ανοίγματα των cofferdams ή χώρους της επικίνδυνης περιοχής Ζώνης 1.
- 8) Χώροι ή ημίκλειστοι χώροι στο ανοικτό κατάστρωμα, σε απόσταση 3 μέτρων από την είσοδο στους συμπίεστες φορτίου, από εισόδους και εξόδους εξαερισμού και ανοίγματα χώρων της επικίνδυνης περιοχής Ζώνης 1.
- 9) Τμήματα του εύκαμπτου σωλήνα φορτίου (cargo hose).
- 10) Χώροι ή ημίκλειστοι χώροι, στους οποίους βρίσκονται σωληνώσεις που περιέχουν φορτίο.

### Επικίνδυνες Περιοχές Ζώνης 2

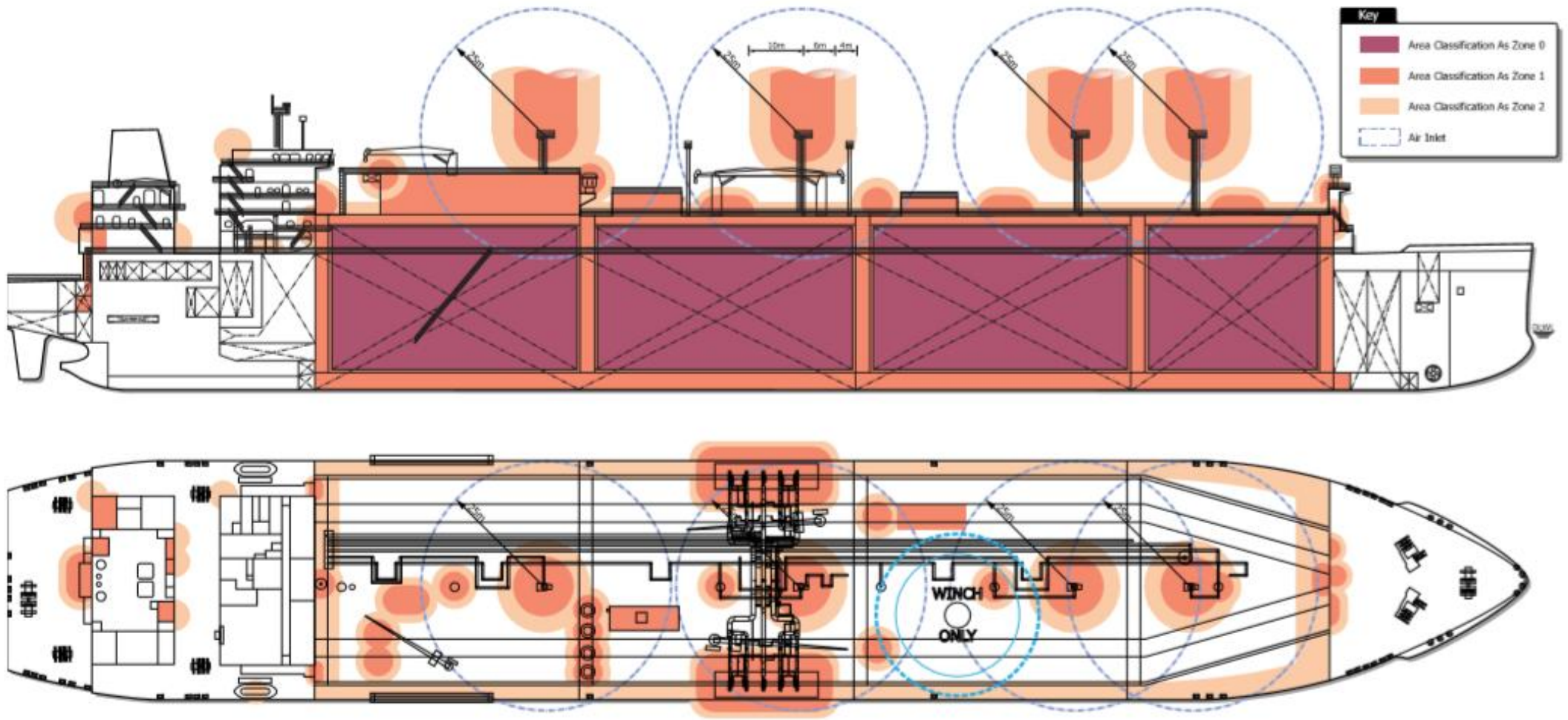
Στην περιοχή αυτή, η ατμόσφαιρα εκρηκτικού αερίου δεν είναι πιθανό να δημιουργηθεί σε κανονική λειτουργία και αν δημιουργηθεί, αυτό θα συμβεί σπάνια και για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- 1) Περιοχές 1.5 μέτρου από ανοιχτές ή ημίκλειστες περιοχές της Ζώνης 1.
- 2) Περιοχές 4 μέτρων άνω του κυλίνδρου και της σφαίρας που ορίζονται στο 5) της Ζώνης 1.
- 3) Περιοχές στο ανοικτό κατάστρωμα, που ξεπερνούν τις επιφάνειες που έχουν τοποθετηθεί για να κρατήσουν τυχόν διαρροές στο κατάστρωμα και μακριά από τις περιοχές του ακομοδεσίου, και 3 μέτρα μακριά από αυτά σε ύψος 2.4 μέτρων πάνω από το κατάστρωμα.

Όλες αυτές οι περιοχές παρουσιάζονται στις Εικόνες 26 και 27 σε κάτοψη, πλάγια όψη και διατομή του πλοίου. Συγκεκριμένα οι Επικίνδυνες Περιοχές Ζώνης 0 επισημαίνονται με μωβ χρώμα, οι Επικίνδυνες Περιοχές Ζώνης 1 με σκούρο πορτοκαλί και οι Επικίνδυνες Περιοχές Ζώνης 2 με ανοικτό πορτοκαλί.



Εικόνα 26: Σχέδιο Επικίνδυνων Περιοχών σε διατομή του πλοίου<sup>[98]</sup>



Εικόνα 27: Σχέδιο Επικίνδυνων Περιοχών<sup>[98]</sup>

## 3.6 Συστήματα ελέγχου και συστήματα ασφαλείας

### 3.6.1 Σύστημα Απενεργοποίησης Έκτακτης Ανάγκης (ESD)

Το σύστημα Απενεργοποίησης Έκτακτης Ανάγκης (Emergency Shutdown System ESD), αποτελεί μια απαίτηση του Κώδικα IGC και σύσταση του SIGTTO (Society of International Gas Tankers and Terminal Operators). Στόχος του αποτελεί η προστασία τόσο του πλοίου όσο και του τερματικού σταθμού σε περίπτωση διαρροής, κρυογονικών κινδύνων ή πυρκαγιάς, κατά τη διαδικασία της φορτω-εκφόρτωσης. Σε αρκετές κρίσιμες τοποθεσίες του πλοίου, όπως στη γέφυρα, στους διαδρόμους, στο δωμάτιο συμπιεστών, στο δωμάτιο ελέγχου του φορτίου κ.α., είναι τοποθετημένες πνευματικές βαλβίδες ή ηλεκτρικά κουμπιά, τα οποία όταν λειτουργήσουν κλείνουν αυτόματα ενεργοποιημένες βαλβίδες και σταματούν τις αντλίες και τους συμπιεστές φορτίου. Παρέχεται έτσι, μια δυνατότητα έκτακτης ανάγκης για το χειρισμό του φορτίου. Αυτή η έκτακτη απενεργοποίηση, απαιτείται επίσης να είναι αυτόματη κατά την απώλεια ηλεκτρικού ρεύματος ή ισχύος ενεργοποίησης των βαλβίδων, ή σε περίπτωση που ξεσπάσει πυρκαγιά στον θόλο των δεξαμενών, στις απολήξεις των φορτίων ή όπου βρίσκονται τα εύφλεκτα στοιχεία. Οι μεμονωμένες βαλβίδες πλήρωσης της δεξαμενής πρέπει να κλείσουν αυτόματα, κατά την ενεργοποίηση ενός αισθητήρα υπερπλήρωσης, που είναι συνδεδεμένος με αυτές. Η λειτουργία των βαλβίδων του συστήματος ESD, μπορεί να είναι είτε πνευματική είτε υδραυλική, αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να είναι ασφαλείς σε αποτυχία, δηλαδή να κλείνουν αυτόματα αν υπάρχει απώλεια ισχύος ενεργοποίησης. Πιο συγκεκριμένα οι λόγοι που θα οδηγήσουν σε έναρξη του Συστήματος Απενεργοποίησης Έκτακτης Ανάγκης είναι οι εξής:<sup>[31]</sup>

- Χειροκίνητη ενεργοποίηση από το προσωπικό, με χρήση των κουμπιών ESD
- Μπλακάουτ του πλοίου
- Ενεργοποίηση του συστήματος από την ξηρά
- Εύτηκτοι σύνδεσμοι γύρω από το θόλο της δεξαμενής, τις απολήξεις και το δωμάτιο συμπιεστών σε περίπτωση πυρκαγιάς
- Συναγερμός υψηλού επιπέδου
- Χαμηλή πίεση δεξαμενής
- Μικρή υδραυλική πίεση βαλβίδων φορτίου
- Χαμηλή πίεση αέρα ελέγχου
- Απελευθέρωση συστήματος πυρασφάλειας

Η έναρξη λοιπόν του συστήματος θα οδηγήσει σε κλείσιμο όλων των βαλβίδων των απολήξεων φόρτωσης και της κύριας βαλβίδας αερίου του μηχανοστασίου καθώς και σε απενεργοποίηση συμπιεστών, γεννήτριας αδρανούς αερίου και αντλιών εκφόρτωσης και ψεκασμού. Ουσιαστικά η απαίτηση του συστήματος ESD είναι να σταματήσει τη ροή του υγρού του φορτίου και των ατμών του σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και να φέρει το σύστημα διαχείρισης του φορτίου σε μια ασφαλή, στατική κατάσταση. Ελαχιστοποιεί τους πιθανούς κινδύνους κατά τη μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου από πλοίο σε χερσαίο τερματικό σταθμό και το αντίστροφο και παρέχει ένα γρήγορο και ασφαλές μέσο για τη διακοπή της μεταφοράς αυτής και την απομόνωση των συστημάτων φορτίου πλοίου και ακτής, με ελεγχόμενο τρόπο, σε περίπτωση συνθηκών σφάλματος.<sup>[31]</sup> Ένα σωστά λειτουργικό και αξιόπιστο σύστημα, μπορεί να διασφαλίσει την ασφάλεια παρά την αποτυχία όλων των άλλων λειτουργικών εξοπλισμών, γι' αυτό και το σύστημα ESD θεωρείται ο πιο σημαντικός εξοπλισμός.<sup>[46]</sup>

### 3.6.2 Πυρασφάλεια

Όσο γρηγορότερα επιτυγχάνεται η δραστηριότητα κατάσβεσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα για επιτυχημένο αποτέλεσμα. Η μέθοδος πυρόσβεσης επιλέγεται, ώστε να αποσκοπεί στην πλήρη εξάλειψη του κινδύνου, καθώς και στην μικρότερη ζημιά που θα προκαλέσει η πυροσβεστική ουσία στην περιοχή. Σε ορισμένα μέρη του πλοίου η επιλογή μπορεί να γίνει μεταξύ ενός εγκατεστημένου εξοπλισμού πυρόσβεσης και της χειρωνακτικής προσπάθειας, η οποία σε μερικές περιοχές είναι η μοναδική λύση. Ο μόνιμος εξοπλισμός πρέπει να χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου ο κίνδυνος πυρκαγιάς καθώς και διάδοσής της είναι μεγάλος. Στα αρχικά στάδια είναι πάντα προτιμότερη η απομόνωση της φωτιάς απομακρύνοντας την πηγή καυσίμου, αλλά αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Στα πλοία μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου είναι διαθέσιμα τέσσερα χωριστά συστήματα πυροπροστασίας και πυρόσβεσης.

#### Νερό

Το νερό δεν είναι κατάλληλο μέσο για την άμεση καταπολέμηση μιας φωτιάς LNG, καθώς προκαλεί μαζική επέκταση, με την αύξηση του ποσοστού εξάτμισης του υγρού. Είναι ωστόσο απαραίτητο ως μέσο ψύξης για την περιοχή που περιβάλλει η φωτιά, καθώς και την προστασία του προσωπικού που μπορεί να χρειαστεί να προσεγγίσει την περιοχή, για αυτό και το πλοίο διαθέτει ένα κανονικό σύστημα πυρόσβεσης νερού, που μπορεί να φτάσει σε οποιοδήποτε τμήμα της περιοχής του φορτίου με τουλάχιστον δύο πίδακες νερού, στην περιοχή του καταστρώματος και αλλού.<sup>[56]</sup> Παίζει ακόμη σημαντικό ρόλο στην προστασία του χάλυβα από τις επιπτώσεις του ακραίου κρύου σε περίπτωση διαρροής LNG. Οι ιδιότητες που το καθιστούν ακατάλληλο για την καταπολέμηση πυρκαγιών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, το καθιστούν ιδανικό για τον ψεκασμό των διαρροών (που δεν έχουν αναφλεγεί) και συνεπώς την αύξηση του ποσοστού εξάτμισης για την αποφυγή της επανάφλεξης.<sup>[45]</sup> Μια σειρά ακροφυσίων ψεκασμού νερού βρίσκονται σε κάθε δοχείο υγρού και ατμού κάθε δεξαμενής, στις απολήξεις των φορτίων, στις βαλβίδες ελέγχου, στο δωμάτιο συμπιεστών, στο μπροστινό διάφραγμα του ακομοδεσίου και γύρω από το δωμάτιο ελέγχου του φορτίου, αν είναι δυνατό να εφαρμοστεί. Το νερό για τη λειτουργία αυτών των ακροφυσίων, τροφοδοτείται από μία αντλία και μια γραμμή ανεξάρτητη αλλά διασυνδεδεμένη με τον πυροσβεστικό κύκλο του πλοίου.<sup>[31]</sup> Όλες οι σωληνώσεις, βαλβίδες, ακροφύσια και άλλα εξαρτήματα του συστήματος ψεκασμού νερού, πρέπει να είναι ανθεκτικά στη διάβρωση από το θαλασσινό νερό.<sup>[48]</sup> Είναι σημαντικό να αποφευχθεί η έγχυση νερού από τις παρακείμενες δομές και η επιδείνωση του καυσίμου της πυρκαγιάς LNG, ή η εκτόξευση σε δίσκους διαρροής που μπορεί να περιέχουν LNG, προκαλώντας έτσι την υπερχειλίση σε μη προστατευμένο χαλύβδινο χώρο. Οι δίσκοι διαρροής και οι περιοχές κάτω από τις απολήξεις του φορτίου είναι σε κάθε περίπτωση πλημμυρισμένες με νερό, για να προστατεύσουν τις δομές χάλυβα από ζημιές λόγω έκθεσης στις υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες.<sup>[1]</sup>

#### Ξηρή Χημική Σκόνη

Όλα τα πλοία μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, πρέπει να είναι εφοδιασμένα με μια σταθερή εγκατάσταση ξηρής χημικής σκόνης και φορητούς πυροσβεστήρες, που μπορούν να καταπολεμήσουν τις πυρκαγιές στην περιοχή του φορτίου, στο κατάστρωμα ή σε κάποιο περιορισμένο χώρο. Τουλάχιστον δύο σωλήνες χειρός απαιτούνται για να καλύψουν την περιοχή αυτή, και στα μεγάλα πλοία υπάρχουν δύο συστήματα σε κάθε πλευρά που καλύπτουν την κεντρική απόληξη και 10-12 ντουλάπια μανικών τοποθετημένα γύρω από το κατάστρωμα. Κάθε σύστημα αποτελείται από μια δεξαμενή που περιέχει διττανθρακικό νάτριο και κυλίνδρους που περιέχουν αέριο άζωτο υπό πίεση. Το σύστημα λειτουργεί με την απελευθέρωση του αερίου

μέσα στη δεξαμενή και το μίγμα που δημιουργείται οδηγείται στις μάνικες. Κατά την εξουδετέρωση της πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας σύστημα ξηρής σκόνης, είναι σημαντικό να αποφασιστεί πότε θα διακοπεί το σύστημα ψεκασμού νερού, δηλαδή πριν ή μετά την εφαρμογή της σκόνης, καθώς οι ξηρές σκόνες είναι διαλυτές στο νερό και ένα ποσοστό μπορεί να εξαλειφθεί αν περάσει μέσα από την «κουρτίνα» νερού. Ακόμη πρέπει να σημειωθεί, ότι οι ξηρές σκόνες δεν παρέχουν αποτέλεσμα ψύξης και γι'αυτό μπορεί να μην είναι αποτελεσματικές, δεδομένου ότι μια πυρκαγιά μπορεί να αναζωπυρωθεί από το ζεστό μέταλλο.<sup>[31]</sup> Δεν θεωρούνται όμως αγωγοί, επομένως είναι κατάλληλες για χρήση σε πυρκαγιές που έχουν προκληθεί από ηλεκτρικό εξοπλισμό, με το μειονέκτημα όμως ότι μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στα ηλεκτρικά μηχανήματα. Μόνο αυτές που είναι συμβατές με αφρό, μπορούν να χρησιμοποιούν συνδυαστικά, διαφορετικά θα προκαλέσουν καταστροφή της κουβέρτας αφρού. Πρέπει να ληφθεί μέριμνα, ώστε η περιορισμένη χωρητικότητα των συστημάτων πυρόσβεσης ξηρής χημικής σκόνης, να χρησιμοποιείται αποτελεσματικά, κυρίως όταν χρησιμοποιούνται με άλλα μέσα πυρόσβεσης. Είναι δυνατή η σπατάλη μεγάλου ποσοστού, εκτός αν γίνει προσεκτικός σχεδιασμός μεγάλης κλίμακας πυροσβεστικών λειτουργιών.<sup>[49]</sup>

### Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα ή το άζωτο που εισάγεται στις βαλβίδες εκτόνωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποτελεσματικό μέσο για την κατάσβεση των πυρκαγιών ατμών αλλά και υγρού. Αυτό είναι ιδιαίτερο πολύτιμο, μόλις η αρχική ροή πίεσης υποχωρήσει. Μετά την έγχυση CO<sub>2</sub> σε έναν κλειστό χώρο, τα όρια αυτού πρέπει να διατηρούνται δροσερά, συνήθως με το σύστημα νερού ψεκασμού από μια μάνικα. Ο χώρος πρέπει να παραμείνει σφραγισμένος έως ότου διαπιστωθεί ότι η πυρκαγιά έχει σβήσει και έχει ψυχθεί αρκετά ώστε να μην αναζωπυρωθεί με την εισαγωγή οξυγόνου. Ένα σύστημα πυρόσβεσης διοξειδίου του άνθρακα είναι διαθέσιμο για το δωμάτιο συμπίεστών, τους ηλεκτροκινητήρες, το δωμάτιο αδρανούς αερίου και σε ορισμένα πλοία για το δωμάτιο ελέγχου του φορτίου.<sup>[31]</sup> Η εισαγωγή CO<sub>2</sub> παράγει μια ηλεκτροστατική φόρτιση που μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο, αν το διοξείδιο του άνθρακα εισάγεται ακούσια ή προληπτικά σε μια εύφλεκτη ατμόσφαιρα. Το άζωτο είναι περισσότερο αποτελεσματικό και ασφαλέστερο για το προσωπικό, αλλά το διοξείδιο του άνθρακα αποθηκεύεται ευκολότερα.<sup>[45]</sup>

### Αφρός υψηλής διαστολής

Ο αφρός υψηλής διαστολής κατάλληλα εφαρμοσμένος στην επιφάνεια μιας πυρκαγιάς λίμνης (που δημιουργείται σε μια περιορισμένη περιοχή), καταστέλλει την ακτινοβολία από τη φλόγα στο υγρό, και μειώνει τον ρυθμό εξάτμισης και συνεπώς την ένταση της πυρκαγιάς, διαχωρίζοντας το καύσιμο από τον αέρα. Απαιτείται συνεχής εφαρμογή, για τη διατήρηση του βάθους του αφρού τουλάχιστον εντός ενός ή δύο μέτρων. Ο αφρός υψηλής διαστολής με συντελεστή περίπου 500 προς 1, έχει βρεθεί ότι είναι ο πιο αποτελεσματικός για το σκοπό αυτό. Ο αφρός δημιουργεί ένα περιβάλλον ασφυξίας και ενεργεί και ως παράγοντας ψύξης. Το φαινόμενο της ασφυξίας ή της ψύξης, μπορεί να είναι λιγότερο ή περισσότερο κυρίαρχο, ανάλογα με το υλικό που καίγεται και το είδος αφρού που χρησιμοποιείται, αλλά για την κατάσβεση ενός υγρού καυσίμου, του οποίου η επιφάνεια έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από 100°C, η επίδραση της ψύξης είναι η κυρίαρχη δύναμη. Αυτό προκαλείται από την εξάτμιση του υγρού που διεισδύει στο στρώμα της επιφάνειας του υλικού που καίγεται, καθώς ο αφρός καταρρέει.<sup>[31]</sup> Ο αφρός υψηλής διαστολής δεν θα σβήσει εντελώς μια πυρκαγιά και για υγροποιημένα αέρια πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο σε περιορισμένες περιοχές. Συνήθως εντοπίζεται μόνο σε χερσαίους τερματικούς σταθμούς και σπανίως σε πλοία.<sup>[57]</sup>

### 3.6.3 Συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς

Το σύστημα ανίχνευσης της πυρκαγιάς έχει σχεδιαστεί για να ανιχνεύει γρήγορα την εκδήλωση πυρκαγιάς, να δίνει έγκαιρη προειδοποίηση και να παρέχει στο πλήρωμα τις καλύτερες πιθανότητες να ελέγξει και να σβήσει τη φωτιά προτού καταστρέψει το πλοίο ή ακόμη και ζωές. Το σύστημα αποτελείται από ένα κεντρικό πάνελ ελέγχου και παρακολούθησης, τοποθετημένο ή στο χώρο της γέφυρας ή στον πυροσβεστικό σταθμό, που αναπαράγεται με εφεδρικά πάνελ, έναν συνδυασμό ανιχνευτών καπνού, φλόγας και θερμότητας και συναγερμό ήχου. Μπορεί να είναι απλό ή περισσότερο περίπλοκο με διευθυνσιοδοτημένους ανιχνευτές, ηλεκτρονικό έλεγχο κ.α. Πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο πηγές ενέργειας, μία από τις οποίες λαμβάνεται από την παροχή έκτακτης ανάγκης. Το σύστημα πρέπει να λειτουργεί ανά πάσα στιγμή, με τη συνεχή παρακολούθηση των τροφοδοτικών ενέργειας για αποτυχία. Οι ανιχνευτές είναι ομαδοποιημένοι σε τμήματα, και η ενεργοποίηση κάθε τμήματος, ξεκινά έναν ηχητικό και οπτικό συναγερμό στο πάνελ ελέγχου. Αν ο οπτικός συναγερμός δεν αναγνωριστεί μέσα σε δύο λεπτά, τότε ενεργοποιείται ο ηχητικός συναγερμός στο χώρο του ακομοδεσίου, στους σταθμούς ελέγχου και στους κύριους χώρους μηχανών. Η ελάχιστη έκταση και η διάταξη ενός συστήματος ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού εξαρτάται από το είδος και την ηλικία του πλοίου.<sup>[98]</sup>

Οι ανιχνευτές θερμότητας σημάνουν τον συναγερμό όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο, συνήθως μεταξύ 54°C και 84°C. Ανιχνευτές με υψηλότερο βαθμό θερμοκρασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές με μεγαλύτερη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα την κουζίνα, με την επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας όμως να μην υπερβαίνει τους 30°C. Ο συναγερμός θα ενεργοποιηθεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, καθώς ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι περισσότερο από 1°C το λεπτό. Οι ανιχνευτές ιονισμού, αντιλαμβάνονται τα αόρατα σωματίδια καπνού της φωτιάς, ενώ οι οπτικοί ανιχνευτές καπνού χρησιμοποιούν μια πηγή φωτός για να καθορίσουν την παρεμπόδιση ή τη φωτεινή διασπορά, που προκαλείται από τα αιωρούμενα σωματίδια καπνού που εισέρχονται στο δωμάτιο. Στους φωτοθερμικούς ανιχνευτές, παρακολουθείται η κατάσταση του θαλάμου και συγκρίνεται με ένα στοιχείο ανίχνευσης θερμότητας, και ο συναγερμός ενεργοποιείται όταν η σύγκριση αυτή υποδηλώνει κατάσταση πυρκαγιάς. Το σύστημα είναι ικανό να διακρίνει τον καπνό από την φωτιά και τον καπνό από άλλες πηγές, όπως τσιγάρο ή ατμό, και επομένως μειώνει τις πιθανότητες λάθος συναγερμού. Κυρίως οι υπέρυθρες αλλά και οι υπεριώδεις ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους ανιχνευτές φλόγας του πλοίου, οι οποίοι ανταποκρίνονται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προκαλείται από την καύση των υδρογονανθράκων. Το σύστημα δεν πρέπει να μεταδίδει ψευδής συναγερμούς από τις ηλιακές ακτίνες, και κατά την παρουσία υδρογόνου απαιτείται ένας συγκεκριμένος τύπος ανιχνευτή φλόγας. Οι γραμμικοί ανιχνευτές θερμότητας, περιλαμβάνουν πεπιεσμένους σωλήνες, καλώδια οπτικών ινών και διηλεκτρικών υλικών και άλλα συστήματα, και μπορούν να βρεθούν σε περιβάλλον όπου οι ανιχνευτές καπνού δεν είναι κατάλληλοι.<sup>[98]</sup>

Τέλος απαραίτητα θεωρούνται και τα συστήματα ανίχνευσης αερίου με ακουστικούς και οπτικούς συναγερμούς για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των περιβλημάτων του φορτίου, το χειρισμό του φορτίου και των βοηθητικών συστημάτων. Πραγματοποιείται συνεχής έλεγχος της ατμόσφαιρας, ώστε να ανιχνευτεί τυχόν διαρροή ατμών LNG ή άλλων επικίνδυνων αερίων. Τα συστήματα αυτά τοποθετούνται σε όλους τους κλειστούς χώρους του φορτίου και των μηχανών φορτίου, που περιέχουν σωληνώσεις, σε άλλους κλειστούς ή ημίκλειστους χώρους στους οποίους μπορεί να συσσωρευτούν ατμοί, στα καλύμματα εξαερισμού και αεραγωγούς, σε κυκλώματα ψύξης και θέρμανσης, στις κεφαλές της γεννήτριας παροχής αδρανούς αερίου, στο μηχανοστάσιο και αλλού.<sup>[48]</sup>



## 3.7 Το LNG ως καύσιμο

### 3.7.1 Sulfur Cap 2020

Κατά τη διάρκεια της 70ής Συνόδου (Marine Environment Protection Committee – MEPC) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), ορίστηκε η 1η Ιανουαρίου 2020 ως η ημερομηνία καθολικής εφαρμογής της χρήσης πετρελαίου με περιεκτικότητα σε θείο 0.50% m/m ως καύσιμο για όλα τα πλοία που θα ταξιδεύουν σε θαλάσσιες περιοχές, εκτός των ήδη καθορισμένων περιοχών ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων των πλοίων (Emission Control Areas – ECA) σύμφωνα με την Διεθνή Σύμβαση MARPOL, Annex VI. Στις περιοχές ECA (Βαλτική θάλασσα, Βόρειος θάλασσα, Ανατολικές και Δυτικές ακτές των ΗΠΑ και του Καναδά, περιοχή της Καραϊβικής θάλασσας που ανήκει στις ΗΠΑ) θα συνεχίσει να εφαρμόζεται το όριο των 0.10% m/m που ισχύει από την 1η Ιανουαρίου 2015. Η σημαντική αυτή μείωση της περιεκτικότητας σε θείο των καυσίμων των πλοίων, από το παγκοσμίως καθορισμένο όριο των 3.5% m/m που ισχύει από την 1η Ιανουαρίου 2012, αποτελεί ένα σημαντικό ορόσημο για την περιβαλλοντικά φιλική χρήση των πλοίων, αφού τα καυσαέρια από την καύση του πετρελαίου στις μηχανές των πλοίων, περιέχουν οξείδια του θείου που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα, προκαλούν τοξικές βροχές, αλλά και συνεισφέρουν στην δημιουργία αερίων μικρο-σωματιδίων που είναι βλαβερά για τον άνθρωπο.

Ο παραπάνω κανονισμός αφορά τα καύσιμα των κυρίων και βοηθητικών μηχανημάτων των πλοίων, καθώς και στους λέβητες. Τα πλοία μπορούν επίσης να συμμορφωθούν στις απαιτήσεις περί μείωσης των εκπομπών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα με αυξημένα ποσοστά σε θείο, εφ' όσον χρησιμοποιούν εγκεκριμένου τύπου εναλλακτικές μεθόδους μείωσης των εκπομπών θείου, όπως είναι τα συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων (exhaust gas cleaning systems /scrubbers), τα οποία «ξεπλένουν» τα καυσαέρια πριν αυτά απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Το πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο είναι κατά μέσο όρο ακριβότερο περίπου 200 δολάρια στον τόνο, σε σχέση με το υψηλής περιεκτικότητας. Με βάση αυτή την διαφορά τιμής, το κόστος εγκατάστασης μονάδας καθαρισμού καυσαερίων σε ένα μεγάλο δεξαμενόπλοιο που καταναλώνει 70 τόνους πετρέλαιο ημερησίως, επί 250 ημέρες το χρόνο, θα αποσβεσθεί σε δύο περίπου χρόνια.<sup>[58]</sup> Τα νέα πλοία λοιπόν που κατασκευάζονται για τη μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, με σκοπό να συμμορφωθούν σε αυτούς τους νέους κανονισμούς επιλέγουν το φυσικό αέριο ως καύσιμο για τις μηχανές τους, για οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και πρακτικούς λόγους που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 1.

### 3.7.2 Διαχείριση του αερίου από τον βρασμό του LNG

Ένα πλοίο μεταφοράς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου μπορεί να διαθέτει ποικίλα συστήματα προώθησης, από τον συμβατικό αμοστρόβιλο και τους κινητήρες ντίζελ διπλού καυσίμου, που αποτελούν τους κύριους τρόπους, μέχρι άλλες καινοτόμες ιδέες όπως συνδυασμό ηλεκτρικού και αερίου στροβίλου και υβριδικές τεχνικές. Το boil – off gas που παράγεται από το φαινόμενο βρασμού στο εσωτερικό των δεξαμενών αποθήκευσης, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, κατευθύνεται προς το σύστημα προώθησης του πλοίου και χρησιμοποιείται ως καύσιμο στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Όλη η διαδικασία διαχείρισης του boil-off gas, έχει στόχο την εξάλειψη όλων των αδικαιολόγητων απωλειών του φορτίου κατά τη διάρκεια μεταφοράς, την διατήρηση της πίεσης των δεξαμενών του φορτίου εντός ορίων σχεδιασμού και την διατήρηση της θερμοκρασίας κάτω από το επιθυμητό όριο.<sup>[8]</sup> Αναλυτικότερα λοιπόν και ανάλογα με το σύστημα προώθησης:

### Ατμοστρόβιλος

Ένα σύστημα προώθησης βασισμένο σε ατμοστρόβιλο, συμπιέζει μέσω ενός συμπιεστή το boil-off gas που στη συνέχεια αποστέλλεται σε δύο λέβητες αερίου, που τροφοδοτούν υπέρθερμο ατμό υψηλής πίεσης, συνήθως σε πίεση 60-70 bar στους 520°C, στους στροβίλους χαμηλής και υψηλής πίεσης, οι οποίοι κινούν μόνο μία έλικα μέσω ενός μειωτήρα κιβωτίου ταχυτήτων. Ο ατμός χρησιμοποιείται ακόμη για την τροφοδοσία δύο γεννητριών τούρμπο που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για βοηθητικές υπηρεσίες. Οι γεννήτριες αυτές είναι εγκατεστημένες για να εγγυηθούν έναν πλεονασμό και η κάθε μία έχει μια ικανότητα ισχύος που μπορεί να καλύψει τη ζήτηση αιχμής φορτίου, συνήθως κατά την πλήρη εκφόρτωση. Δύο κινητήρες ντίζελ είναι επίσης εγκατεστημένοι, με συνδυασμένη χωρητικότητα ίση με μία από τις γεννήτριες τούρμπο, ως απαίτηση ασφαλείας για την παροχή επαρκούς ισχύος κατά τη διάρκεια ενός μπλακάουτ. Το επιπλέον boil-off gas που παράγεται σε ορισμένες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα σε αποτυχία του ατμοστροβίλου, καίγεται επίσης στους λέβητες και ο ατμός που δημιουργείται απορρίπτεται στον συμπυκνωτήρα για να διασκορπίσει την ενέργεια στη θάλασσα. Μέσω του συστήματος αυτού επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση της πίεσης στην δεξαμενή, εξαλείφοντας την ανάγκη για ύπαρξη μονάδας καύσης αερίου. Οι λέβητες μπορούν να καίνε ταυτόχρονα το βαρύ πετρέλαιο (Heavy Fuel Oil HFO) και το boil-off gas σε οποιαδήποτε αναλογία υγρού/αερίου, προσφέροντας έτσι μια πολύ εύκολη μέθοδο χειρισμού του boil-off gas. Επιπλέον, το σύστημα προώθησης του πλοίου με ατμοστρόβιλο χαρακτηρίζεται από ευκολία χρήσης, εγγενή αξιοπιστία και μειωμένο κόστος. Παρουσιάζει όμως τη χαμηλότερη συνολική απόδοση, περίπου 35% με πλήρες φορτίο, η οποία μειώνεται όσο μειώνεται και το φορτίο του στροβίλου, γεγονός που οδηγεί σε υψηλό κόστος καυσίμου και υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.<sup>[60]</sup>

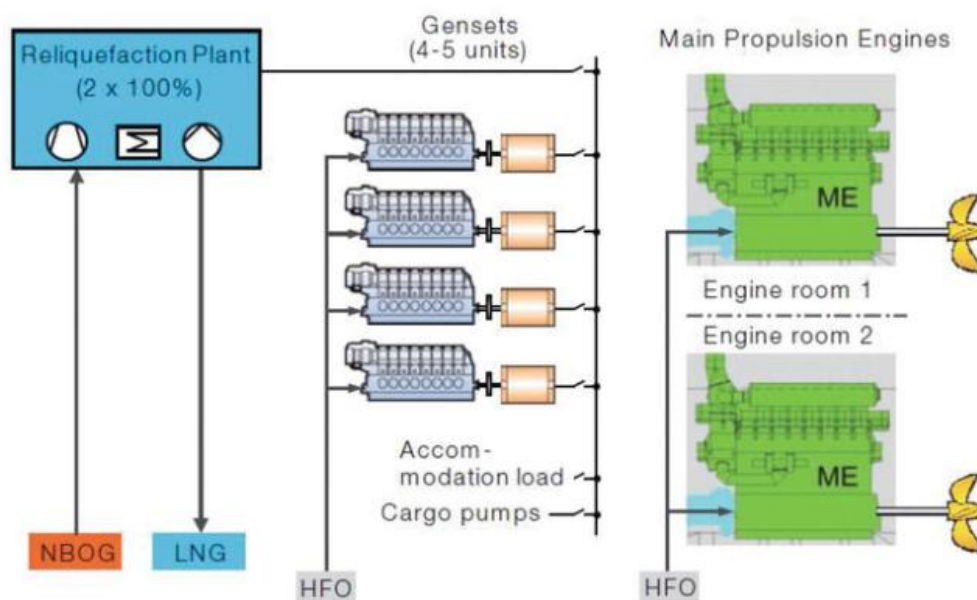
### Κινητήρες διπλού καυσίμου

Ένα άλλο σύστημα προώθησης του πλοίου είναι αυτό των κινητήρων ντίζελ διπλού καυσίμου (Dual Fuel Diesel Electric DFDE), του οποίου η διαμόρφωση είναι απλούστερη. Το σύστημα χρησιμοποιεί πολλαπλές μηχανές ίδιου τύπου, τυπικά τέσσερις ή πέντε, σε συνδυασμό με ηλεκτρικές γεννήτριες για την παροχή ενέργειας σε όλο το πλοίο, συμπεριλαμβανομένης και της προώθησης, η οποία επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρικών κινητήρων. Οι κινητήρες διπλού καυσίμου μπορούν να λειτουργούν με boil-off gas, βαρύ πετρέλαιο (HFO) ή MDO (Marine Diesel Oil) και έχουν διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας ανάλογα με το καύσιμο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Όταν το αέριο καίγεται ως καύσιμο (λειτουργία αερίου), ο κινητήρας υιοθετεί την έννοια του κύκλου Otto, ενώ αντίθετα αν χρησιμοποιηθούν HFO ή MDO, ο κινητήρας λειτουργεί σε κύκλο ντίζελ (λειτουργία diesel). Στη λειτουργία αερίου το boil-off gas εισάγεται στην είσοδο αέρα πριν από κάθε κύλινδρο μεμονωμένα, μέσω μιας βαλβίδας εισαγωγής αερίου, όπου αναμιγνύεται με τον φορτισμένο αέρα πριν από την είσοδο στον θάλαμο καύσης. Ο μηχανισμός επιτρέπει τη συμπίεση και έγχυση του boil-off gas σε σχετικά χαμηλή πίεση, περίπου 5-6 bar, γεγονός που μειώνει την πολυπλοκότητα του συστήματος παροχής αερίου καυσίμου και συνεπώς τους κινδύνους, από τη χρήση μεθανίου σε υψηλή πίεση στο μηχανοστάσιο. Μια μικρή ποσότητα MDO, περίπου 1%, είναι απαραίτητη για την έναρξη της έναυσης. Σε λειτουργία ντίζελ, ο κινητήρας λειτουργεί χρησιμοποιώντας τον παραδοσιακό τρόπο ψεκασμού καυσίμου. Η εναλλαγή μεταξύ των δύο τρόπων μπορεί να πραγματοποιηθεί σταθερά, χωρίς τη διακοπή στην παροχή ρεύματος, επειδή όμως ακολουθούν διαφορετικές αρχές λειτουργίας, έχουν και διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά. Ο τρόπος λειτουργίας του ντίζελ είναι καλύτερος από άποψη θερμικής απόδοσης και δυναμικής απόκρισης, ενώ η λειτουργία αερίου έχει πλεονεκτήματα από πλευράς κόστους καυσίμου και εκπομπών καυσαερίων. Αν υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο boil-off gas από την απαιτούμενη ισχύ για την προώθηση ή το ηλεκτρικό φορτίο, τότε το επιπλέον boil-off gas αποστέλλεται στη μονάδα καύσης αερίου. Η εγκατεστημένη χωρητικότητα της μονάδας αυτής έχει συνήθως μέγεθος έτσι ώστε να μπορεί να διαχειριστεί τη συνολική χωρητικότητα boil-off gas σε ένα τυπικό ταξίδι με

φορτίο. Το μόνο μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι το υψηλό κόστος συντήρησης και επένδυσης των κινητήρων διπλού καυσίμου και η μεγάλη ποσότητα εξοπλισμού που περιλαμβάνει.<sup>[60]</sup>

#### Δίχρονος κινητήρας ντίζελ χαμηλής ταχύτητας με εγκατάσταση επανυγροποίησης

Οι δίχρονοι κινητήρες ντίζελ χαμηλής ταχύτητας αποτελούν τα κυρίαρχα συστήματα προώθησης του πλοίου στην εμπορική ναυτιλία, η οποία επωφελείται από την υψηλή αποδοτικότητα, την ικανότητα καύσης χαμηλής ποιότητας καυσίμων χαμηλού κόστους και το χαμηλό κόστος συντήρησης. Δεδομένου ότι ο κινητήρας αυτός είναι μια μονάδα προώθησης με ένα μόνο τροφοδοτικό (HFO) χωρίς ικανότητα καύσης boil-off gas, το φυσικό boil-off gas από τις δεξαμενές φορτίου υγροποιείται και αποστέλλεται πίσω σε αυτές. Με την αύξηση των διαστάσεων των δεξαμενοπλοίων μεταφοράς LNG, αυξάνεται σημαντικά και ο όγκος του boil-off gas και βρίσκεται πλέον στο φάσμα της δυναμικότητας της μονάδας επανυγροποίησης, γι' αυτό και το σύστημα των κινητήρων αυτών, αποτελεί εφικτή και ελκυστική λύση για τους πλοιοκτήτες. Το σύστημα περιλαμβάνει δύο ντιζελοκινητήρες χαμηλής ταχύτητας σε μορφή διπλού κοιλία, και τέσσερα βοηθητικά σύνολα γεννήτριας για ηλεκτρική ενέργεια. Η μονάδα επανυγροποίησης χρησιμοποιείται για την υγροποίηση του boil-off gas που παράγεται στις δεξαμενές αποθήκευσης και την επιστροφή σε υγρή κατάσταση, διατηρώντας μια σωστή πίεση στις δεξαμενές και αποφεύγοντας τη σπατάλη του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου που μεταφέρεται. Εκτός αυτού, μια μονάδα καύσης είναι επίσης εγκατεστημένη, για να καίει το boil-off gas που παράγεται, σε περίπτωση βλάβης του συστήματος επανυγροποίησης και έτσι να αποφευχθεί η αύξηση της πίεσης στις δεξαμενές. Η διεργασία της επανυγροποίησης βασίζεται σε έναν κλειστό κύκλο που χρησιμοποιεί ως ψυκτικό άζωτο (Joule-Thomson effect), απορροφώντας τη θερμότητα από το boil-off gas. Αρχικά το άζωτο συμπιέζεται στα 57 bar σε τρία στάδια και διαστέλλεται σε 14 bar πίεση μέσω ενός περιστρεφόμενου διαστολέα. Σε αυτόν τον κύκλο το αέριο αναρροφάται από τις δεξαμενές LNG και συμπιέζεται στα 5 bar από έναν συμπιεστή χαμηλής κατανάλωσης και κατόπιν ο ατμός ψύχεται κρυογονικά στους  $-160^{\circ}\text{C}$  σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό εξασφαλίζει τη συμπύκνωση όλων των υδρογονανθράκων στο boil-off gas έτσι ώστε να μετατραπούν ξανά σε LNG, ενώ το άζωτο και άλλα συμπυκνώσιμα παραμένουν σε αέρια κατάσταση. Οι ακαθαρσίες αυτές τελικά απομακρύνονται σε διαχωριστήρα αερίου/υγρού, όπου το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο διαχωρίζεται και παραδίδεται πίσω στις δεξαμενές φορτίου και οι ακαθαρσίες είτε εκφορτώνονται στην ατμόσφαιρα είτε καίγονται στη μονάδα καύσης. Η λειτουργία της μονάδας επανυγροποίησης απαιτεί υψηλή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από βοηθητικές γεννήτριες που αποτελούνται από 3-4 γεννήτριες ισχύος, σημείο στο οποίο το σύστημα αυτό μειονεκτεί. Παρόλα αυτά, θεωρείται ανώτερη, διότι παραδίδεται περισσότερο φορτίο και απαιτείται λιγότερη πίεση. Τα κύρια εξαρτήματα του συστήματος αυτού παρουσιάζονται στην Εικόνα 28.<sup>[60]</sup>



**Εικόνα 28:** Σύστημα δίχρονου κινητήρα ντίζελ με επανυγροποίηση<sup>[60]</sup>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Χερσαίος Τερματικός Σταθμός LNG

### 4.1 Τεχνολογία Χερσαίου Τερματικού Σταθμού

Ένας χερσαίος τερματικός σταθμός LNG, είναι ο χώρος όπου πραγματοποιείται η φόρτωση και εκφόρτωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στα/από τα ειδικά δεξαμενόπλοια και αποτελεί συνήθως μέρος ενός ευρύτερου λιμένα. Εκτός από την φορτω-εκφόρτωση του LNG, στους σταθμούς αυτούς μπορούν να επιβιβαστούν ή να αποβιβαστούν και άνθρωποι. Αν δεν ληφθεί η απαραίτητη προσοχή, κατά τη διαδικασία της φορτω-εκφόρτωσης, τότε αυτό μπορεί να οδηγήσει τόσο σε οικονομικές, όσο και σε υλικές – ανθρώπινες απώλειες. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο οι χερσαίοι τερματικοί σταθμοί διατηρούνται ξεχωριστά από το υπόλοιπο λιμάνι και έτσι εξασφαλίζεται ότι η διαδικασία φόρτωσης και εκφόρτωσης πραγματοποιείται συνεχώς και με τον πιο τέλειο τρόπο. Οι χερσαίοι τερματικοί σταθμοί, για τα μεγάλα πλοία, είναι αλλιώς γνωστά ως αποβάθρες και πλατφόρμες, όταν τα πλοία μικρότερου μεγέθους ρυμουλκούνται με φορτίο.

Αρχικά η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας του χερσαίου τερματικού σταθμού Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, καθορίζεται κυρίως από δύο παράγοντες: (α) την ανάγκη να παρέχονται αποτελεσματικά οι απαιτούμενες λειτουργίες τερματικού σταθμού και (β) η διαθεσιμότητα κατάλληλων τοποθεσιών σε σχέση με τις απαιτήσεις χώρου, τη ζώνη ασφαλείας, τη προσβασιμότητα, τους κανονισμούς σχεδιασμού της πόλης και τη συμβατότητα με άλλες τοπικές χρήσεις του εν λόγω χώρου. Ο δεύτερος παράγοντας σε πολλές περιπτώσεις επιβάλει περιορισμούς σχετικά με το που μπορούν οι τερματικοί σταθμοί να εγκαθίστανται, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σε τοποθεσίες που δεν είναι τόσο ιδανικές σε σχέση με τον πρώτο παράγοντα. Ωστόσο, υπάρχουν αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των περιορισμών για την τοποθεσία ενός τερματικού σταθμού LNG και των απαιτούμενων λειτουργιών που πρέπει να εκτελεστούν με σκοπό τον ανεφοδιασμό των πλοίων. Ο εφοδιασμός των πλοίων με LNG από τις εγκαταστάσεις αυτές μέσω σταθερών εφοδιαστικών γραμμών απαιτεί τον τερματικό σταθμό LNG κοντά στο σημείο ανεφοδιασμού, ενδεικτικά ως 250 μέτρα. Εάν δεν υπάρχει η δυνατότητα ο τερματικός σταθμός να εγκατασταθεί αρκετά κοντά στο συνηθισμένο σημείο πρόσδεσης των πλοίων προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο ανεφοδιασμός, τότε απαιτείται η μετακίνηση των πλοίων σε άλλο σημείο πρόσδεση, γεγονός το οποίο πολύ δύσκολα μπορεί να συμβαίνει λόγω του προγραμματισμού του πλοίου.<sup>[8]</sup>

Οι λειτουργίες που πρέπει να παρέχει ο τερματικός σταθμός LNG είναι οι εξής: (1) Παραλαβή του LNG, πιθανότατα μέσω παράδοσης από πλοία αλλά και με δυνατότητα παράδοσης από βυτιοφόρα οχήματα, (2) επαρκής αποθήκευση ποσότητας LNG που θα ανταποκρίνεται στις απαιτούμενες εργασίες ανεφοδιασμού, (3) σε περίπτωση που ο τερματικός σταθμός παρέχει επίσης φυσικό αέριο σε τοπικές, μη σχετικές με την μεταφορά, υπηρεσίες, τότε θα πρέπει να υφίσταται λειτουργία αεριοποίησης και κατάλληλος, ως προς το σκοπό αυτό, αγωγός και (4) ο τερματικός σταθμός θα πρέπει να βρίσκεται, να κατασκευάζεται και να συμμορφώνεται πλήρως σύμφωνα με όλους τους ισχύοντες κανονισμούς και πρότυπα ασφαλείας.<sup>[8]</sup>

Κυρίως τρεις παράγοντες καθορίζουν την χωρητικότητα αποθήκευσης και άρα την κλίμακα ενός χερσαίου τερματικού σταθμού LNG: η ποιότητα και η συχνότητα παράδοσης του προϊόντος από το δεξαμενόπλοιο μεταφοράς, ο χρόνος παραμονής και η αναμενόμενη ζήτηση. Οι παγκόσμιας κλίμακας τερματικοί σταθμοί, συνήθως έχουν μια χωρητικότητα αποθήκευσης περισσότερο από 100.000 m<sup>3</sup> Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, και λειτουργούν ως βασικοί

κόμβοι για την προμήθεια LNG στα εθνικά δίκτυα φυσικού αερίου, επιτρέποντας έτσι την περαιτέρω διανομή σε τερματικούς σταθμούς μικρής ή μεσαίας κλίμακας. Οι μεσαίας κλίμακας τερματικοί σταθμοί κυμαίνονται από 10.000 m<sup>3</sup> έως 100.000 m<sup>3</sup> χωρητικότητα, και παίζουν σημαντικό ρόλο στην αλυσίδα Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, ικανοποιώντας τη ζήτηση φυσικού αερίου μιας ποικιλίας πελατών, από εμπορικούς χρήστες π.χ. πετροχημικών και θαλάσσιων βιομηχανιών, σε οικιακούς χρήστες, που εξυπηρετούνται από τοπικά δίκτυα. Οι μικρής κλίμακας τερματικοί σταθμοί, προμηθεύουν κυρίως φυσικό αέριο απευθείας στους καταναλωτές με υψηλή τοπική ζήτηση και επομένως είναι απαραίτητο να βρίσκονται σε λιμάνι ή εκτεταμένο δίκτυο φυσικού αερίου. Το LNG συνήθως αποθηκεύεται σε δεξαμενές επίπεδης βάσης χωρητικότητας 10.000 m<sup>3</sup> ή σε κρυογονικές δεξαμενές 1000 m<sup>3</sup> η κάθε μία. Η χωρητικότητα αποθήκευσης και ο αριθμός των εγκατεστημένων δεξαμενών σχεδιάζεται, ώστε να επιτευχθεί μια βέλτιστη οικονομική και τεχνική λύση.<sup>[63]</sup> Ο σχεδιασμός των χερσαίων δεξαμενών αποθήκευσης θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω.

Ο τερματικός σταθμός λοιπόν συνοψίζοντας, απαιτεί εγκαταστάσεις για τον ελλιμενισμό του πλοίου, το οποίο θα τον προμηθεύει με LNG, τη μεταφορά του LNG από το πλοίο στις δεξαμενές αποθήκευσης, καθώς και τη δυνατότητα εκφόρτωσης βυτιοφόρων οχημάτων στον τερματικό σταθμό. Οι ίδιες εγκαταστάσεις θα πρέπει επίσης να μπορούν να χρησιμοποιούνται και για την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή την παροχή LNG στα πλοία.<sup>[8]</sup>

Πριν περιγραφεί ο εξοπλισμός ενός χερσαίου τερματικού σταθμού, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι κάθε σταθμός είναι διαφορετικός και ότι ο εξοπλισμός και τα συστήματα ελέγχου μπορεί να διαφέρουν αρκετά από τη μία εγκατάσταση στην άλλη, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου σχεδίου, την επιθυμητή ευελιξία λειτουργίας και τις προτιμήσεις των πελατών.<sup>[64]</sup>

### Προβλήτα

Μια αποβάθρα ή προβλήτα είναι απαραίτητη για την παραλαβή του LNG από τα πλοία, προκειμένου στη συνέχεια να αποθηκευτεί στις δεξαμενές της εγκατάστασης, αλλά επίσης και για την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή τον ανεφοδιασμό των πλοίων με LNG. Παράλληλα ο εν λόγω τερματικός σταθμός για να είναι λειτουργικός, θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να υποδεχθεί μεγάλο μεγέθους πλοία, μήκους 200 μέτρων περίπου και μέσο όρο βυθίσματος γύρω στα 7.5 μέτρα. Σε πολλές περιπτώσεις μια ήδη υπάρχον προβλήτα μπορεί να εφοδιαστεί με μηχανισμό φόρτωσης και εκφόρτωσης LNG, ο οποίος μπορεί να εγκατασταθεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ή να αποφευχθεί κάθε παρεμβολή με άλλες επιμέρους λειτουργίες του λιμένα που ενδεχομένως να προκύψουν με την δημιουργία μιας νέας προβλήτας. Επιπροσθέτως, σε ορισμένες περιπτώσεις και προκειμένου να διατηρείται το επενδυτικό κόστος σε χαμηλά επίπεδα, είναι αποδοτικότερο να εξετάζεται μια απλοποιημένη λύση προβλήτας.<sup>[8]</sup>

Η προβλήτα είναι ουσιαστικά μια τσιμεντένια δομή που προεξέχει από το έδαφος έξω στο νερό και παρέχει υποστήριξη για τον κύριο και βοηθητικό εξοπλισμό. Είναι εξοπλισμένη με σύστημα αγκυροβόλησης (δελφίνια δεσίματος) με γρήγορη αποδέσμευση και βραχίονες θαλάσσιας φόρτωσης και εκφόρτωσης, επιτρέποντας την ασφαλή πρόσδεση των πλοίων και την αποτελεσματική μεταφορά LNG κατά τη διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης.<sup>[63]</sup> Επιπλέον περιέχει ένα πλαίσιο για στέγαση σωληνώσεων και καλωδίων, καθώς και ένα οδόστρωμα για πρόσβαση προσωπικού και μικρών οχημάτων. Στις γωνίες της προβλήτας βρίσκονται εγκατεστημένες δύο οθόνες φωτιές, με σκοπό τον έλεγχο της πυρκαγιάς και την παρακολούθηση ολόκληρης της περιοχής του βραχίονα φόρτωσης. Παράλληλα σε κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα, οι οποίες βρίσκονται σε άμεση έκθεση σε διαρροές και θεωρούνται κρίσιμες για την σταθερότητα

της προβλήτας, παρέχεται πρόσθετη κάλυψη, που δρα ως προστασία έναντι της ψύξης. Το μήκος της καθορίζεται από τις ειδικές συνθήκες τοποθεσίας, το βάθος νερού και το συνολικό μήκος του δεξαμενοπλοίου.<sup>[65]</sup>

### Βραχίονες φορτω-εκφόρτωσης

Οι βραχίονες φόρτωσης και εκφόρτωσης είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι ώστε να αντιμετωπίζουν τις κρυογονικές θερμοκρασίες και είναι εξοπλισμένοι με διάφορα ειδικά χαρακτηριστικά, για να επιτρέπουν την ασφαλή μεταφορά του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, όπως συζεύξεις για γρήγορες διαδικασίες φορτω-εκφόρτωσης. Το μέγεθος ενός βραχίονα καθορίζεται κυρίως από τους ρυθμούς φορτω-εκφόρτωσης και από το εύρος λειτουργίας των πλοίων που προσγειώνονται στην προβλήτα.<sup>[63]</sup> Χωρίζονται σε αυτούς που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά LNG από και προς το πλοίο (συνήθως τρεις) και αυτούς που χρησιμοποιούνται για την επιστροφή ατμών (boil-off gas) από και προς το πλοίο (συνήθως ένας).<sup>[11]</sup>

Ένας βραχίονας περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα μέρη: το σώμα του βραχίονα, τη συσκευή αποσύνδεσης έκτακτης ανάγκης και ένα ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα ελέγχου. Ο υδραυλικός υποσταθμός τοποθετείται στη στήλη για τον έλεγχο του βραχίονα και ο χειριστής μπορεί να χρησιμοποιήσει το τηλεχειριστήριο για να λειτουργήσει τον βραχίονα φόρτωσης στο πλοίο ή στην αποβάθρα. Οι βραχίονες είναι εξοπλισμένοι με ειδικές φλάντζες, πάνω στις οποίες βιδώνουν με υδραυλική αρπαγή οι φλάντζες του πλοίου, ώστε να πραγματοποιηθεί η φορτω-εκφόρτωση. Οι φλάντζες αυτές πρέπει καθ'όλη τη διάρκεια της διαδικασίας να διατηρούνται παράλληλες προς τις φλάντζες του πλοίου, καθώς αν χαθεί η παραλληλότητα ξεκινάνε τα προβλήματα διαρροών LNG. Για τον σκοπό αυτό, οι βραχίονες φορτω-εκφόρτωσης διαθέτουν τρεις βαθμούς ελευθερίας κίνησης για περιορισμένο εύρος κίνησης. Ο χώρος που ορίζεται για το εύρος αυτό ονομάζεται «φάκελος» και είναι ο τρισδιάστατος χώρος, εντός του οποίου επιτρέπεται η κίνηση των βραχιόνων σε περίπτωση μετακίνησης του πλοίου εξαιτίας της αλλαγής βάρους κατά την φορτω-εκφόρτωση ή της κίνησης των κυμάτων.<sup>[66]</sup>

Τα εξαρτήματα αυτά αποτελούν ουσιαστικά το κλειδί σύνδεσης για την μεταφορά LNG, μεταξύ των σωληνώσεων της προβλήτας και του πλοίου. Οι βραχίονες θα πρέπει να είναι ικανοί να μεταφέρουν το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο χωρίς διαρροές, να μετακινούνται όσο αλλάζει η θέση των απολήξεων του πλοίου και να υποστηρίζουν το επιβαλλόμενο νεκρό φορτίο ρευστού, πάγου και ανέμου.<sup>[67]</sup>



**Εικόνα 29: Βραχίονας εκφόρτωσης LNG σε πλατφόρμα τερματικού σταθμού<sup>[68]</sup>**



### Γραμμές μεταφοράς

Από το πλοίο μέχρι τις δεξαμενές αποθήκευσης του χερσαίου τερματικού σταθμού το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο μεταφέρεται μέσω ενός μονωμένου αγωγού, συνήθως συνοδευόμενου από μια γραμμή επιστροφής ατμού. Ο ίδιος αγωγός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή με LNG του τερματικού σταθμού, από ένα φορηγό πλοίο μεταφοράς LNG, καθώς επίσης και για τον εφοδιασμό ενός πλοίου με LNG ως καύσιμο προώθησης από τον τερματικό σταθμό. Λόγω της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του LNG και του περιβάλλοντος, η απόσταση μεταξύ του τερματικού σταθμού και του σημείου ανεφοδιασμού καυσίμων στην προβλήτα πρέπει να είναι σύντομη, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η θέρμανση του LNG. Ο αγωγός μεταξύ της αποβάθρας και του τερματικού σταθμού είναι προτιμότερο να τοποθετηθεί μέσα σε υπόγειο οχετό, έτσι ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή με άλλες δραστηριότητες.<sup>[66]</sup> Οι γραμμές αυτές μεταφοράς θα πρέπει να σχεδιαστούν, κατασκευαστούν, λειτουργήσουν και συντηρηθούν σύμφωνα με τα ομοσπονδιακά πρότυπα ασφαλείας, που έχουν σκοπό να εξασφαλίσουν επαρκή ασφάλεια για το κοινό και να αποτρέψουν ατυχήματα.<sup>[69]</sup> Τα συστήματα αυτοματισμού και οι ρυθμιστές πίεσης και θερμοκρασίας διασφαλίζουν τις σωστές συνθήκες του ρευστού στους καθοδικούς αγωγούς.<sup>[70]</sup> Η σύνδεση μεταξύ των γραμμών μεταφοράς και του πλοίου επιτυγχάνεται μέσω ευκάμπτων σωλήνων, που αναφέρθηκαν παραπάνω ως βραχίονες φορτω-εκφόρτωσης.

### Μονάδα Επαναεριοποίησης

Όταν υπάρχει παράδοση αερίου από τον τερματικό σταθμό σε ένα δίκτυο αερίου ή σε έναν κοντινό πελάτη, το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο που έχει αποθηκευτεί, αποστέλλεται μέσω εμβυπτιζομένων αντλιών σε αντλίες υψηλής πίεσης, που συμπιέζουν το LNG ως την πίεση λειτουργίας του δικτύου μεταφοράς. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως η συμπίεση LNG απαιτεί 30 φορές λιγότερη ενέργεια από την συμπίεση φυσικού αερίου.<sup>[11]</sup> Στη συνέχεια το LNG θερμαίνεται και μετατρέπεται από υγρό σε αέριο στη μονάδα αεριοποίησης. Για τη θέρμανση χρησιμοποιούνται εξατμιστήρες, αφού αποτελούν έναν σταθερό και αποτελεσματικό τρόπο θέρμανσης. Εναλλακτική λύση αποτελεί η χρήση υπερβολικής θερμότητας από βιομηχανία, αν είναι διαθέσιμη κοντά. Οι τύποι εξατμιστήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διεργασία αυτή ποικίλουν, και η επιλογή τους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την χωρητικότητα, τη διαθέσιμη επιφάνεια, τη διαθεσιμότητα των μέσω θέρμανσης ή του θαλασσινού νερού, περιβαλλοντικούς παράγοντες και το κόστος θερμότητας ή καυσίμων.<sup>[63]</sup>

Αρχικά υπάρχουν οι εξατμιστήρες αέρα, οι οποίοι βασίζονται σε δύο εναλλασσόμενα σετ, από τα οποία το ένα βρίσκεται σε υπόψυξη και το άλλο σε λειτουργία.<sup>[70]</sup> Οι εξατμιστήρες ανοιχτού σκελετού που λειτουργούν με θαλασσινό νερό χρησιμοποιούνται κυρίως για κάλυψη φορτίων βάσης και οι ανεξάρτητοι εξατμιστήρες «βυθισμένης καύσης» που αποτελούνται από ένα λουτρό νερού που θερμαίνεται από καυστήρα φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται κυρίως για κάλυψη φορτίων αιχμής.<sup>[63][65][11]</sup> Οι εξατμιστήρες ανοιχτού σκελετού και οι εξατμιστήρες καύσης αντιπροσωπεύουν πάνω από το 80% των εγκατεστημένων εξατμιστήρων παγκοσμίως. Η ισορροπία τους επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφόρων τύπων εναλλακτών θερμότητας, όπως εναλλάκτες κελύφους σωλήνων που χρησιμοποιούν διάφορα μέσα θέρμανσης όπως άμεση θερμότητα, γλυκόλη/νερό ή καυτό λάδι. Αυτοί συνήθως συνδέονται και με τη χρήση της ανάκτησης του ψυχρού Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή τον διαχωρισμό του αέρα.<sup>[63][71]</sup> Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι εξατμιστήρες ανοιχτού σκελετού, εξάγουν ποσότητα κρύου νερού και απαιτούν κάποια επεξεργασία του, για την αναστολή της διάβρωσης και την ανάπτυξη άλγης, οπότε οι τοπικές υδάτινες συνθήκες μπορούν



να επηρεαστούν από αυτές τις πτυχές. Επίσης οι εξατμιστήρες καύσης, με την καύση του καυσίμου συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα καθώς και με τα παραγόμενα NOx.<sup>[71]</sup> Το μέγεθος και ο αριθμός των εξατμιστήρων εξαρτάται από το αποτέλεσμα εξόδου από τον τερματικό σταθμό.<sup>[70]</sup>

### Βοηθητικές εγκαταστάσεις

Αν ένας τερματικός σταθμός θέλει να έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει καθώς και να παραδίδει LNG από/σε βυτιοφόρο όχημα, τότε θα πρέπει να υποστηρίζει ειδικές εγκαταστάσεις ευέλικτων σωλήνων και σταθερών φυγοκεντρικών αντλιών οι οποίες θα μεταφέρουν το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο μεταξύ του χερσαίου τερματικού σταθμού και του βυτιοφόρου οχήματος.<sup>[22]</sup>

## 4.2 Δεξαμενές αποθήκευσης LNG τερματικού σταθμού

Οι δεξαμενές αποθήκευσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου τείνουν να είναι το κυρίαρχο χαρακτηριστικό ενός χερσαίου τερματικού σταθμού LNG, τόσο από άποψη μεγέθους όσο και κόστους κατασκευής. Σήμερα υπάρχει μια ποικιλία αποθηκευτικών λύσεων και η επιλογή της κατάλληλης λύσης εξαρτάται από τους παράγοντες ασφαλείας, την απαιτούμενη χωρητικότητα καθώς και την πίεση που σχετίζεται με τη δημιουργία του boil-off gas.<sup>[63]</sup>

Με βάση την χωρητικότητα αποθήκευσης και την πίεση λειτουργίας, οι παρακάτω τρεις τύποι δεξαμενών είναι γενικά διαθέσιμοι:<sup>[63]</sup>

- Δεξαμενή επίπεδης βάσης : 2.000-250.000 m<sup>3</sup>
- Σφαιρική δεξαμενή : 1.000 – 8.000 m<sup>3</sup>
- Δεξαμενή bullet : 100 – 1.000 m<sup>3</sup>

Η δεξαμενή επίπεδης βάσης λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση, ενώ οι άλλες δύο λειτουργούν υπό πίεση, πέραν της κρυογονικής θερμοκρασίας.<sup>[63]</sup> Οι δύο τελευταίες προ-κατασκευάζονται πριν αποσταλούν στο σημείο της εγκατάστασης, το οποίο μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί σε μέγεθος με την προσθήκη ή την αφαίρεση δεξαμενών συμπίεσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τους τοπικούς χωροταξικούς περιορισμούς. Οι ατμοσφαιρικές δεξαμενές κατασκευάζονται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και συνήθως δεν μπορούν να αφαιρεθούν, έτσι ώστε να εγκατασταθούν εκ νέου σε διαφορετικές τοποθεσίες.<sup>[81]</sup> Ακόμη η χαμηλή πίεση (ατμοσφαιρική) είναι εκείνη που επιτρέπει τη χρήση επίπεδου πυθμένα, εφόσον οι προς τα πάνω δυνάμεις που εξασκούνται στη θολωτή στέγη (λόγω αυξημένης πίεσης ανέμου, σεισμού κλπ), αντισταθμίζονται με αγκύλωση στα θεμέλια του κελύφους.<sup>[72]</sup> Και στα δύο είδη δεξαμενών όμως, όσον αφορά την πίεση λειτουργίας, ο μέγιστος καθαρός όγκος χωρητικότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση, είναι μικρότερος από τον συνολικό όγκο χωρητικότητας της δεξαμενής σε ποσοστό περίπου του 10%.<sup>[81]</sup>

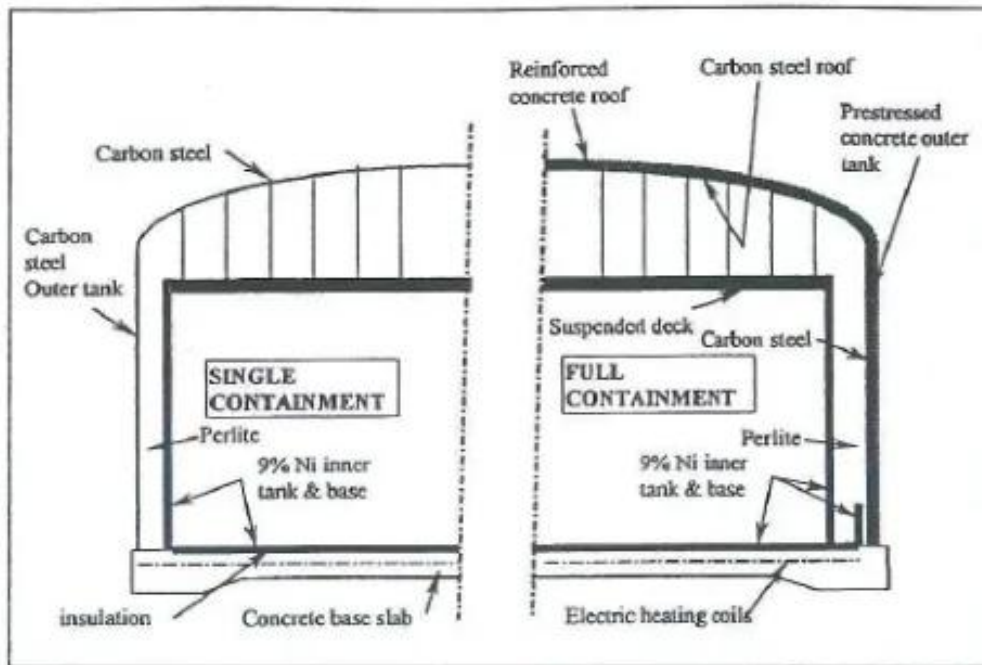
Όσον αφορά τα περιβλήματα που περιέχουν, οι δεξαμενές αποθήκευσης ενός χερσαίου τερματικού σταθμού διακρίνονται στις δεξαμενές απλής συγκράτησης (single containment) , διπλής συγκράτησης (double containment) και πλήρους συγκράτησης (full containment).<sup>[63]</sup>

Οι δεξαμενές απλής συγκράτησης είναι συνήθως μεταλλικές, κυλινδρικές με διπλό τοίχωμα και επίπεδο πυθμένα, ο οποίος στηρίζεται σε μόνωση που μπορεί να αντέξει υψηλά φορτία και σε βάση από σκυρόδεμα. Η βάση στηρίζεται σε πυλώνες για αερισμό ή σε πλάκα με σύστημα θέρμανσης, προς αποφυγή δημιουργίας πάγου. Η εσωτερική οροφή που κρέμεται από τη στέγη συγκρατεί τη μόνωση της οροφής και διαχωρίζει τη θερμότητα από τη ψυχρή ζώνη του αερίου. Η βασική ιδέα είναι το διπλό τοίχωμα, το εσωτερικό σαν κύριο δοχείο του υγρού και το εξωτερικό για την συγκράτηση της οροφής και της μόνωσης και όχι για τη συγκράτηση πιθανών διαρροών του καυσίμου. Σαν υλικό κατασκευής του εσωτερικού τοιχώματος οι προδιαγραφές έχουν δεχθεί τον χάλυβα 9% νικελίου (μέχρι πάχους 32 mm), ο οποίος θεωρείται συντηρητικό υλικό αφού ικανοποιεί τους ελέγχους μέχρι και 30°C περίπου χαμηλότερα της θερμοκρασίας λειτουργίας. Εκτός του υλικού αυτού χρησιμοποιούνται και είναι αποδεκτά και άλλα υλικά όπως κράματα αλουμινίου, κράματα νικελίου και ανοξείδωτοι χάλυβες.<sup>[72]</sup> Το εξωτερικό τοίχωμα που συγκρατεί τη μόνωση, κατασκευάζεται από ανθρακούχο χάλυβα, και στις δεξαμενές απλής συγκράτησης έχει σχεδιαστεί μόνο για συγκράτηση των ατμών. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η βλάβη στο εσωτερικό τοίχωμα μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη στο εξωτερικό τοίχωμα.<sup>[64]</sup> Συνήθως οι δεξαμενές απλής συγκράτησης περιβάλλονται από εξωτερικά αναχώματα.

Στις δεξαμενές διπλής συγκράτησης, χρησιμοποιείται μια δευτερεύον ομόκεντρη εξωτερική δεξαμενή, το ονομαζόμενο «κέλυφος», που απέχει από την εσωτερική ένα κενό διάστημα μέχρι 6 μέτρα. Το εξωτερικό αυτό κέλυφος, που είναι συνήθως κατασκευασμένο από προεντεταμένο σκυρόδεμα, με άριστη συμπεριφορά στις κρουγονικές θερμοκρασίες, έχει την ιδιότητα να συγκρατεί υγρό σε περίπτωση διαρροής, αλλά όχι ατμό. Ο σχεδιασμός του εξωτερικού κελύφους πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους εξής παράγοντες: να υποβαστάζει το υδροστατικό φορτίο του περιεχομένου της εσωτερικής δεξαμενής σε περίπτωση διαρροής και μερικές φορές σε συνδυασμό και με ανάχωμα, να λειτουργεί σαν θώρακας για πιθανή προσβολή από εξωτερικά αίτια, να υπάρχει πρόβλεψη ώστε τα στοιχεία εξωτερικής και εσωτερικής δεξαμενής να μην διατρέχουν κίνδυνο ταυτόχρονης καταστροφής.<sup>[72]</sup>

Οι δεξαμενές πλήρους συγκράτησης αποτελούν ουσιαστικά μια μορφή των δεξαμενών διπλής συγκράτησης, όπου το εξωτερικό τοίχωμα καθώς και η οροφή είναι σχεδιασμένα να συγκρατούν εκτός από το υγρό και το αέριο.<sup>[72]</sup> Σε αντίθεση με τη δεξαμενή διπλής συγκράτησης, όπου η οροφή είναι κατασκευασμένη από ανθρακούχο ή ανοξείδωτο χάλυβα, η οροφή στο σύστημα αυτό είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το σύστημα μόνωσης στον τοίχο της δεξαμενής συνήθως αποτελείται από μία ελαστική κουβέρτα στο εξωτερικό του εσωτερικού κελύφους και σκόνη από περλίτη στον δακτυλιοειδή χώρο. Μια επένδυση από ανθρακούχο χάλυβα καλύπτει το εσωτερικό του εξωτερικού τοιχώματος και λειτουργεί σαν φράγμα υδρατμών, ώστε να αποφεύγεται η διεύδυση υγρασίας στον δακτυλιοειδή χώρο. Ένα σύστημα κάτω τοιχώματος με μόνωση και πλάκα 9% νικελίου χρησιμοποιείται για να εκτείνεται περίπου πέντε μέτρα από τον πυθμένα, του οποίου η μόνωση είναι ένα αφρώδες υλικό που ελαχιστοποιεί τις διαρροές θερμότητας και συχνά συνεισφέρει και στη θέρμανση για την αποφυγή προβλημάτων λόγω παγετού. Εναλλακτικά, αν η δεξαμενή είναι χτισμένη πάνω σε μια ανυψωμένη πλάκα βάσης, η θέρμανση στην πλάκα επιτυγχάνεται με την κυκλοφορία του αέρα είτε φυσική είτε εξαναγκασμένη.<sup>[71]</sup>

Η πλειοψηφία των δεξαμενών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως σε χερσαίους τερματικούς σταθμούς είναι κρουγονικές κυλινδρικές επίπεδης βάσης, διότι οι σφαιρικές δεξαμενές συμπίεσης εμφανίζουν μεγαλύτερη πιθανότητα αποτυχίας και κατάρρευσης. Αυτό συμβαίνει γιατί το συνολικό φορτίο συγκεντρώνεται σε μικρότερη περιοχή, παρά να κατανέμεται σε μεγαλύτερη περιοχή, όπως συμβαίνει στις κυλινδρικές δεξαμενές.<sup>[11]</sup>



**Εικόνα 30:** Σύγκριση δεξαμενής απλής και πλήρους συγκράτησης<sup>[64]</sup>

Πριν αποδοθεί μια δεξαμενή για λειτουργία, ελέγχεται η στεγανότητά και η στατική της επάρκεια με το τεστ νερού μέχρι πληρώσεως. Για τον έλεγχο της υπερπίεσης τοποθετούνται βαλβίδες ασφαλείας που ρυθμίζονται συνεχώς στο 110% της μέγιστης πίεσης λειτουργίας. Τέλος οι αποστάσεις μεταξύ των δεξαμενών πρέπει να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές, ώστε και με την βοήθεια των συστημάτων πυρόσβεσης να αποφεύγεται η εξάπλωση της φωτιάς.<sup>[72]</sup> Οι συνδέσεις με σωληνώσεις βρίσκονται πάντα στην κορυφή των δεξαμενών. Δεν υπάρχουν συνδέσεις για αγωγούς ή μετρητικά όργανα στις πλευρές ή στον πυθμένα της δεξαμενής για αν εξασφαλιστεί η μηχανική ακεραιότητα. Η εσωτερική σωλήνωση μπορεί να επιτρέψει την πάνω ή κάτω πλήρωση, για να ελαχιστοποιήσει και τη δυνατότητα στρωματοποίησης, όταν τροφοδοτούνται διαφορετικές πυκνότητες στην ίδια δεξαμενή.<sup>[71]</sup> Οι δεξαμενές είναι τέλος εξοπλισμένες με αντλίες εμβαπτιζομένου τύπου στον πυθμένα τους, για τη μεταφορά LNG στους εξατμιστήρες. Οι αντλίες βρίσκονται τοποθετημένες μέσα σε στήλες που εκτείνονται από τον πυθμένα της δεξαμενής μέχρι την εξωτερική οροφή και επιτρέπουν την απομόνωση των αντλιών από το περιεχόμενο της δεξαμενής για αφαίρεση της αντλίας, συντήρηση και επανεγκατάσταση.<sup>[69]</sup>



**Εικόνα 31:** Εσωτερικό δεξαμενής αποθήκευσης LNG<sup>[11]</sup>



**Εικόνα 32:** Κατασκευή δεξαμενών πλήρους συγκράτησης<sup>[63]</sup>

### 4.3 Διαχείριση του αερίου από τον βρασμό του LNG

Η παραγωγή του boil-off gas και η ανάκτησή του στις εγκαταστάσεις ενός χερσαίου τερματικού σταθμού, απαιτούν ειδικές εκτιμήσεις, ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση του αέρα και οι απώλειες ενέργειας και προϊόντος.<sup>[25]</sup> Το αέριο αυτό που δημιουργείται από την είσοδο θερμότητας στην δεξαμενή, καθώς και από το διαλείπον αέριο από τη φόρτωση και εκφόρτωση, απαιτεί συνεχή αφαίρεση από τη δεξαμενή αποθήκευσης. Το σύστημα σχεδιασμού της διαχείρισης του boil-off gas επηρεάζεται κυρίως από την χωρητικότητα αποθήκευσης της δεξαμενής, τον βαθμό μόνωσης, την πίεση λειτουργίας, τις ιδιότητες του εισαγόμενου LNG, το αναμενόμενο λειτουργικό σενάριο φόρτωσης του τερματικού σταθμού, τις εγκαταστάσεις αποστολής και τη δυνατότητα συνεχούς κατανάλωσης αερίου.<sup>[63]</sup> Υπάρχουν διάφορες δυνατότητες διαχείρισης του όγκου του αερίου, το οποίο παράγεται σε παροδική βάση, όπως χαμηλής πίεσης συμπίεση σε ένα σύστημα αερίου καυσίμου, υψηλής πίεσης συμπίεση μέχρι τις πιέσεις λειτουργίας του αγωγού φυσικού αερίου, μονάδα επανυγροποίησης και επιστροφή στις δεξαμενές αποθήκευσης και χαμηλής πίεσης συμπίεση σε συμπυκνωτήρα για μετατροπή του boil-off gas σε LNG.<sup>[73]</sup>

Οι συμπυκνωτήρες είναι εκείνοι που χρησιμοποιούνται συνήθως και είναι εγκατεστημένοι στον χερσαίο τερματικό σταθμό, ως μέρος του συστήματος διαχείρισης του boil-off gas. Συνήθως εφαρμόζονται σε τερματικούς σταθμούς όπου υπάρχει συνεχής αποστολή φυσικού αερίου μέσω εξάτμισης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου.<sup>[63]</sup> Τόσο η υψηλής πίεσης συμπίεση όσο και η επανυγροποίηση, έχουν υψηλό λειτουργικό κόστος καθώς και κόστος κεφαλαίου, ενώ η χαμηλής πίεσης συμπίεση απαιτεί έναν κοντινό καταναλωτή αερίου καυσίμου, που συνήθως δεν είναι γενικά διαθέσιμος.<sup>[73]</sup>

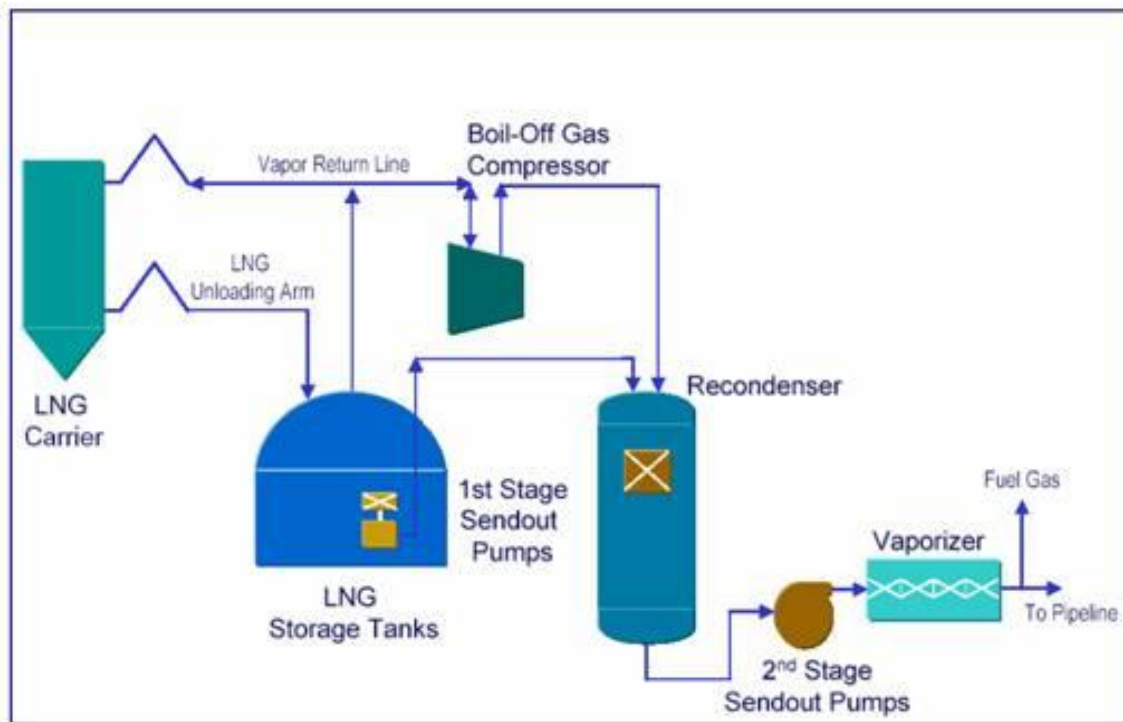
Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν εναλλάκτη για τη μείωση της θερμοκρασίας του boil-off gas, τον συμπίεστη χαμηλής πίεσης και τον συμπυκνωτήρα για επανυγροποίηση.<sup>[73]</sup>



Το boil-off gas συλλέγεται από το σύστημα διαχείρισης των ατμών, και το μέρος αυτού του αερίου που προέρχεται από τις διαδικασίες φορτω-εκφόρτωσης του δεξαμενοπλοίου, θα επιστραφεί στην δεξαμενή του LNG Carrier με έναν φουσητήρα επιστροφής ατμών για να αναπληρώσει το τμήμα του υγρού που αντλήθηκε και να χρησιμοποιηθεί και σε διεργασίες του πλοίου. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται θετική η πίεση στην δεξαμενή αποθήκευσης. Το υπόλοιπο αέριο που δεν μεταφέρεται πίσω στο πλοίο, συμπιέζεται και συμπυκνώνεται σε άμεση επαφή με το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο. Το LNG υποψύχεται επειδή ο συμπυκνωτής λειτουργεί σε σημαντικά υψηλότερες πιέσεις, τυπικά μεταξύ 5 και 10 barg, από την δεξαμενή αποθήκευσης, οι πιέσεις της οποίας είναι ατμοσφαιρικές. Μετά την συμπύκνωση το αέριο τελικά συνδυάζεται με το προς αποστολή LNG, πριν αντληθεί μέχρι την πίεση του αγωγού στις αντλίες εκτόνωσης.<sup>[69]</sup> Όταν δεν υπάρχει αποστολή αερίου, ο χερσαίος τερματικός σταθμός βρίσκεται σε κατάσταση μηδενικής αποστολής και πρέπει να επιδιώξει άλλες λύσεις για τη διαχείριση του boil-off gas.<sup>[73]</sup> Η περίσσεια του boil-off gas καίγεται σε πυρσό καύσης, ο οποίος αποτελεί και ένα σύστημα ασφάλειας, αφού κάνει αντιληπτή οποιαδήποτε αποτυχία.<sup>[11]</sup>

Η μονάδα επανυγροποίησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά, είναι μια τεχνολογία που βασίζεται σε έναν κύκλο ανακύκλωσης αζώτου Brayton για την εκ νέου εκκαθάριση του boil-off gas. Ανάλογα με τη διαθέσιμη πίεση του αερίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα επεξεργασίας με έναν ή δύο διαστολές. Η χρήση του κύκλου αυτού επιτρέπει ευρεία ευελιξία λειτουργίας, η οποία είναι κατάλληλη αφού η ροή του boil-off gas μπορεί να ποικίλει με την πάροδο του χρόνου.<sup>[74]</sup>

Ένα τυπικό πλάνο των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε έναν χερσαίο τερματικό σταθμό και περιγράφηκαν παραπάνω, παρουσιάζεται στην Εικόνα 33.



**Εικόνα 33:** Πλάνο διεργασιών χερσαίου τερματικού σταθμού LNG<sup>[75]</sup>

## 4.4 Συστήματα ελέγχου και συστήματα ασφαλείας τερματικού σταθμού

Η ασφάλεια σε έναν χερσαίο τερματικό σταθμό Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, αποτελεί ένα ευαίσθητο ζήτημα που δεν έχει μόνο τεχνικές επιπτώσεις αλλά και κοινωνικοπολιτικές πτυχές. Επομένως είναι σημαντικό να αντιμετωπιστούν όλα αυτά τα ζητήματα και γι' αυτό η ασφάλεια είναι το σημαντικότερο στοιχείο στον σχεδιασμό, την κατασκευή και στη λειτουργία ενός τερματικού σταθμού LNG. Οι υπάρχοντες κώδικες σχεδίασης, πρότυπα και διαδικασίες επανεξετάζονται συνεχώς και αναπτύσσονται με νέες προσθήκες, ώστε να ενσωματωθούν όλες οι νέες εξελίξεις ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο για τη ζωή και την ιδιοκτησία. Υπάρχει λοιπόν μια συνεχής δραστηριότητα για τη βελτίωση της ασφάλειας και τη μείωση του κινδύνου που συνδέεται με τις χερσαίες εγκαταστάσεις ενός τερματικού σταθμού LNG, και εκτός από τις εγκαταστάσεις ξηράς του σταθμού περιλαμβάνει και διάφορες απαιτήσεις για τα πλοία που προσεγγίζουν την προβλήτα και προσγειώνονται εκεί.<sup>[71]</sup>

Για την ασφαλή λειτουργία οποιουδήποτε τερματικού σταθμού LNG, είναι ζωτικής σημασίας να υπάρχει κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος διακοπής έκτακτης ανάγκης και των συστημάτων επικοινωνίας, καθώς και παρακολούθηση των συστημάτων προστασίας απωλειών. Τα τελευταία σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργούν αυτόματα σε κάθε περίπτωση έλλειψης προσοχής από τον χειριστή. Το Σύστημα Απενεργοποίησης Έκτακτης Ανάγκης (ESD System) που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, εκτός από το δεξαμενόπλοιο μεταφοράς, βρίσκεται εγκατεστημένο και στον χερσαίο τερματικό σταθμό LNG, ώστε να επιτρέπει τον ασφαλή τερματισμό των διαδικασιών σε περίπτωση ατυχήματος. Η έναρξη της διακοπής λειτουργίας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε χειροκίνητα, από σταθμούς χειρός τοποθετημένους σε όλη την εγκατάσταση, είτε αυτόματα βασισμένη σε πληροφορίες που προέρχονται από τους ποικίλους ανιχνευτές κινδύνου που βρίσκονται σε κρίσιμες περιοχές της εγκατάστασης. Το σύστημα επιτρέπει την απενεργοποίηση συγκεκριμένων τομέων (διαδικασία εκφόρτωσης ή συγκεκριμένα εξαρτήματα του εξοπλισμού) ή ολόκληρης της εγκατάστασης, ανάλογα το ατύχημα. Η βασικότερη ενέργεια του συστήματος είναι το κλείσιμο όλων των βανών στις γραμμές έγχυσης, από το πλοίο έως τις δεξαμενές της εγκατάστασης. Στο δωμάτιο ελέγχου υπάρχουν συναγερμοί για να ειδοποιούν το προσωπικό για μια επικίνδυνη κατάσταση, που ανιχνεύεται από τα όργανα μέτρησης. Σε μερικούς τερματικούς σταθμούς LNG υπάρχουν τέσσερα επίπεδα απενεργοποίησης, από το χαμηλότερο έως το υψηλότερο επίπεδο. Μια απενεργοποίηση σε υψηλότερο επίπεδο μπορεί να προκαλέσει μία ή περισσότερες απενεργοποιήσεις στο αμέσως προηγούμενο επίπεδο.<sup>[71]</sup>

**(Unit Shutdown USD)** : Η μονάδα αυτή αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο απενεργοποίησης και είναι σχεδιασμένη, ώστε να απομονώνει ένα εξάρτημα ή μια ομάδα εξαρτημάτων ή ένα σύστημα επεξεργασίας, λόγω μη ασφαλών συνθηκών λειτουργίας ή λόγω χειροκίνητης ενεργοποίησης των κουμπιών. Αυτόματη διακοπή θα πραγματοποιηθεί από τα συστήματα οργάνων ασφαλείας. Οι διαδικασίες εκφόρτωσης, μεταφοράς και αποθήκευσης υποδιαιρούνται σε συστήματα λογικής διαδικασίας που κλείνουν ένα τμήμα της εγκατάστασης, επιτρέποντας παράλληλα τη συνέχεια των υπόλοιπων εγκαταστάσεων υπό μερικές συνθήκες λειτουργίας.<sup>[71]</sup>

**(Process Shutdown PSD)** : Το σύστημα αυτό είναι σχεδιασμένο να απενεργοποιεί και να απομονώνει ολόκληρη τη κεντρική μονάδα του συστήματος επεξεργασίας ή μεγάλα τμήματα αυτού, διατηρώντας παράλληλα τη λειτουργία των συστημάτων κοινής ωφέλειας και ασφαλείας, αφήνοντας μερικές λειτουργικές περιοχές μη επηρεασμένες.<sup>[71]</sup>

Emergency Shutdown (ESD) : Το σύστημα αυτό εξασφαλίζει την αρχική προστασία του εξοπλισμού και των χώρων σε περίπτωση συναγερμού πυρκαγιάς ή αερίου. Εκκινεί τις διαδικασίες του συστήματος PSD καθώς και την αυτόματη αποσυμπίεση των επηρεασμένων συστημάτων επεξεργασίας. Τα κανονικά κυκλώματα ισχύος στις περιοχές που έχουν επηρεαστεί απενεργοποιούνται, ενώ η βασική ισχύς παραμένει σε λειτουργία και οι γεννήτριες έκτακτης ανάγκης ενεργοποιούνται.<sup>[71]</sup>

Total Plant Shutdown (TPS) : Αυτό είναι το υψηλότερο επίπεδο διακοπής όπου η κατάσταση έχει προχωρήσει στο σημείο, που η μόνη ασφαλής ενέργεια που απομένει είναι η εκκένωση της εγκατάστασης. Τα χειροκίνητα κουμπιά βρίσκονται στην κεντρική αίθουσα ελέγχου και στον προσωρινό σταθμό ελέγχου έκτακτης ανάγκης στο κτίριο διοίκησης. Το σύστημα αυτό εκκινεί τις διαδικασίες των συστημάτων PSD και ESD, αν δεν έχουν ήδη ενεργοποιηθεί, αποσυμπίεζει όλες τις μονάδες επεξεργασίας και αποσυνδέει όλη την ισχύ της εγκατάστασης.<sup>[71]</sup>

Ένας χερσαίος τερματικός σταθμός διαθέτει ακόμη συστήματα γρήγορης αποδέσμευσης τόσο για τους βραχίονες της εγκατάστασης, που αποσυνδέονται από την πολλαπλή έγχυσης του πλοίου χωρίς να παρατηρηθεί καμία διαρροή, όσο και για όλες τις δέστρες των κάβων του πλοίου, που ενεργοποιούνται αυτόματα ή χειροκίνητα.<sup>[81]</sup>

Ο χερσαίος τερματικός σταθμός είναι επίσης εξοπλισμένος με ένα σύστημα ανίχνευσης κινδύνου, που περιλαμβάνει ανιχνευτές φλόγας, φυσικού αερίου, θερμοκρασίας και καπνού. Το σύστημα αυτό παρέχει την έγκαιρη ανίχνευση αερίων που απελευθερώνονται, εύφλεκτων αερίων υγρών και πυρκαγιών, τον προσδιορισμό της συγκεκριμένης τοποθεσίας απελευθέρωσης των επικινδύνων ουσιών, την έναρξη της αυτόματης διακοπής λειτουργίας του εξοπλισμού και την έναρξη των συστημάτων ελέγχου πυρκαγιάς. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι τοποθετημένοι στην προβλήτα, στην δεξαμενή αποθήκευσης και στο σύστημα διαχείρισης του boil-off gas, που αποτελούν τις κρίσιμες περιοχές της εγκατάστασης, αλλά και σε άλλα σημεία του τερματικού σταθμού.

Επιπροσθέτως διάφορα συστήματα καταστολής της πυρκαγιάς, βρίσκονται σε διάφορα σημεία του χερσαίου τερματικού σταθμού LNG. Ο τύπος της πυροσβεστικής ουσίας που χρησιμοποιείται σε μια συγκεκριμένη περίπτωση, βασίζεται στα χαρακτηριστικά του γεγονότος καθώς και στην αποτελεσματικότητα της ουσίας σε συγκεκριμένο τύπο πυρκαγιάς, που έχει προκληθεί σε μια συγκεκριμένη μονάδα σχεδιασμού ή λειτουργία της εγκατάστασης. Το σύστημα πυρόσβεσης λοιπόν περιλαμβάνει : ένα υπόγειο σύστημα σωληνώσεων διανομής πυροσβεστικού νερού που εξυπηρετεί πυροσβεστικούς κρουνοί, κανόνια νερού και μάνικες, ένα σύστημα αφρού υψηλής διαστολής, ένα σύστημα ξηρής χημικής σκόνης, φορητούς και τροχήλατους πυροσβεστήρες σκόνης, αφρού και διοξειδίου του άνθρακα και πυροπροστασία στα κτίρια που αποτελείται από ανιχνευτές καπνού, υπεριώδεις και υπέρυθρους ανιχνευτές φλόγας και φορητούς πυροσβεστήρες. Η λειτουργία των συστημάτων αυτών αναλύθηκε και παραπάνω στο Κεφάλαιο 3.6.2. Το νερό για κατάσβεση των πυρκαγιών μπορεί να αντληθεί από δυο ανεξάρτητες πηγές. Μια δεξαμενή φρέσκου νερού που βρίσκεται εγκατεστημένη πάνω στον τερματικό σταθμό, αποτελεί την κύρια παροχή νερού και με τη βοήθεια μιας ηλεκτροκίνητης αντλίας, μεταφέρεται στο σύστημα διανομής. Η δεύτερη εναλλακτική πηγή είναι το θαλασσινό νερό, το οποίο παρέχεται από αντλίες πυρόσβεσης που ενεργοποιούνται αυτόματα αν υπάρχει αποτυχία των αντλιών φρέσκου νερού. Τέλος άζωτο χρησιμοποιείται για την συνεχή εκκαθάριση των αγωγών, των συμπιεστών, των στηλών που βρίσκονται τοποθετημένες οι αντλίες εμβαισιζομένου τύπου στο εσωτερικό της δεξαμενής, των βραχιόνων φορτω-εκφόρτωσης και των κεφαλών εξαερισμού για την αποφυγή εισροής αέρα.<sup>[71]</sup>



Συγκεκριμένα οι δεξαμενές αποθήκευσης που αποτελούν και τον σημαντικότερο κίνδυνο στον τερματικό σταθμό εκτός από τα συστήματα πυρόσβεσης που αναφέρθηκαν, είναι εξοπλισμένες και με βάνες ασφαλείας, ανακουφιστικές βαλβίδες και εξαεριστικά πίεσης, εξαεριστικά έκτακτης ανάγκης, ανιχνευτές αερίων, προειδοποιητικά υψηλής στάθμης πλήρωσης, βάνες αποστράγγισης νερού, λεκάνες ασφαλείας (αναχώματα), αυτόματο και τηλεχειριζόμενο σύστημα ψεκασμού με νερό της οροφής.<sup>[11]</sup>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Διαδικασίες φορτω-εκφόρτωσης**

### **5.1 Έλεγχος συμβατότητας μεταξύ πλοίου και χερσαίου τερματικού σταθμού LNG**

Πριν από την προγραμματισμένη κλήση στον χερσαίο τερματικό σταθμό Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, ένα πλοίο θα πρέπει να έχει υποβληθεί επιτυχώς στη διαδικασία καταχώρησής του στον κατάλογο των πλοίων του τερματικού σταθμού, στον οποίο θα πραγματοποιήσει φορτω-εκφόρτωση. Η καταχώρηση των πλοίων υποβάλλεται, σύμφωνα με το παράρτημα 2 της σύμβασης πρόσβασης στους τερματικούς σταθμούς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου και τη διαδικασία έγκρισης του πλοίου, που συστάθηκε από την Gas LNG Europe, και είναι ξεχωριστή για κάθε τερματικό σταθμό. Ο έλεγχος της συμβατότητας μεταξύ του πλοίου LNG και του χερσαίου τερματικού σταθμού, αποτελεί ουσιαστικά μία μελέτη που αναλαμβάνει ο εκπρόσωπος του LNG Carrier, ο τεχνικός διαχειριστής και ο χειριστής του τερματικού σταθμού, για να εξασφαλίσουν την ασφαλή πρόσδεση του πλοίου στην προβλήτα του σταθμού και έτσι την μεταφορά φορτίου LNG.<sup>[82]</sup>

Η μελέτη αυτή ξεκινά με την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των ειδικών που αναφέρθηκαν, έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση να διασφαλίζεται ότι τόσο το πλοίο όσο και η εγκατάσταση LNG γνωρίζουν τις διεπιφάνειες των διαδικασιών επαλήθευσης της τεχνικής και λειτουργικής συμβατότητας του πλοίου LNG και του χερσαίου τερματικού σταθμού. Συγκεκριμένα κοινοποιούνται έγκυρα πιστοποιητικά, σχέδια και εγχειρίδια που αφορούν τεχνικές προδιαγραφές και προδιαγραφές ασφαλείας για την πρόσδεση, σύνδεση, έγχυση LNG, αποσύνδεση απόπλου πλοίων LNG από τον τερματικό σταθμό, καθώς και ο τύπος και το περιεχόμενο των πιστοποιητικών καταλληλότητας και επιθεωρήσεων του πλοίου.<sup>[83]</sup> Όλα τα απαραίτητα έγγραφα που πρέπει να συγκεντρωθούν παρατίθενται στο παράρτημα του Ερωτηματολογίου Προ-αποδοχής (Pro-acceptance Questionnaire PAQ) για τον εκπρόσωπο του πλοίου και στην ιστοσελίδα του χερσαίου τερματικού σταθμού για τον χειριστή.<sup>[84]</sup> Ο τεχνικός διαχειριστής εφόσον εξετάσει όλα τα στοιχεία που ανταλλάχθηκαν, θα αποφασίσει σχετικά με την δυνατότητα αποδοχής του πλοίου LNG και τα συμπεράσματα της ανάλυσης αυτής θα κοινοποιηθούν στον εκπρόσωπο του πλοίου, ο οποίος στη συνέχεια θα προετοιμάσει ένα σχέδιο πρόσδεσης του πλοίου. Ο διαχειριστής ελέγχει και εγκρίνει ή απορρίπτει το σχέδιο πρόσδεσης, στην περίπτωση που αυτό δεν είναι συμβατό με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της προβλήτας και μπορεί να ζητήσει εκ νέου τον υπολογισμό του. Το τελικό σχέδιο πρόσδεσης πρέπει να συμφωνηθεί μεταξύ του διαχειριστή και του εκπροσώπου του πλοίου και να γίνει γνωστό στον καπετάνιο και τον ναυτιλιακό πράκτορα του πλοίου.<sup>[83]</sup> Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης όλων των στοιχείων οργανώνεται μια συνάντηση στον χερσαίο τερματικό σταθμό LNG, με μέλη τον διαχειριστή, τον εκπρόσωπο του πλοίου και τον χειριστή του σταθμού, στην οποία αναλύονται τα συμπεράσματα του σχεδίου πρόσδεσης και καθορίζεται το σχέδιο ασφαλείας πλοίου/τερματικού σταθμού (Ship Shore Safety Plan SSSP), που συγκεντρώνει τεχνικά δεδομένα και διαδικασίες λειτουργίας, ασφάλειας, έκτακτης ανάγκης και επικοινωνίας.<sup>[84]</sup>

Η πλήρης συμβατότητα του πλοίου με τον τερματικό σταθμό επαληθεύεται με μια δοκιμαστική φορτω-εκφόρτωση. Μετά την ασφαλή πρόσδεση του πλοίου και πριν ξεκινήσει η έγχυση του φορτίου, λαμβάνει χώρα πάνω στο πλοίο μια σύσκεψη μεταξύ του διαχειριστή, του εκπροσώπου και του καπετάνιου του πλοίου κατά τη διάρκεια της οποίας επαληθεύεται το σχέδιο ασφαλείας

πλοίου/τερματικού σταθμού και ότι αφορά στην πρόσδεση, την πυρόσβεση, την μεταφορά φορτίου LNG, τις επικοινωνίες και τις διαδικασίες λειτουργίας, ελέγχεται η διεπιφάνεια πλοίου/τερματικού σταθμού σύμφωνα με την λίστα ελέγχου ασφαλείας του IMO, που τελικά υπογράφεται από τον καπετάνιο. Μετά την αξιολόγηση όλων των παραμέτρων της δοκιμαστικής φορτω-εκφόρτωσης, αποφασίζεται αν το πλοίο LNG δεν θα γίνει αποδεκτό για μελλοντική φορτω-εκφόρτωση στην εγκατάσταση LNG, γίνει αποδεκτό μελλοντικά για άλλη δοκιμαστική φορτω-εκφόρτωση έπειτα από διορθωτικές ενέργειες ή γίνει αποδεκτό μελλοντικά, χωρίς να υπόκειται σε περαιτέρω δοκιμές για μια συγκεκριμένη περίοδο αποδοχής, οπότε και καταχωρείται στον κατάλογο των πλοίων του χερσαίου τερματικού σταθμού.<sup>[83]</sup>

## 5.2 Ελλιμενισμός πλοίου

Όταν το πλοίο φτάσει στο αγκυροβόλιο επικοινωνεί μέσω ασύρματου με το κέντρο ελέγχου του χερσαίου τερματικού σταθμού LNG και γνωστοποιεί τον χρόνο κατά τον οποίο θα είναι έτοιμο για ελλιμενισμό.<sup>[83]</sup> Οι σημαντικότεροι κανόνες πριν ή κατά τη διάρκεια ελλιμενισμού του πλοίου, ο οποίος επιτρέπεται κάτω από ορισμένες καιρικές συνθήκες, είναι οι εξής: χαμηλή ταχύτητα, ελεγχόμενη προσέγγιση, προγραμματισμός, ομαδικότητα και έλεγχος εξοπλισμού.<sup>[85]</sup> Η διαδικασία του ελλιμενισμού πραγματοποιείται με τη βοήθεια ρυμουλκών, που είναι μια εξωτερική υπηρεσία που ορίζεται από τον πράκτορα του πλοίου.<sup>[86]</sup> Το ρυμουλκό είναι μια ειδική κατηγορία σκάφους που βοηθά στην πρόσδεση του πλοίου LNG, είτε με ρυμούλκηση, κατά την οποία δένεται με το πλοίο με ειδικά συρματόσχοινα, είτε με ώθηση του πλοίου προς την προβλήτα και χωρίς αυτό τα μεγάλα δεξαμενόπλοια δεν μπορούν να φτάσουν στο λιμάνι από μόνα τους (Εικόνα 38). Μπορεί ακόμη να λειτουργήσει ως σκάφος διάσωσης και παγοθραυστικό, ενώ παράλληλα προσφέρει και παροχή βασικών υπηρεσιών για το πλοίο όπως νερό, αέρα, συστήματα πυροπροστασίας κ.α.



**Εικόνα 38:** Ρυμουλκά ωθούν το πλοίο προς την προβλήτα<sup>[87]</sup>

Η επιλογή του αριθμού του ρυμουλκών και της ισχύος έλξης τους, εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου που πρόκειται να ελλιμενιστεί και συνήθως συνδέονται με τις μπροστινές και πρυμναίες άκρες του ποίου, ώστε να ελέγχουν τόσο την πλευρική και μπροστινή κίνηση, όσο και την προς τα πίσω, τραβώντας ή πιέζοντας όπως απαιτείται. Για πλοία μεταφοράς LNG από 70.000 έως 160.000 m<sup>3</sup> χρησιμοποιούνται συνήθως 4 ρυμουλκά για τον ελλιμενισμό, και 3 ώστε να αποσυνδεθεί από την προβλήτα της εγκατάστασης. Καθώς το πλοίο πλησιάζει την προβλήτα, πρέπει να έρθει παράλληλα σε αυτήν και να σταματήσει λίγο πριν φτάσει στη θέση ελλιμενισμού, χωρίς την παρουσία εμπρόσθιων ρυμουλκών, τα οποία στη συνέχεια θα βοηθήσουν στο να κατευθυνθεί προς τη σωστή θέση, και παράλληλα με τη χρήση γραμμών ελατηρίων εξασφαλίζουν την προς τα εμπρός και πίσω ακινησία του πλοίου. Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία πρόσδεσης, στην οποία πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο καλά επανδρωμένα πλοία αγκυροβόλησης, ένα στο τα τόξο και ένα στην πρύμνη του πλοίου μεταφοράς LNG. Δύο συνεργεία αγκυροβόλησης σε κάθε πλευρά της προβλήτας βοηθούν στην τοποθέτηση των γραμμών, οι οποίες μεταφέρονται μία προς μία στο αντίστοιχο άγκιστρο και τελικά τεντώνονται.<sup>[86]</sup> Ο αριθμός των κάβων πρόσδεσης αλλά και η διάταξη αυτών καθορίζεται κατά τη διαδικασία έγκρισης της συμβατότητας του πλοίου με την προβλήτα.<sup>[83]</sup> Η διαδικασία φόρτωσης είναι έτοιμη όταν και οι βραχίονες φορτω-εκφόρτωσης της προβλήτας του χερσαίου τερματικού σταθμού συνδεθούν με τις απολήξεις του πλοίου που βρίσκονται στο κατάστρωμα.

### 5.3 Διαδικασία φόρτωσης στο πρώτο ταξίδι

Αρχικά θεωρούμε ότι το δεξαμενόπλοιο μεταφοράς LNG έρχεται απευθείας από ναυπηγείο ή δεξαμενισμό, ώστε να πραγματοποιηθεί ή πρώτη του φόρτωση από χερσαίο τερματικό σταθμό. Πριν τη διεξαγωγή οποιωνδήποτε εργασιών φορτίου, είναι σημαντικό οι δεξαμενές να έχουν ελεγχθεί επιμελώς, ώστε να εξασφαλιστεί η καθαριότητα τους, δηλαδή να έχουν αφαιρεθεί όλα τα χαλαρά αντικείμενα και όλα τα εξαρτήματα να είναι σωστά ασφαλισμένα. Αφού ολοκληρωθεί η επιθεώρηση, η δεξαμενή φορτίου πρέπει να είναι καλά ασφαλισμένη, και η διαδικασία της ξήρανσης μπορεί να ξεκινήσει.<sup>[88]</sup>

#### 5.3.1 Ξήρανση

Η ξήρανση ολόκληρου του συστήματος διακίνησης φορτίου σε οποιοδήποτε δεξαμενόπλοιο μεταφοράς LNG είναι το πρώτο απαραίτητο βήμα πριν τη φόρτωση LNG από τον χερσαίο τερματικό σταθμό. Όλοι οι ατμοί νερού καθώς και το ελεύθερο νερό πρέπει να απομακρυνθούν από τις δεξαμενές, γιατί διαφορετικά η υπολειμματική υγρασία μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία πάγου και ιδρυτών, αλλά ταυτόχρονα σε συνδυασμό με θείο και οξείδια του αζώτου που μπορεί να υπάρχουν σε περίσσεια στο αδρανές αέριο μπορούν να σχηματιστούν και διαβρωτικές ουσίες που προκαλούν προβλήματα στο σύστημα φορτίου.<sup>[45]</sup> Η διαδικασία της ξήρανσης στους υπόλοιπους χώρους του συστήματος, ουσιαστικά πραγματοποιείται προκειμένου να αποτραπεί ζημιά στη μόνωση της δεξαμενής, λόγω συμπύκνωσης της υγρασίας μέσα σε αυτή, πριν από τη διαδικασία ψύξης αλλά και περιοδικά κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού. Σύμφωνα με τον κώδικα IGC, από τον καθαρό αέρα αφαιρείται το νερό και αποστέλλεται στους χώρους συγκράτησης με σημείο δρόσου από -70°C έως -40°C, μέσω του πυθμένα τους, ενώ ο υγρός αέρας απελευθερώνεται μέσω του παρεχόμενου σωλήνα εξαερισμού στο ανώτατο τμήμα της δεξαμενής.<sup>[88]</sup> Όσον αφορά την ίδια τη δεξαμενή, επειδή ο ξηρός αέρας μπορεί να είναι ελαφρύτερος από τον αέρα περιβάλλοντος, εισάγεται μέσω της πολλαπλής ατμού, στο δοχείο ατμού στην κορυφή της δεξαμενής, και το μίγμα αέρα εξέρχεται από τον πυθμένα της στην

ατμόσφαιρα.<sup>[89]</sup> Η πίεση στον χώρο συγκράτησης πρέπει να διατηρείται σε μία πίεση , υψηλότερη από την ατμοσφαιρική. Πριν την παροχή ξηρού αέρα στον χώρο συγκράτησης, ο ίδιος πρέπει να είναι εντελώς ξηρός αρχίζοντας από το κάτω μέρος όπου βρίσκεται το πηγάδι υδροσυλλεκτών. Όταν το σημείο δρόσου γίνει μικρότερο από την προγραμματισμένη θερμοκρασία τότε ολοκληρώνεται η διαδικασία της ξήρανσης,<sup>[88]</sup> και στο σημείο αυτό οι δεξαμενές έχουν 20% περίπου οξυγόνο και ένα περιεχόμενο σε μεθάνιο λιγότερο από 0.2% κατ'όγκο.<sup>[89]</sup>

Η ξήρανση μπορεί να πραγματοποιηθεί ως μέρος της διαδικασίας αδρανοποίησης, κατά τη λήψη αδρανούς αερίου από τον χειρσαίο τερματικό σταθμό. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα της παροχής διπλών λειτουργιών μείωσης της υγρασίας του περιεχομένου των δεξαμενών μέχρι το απαιτούμενο σημείο δρόσου και ταυτόχρονα μείωση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο. Το μειονέκτημα όμως της μεθόδου αυτή, όπως και της παρακάτω που θα αναφερθεί, είναι ότι χρησιμοποιείται περισσότερο αδρανές αέριο από την ποσότητα που θα χρειαζόταν ώστε να μειωθεί το οξυγόνο στην επιθυμητή τιμή.<sup>[88]</sup>

Η διαδικασία μπορεί ακόμη να επιτευχθεί ταυτόχρονα με την διαδικασία της αδρανοποίησης, όταν χρησιμοποιείται η γεννήτρια αδρανούς αερίου του πλοίου, αλλά η ικανοποιητική αφαίρεση ατμών νερού εξαρτάται από τις προδιαγραφές του συστήματος αδρανοποίησης. Η γεννήτρια θα πρέπει να είναι κατάλληλης χωρητικότητας και το αδρανές αέριο κατάλληλης ποιότητας, αλλά οι απαραίτητες προδιαγραφές δεν είναι πάντα χαρακτηριστικό σχεδιασμού του εξοπλισμού αυτού. Η γεννήτρια είναι μερικές φορές εφοδιασμένη με έναν ξηραντήρα ψυγείου και έναν ξηραντήρα προσρόφησης, οι οποίοι σε συνδυασμό μπορούν να μειώσουν το σημείο δρόσου στους  $-45^{\circ}\text{C}$  ή και χαμηλότερα, σε ατμοσφαιρική πίεση.<sup>[88]</sup>

Ένας εναλλακτικός τρόπος ξήρανσης με αδρανές αέριο επιτυγχάνεται μέσω ενός φυσητήρα αδρανούς αερίου (χωρίς καύση) που παρέχει αέρα, ο οποίος στη συνέχεια τροφοδοτείται σε έναν ξηραντήρα ψυγείου που κάνει χρήση κάποιου είδους ψυκτικού. Ο αέρας λοιπόν ψύχεται και οι υδρατμοί συμπυκνώνονται και αποστραγγίζονται. Ο αέρας που εξέρχεται από τον ξηραντήρα είναι κατά συνέπεια, κορεσμένος σε χαμηλότερο σημείο δρόσου, το οποίο μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με διοξείδιο του πυριτίου μετά την ξήρανση. Στη συνέχεια ο αέρας μπορεί να θερμανθεί σε συνθήκες περιβάλλοντος μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, και να επιστραφεί στις δεξαμενές. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις δεξαμενές και τις σωληνώσεις, μέχρι το σημείο δρόσου του περιεχομένου της δεξαμενής είναι κατάλληλο για τις διαδικασίες φόρτωσης.<sup>[88]</sup>

### 5.3.2 Αδρανοποίηση

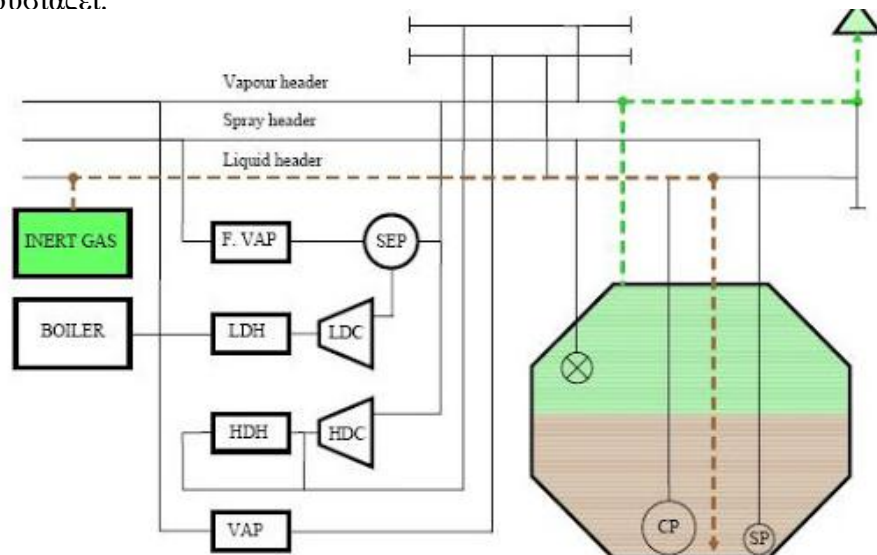
Η αδρανοποίηση των δεξαμενών αποθήκευσης, των μηχανημάτων του συστήματος φορτίου και των σωληνώσεων πραγματοποιείται αμέσως μετά την διαδικασία ξήρανσης και εκτελείται πρωτίστως για να εξασφαλιστούν μη εύφλεκτες συνθήκες κατά την επακόλουθη φόρτωση με αέριο φορτίο. Η γεννήτρια αδρανούς αερίου που βρίσκεται στο πλοίο, χρησιμοποιείται σε όλες τις δεξαμενές φορτίου για να μειώσει το επίπεδο οξυγόνου σε μια τυπική τιμή 2% και το σημείο δρόσου στους  $-45^{\circ}\text{C}$ . Η μείωση αυτή του οξυγόνου εξυπηρετεί και την αποφυγή χημικής αντίδρασης με τους εισερχόμενους ατμούς του LNG, η οποία για ορισμένα αντιδραστικά χημικά αέρια, όπως χλωριούχο βινύλιο ή βουταδιένιο σε υψηλά επίπεδα οξυγόνου μπορεί να λάβει χώρα.<sup>[88]</sup> Το αδρανές αέριο οδηγείται στον πυθμένα της δεξαμενής μέσω της γραμμής πλήρωσης υγρού και ο εκτοπισμένος αέρας εξαερώνεται στην ατμόσφαιρα μέσω της γραμμής ατμού και του στύλου εξαερισμού, στην κορυφή της δεξαμενής.<sup>[45]</sup> Γενικά υπάρχουν δύο διαδικασίες που

μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αδρανοποίηση των δεξαμενών: αδρανοποίηση με μετατόπιση και αραίωση.

Η αδρανοποίηση με μετατόπιση, βασίζεται στη διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας της δεξαμενής φορτίου, δηλαδή στις διαφορετικές πυκνότητες ατμών μεταξύ του αερίου που εισέρχεται στη δεξαμενή και του αερίου που βρίσκεται ήδη σε αυτήν. Το βαρύτερο αέριο εισάγεται κάτω από το ελαφρύτερο αέριο σε χαμηλή ταχύτητα για να ελαχιστοποιηθεί η αναταραχή. Εάν υπάρχει καλή διαστρωμάτωση με ελάχιστη ανάμειξη στην διεπιφάνεια, τότε μόνο ένας όγκος δεξαμενής των εισερχόμενων αδρανών αερίων είναι επαρκής για να αλλάξει την ατμόσφαιρα. Στην πράξη συμβαίνει ανάμειξη και για αυτό είναι απαραίτητη η χρήση περισσότερων όγκων δεξαμενών αδρανούς αερίου. Το ποσό αυτό μπορεί να ποικίλει έως και τέσσερις φορές τον όγκο της δεξαμενής, ανάλογα τη σχετική πυκνότητα των αερίων μαζί με τη διαμόρφωση της δεξαμενής και των αγωγών. Η αδρανοποίηση με μετατόπιση είναι μια οικονομική διαδικασία, καθώς χρησιμοποιεί την μικρότερη ποσότητα αδρανούς αερίου και διαρκεί σύντομο χρόνο. Ωστόσο είναι πρακτικό, μόνο όταν η ανάμειξη με τους αρχικούς ατμούς της δεξαμενής είναι περιορισμένη.<sup>[88]</sup>

Όταν αδρανοποιείται μια δεξαμενή με τη μέθοδο της αραίωσης, το εισερχόμενο αδρανές αέριο αναμιγνύεται μέσω στροβιλισμού με το αέριο που υπάρχει ήδη στην δεξαμενή. Η μέθοδος αυτή μπορεί να διεξαχθεί είτε με αραίωση με επανειλημμένη πίεση, κυρίως στις δεξαμενές τύπου C, είτε με συνεχή αραίωση, στις δεξαμενές τύπου A και η αποτελεσματικότητα της βασίζεται στην γρήγορη και τυρβώδη είσοδο το αδρανούς αερίου.<sup>[88]</sup>

Το αδρανές αέριο λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ποικίλους τρόπους για την επίτευξη της αδρανοποίησης των δεξαμενών, από τους οποίους ο κατάλληλος, εξαρτάται από τον σχεδιασμό του δεξαμενοπλοίου και τις διαφορές πυκνότητας. Είναι σημαντικό να παρακολουθείται η συγκέντρωση του οξυγόνου σε κάθε δεξαμενή, ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η πρόοδος της αδρανοποίησης, καθώς και η βεβαιότητα ότι ολόκληρο το σύστημα φορτίου είναι επαρκώς αδρανές. Εκτός όμως από τη χρήση της γεννήτριας αδρανούς αερίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αέριο άζωτο για την διαδικασία της αδρανοποίησης, παρόλο που προτιμάται κυρίως στην μεταφορά χημικών αερίων όπως χλωριούχο βινύλιο και βουταδιένιο και στη μεταφορά αμμωνίας.<sup>[88]</sup> Το υγρό άζωτο τροφοδοτείται από τον χειρσαίο τερματικό σταθμό LNG και μεταφέρεται μέσω της πολλαπλής του πλοίου στον εξατμιστήρα LNG. Στη συνέχεια το αέριο άζωτο εισάγεται στις δεξαμενές αποθήκευσης, μέσω των δοχείων ατμού που βρίσκονται στην κορυφή τους και ο υγρός αέρας εξάγεται από τον πυθμένα τους, μέσω της γραμμής πλήρωσης από την βαλβίδα εξαερισμού.<sup>[98]</sup> Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι το υψηλό κόστος που παρουσιάζει.<sup>[88]</sup>



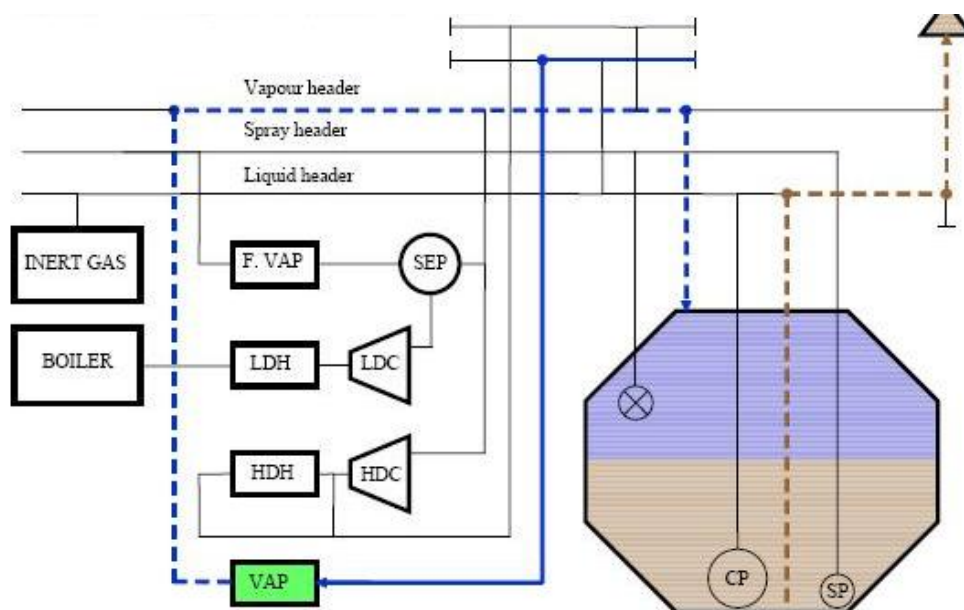
**Εικόνα 39:** Διαδικασία αδρανοποίησης δεξαμενών αποθήκευσης LNG<sup>[45]</sup>



### 5.3.3 Καθαρισμός

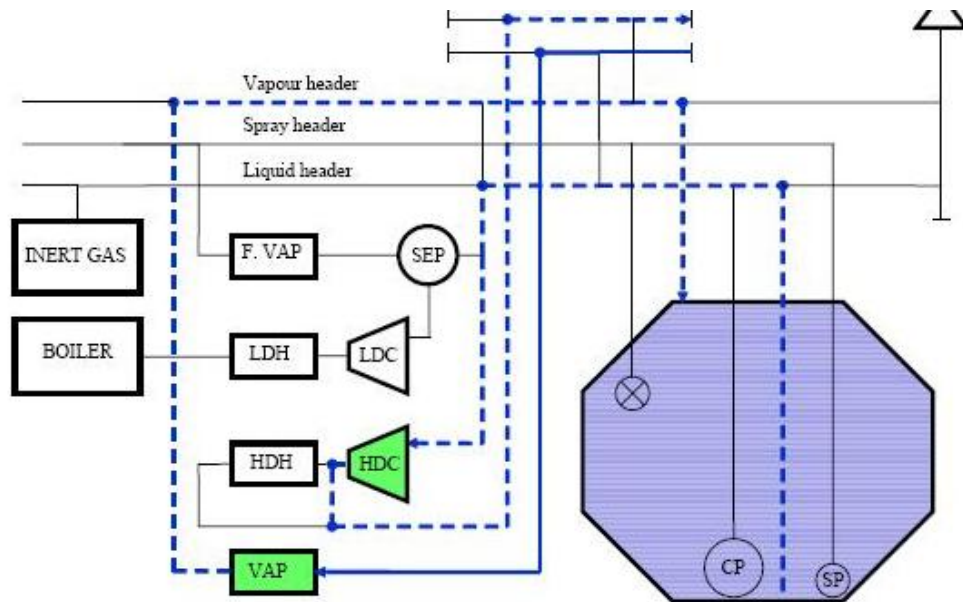
Αφού οι δεξαμενές αποθήκευσης έχουν αδρανοποιηθεί, καθαρίζονται με ζεστούς ατμούς LNG, ώστε να απομακρυνθούν τα αέρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία θα μπορούσαν να παγώσουν στις κρυογονικές θερμοκρασίες του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου και να δημιουργήσουν προβλήματα. Η διαδικασία του καθαρισμού πραγματοποιείται όταν η αδρανοποίηση που έχει προηγηθεί, γίνεται με αδρανές αέριο, γιατί αυτό είναι που περιέχει διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο παγώνει σε θερμοκρασία  $-60^{\circ}\text{C}$  και δημιουργεί μια λευκή σκόνη που μπορεί να φράξει βαλβίδες, φίλτρα και ακροφύσια. Το υγρό LNG φορτώνεται από τον χερσαίο τερματικό σταθμό, μέσω της γραμμής ψεκασμού, στον εξατμιστήρα LNG του πλοίου και στη συνέχεια εισάγεται μέσω της γραμμής του ατμού, από την κορυφή κάθε δεξαμενής από το δοχείο ατμού, σε κατάσταση θερμού ατμού στους  $20-25^{\circ}\text{C}$ . Αυτό δημιουργεί μια διεπιφάνεια στη δεξαμενή, μεταξύ του ατμού LNG και του αδρανούς αερίου το οποίο ως βαρύτερο αποβάλλεται από τον χώρο με μετατόπιση μέσω των γραμμών φόρτωσης υγρού, και στη συνέχεια εξαερίζεται στην ατμόσφαιρα. Η λειτουργία συνεχίζεται μέχρις ότου επιτευχθεί μια ανάγνωση αερίου με περιεκτικότητα 5% σε μεθάνιο στην βαλβίδα εξαερισμού, και όταν συμβεί αυτό οι υψηλής πίεσης συμπιεστές παρατάσσονται ώστε να μεταφέρουν τον ατμό στην ξηρά. Παρόλα αυτά είναι καλύτερα οι συμπιεστές να μην χρησιμοποιηθούν, ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση τυρβώδους ροής στην δεξαμενή.<sup>[98]</sup> Η διαδικασία του καθαρισμού θεωρείται πλήρης όταν η περιεκτικότητα σε μεθάνιο υπερβαίνει το 88% της δεξαμενής (σημείωση: το LNG αποτελείται από περίπου 95% μεθάνιο) και η περιεκτικότητα σε άζωτο ή αδρανές αέριο είναι μικρότερη ή ίση του 1%.<sup>[88]</sup>

Υπάρχουν εξαιρετικές περιπτώσεις όπου απαιτείται ο καθαρισμός μίας ή περισσότερων δεξαμενών στη θάλασσα, με χρήση του υγρού LNG που υπάρχει στο πλοίο. Στην περίπτωση αυτή το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο θα τροφοδοτηθεί στον εξατμιστήρα, μέσω της γραμμής ψεκασμού με χρήση της αντλίας ψεκασμού που βρίσκεται στον πυθμένα της δεξαμενής και περιέχει υγρό LNG. Λόγω όμως τοπικών κανονισμών για τον εξαερισμό του μεθανίου στην ατμόσφαιρα, μερικές λιμενικές αρχές απαιτούν ολόκληρη τη διαδικασία να πραγματοποιείται με μεταφορά των καυσαερίων σε χερσαίες εγκαταστάσεις.<sup>[98]</sup>



Εικόνα 40: Διαδικασία καθαρισμού των δεξαμενών LNG<sup>[45]</sup>





Εικόνα 41: Διαδικασία καθαρισμού δεξαμενών LNG με επιστροφή ατμών στην ξηρά<sup>[45]</sup>

### 5.3.4 Ψύξη

Η ψύξη είναι η διαδικασία που φέρνει το σύστημα αποθήκευσης φορτίου σε μια θερμοκρασία που δεν προκαλεί υπερβολική δημιουργία boil-off gas κατά τη φόρτωση και αποτρέπει το θερμικό σοκ στο πρωτεύον σύστημα συγκράτησης. Εκτός από την ψύξη των δεξαμενών αποθήκευσης, που μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε εν πλω είτε στο λιμάνι, απαιτείται και η ψύξη των γραμμών μεταφοράς που μπορεί να λάβει χώρα μόνο μετά τον ελλιμενισμό του πλοίου στον χερσαίο τερματικό σταθμό. Η λειτουργία της ψύξης επιτυγχάνεται με την εισαγωγή LNG, το οποίο τροφοδοτείται από τον χερσαίο τερματικό σταθμό στην πολλαπλή ψύξης στο κατάστρωμα του πλοίου ή στις γραμμές φόρτωσης, και τελικά ψύχει όλα τα δίκτυα στην κορυφή κάθε δεξαμενής μέσω της γραμμής ψεκασμού στην οποία και ψύχεται. Το ποσό LNG που απαιτείται, εξαρτάται από την επιφάνεια που πρόκειται να ψυχθεί. Στα δεξαμενόπλοια με δεξαμενές μεμβράνης η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί μια θερμοκρασία περίπου  $-130^{\circ}\text{C}$ , ενώ στα δεξαμενόπλοια με σφαιρικές δεξαμενές μέχρι μια θερμοκρασία  $-115^{\circ}\text{C}$ .<sup>[88]</sup>

Οι κύριοι λόγοι για την ψύξη των γραμμών φορτίου είναι οι εξής: (α) η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας δημιουργίας διαρροής στις αρθρώσεις με βαλβίδες ή σε άλλα τμήματα του αγωγού καθώς συστέλλονται όταν μεταφέρεται το φορτίο, (β) η μείωση της πιθανότητας ξαφνικών φορτίων κλονισμού στους φουσητήρες, καθώς οι σωλήνες συστέλλονται γρήγορα και (γ) η αποφυγή σχηματισμού φραγμάτων ατμού κατά την εισαγωγή του φορτίου. Συγκεκριμένα, αν το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο εισάγεται σε έναν ζεστό αγωγό, το αρχικό φορτίο θα εξατμιστεί δημιουργώντας μεγάλη πίεση που μπορεί να εμποδίσει τη φόρτωση του υγρού. Τότε ο ατμός θα συμπυκνωθεί πολύ γρήγορα, καθώς η θερμοκρασία μειώνεται κάτω από το σημείο συμπύκνωσης, επιτρέποντας στο υγρό να βυθιστεί κατά μήκος του αγωγού προκαλώντας βλάβη στους αγωγούς, τις βαλβίδες και τις συνδέσεις.<sup>[88]</sup>

Ο ρυθμός ψύξης εξαρτάται από τον σχεδιασμό του συστήματος συγκράτησης φορτίου, αλλά τυπικά είναι αργός και κυμαίνεται περίπου σε  $10^{\circ}\text{C}$  ανά ώρα, ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική πίεση στον πύργο αντλίας, και ώστε να παραμείνει εντός της ικανότητας του συστήματος αδρανούς αερίου και έτσι να διατηρούνται οι πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χώροι μόνωσης

στις απαιτούμενες θερμοκρασίες.<sup>[88]</sup> Ο ατμός που δημιουργείται στις δεξαμενές κατά την διαδικασία αυτή, πρέπει να επιστραφεί μέσω των συμπιεστών και την πολλαπλή ατμού στον τερματικό σταθμό, ή να διαχειριστεί με το σύστημα επανυγροποίησης του πλοίου.<sup>[98]</sup> Η ψύξη συνεχίζεται μέχρι το boil-off gas ελαχιστοποιηθεί και αρχίσει να δημιουργείται υγρό στον πυθμένα της δεξαμενής.<sup>[89]</sup> Όταν πλησιάζει η ολοκλήρωση της ψύξης της δεξαμενής, τότε ψύχονται οι πολλαπλές διανομής υγρού, οι γραμμές υγρού και οι γραμμές φόρτωσης.<sup>[90]</sup>

Πριν από την έναρξη των εργασιών φόρτωσης πρέπει να ακολουθηθούν όλες οι προ-λειτουργικές διαδικασίες πλοίου/τερματικού σταθμού. Μία «κουρτίνα» νερού πρέπει να λειτουργεί πριν την σύνδεση των βραχιόνων και να παραμένει σε λειτουργία μέχρι και την αποσύνδεση, και χρησιμοποιείται στην περιοχή των απολήξεων για προστασία της γάστρας του πλοίου, λόγω της διαβρωτικότητας που εμφανίζει το LNG. Όταν ολοκληρωθούν όλες οι αρχικές διαδικασίες, η αρχική φόρτωση μπορεί να ξεκινήσει, και δεν διαφέρει από τη διαδικασία της φόρτωσης που πραγματοποιείται σε κάποιο ταξίδι του πλοίου.<sup>[88]</sup>



**Εικόνα 42:** Ροή νερού κάτω από τους σωλήνες για αποφυγή ζημιάς του πλοίου σε περίπτωση διαρροής LNG<sup>[92]</sup>

## 5.4 Διαδικασία φόρτωσης εκτός του πρώτου ταξιδιού

### Ψύξη γραμμών και δεξαμενών

Στην περίπτωση που το δεξαμενόπλοιο LNG δεν εκτελεί το πρώτο του ταξίδι, τότε οι διαδικασίες ξήρανσης, αδρανοποίησης και καθαρισμού δεν πραγματοποιούνται. Πριν την άφιξη του πλοίου στον χερσαίο τερματικό σταθμό LNG, είναι απαραίτητη η προετοιμασία των δεξαμενών και των γραμμών φόρτωσης. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η ψύξη των δεξαμενών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε εν πλω είτε στο λιμάνι, ενώ η ψύξη των γραμμών φόρτωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μετά τον ελλιμενισμό του πλοίου.<sup>[53]</sup>

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις προετοιμασίας των δεξαμενών αποθήκευσης για φόρτωση. Η πρώτη σχετίζεται με την διαδικασία ψύξης με υπάρχον υγρό σε κάποια από τις δεξαμενές εν πλω και η δεύτερη με την διαδικασία ψύξης χωρίς υγρό στις δεξαμενές. Στην πρώτη περίπτωση το πάγωμα των δεξαμενών μπορεί να πραγματοποιηθεί από το ίδιο το πλοίο, εφόσον βέβαια η ποσότητα του

κρατημένου φορτίου σε κάποια από τις δεξαμενές του πλοίου είναι επαρκής. Αναλόγως την ταχύτητα του πλοίου, η ψύξη συνήθως ξεκινά 3 με 5 μέρες πριν την άφιξη στον χερσαίο τερματικό σταθμό LNG, ώστε να προλαβαίνουν οι μηχανές του πλοίου να καταναλώνουν την περίσσεια πίεσης που δημιουργείται στις δεξαμενές κατά τη διάρκεια της ψύξης (καύση boil-off gas). Ο επιθυμητός μέσος όρος θερμοκρασίας των δεξαμενών, ώστε αυτές να είναι έτοιμες να δεχθούν φορτίο, είναι τουλάχιστον  $-135^{\circ}\text{C}$ . Στη συνέχεια η ψύξη των γραμμών πραγματοποιείται στο λιμάνι.<sup>[53]</sup>

Στην δεύτερη περίπτωση, η ψύξη τόσο των δεξαμενών όσο και των γραμμών φορτίου πραγματοποιείται στον χερσαίο τερματικό σταθμό. Ο τερματικός σταθμός LNG πρέπει να ενημερωθεί, ώστε να ξεκινήσει η άντληση με αργό ρυθμό για περίπου 15 λεπτά, προκειμένου να ψυχθούν σταδιακά οι σωληνώσεις του τερματικού σταθμού, αλλά και οι κεφαλές του πλοίου. Η ταχύτητα άντλησης αυξάνεται αργά μέχρι να ολοκληρωθεί η ψύξη της γραμμής υγρού και της γραμμής ψεκασμού, που διαρκεί περίπου 15 με 20 λεπτά. Η πίεση των δεξαμενών αποθήκευσης πρέπει να ελέγχεται συνεχώς και αν απαιτείται ο συμπιεστής υψηλής πίεσης θα πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα, ώστε να διατηρείται σταθερή η πίεση των ατμών. Για να αποφευχθεί η πιθανότητα απόσπασης τμημάτων σωλήνων, περισσότερο στο κάτω μέρος απ'ότι στην κορυφή, προκαλώντας έτσι φλάντζες και τμήματα μεγάλου μήκους σωλήνων να αναπτύξουν μεγάλη πίεση, η γραμμή υγρού και οι απολήξεις πρέπει να ψυχθούν και να γεμίσουν όσο το δυνατόν ταχύτερα.<sup>[88]</sup> Οι γραμμές είναι έτοιμες να δεχθούν υγρό LNG μόνο όταν η θερμοκρασία τους είναι από  $-150^{\circ}\text{C}$  και κάτω, ενώ η δεξαμενή αποθήκευσης πρέπει να φτάσει στους  $-135^{\circ}\text{C}$ .<sup>[53]</sup>

### Καθαρισμός των βραχιόνων φόρτωσης

Μετά τη σύνδεση των βραχιόνων φόρτωσης, ο αέρας σε αυτούς, καθώς και στις άκρες των σωλήνων πολλαπλής εισαγωγής στο κατάστρωμα του πλοίου, πρέπει να καθαριστεί. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η αποφυγή σχηματισμού πάγου και υγρασίας κατά την διαδικασία της ψύξης που ακολουθεί, λόγω των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών. Αέριο άζωτο οδηγείται στους βραχίονες από τις γραμμές έγχυσης που συνδέονται σε αυτούς, και στη συνέχεια η πίεση αυξάνεται περίπου στα 2 bar. Μετά τη συμπίεση, η βαλβίδα εξαερισμού της πολλαπλής υγρού και η βαλβίδα αποστράγγισης της πολλαπλής ατμού του πλοίου ανοίγουν, για να απελευθερώσουν αέριο άζωτο και αέρα στην ατμόσφαιρα.<sup>[45]</sup> Ενώ η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται δύο ή τρεις φορές, ταυτόχρονα διεξάγεται μια δοκιμή διαρροής (leak test) με διάλυμα σαπουνιού, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχει διαρροή μεταξύ των αγωγών συνδέσεως πλοίου/σταθμού στον χώρο των απολήξεων.<sup>[53]</sup> Η διαδικασία του καθαρισμού του αέρα στους βραχίονες φόρτωσης ολοκληρώνεται, όταν το περιεχόμενο οξυγόνο στον καθαρισμένο αέρα σημειώνεται μικρότερο από 2%.<sup>[45]</sup>

### Ψύξη των βραχιόνων φόρτωσης

Η ψύξη των βραχιόνων φόρτωσης πραγματοποιείται από την πλευρά της ακτής, χρησιμοποιώντας μια αντλία μικρής χωρητικότητας. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, στη διαδικασία της εκφόρτωσης η ψύξη τους πραγματοποιείται με αποστολή του LNG από την αντλία ψεκασμού του πλοίου. Το πλοίο θα προετοιμάσει για ψύξη όλες τις γραμμές, τις απολήξεις, τις διακλαδώσεις και τις γραμμές ψεκασμού και ο τερματικός σταθμός θα ξεκινήσει βαθμιαία την ψύξη των γραμμών στην προβλήτα και στη συνέχεια στο πλοίο. Όταν η γραμμή υγρού του πλοίου βρίσκεται σε θερμοκρασία περίπου  $-157^{\circ}\text{C}$ , οι βαλβίδες φόρτωσης της δεξαμενής μετά την επιβεβαίωση του τερματικού σταθμού πρέπει να έτοιμες να αρχίσουν την φόρτωση.<sup>[88]</sup>

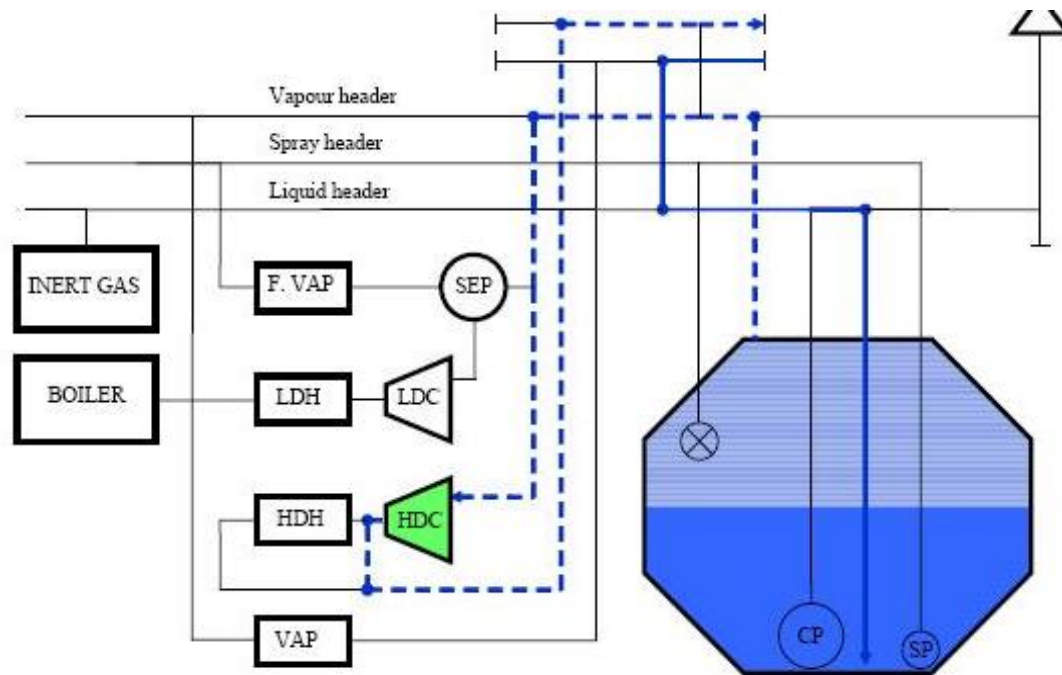


**Εικόνα 43: Ψύξη βραχίονα φόρτωσης<sup>[91]</sup>**

## Φόρτωση

Αφού ολοκληρωθεί και η διαδικασία της ψύξης, το πλοίο είναι έτοιμο να φορτώσει Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο. Όλες οι δεξαμενές αποθήκευσης φορτώνονται ταυτόχρονα, ενώ παράλληλα η διαδικασία του αφερματισμού λαμβάνει χώρα. Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο μεταφέρεται μέσω των απολήξεων φόρτωσης του πλοίου στην γραμμή υγρού και έπειτα σε κάθε γραμμή πλήρωσης στον πυθμένα της δεξαμενής, με τη βοήθεια αντλιών που βρίσκονται στην ξηρά. Ο εκτοπισμένος ατμός και το boil-off gas εξάγονται από κάθε δεξαμενή μέσω του τμήματος της αναρρόφησης των ατμών, στην γραμμή του ατμού. Ο ατμός αρχικά ελευθερώνεται προς την ακτή μέσω των διασταυρώσεων των ατμών και της πολλαπλής, και καθώς αυξάνεται η πίεση της δεξαμενής, ένας συμπιεστής του πλοίου τίθεται σε λειτουργία για να αυξήσει την ροή του αερίου προς την ακτή και να περιορίσει την πίεση στην δεξαμενή.<sup>[88]</sup> Οι λόγοι για τους οποίους η πίεση της δεξαμενής αποθήκευσης αυξάνεται είναι οι εξής: (α) η πίεση των ατμών του «ζεστού» φορτίου, (β) η μετατόπιση των ατμών από το εισερχόμενο υγρό, (γ) η δημιουργία ατμού λόγω της μεταφοράς θερμότητας από τους τοίχους της δεξαμενής στο υγρό και (δ) η δημιουργία ατμού λόγω μεταφοράς θερμότητας από τους αγωγούς του πλοίου και του τερματικού σταθμού και τις αντλίες του σταθμού.<sup>[49]</sup> Δεδομένου ότι ο ατμός δεν εξαερίζεται στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της φόρτωσης, η διαδικασία αυτή αναφέρεται συχνά ως κλειστός κύκλος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αντί της γραμμής επιστροφής ατμού, χρησιμοποιείται το σύστημα επανυγροποίησης του πλοίου για τη διαχείριση του boil-off gas (αν υπάρχει) και έτσι του ελέγχου της πίεσης στις δεξαμενές. Οι ρυθμοί φόρτωσης σε αυτήν την περίπτωση όμως, είναι περιορισμένοι από την χωρητικότητα του συστήματος και επίσης η απαιτούμενη ισχύς και η αντιστάθμιση της ενέργειας άντλησης και της ροής θερμότητας μέσω της μόνωσης, αφήνουν μικρή χωρητικότητα για ψύξη του φορτίου. Όπως λοιπόν αυξάνεται ο ρυθμός φόρτωσης, είναι σημαντικός ο έλεγχος και η παρακολούθηση των πιέσεων καθώς και η έναρξη της λειτουργίας των συμπιεστών. Αν οι συμπιεστές δεν είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν στην ποσότητα του boil-off gas, η μείωση του ρυθμού φόρτωσης είναι απαραίτητη.<sup>[88]</sup>





**Εικόνα 44:** Διαδικασία φόρτωσης των δεξαμενών αποθήκευσης του πλοίου, με επιστροφή ατμών στην ξηρά<sup>[45]</sup>

Η φόρτωση ξεκινάει με πολύ αργό ρυθμό, περίπου  $1000\text{m}^3$ , ώστε να βεβαιωθεί ότι δεν υπάρχουν διαρροές στις γραμμές φορτώσεως, ότι δεν έχει ξεχαστεί κάποια βαλβίδα ανοιχτή και γενικά ότι όλα λειτουργούν σωστά. Αφού ελεγχθεί και η ομαλή λειτουργία της γεννήτριας αζώτου, η οποία κατά την ολοκλήρωση της ψύξης και την έναρξη της φόρτωσης, προμηθεύει με άζωτο τους χώρους μόνωσης ώστε να διατηρεί θετική την πίεση τους, για τυχόν διαρροές στα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα φράγματα, ο ρυθμός σταδιακά αυξάνεται κάθε δέκα λεπτά, μέχρις ότου φτάσει το μέγιστο ρυθμό φόρτωσης.<sup>[53]</sup> Η διαδικασία της φόρτωσης έχει ολοκληρωθεί, όταν οι δεξαμενές είναι γεμάτες μέχρι την επιθυμητή τιμή και στο σημείο αυτό ο ρυθμός φόρτωσης αρχίζει να μειώνεται σταδιακά, μέχρι το χαμηλότερο ρυθμό φόρτωσης. Οι δεξαμενές μεμβράνης συνήθως γεμίζουν έως το 98%, ενώ οι σφαιρικές δεξαμενές μέχρι το 99,5% κατ'όγκο και το μικρό ποσοστό που απομένει, βοηθάει στο να αποφευχθεί οποιαδήποτε είσοδος υγρού στους αγωγούς εξαερισμού και γενικά οποιαδήποτε διαρροή.<sup>[88]</sup>

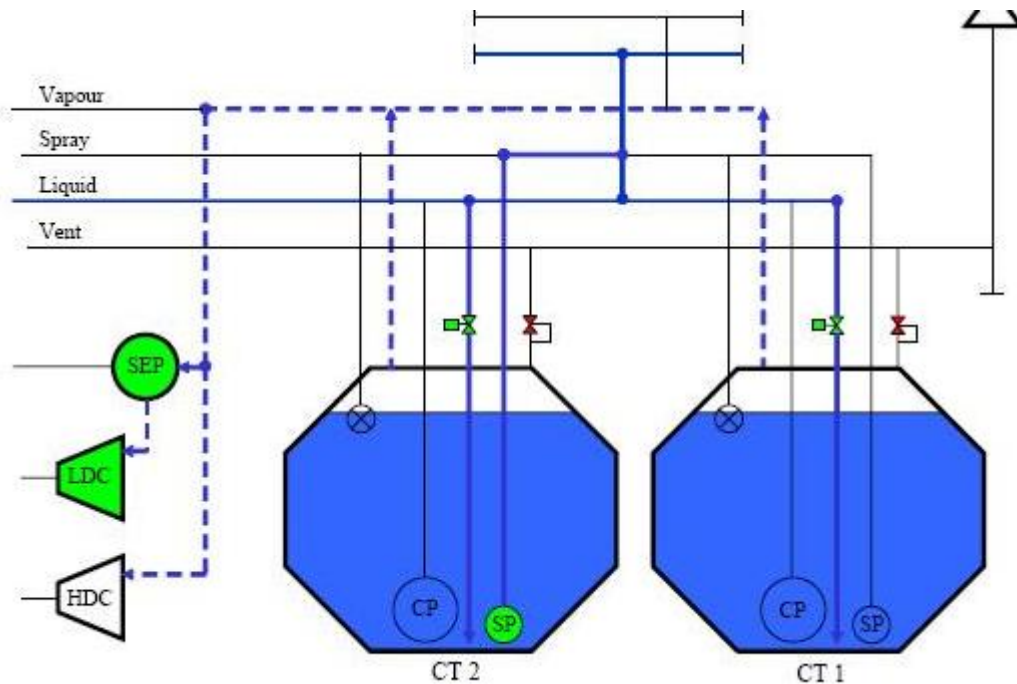
### Αποστράγγιση

Είναι σημαντικό στο τελευταίο στάδιο που φορτώνεται και η τελευταία δεξαμενή, να γίνει αποστράγγιση των γραμμών, οπότε είναι απαραίτητη η ύπαρξη διαθέσιμου χώρου μέσα στην δεξαμενή αποθήκευσης.<sup>[53]</sup> Το υγρό υπόλειμμα μπορεί να καθαριστεί είτε «φυσώντας» στην ξηρά με ατμούς χρησιμοποιώντας τον συμπιεστή του πλοίου, είτε με ένεση αζώτου πίεσης 5 bar στον βραχίονα φόρτωσης ώστε να μεταφερθεί στις δεξαμενές του πλοίου. Αφού οι αγωγοί καθαριστούν και αποσυμπιεστούν, οι βαλβίδες πολλαπλής κλείνουν και οι βραχίονες αποσυνδέονται από τις φλάντζες των απολήξεων. Σε αρκετά λιμάνια πριν γίνει αποσύνδεση, απαιτείται ο καθαρισμός με αέρα των αγωγών, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία εύφλεκτων ατμών.<sup>[88]</sup> Αρχικά αποσυνδέονται οι βραχίονες φόρτωσης του υγρού από τις απολήξεις του πλοίου, και μόνο όταν πραγματοποιηθεί έναρξη του συστήματος καύσης του αερίου στο πλοίο, τότε αποσυνδέεται και ο βραχίονας επιστροφής ατμού.<sup>[53]</sup> Συνήθως ο πάγος που έχει σχηματιστεί, λόγω των κρυογονικών θερμοκρασιών του LNG, στις σωληνώσεις ξεπλένεται με νερό.<sup>[92]</sup>

## 5.5 Διαδικασία εκφόρτωσης

### Ψύξη γραμμών εκφόρτωσης

Στην περίπτωση που ένα πλοίο LNG θέλει να εκφορτώσει σε έναν χερσαίο τερματικό σταθμό, πριν τον ελλιμενισμό του πλοίου στο λιμάνι, απαιτείται να έχει προηγηθεί η ψύξη των γραμμών του πλοίου εν πλω, με το ήδη υπάρχον φορτίο που διαθέτει. Η ψύξη πραγματοποιείται περίπου 18 ώρες πριν την άφιξη στον χερσαίο τερματικό σταθμό LNG και οι γραμμές θεωρούνται έτοιμες στην συμμετοχή της εκφόρτωσης, όταν βρίσκονται σε θερμοκρασία κάτω των  $-150^{\circ}\text{C}$ .<sup>[53]</sup> Η ψύξη της γραμμής του υγρού πραγματοποιείται με χρήση της αντλίας ψεκασμού μιας δεξαμενής, η οποία μεταφέρει το LNG από τον πυθμένα της δεξαμενής, μέσω της γραμμής ψεκασμού στην πολλαπλή του υγρού. Η ποσότητα του ατμού που εκτοπίζεται από τις διασταυρωμένες σωληνώσεις, περνά μέσα από τη γραμμή του υγρού πίσω στις δεξαμενές, μέσω της γραμμής πλήρωσης ή καταλήγει στο μηχανοστάσιο όπου και χρησιμοποιείται όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο ως καύσιμο.<sup>[98]</sup>



**Εικόνα 45:** Ψύξη γραμμών πλοίου πριν την άφιξη στον τερματικό σταθμό για εκφόρτωση<sup>[45]</sup>

### Καθαρισμός των βραχιόνων εκφόρτωσης

Μετά τον ελλιμενισμό του πλοίου, την ασφαλή πρόσδεσή του, τη σύνδεση των καλωδίων γείωσης και την πραγματοποίηση των προ-λειτουργικών διαδικασιών, που εξασφαλίζουν την ασφάλεια της διαδικασίας, οι βραχιόνες εκφόρτωσης συνδέονται με τις πολλαπλές του πλοίου. Στη συνέχεια ακολουθεί ο καθαρισμός τους με αέρα και η συμπίεσή τους με αέριο άζωτο, το οποίο τροφοδοτείται από την ξηρά, για να εξαφανιστούν τυχόν ίχνη οξυγόνου, του οποίου η περιεκτικότητα πρέπει να είναι μικρότερη από 3%, και υγρασίας. Σε κάθε βραχίονα σημειώνεται μια πίεση 2 bar και γίνεται χρήση διαλύματος σαπουνιού, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχουν διαρροές.<sup>[88]</sup>

## Ψύξη βραχιόνων εκφόρτωσης

Η διαδικασία ψύξης των βραχιόνων εκφόρτωσης ακολουθεί την διαδικασία του τερματικού σταθμού και πραγματοποιείται με χρήση των αντλιών ψεκασμού στις δεξαμενές του πλοίου ή μιας αντλίας φορτίου σε συνεργασία με τον σταθμό. Το πλοίο ανοίγει την πολλαπλή του στους βραχίονες, η εγκατάσταση τα δύο εξαεριστικά που βρίσκονται σε αυτούς και η βοηθητική αντλία του πλοίου ξεκινά κάνοντας ανακυκλοφορία του υγρού, ψύχοντας τις γραμμές και στη συνέχεια τους βραχίονες εκφόρτωσης, των οποίων η πίεση διατηρείται σταθερή.<sup>[98]</sup> Όταν η θερμοκρασία των βραχιόνων φτάσει τους  $-130^{\circ}\text{C}$  τα εξαεριστικά κλείνουν προς το δοχείο συλλογής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στη μεριά της προβλήτας.<sup>[86]</sup>

## Εκφόρτωση

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι εκφόρτωσης LNG από τα ειδικά δεξαμενόπλοια μεταφοράς στον χερσαίο τερματικό σταθμό LNG: (α) εκφόρτωση με συμπίεση των χώρων ατμών, (β) εκφόρτωση με χρήση ή χωρίς ενισχυτικών αντλιών (booster pumps) και (γ) εκφόρτωση με ενισχυτική αντλία και θερμαντήρα φορτίου. Η πρώτη μέθοδος εφαρμόζεται μόνο σε πλοία που έχουν εγκαταστήσει δεξαμενές τύπου C, ενώ η δεύτερη μέθοδος κατά την οποία η εκφόρτωση LNG πραγματοποιείται από φυγοκεντρικές αντλίες, είτε μόνες τους είτε σε σειρά με ενισχυτικές αντλίες είναι εκείνη που υιοθετείται από τα περισσότερα LNG Carriers.<sup>[89]</sup> Το υγρό αντλείται στην ξηρά με τη βοήθεια των βυθιζόμενων αντλιών που βρίσκονται στον πυθμένα κάθε δεξαμενής του πλοίου. Κατά τη διαδικασία αυτή η πίεση της δεξαμενής παρουσιάζει μια τάση μείωσης, καθώς η στάθμη του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου κατεβαίνει. Αντίθετα η πίεση της δεξαμενής αποθήκευσης LNG του χερσαίου τερματικού σταθμού παρουσιάζει μια αυξανόμενη τάση, με την παραλαβή του φορτίου.<sup>[88]</sup>

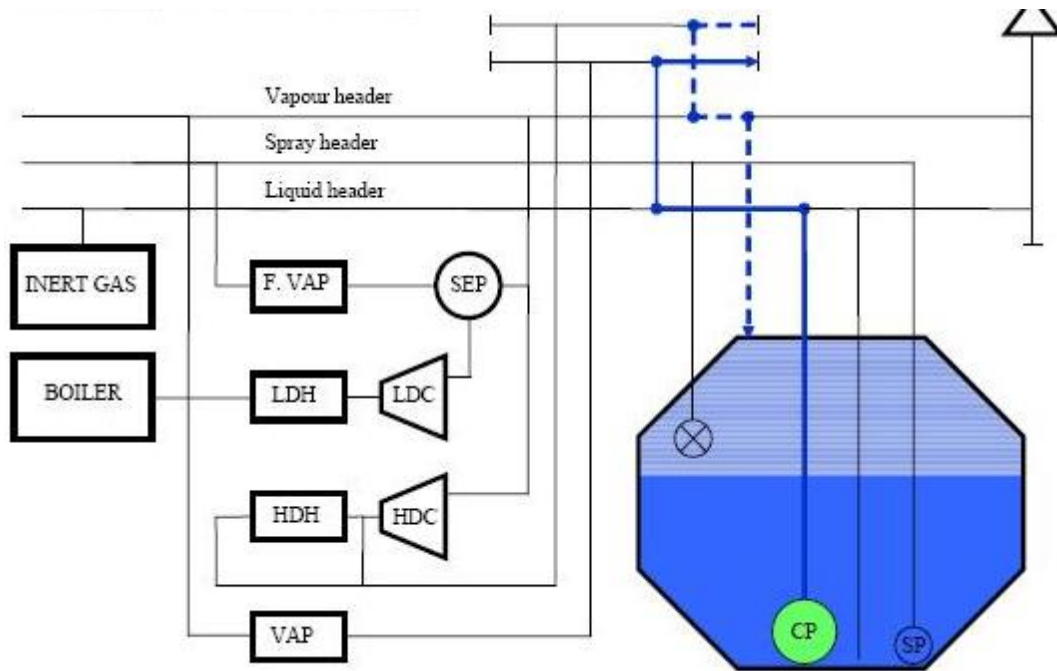
Καθώς το υγρό λοιπόν αντλείται από το δεξαμενόπλοιο και η πίεση των δεξαμενών μειώνεται δημιουργείται boil-off gas. Η ποσότητα του αερίου αυτού είναι ανεπαρκής για να διατηρήσει τις πιέσεις στην δεξαμενή στο αποδεκτό επίπεδο και εξαρτάται από τον ρυθμό εκφόρτωσης, τη θερμοκρασία του φορτίου και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Όταν οι ατμοί αυτοί είναι ανεπαρκείς να εξισορροπήσουν τον ρυθμό απομάκρυνσης του υγρού, είναι απαραίτητο να προστεθούν υδρατμοί στη δεξαμενή.<sup>[88]</sup> Με χρήση λοιπόν αυτής της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δεξαμενών του πλοίου και του τερματικού σταθμού, ένας τρόπος προσθήκης υδρατμών, επιτυγχάνεται με αποστολή του αερίου LNG που δημιουργείται στη δεξαμενή ξηράς, στη δεξαμενή φορτίου του δεξαμενοπλοίου. Ωστόσο όταν το LNG εκφορτώνεται με υψηλότερο ρυθμό, η δεξαμενή του πλοίου παρουσιάζει μια τάση πτώσης πίεσης και ως εκ τούτου το αέριο LNG εξαναγκάζεται να παραμείνει μέσα σε αυτή, μέσω ενός ανεμιστήρα ξηράς, ώστε να διατηρηθεί η πίεση. Με τον τρόπο αυτό διαχείρισης του ατμού κατά τη διαδικασία της εκφόρτωσης, ένα μέρος του φορτίου που παραδίδεται στην ξηρά εξατμίζεται με έναν εξατμιστή του δεξαμενοπλοίου και έτσι μεταφέρεται το boil-off gas πίσω στις δεξαμενές.<sup>[45]</sup>

### 1. Εκφόρτωση με επιστροφή ατμών από την ξηρά

Η συνήθης διαδικασία ξεκινά με την έναρξη των αντλιών σε μια δεξαμενή για ανακυκλοφορία και στη συνέχεια με την έναρξη της εκφόρτωσης από αυτή. Η διαδικασία αυτή διαρκεί περίπου 5 λεπτά και εφαρμόζεται και στις υπόλοιπες δεξαμενές με μια περίοδο 5 λεπτών μεταξύ κάθε δεξαμενής. Όταν όλες οι αντλίες λειτουργούν με φορτίο 60%, στη συνέχεια η ισχύς τους αυξάνεται αργά, μέχρι να φτάσουν το μέγιστο όριο φορτίου. Καθώς η πίεση της δεξαμενής ελαττώνεται, η εγκατάσταση του χερσαίου τερματικού σταθμού ξεκινά την αποστολή ατμού πίσω στο πλοίο, ώστε να επιτευχθεί η διατήρηση της πίεσης στην δεξαμενή στο επίπεδο που έχει



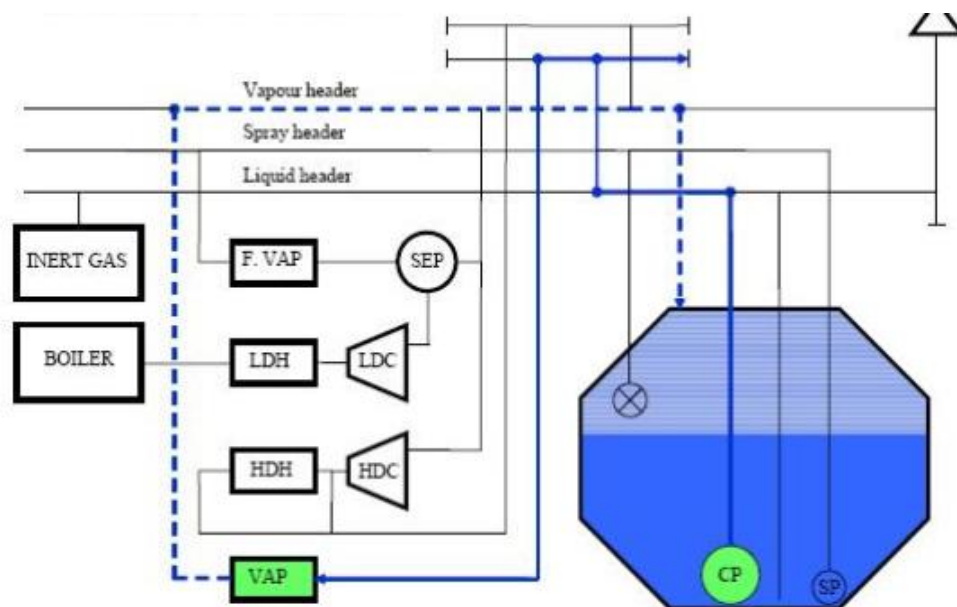
συμφωνηθεί. Κατά τη διαδικασία της εκφόρτωσης παρακολουθείται το επίπεδο της δεξαμενής φορτίου και η πίεσή της, το φορτίο του κινητήρα της αντλίας και η πίεση εκφόρτωσης καθώς και η κατάσταση του πλοίου.



**Εικόνα 46:** Διαδικασία εκφόρτωσης LNG με επιστροφή ατμών<sup>[45]</sup>

## 2. Εκφόρτωση χωρίς επιστροφή ατμών από την ξηρά

Σε σπάνιες περιπτώσεις η εκφόρτωση LNG πραγματοποιείται χωρίς επιστροφή ατμών από την ξηρά, αλλά με χρήση του εξατμιστήρα του ίδιου του πλοίου. Μια ποσότητα του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου που εκφορτώνεται, παρακάμπει την κύρια γραμμή του υγρού και τροφοδοτείται στον εξατμιστήρα.



**Εικόνα 47:** Εκφόρτωση LNG χωρίς επιστροφή ατμών<sup>[45]</sup>

Η εκφόρτωση ξεκινάει με πολύ αργό ρυθμό για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και στην περίπτωση της διαδικασίας φόρτωσης και συνεχίζεται με σταδιακά αυξανόμενο ρυθμό.<sup>[53]</sup> Επίσης ταυτόχρονα λαμβάνει χώρα και η διαδικασία αφερματισμού του πλοίου.

### Αποστράγγιση

Οι διαδικασίες αποστράγγισης και καθαρισμού των πολλαπλών του πλοίου καθώς και των γραμμών υγρού, είναι οι ίδιες είτε το πλοίο φορτώνει LNG είτε εκφορτώνει και πραγματοποιούνται με τη μέθοδο «διάτρησης» του αζώτου. Μετά την ολοκλήρωση της εκφόρτωσης, ο ατμός στον βραχίονα του ατμού, τροφοδοτείται στις δεξαμενές μέσω της γραμμής αερίου, με τη βοήθεια του αερίου αζώτου που δίνεται από τον χειρσαίο τερματικό σταθμό, το οποίο βοηθάει και στην απόψυξη.<sup>[88]</sup> Η αποστράγγιση γίνεται κανονικά με συμπίεση των βραχιόνων, με τη βοήθεια ενός συμπιεστή στην ξηρά και με το άνοιγμα της βαλβίδας παράκαμψης ψεκασμού στην πολλαπλή.<sup>[45]</sup> Αφού επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχει ίχνος αερίου ή υγρού LNG στις γραμμές σύνδεσης, ξεκινά και η αποσύνδεση των βραχιόνων, αρχικά των υγρών και τέλος του ατμού.<sup>[88]</sup> Στο σημείο αυτό το ειδικό δεξαμενόπλοιο διατηρεί την πίεση στις δεξαμενές με την καύση του boil-of gas στις μηχανές.<sup>[90]</sup>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Σενάρια ατυχημάτων κατά τη φορτω-εκφόρτωση LNG από χερσαίο τερματικό σταθμό σε πλοίο και εφαρμογή του λογισμικού ALOHA**

### **6.1 Γραφική ανάλυση σεναρίων ατυχημάτων LNG**

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν τα παρακάτω οκτώ σενάρια ατυχημάτων κατά τη φορτω-εκφόρτωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου από χερσαίο τερματικό σταθμό σε πλοίο και το αντίστροφο.

1. Οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς
2. Ολική διάρρηξη δεξαμενής ξηράς
3. Οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης πλοίου
4. Ολική διάρρηξη δεξαμενής πλοίου
5. Οπή στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG
6. Ολική διάρρηξη βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG
7. Οπή στον βραχίονα επιστροφής ατμών LNG
8. Ολική διάρρηξη βραχίονα επιστροφής ατμών LNG

Τα σενάρια αυτά επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να συνδέονται άμεσα με την διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης LNG και κυρίως με το σύστημα αποθήκευσης φορτίου, που μελετάται λεπτομερώς στην συγκεκριμένη εργασία. Επιπλέον, είναι εκείνα που έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβούν κατά τη μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, όπως παρουσιάζεται και στα επόμενα Υποκεφάλαια και με παραδείγματα.

Η προσομοίωση γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού ALOHA, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για τον σχεδιασμό και την αντιμετώπιση χημικών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, μοντελοποιώντας ποικίλους κινδύνους. Συγκεκριμένα επιτρέπει την εισαγωγή λεπτομερειών σχετικά με μια πραγματική ή πιθανή χημική απελευθέρωση και στη συνέχεια δημιουργεί εκτιμήσεις των ζωνών απειλής για διάφορους τύπους κινδύνων, που μπορούν ακόμη να απεικονιστούν και σε χάρτες. Όπως θα περιγραφεί και παρακάτω, η κόκκινη ζώνη απειλής αντιπροσωπεύει το χειρότερο επίπεδο κινδύνου, και οι πορτοκαλί και κίτρινες ζώνες απειλής περιοχές με μειωμένο κίνδυνο.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια, θα εξεταστεί αρχικά εκείνο που έχει περισσότερες πιθανότητες να συμβεί και περιγράφεται από συγκεκριμένες μεταβλητές σχεδιασμού. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει μια ανάλυση ευαισθησίας, με σκοπό να εξεταστούν οι επιπτώσεις που επιφέρει στο πιθανό σενάριο, η μεταβολή ορισμένων παραμέτρων. Συγκεκριμένα μεταβάλλονται το μέγεθος και το ύψος της οπής που δημιουργείται, η πληρότητα του εξοπλισμού (δεξαμενής ή βραχίονα), η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία αποθήκευσης του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου.

Αξίζει να σημειωθεί πως το υπολογιστικό εργαλείο ALOHA περιέχει μια συγκεκριμένη βιβλιοθήκη χημικών, που περιλαμβάνει φυσικές ιδιότητες και τοξικολογικά δεδομένα για

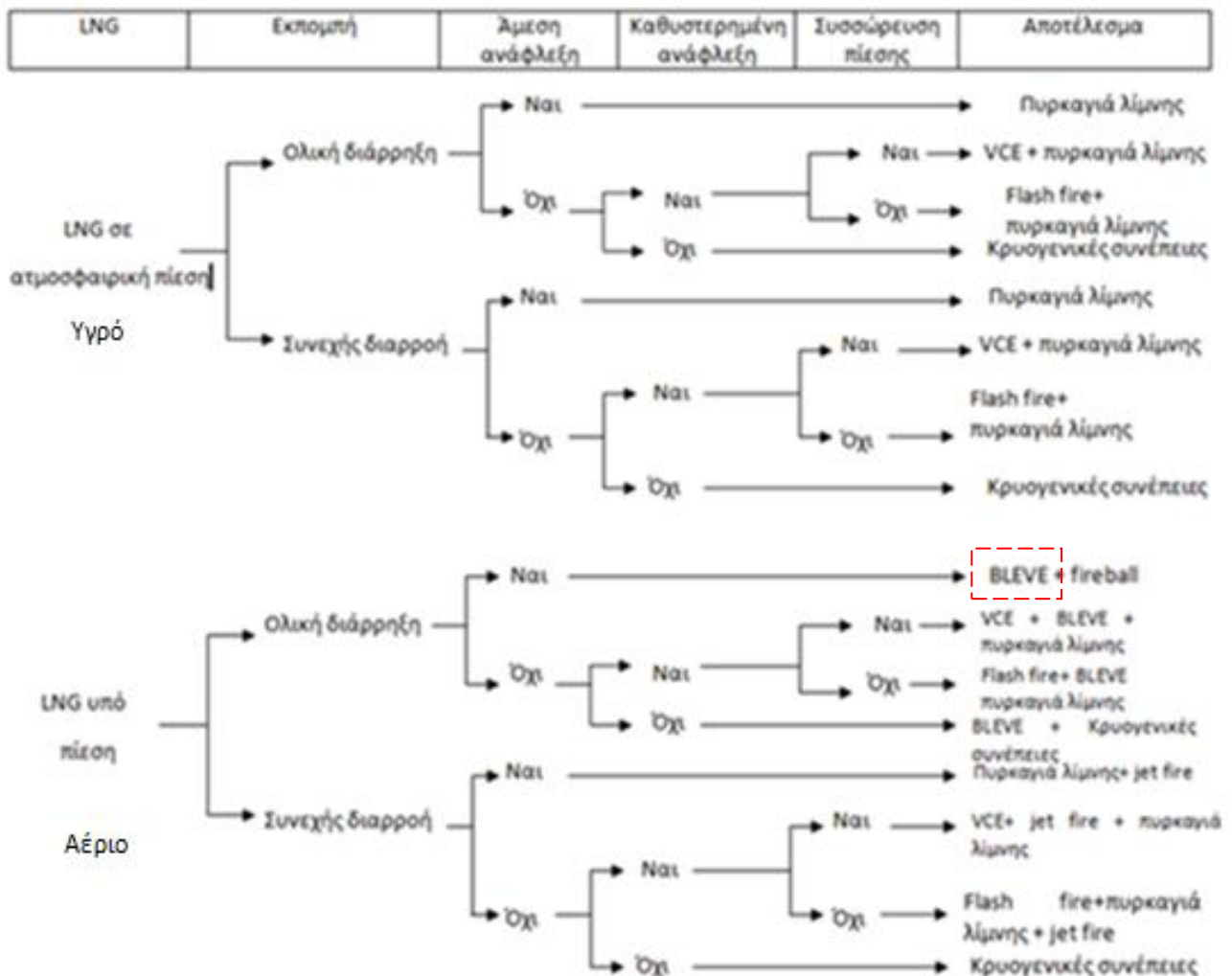
εκατοντάδες καθαρές χημικές ουσίες και μόλις πέντε διαλύματα. Επειδή όμως, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, η ακριβής σύσταση και ιδιότητες του LNG είναι δύσκολο να προσδιοριστούν, γίνεται παραδοχή ότι οι ιδιότητές του ταυτίζονται με αυτές του καθαρού μεθανίου, αφού για τους περισσότερους μηχανολογικούς υπολογισμούς μπορεί να θεωρηθεί ότι οι φυσικές ιδιότητες του καθαρού μεθανίου αντιπροσωπεύουν αυτές του LNG.

Η απώλεια LNG είναι το συνηθέστερο περιστατικό κατά τη διαδικασία φόρτωσης ή εκφόρτωσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, σε/από Υγραεριοφόρο πλοίο και μπορεί να οφείλεται σε αποτυχία των δεξαμενών ή των σωληνώσεων της εγκατάστασης, αλλά και του ίδιου του πλοίου, σε λανθασμένη εκτέλεση κάποιας διαδικασίας, σε λάθος χειρισμό ή βλάβη μηχανήματος, ακόμη και σε περιβαλλοντικά αίτια. Η απώλεια αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μια σειρά τελικών σεναρίων ατυχημάτων, τα οποία όμως εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους, όπως οι ιδιότητες και η φύση του απελευθερωμένου υλικού, η πηγή απελευθέρωσης, η άμεση ή καθυστερημένη ανάφλεξη και η πίεση απελευθέρωσης. Ο κυριότερος κίνδυνος που μπορεί να προκύψει από μια διαρροή ή κηλίδα Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου είναι η πυρκαγιά. Αν το LNG αναφλεγεί παρουσιάζονται 4 πιθανά σενάρια πυρκαγιάς: πυρκαγιά λίμνης (pool fire), jet fire (γλώσσα φωτιάς), ανάφλεξη αερίου νέφους (flash fire) και έκρηξη αερίου νέφους (vapor cloud explosion).

Οι συνέπειες που προκύπτουν από τη διαρροή LNG, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες με βάση την πίεση στην οποία βρίσκεται το συστατικό, ατμοσφαιρική ή υπό πίεση. Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος της εργασίας το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο αποθηκεύεται σε ατμοσφαιρική πίεση στους  $-163^{\circ}\text{C}$ . Στις δεξαμενές του πλοίου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, κατά τη διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης LNG σε χερσαίο τερματικό σταθμό και στην εγκατάσταση του χερσαίου τερματικού σταθμού όμως, δημιουργείται το boil-off gas, το αέριο που προκύπτει από τον βρασμό του LNG. Στον τελευταίο υπάρχουν τρεις συγκεκριμένες περιοχές όπου μπορεί να δημιουργηθεί το boil-off gas, (1) στην δεξαμενή flash μετά τον κύριο κρυογονικό εναλλάκτη θερμότητας (FBOG), (2) στις δεξαμενές αποθήκευσης (TBOG) και (3) στην προβλήτα (JBOG). Ο ρυθμός παραγωγής του εξατμιζόμενου αυτού αερίου εξαρτάται από την τεχνολογία των δεξαμενών, τις συνθήκες που επικρατούν καθώς και τον χρόνο φόρτωσης και συνήθως κυμαίνεται από 1% μέχρι άνω του 3%.<sup>[25]</sup> Η ποσότητα αυτή του εξατμιζόμενου LNG, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.3.1 μεταβάλλει τη σύσταση και την ποιότητα του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει επικίνδυνα και την πίεση της δεξαμενής,<sup>[26]</sup> με αποτέλεσμα να είναι πιθανό να συμβούν ατυχήματα. Υπερπίεσεις δημιουργούνται επίσης και με την ανατροπή του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (rollover), όπου η παγιδευμένη θερμότητα μετατρέπεται σε αέριο και έτσι παρατηρείται ταχεία απελευθέρωση ατμών, που μπορεί να αποβεί καταστροφική.

Πραγματοποιείται λοιπόν μια ανάλυση επικινδυνότητας, με τη μέθοδο της Fault Tree Analysis, στόχος της οποίας είναι η αξιολόγηση μιας ανεπιθύμητης κατάστασης ενός συστήματος, συνδυάζοντας μια σειρά συμβάντων χαμηλότερου επιπέδου. Η ακολουθία των αποτελεσμάτων και για τις δύο κατηγορίες (πίεσης) παρουσιάζεται στην Εικόνα 48 και με βάση αυτή θα ακολουθήσουν και οι εφαρμογές των σεναρίων στο λογισμικό ALOHA. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι το LNG που βρίσκεται υπό πίεση, μπορεί να είναι είτε υγρό είτε αέριο. Στην Εικόνα 48 στον δεύτερο κλάδο της γραφικής ανάλυσης, παρουσιάζεται η περίπτωση κατά την οποία έχουν δημιουργηθεί μεγάλες υπερπίεσεις και το LNG έχει μετατραπεί εξολοκλήρου σε αέριο. Στην περίπτωση του υγρού υπό πίεση οι συνέπειες που προκύπτουν είναι οι ίδιες με την περίπτωση υγρού LNG σε ατμοσφαιρική πίεση. Κάθε αποτέλεσμα, που παρουσιάζεται στην

παρακάτω εικόνα, έχει αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2 και οι πιθανές επιπτώσεις που μπορούν να προκύψουν από κάθε ένα από αυτά, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.



**Εικόνα 48: Fault tree analysis σεναρίων ατυχημάτων LNG**

Τα σενάρια ατυχημάτων που θα εξεταστούν στη συγκεκριμένη εργασία, συμπεριλαμβάνουν τις καταστάσεις στις οποίες το LNG είναι υγρό σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και υγρό υπό πίεση και χαρακτηρίζονται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πρώτο κλάδο της γραφικής ανάλυσης. Η περίπτωση δημιουργίας έκρηξης εκτονώμενου ατμού ζέοντος υγρού, BLEVE, δεν θα εξεταστεί στην παρούσα διπλωματική, καθώς όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, αποτελεί ένα εξαιρετικά απίθανο φαινόμενο, το οποίο απαιτεί την ταυτόχρονη αποτυχία όλων των μονάδων ασφαλείας τόσο του χερσαίου τερματικού σταθμού, όσο και του δεξαμενοπλοίου μεταφοράς LNG. Παρόλο που δεν υπάρχουν αντίστοιχα ιστορικά παραδείγματα, δεν παραγνωρίζεται το γεγονός, ότι υπάρχουν έστω και πολύ μικρές πιθανότητες να παρατηρηθεί ο κίνδυνος αυτός, κατά την φορτω-εκφόρτωση LNG.

**Πίνακας 5 : Πιθανές επιπτώσεις κάθε αποτελέσματος**

Κατάσταση	Αποτέλεσμα	Επιπτώσεις
Υγρό σε ατμοσφαιρική πίεση (ή υγρό υπό πίεση)	Εξατμιζόμενη λίμνη υγρού	-Τοξικότητα λόγω εξάτμισης -Δημιουργία εύφλεκτου αερίου νέφους -Υπερπίεση από έκρηξη νέφους
	Πυρκαγιά λίμνης	-Θερμική ακτινοβολία -Τοξικότητα λόγω καύσης -Έκρηξη
	Ακαριαία απελευθέρωση	- Δημιουργία εύφλεκτου αερίου νέφους -Τοξικότητα λόγω καύσης -Έκρηξη -Θραύσματα -Ωστικό κύμα
Αέριο υπό πίεση	Αέριο Νέφος	-Τοξικότητα λόγω εξάτμισης -Δημιουργία εύφλεκτου αερίου νέφους -Υπερπίεση από έκρηξη νέφους
	Γλώσσα φωτιάς	-Θερμική ακτινοβολία -Τοξικότητα λόγω καύσης
	Ακαριαία απελευθέρωση	- Δημιουργία εύφλεκτου αερίου νέφους -Τοξικότητα λόγω καύσης -Έκρηξη -Θραύσματα -Ωστικό κύμα

## 6.2 Οριακές τιμές επιπτώσεων και ζώνες ασφαλείας

Ως οριακές τιμές επιπτώσεων (Levels of Concern, LOCs), από τη δράση επικίνδυνων παραγόντων στο περιβάλλον, ορίζονται τα επίπεδα επιβάρυνσης πέρα από τα οποία παρατηρούνται συγκεκριμένες βλάβες στα άτομα τα οποία εκτίθενται, αλλά και στις κοντινές εγκαταστάσεις/ιδιοκτησίες . Στην περίπτωση των παραπάνω ατυχημάτων, που μπορούν να συμβούν κατά την φορτω-εκφόρτωση LNG, ως επικίνδυνος παράγοντας θεωρείται η παρουσία τοξικών ουσιών στον αέρα, η θερμική ακτινοβολία και η υπερπίεση λόγω ωστικού κύματος. Οι οριακές αυτές τιμές προσδιορίζονται με βάση τη λαμβανόμενη δόση, η οποία υπολογίζεται από την ένταση του φαινομένου της έκθεσης στον επικίνδυνο παράγοντα και το χρόνο έκθεσης. Η διαδικασία υπολογισμού των οριακών τιμών διαφέρει ανάλογα την έκθεση, η οποία μπορεί να είναι είτε χρόνια, για όσους διαβιώνουν ή εργάζονται σε επιβαρυνμένο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα, είτε περιστασιακή, όταν έχει περιορισμένη διάρκεια και όπως συμβαίνει στην περίπτωση βιομηχανικού ατυχήματος. Αναφέρεται ενδεικτικά, η έκθεση σε τοξική ουσία στον αέρα, η οποία διαρκεί όσο και η διέλευση του τοξικού νέφους, από την περιοχή στην οποία στέκεται ή κινείται ένα άτομο, επομένως συμπεραίνεται ότι τόσο η ένταση του φυσικού φαινομένου όσο και ο χρόνος έκθεσης δεν αποτελούν σταθερές τιμές. Μάλιστα, οι οριακές τιμές

επιπτώσεων που προτείνονται από διεθνείς οργανισμούς, είναι συνδεδεμένες πάντα με έκθεση στον επικίνδυνο παράγοντα, για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια.<sup>[96]</sup>

Η εκτίμηση των επιπτώσεων από κάποια επιβάρυνση, γίνεται είτε με τη μέθοδο της ομαδικής διακινδύνευσης, είτε με τη μέθοδο της ατομικής διακινδύνευσης. Η πρώτη εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί μια συγκεκριμένη επιβάρυνση, σε αριθμό ατόμων ενός δεδομένου πληθυσμού από την εκδήλωση ενός συγκεκριμένου κινδύνου. Η μέθοδος της ατομικής διακινδύνευσης, που χρησιμοποιείται και στην Ελλάδα, εκφράζει το ποσοστό ατόμων ενός πληθυσμού, το οποίο αναμένεται να παρουσιάσει κάποια βλάβη, ή εξ ίσου την πιθανότητα ένα μόνο άτομο να υποστεί μια βλάβη για ένα δεδομένο επίπεδο δόσης. Συνήθως εκφράζεται με οριακές τιμές που αντιστοιχούν στο γεγονός να συμβεί μια βλάβη στο 50% ή στο 1% ενός πληθυσμού ατόμων και επισημαίνεται ότι στους σχετικούς δείκτες για την έκθεση σε τοξική ουσία αναφέρεται μόνο η συγκέντρωση για μια σταθερή διάρκεια έκθεσης, που είναι ίση περίπου με 30 λεπτά.<sup>[96]</sup>

Η διαχείριση βιομηχανικών ατυχημάτων απαιτεί ακόμη την υιοθέτηση ειδικών ζωνών γύρω από τη θέση του ατυχήματος, ανάλογα με την ένταση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και απαιτεί επίσης τον καθορισμό των αντίστοιχων ορίων που αναφέρθηκαν παραπάνω, για τον προσδιορισμό των ζωνών αυτών. Διαμορφώνονται οι παρακάτω τρεις ζώνες απειλής, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την περιοχή εντός της οποίας το επίπεδο κινδύνου (τοξικότητα, αναφλεξιμότητα, θερμική ακτινοβολία ή υπερπίεση) προβλέπεται να υπερβαίνει το LOC που έχει τεθεί, κάποια στιγμή μετά την απελευθέρωση του χημικού.<sup>[96]</sup>

- Ζώνη I – Προστασία Δυνάμεων Καταστολής: στη ζώνη αυτή συμβαίνουν σοβαροί τραυματισμοί και θάνατοι σε σημαντικό ποσοστό
- Ζώνη II – Προστασία Πληθυσμού – Σοβαρές Επιπτώσεις: για τα περισσότερα άτομα της ζώνης αυτής αναμένονται μη ανατάξιμες βλάβες στην υγεία τους και πιθανοί θάνατοι σε μικρό ποσοστό του πληθυσμού. Στη ζώνη αυτή γίνονται συστηματικές ενέργειες διάσωσης από τα σωστικά συνεργεία.
- Ζώνη III – Προστασία Πληθυσμού – Μέτριες Επιπτώσεις: στη ζώνη αυτή δεν αναμένονται θάνατοι, ενώ σε σχετικά μικρό αριθμό ατόμων αναμένονται βλάβες στην υγεία τους.

Για τον προσδιορισμό λοιπόν της εμβέλειας των ζωνών αυτών, κάθε σεναρίου που περιγράφηκε παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα οι οριακές τιμές που έχουν δοθεί από το Μνημόνιο συνάρτησης εργασίας ΕΜΠ του 1998, και αναγράφονται στο Βιβλίο της Ασφάλειας Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων.<sup>[96]</sup> Στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των οριακών τιμών με τις ζώνες προστασίας.

**Πίνακας 6: Αντιστοίχιση Οριακών Τιμών και Ζωνών Προστασίας**

Ζώνες προστασίας	Συγκέντρωση Τοξικών ουσιών (mg/m <sup>3</sup> )	Συγκέντρωση καυσίμου στον αέρα (ppm)	Ένταση Θερμικής Ακτινοβολίας (kW/m <sup>2</sup> )	Ωστικό κύμα Υπερπίεση (mbar)
Ζώνη I	LC <sub>50</sub>	30.000	15	350
Ζώνη II	LC <sub>1</sub>	-	6	140
Ζώνη III	IDLH	5000	3	50



Οι οριακές τιμές επιπτώσεων που αναγράφονται στον Πίνακα 6 και σχετίζονται με την συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα ορίζονται ως εξής:

- $LC_{50}$  (Lethal Concentration 50): Ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα, στην οποία πεθαίνει το 50% των ανθρώπων, με εισπνοή της ουσίας για καθορισμένο χρόνο έκθεσης.
- $LC_1$  (Lethal Concentration 1): Ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία είναι πιθανό να συμβεί θάνατος στο 1% του πληθυσμού, με εισπνοή της ουσίας για καθορισμένο χρόνο έκθεσης.
- IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health): Ορίζεται ως η μέγιστη συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας, πάνω από την οποία είναι δυνατό να υπάρξουν μόνιμες βλάβες στην υγεία ενός ατόμου, για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα έκθεσης.

Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η τοξική τιμή LOC για μια ουσία, τόσο πιο τοξική είναι η ουσία αυτή όταν εισπνέεται.

Η θερμική ακτινοβολία είναι ο κίνδυνος που διαμορφώνεται, όταν εκτελείται ένα σενάριο πυρκαγιάς λίμνης, γλώσσας φωτιάς ή έκρηξη εκτονωμένου ατμού ζέοντος υγρού και η οριακή τιμή θερμικής ακτινοβολίας (Thermal Radiation Level of Concern), είναι ουσιαστικά ένα οριακό επίπεδο θερμικής ακτινοβολίας, πάνω από το οποίο ενδέχεται να υπάρχουν κίνδυνοι.

Το ωστικό κύμα, το οποίο προκαλείται από την απότομη αύξηση της πίεσης, είναι ένα από τα κύρια αποτελέσματα της έκρηξης αερίου νέφους και κινείται από το κέντρο της έκρηξης με μια δεδομένη ταχύτητα. Η οριακή τιμή υπερπίεσης (Overpressure Level of Concern) είναι συνήθως το όριο της πίεσης, πάνω από την οποία ενδέχεται να υπάρχει κίνδυνος. Οι επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό λόγω του ωστικού κύματος, μπορεί να είναι άμεσες (τραυματισμός πνευμόνων, διάρρηξη του ακουστικού τυμπάνου), επιδράσεις λόγω μετατόπισης (εκτίναξη σε σχετικά μεγάλη απόσταση), επιδράσεις από θραύσματα και επιδράσεις από καταρρευσίες κτιρίων. Συγκεκριμένα το είδος της επιβάρυνσης για κάθε οριακή τιμή έντασης θερμικής ακτινοβολίας και υπερπίεσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.

Η συγκέντρωση του καυσίμου στον αέρα, σχετίζεται με τις εύφλεκτες οριακές τιμές (Flammable Level of Concern), με τις οποίες μπορεί να προβλεφθεί η εύφλεκτη περιοχή του νέφους ατμών, που δημιουργείται από την απελευθέρωση μιας χημικής ουσίας, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί ο κίνδυνος της αναφλεξιμότητας. Ουσιαστικά ορίζονται ως μια κατώτατη συγκέντρωση καυσίμου στον αέρα, πάνω από την οποία ενδέχεται να υπάρχει κίνδυνος αναφλεξιμότητας. Οι τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα 6, είναι οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος για το μεθάνιο ως συστατικό, και αποτελούν και οι δύο κλάσματα του κατώτατου ορίου αναφλεξιμότητας (LFL) και όχι το ίδιο το όριο, διότι όταν ένα εύφλεκτο νέφος ατμών διασπείρεται, η συγκέντρωση καυσίμου στον αέρα δεν είναι ομοιόμορφη. . Θα υπάρχουν δηλαδή περιοχές όπου η συγκέντρωση είναι υψηλότερη από τον μέσο όρο που υπολογίζεται και περιοχές που είναι μικρότερη. Οι περιοχές που εμφανίζονται λόγω της έλλειψης συγκέντρωσης ονομάζονται τσέπες, και εκεί η χημική ουσία βρίσκεται στο εύφλεκτο εύρος ακόμα κι αν η μέση συγκέντρωση έχει πέσει κάτω από το LFL.

**Πίνακας 7 : Αντιστοίχιση είδους επιβαρύνσεων και Ζωνών Προστασίας**

Ζώνες	Επιβάρυνση από θερμική ακτινοβολία	Επιβάρυνση από υπερπίεση
Ζώνη I	Εγκαύματα γ' βαθμού (με συνέπεια το θάνατο) σε ποσοστό πάνω από το 50% του πληθυσμού	Μη επισκευάσιμες ζημιές στον φέροντα οργανισμό και τους τοίχους κτιρίων
Ζώνη II	Εγκαύματα γ' βαθμού (με συνέπεια το θάνατο) σε ποσοστό 1% των εκτιθέμενων.	Ζημιές στον φέροντα οργανισμό και σε εξωτερικούς η εσωτερικούς τοίχους
Ζώνη III	Πρόκληση εγκαυμάτων α' βαθμού σε σημαντικό τμήμα του πληθυσμού.	Ελαφρές ρωγμές σε τοίχους και ζημιές σε πόρτες και παράθυρα.

## 6.3 Ανάλυση σεναρίων ατυχημάτων

### 6.3.1 Ατύχημα 1 : Οπή στη δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς και πλοίου

Στο σενάριο αυτό εξετάζονται οι κίνδυνοι που προκύπτουν από τη δημιουργία μιας οπής στη δεξαμενή αποθήκευσης LNG του χερσαίου τερματικού σταθμού και τη δεξαμενή αποθήκευσης του υγραεριοφόρου πλοίου. Τα περισσότερα μέταλλα και κράματα γίνονται ισχυρότερα, αλλά λιγότερο όλκιμα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επειδή η χαμηλή θερμοκρασία αλλάζει την κρυσταλλική δομή του υλικού, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής εφελκυσμού και απόδοσης του, αλλά ταυτόχρονα και την μείωση της αντίστασης κρούσης και τη μετατροπή του σε εύθραυστο υλικό. Οι κανονικοί χάλυβες χάνουν γρήγορα την ολκιμότητά τους και την αντοχή τους σε κρούση κάτω από τους 0°C και η επακόλουθη ταχεία ψύξη προκαλεί στο μέταλλο μια πίεση λόγω συστολής. Σε αυτήν την κατάσταση το μέταλλο ενδέχεται να σπάσει και το φαινόμενο που εμφανίζεται ξαφνικά ονομάζεται «εύθραυστο κάταγμα» (brittle fracture).<sup>[45]</sup>

Παρόλο που λαμβάνονται μέτρα κατά τον σχεδιασμό της δεξαμενής αποθήκευσης του χερσαίου τερματικού σταθμού, όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 4, ώστε να διασφαλιστεί ότι το LNG δεν έρχεται σε επαφή με τη χαλύβδινη δομή της δεξαμενής, είναι πολύ πιθανό να δημιουργηθεί κάποιο άνοιγμα στην δομή της δεξαμενής και να παρατηρηθεί διαρροή Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου. Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 49, σε μία από τις δεξαμενές αποθήκευσης της εγκατάστασης LNG στην ανατολική Ουάσινγκτον, Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο διέρρευσε σε ένα χώρο μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών τοιχωμάτων της δεξαμενής, με αποτέλεσμα η κρυογονική θερμοκρασία των -163°C να δημιουργήσει πολλές ρωγμές στο εξωτερικό τοίχωμα από ανθρακούχο χάλυβα, επιτρέποντας έτσι ένα μέρος του LNG να διαφύγει. Μια επιθεώρηση σημείωσε, πως οι τεχνικοί της εγκατάστασης δεν είχαν διαβάσει σωστά την ένδειξη σε μία από τις συσκευές καθοδικής προστασίας, οι οποίες βοηθούν στην αποφυγή διαρροών, παρακολουθώντας τη διάβρωση στην δεξαμενή.<sup>[93]</sup>



**Εικόνα 49: Διαρροή LNG από οπή στην δεξαμενή ξηράς της εγκατάστασης LNG στην ανατολική Ουάσινγκτον<sup>[93]</sup>**

Επίσης ο σχεδιασμός όλου του πλοίου, με επιπλέον προστασίες και μονώσεις σε κάθε δεξαμενή, με εξειδικευμένο εξοπλισμό για την αντιμετώπιση τυχόν διαρροών και την αποστράγγιση νερού (δοχείο συλλογής σταγόνων από ανοξείδωτο χάλυβα στον πυθμένα των δεξαμενών και στις πολλαπλές του καταστρώματος), με τους εύκαμπτους σωλήνες πυρκαγιάς που είναι τοποθετημένοι σε κάθε υγρό θόλο για προστασία από διαρροές σε φλάντζες και βαλβίδες, αλλά και τα μέτρα που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης LNG, όπως η λειτουργία της κουρτίνας νερού, μειώνουν κάθε πιθανότητα εμφάνισης διαρροής από τον εξωτερικό φλοιό της δεξαμενής αποθήκευσης. Παράλληλα η σωστή λειτουργία των συστημάτων ασφαλείας και ελέγχου, εξασφαλίζουν την έγκαιρη προειδοποίηση και έτσι ταχεία αντιμετώπιση, κάποιου προβλήματος διαρροής. Παρ'όλα αυτά όμως, όπως και στην περίπτωση της δεξαμενής ξηράς, οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, τα φαινόμενα διάβρωσης, το rollover, αλλά και το φαινόμενο του χτυπήματος (sloshing) που έχει αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 2.5.7, σε συνδυασμό με βλάβη σε κάποιο σύστημα παρακολούθησης, μπορούν να προκαλέσουν δομικές ζημιές στην δεξαμενή αποθήκευσης.

Μια πληρέστερη αξιολόγηση για μια εγκατάσταση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, θα περιλαμβάνει τόσο μεγαλύτερου όσο και μικρότερου μεγέθους οπές σε εξοπλισμό και μηχανήματα. Συγκεκριμένα μπορεί να περιλαμβάνει οπές μεγέθους<sup>[36]</sup> :

- 10-25 mm : τυπικά μικρές οπές με μεγάλη συχνότητα (πολύ πιθανό να δημιουργηθούν στην εγκατάσταση)
- 50 mm : σοβαρό περιστατικό διαρροής, που μπορεί να μην εμφανιστεί κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης

- 100-250 mm : πολύ σοβαρό περιστατικό διαρροής, απίθανο να συμβεί κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, αλλά έχει παρατηρηθεί σε ιστορικά αρχεία των εγκαταστάσεων LNG

Στο **Παράρτημα Α** παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα, για την περίπτωση διαρροής LNG από οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς και στο **Παράρτημα Γ** για την περίπτωση διαρροής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου από οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης του υγραεριοφόρου πλοίου.

Σύμφωνα με το υποκεφάλαιο 3.4.1.6 οι πλέον χρησιμοποιούμενες δεξαμενές αποθήκευσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στα LNG Carriers, είναι οι δεξαμενές μεμβράνης και οι σφαιρικές δεξαμενές Moss. Το λογισμικό ALOHA υποστηρίζει τρεις τύπους δεξαμενών: (α) οριζόντια κυλινδρική, (β) κάθετη κυλινδρική και (γ) σφαιρική. Επομένως για τις περιπτώσεις ατυχημάτων που περιλαμβάνουν την δεξαμενή του πλοίου, θα θεωρηθεί η ύπαρξη σφαιρικής δεξαμενής. Επιπλέον, η πληρότητα της δεξαμενής του πλοίου (99,5%) διαφέρει από την πληρότητα της δεξαμενής ξηράς (80%), διότι θεωρείται ότι το ατύχημα συμβαίνει κατά την έναρξη της διαδικασίας εκφόρτωσης ή κατά την λήξη της διαδικασίας φόρτωσης (πιθανό σενάριο) και στην ανάλυση ευαισθησίας σε κάποια ενδιάμεση κατάσταση.

### **6.3.2 Ατύχημα 2 : Ολική διάρρηξη δεξαμενής αποθήκευσης ξηράς και πλοίου**

Τα αίτια που μπορούν να οδηγήσουν σε ολική διάρρηξη της δεξαμενής του χερσαίου τερματικού σταθμού ή του πλοίου είναι τρία : (α) υπερπλήρωση της δεξαμενής, (β) ανάπτυξη μεγάλων πιέσεων στο εσωτερικό (υπερπίεση) και (γ) φυσικά αίτια (σεισμός, τσουνάμι κλπ.). Στη συγκεκριμένη εργασία θα μελετηθούν οι δύο πρώτες περιπτώσεις, οι οποίες οδηγούν άμεσα σε κατάρρευση της οροφής της δεξαμενής και έτσι σε ακαριαία απελευθέρωση του συνολικού περιεχόμενου της στην ατμόσφαιρα.

Παρόλο που ολόκληρη η εγκατάσταση του χερσαίου τερματικού σταθμού είναι κατάλληλα σχεδιασμένη και εξοπλισμένη με συστήματα ελέγχου, ασφαλείας, ανίχνευσης, έκτακτης ανάγκης κ.α., το φαινόμενο της ολικής διάρρηξης δεξαμενής είναι πιθανό να συμβεί για διάφορους συνδυαστικούς λόγους.

Όσον αφορά την περίπτωση της υπερπίεσης, κατά την εκφόρτωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου για παράδειγμα, μπορεί να παρατηρηθεί βλάβη στο σύστημα απομάκρυνσης του boil-off gas, λόγω κακής λειτουργίας του συμπιεστή. Σε περίπτωση απουσίας εφεδρικού συμπιεστή, ή αποτυχίας αυτού, οι χειριστές του πλοίου και του τερματικού σταθμού, αφού αναγνωρίσουν την αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό της δεξαμενής, πρέπει να επικοινωνήσουν ώστε να τερματίσουν την λειτουργία, κλείνοντας τις κατάλληλες βαλβίδες και αντλίες με τη βοήθεια του Συστήματος Έκτακτης Ανάγκης. Αποτυχία του συστήματος ESD ή των βαλβίδων ασφαλείας, έχει ως αποτέλεσμα την ολική διάρρηξη της δεξαμενής και την άμεση απελευθέρωση του LNG στην ατμόσφαιρα. Η περίπτωση της υπερπλήρωσης, αναγνωρίζεται συνήθως ως ανθρώπινο σφάλμα κατά την διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης, και δυσλειτουργίας του στοιχείου ελέγχου της στάθμης του υγρού.

Η έντονη αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της δεξαμενής αποθήκευσης του LNG Carrier, επομένως και της πίεσης, λόγω μεγάλης διάρκειας παραμονής του αποθηκευμένου LNG χωρίς κυκλοφορία, ή εξάτμισης μεγάλων ποσοτήτων υγρού (boil-off gas), ή προσθήκη προϊόντων με αρκετά διαφορετικές πυκνότητες (rollover) καθώς και άλλοι λόγοι, σε συνδυασμό με την αποτυχία του συστήματος απομάκρυνσης boil-off gas και του συστήματος έκτακτης ανάγκης, μπορούν να οδηγήσουν σε ολική διάρρηξη της δεξαμενής του πλοίου. Οι ανακουφιστικές βαλβίδες που είναι τοποθετημένες στην οροφή κάθε δεξαμενής, έχουν μέγιστο ρυθμό ροής ο οποίος αν ξεπεραστεί, θα οδηγήσει επίσης σε αύξηση της πίεσης της δεξαμενής. Η περίπτωση υπερπλήρωσης της δεξαμενής, μπορεί να εμφανιστεί όπως αναφέρθηκε, κυρίως λόγω ανθρώπινων σφαλμάτων, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν αρχικά στην απελευθέρωση υγρού μέσω των αεραγωγών που προορίζονται για τους ατμούς, και στη συνέχεια σε κατάρρευση της οροφής της δεξαμενής.<sup>[95]</sup>

Στο **Παράρτημα Β** παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ALOHA, τόσο για την περίπτωση της ολικής διάρρηξης της δεξαμενής αποθήκευσης ξηράς λόγω υπερπλήρωσης (πορτοκαλί χρώμα) όσο και υπερπίεσης (ροζ χρώμα). Στην περίπτωση της υπερπλήρωσης, η δεξαμενή είναι πλήρης 100%, οπότε η ποσότητα του LNG που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα είναι 90000 m<sup>3</sup>, ενώ στην περίπτωση της υπερπίεσης απελευθερώνεται όγκος 72000 m<sup>3</sup>, ίσος με τον όγκο της δεξαμενής που είναι πλήρης κατά 80%, όπως και στο πρώτο σενάριο.

Στο **Παράρτημα Δ** παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ALOHA, τόσο για την περίπτωση ολικής διάρρηξης δεξαμενής του πλοίου λόγω υπερπλήρωσης (πορτοκαλί χρώμα), όσο και για την περίπτωση λόγω υπερπίεσης (ροζ χρώμα).

### **6.3.3 Ατύχημα 3 : Οπή στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG και επιστροφής ατμών**

Κατά τη διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης LNG, η πιθανότητα διαρροής από τον βραχίονα μεταφοράς του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου ή του βραχίονα επιστροφής ατμών LNG, λόγω παλιρροιακού φαινομένου είναι σχεδόν αμελητέα. Ωστόσο μια διαρροή θα μπορούσε να προκληθεί από υπερβολική κίνηση του πλοίου, καθώς έχει ελλειμνιστεί παράλληλα της προβλήτας του τερματικού σταθμού. Οι βραχίονες έχουν σχεδιαστεί να δέχονται μια συγκεκριμένη κίνηση του δεξαμενοπλοίου, και αν η κίνηση υπερβεί κάποια συγκεκριμένα όρια, τότε ενεργοποιείται το σύστημα ESD και διακόπτονται όλες οι εργασίες φορτίου. Εάν η κίνηση του πλοίου αυξάνεται ακόμα περισσότερο, τότε ενεργοποιείται το σύστημα γρήγορης αποδέσμευσης και οι βραχίονες αποσυνδέονται αμέσως από την πολλαπλή του καταστρώματος.<sup>[45]</sup> Σε περίπτωση βλάβης των συστημάτων ελέγχου, ανθρώπινου χειροκίνητου λάθους, κακής συντήρησης των βραχιόνων και των φλαντζών-βαλβίδων που διαθέτουν, λάθος επιλογή υλικού κατασκευής, πολλαπλών δονήσεων και υπερβολικών κινήσεων, διάβρωσης, πρόσκρουσης κατά τη σύνδεση με την πολλαπλή του πλοίου και έτσι δημιουργία ρωγμής, είναι δυνατή η διαρροή προϊόντος.

Στην περίπτωση που το ατύχημα πραγματοποιείται στους βραχίονες φορτω-εκφόρτωσης, αξίζει να σημειωθεί, ότι η διαρροή Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου μπορεί να παρατηρηθεί τόσο σε ξηρή επιφάνεια (έδαφος), όσο και σε υγρή (θάλασσα), αφού μετά τη σύνδεση τους με τις

πολλαπλές του πλοίου, ένα κομμάτι τους παραμένει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 50.



**Εικόνα 50:** Σύνδεση βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης με τις πολλαπλές του πλοίου

### 6.3.3.1 Γρήγορη Μετάβαση Φάσης (Rapid Phase Transition RPT)

Όταν απελευθερωθεί ποσότητα Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στο νερό, επιπλέει λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας και εξατμίζεται, χωρίς τη δημιουργία στρώσης πάγου στην επιφάνεια. Αν απελευθερωθεί μεγάλη ποσότητα LNG, θα εξατμιστεί πολύ γρήγορα και μπορεί να προκαλέσει μια απότομη μεταβατική φάση (RPT - Rapid Phase Transition). Η θερμοκρασία που έχει το νερό, όπως και η ποσότητα των υπολοίπων ουσιών που έρχονται σε επαφή μαζί του (μεθάνιο) και τείνουν να καταλάβουν μεγαλύτερο μέρος από ότι το υγρό, επηρεάζουν την πιθανότητα μιας απότομης μεταβατικής φάσης από υγρό σε αέριο, με αποτέλεσμα να απελευθερωθεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας και να προκληθεί φυσική έκρηξη χωρίς φλόγα. Αν και δεν υπάρχει καύση, η φυσική αυτή έκρηξη είναι πολύ επικίνδυνη για τον άνθρωπο, τις κοντινές εγκαταστάσεις και το υγραεριοφόρο πλοίο.<sup>[13]</sup>



Αυτή η γρήγορη μετάβαση φάσης είναι ένα ιδιαίτερα ανησυχητικό φαινόμενο για τα πλοία που μεταφέρουν Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο κυρίως για δύο λόγους. Επειδή η πίεση της δεξαμενής αποθήκευσης του φορτίου είναι σχετικά χαμηλή και επειδή το σύστημα εκτόνωσης πίεσης των δεξαμενών, μπορεί να μην είναι σε θέση να ενεργοποιηθεί αρκετά γρήγορα για να αποβάλει τους μεγάλους όγκους των ατμών που αναπτύσσονται αυθόρμητα από μια μετάβαση φάσης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκληθεί από διαρροή LNG από τη δεξαμενή, από μια μεγάλη οπή πάνω ή κάτω από τη γραμμή του νερού ή από εισροή νερού σε μερικώς γεμάτη δεξαμενή με την οπή να βρίσκεται κάτω από τη γραμμή νερού αλλά πάνω από τη στάθμη του LNG.<sup>[38]</sup> Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι το φαινόμενο αυτό συμβαίνει κυρίως όταν το LNG περιέχει μη αμελητέες ποσότητες αιθανίου, προπανίου και βουτανίου.<sup>[41]</sup>



**Εικόνα 51:** Απότομη μετάβαση φάσης LNG<sup>[40]</sup>

Στα **Παράρτηματα Ε και Ζ** παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ALOHA, για την περίπτωση διαρροής Υγροποιημένου Φυσικού Αέριου, τόσο σε ξηρή (ροζ χρώμα) όσο και σε υγρή (πορτοκαλί χρώμα) επιφάνεια, από τον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG και τον βραχίονα επιστροφής ατμών αντίστοιχα. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα κοινά δεδομένα και στις δύο περιπτώσεις.

Για την εισαγωγή δεδομένων στο ALOHA, χρησιμοποιείται η επιλογή της κάθετης κυλινδρικής δεξαμενής ως πηγή διαρροής, με τις πραγματικές διαστάσεις του βραχίονα. Ουσιαστικά η διαρροή σε σωλήνα ανάγεται σε διαρροή από δεξαμενή, λόγω των μικρών διαστάσεων του βραχίονα. Ο ρυθμός εκροής από σωλήνα μικρού μήκους που συνδέεται με δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί ίδιος με αυτόν κυκλικής οπής ίδια διαμέτρου σε δεξαμενή.<sup>[96]</sup>

### 6.3.4 Ατύχημα 4 : Ολική διάρρηξη βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG και επιστροφής ατμών

Εκτός από την δημιουργία οπής στους βραχίονες, που έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή διαρροή Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στο περιβάλλον, η ολική διάρρηξη και έτσι η ακαριαία απελευθέρωση όλου του προϊόντος στην ατμόσφαιρα, αποτελεί επίσης ένα πιθανό σενάριο ατυχήματος, που παρουσιάζεται και στην Εικόνα 52. Ο υψηλός αρχικός ρυθμός φόρτωσης, η κακή σύνδεση στην πολλαπλή του πλοίου, η λανθασμένη επιλογή μετάλλων για την κατασκευή είτε του βραχίονα, είτε της πολλαπλής, η κακή συντήρηση και έτσι φθορά του εξοπλισμού, είναι μερικοί από τους λόγους που μπορούν να προκαλέσουν αυτό το ατύχημα. Παρόλο που στους περισσότερους χερσαίους τερματικούς σταθμούς, βρίσκεται εγκατεστημένη μια βαλβίδα απενεργοποίησης έκτακτης ανάγκης στην γραμμή μεταφοράς, η οποία περιορίζει τον χρόνο απελευθέρωσης για ρήξη των βραχιόνων, η αποτυχία της σε περίπτωση κάποιου ατυχήματος κατά την επιστροφή ατμών από/στην ξηρά, μπορεί να οδηγήσει σε ολική διάρρηξη του βραχίονα και έτσι σε άμεση απελευθέρωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στην ατμόσφαιρα.<sup>[96]</sup>



Εικόνα 52 : Ολική διάρρηξη βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG<sup>[94]</sup>

Στα **Παραρτήματα ΣΤ** και **Η** παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ALOHA, για την περίπτωση ολικής διάρρηξης του βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG και του βραχίονα επιστροφής ατμών αντίστοιχα, και την απελευθέρωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, τόσο σε ξηρή (ροζ χρώμα) όσο και σε υγρή (πορτοκαλί χρώμα) επιφάνεια. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα κοινά δεδομένα και στις δύο περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί πως στα σενάρια διαρροής και διάρρηξης του βραχίονα επιστροφής ατμών οι τιμές που εισάγονται στο πρόγραμμα (**Παραρτήματα Ζ** και **Η**) διαφέρουν από τις τιμές των προηγούμενων σεναρίων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι περιπτώσεις αυτές συνδέονται με το αέριο

που προκύπτει από τον βρασμό του LNG (boil-off gas), που βρίσκεται εξολοκλήρου σε αέρια κατάσταση, οπότε και σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Η ποσότητα του LNG που διαφεύγει άμεσα στην ατμόσφαιρα, υπολογίζεται ως ο συνολικός όγκος του βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης από τις δεδομένες διαστάσεις που έχουν οριστεί στο προηγούμενο σενάριο (διάμετρος = 0,6 m και μήκος = 12,5 m). Θεωρείται ότι ο βραχίονας λειτουργεί με τον μέγιστο ρυθμό φόρτωσης, επομένως είναι πλήρης 100%.

Παρόλο που ο βραχίονας βρίσκεται σε κάποιο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους, που ουσιαστικά είναι ίσο με το βάθος του υγραεριοφόρου πλοίου, δηλαδή την απόσταση του ανώτατου σημείου της καμπύλης του καταστρώματος από τη βασική γραμμή, ως ύψος πηγής στο πρόγραμμα ορίζεται το έδαφος (μηδενική τιμή). Ουσιαστικά ένα μη μηδενικό ύψος εισάγεται, μόνο όταν η απελευθερωμένη χημική ουσία διασκορπίζεται παθητικά μακριά από το σημείο απελευθέρωσης, χωρίς να αυξάνεται προς τα πάνω (όπως μπορεί να συμβεί σε ένα αέριο που εκπέμπεται από μια θερμαινόμενη πηγή), ή να κινείται προς το έδαφος (όπως συμβαίνει σε ένα βαρύ αέριο). Μάλιστα, αν το επιλεγμένο χημικό είναι βαρύ αέριο, το ίδιο το πρόγραμμα ειδοποιεί ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί μηδενικό ύψος πηγής, ώστε να μοντελοποιηθεί η απελευθέρωση, και σε περίπτωση που εισαχθεί διαφορετική τιμή, κατά τον υπολογισμό της διασποράς το ALOHA θεωρεί ως ύψος πηγής το έδαφος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Αποτελέσματα και σχολιασμός

### 7.1 Σενάριο ατυχημάτων 1: Οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου, κατά το οποίο δημιουργείται οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς. Στην αρχή του πίνακα αναλύεται το πιο πιθανό σενάριο, το οποίο αντιστοιχεί στο **Παράρτημα Α**, και στη συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση ευαισθησίας, με σκοπό να εξεταστούν οι επιπτώσεις που επιφέρει στο πιθανό σενάριο, η μεταβολή ορισμένων παραμέτρων. Συγκεκριμένα μεταβάλλονται το μέγεθος και το ύψος της οπής, η πληρότητα της δεξαμενής, η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία αποθήκευσης του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου.

**Πίνακας 8 : Αποτελέσματα σεναρίου οπής στην δεξαμενή ξηράς**

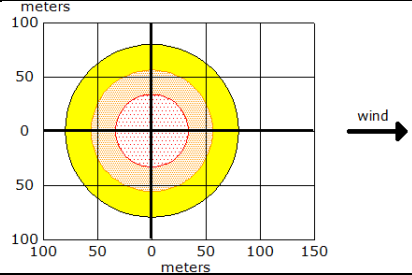
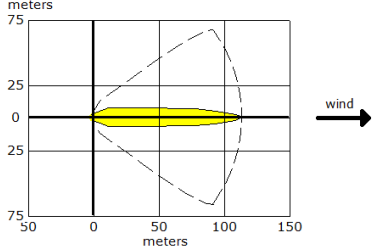
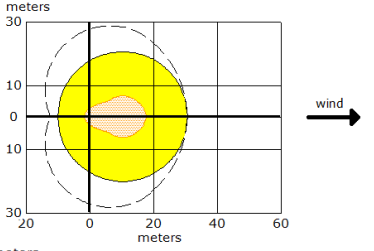
Σενάριο	Μεταβλητή σχεδιασμού	Συνέπεια	Απόσταση ζωνών			Διάμετρος λίμνης	Ποσότητα LNG	Ρυθμός διαφυγής	Διαγραμματική απεικόνιση
			Κόκκινη	Πορτοκαλί	Κίτρινη				
<b>Πιθανό σενάριο</b>									
1)Οπή στην δεξαμενή ξηράς	d <sub>οπής</sub> = 0,025 m, πληρότητα δεξαμενής 80%, ταχύτητα ανέμου 2m/s, θερμοκρασία υγρού -163°C, ύψος οπής 50%	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	16 m	7,5 m	4.053 kg	67,9 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	31 m	-	103 m				

από τον πυθμένα	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	17 m	29 m					
	Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	10 m	17 m	23 m	3,9 m	4134 kg	69,1 kg/min		

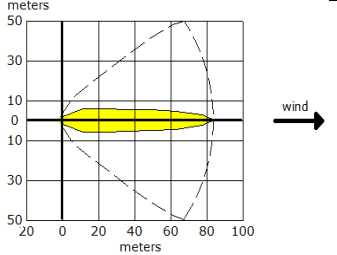
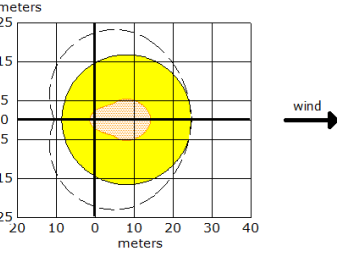
**Ανάλυση ευαισθησίας**

$d_{οπής} = 0,05$ <b>m</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	28 m					-
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	56 m	-	185 m	15,2 m	16.208 kg	272 kg/min		

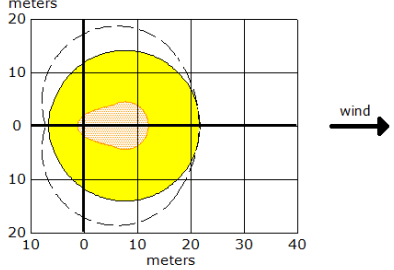
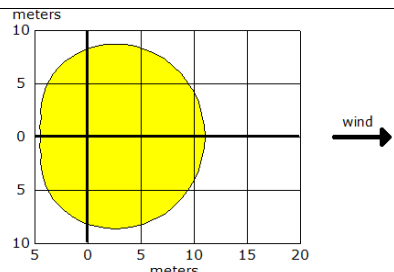
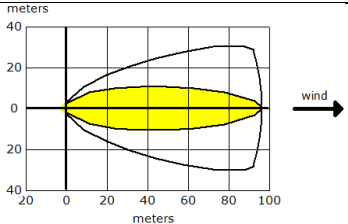
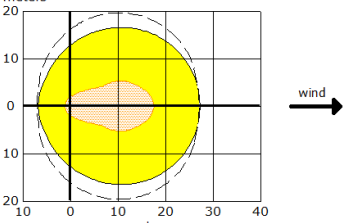
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	38 m	50 m				
		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	17 m	29 m	42 m	7,8 m	16.538 kg	277 kg/min	
	$d_{οπής} = 0,1 \text{ m}$	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	20 m	22 m	46 m	31 m	64.815 kg	1.090 kg/min	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	95 m	-	321 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	64 m	89 m				

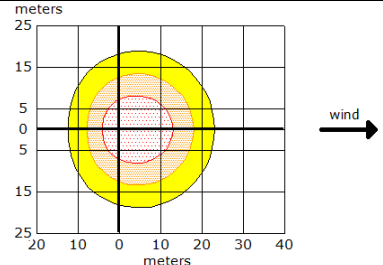
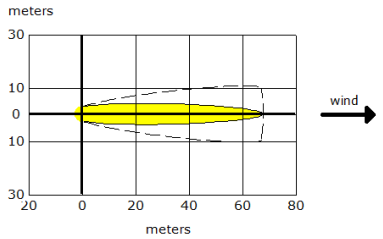
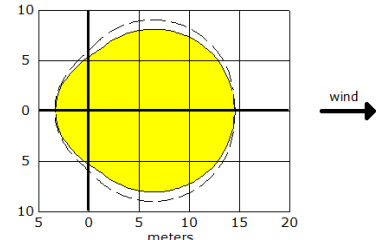
		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	34 m	56 m	80 m	15,5 m	66.150 kg	1.110 kg/min	
<b>Πληρότητα δεξαμενής 90%</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	18 m	8,4 m	5.056 kg	84,7 kg/min	-	
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	34 m	-	113 m					
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	18 m	31 m					
	Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	11	19	26				4,3 m	5.158 kg



Πληρότητα δεξαμενής 70%	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	12 m	6,1 m	2.700 kg	45,2 kg/min	-
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	26 m	-	84 m				
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	14 m	25 m				
	Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	< 10 m	14 m	20 m				3,2 m
	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	21 m				-

	<b>Ύψος οπής 10% από τον πυθμένα</b>	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	41 m	-	134 m	10,1 m	7.289 kg	122 kg/min	
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	26 m	37 m				
		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	13 m	22 m	31 m				5,2 m
	<b>Ύψος οπής 70% από τον πυθμένα</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	11 m	3,7 m	978 kg	16,4 kg/min	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	18 m	-	49 m				-

		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	12 m	22 m				
		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	<10 m	<10 m	12	1,9 m	997 kg	16,7 kg/min	
	<b>Ταχύτητα ανέμου 4 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m	11 m	19 m			-	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	30 m	-	97 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	18 m	28 m	7,1 m	4.063 kg	68,1 kg/min	

		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	13 m	18 m	23 m	3,9 m	4.134 kg	69,1 kg/min	
	<b>Ταχύτητα ανέμου 8 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m	<10 m	<10 m	6,4 m	4078 kg	68,3 kg/min	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	14 m	-	68 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	<10 m	15 m				
		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	13 m	17 m	21 m				3,9 m

		Τοξική περιοχή αερίου νέφους	12 m	18 m	30 m				-
Θερμοκρασία LNG -160°C		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	44 m	-	117 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	32 m	49 m	-	6.419 kg	107 kg/min	
		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	10 m	11 m	18 m				
		Τοξική περιοχή αερίου νέφους	20 m	23 m	45 m	-			

	<b>Θερμοκρασί α LNG -150°C</b>	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	67 m	-	173 m	-	12.450 kg	208 kg/min	
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	53 m	71 m				
		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	10 m	17 m	26 m				

Σύμφωνα λοιπόν με την σύνοψη του Πίνακα 8, η σύγκριση μεταξύ των ληφθέντων αποτελεσμάτων για τα προσδιορισμένα σενάρια, δείχνει ότι στο σενάριο με την μέγιστη διάμετρο οπής ( $d_{\text{οπής}} = 0.1 \text{ m}$ ), παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ζώνες κινδύνου, καθώς και η μεγαλύτερη ποσότητα LNG που διαφεύγει. Για παράδειγμα η μέγιστη ένταση θερμικής ακτινοβολίας της πυρκαγιάς λίμνης ( $15 \text{ kW/m}^2$  ή περισσότερο) θα επεκταθεί για τη μεγαλύτερη απόσταση (34 m), σε σύγκριση με την επέκταση της κόκκινης ζώνης στα υπόλοιπα σενάρια. Το ίδιο συμβαίνει και για την συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, την συγκέντρωση του καυσίμου στον αέρα και την υπερπίεση του ωστικού κύματος και μάλιστα και για τις τρεις ζώνες. Σε περίπτωση δηλαδή έκρηξης αερίου νέφους, η μέση τιμή της υπερπίεσης (140 mbar ή περισσότερο) θα φτάσει σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση (64 m) από τα υπόλοιπα σενάρια, ενώ σε περίπτωση για παράδειγμα δημιουργίας λίμνης που δεν αναφλέγεται και σταδιακά εξατμίζεται, η μικρότερη συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα (IDLH), θα επεκταθεί και πάλι σε μια μεγαλύτερη απόσταση (46 m).

Παρατηρείται ακόμη, ότι η αύξηση του ύψους της οπής από την κορυφή της δεξαμενής (μείωση από τον πυθμένα), οδηγεί σε αύξηση και των ζωνών κινδύνου. Για παράδειγμα στο σενάριο, στο οποίο η κυκλική οπή βρίσκεται στο 10% από την κορυφή της δεξαμενής ξηράς, η μικρότερη συγκέντρωση καυσίμου στον αέρα (που αντιστοιχεί στο 10% του LEL σύμφωνα με την προεπιλεγμένη τιμή του προγράμματος), πάνω από την οποία μπορεί να εμφανιστεί κίνδυνος αναφλεξιμότητας, επεκτείνεται σε απόσταση 134 m από το σημείο διαρροής (κίτρινη ζώνη), σε σχέση με το πιθανό σενάριο, στο οποίο επεκτείνεται σε απόσταση 103 m.

Σε μικρή αύξηση των ζωνών κινδύνου, οδηγεί και η αύξηση της πληρότητας της δεξαμενής, αλλά όχι με τόσο σημαντικές μεταβολές όσο η αύξηση της διαμέτρου της οπής. Η αλλαγή των μετεωρολογικών συνθηκών, και ειδικότερα της ταχύτητας του ανέμου που μελετήθηκε, παρόλο που δεν μεταβάλλει σημαντικά την ποσότητα του LNG που διαφεύγει και τον ρυθμό απελευθέρωσής του, ο τετραπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα (8 m/s), οδηγεί σε μια σχετικά μικρή ελάττωση των ζωνών κινδύνου, συγκριτικά με τα αποτελέσματα του πιο πιθανού σεναρίου.

Η αύξηση της θερμοκρασίας αποθήκευσης του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, λόγω της εισροής θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον και άλλους λόγους που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 6, οδηγεί στην δημιουργία γλώσσας φωτιάς και όχι πυρκαγιάς λίμνης όπως συμβαίνει στα προηγούμενα σενάρια. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, συνεπάγεται την αύξηση της πίεσης αποθήκευσης στην δεξαμενή, και αυτή η συσσώρευση πίεσης οδηγεί σε διαφορετικό αποτέλεσμα σύμφωνα με την Εικόνα 48, αφού πλέον το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο θεωρείται αέριο υπό πίεση. Και στην περίπτωση αυτή όμως, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, παράλληλα οι κίνδυνοι της έντασης της θερμικής ακτινοβολίας, της υπερπίεσης του ωστικού κύματος, των συγκεντρώσεων τοξικών ουσιών και καυσίμου στον αέρα, επεκτείνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Συγκεκριμένα, η μέγιστη συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα ( $LC_{50}$ ) επεκτείνεται κατά 10 μέτρα περισσότερο με αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $13^\circ\text{C}$ , η τιμή υπερπίεσης των 140 mbar, σε περίπτωση έκρηξης αερίου νέφους, αυξάνεται κατά 36 m και η μικρότερη ένταση θερμικής ακτινοβολίας της πυρκαγιάς λίμνης, αναπτύσσεται σε μια απόσταση κατά 3 m μεγαλύτερη συγκριτικά με το πιθανό σενάριο.



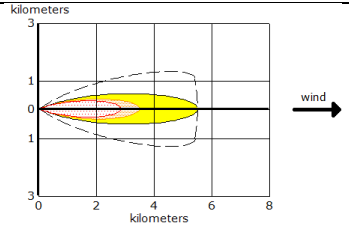
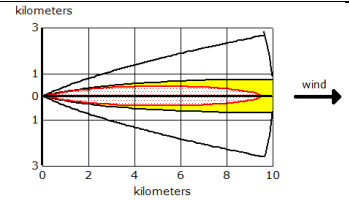
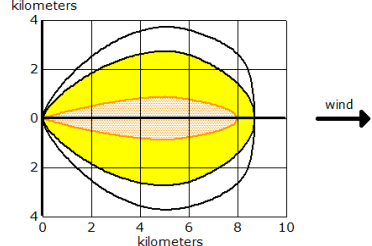
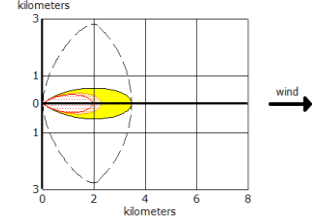
## 7.2 Σενάριο ατυχημάτων 2: Ολική διάρρηξη δεξαμενής ξηράς

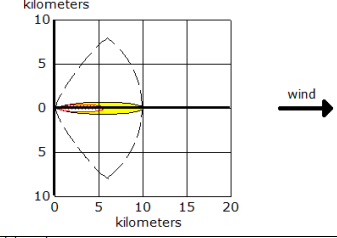
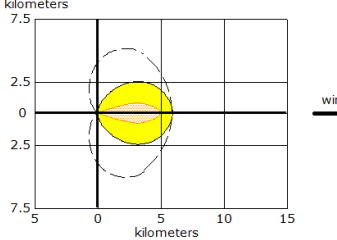
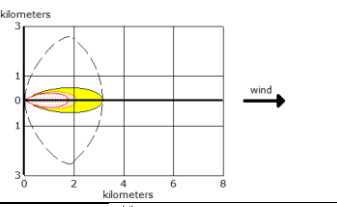
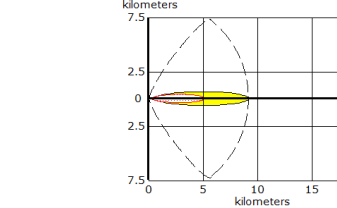
Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου ολικής διάρρηξης δεξαμενής ξηράς. Αναλύθηκαν και οι δυο περιπτώσεις, υπερπλήρωσης και υπερπίεσης, που μπορούν να προκαλέσουν το ατύχημα αυτό, και όπως και στο πρώτο σενάριο μελετήθηκε κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα του πιο πιθανού σεναρίου, με αλλαγή ορισμένων μεταβλητών σχεδιασμού.

**Πίνακας 9 : Αποτελέσματα σεναρίου ολικής διάρρηξης δεξαμενής ξηράς**

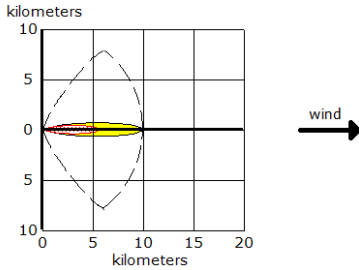
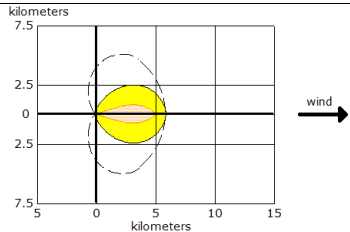
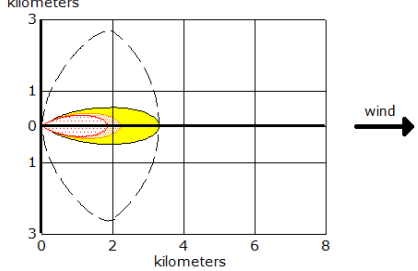
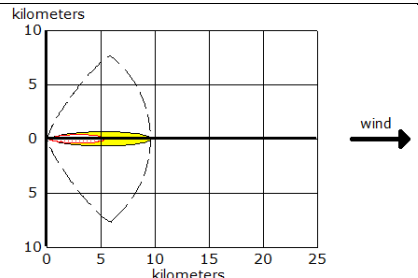
Σενάριο	Μεταβλητή σχεδιασμού	Συνέπεια	Απόσταση ζωνών			Ποσότητα LNG	Ρυθμός διαφυγής	Διαγραμματική απεικόνιση
			Κόκκινη	Πορτοκαλί	Κίτρινη			
<b>Πιθανό σενάριο υπερπλήρωσης</b>								
2) Ολική διάρρηξη δεξαμενής ξηράς	Ταχύτητα ανέμου 2m/s	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	2100 m	2500 m	3800 m	38.226.987 kg	637.000 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	6100 m	-	> 10.000 m			

		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	5400 m	6500 m			
<b>Ανάλυση ευαισθησίας για το σενάριο της υπερπλήρωσης</b>								
<b>Ταχύτητα ανέμου 4 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	2100 m	2500 m	3800 m	38.226.987 kg	637.000 kg/min		
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	6100 m	-	> 10.000 m				
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	5400 m	6500 m				

	<b>Ταχύτητα ανέμου 8 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	2900 m	3500 m	5500 m	38.226.987 kg	637.000 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	9500 m	-	> 10.000 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	8000 m	8700 m			
<b>Πιθανό σενάριο υπερπίεσης</b>								
		Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1900 m	2300 m	3500 m			

	Πληρότητα δεξαμενής 80%, θερμοκρασία LNG -150°C, ταχύτητα ανέμου 2 m/s	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	5600 m	-	> 10.000 m	29.150.067 kg	486.000 kg/min	
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	4900 m	5900 m			
<b>Ανάλυση ευαισθησίας για το σενάριο υπερπίεσης</b>								
	Πληρότητα δεξαμενής 60%	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1800 m	2100 m	3200 m	21.862.550 kg	364.000 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	5100 m	-	9200 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	4500 m	5400 m			

	<b>Πληρότητα δεξαμενής 90%</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	2000 m	2400 m	3600 m	32.793. 825 kg	547.000 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	5800 m	-	> 10.000 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	5100 m	6200 m			
		Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1900 m	2300 m	3400 m			

	<b>Θερμοκρασί α LNG -140°C</b>	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	5500 m	-	> 10.000 m	27.962.863 kg	466.000 kg/min	
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	4900 m	5800 m			
	<b>Θερμοκρασί α LNG -120°C</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1900 m	2200 m	3300 m	25.253.414 kg	421.000 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	5400 m	-	9700 m			

		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	4700 m	5700 m			
	<b>Ταχύτητα ανέμου 4 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1900 m	2300 m	3500 m	29.150.067 kg	486.000 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	5600 m	-	> 10.000 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	4900 m	5900 m			



	<b>Ταχύτητα ανέμου 8 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	2600 m	3200 m	5000 m	29.150.067 kg	486.000 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	8600 m	-	> 10.000 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	7200 m	7900 m			

Στην περίπτωση της υπερπλήρωσης, η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται μόνο στη μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου, καθώς η μεταβλητή της θερμοκρασίας σχετίζεται με το επόμενο σενάριο της υπερπίεσης. Όπως φαίνεται και στον πίνακα των αποτελεσμάτων, ο διπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα δεν επιφέρει καμία αλλαγή στις ζώνες κινδύνου, σε αντίθεση με τον τετραπλασιασμό της, που προκαλεί μια αύξηση όλων των ζωνών. Συγκεκριμένα η μέγιστη συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα ( $LC_{50}$  ή περισσότερο), για ταχύτητα του αέρα ίση με 8 m/s, επεκτείνεται για 800 m επιπλέον, σε σχέση με την αρχική απόσταση της κόκκινης ζώνης, για ταχύτητα του αέρα ίση με 2 m/s. Το ίδιο συμβαίνει και στις υπόλοιπες περιοχές όπου εμφανίζεται ο κίνδυνος της τοξικότητας, με μια αύξηση κατά 1000 m της περιοχής όπου η συγκέντρωση τοξικών ουσιών είναι ίση και μεγαλύτερη του  $LC_1$  (πορτοκαλί ζώνη) και μια αύξηση κατά 1700 m της περιοχής όπου η συγκέντρωση είναι ίση και μεγαλύτερη του IDLH (κίτρινη ζώνη). Η κόκκινη ζώνη της περιοχής στην οποία μπορεί να δημιουργηθεί εύφλεκτο μίγμα του LNG με τον αέρα, στην οποία δηλαδή η συγκέντρωση του καυσίμου στον αέρα είναι μεγαλύτερη από 30.000 ppm (η προεπιλεγμένη τιμή του προγράμματος), επεκτείνεται κατά 3400 m περισσότερο από το πιθανό σενάριο, και η κίτρινη ζώνη της ίδιας περιοχής, στην οποία η συγκέντρωση του καυσίμου στον αέρα είναι μεγαλύτερη από 5000 ppm (η προεπιλεγμένη τιμή του προγράμματος), παραμένει μεγαλύτερη από 10 χιλιόμετρα και στις δύο περιπτώσεις μικρότερης και μεγαλύτερης ταχύτητας αέρα. Σε περίπτωση έκρηξης αερίου νέφους, όπως και στο σενάριο δημιουργίας οπής στην δεξαμενή ξηράς, επειδή η οριακή τιμή πίεσης της πιο επικίνδυνης ζώνης, δεν υπερβαίνεται, ο κίνδυνος της καταστροφής και κατάρρευσης των κτιρίων δεν εμφανίζεται. Οι ζώνες όμως, στις οποίες παρατηρούνται σοβαροί τραυματισμοί (πορτοκαλί ζώνη) και επιδράσεις από θραύσματα και κυρίως από κομμάτια γυαλιού που εκτινάσσονται (κίτρινη ζώνη), επεκτείνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, με τον τετραπλασιασμό της ταχύτητας του αέρα, και μάλιστα κατά 2600 m και 2200 m περισσότερο, αντίστοιχα για κάθε ζώνη.

Το φαινόμενο της υπερπίεσης εξετάζεται στο πρόγραμμα, ουσιαστικά με μεταβολή της αρχικής θερμοκρασίας αποθήκευσης του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, και έτσι την εμφάνιση πίεσης στο εσωτερικό της δεξαμενής. Θέτοντας ως αρχικές παραμέτρους, αυτές που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β και με μεταβολές στην θερμοκρασία αποθήκευσης, την πληρότητα της δεξαμενής και την ταχύτητα του αέρα, εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα. Με αύξηση 10% της πληρότητας της δεξαμενής, παρατηρείται μια αύξηση σε όλες τις επικίνδυνες ζώνες. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις των τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, δηλαδή η συγκέντρωση στην οποία πεθαίνει το 50% των ανθρώπων με εισπνοή, η συγκέντρωση στην οποία είναι πιθανό να συμβεί θάνατος στο 1% του πληθυσμού και η συγκέντρωση η οποία μπορεί να προκαλέσει μόνιμες βλάβες στην υγεία, επεκτείνονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες κατά 100 m, συγκριτικά με το πιθανό σενάριο, όπου η πληρότητα της δεξαμενής είναι 10% μικρότερη. (80% συνολικά). Η απόσταση από το σημείο διάρρηξης, που μπορεί να αναπτυχθεί συγκέντρωση του LNG στον αέρα ίση ή μεγαλύτερη από 30.000 ppm (πορτοκαλί ζώνη) και έτσι να δημιουργηθεί εύφλεκτο νέφος ατμών, αυξάνεται κατά 200 m, ενώ η απόσταση που μπορεί να αναπτυχθεί συγκέντρωση καυσίμου στον αέρα ίση ή μεγαλύτερη με 5000 ppm (κίτρινη ζώνη), παραμένει μεγαλύτερη των 10 χιλιομέτρων. Αύξηση παρατηρείται και στις ζώνες λόγω υπερπίεσης του ωστικού κύματος, σε περίπτωση δημιουργίας έκρηξης αερίου νέφους.

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αποθήκευσης, και άρα η τιμή της υπερπίεσης που εμφανίζεται στο εσωτερικό της δεξαμενής (το LNG παραμένει να βρίσκεται υγρό υπό πίεση) παρατηρούνται σχετικά μικρές ελαττώσεις των επικίνδυνων ζωνών. Στην περίπτωση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιλέγεται (ίση με  $-120^{\circ}\text{C}$  από την ανάλυση ευαισθησίας και αυξημένη κατά  $30^{\circ}\text{C}$  από την αρχική τιμή του πιθανού σεναρίου), μόνο η απόσταση της τοξικής κόκκινης ζώνης, μένει

σταθερή στα 1900 m από το σημείο της διάρρηξης, και όλες οι υπόλοιπες τοξικές και εύφλεκτες ζώνες καθώς και ζώνες υπερπίεσης λόγω ωστικού κύματος, μειώνονται ελαφρώς, με μέγιστη διαφορά έως 300 m. Η ποσότητα όμως του LNG που διαφεύγει, μειώνεται σημαντικά, λόγω της έντονης εξάτμισης ενός μέρους του και την μετατροπή του σε αέριο.

Αντίθετα η αύξηση της ταχύτητας του αέρα, επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα αποτελέσματα του πιθανού σεναρίου. Παρόλο που ο διπλασιασμός της τιμής, όπως και στην περίπτωση της υπερπλήρωσης δεν επηρεάζει καθόλου τα αποτελέσματα, ο τετραπλασιασμός επεκτείνει επικίνδυνα τις αποστάσεις των ζωνών. Η μέγιστη συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα (LC<sub>50</sub> ή περισσότερο), επεκτείνεται σε μεγαλύτερη απόσταση (2600 m) από το αρχικό σενάριο (1900 m), το ίδιο και οι οριακές τιμές υπερπίεσης λόγω ωστικού κύματος στις ζώνες II και III, ενώ οι περιοχές στις οποίες είναι δυνατό να εμφανιστεί ανάφλεξη του αερίου νέφους, είναι πλέον μεγαλύτερες κατά 2000 m.

### 7.3 Σενάριο ατυχημάτων 3: Οπή στη δεξαμενή αποθήκευσης του πλοίου

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου, κατά το οποίο δημιουργείται οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης του υγραεριοφόρου πλοίου. Στην αρχή του πίνακα αναλύεται το πιο πιθανό σενάριο, το οποίο αντιστοιχεί στο Παράρτημα Γ, και στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε και στο πρώτο σενάριο της εργασίας. Επειδή η μόνη διαφορά με το σενάριο δημιουργίας οπής στην δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς είναι οι διαστάσεις της δεξαμενής και η πληρότητα της, οι μεταβολές που μελετώνται στις μεταβλητές σχεδιασμού αφορούν μόνο τη δυσμενέστερη περίπτωση, με βάση τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί στο πρώτο σενάριο.

**Πίνακας 10 :** Αποτελέσματα σεναρίου οπής στη δεξαμενή αποθήκευσης πλοίου

Σενάριο	Μεταβλητή σχεδιασμού	Συνέπεια	Απόσταση ζωνών			Διάμετρος λίκνης	Ποσότητα LNG	Ρυθμός διαφυγής	Διαγραμματική απεικόνιση
			Κόκκινη	Πορτοκαλί	Κίτρινη				
<b>Πιθανό σενάριο</b>									
1) Οπή στην δεξαμενή αποθήκευσης πλοίου	$d_{\text{οπή}} = 0,025 \text{ m}$ , 99,5% πληρότητα, ταχύτητα ανέμου 2m/s, θερμοκρασία υγρού - $163^{\circ}\text{C}$ , ύψος οπής 50%	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	20 m	10,4 m	7.862 kg	132 kg/min	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	39 m	-	119 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	26 m	37 m				

		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	14 m	23 m	32 m	5,4 m	8016 kg	134 kg/min	
<b>Ανάλυση ευαισθησίας</b>									
	$d_{opt} = 0,1 \text{ m}$	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	23 m	30 m	58 m	42 m	124.928 kg	2.120 kg/min	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	115 m	-	372 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	78 m	111 m				

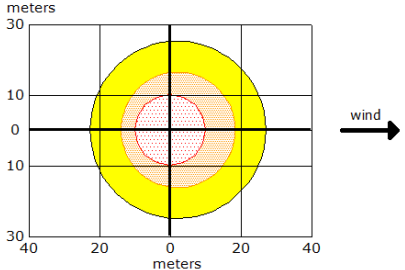
		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	44 m	73 m	103 m	22 m	127.822 kg	2.140 kg/min	
	<b>Πληρότητα δεξαμενής 90%</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	18 m	9,1 m	6.113 kg	102 kg/min	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	34 m	-	106 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	25 m	33 m				

		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	12	20	28	4,8 m	6.232 kg	104 kg/min	
Υψος οπής 10% από τον πυθμένα	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	11 m	22 m	12,4 m	11.206 kg	188 kg/min	-	
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	44 m	-	138 m					
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	28 m	43 m					



		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	16 m	26 m	37 m	6,5 m	11.426 kg	191 kg/min	
	Ταχύτητα ανέμου 4 m/s	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m	10 m	23 m	9,9 m	7.879 m	132 kg/min	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	41 m	-	128 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	28 m	38 m				

		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	18 m	24 m	32 m	5,4 m	8.016 m	134 kg/min	
	Θερμοκρασί α LNG -150°C	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	21 m	27 m	48 m	-	-	-	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	71 m	-	185 m	-			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	60 m	75 m	-			

		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	10 m	18 m	27 m				
--	--	---	------	------	------	--	--	--	---

Η διάμετρος της οπής, λαμβάνει την μεγαλύτερη δυνατή τιμή (0.1 m), το ύψος της οπής επιλέγεται στην μικρότερη δυνατή απόσταση από τον πυθμένα της δεξαμενής (10%), η ταχύτητα του ανέμου διπλασιάζεται (4 m/s) και η θερμοκρασία αποθήκευσης αυξάνεται κατά 13°C. Η πληρότητα της δεξαμενής μειώνεται κατά 9.5%, για να επιβεβαιωθεί ότι το χειρότερο σενάριο, όσον αφορά την μεταβλητή αυτή, είναι το αρχικό στο οποίο λαμβάνει και τη μέγιστη δυνατή τιμή της (99.5%). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί, πως η αρχική πληρότητα της δεξαμενής του πλοίου, λαμβάνεται ίση με 99,5%, γιατί μέχρι το σημείο αυτό γεμίζει η δεξαμενή κατά τη φόρτωση, οπότε είναι και το σημείο από το οποίο ξεκινά η εκφόρτωση. Θεωρείται λοιπόν ότι το ατύχημα συμβαίνει κατά την έναρξη της διαδικασίας εκφόρτωσης ή κατά την λήξη της διαδικασίας φόρτωσης (πιθανό σενάριο) και στην ανάλυση ευαισθησίας που ακολουθεί σε κάποια ενδιάμεση κατάσταση.

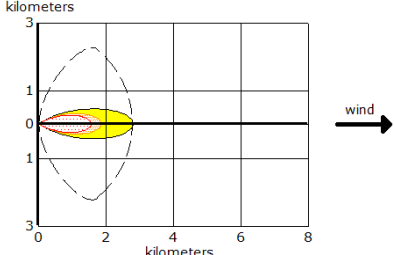
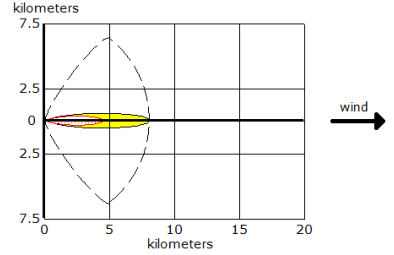
Σε περίπτωση δημιουργίας πυρκαγιάς λίμνης, η μέγιστη ένταση θερμικής ακτινοβολίας ( $15 \text{ kW/m}^2$ ) που προκαλεί εγκαύματα γ' βαθμού στο 50% του πληθυσμού, ίσως και θανάσιμα, θα επεκταθεί σε μία απόσταση 44 m από το σημείο διαρροής σχεδόν τετραπλάσια από την απόσταση της κόκκινης ζώνης του πιθανού σεναρίου ίση με 14 m, με αύξηση της διαμέτρου της οπής. Παράλληλα η μέση ένταση θερμικής ακτινοβολίας ( $6 \text{ kW/m}^2$ ), που προκαλεί σοβαρούς τραυματισμούς και εγκαύματα γ' βαθμού στο 1% του πληθυσμού, θα επεκταθεί 50 m περισσότερο και η μικρότερη αλλά όχι ασήμαντη ένταση θερμικής ακτινοβολίας ( $3 \text{ kW/m}^2$ ), θα επεκταθεί 71 m περισσότερο. Η διάμετρος της ίδιας της λίμνης, από 10,4 m, θα αυξηθεί στα 22 m, ενώ η ποσότητα του LNG που θα διαφύγει θα είναι 16 φορές μεγαλύτερη, αν η διάμετρος της οπής μεταβληθεί από 0.025 m σε 0.1 m. Σε περίπτωση που η λίμνη δεν αναφλεγεί, η κόκκινη ζώνη της μέγιστης συγκέντρωσης τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, θα επεκταθεί κατά 13 m, σε σχέση και πάλι με το πιθανό σενάριο, η εύφλεκτη περιοχή του αερίου νέφους, στην οποία η συγκέντρωση του LNG στον αέρα είναι μεγαλύτερη από το 60% του LFL, θα φτάσει σε μία απόσταση 115 m, ενώ η εύφλεκτη περιοχή, στην οποία η συγκέντρωση του LNG είναι μεγαλύτερη από το 10% του LFL, θα φτάσει σε μία απόσταση 372 m. Τέλος σε περίπτωση δημιουργίας έκρηξης αερίου νέφους, η μέγιστη τιμή υπερπίεσης των 140 mbar (η τιμή 350 mbar παρόλο που ορίζεται δεν ξεπερνιέται σε κανένα σενάριο), θα δημιουργήσει την πορτοκαλί ζώνη, όπως φαίνεται και στις διαγραμματικές απεικονίσεις, η οποία θα εξαπλωθεί σε απόσταση 78 m (52 m περισσότερο από το αρχικό σενάριο) και η τιμή υπερπίεσης των 50 mbar, θα δημιουργήσει την κίτρινη ζώνη, που θα εξαπλωθεί σε απόσταση 111 m (74 m περισσότερο).

Με αύξηση της απόστασης της οπής από την κορυφή της δεξαμενής, καθώς και διπλασιασμό της ταχύτητας του αέρα (όχι τετραπλασιασμό γιατί οδηγεί σε μείωση των ζωνών όπως παρουσιάστηκε στο πρώτο σενάριο), παρατηρείται ξανά μια μικρή επέκταση των ζωνών, με την αύξηση όμως της διαμέτρου της οπής να παραμένει το δυσμενέστερο σενάριο. Μάλιστα η αύξηση κατά 40% του ύψους της οπής από την κορυφή της δεξαμενής, δεν επηρεάζει καθόλου την τοξική κόκκινη ζώνη, κατά τη δημιουργία της εξατμιζόμενης λίμνης LNG, ενώ ο διπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα, δεν επιφέρει καμία αλλαγή στην τοξική κόκκινη ζώνη και στην πορτοκαλί ζώνη της έκρηξης αερίου νέφους.

## 7.4 Σενάριο ατυχημάτων 4: Ολική διάρρηξη δεξαμενή αποθήκευσης πλοίου

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου ολικής διάρρηξης της δεξαμενής αποθήκευσης του πλοίου, λόγω υπερπλήρωσης και υπερπίεσης. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι τιμές της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας αποθήκευσης, στην ανάλυση ευαισθησίας, επιλέγονται κατάλληλα, ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, θα είναι δυσμενέστερα ή αρκετά διαφορετικά του πιθανού σεναρίου. Η επιλογή αυτή, ουσιαστικά, γίνεται από τον πίνακα αποτελεσμάτων του δεύτερου σεναρίου, όπου πραγματοποιείται και εκεί ολική διάρρηξη, αλλά αυτή τη φορά της δεξαμενής αποθήκευσης ξηράς, η οποία διαφέρει μόνο στις διαστάσεις με την σφαιρική δεξαμενή του πλοίου.

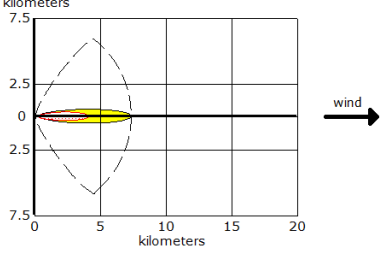
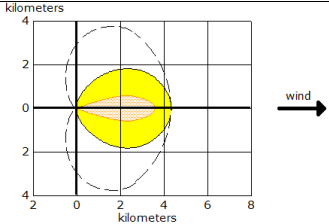
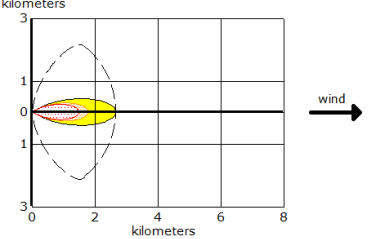
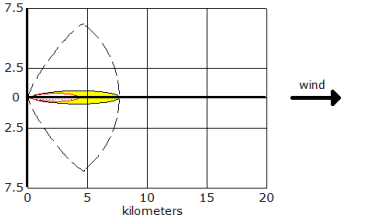
**Πίνακας 11 : Αποτελέσματα σεναρίου ολικής διάρρηξης δεξαμενής πλοίου**

Σενάριο	Μεταβλητή σχεδιασμού	Συνέπεια	Απόσταση ζωνών			Ποσότητα LNG	Ρυθμός διαφυγής	Διαγραμματική απεικόνιση
			Κόκκινη	Πορτοκαλί	Κίτρινη			
<b>Πιθανό σενάριο υπερπλήρωσης</b>								
2) Ολική διάρρηξη δεξαμενής αποθήκευσης πλοίου	Ταχύτητα ανέμου 2m/s, θερμοκρασία LNG -163°C	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1600 m	1900 m	2800 m	14.866.051 kg	248.000 kg/sec	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	4500 m	-	8100 m			

		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	4000 m	4800 m					
<b>Ανάλυση ευαισθησίας για το σενάριο της υπερπλήρωσης</b>										
<b>Ταχύτητα ανέμου 8 m/s</b>		Τοξική περιοχή αερίου νέφους	2000 m	2500 m	3900 m	14.866.051 kg	248.000 kg/sec			
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	6700 m	-	> 10.000 m					
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	5700 m	6200 m					

Πιθανό σενάριο υπερπίεσης							
Πληρότητα δεξαμενής 99,5%, θερμοκρασία LNG -150°C, ταχύτητα ανέμου 2 m/s	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1500 m	1800 m	2700 m	11.336.137 kg	189.000 kg/sec	
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	4.400 m	-	7.900 m			
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	3800 m	4600 m			
Ανάλυση ευαισθησίας για το σενάριο υπερπίεσης							
	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1400 m	1700 m	2600 m			



	<b>Πληρότητα δεξαμενής 80%</b>	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	4100 m	-	7400 m	11.336.137 kg	189.000 kg/sec	
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	3600 m	4400 m			
	<b>Θερμοκρασία LNG -140°C</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1500 m	1800 m	2700 m	12.913.406 kg	215.000 kg/sec	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	4300 m	-	7800 m			

		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	3800 m	4500 m			
	<b>Ταχύτητα ανέμου 8 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	1900 m	2400 m	3800 m	13.461.663 kg	224.000 kg/sec	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	6400 m	-	> 10.000 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	5500 m	6000 m			

Αν η ολική διάρρηξη της δεξαμενής, προκύψει από υπερπλήρωσή της, κατά τη διαδικασία φόρτωσης LNG από χερσαίο τερματικό σταθμό, τότε η μέγιστη συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα ( $LC_{50}$  ή περισσότερο) στην οποία πεθαίνει το 50% του πληθυσμού, θα επεκταθεί σε μια απόσταση 1600 m από το σημείο του ατυχήματος, η μέση συγκέντρωση ( $LC_1$  ή περισσότερο) στην οποία είναι πιθανό να συμβεί θάνατος στο 1% του πληθυσμού, σε μια απόσταση 1900 m και η μικρότερη (IDLH), η οποία μπορεί να προκαλέσει μόνιμες βλάβες στην υγεία του ανθρώπου ο οποίος θα εκτεθεί σε αυτή, σε μια απόσταση 2800 m. Οι τοξικές αυτές ζώνες μεγαλώνουν με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα, και η μέγιστη τιμή τους παρατηρείται με τον τετραπλασιασμό της τελευταίας (8 m/s). Η κόκκινη ζώνη επεκτείνεται για ακόμη 400 m (2000 m συνολικά), η πορτοκαλί για 600 m (2500 m συνολικά) και η κίτρινη για 1100 m ακόμη (3900 m συνολικά). Αν κατά τη διάρκεια φόρτωσης LNG στο υγραεριοφόρο πλοίο, αυξηθεί η θερμοκρασία αποθήκευσης του προϊόντος και στη συνέχεια πραγματοποιηθεί η υπερπλήρωσή της, τότε οι τοξικές ζώνες δεν επηρεάζονται, παρά μόνο η πιο επικίνδυνη, η κόκκινη η οποία θα μειωθεί κατά 100 m (1800 m συνολικά). Επιπλέον η ποσότητα του LNG που απελευθερώνεται ακαριαία στην ατμόσφαιρα μειώνεται σημαντικά, αφού η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην εξάτμιση ενός μέρους του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου και την μετατροπή του σε ατμούς.

Η περιοχή εξάπλωσης του LNG, στην οποία η συγκέντρωση του καυσίμου στον αέρα είναι μεγαλύτερη από την άνω οριακή τιμή ( $LOC = 60\%$  του LFL) και μπορεί να αναφλεγεί προκαλώντας flash fire, επεκτείνεται για 4500 m, ενώ η περιοχή στην οποία η συγκέντρωση είναι μεγαλύτερη από την κάτω οριακή τιμή ( $LOC = 10\%$  του LFL) και εξίσου μπορεί να αναφλεγεί, επεκτείνεται για 8100 m. Η αύξηση της ταχύτητας του αέρα, οδηγεί στην αύξηση αυτών των ζωνών, με την κόκκινη ζώνη να φτάνει τα 6700 m και την κίτρινη περισσότερο από 10 χιλιόμετρα, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας αποθήκευσης κατά  $8^{\circ}C$ , δεν τις μεταβάλλει καθόλου.

Αν η υπερπλήρωση της δεξαμενής, οδηγήσει σε ολική διάρρηξη της, που θα έχει ως επακόλουθο την δημιουργία έκρηξης αερίου νέφους, τότε η τιμή της υπερπίεσης των 140 mbar δημιουργεί την πορτοκαλί Ζώνη II, που επεκτείνεται 4000 m από το σημείο του ατυχήματος, και η τιμή της υπερπίεσης λόγω ωστικού κύματος των 50 mbar, που δημιουργεί την κίτρινη Ζώνη III, επεκτείνεται για 4800 m. Ο τετραπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα, μεγαλώνει κατά 1700 m την πορτοκαλί ζώνη και κατά 1400 m την κίτρινη, σε αντίθεση με την αύξηση της θερμοκρασίας του LNG ( $-155^{\circ}C$ ), που μειώνει κατά 100 m και τις δύο ζώνες.

Αν η ολική διάρρηξη της δεξαμενής του πλοίου, προκύψει από τη δημιουργία υπερπίεσης στο εσωτερικό, αρχικά συμπεραίνεται πως αποτελεί καλύτερο σενάριο από την ολική διάρρηξη λόγω υπερπλήρωσης, διότι οι επικίνδυνες ζώνες αναπτύσσονται σε μικρότερες αποστάσεις, με διαφορά 100 ή 200 m η κάθε μία. Επίσης επιβεβαιώνεται, πως το πιο πιθανό σενάριο, στο οποίο η δεξαμενή είναι γεμάτη κατά 99,5%, είναι και το δυσμενέστερο σε ότι έχει να κάνει με την πληρότητα της δεξαμενής, αφού έχει επιλεγεί η μέγιστη τιμή πληρότητας.

Παρόμοια με την περίπτωση της υπερπλήρωσης, η αύξηση της ταχύτητας του αέρα, οδηγεί σε σχεδόν ίδια επέκταση όλων των ζωνών, τοξικών, εύφλεκτων και ζωνών υπερπίεσης, ενώ η δημιουργία μεγαλύτερων υπερπίεσεων (αύξηση δηλαδή της θερμοκρασίας αποθήκευσης από  $-150^{\circ}C$  σε  $-140^{\circ}C$ ) μεταβάλλει μόνο κατά 100 m λιγότερο την εύφλεκτη περιοχή του αερίου νέφους, και ελαττώνει κατά 100 m επίσης, την απόσταση στην οποία αναπτύσσεται η μικρότερη τιμή υπερπίεσης λόγω ωστικού κύματος, σε περίπτωση δημιουργίας έκρηξης αερίου νέφους (κίτρινη ζώνη).

## 7.5 Σενάριο ατυχημάτων 5: Οπή στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG

Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου, κατά το οποίο δημιουργείται οπή διαμέτρου 0,025 m στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG από χειρσαίο τερματικό σταθμό σε πλοίο και το αντίστροφο. Τα αποτελέσματα με μπλε χρώμα, αναφέρονται στην διαρροή Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στη θάλασσα και έχουν μελετηθεί μόνο για τις περιπτώσεις τοξικότητας και έκρηξης αερίου νέφους, αλλά χωρίς φλόγα, όπως εξηγείται και στο Υποκεφάλαιο 6.6.1 της εργασίας με το φαινόμενο της Γρήγορης Μετάβασης Φάσης.

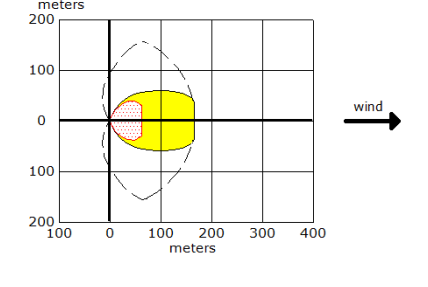
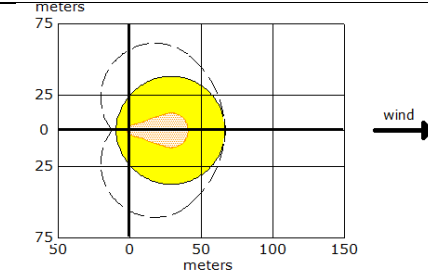
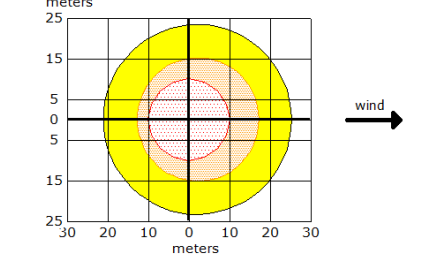
**Πίνακας 12 : Αποτελέσματα σεναρίου οπής στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG**

Σενάριο	Μεταβλητή σχεδιασμού	Συνέπεια	Απόσταση ζωνών			Διάμετρος λίκνης	Ποσότητα LNG που διαφεύγει	Ρυθμός διαφυγής	Διαγραμματική απεικόνιση διαρροής σε έδαφος
			Κόκκινη	Πορτοκαλί	Κίτρινη				
<b>Πιθανό σενάριο</b>									
1)Οπή στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG	d <sub>οπής</sub> = 0,025 m, 100% πληρότητα, ταχύτητα ανέμου 2m/s, θερμοκρασία υγρού LNG -163°C, ύψος οπής 50%	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m <b>10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	11 m <b>20 m</b>	2,9 m <b>4,3 m</b>	344 kg <b>344 kg</b>	50,4 kg/min <b>57,2 kg/min</b>	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	23 m	-	71 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	14 m <b>17 m</b>	25 m <b>29 m</b>				

		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	< 10 m	15 m	21 m	3,4 m	344 kg	53,5 kg/min	
<b>Ανάλυση ευαισθησίας</b>									
<b>d<sub>οπής</sub> = 0,1 m</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m <b>12 m</b>	11 m <b>18 m</b>	25 m <b>33 m</b>	8,7 m <b>10,9 m</b>	344 kg <b>344 kg</b>	5,74 kg/min <b>5,74 kg/min</b>	-	
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	52 m	-	161 m					
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	38 m <b>39 m</b>	52 m <b>57 m</b>					

		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	18 m	32 m	46 m	8,7 m	344 kg	5,83 kg/min	
Υψος οπής 10% από τον πυθμένα	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	10 m <b>&lt; 10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	14 m <b>22 m</b>	4 m <b>5,3 m</b>	620 kg <b>620 kg</b>	76,3 kg/min <b>90,5 kg</b>	-	
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	28 m	-	85 m					
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	16 m <b>20 m</b>	29 m <b>35 m</b>					
	Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	12 m	19 m	26 m				4,4 m	620 kg

		Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>11 m</b>	11 m <b>11 m</b>	11 m <b>26 m</b>				-
<b>Ταχύτητα ανέμου 4 m/s</b>		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	23 m	-	68 m	2,8 m	344 kg	51,2 kg/min	
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	13 m <b>26 m</b>	23 m <b>33 m</b>	<b>5,3 m</b>	<b>344 kg</b>	<b>57,2 kg/min</b>	
		Θερμική ακτινοβολία πυρκαγιάς λίμνης	12 m	26 m	21 m	3,4 m	344 kg	53,5 kg/min	
		Τοξική περιοχή αερίου νέφους	18 m <b>78 m</b>	23 m <b>100 m</b>	44 m <b>178 m</b>				-

	<b>Θερμοκρασί α LNG -150°C</b>	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	63 m	-	167 m				
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	42 m <b>138 m</b>	67 m <b>172 m</b>	-	595 kg <b>595 kg</b>	193 kg/min <b>193 kg/min</b>	
		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	10 m	17 m	25 m				



Όπως φαίνεται και στον πίνακα σύνοψης των αποτελεσμάτων, η διαρροή LNG σε νερό, παρόλο που δεν μελετάται ως πυρκαγιά λίμνης και έκρηξη με φλόγα, είναι πιο επικίνδυνη από την διαρροή LNG στο έδαφος, σε ότι αφορά την τοξικότητα στην ατμόσφαιρα και κυρίως τις υπερπίεσεις λόγω ωστικού κύματος από το φαινόμενο της Γρήγορης Μετάβασης Φάσης. Στην περίπτωση εμφάνισης του πιο πιθανού σεναρίου, διαφορές παρατηρούνται στις εξής περιοχές: η κίτρινη ζώνη της μικρότερης συγκέντρωσης τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, αυξάνεται κατά 9 m στην περίπτωση διαρροής LNG στη θάλασσα, και οι ζώνες μέσης και μικρότερης υπερπίεσης επεκτείνονται περισσότερο κατά 3 και 4 m αντίστοιχα. Η αύξηση αυτή στις ζώνες που αναφέρθηκαν, αλλά και στις υπόλοιπες ζώνες τοξικότητας, παρατηρείται και στην ανάλυση ευαισθησίας που ακολουθεί, τόσο συγκριτικά με την διαρροή LNG στο έδαφος, όσο και με την αλλαγή των μεταβλητών σχεδιασμού για το ίδιο το σενάριο διαρροής LNG σε νερό.

Με την αύξηση της διαμέτρου της οπής, ενώ στην περίπτωση διαρροής σε έδαφος, η κόκκινη και η πορτοκαλί ζώνη τοξικότητας παραμένουν αμετάβλητες, στην περίπτωση διαρροής σε νερό η μέγιστη συγκέντρωση  $LC_{50}$  θα αναπτυχθεί σε μία απόσταση μεγαλύτερη κατά 2 m, και η μέση συγκέντρωση  $LC_1$  σε μια απόσταση μεγαλύτερη κατά 7 m. Η μικρότερη συγκέντρωση τοξικών ουσιών IDLH και στις δύο περιπτώσεις θα επεκταθεί περισσότερο από το αρχικό σενάριο, σε μία απόσταση που θα φτάσει τα 14 m στην διαρροή στο έδαφος, και τα 13 m στην διαρροή σε νερό. Σε περίπτωση έκρηξης, οι αποστάσεις των υπερπίεσεων 140 και 50 mbar, από το σημείο διαρροής, επίσης θα αυξηθούν κατά μέσο όρο περίπου 25 m και στις δύο περιπτώσεις. Αν η διαρροή στο έδαφος οδηγήσει σε πυρκαγιά λίμνης διαμέτρου 8,7 m (μεγαλύτερη κατά 5,3 m), τότε η μέγιστη ένταση θερμικής ακτινοβολίας ( $15 \text{ kW/m}^2$ ) θα φτάσει τα 18 m, η μέση ένταση ( $6 \text{ kW/m}^2$ ) τα 32 m και η μικρότερη αλλά εξίσου σημαντική ( $3 \text{ kW/m}^2$ ) τα 46 m.

Με την αύξηση του ύψους της οπής, προβλέπονται και πάλι μεγαλύτερες επικίνδυνες ζώνες για κάθε περίπτωση, σε σύγκριση με το πιο πιθανό σενάριο πάντα, αλλά όχι με μεγάλη διαφορά όπως με την αύξηση της διαμέτρου της οπής. Όσον αφορά την διαρροή σε έδαφος, η μεγαλύτερη αύξηση γίνεται στην κίτρινη ζώνη της εύφλεκτης περιοχής αερίου νέφους, όπου η συγκέντρωση LNG στον αέρα, ξεπερνάει το 10% του LFL (αύξηση κατά 14 m), ενώ όσον αφορά τη διαρροή σε νερό, παρατηρούνται σχετικές ελαττώσεις ή αμελητέες διαφορές στις ζώνες τοξικότητας και στις ζώνες υπερπίεσεων, λόγω ωστικού κύματος, της Γρήγορης Μετάβασης Φάσης.

Με τον διπλασιασμό της ταχύτητας του αέρα, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα : για την περίπτωση διαρροής σε τσιμεντένιο έδαφος, όλες οι επικίνδυνες ζώνες εκτός από τις ζώνες της πυρκαγιάς λίμνης μειώνονται ή παραμένουν στις ίδιες αποστάσεις. Οι τελευταίες παρουσιάζουν μια σχετική αύξηση, αλλά μόνο στην κόκκινη και πορτοκαλί περιοχή της μέγιστης και μέσης έντασης θερμικής ακτινοβολίας. Για την περίπτωση διαρροής σε νερό, όλες οι επικίνδυνες ζώνες παρουσιάζουν μια άνοδο στην απόσταση που επεκτείνονται από το σημείο διαρροής του βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης, εκτός από την πορτοκαλί τοξική ζώνη, που παραμένει αμετάβλητη στα 11 m.

Το δυσμενέστερο σενάριο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του μεταφερόμενου LNG από  $-163^\circ\text{C}$  στους  $-150^\circ\text{C}$ . Στην περίπτωση αυτή, όλες οι αποστάσεις των ζωνών τοξικότητας, αναφλεξιμότητας και υπερπίεσης, παρουσιάζουν την μέγιστη δυνατή τιμή τους, με εξαίρεση τις ζώνες πυρκαγιάς λίμνης. Οι μεγαλύτερες επεκτάσεις των ζωνών, παρατηρούνται στην περίπτωση διαρροής LNG σε νερό. Για παράδειγμα η μέγιστη συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, επεκτείνεται σε απόσταση 78 m, σε σχέση με την αρχική απόσταση των 10 m, η μέση συγκέντρωση σε 100 m, σε σχέση με την αρχική των 11 και η μικρότερη σε απόσταση 178 m, σε σχέση με την απόσταση του πιθανού σεναρίου, που είναι ίση με 20 m. Το ίδιο συμβαίνει και με τις ζώνες υπερπίεσης, όπου η τιμή των 140 mbar θα φτάσει σε απόσταση

μεγαλύτερη κατά 121 m της αρχικής και η τιμή των 50 mbar, σε απόσταση μεγαλύτερη κατά 143 m.

## 7.6 Σενάριο ατυχημάτων 6: Ολική διάρρηξη βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG

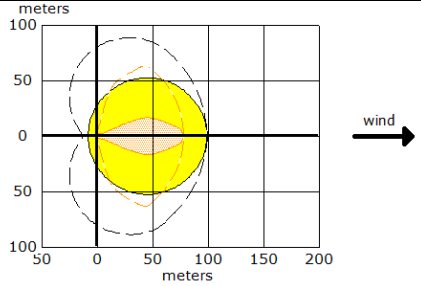
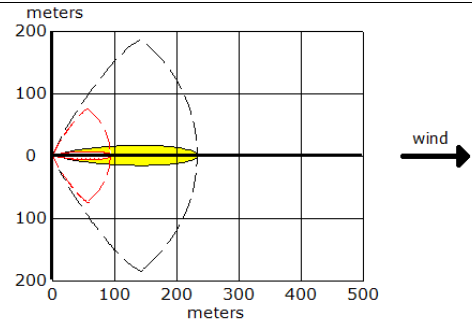
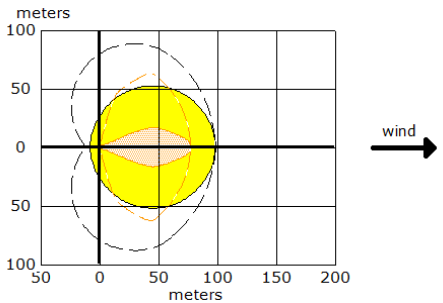
Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου, κατά το οποίο πραγματοποιείται ολική διάρρηξη του βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG, κατά τη μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου από χερσαίο τερματικό σταθμό σε πλοίο και το αντίστροφο. Τα αποτελέσματα με μπλε χρώμα, αναφέρονται στην ακαριαία απελευθέρωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στη θάλασσα και έχουν μελετηθεί μόνο για τις περιπτώσεις τοξικότητας και έκρηξης αερίου νέφους, αλλά χωρίς φλόγα, όπως εξηγείται και στο Υποκεφάλαιο 6.6.1 της εργασίας με την Γρήγορη Μετάβαση Φάσης.

**Πίνακας 13: Αποτελέσματα σεναρίου ολική διάρρηξης βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG**

Σενάριο	Μεταβλητή σχεδιασμού	Συνέπεια	Απόσταση ζωνών			Ποσότητα LNG που διαφεύγει	Ρυθμός διαφυγής	Διαγραμματική απεικόνιση για ολική διάρρηξη σε έδαφος
			Κόκκινη	Πορτοκαλί	Κίτρινη			
<b>Πιθανό σενάριο</b>								
2) Ολική διάρρηξη βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG	Ταχύτητα ανέμου 2m/s, θερμοκρασία LNG -163°C, πληρότητα 100%	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	19 m 62 m	25 m 82 m	47 m 156 m	688 kg	11,5 kg/sec	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	97 m	-	238 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	79 m	100 m			

				241 m	259 m			
<b>Ανάλυση ευαισθησίας</b>								
<b>Ταχύτητα ανέμου 4 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	27 m <b>44 m</b>	36 m <b>58 m</b>	67 m <b>110 m</b>	688 kg	11,5 kg/sec		
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	144 m	-	378 m				
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	111 m <b>170 m</b>	125 m <b>184 m</b>				

	<b>Ταχύτητα ανέμου 8 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	19 m <b>31 m</b>	25 m <b>41 m</b>	47 m <b>77 m</b>	688 kg	11,5 kg/sec	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	100 m	-	258 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	78 m <b>112 m</b>	88 m <b>128 m</b>			
	<b>Θερμοκρασία LNG -160°C</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	19 m <b>62 m</b>	25 m <b>81 m</b>	47 m <b>155 m</b>	681 kg	11,3 kg/sec	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	96 m	-	237 m			

		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	79 m 239 m	100 m 258 m			
Θερμοκρασία LNG -155°C	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	19 m 61 m	25 m 81 m	46 m 154 m	669 kg	11,1 kg/sec	-	
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	96 m	-	235 m				
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	78 m 237 m	99 m 256 m				

<b>Πληρότητα δεξαμενής 80%</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	17 m <b>55 m</b>	22 m <b>74 m</b>	42 m <b>139 m</b>	550 kg	9,17 kg/sec	-
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	86 m	-	213 m			
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	72 m <b>217 m</b>	90 m <b>233 m</b>			

Σε όλα τα σενάρια που μελετώνται, τόσο στο πιο πιθανό σενάριο, όσο και στην ανάλυση ευαισθησίας, η ολική διάρρηξη του βραχίονα στη θάλασσα, επιφέρει σημαντικότερες επιπτώσεις απ'ότι η ολική διάρρηξη σε τσιμεντένιο έδαφος. Η μέγιστη συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, ικανή να προκαλέσει τον θάνατο του 50% του πληθυσμού με εισπνοή της, επεκτείνεται σε μια απόσταση 62 m, σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερη, από την απόσταση στην οποία επεκτείνεται η ίδια συγκέντρωση τοξικών ουσιών, όταν η ολική διάρρηξη πραγματοποιείται σε τσιμεντένιο έδαφος. Η μέση τιμή υπερπίεσης, των 140 mbar, λόγω ωστικού κύματος, που δημιουργεί ζημιές σε οποιοδήποτε οργανισμό και σε εξωτερικούς και εσωτερικούς τοίχους, σε περίπτωση δημιουργίας του φαινομένου Γρήγορης Μετάβασης Φάσης, επεκτείνεται σε μια απόσταση 241 m, σε σχέση με τα 79 m που επεκτείνεται η ίδια τιμή υπερπίεσης, σε περίπτωση δημιουργίας έκρηξης αερίου νέφους (στο έδαφος).

Όσον αφορά την ολική διάρρηξη σε έδαφος, παρόλο που με τον διπλασιασμό της ταχύτητας του αέρα, αυξάνεται αρκετά η εμβέλεια των επικίνδυνων ζωνών, ο τετραπλασιασμός οδηγεί είτε σε πολύ μικρή αύξηση, είτε σε πολύ μικρή μείωση, είτε δεν προκαλεί καμία μεταβολή. Για παράδειγμα η κόκκινη ζώνη της εύφλεκτης περιοχής του αερίου νέφους, του πιο πιθανού σεναρίου φτάνει τα 97 m, ενώ με τον διπλασιασμό της ταχύτητας του αέρα (4 m/s) φτάνει τα 144 m και με τον τετραπλασιασμό (8 m/s) φτάνει τα 100 m. Οι τοξικές ζώνες με τον τετραπλασιασμό της ταχύτητας του αέρα, δεν μεταβάλλονται καθόλου, ενώ με τον διπλασιασμό επεκτείνονται κατά 8 και 11 m η κόκκινη και η πορτοκαλί αντίστοιχα, και κατά 20 m η κίτρινη ζώνη. Τέλος οι ζώνες υπερπίεσης αυξάνονται όταν η ταχύτητα του αέρα ισούται με 4 m/s και ελαττώνονται όταν ισούται με 8 m/s, συγκριτικά πάντα με το αρχικό σενάριο όπου ισούται με 2 m/s. Αντίθετα, όσον αφορά την ολική διάρρηξη του βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης σε νερό, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα, τόσο μειώνεται η εμβέλεια των επικίνδυνων τοξικών ζωνών και ζωνών υπερπίεσης.

Η αύξηση κατά 3°C του μεταφερόμενου Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου δεν επηρεάζει την απόσταση που αναπτύσσονται οι επικίνδυνες ζώνες. Παρατηρείται μόνο μια αμελητέα μείωση (1-2 m) των τοξικών ζωνών και των ζωνών υπερπίεσης, στην περίπτωση απελευθέρωσης του LNG στη θάλασσα, και των εύφλεκτων ζωνών, στην περίπτωση απελευθέρωσης σε ξηρό έδαφος. Αν η θερμοκρασία του LNG αυξηθεί περισσότερο, (κατά 8°C), λόγω ίσως αποτυχημένης διαδικασίας ψύξης των βραχιόνων και έτσι δημιουργία boil-off gas, παρατηρείται ξανά μια μείωση των αποστάσεων των ζωνών με την μεγαλύτερη να φτάνει τα 3 m. Οι αποστάσεις των τοξικών ζωνών, στις οποίες αναπτύσσονται οι συγκεντρώσεις LC<sub>50</sub> και LC<sub>1</sub>, παραμένουν αμετάβλητες.

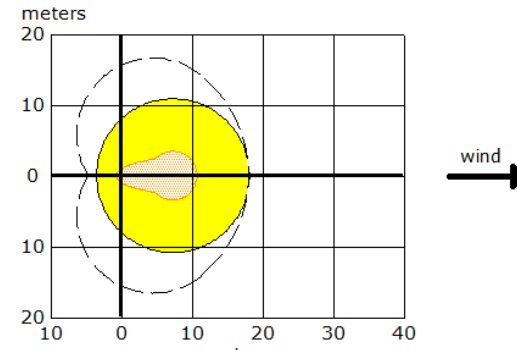
Όπως συμβαίνει και στα προηγούμενα σενάρια που μελετήθηκαν, η δυσμενέστερη περίπτωση παρατηρείται όταν η πληρότητα της δεξαμενής ή του βραχίονα είναι 100%. Στο σενάριο δημιουργίας οπής στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης, καθώς και στο σενάριο ολικής διάρρηξής του, θεωρείται ότι ο εξοπλισμός λειτουργεί με μέγιστο ρυθμό φόρτωσης ή εκφόρτωσης, επομένως είναι πλήρης κατά 100%. Με την μείωση της πληρότητας στο 80%, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 12, όλες οι επικίνδυνες ζώνες ελαττώνονται σημαντικά. Για παράδειγμα σε περίπτωση εμφάνισης Γρήγορης Μετάβασης Φάσης, η μέση υπερπίεση θα επεκταθεί 217 m από το σημείο του ατυχήματος (241 m με 100% πληρότητα) και η μικρότερη υπερπίεση σε 233 m (259 m με 100% πληρότητα), ενώ σε περίπτωση διάρρηξης σε ξηρή επιφάνεια και εμφάνισης έκρηξης αερίου νέφους, η μέση υπερπίεση των 140 mbar θα επεκταθεί σε μια απόσταση 72 m (79 m με 100% πληρότητα) και η μικρότερη τιμή υπερπίεσης των 50 mbar σε 90 m (100 m με 100% πληρότητα). Ανάλογα μειώνονται και οι τοξικές ζώνες, ανεξάρτητα από το είδος του εδάφους, καθώς και η περιοχή όπου είναι δυνατό να εμφανιστεί εύφλεκτο μίγμα στην ατμόσφαιρα.

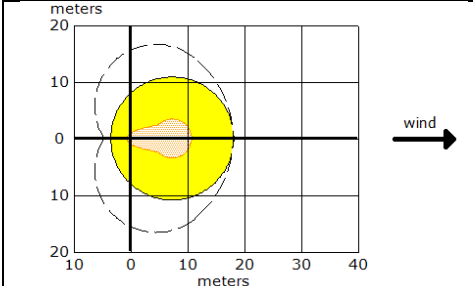


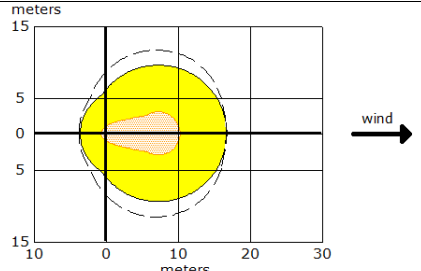
## 7.7 Σενάριο ατυχημάτων 7: Οπή στον βραχίονα επιστροφής ατμών LNG

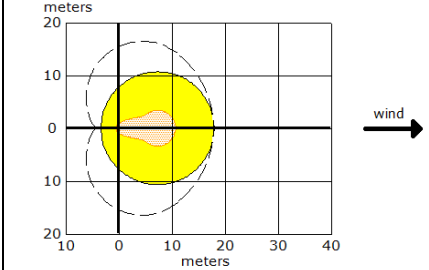
Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου, κατά το οποίο δημιουργείται οπή στον βραχίονα επιστροφής ατμών LNG, κατά τη μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου από χερσαίο τερματικό σταθμό σε πλοίο και το αντίστροφο. Τα αποτελέσματα με μπλε χρώμα, αναφέρονται στην διαρροή ατμών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου σε ανοιχτή θάλασσα και έχουν μελετηθεί μόνο για τις περιπτώσεις τοξικότητας και έκρηξης αερίου νέφους, αλλά χωρίς φλόγα, όπως εξηγείται και στο Υποκεφάλαιο 6.6.1 της εργασίας με το φαινόμενο της Γρήγορης Μετάβασης Φάσης.

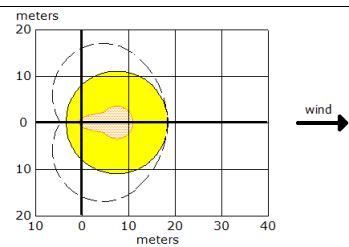
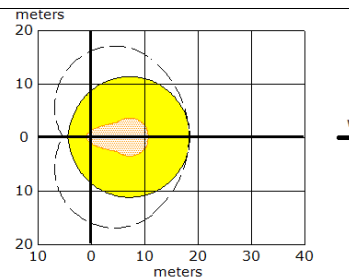
**Πίνακας 14 : Αποτελέσματα σεναρίου οπής στον βραχίονα επιστροφής ατμών LNG**

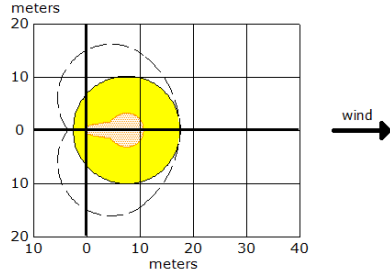
Σενάριο	Μεταβλητή σχεδιασμού	Συνέπεια	Απόσταση ζωνών			Ποσότητα LNG που διαφεύγει	Ρυθμός διαφυγής	Διαγραμματική απεικόνιση διαρροής σε έδαφος
			Κόκκινη	Πορτοκαλί	Κίτρινη			
1)Οπή στον βραχίονα επιστροφής ατμών LNG	d <sub>οπής</sub> = 0,025 m, ταχύτητα ανέμου 2m/s, θερμοκρασία ατμών LNG -140°C, πίεση ατμών 2,5 atm	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	3,39 kg <b>3,39 kg</b>	56,5 gr/sec <b>56,5 gr/sec</b>	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	22 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <b>&lt;10 m</b>	18 m <b>14 m</b>			

		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	<10 m	<10 m	<10 m	3,39 kg	198 gr/sec	-
$d_{οπής} = 0,1 \text{ m}$	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	3,39 kg <b>3,39 kg</b>	56,5 gr/sec <b>56,5 gr/sec</b>	-	
	Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	22 m			-	
	Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <b>&lt;10 m</b>	18 m <b>14 m</b>				
	Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	10 m	10 m	10 m			3,39 kg	3,17 gr/sec

	<b>Ταχύτητα ανέμου 4 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	3,39 kg <b>3,39 kg</b>	56,5 gr/sec <b>56,5 kg</b>	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	20 m			-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	10 m <b>12 m</b>	17 m <b>13 m</b>			
		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	<10 m	<10 m	<10 m			3,39 kg
	<b>Ταχύτητα ανέμου 8 m/s</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>11 m</b>	3,39 kg <b>3,39 kg</b>	56,5 gr/sec <b>56,5 gr/sec</b>	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	<10 m	-	17 m			-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	- <b>&lt;10 m</b>	- <b>12 m</b>			-

		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	<10 m	<10 m	<10 m	595 kg	205 kg/min	-
	<b>Θερμοκρασί α ατμών LNG -130°C</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	3,08 kg <b>3,08 kg</b>	51,4 gr/sec <b>51,4 gr/sec</b>	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	22 m			-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <b>&lt;10 m</b>	18 m <b>14 m</b>			
		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	<10 m	<10 m	<10 m			
	<b>Θερμοκρασί α ατμών LNG -120°C</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	2,86 kg <b>2,86 kg</b>	47,7 gr/sec <b>47,7 gr/sec</b>	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου	11 m	-	21 m			-

		νέφους						
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <10 m	19 m 14 m			
		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	<10 m	<10 m	<10 m	2,86 kg	184 gr/sec	-
	<b>Πίεση ατμών LNG 3 atm</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <10 m	<10 m <10 m	11 m 11 m	4,73 kg 4,73 kg	78,8 gr/sec 78,8 gr/sec	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	25 m			-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <10 m	19 m 15 m			
		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	<10 m	<10 m	<10 m	4,73 kg	239 gr/sec	-
		Τοξική περιοχή αερίου	<10 m <10 m	<10 m <10 m	11 m 11 m			-

	<b>Πίεση ατμών LNG 1,5 atm</b>	νέφους				1,06 kg	17,6 gr/sec	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	12 m	<b>1,06 kg</b>	<b>17,6 gr/sec</b>	-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <b>&lt;10 m</b>	18 m <b>12 m</b>			
		Θερμική ακτινοβολία γλώσσας φωτιάς	<10 m	<10 m	<10 m	1,06 kg	114 gr/sec	-

Κατά τη δημιουργία του πιο πιθανού σεναρίου (οπή διαμέτρου 0,025 m στον βραχίονα επιστροφής ατμών LNG θερμοκρασίας  $-140^{\circ}\text{C}$  και πίεσης 2,5 atm, με ταχύτητα του αέρα 2 m/s) η τοξική κόκκινη και πορτοκαλί ζώνη επεκτείνονται σε μια απόσταση μικρότερη από 10 μέτρα, και η κίτρινη σε μία απόσταση 11 μέτρων. Η κόκκινη ζώνη της εύφλεκτης περιοχής του αερίου νέφους αναπτύσσεται σε μία απόσταση 11 μέτρων, ενώ η κίτρινη στην οποία η συγκέντρωση των ατμών LNG στον αέρα ξεπερνά τα 5000 ppm, αναπτύσσεται σε μία απόσταση 22 μέτρων από το σημείο διαρροής του βραχίονα.

Οι μεγαλύτερες ζώνες σε όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης ευαισθησίας, καθώς και στο αρχικό σενάριο, αντιστοιχούν στις κίτρινες ζώνες της εύφλεκτης περιοχής αερίου νέφους και της περιοχής έκρηξης αερίου νέφους (τιμή υπερπίεσης των 50 mbar) και είναι και αυτές οι οποίες επηρεάζονται περισσότερο από τις μεταβολές των διάφορων μεταβλητών σχεδιασμού. Με τον τετραπλασιασμό της διαμέτρου της οπής, η μόνη αλλαγή που παρατηρείται στον πίνακα των αποτελεσμάτων, αφορά τις ζώνες της θερμικής ακτινοβολίας της γλώσσας φωτιάς, οι οποίες φτάνουν την τιμή των 10 μέτρων. Με τον διπλασιασμό της ταχύτητας του αέρα, παρατηρείται μια σχετική μείωση μόνο της κίτρινης ζώνης εύφλεκτου αερίου νέφους κατά 2 μέτρα και της ζώνης υπερπίεσης των 50 mbar λόγω ωστικού κύματος κατά 1 μέτρο, ενώ με τον τετραπλασιασμό παρατηρείται μια συνολική μείωση των ζωνών.

Αν η θερμοκρασία των ατμών LNG αυξηθεί κατά  $10^{\circ}\text{C}$  (ίση με  $-130^{\circ}\text{C}$ ) δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στα αποτελέσματα του πιθανού σεναρίου. Αν όμως αυξηθεί κατά  $20^{\circ}\text{C}$  (ίση με  $-120^{\circ}\text{C}$ ), τότε περιοχή όπου η συγκέντρωση του καυσίμου ξεπερνά τα 5000 ppm και έτσι μπορεί να δημιουργηθεί εύφλεκτο μίγμα, μειώνεται κατά 1 μέτρο (ίση με 21 m) και η περιοχή στην οποία δημιουργείται η μικρότερη τιμή υπερπίεσης σε περίπτωση έκρηξης αερίου νέφους, αυξάνεται κατά 1 μέτρο (ίση με 19 m)

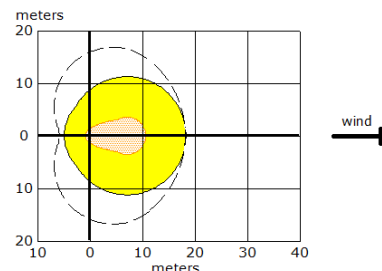
Σε περίπτωση που η πίεση των ατμών, που επιστρέφονται είτε στο πλοίο είτε στον χειρσαίο τερματικό σταθμό κατά τη διαδικασία της φορτω-εκφόρτωσης, αυξηθεί περισσότερο κατά 0,5 ατμόσφαιρες, παρατηρείται επέκταση των αποστάσεων των ζωνών, με την μεγαλύτερη των 3 μέτρων να αντιστοιχεί στην Ζώνη III της εύφλεκτης περιοχής αερίου νέφους. Παράλληλα αυξάνεται και η ποσότητα των ατμών που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα Αντίθετα με την ελάττωση της πίεσης των ατμών κατά 1 ατμόσφαιρα, η ζώνη που μόλις αναφέρθηκε μειώνεται κατά 10 μέτρα.

Αν οι ατμοί του LNG διαρρεύσουν πάνω από ανοιχτή θάλασσα και όχι ξηρή επιφάνεια, αρχικά συγκριτικά με το πιο πιθανό σενάριο, οι ζώνες τοξικότητας δεν επηρεάζονται καθόλου, ενώ οι ζώνες υπερπίεσης λόγω ωστικού κύματος ελαφρώς ελαττώνονται, η πορτοκαλί ζώνη της τιμής υπερπίεσης των 140 mbar επεκτείνεται σε μια απόσταση μικρότερη από δέκα μέτρα και η κίτρινη ζώνη της υπερπίεσης των 50 mbar, ελαττώνεται κατά 4 μέτρα. Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, βγαίνει το συμπέρασμα πως οι μόνες μεταβλητές σχεδιασμού που με την μεταβολή τους οδηγούν σε διαφορετικό αποτέλεσμα είναι η ταχύτητα του αέρα και η πίεση των ατμών LNG. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ταχύτητας του αέρα και η μείωση της πίεσης των ατμών LNG, οδηγούν σε σταδιακή μείωση των ζωνών που δημιουργούνται από έκρηξη αερίου νέφους πάνω από υγρή επιφάνεια. Δηλαδή όταν η ταχύτητα του αέρα ισούται με 8 m/s αναμένεται μείωση των ζωνών απειλής, ενώ όταν η πίεση των ατμών ισούται με 3 ατμόσφαιρες αναμένεται αύξηση. Οι ζώνες τοξικότητας σε όλες τις περιπτώσεις παραμένουν αμετάβλητες.

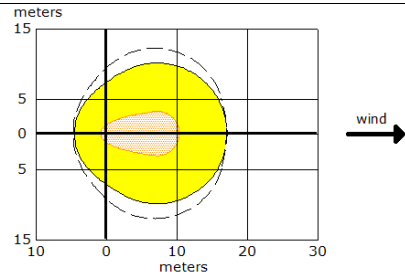
## 7.8 Σενάριο ατυχημάτων 8: Ολική διάρρηξη βραχίονα επιστροφής ατμών LNG

Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου, κατά το οποίο πραγματοποιείται ολική διάρρηξη του βραχίονα επιστροφής ατμών LNG, κατά τη μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου από χερσαίο τερματικό σταθμό σε πλοίο και το αντίστροφο. Τα αποτελέσματα με μπλε χρώμα, αναφέρονται στην ακαριαία απελευθέρωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στη θάλασσα και έχουν μελετηθεί μόνο για τις περιπτώσεις τοξικότητας και έκρηξης αερίου νέφους, αλλά χωρίς φλόγα, όπως εξηγείται και στο Υποκεφάλαιο 6.6.1 της εργασίας με την Γρήγορη Μετάβαση Φάσης.

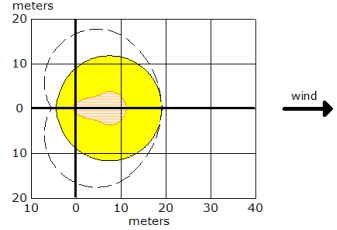
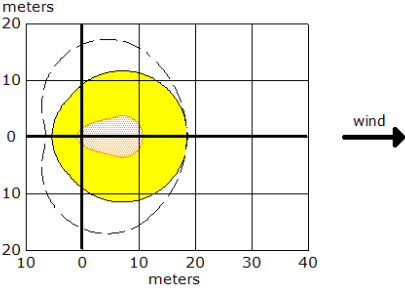
**Πίνακας 15 : Αποτελέσματα σεναρίου ολικής διάρρηξης βραχίονα επιστροφής ατμών LNG**

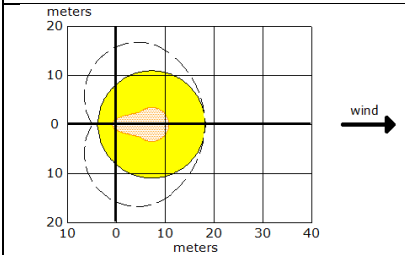
Σενάριο	Μεταβλητή σχεδιασμού	Συνέπεια	Απόσταση ζωνών			Ποσότητα LNG που διαφεύγει	Ρυθμός διαφυγής	Διαγραμματική απεικόνιση για ολική διάρρηξη σε έδαφος
			Κόκκινη	Πορτοκαλί	Κίτρινη			
<b>Πιθανό σενάριο</b>								
2) Ολική διάρρηξη βραχίονα επιστροφής ατμών LNG	Ταχύτητα ανέμου 2m/s, θερμοκρασία ατμών LNG -140°C, πίεση ατμών LNG 2,5 atm	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	6,28 kg	105 gr/sec	
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	30 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <b>12 m</b>	18 m <b>15 m</b>			



Ανάλυση ευαισθησίας								
	Ταχύτητα ανέμου 4 m/s	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	6,28 kg	105 gr/sec	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	25 m			-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	10 m <b>13 m</b>	17 m <b>15 m</b>			
	Ταχύτητα ανέμου 8 m/s	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>11 m</b>	6,28 kg	105 gr/sec	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	10 m	-	23 m			-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	- <b>12 m</b>	- <b>13 m</b>			-

	<b>Θερμοκρασί α ατμών LNG -130°C</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	5,78 kg	96,3 gr/sec	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	28 m			
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <b>12 m</b>	19 m <b>15 m</b>			
	<b>Θερμοκρασί α ατμών LNG -120°C</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	5,36 kg	89,3 gr/sec	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	26 m			

		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <b>12 m</b>	19 m <b>15 m</b>			
	<b>Πίεση ατμών LNG 3 atm</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	7,62 kg	127 gr/sec	-
		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	32 m			-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <b>13 m</b>	19 m <b>16 m</b>			
	<b>Πίεση ατμών LNG 1,5 atm</b>	Τοξική περιοχή αερίου νέφους	<10 m <b>&lt;10 m</b>	<10 m <b>&lt;10 m</b>	11 m <b>11 m</b>	3,68 kg	61,4 gr/sec	-

		Εύφλεκτη περιοχή αερίου νέφους	11 m	-	22 m			-
		Περιοχή έκρηξης αερίου νέφους	-	11 m <10 m	18 m <b>14 m</b>			

Τα αποτελέσματα του πιθανού σεναρίου είναι ίδια με αυτά του Πίνακα 14, όπου πραγματοποιείται διαρροή ατμών LNG από οπή στον βραχίονα επιστροφής ατμών, με μόνη εξαίρεση την κίτρινη ζώνη της εύφλεκτης περιοχής αερίου νέφους που στην περίπτωση αυτή αναπτύσσεται μέχρι τα 30 m από το σημείο διάρρηξης. Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται, ώστε να βρεθεί το δυσμενέστερο σενάριο, με μεταβολή των παραμέτρων της ταχύτητας του αέρα, της θερμοκρασίας των ατμών LNG και της πίεσης των ατμών.

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα, τόσο ελαττώνονται οι ζώνες επικινδυνότητας και μάλιστα με τον τετραπλασιασμό της (8 m/s) ο κίνδυνος της έκρηξης αερίου νέφους εξαλείφεται εντελώς. Με την αύξηση της θερμοκρασίας των ατμών LNG, οι μόνες μεταβολές που παρατηρούνται, σχετίζονται με την ζώνη της εύφλεκτης περιοχής αερίου νέφους όπου η συγκέντρωση του καύσιμου στον αέρα ξεπερνά τα 5000 ppm και με την Ζώνη III της έκρηξης αερίου νέφους όπου η τιμή της υπερπίεσης ισούται η ξεπερνά την τιμή των 50 mbar. Η πρώτη ζώνη με αύξηση κατά 10°C της θερμοκρασίας μειώνεται κατά 2 m και με αύξηση 20°C μειώνεται κατά 4 m. Αντίθετα η δεύτερη ζώνη που αναφέρθηκε προηγουμένως, με αύξηση της θερμοκρασίας είτε 10°C είτε 20°C επεκτείνεται κατά 1 μέτρο περισσότερο σε σχέση με το πιθανό σενάριο θερμοκρασίας -140°C.

Τέλος, η αύξηση της πίεσης των ατμών LNG κατά 0,5 ατμόσφαιρες, οδηγεί σε μια επέκταση 1-2 μέτρων των κίτρινων ζωνών της περιοχής αερίου νέφους μπορεί να αναφλεγεί, καθώς και της περιοχής έκρηξης αερίου νέφους, ενώ η μείωση της πίεσης κατά 1 ατμόσφαιρα, ελαττώνει μόνο κατά 8 μέτρα την περιοχή συγκέντρωσης των 5000 ppm, όπου οι ατμοί μπορούν να αναμιχθούν με τον περιβαλλοντικό αέρα και να δημιουργήσουν τον κίνδυνο της αναφλεξιμότητας.

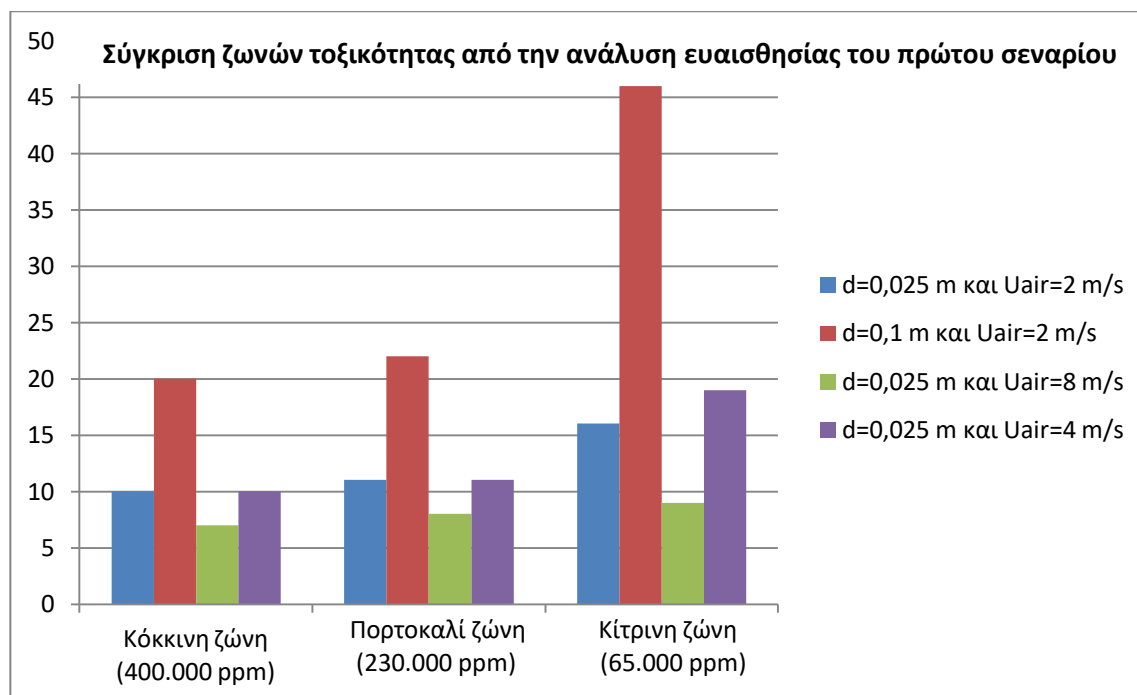
Αν οι ατμοί του LNG απελευθερωθούν ακαριαία πάνω από ανοιχτή θάλασσα και όχι ξηρή επιφάνεια, όπως και στο 7<sup>ο</sup> σενάριο, οι ζώνες τοξικότητας δεν επηρεάζονται καθόλου, ενώ οι ζώνες υπερπίεσης λόγω ωστικού κύματος ελαφρώς ελαττώνονται. Ο διπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα, αυξάνει κατά 1 μέτρο την Ζώνη II της έκρηξης αερίου νέφους, όπου η τιμή της υπερπίεσης ισούται ή υπερβαίνει τα 140 mbar, και ο τετραπλασιασμός μειώνει κατά 2 μέτρα την Ζώνη III του αντίστοιχου κινδύνου. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των ατμών LNG δεν μεταβάλλει τα αποτελέσματα στην περίπτωση της υγρής επιφάνειας, ενώ η μεταβλητή της πίεσης είναι ανάλογη με τις ζώνες επικινδυνότητας της έκρηξης αερίου νέφους. Αύξηση δηλαδή της πίεσης των ατμών στον βραχίονα, οδηγεί και σε αύξηση των Ζωνών II (τιμή υπερπίεσης 140 mbar) και III (τιμή υπερπίεσης 50 mbar) κατά 1 μέτρο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Συμπεράσματα

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων κάθε σεναρίου στο Κεφάλαιο 7 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Όπως φαίνεται από όλα τα αποτελέσματα του προηγούμενου Κεφαλαίου, το χειρότερο σενάριο που μπορεί να συμβεί, συναντάται στην περίπτωση της εκφόρτωσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου από πλοίο σε χερσαίο τερματικό σταθμό, όπου πραγματοποιείται υπερπλήρωση της δεξαμενής ξηράς και έτσι όλη η ποσότητα του αποθηκευμένου LNG, διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό είναι εν μέρει λογικό, καθώς η χωρητικότητα της δεξαμενής ξηράς, είναι πολύ μεγαλύτερη και από αυτή της δεξαμενής του πλοίου, και μάλιστα στην περίπτωση της υπερπλήρωσης, είναι πλήρης 100%, οπότε 90.000 m<sup>3</sup> LNG απελευθερώνονται ακαριαία. Στο σενάριο αυτό, οι επικίνδυνες ζώνες τοξικότητας, αναφλεξιμότητας και υπερπίεσης, επεκτείνονται σε αποστάσεις που μετριοούνται σε χιλιόμετρα, συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια που η ανάπτυξη των ζωνών φτάνει την μέγιστη τιμή των 300 μέτρων περίπου. Μάλιστα, όπως φαίνεται και από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, με τον τετραπλασιασμό της ταχύτητας του αέρα στην ακάλυπτη περιοχή, προκαλείται ακόμη μεγαλύτερη αύξηση των ζωνών, που σημαίνει ότι οι οριακές τιμές κάθε σεναρίου διευρύνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις σε σχέση με το αρχικό πιθανό σενάριο, επομένως οι επιπτώσεις, οι τραυματισμοί, οι θάνατοι και η καταστροφή της περιοχής, πολλαπλασιάζονται.
- Η χρονική εξέλιξη του σεναρίου αυτού, διαρκεί ένα λεπτό (60 sec), αφού απελευθερώνονται 38.226.987 kg LNG με ρυθμό 637.000 kg/sec. Η ίδια διάρκεια συναντάται και στα υπόλοιπα σενάρια ολικής διάρρηξης, όπως για παράδειγμα στην ολική διάρρηξη της δεξαμενής του πλοίου λόγω υπερπλήρωσης, όπου απελευθερώνονται 14.866.051 kg LNG με ρυθμό 248.000 kg/sec. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι μικρότερες ζώνες που εμφανίζονται κατά την ανάλυση ευαισθησίας, για τα σενάρια που σχετίζονται με την δημιουργία οπής στη δεξαμενή ξηράς και πλοίου, περιορίζονται στη χρονική διάρκεια της 1 ώρας και όχι μέχρι το τέλος του φαινομένου. Στα υπόλοιπα σενάρια των βραχιόνων δεν διαφεύγει τεράστια ποσότητα, οπότε το φαινόμενο διαρκεί ορισμένα λεπτά. Ο περιορισμός της χρονικής διάρκειας, δεν αποτελεί μειονέκτημα αλλά αναγκαιότητα, καθώς η λογική του προγράμματος ALOHA, είναι η άμεση αντιμετώπιση των κινδύνων. Η θερμοκρασία και η ταχύτητα του αέρα, αλλάζουν ραγδαία, οπότε οποιαδήποτε εκτίμηση πέραν της μίας ώρας είναι αρκετά επισφαλής.
- Επιπλέον συμπεραίνεται, πως στα σενάρια κατά τα οποία δημιουργείται οπή στον εξοπλισμό, η αύξηση της ταχύτητας του αέρα τέσσερις φορές περισσότερο, οδηγεί σε μείωση των επικίνδυνων ζωνών, ενώ ο διπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα επιφέρει ελάχιστες ή καθόλου μεταβολές στα αποτελέσματα του πιθανού σεναρίου. Ακόμη, όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος της οπής που σχηματίζεται, οι κίνδυνοι της τοξικότητας, της θερμικής ακτινοβολίας σε περίπτωση πυρκαγιάς, και της υπερπίεσης σε περίπτωση έκρηξης, αναπτύσσονται σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Στο Διάγραμμα 1, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα τοξικότητας του πρώτου σεναρίου (δημιουργία οπής στην δεξαμενή αποθήκευσης ξηράς), που εξήλθαν από την ανάλυση ευαισθησίας, κατά την οποία μεταβλήθηκαν η διάμετρος της οπής και η ταχύτητα του αέρα.

**Διάγραμμα 1: Σειρά παρουσίασης : μπλε νούμερο 1, μωβ νούμερο 2, πράσινο νούμερο 3, κόκκινο νούμερο 4**

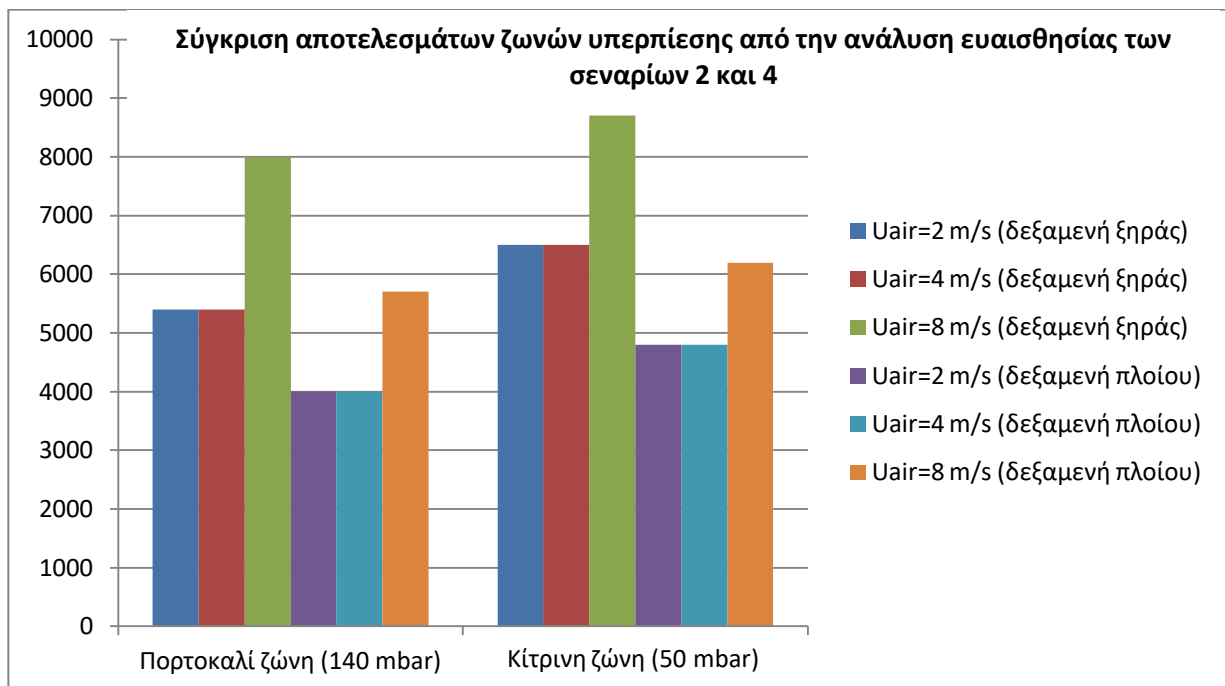


Οι μπλε στήλες αντιστοιχούν στο πιθανό σενάριο, κατά το οποίο δημιουργείται οπή διαμέτρου 0,025 m και η ταχύτητα του αέρα είναι ίση με 2 m/s. Με τον τετραπλασιασμό της διαμέτρου της οπής ( $d=0,1$  m) παρατηρείται μεγάλη επέκταση των ζωνών τοξικότητας (κόκκινες στήλες), με την κίτρινη ζώνη, στην οποία η συγκέντρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα ξεπερνά τα 65.000 ppm, να φτάνει την τιμή των 46 m. Η μεταβολή αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η ποσότητα LNG που διαφεύγει, καθώς και ο ρυθμός διαφυγής πολλαπλασιάζονται.

Ο διπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα (μωβ στήλες), δεν επηρεάζει την κόκκινη και πορτοκαλί ζώνη τοξικότητας, παρά μόνο αυξάνει κατά 3 m την κίτρινη ζώνη. Αυτό συμβαίνει γιατί η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά 2 m/s, δεν μεταβάλλει την σταθερότητα της ατμόσφαιρας, την τάση δηλαδή του αέρα να παραμένει στην αρχική του θέση. Αντίθετα ο τετραπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα (πράσινες στήλες), οδηγεί σε μικρότερες ζώνες επικινδυνότητας. Ουσιαστικά όταν τετραπλασιάζεται η ταχύτητα, η κλάση ευστάθειας των ατμοσφαιρικών συνθηκών αλλάζει σε Β-μέτρια ασταθής από C-ελαφρώς ασταθής (αυτόματη επιλογή προγράμματος βάσει των οριζόμενων κατά Pasquill).<sup>[97]</sup> Αυτό δείχνει ότι επικρατούν περισσότερο ασταθείς συνθήκες εξαιτίας της θέρμανσης του αέρα κοντά στο έδαφος, από τη μέση έως ισχυρή εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, προκαλώντας άνοδο και δημιουργώντας τυρβώδεις ροές. Κατά συνέπεια προκαλείται ταχύτερη ανάμιξη του διασπειρόμενου αερίου (LNG) με τον αέρα και επίτευξη υψηλότερης αραίωσης των ατμών LNG. Ως αποτέλεσμα προκύπτουν μικρότερες αποστάσεις, στις οποίες ο αέρας εμφανίζει συγκέντρωση κάτω από την τοξική οριακή τιμή (LOC) του LNG που έχει τεθεί (μείωση ζωνών επικινδυνότητας). Παρόμοιες μεταβολές, παρατηρούνται και στα υπόλοιπα σενάρια συνεχούς διαρροής LNG, από την δεξαμενή αποθήκευσης του πλοίου και τους βραχίονες φορτω-εκφόρτωσης και μάλιστα για όλους τους κινδύνους που μοντελοποιούνται.

- Στα σενάρια ατυχημάτων ολικής διάρρηξης της δεξαμενής του χειρσαίου τερματικού σταθμού και του υγραεριοφόρου πλοίου, ενώ ο διπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα δεν επιφέρει κάποια μεταβολή στα αποτελέσματα του πιθανού σεναρίου, ο τετραπλασιασμός της επεκτείνει τις αποστάσεις των ζωνών επικινδυνότητας. Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση ευαισθησίας των σεναρίων αυτών, με μεταβολή της ταχύτητας του αέρα, για τις ζώνες υπερπίεσης λόγω ωστικού κύματος, που δημιουργούνται από την έκρηξη αερίου νέφους. Οι ίδιες μεταβολές, παρατηρούνται και στις αποστάσεις στις οποίες αναπτύσσεται ο κίνδυνος της τοξικότητας, αλλά και της αναφλεξιμότητας.

**Διάγραμμα 2: Σειρά παρουσίασης: μπλε νούμερο 1, κόκκινο νούμερο 2, πράσινο νούμερο 3, μωβ νούμερο 4, γαλάζιο νούμερο 5, πορτοκαλί νούμερο 6**

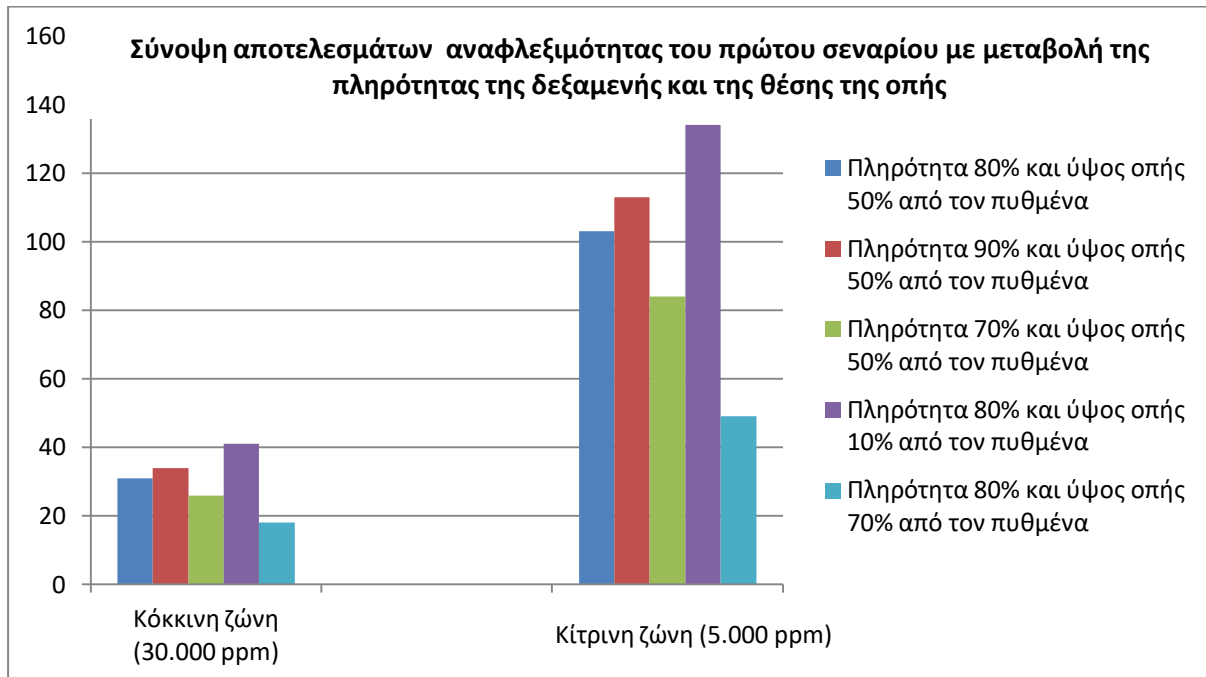


Όπως εξηγήθηκε και στο προηγούμενο συμπέρασμα, οι ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες, που χαρακτηρίζονται από έντονο ηλιακό φως και καθαρό ουρανό, συμβάλλουν σε υψηλά επίπεδα θερμικής αναταραχής στην ατμόσφαιρα και προωθούν την ταχεία ανάμιξη. Από την άλλη πλευρά, οι σταθερές συνθήκες που χαρακτηρίζονται από ελαφρούς ανέμους και συνθήκες νυχτερινής ψύξης, συμβάλλουν σε χαμηλά επίπεδα θερμικής αναταραχής και δεν προωθούν την ανάμιξη του αερίου. Με την εμφάνιση αυτού του μεγάλου ρήγματος, το υγρό που βρίσκεται υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες, θα αλλάξει αδιαβατικά σε μίγμα ατμού-υγρού, με το μεγαλύτερο ποσοστό να περνάει απότομα στην αέρια φάση. Στην περίπτωση λοιπόν αυτή, ο τετραπλασιασμός της ταχύτητας του αέρα αυξάνει τις αποστάσεις των ζωνών επικινδυνότητας, καθώς αυξάνεται η ποσότητα του LNG που περνάει στην αέρια φάση και έτσι αυξάνεται η ανάμιξη του αερίου νέφους με τον αέρα του περιβάλλοντος.

- Στο πρώτο σενάριο δημιουργίας οπής, η αύξηση της πληρότητας της δεξαμενής ξηράς, καθώς και η μείωση του ύψους της οπής από τον πυθμένα, οδηγούν σε αύξηση των ζωνών επικινδυνότητας. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε με μεταβολή των παραπάνω παραμέτρων, για τις ζώνες της εύφλεκτης περιοχής του αερίου νέφους, παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3.



**Διάγραμμα 3: Σειρά παρουσίασης: μπλε νούμερο 1, κόκκινο νούμερο 2, πράσινο νούμερο 3, μωβ νούμερο 4, γαλάζιο νούμερο 5**



Όπως είναι λογικό, η αύξηση 10% της πληρότητας της δεξαμενής ξηράς (συνολική πληρότητα δηλαδή 90%, από το 80% που αποτελεί το πιθανό σενάριο), επεκτείνει και τις δύο ζώνες της εύφλεκτης περιοχής, αφού παράλληλα αυξάνεται και η ποσότητα του LNG που διαφεύγει. Το ίδιο παρατηρείται και με μείωση του ύψους της οπής από τον πυθμένα, ή αύξηση από την κορυφή της δεξαμενής. Όταν η οπή βρίσκεται στο 10% από τον πυθμένα, συγκριτικά με το πιθανό σενάριο που βρίσκεται στο 50%, ο χρόνος κατά τον οποίο σταδιακά αδειάζει η δεξαμενή, είναι μεγαλύτερος, γιατί προστίθεται επιπλέον ποσότητα προϊόντος που διαρρέει. Αντίθετα με μείωση της πληρότητας της δεξαμενής και αύξηση της οπής από τον πυθμένα, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα οι ζώνες αναφλεξιμότητας ελαττώνονται. Το δυσμενέστερο σενάριο παρατηρείται όταν η πληρότητα της δεξαμενής λάβει την μέγιστη δυνατή τιμή και το ύψος της οπής από τον πυθμένα την μικρότερη (μωβ στήλες). Οι ίδιες μεταβολές παρατηρούνται και στο σενάριο 3, κατά το οποίο δημιουργείται οπή στη δεξαμενή του υγραεριοφόρου πλοίου.

- Αξίζει να σημειωθεί, πως στο σενάριο κατά το οποίο διαρρέει LNG από οπή διαμέτρου 0,025 m που βρίσκεται σε ύψος 10% από τον πυθμένα της δεξαμενής του πλοίου, έχει ληφθεί υπόψη η διαμερισματοποίηση της δεξαμενής από τους γύρω χώρους. Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας στο Κεφάλαιο 3, κάτω από τον πυθμένα της σφαιρικής δεξαμενής, υπάρχει ένα κενό τμήμα, το οποίο περιλαμβάνει και το δοχείο περισυλλογής LNG (drip tray) σε περίπτωση διαρροής. Αν διαφύγει λοιπόν LNG από μια περιοχή κοντά στον πυθμένα, η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να συγκρατηθεί, είναι ουσιαστικά όσο και η χωρητικότητα του κενού αυτού χώρου. Στα αποτελέσματα λοιπόν του Πίνακα 10, η

διάμετρος της εξατμιζόμενης λίμνης που δημιουργείται είναι 12,5 m και της πυρκαγιάς λίμνης, σε περίπτωση ανάφλεξης, 6,5 m. Η διάμετρος του κενού χώρου κυμαίνεται από 58-40,6 m, όσο περίπου και η διάμετρος της ίδιας της δεξαμενής, οπότε οι κίνδυνοι που δημιουργούνται περιορίζονται μέσα στην απόσταση αυτή.

- Όσον αφορά τα σενάρια ατυχημάτων που σχετίζονται με τους βραχίονες φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG, το δυσμενέστερο σενάριο από άποψη τοξικότητας και υπερπίεσης λόγω ωστικού κύματος, παρατηρείται κατά την διαρροή ή ακαριαία απελευθέρωση LNG στο νερό, όπου δημιουργείται το φαινόμενο της Γρήγορης Μετάβασης Φάσης (RPT). Στην περίπτωση αυτή τα φαινόμενα εξελίσσονται ταχύτερα, συγκριτικά με την διαρροή σε ξηρή επιφάνεια λόγω των διαφορετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων του καυσίμου με το νερό, απότι του καυσίμου με το έδαφος, λόγω της μεγάλης ακάλυπτης θαλάσσιας περιοχής χωρίς περιορισμούς και της διαφορετικής θερμοκρασίας. Η εξάτμιση του LNG καθορίζεται κυρίως από τη ροή θερμότητας με συναγωγή και εφόσον η περιοχή είναι ανοιχτή, το φαινόμενο σχηματισμού πάγου μπορεί να παραληφθεί, αφού δεν μεταβάλλει τη διαδικασία της εξάτμισης. Επιπλέον η λεία επιφάνεια της θάλασσας, σε σχέση με την τραχιά επιφάνεια του εδάφους, προάγει την κάθετη ανάμιξη του αερίου.<sup>[96]</sup>
- Τα δύο τελευταία σενάρια που σχετίζονται με την διαρροή και ακαριαία απελευθέρωση ατμών LNG, από τον βραχίονα επιστροφής του boil-off gas, κατά τη διαδικασία φορτω-εκφόρτωσης, αποτελούν όπως αναφέρθηκε ειδική περίπτωση. Ενώ στα υπόλοιπα σενάρια θεωρείται η ύπαρξη υγρού σε ατμοσφαιρική πίεση, εδώ η παρουσία του αερίου σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα συγκριτικά και με τα παρόμοια σενάρια του βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG. Όχι μόνο παρατηρούνται πολύ μικρότερες ζώνες επικινδυνότητας για όλους τους κινδύνους, αλλά ταυτόχρονα το φαινόμενο της Γρήγορης Μετάβασης Φάσης στην ελεύθερη επιφάνεια νερού δεν αποτελεί δυσμενέστερο σενάριο. Αυτό συμβαίνει διότι οι ατμοί του LNG ως ελαφρύτεροι του αέρα δεν έρχονται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του υποστρώματος, όπως στα σενάρια διαρροής ή απελευθέρωσης υγρού LNG, και ανυψώνονται στην ατμόσφαιρα (όπως και στο πιθανό σενάριο) οπότε δεν παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας στα 6 πρώτα σενάρια που μελετήθηκαν, οδηγεί όπως παρουσιάζεται και στα αποτελέσματα, σε γλώσσα φωτιάς (jet fire). Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται την αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό της δεξαμενής ή του βραχίονα, και το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο στην περίπτωση αυτή μετατρέπεται σταδιακά σε αέριο υπό πίεση. Η μεταβολή της τιμής της θερμοκρασίας, έγινε ουσιαστικά για να επιβεβαιωθεί, ότι με την αλλαγή αυτή επηρεάζεται και η κατάσταση του αποθηκευμένου Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου και έτσι οι κίνδυνοι που δημιουργούνται διαφέρουν (Εικόνα 48) από το αρχικό πιθανό σενάριο, στο οποίο έχει θεωρηθεί ατμοσφαιρική πίεση και δημιουργείται πυρκαγιά λίμνης (pool fire).
- Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου στο Κεφάλαιο 7, κατά την μοντελοποίηση ορισμένων κινδύνων, δεν δίνεται η διαγραμματική απεικόνιση των ζωνών απειλής. Αυτό οφείλεται στην δημιουργία μικρών αποστάσεων των συγκεκριμένων ζωνών και στην ύπαρξη μεγάλης αβεβαιότητας.
- Η υφιστάμενη χρήση γης μιας περιοχής αποτελεί σημαντική παράμετρο για το αν επιτρέπεται η εγκατάσταση μιας νέας βιομηχανικής μονάδας στην εν λόγω περιοχή κατά τη διαδικασία αδειοδότησης. Όπως λοιπόν αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή της εργασίας, το σύνολο των αποτελεσμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τον σχεδιασμό χωροθέτησης μιας εγκατάστασης, καθώς ορίζει τις αποστάσεις ασφαλείας που αναπτύσσονται, μέσω των

ζωνών επικινδυνότητας και έτσι μπορεί να συμβάλλει στα προληπτικά μέτρα ασφαλείας καθώς και στα μέτρα προστασίας και επέμβασης για τον περιορισμό των συνεπειών του ατυχήματος. Για παράδειγμα οι κόκκινες ζώνες που έχουν προσδιοριστεί για κάθε σενάριο, αντιστοιχούν στις περιοχές γύρω από το χώρο του ατυχήματος όπου κινούνται μόνο οι ομάδες αντιμετώπισης του ατυχήματος, ενώ οι πορτοκαλί και κίτρινες ζώνες αντιστοιχούν στις περιοχές όπου εκδηλώνονται οι δράσεις προστασίας του πληθυσμού. Ουσιαστικά τα στοιχεία αυτά αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία της μελέτης ασφαλείας της εγκατάστασης, για τη διαμόρφωση του σχετικού ΣΑΤΑΜΕ, ή την αναβάθμιση του υπάρχοντος. Η μελέτη ασφαλείας δηλαδή, περιλαμβάνει ανάλυση πιθανών μεγάλων ατυχημάτων της εγκατάστασης, για τα οποία έχει γίνει εκτίμηση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και το περιβάλλον των παρακείμενων περιοχών με χρήση κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων.<sup>[96]</sup> Σε περίπτωση λοιπόν μεγάλου ατυχήματος, όπως η ολική διάρρηξη των δεξαμενών, είναι πιθανό οι επιπτώσεις να επεκταθούν και εκτός των ορίων της εγκατάστασης και να επηρεάσουν την ευρύτερη περιοχή, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του προγράμματος. Για την προστασία του πληθυσμού, των εργαζομένων άλλων επιχειρήσεων όπως νοσοκομεία, σχολεία, κατοίκους κ.α., είναι αναγκαία η ύπαρξη και η ετοιμότητα για εφαρμογή ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης που αφορά την περιοχή. Η κατάρτιση του ΣΑΤΑΜΕ, πραγματοποιείται σύμφωνα με την καταχωρημένη μελέτη ασφαλείας, και η εφαρμογή του χωρίς καθυστέρηση, από τον ασκούντα την εκμετάλλευση και τις εμπλεκόμενες αρμόδιες αρχές, μπορεί να περιορίσει οποιοδήποτε ανεξέλεγκτο συμβάν, που αναμένεται να καταλήξει σε μεγάλο ατύχημα.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α** : Δεδομένα προγράμματος ALOHA για την περίπτωση οπής στην δεξαμενή ξηράς

<b>Γεωγραφική τοποθεσία</b>		
Περιοχή X, σε ακάλυπτο περιβάλλον και τυπικό υψόμετρο		
<b>Χημικά δεδομένα</b>		
Μεθάνιο		
<b>Ατμοσφαιρικά δεδομένα</b>		
Ταχύτητα ανέμου :	2 m/s	
Διεύθυνση ανέμου :	ανατολική	
Ύψος μέτρησης ανέμου :	3 m	
Τραχύτητα εδάφους :	Ανοιχτή περιοχή	
Νεφοκάλυψη :	3	
Θερμοκρασία αέρα:	18°C	
Θερμοκρασιακή αναστροφή:	όχι	
Υγρασία:	25%	
<b>Πηγή</b>		
Κάθετη κυλινδρική δεξαμενή		
Διάμετρος :	70 m	
Όγκος :	90000 m <sup>3</sup>	
Περιέχει υγρό		
Θερμοκρασία υγρού:	-163°C	
Πλήρης κατά :	80%	
<b>Στοιχεία οπής</b>		
Σχήμα :	Σφαίρα	
Διάμετρος :	0,025 m	
Ύψος :	στο 50% από την οροφή	
<b>Παράμετροι εδάφους</b>		
Τύπος εδάφους :	Τσιμέντο	
Θερμοκρασία εδάφους :	18°C	

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β** : Δεδομένα προγράμματος ALOHA για την περίπτωση ολικής διάρρηξης δεξαμενής ξηράς

<b>Γεωγραφική τοποθεσία</b>		
Περιοχή X, σε ακάλυπτο περιβάλλον και τυπικό υψόμετρο		
<b>Χημικά δεδομένα</b>		
Μεθάνιο		
<b>Ατμοσφαιρικά δεδομένα</b>		
Ταχύτητα ανέμου :	2 m/s	
Διεύθυνση ανέμου :	Ανατολική	
Ύψος μέτρησης ανέμου :	3 m	
Τραχύτητα εδάφους :	Ανοιχτή περιοχή	
Νεφοκάλυψη :	3	
Θερμοκρασία αέρα:	18°C	
Θερμοκρασιακή αναστροφή:	Όχι	
Υγρασία:	25%	
<b>Πηγή</b>		
Άμεση στιγμιαία πηγή		
Ποσότητα που διαφεύγει :	72000 m <sup>3</sup>	90000 m <sup>3</sup>
Ύψος πηγής :	0 (έδαφος)	
Περιέχει υγρό		
Θερμοκρασία υγρού:	-150°C	-163°C
Πλήρης κατά :	80%	100%

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ :** Δεδομένα προγράμματος ALOHA για την περίπτωση οπής στην δεξαμενή του πλοίου

<b>Γεωγραφική τοποθεσία</b>		
Περιοχή X, σε ακάλυπτο περιβάλλον και τυπικό υψόμετρο		
<b>Χημικά δεδομένα</b>		
Μεθάνιο		
<b>Ατμοσφαιρικά δεδομένα</b>		
Ταχύτητα ανέμου :	2 m/s	
Διεύθυνση ανέμου :	ανατολική	
Ύψος μέτρησης ανέμου :	3 m	
Τραχύτητα εδάφους :	Ανοιχτή περιοχή	
Νεφοκάλυψη :	3	
Θερμοκρασία αέρα:	18°C	
Θερμοκρασιακή αναστροφή:	όχι	
Υγρασία:	25%	
<b>Πηγή</b>		
Σφαιρική δεξαμενή		
Όγκος :	35000 m <sup>3</sup>	
Περιέχει υγρό		
Θερμοκρασία υγρού:	-163°C	
Πλήρης κατά :	99,5%	
<b>Στοιχεία οπής</b>		
Σχήμα :	Σφαίρα	
Διάμετρος :	0,025 m	
Ύψος :	στο 50% από την οροφή	
<b>Παράμετροι εδάφους</b>		
Τύπος εδάφους :	Τσιμέντο	
Θερμοκρασία εδάφους :	18°C	

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ :** Δεδομένα προγράμματος ALOHA για την περίπτωση ολικής διάρρηξης της δεξαμενής του πλοίου

<b>Γεωγραφική τοποθεσία</b>		
Περιοχή X, σε ακάλυπτο περιβάλλον και τυπικό υψόμετρο		
<b>Χημικά δεδομένα</b>		
Μεθάνιο		
<b>Ατμοσφαιρικά δεδομένα</b>		
Ταχύτητα ανέμου :	2 m/s	
Διεύθυνση ανέμου :	Ανατολική	
Ύψος μέτρησης ανέμου :	3 m	
Τραχύτητα εδάφους :	Ανοιχτή περιοχή	
Νεφοκάλυψη :	3	
Θερμοκρασία αέρα:	18°C	
Θερμοκρασιακή αναστροφή:	Όχι	
Υγρασία:	25%	
<b>Πηγή</b>		
Άμεση στιγμιαία πηγή		
Ποσότητα που διαφεύγει :	33250 m <sup>3</sup>	35000 m <sup>3</sup>
Ύψος πηγής :	0 (έδαφος)	
Περιέχει υγρό		
Θερμοκρασία υγρού:	-155°C	-163°C
Πλήρης κατά :	99,5%	100%

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε** : Δεδομένα προγράμματος ALOHA για την περίπτωση οπής στον βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG

<b>Γεωγραφική τοποθεσία</b>		
Περιοχή X, σε ακάλυπτο περιβάλλον και τυπικό υψόμετρο		
<b>Χημικά δεδομένα</b>		
Μεθάνιο		
<b>Ατμοσφαιρικά δεδομένα</b>		
Ταχύτητα ανέμου :	2 m/s	
Διεύθυνση ανέμου :	ανατολική	
Ύψος μέτρησης ανέμου :	3 m	
Τραχύτητα εδάφους :	Ανοιχτή περιοχή	Ανοιχτή θάλασσα
Νεφοκάλυψη :	3	
Θερμοκρασία αέρα:	18°C	
Θερμοκρασιακή αναστροφή:	όχι	
Υγρασία:	25%	
<b>Πηγή</b>		
Κάθετη κυλινδρική δεξαμενή		
Διάμετρος :	0,4064 m	
Μήκος :	12,5 m	
Περιέχει υγρό		
Θερμοκρασία υγρού:	-163°C	
Πλήρης κατά :	100%	
<b>Στοιχεία οπής</b>		
Σχήμα :	Σφαίρα	
Διάμετρος :	0,025 m	
Ύψος :	στο 50% από την οροφή	
<b>Παράμετροι εδάφους</b>		
Τύπος εδάφους :	Τσιμέντο	Νερό
Θερμοκρασία εδάφους :	18°C	15°C



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ** : Δεδομένα προγράμματος ALOHA για την περίπτωση ολικής διάρρηξης βραχίονα φορτω-εκφόρτωσης υγρού LNG

<b>Γεωγραφική τοποθεσία</b>		
Περιοχή X, σε ακάλυπτο περιβάλλον και τυπικό υψόμετρο		
<b>Χημικά δεδομένα</b>		
Μεθάνιο		
<b>Ατμοσφαιρικά δεδομένα</b>		
Ταχύτητα ανέμου :	2 m/s	
Διεύθυνση ανέμου :	Ανατολική	
Ύψος μέτρησης ανέμου :	3 m	
Τραχύτητα εδάφους :	Ανοιχτή περιοχή	Ανοιχτή θάλασσα
Νεφοκάλυψη :	3	
Θερμοκρασία αέρα:	18°C	
Θερμοκρασιακή αναστροφή:	Όχι	
Υγρασία:	25%	
<b>Πηγή</b>		
Άμεση στιγμιαία πηγή		
Ποσότητα που διαφεύγει :	1,62 m <sup>3</sup>	
Ύψος πηγής :	0 (έδαφος)	
Περιέχει υγρό		
Θερμοκρασία υγρού:	-163°C	

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ** : Δεδομένα προγράμματος ALOHA για την περίπτωση οπής στον βραχίονα επιστροφής ατμών LNG

<b>Γεωγραφική τοποθεσία</b>		
Περιοχή X, σε ακάλυπτο περιβάλλον και τυπικό υψόμετρο		
<b>Χημικά δεδομένα</b>		
Μεθάνιο		
<b>Ατμοσφαιρικά δεδομένα</b>		
Ταχύτητα ανέμου :	2 m/s	
Διεύθυνση ανέμου :	Ανατολική	
Ύψος μέτρησης ανέμου :	3 m	
Τραχύτητα εδάφους :	Ανοιχτή περιοχή	Ανοιχτή θάλασσα
Νεφοκάλυψη :	3	
Θερμοκρασία αέρα:	18°C	
Θερμοκρασιακή αναστροφή:	Όχι	
Υγρασία:	25%	
<b>Πηγή</b>		
Κάθετη κυλινδρική δεξαμενή		
Διάμετρος :	0,4064 m	
Μήκος :	12,5 m	
Περιέχει αέριο		
Θερμοκρασία αερίου:	-140°C	
Πίεση αερίου:	2,5 atm	
<b>Στοιχεία οπής</b>		
Σχήμα :	Σφαίρα	
Διάμετρος :	0,025 m	

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η :** Δεδομένα προγράμματος ALOHA για την περίπτωση ολικής διάρρηξης βραχίονα επιστροφής ατμών

<b>Γεωγραφική τοποθεσία</b>		
Περιοχή X, σε ακάλυπτο περιβάλλον και τυπικό υψόμετρο		
<b>Χημικά δεδομένα</b>		
Μεθάνιο		
<b>Ατμοσφαιρικά δεδομένα</b>		
Ταχύτητα ανέμου :	2 m/s	
Διεύθυνση ανέμου :	Ανατολική	
Ύψος μέτρησης ανέμου :	3 m	
Τραχύτητα εδάφους :	Ανοιχτή περιοχή	Ανοιχτή θάλασσα
Νεφοκάλυψη :	3	
Θερμοκρασία αέρα:	18°C	
Θερμοκρασιακή αναστροφή:	Όχι	
Υγρασία:	25%	
<b>Πηγή</b>		
Άμεση στιγμιαία πηγή		
Ποσότητα που διαφεύγει :	1,62 m <sup>3</sup>	
Περιέχει αέριο		
Θερμοκρασία αερίου:	-140°C	
Πίεση αερίου :	2,5 atm	

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΩΝ

LNG	Liquefied Natural Gas
BOG	Boil off gas
IGC Code	International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Liquefied Gases in Bulk
WEF	World Economic Forum
CNG	Compressed Natural Gas
LFL	Lower Flammable Limit
UFL	Upper Flammable Limit
VCE	Vapor Cloud Explosion
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
ESD	Emergency Shutdown System
SIGTTO	Society of International Gas Tankers and Terminal Operators
MEPC	Marine Environment Protection Committee
ECA	Emission Control Areas
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from ships
IMO	International Maritime Organization
HFO	Heavy Fuel Oil
MDO	Marine Diesel Oil
DFDE	Dual Fuel Diesel Electric
USD	Unit Shutdown
PSD	Process Shutdown
TPS	Total Plant Shutdown
PAQ	Pro- Acceptance Questionnaire
SSSP	Ship Shore Safety Plan
FBOG	Flash Boil off Gas
JBOG	Jetty Boil off Gas
TBOG	Tank Boil off Gas
LOC	Level of Concern
LC <sub>50</sub>	Lethal Concentration 50
LC <sub>1</sub>	Lethal Concentration 1
IDLH	Immediately Dangerous to Life and Health
RPT	Rapid Phase Transition
SMPEP	Shipboard Marine Pollution Emergency Plan
ΥΦΑ	Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο
ΣΑΤΑΜΕ	Γενικό Σχέδιο Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Εθνικό Σχέδιο για την Υγεία και το Κλίμα, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Αθήνα, Νοέμβριος 2019
- [2] International Gas Union, Global LNG Carriers
- [3] Global Climate Change Vital Signs of the Planet, Nasa, Causes
- [4] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION, The European Green Deal, Brussels 11/12/2019, COM(2019) 640 final
- [5] Innovation for the Earth Harnessing technological breakthroughs for people and the planet, World Economic Forum, Davos, January 2017
- [6] Liquefied Natural Gas (LNG), James Chen, Feb 10 2020
- [7] Handbook of Liquefied Natural Gas, Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David A. Wood
- [8] Αξιολόγηση και τεχνική ανάλυση των απαιτούμενων παραμέτρων και υποδομών για την εγκατάσταση τερματικών σταθμών ανεφοδιασμού Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου σε λιμένες, Παπασταμάτη Ιωάννα – Μαρία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2017
- [9] Συγκριτική Ανάλυση Κύκλου Ζωής των Ναυτιλιακών Καυσίμων Low Sulphur Fuel Oil και LNG, ΕΜΠ, Διαμαντάκης Δημήτριος, Αθήνα, Δεκέμβριος 2014
- [10] LNG Φυσικό Αέριο, Μεταφορά Δια Θαλάσσης, Οι Περιβαλλοντικές και Οικονομικές του Συνέπειες, Πανεπιστήμιο Πειραιά, Ελένη Μιχαλοπούλου, Νοέμβριος 2016
- [11] <http://mycourses.ntua.gr/>
- [12] Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών, ΕΜΠ, Ε. Λόης, Φ. Ζαννίκος, Δ. Καρώνης, Αθήνα 2014
- [13] Θαλάσσια Μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Νικολέτα Δεληγεώρογλου, Νοέμβριος 2017
- [14] Πηγές Ενέργειας Συμβατικές και Ανανεώσιμες, Ι. Ι. Γελεγένης, Π. Ι. Αζαόπουλος, Σύγχρονη Εκδοτική
- [15] Student Energy, Natural Gas Transport, Olga Gerasimchuk
- [16] Η αγορά των LNG και η πορεία τους στην ελληνόκτητη ναυτιλία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Εμμανουέλα Μπρέγκου
- [17] LNG Regasification Process and System, United States Patent Application Publication Keller, Pub No: US 2003/0005698 A1, January 2003
- [18] Method and apparatus for offshore LNG regasification, United States Patent Frimm et al., Patent No: US 6,546,739 B2, April 2003
- [19] Energy recovery from the LNG regasification process, Roberto Bruno Piero Bevilacqua, Natale Arcuri, August 2<sup>nd</sup> 2017
- [20] United States Patent Zednik et al. Patent Number: 6,089,022, January 2000

- [21] Basic Properties of LNG, LNG Information Paper No.1, Groupe International Des Importateurs de Gaz Naturel Lquefie
- [22] Introduction to LNG, An overview on liquefied natural gas its properties, organization of the LNG industry and safety considerations, Energy Economic Research at the Bureau of Economic Geology, Michelle Michot Foss, January 2007
- [23] Αναγνώριση Κινδύνων στις Βιομηχανίες Διεργασιών με χρήση Πολυμέσων, ΕΜΠ, Φώτης Ρήγας, Αθήνα 2004
- [24] Το Έργο του Φυσικού Αερίου: οι μέχρι τώρα εξελίξεις και προοπτικές, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Γ. Παπαδάκης, Αθήνα 1992
- [25] Dynamic Simulation of LNG loading, BOG generation, and BOG recovery at LNG exporting terminals, Yogesh M. Kurl, Sujing Wang, Qiang Xu, November 2016
- [26] In detail Wartsilla Technical Journal, Boil off gas handling on board LNG fuelled ships, 25 April 2016
- [27] Problem of boil-off in LNG supply chain, Đorđe Dobrota, Branko Lalić, Ivan Komar, October 2013
- [28] RESPONSE CONSIDERATIONS FOR LNG SPILLS, Ann Hayward Walker, President, SEA Consulting, Cape Charles, Virginia, USA, Interspill Conference, London, 2006
- [29] THE POTENTIAL RISKS OF LIQUEFIED NATURAL GAS, ANDREW J. VAN HORN and RICHARD WILSON Energy and Environmental Policy Center, Harvard University, Cambridge, MA 02138, U.S.A.
- [30] LNG spill on water, Michael Moore video
- [31] Cargo handling in LNG Carriers: safety and operational matters, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, Μάνου Ευαγγελία, 2018
- [32] Modeling large LNG pool fires on water, Steven Betteridge, Elsevier
- [33] Sandia National Laboratories, Capabilities, Fire Testing Capabilities, 2020 National Technology and Engineering Solutions of Sandia, LLC
- [34] Health and safety executive, Guidance, Offshore Oil and Gas Fire Explosion and Risk Assessment
- [35] LNG hazard awareness training at the Spadeadam Testing and Research, Cumbria, UK, DNV-GL
- [36] LNG Risk Based Safety: Modeling and Consequence Analysis, John L. Woodward, Robin Pitbaldo
- [37] Loss Prevention Through Risk Assessment Surveys of LNG Carriers in Operation, Under Construction, Conversion and Repair K.S. Wang The Principal Surveyor for Japan BMT Marine & Offshore Surveys Ltd.
- [38] Review of Vapour Cloud Explosion Incidents Prepared by the Health and Safety Executive
- [39] LNG Properties and Hazards Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT) G. A. MELHEM, PH.D., S. SARAF, PH.D., H. OZOG

- [40] Physical Explosion: LNG Rapid Phase Transition (RPT), RiskSafety, 1/7/2010
- [41] Safety aspects of the use of LNG for marine propulsion L. VANDEBROEK a, J. BERGHMANSb, Elsevier
- [42] Πρώτες Βοήθειες και Καταστροφές (Hellenic first aid), Φαινόμενο BLEVE
- [43] Rollover in LNG Storage Tanks, 2nd Edition: 2012 - 2015 | Public Version, Summary Report by the GIIGNL Technical Study Group on the Behaviour of LNG in Storage
- [44] Simulation of sloshing in LNG tanks, Milovan Peric, Tobias Zorn, Ould el Moctar, Thomas E. Schellin, Yong-Soo Kim, January 2007
- [45] Liquefied Gas Carrier, Safety and Operational Matters, LNG Handling
- [46] LNG Transportation Chain: An Interpreted Risk Assessment from ship to end user, Naiyanad Songbandid, Master Thesis, June 2016
- [47] LNG Ships, GIIGNL – The International Group of Liquefied Natural Gas Importers, LNG Information Paper #3, 2019 Update
- [48] RESOLUTION MSC.370(93) (adopted on 22 May 2014) AMENDMENTS TO THE INTERNATIONAL CODE FOR THE CONSTRUCTION AND EQUIPMENT OF SHIPS CARRYING LIQUEFIED GASES IN BULK (IGC CODE)
- [49] Tanker Safety Guide Liquefied Gas, Third Edition International Chamber of Shipping, 2018
- [50] Μεταφορά – Αποθήκευση – Χρήση του LNG στο πλοίο, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, Γεροντόπουλος Κωνσταντίνος, 2015
- [51] International Safety Guide for Inland Navigation Tank-barges and Terminals, Chapter 33, Types of Gas Carriers, Edition 1-2010
- [52] LNG Pumping System, Cargo Pumps, Marine World, 28/2/2019
- [53] Πλοία Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου και Διαδικασίες Φορτωεκφόρτωσης, Ακαδημία Εμπορικής Ναυτιλίας, Τσιμαχίδου Συμέλα, 2016
- [54] ANNEX 11 RESOLUTION MSC.285(86) (adopted on 1 June 2009) INTERIM GUIDELINES ON SAFETY FOR NATURAL GAS-FUELLED ENGINE INSTALLATIONS IN SHIPS
- [55] Safety of Cargo Handling and Transport Liquefied Natural Gas by Sea. Dangerous Properties of LNG and Actual Situation of LNG Fleet , A. Starosta Gdynia Maritime University, Gdynia, Poland
- [56] Safety features on LNG ships\* F.S. Harris F.S. Harris Ltd, 14 Karen Close, Hethersett, Norwich NR9 3DG, UK
- [57] Effective fire-fighting strategies for LNG during bunkering , Dimitrios Dalaklis Assistant Professor (Safety & Security)
- [58] Ναυτικά Χρόνια, Απαντήσεις σε ερωτήματα μετά την 70ή Σύνοδο της Ναυτιλιακής Επιτροπής, Περιβαλλοντικής Προστασίας του IMO, 8 Νοεμβρίου 2016
- [59] STUDIES ON THE FEASIBILITY AND USE OF LNG AS A FUEL FOR SHIPPING, International Maritime Organization 2016

- [60] Options and evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers, Tu Huan, Fan Hongjun, Lei Wei, Zhou Guoqiang, 14 February 2019
- [61] Liquefied Natural Gas (LNG) Receiving Terminal and Associated Facilities May 2005
- [62] A review of double hull tanker oil spill prevention considerations, Report to Prince William Sound, RCAC
- [63] Gateways to clean energy, LNG Import Terminals, The Linde Group
- [64] Designing LNG terminals for safety, Gas Technology, Arif Habibullah, Parsons Energy & Chemical Group Inc.
- [65] Liquefied Natural Gas (LNG) Receiving Terminal and Associated Facilities May 2005
- [66] Προκαταρκτική Μελέτη Σκοπιμότητας για την κατασκευή ή αναβάθμιση των ήδη υπαρχόντων υποδομών αποθήκευσης, επεξεργασίας και διανομής υγροποιημένου φυσικού αερίου ώστε να υποστηρίζει και την διανομή του σε πλοία ως καύσιμο ναυσιπλοΐας, ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ, ΑΝΔΡΙΑΝΑΚΗ ΑΡΓΥΡΩ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- [67] Literature Study about LNG Jetty, Vivi Oktaviani
- [68] Stress and thermal analysis for an LNG marine loading arm, General Engineering analysis, Case study, LUSAS, 23/4/2018
- [69] Golden Pass LNG Terminal and Pipeline Project: Environmental Impact Statement, Golden Pass LNG Terminal L.P., Golden Pass Pipeline L.P., Federal Agency Regulatory Commission, Jun 2 2005
- [70] The general design of an LNG terminal, MAGALOG, Europa EU, 12/3/2020
- [71] An LNG project in India : setting up of an import terminal and the role of transportation, Sangeeta Sharma, World Maritime University, 1999
- [72] Το έργο του Φυσικού Αερίου: Οι μέχρι τώρα εξελίξεις και προοπτικές, Γ. Παπαδάκης, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας, Σεπτέμβριος 1992
- [73] Gas Processing News, Gas Processing and LNG, Simplify BOG Recondenser design and Operation End of series. Part 1, May/June 2014. GP
- [74] Air Liquide Engineering and Construction, Boil off gas Reliquefaction, Recovering BOG at LNG import and export terminals, 2020
- [75] Ekomeri.com, How does LNG terminals work, 11/2/2016
- [76] ΔΕΣΦΑ, Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Α.Ε.
- [77] energyin, 02/12/2019
- [78] Presentation of DESFA'S Revithoussa Terminal Station Long Version, ΔΕΣΦΑ
- [79] LNG IN EUROPE 2018, An Overview of LNG Import Terminals in Europe, King and Spalding
- [80] Small- and medium-scale LNG terminals, Wartsilla



- [81] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ « ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕ ΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΥΦΑ ΡΕΒΥΘΟΥΣΑΣ », ΔΕΣΦΑ, 14/06/2010
- [82] Elengy, Ship related procedures, PROCEDURES AND USEFUL INFORMATION FOR ACCOMMODATION OF VESSELS AT THE LNG TERMINAL
- [83] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ « ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕ ΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΥΦΑ ΡΕΒΥΘΟΥΣΑΣ », ΔΕΣΦΑ, 14/06/2010
- [84] SHIP APPROVAL PROCEDURE Montoir-de-Bretagne, Fos Tonkin and Fos Cavaou LNG terminal, Revision 7 - Version of June 2016, Elengy
- [85] A Master's guide to berthing, 2<sup>nd</sup> Edition, The Standard, February 2012
- [86] LNG Terminal Revithoussa, Marine Procedures Manual, Desfa S.A., 2/3/2018
- [87] News United States, US concerned over untrackable China ships carrying Iran oil, Aljazeera, 16/10/2019
- [88] Chapter 32 SHIPBOARD OPERATIONS, International Safety Guide Chapter 32 for Inland Navigation Tank-barges and Terminals
- [89] LNG Cargo Operations, Juan Manuel Martin Ordax, Co-financed by the European Union, Trans-European Transport Network
- [90] Deck Cadet for Booklet for LNG Operations, NTK Maritime College
- [91] Changlong, Products, Cryogenic Marine Loading Arm
- [92] PROCEDURES AND DEVICES PROVIDING THE SAFETY DURING LNG OPERATIONS  
Habil. Dr., prof. Vytautas Paulauskas KSRC
- [93] Sightline Institute, WILLIAMS COMPANIES FAILED TO PROTECT EMPLOYEES IN PLYMOUTH LNG EXPLOSION, TARIKA POWELL, 3 JUNE 2016
- [94] Chiksan marine loading arm accident, Brea-Teck, video
- [95] New series of articles inspired by IChemE's Loss Prevention Bulletin and the BP Process Safety Series: sharing lessons learned from accidents, Recuring accidents: overfilling vessels, Peter Waite
- [96] Ασφάλεια Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Σημειώσεις Μαθήματος, Ζιώμας Ιωάννης, Κροκίδα Μαγδαληνή, Αθήνα 2014
- [97] Performance test of the Pasquill Stability Classification Scheme, Hillary Lin Chapman, University of Wisconsin-Milwaukee, May 2017
- [98] Minerva Marine Inc.