

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ**

**«ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ»**

Διπλωματική Εργασία

Αδαμαντίδης Γεώργιος

13-11-2008

ΑΘΗΝΑ

Αδαμαντίδης Γεώργιος

**«ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ»**

13-11-2008

Διπλωματική Εργασία

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Μέλη Τριμελούς Επιτροπής

Χαρίλαος Ν. Ψαράυτης, Καθηγητής ΕΜΠ

Απόστολος Δ. Παπανικολάου, Καθηγητής ΕΜΠ

Νικόλαος Π. Βεντικός, Λέκτορας ΕΜΠ (Επιβλέπων Καθηγητής)

ΑΘΗΝΑ

...ευχαριστώ τους γονείς μου Φαίδων και Αλκηστις, την αδερφή μου Χριστίνα, τον φίλο και συμφοιτητή Μπαλαούρα Ιωάννη και την Σιγάλα Δέσποινα που χωρίς την βοήθεια τους η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2.	ΣΤΟΧΟΣ	9
3.	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	10
4.	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ LNG ΚΑΙ LNG CARRIERS.....	11
4.1.	ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ LNG ΣΤΟΛΟ.....	11
4.2.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	14
4.2.1.	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	14
4.2.2.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	14
4.2.3.	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ.....	16
4.2.4.	ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	17
5.	ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ	18
6.	ΚΙΝΔΥΝΟΙ LNG	22
6.1	ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.....	24
6.2	ΕΚΡΗΞΕΙΣ.....	25
6.3	ΑΜΕΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΦΑΣΗ (RAPID PHASE TRANSITION)	29
6.4	ΚΡΥΟΓΟΝΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ	30
7.	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΡΡΟΗ LNG.....	31
7.1	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ	31
7.1.1	ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ - ΑΣΦΥΞΙΑ	31
7.1.2	ΑΝΑΦΛΕΞΗ – ΕΓΚΑΥΜΑΤΑ.....	33
7.2	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	34
7.2.1	ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ - ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ	35
7.2.2	ΑΝΑΦΛΕΞΗ	36
8.	ΒΗΜΑΤΑ-ΚΛΕΙΔΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ LNG ΔΙΑΡΡΟΩΝ	40

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

9.	ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ LNG ΔΙΑΡΡΟΕΣ.....	42
9.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΤΟΥ LNG ΣΤΟ ΝΕΡΟ	42
9.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΡΑΣΜΟΥ ΛΙΜΝΗΣ.....	44
9.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ (RPT) 46	
9.4	ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΝΝΕΦΟΥ LNG ΑΤΜΟΥ.....	47
9.5	ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΚΑΥΣΗΣ.....	52
9.5.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΝΕΦΟΥ ΑΤΜΟΥ LNG.....	52
9.5.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΤΑΧΕΙΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ – ΤΑΧΕΙΑΣ ΕΚΡΗΞΗΣ.....	55
10.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ LNG ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ.....	57
10.1	ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ LNG.....	58
10.2	ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΜΙΑΣ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ.....	58
10.3	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΤΜΟΥ ΑΠΟ ΜΙΑ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΣΤΟ ΝΕΡΟ.....	59
10.4	ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΕΥΦΛΕΚΤΟΥ ΑΤΜΟΥ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΔΙΑΡΡΟΗ LNG.....	60
10.5	ΑΜΕΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΦΑΣΗ (RPT).....	60
10.6	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΛΙΜΝΗΣ.....	61
11.	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	63
11.1	LEHR AND SIMICEK-BEATTY 2003.....	63
11.1.1	ΔΙΑΔΟΣΗ.....	63
11.1.2	ΕΞΑΤΜΙΣΗ.....	67
11.1.3	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΑΤΜΟΥ.....	67
11.2	FAY 2003.....	68
11.2.1	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	70
11.3	QUEST 2003.....	78
11.3.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΛΙΜΝΗΣ.....	78
11.3.2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ «ΠΥΡΙΝΗΣ ΜΠΑΛΑΣ».....	80
11.3.3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΣΥΝΝΕΦΟΥ ΑΤΜΟΥ.....	81

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

11.4	ΚΟΟΡΜΑΝ (VALLEJO) 2004	84
11.5	ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΜΟΝΤΕΛΑ	88
11.5.1	ABS, 2004.....	89
11.5.2	PITBLADO ET AL. DET NORSKE VERITAS, 2004	93
11.5.3	SANDIA. HIGHTOWER ET AL., 2004	96
12.	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ 4 ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	100
13.	ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΜΙΑΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ	104
13.1	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	104
13.2	ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ	105
13.2.1	ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ LNG ΠΛΟΙΩΝ	105
13.2.2	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΝΝΟΙΩΝ	105
13.2.3	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ LNG ΠΛΟΙΩΝ	106
13.2.4	ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΛΗΨΗ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ LNG	107
13.2.5	ΜΕΤΡΑ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΛΗΨΗ ΑΤΥΧΗΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ LNG.....	111
13.2.6	ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΛΗΨΗ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ LNG ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΡΟΜΟΚΡΑΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΣΗ	112
13.3	ΜΕΤΡΑ ΜΕΙΩΣΗΣ	114
13.3.1	ΜΕΤΡΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΣΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΜΙΑ ΠΙΘΑΝΗ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ.....	114
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρόσφατα, έχει παρατηρηθεί μια σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος σχετικά με τους κινδύνους που πιθανόν να εμφανιστούν στις διαδικασίες αποθήκευσης, μεταχείρισης και μεταφοράς του υγροποιημένου φυσικού αερίου (liquefied natural gas). Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στην επέκταση της LNG αγοράς μέσω της κατασκευής πολλών τερματικών σταθμών σε ολόκληρο τον κόσμο και της ανησυχίας σχετικά με την εμφάνιση τρομοκρατικών ενεργειών σε αυτούς. Εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG Carriers), οι κίνδυνοι αυτοί είναι μεγάλης τάξης μεγέθους, κάτι που καθιστά αρκετά δύσκολη την προσπάθεια ακριβούς πρόβλεψής τους. Προκειμένου να καθορίσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα τις επιπτώσεις αυτές, πρέπει να γίνουν αρκετές πειραματικές, αριθμητικές και αναλυτικές προσπάθειες.

Μια εκτενή πειραματική προσπάθεια έγινε τη δεκαετία του '70 και του '80 σχετικά με τη συμπεριφορά του LNG όταν διαρρέυσει στο νερό, με αλλά και χωρίς την εμφάνιση μεταγενέστερης ανάφλεξης. Στις μέρες μας, με το ανανεωμένο ενδιαφέρον για τη παγκόσμια LNG ναυτιλία, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες που προσπαθούν να προσδιορίσουν όλες τις πιθανές επιπτώσεις που σχετίζονται με μια διαρροή LNG στο νερό. Αυτές οι μελέτες παρουσιάζουν μια πληθώρα αποτελεσμάτων με αρκετές διαφορές μεταξύ τους, οι οποίες οφείλονται στον μη ακριβή καθορισμό των βασικών παραμέτρων και υποθέσεων του κάθε μοντέλου.

Σε αυτή τη μελέτη συνοψίζονται οι πειραματικές προσπάθειες και μοντελοποιήσεις του φαινομένου της διαρροής που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, τόσο σε μικρή κλίμακα όσο και σε μεγάλη, έτσι ώστε να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός και να βρεθούν οι ελλείψεις και τα όρια σχετικά με την πρόβλεψη των κινδύνων που εμφανίζονται σε μια τέτοια διαρροή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται γενικά στοιχεία σχετικά με το υγροποιημένο φυσικό αέριο που έχουν να κάνουν με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά μεγέθη του (σύσταση σημαντικές θερμοκρασίες κ.α.), με τον τρόπο που μεταφέρεται, με το είδος των υγραεριοφόρων δεξαμενόπλοιων και των χαρακτηριστικών κατασκευαστικών τους στοιχείων και τέλος με την πορεία και το μέλλον της παγκόσμιας ναυτιλιακής αγοράς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια καταγραφή / περιγραφή όλων των ατυχημάτων σχετικά με το υγροποιημένο φυσικό αέριο που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, κατηγοριοποίηση τους ανάλογα με το είδος του ατυχήματος, ενώ η υπολογίζεται και η συχνότητα εμφάνισης τους ανά έτος.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των κινδύνων που προκύπτουν από μια πιθανή διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου, αναλύοντας σε κάθε έναν από αυτούς τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την εμφάνιση τους και τον τρόπο με τον οποίο κινδυνεύουν οι άνθρωποι και οι κατασκευές που βρίσκονται κοντά στη περιοχή του συμβάντος.

Στο έβδομο κεφάλαιο έχουν συγκεντρωθεί οι επιπτώσεις μιας διαρροής LNG σχετικά με την επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας και των εκρήξεων τόσο στον άνθρωπο όσο και στις παράκτιες κατασκευές που πιθανόν να επηρεαστούν.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται επιγραμματικά τα σημεία “κλειδιά” τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη στη περίπτωση που θέλουμε να μελετήσουμε και να μοντελοποιήσουμε τις επιπτώσεις και τον μηχανισμό λειτουργίας μια διαρροής τέτοιου είδους. Αυτά βασίζονται τόσο σε πειράματα όσο και σε θεωρητικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι και σήμερα και αποτελούν μια πολύ καλή σύνοψη των παραμέτρων που παίζουν καθοριστικό ρόλο στο φαινόμενο της διαρροής.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα μικρής κλίμακας πειράματα, τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί από μια πληθώρα μελετητών και έχουν βοηθήσει πάρα πολύ στην κατανόηση του φαινομένου της διαρροής, καθώς σε αυτά τα πειράματα βασίστηκαν οι πρώτες μοντελοποιήσεις. Τα πειράματα αυτά σχετίζονται με όλες τις συνιστώσες μιας διαρροής υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό όπως ο σχηματισμός της λίμνης, η εξάπλωση της, ο βρασμός της, η καύση της, η διασπορά του εύφλεκτου σύννεφου ατμού κ.α.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί μία διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό. Η μοντελοποίηση δηλαδή του ρυθμού διαρροής, της εξάπλωσης της λίμνης, της παραγωγής και της διασποράς του ατμού, της άμεσης μεταβατικής φάσης (RPT) και της θερμικής ακτινοβολίας σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Στο ενδέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αρχικά τέσσερα (4) μοντέλα υπολογισμού των φαινομένων της διαρροής υγροποιημένου φυσικού αερίου, τα οποία είναι οι πρώτες ολοκληρωμένες μελέτες που βοήθησαν τόσο στην ερμηνεία / κατανόηση του γεγονότος όσο και στη πρόβλεψη του μεγέθους και του είδους των επερχόμενων κινδύνων. Παρουσιάζονται επίσης τρία (3) επιπλέον μοντέλα, τα οποία κατασκευάστηκαν μεταγενέστερα από τα τέσσερα αρχικά και είναι αρκετά επηρεασμένα από αυτά. Τα μοντέλα αυτά έχουν δημιουργηθεί από τον ABS, τον DNV και τα εργαστήρια της SANDIA.

Στο δωδέκατο κεφάλαιο γίνεται μια περίληψη των υποθέσεων και των αποτελεσμάτων των τεσσάρων αρχικών μοντελοποιήσεων ενώ γίνεται και μια ανάλυση των λόγων για τους οποίους υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους. Επίσης γίνεται μια σύνοψη / σύγκριση του είδους των αποτελεσμάτων και των αρχικών υποθέσεων μεταξύ των τεσσάρων πρώτων μοντελοποιήσεων του συνολικού φαινομένου της διαρροής (όχι συγκεκριμένων τομέων όπως στα πειράματα του προηγούμενου κεφαλαίου). Η κατηγοριοποίηση γίνεται σύμφωνα με χαρακτηριστικές παραμέτρους ενός ατυχήματος LNG.

Στο δέκατο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μια σειρά από μέτρα πρόληψης και περιορισμού των επιπτώσεων μιας διαρροής, συμπεριλαμβανομένου θεμάτων σχετικά με τον εξοπλισμό, με μέτρα πρόληψης / μείωσης μεγέθους κινδύνων κ.α.

2. ΣΤΟΧΟΣ

Ο σκοπός της μελέτης αυτής είναι αρχικά η κατανόηση της λειτουργίας των μηχανισμών μιας πιθανής διαρροής υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό (εξάπλωση, σχηματισμός λίμνης, ανάφλεξη, διασπορά, εξάτμιση κ.α.) και στη συνέχεια ο καθορισμός των κινδύνων που μπορεί να προκύψουν από τη διαρροή του υγρού φορτίου, με ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση που έχουν στους ανθρώπους και στις κοντινές κατασκευές (κτίρια, εγκαταστάσεις, δεξαμενές κτλ.). Επιπλέον, αναφέρεται και η πορεία και το ιστορικό της παγκόσμιας ναυτιλίας μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου ώστε να μελετηθούν τα διάφορα ατυχήματα σχετικά με LNG πλοία και να υπολογιστεί η συχνότητα εμφάνισης τους κάθε χρόνο ανάλογα με το είδος τους.

3. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρόβλεψη των πιθανών κινδύνων που σχετίζονται με την αποθήκευση και μεταφορά του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) μέσω υγραεριοφόρων έχει οδηγήσει στη δημιουργία ενός σημαντικού αριθμών πειραματικών και αναλυτικών μελετών. Στη παρούσα μελέτη παρουσιάζονται και αναλύονται αυτές οι πειραματικές και αναλυτικές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, τόσο μικρής αλλά και μεγάλης κλίμακας. Ειδικότερα, παρουσιάζονται πειράματα σχετικά με τη διασπορά στην ατμόσφαιρα του σύννεφου LNG ατμού όπως και πειράματα για τη πυρκαγιά της LNG λίμνης που σχηματίζεται μετά από μια διαρροή στο νερό. Εκρήξεις, βρασμός της λίμνης και άμεση μεταβατική φάση είναι ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του φαινομένου της διαρροής που επίσης περιγράφονται και εξετάζονται, όπως και διάφορες μοντελοποιήσεις, σκοπός των οποίων είναι ο υπολογισμός της έκτασης των περιοχών που πλήττονται από τους κινδύνους εξαιτίας της διασποράς του σύννεφου και της πυρκαγιάς λίμνης. Αν και υπάρχουν αρκετά στοιχεία στη διάθεση μας για να μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των διαρροών υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό, υπάρχουν ακόμα αρκετά κενά όσον αναφορά τεχνικές γνώσεις για την πρόβλεψη της έκτασης των κινδύνων. Κάποια από αυτά τα κενά, μπορούν να αντιμετωπιστούν με τις παρούσες μοντελοποιήσεις και την εκτέλεση επιπλέον πειραμάτων, κάτι που αναφέρεται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

The prediction of the possible hazards associated with the storage and transportation of liquefied natural gas (LNG) by ship has motivated a substantial number of experimental and analytical studies. This paper reviews the experimental and analytical work performed to date on large-scale spills of LNG. Specifically, experiments on the dispersion of LNG, as well as experiments of LNG fires from spills on water and land are reviewed. Explosion, pool boiling, and rapid phase transition (RPT) explosion studies are described and discussed, as well as models used to predict dispersion and thermal hazard distances. Although there have been significant advances in understanding the behaviour of LNG spills, technical knowledge gaps to improve hazard prediction are identified. Some of these gaps can be addressed with current modelling and testing capabilities. A discussion of the state of knowledge and recommendations to further improve the understanding of the behaviour of LNG spills on water is provided.

4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ LNG ΚΑΙ LNG CARRIERS

Ένα σημαντικό ποσοστό των παγκοσμίων ενεργειακών αναγκών καλύπτεται σήμερα από την καύση αερίων καυσίμων. Τα καύσιμα αυτά είναι μία σχετικά φθηνή και καθαρή πηγή ενέργειας. Για την μεταφορά των αερίων καυσίμων από τις χώρες παραγωγής στις χώρες κατανάλωσης, χρησιμοποιούνται αφενός εκτεταμένα δίκτυα αγωγών και αφ' εταίρου ειδικά σχεδιασμένα πλοία. Η μεταφορά αερίων καυσίμων με πλοία είναι σημαντικά πιο δύσκολη από αυτήν του πετρελαίου. Για να είναι όμως αυτή η μεταφορά οικονομικά συμφέρουσα θα πρέπει το φυσικό αέριο να υγροποιηθεί ώστε να αυξηθεί η πυκνότητά του, με αποτέλεσμα την μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του πεπερασμένου όγκου κυτών του πλοίου για την μεταφορά σημαντικών ποσοτήτων φορτίου. Η υγροποίηση αυτή επιτυγχάνεται με ψύξη ή με αύξηση της πίεσης ή συνδυασμό και των δύο.

Η υγροποίηση του φυσικού αερίου χρονολογείται από τον 19^ο αιώνα, όταν ο Βρετανός φυσικοχημικός Michael Faraday πειραματίστηκε με την υγροποίηση διάφορων αερίων συμπεριλαμβανομένου και του φυσικού.

Το φυσικό αέριο είναι μίγμα ελαφρών αερίων, κυρίως μεθανίου (75%-95%), αιθανίου και άλλων ελαφρών αερίων. Η μέθοδος της υγροποίησής του επιλέγεται με βάση τις φυσικοχημικές του ιδιότητες. Το φυσικό αέριο έχει σημείο βρασμού τους -162°C . Η κρίσιμη θερμοκρασία του μεθανίου, πάνω από την οποία δεν μπορεί να υγροποιηθεί με αύξηση της πίεσης είναι -82°C , ενώ για την υγροποίησή του στους -82°C απαιτείται πίεση 47 bar. Τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου ή LNGC (Liquefied Natural Gas Carriers) σχεδιάζονται για να μεταφέρουν το φορτίο τους σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία περίπου -162°C .

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο είναι ένα άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό υγρό το οποίο στην υγρή του κατάσταση καταλαμβάνει 600 φορές μικρότερο όγκο από ότι στην αέρια κατάσταση. Ο ατμός του θεωρείται εύφλεκτος και είναι επίσης άχρωμος και άοσμος, παρόλα αυτά όμως το σύννεφο ατμών του LNG έχει άσπρο χρώμα λόγω των υδρατμών που συγκρατούνται εξαιτίας της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας του. Οι περιεκτικότητες του μεθανίου στο σύννεφο ατμού για να θεωρείται εύφλεκτο είναι από 5 με 15 % κατά όγκο.

4.1. Γενικά για LNG στόλο

Την τελευταία δεκαετία η κατανάλωση φυσικού αερίου παρουσίασε έναν ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξεως του 2.4 %, ξεπερνώντας και τον αντίστοιχο ετήσιο ρυθμό της ενεργειακής κατανάλωσης, ο οποίος ήταν στο 2.1 %.

Την περασμένη δεκαετία, η ετήσια αύξηση του εμπορίου του υγροποιημένου φυσικού αερίου κυμάνθηκε στο 7.7 %, σταθερά μπροστά από την ανάπτυξη του παγκόσμιου εμπορίου αγωγών, το οποίο παρουσίασε μια αύξηση μόνο 4.7 %. Χωρίς να προκαλεί έκπληξη, ο παγκόσμιος στόλος υγραεριοφόρων αυξάνεται ραγδαία. Το 2007 31 νέα πλοία παραδόθηκαν, αυξάνοντας τον παγκόσμιο στόλο των LNG κατά 14 %. Μέχρι το τέλος του 2008, ο αριθμός των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου θα φτάσει τα 317 με 79 επιπλέον σε παραγγελίες για

παράδοση μέχρι το 2012. Κύριος οδηγός σε αυτή την αύξηση υπήρξε η μεγάλη ζήτηση σε ενέργεια των χωρών της Ασίας. Το 2006, η Ιαπωνία και η Νότιος Κορέα κατείχαν το ρεκόρ σε εισαγωγές LNG αυξάνοντας τες κατά 7% σε 62.5 Mt και 13.25% σε 25.3 Mt, αντίστοιχα. Ένα άλλο κομβικό σημείο ήταν το 2006 όταν η Κίνα και το Μεξικό άρχισαν να εισάγουν LNG, φέρνοντας τον αριθμό των χωρών που εισάγουν υγροποιημένο φυσικό αέριο στις 17.



Σχήμα 1. Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου

Η αυξημένη ανάγκη για μελλοντική εξασφάλιση των ενεργειακών αποθεμάτων προσέλκυσε πολλές παράκτιες χώρες στη θαλάσσια μεταφορά του υγροποιημένου φυσικού αερίου. Συνεπώς, πολλά κράτη συμπεριέλαβαν αυτό το είδος μεταφοράς στην ενεργειακή ατζέντα τους, δημιουργώντας μακροπρόθεσμα συμβόλαια με ιδιοκτήτες υγραεριοφόρων ώστε να αποφύγουν τη συνεχή προμήθεια.

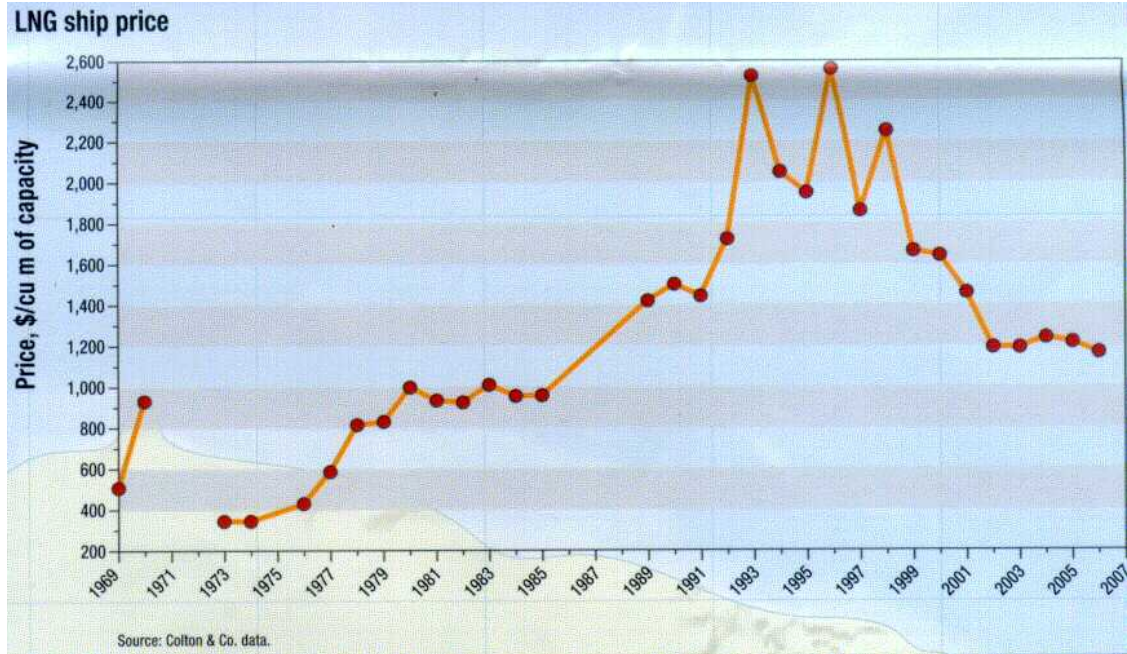
Το μεγάλο μέγεθος σε απαιτήσεις είναι αυτό στο οποίο οφείλεται η άνοδος στη βιομηχανία των LNG πλοίων, φτάνοντας σε πολλές πρωτιές τα τελευταία δυο χρόνια. Το 2006 παραδόθηκε το πρώτο πλοίο με ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης διπλού καύσιμου. Από τότε αρκετά πλοία τέτοιου είδους πρόωσης κατασκευάστηκαν φτάνοντας τον αριθμό τους στα 86.

Ένα άλλο σημαντικό τεχνικό επίτευγμα της LNG βιομηχανίας είναι η ραγδαία αύξηση στην χωρητικότητα του πλοίου, η οποία οδήγησε στο πρώτο supersized Q-max LNG χωρητικότητας 265,000 m³ ιδιοκτησία της Qatar Gas Transport Co's.

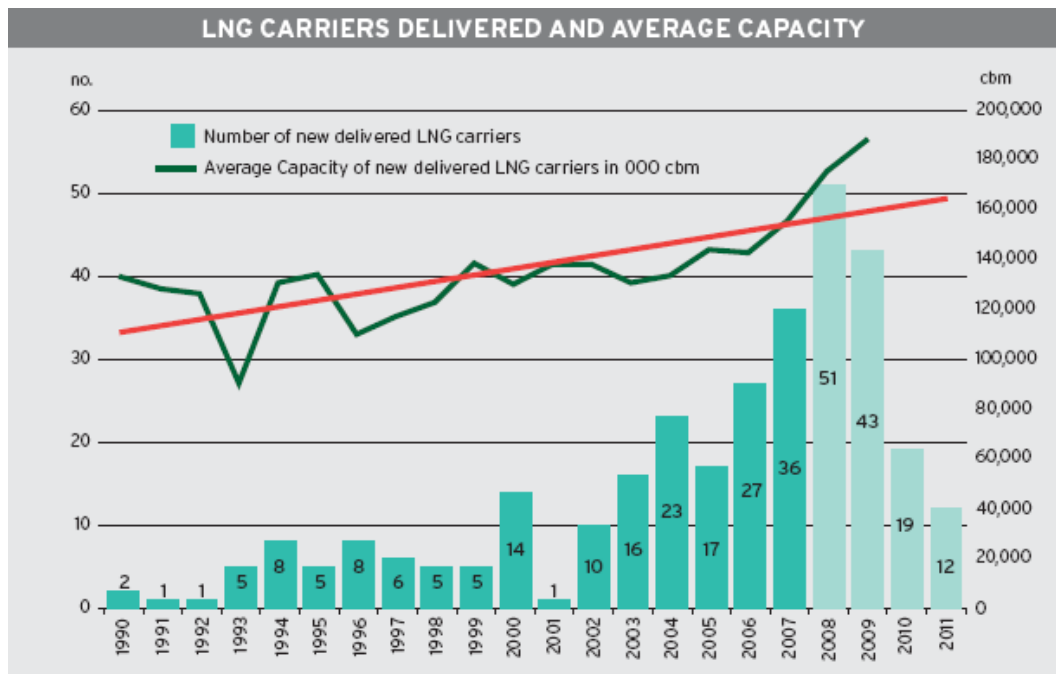
Όσον αναφορά το κόστος κτίσης ενός τέτοιου είδους πλοίου ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένα υγραεριοφόρο μεγέθους 125,000 m³ κόστιζε πριν μερικά χρόνια 250 εκ. δολάρια. Η τιμή αυτή έπεσε περίπου στα 140 εκ. δολάρια το 2000, αλλά αυξήθηκε και πάλι στη συνέχεια με αποτέλεσμα τα επίπεδα των τιμών κατασκευής LNG πλοίων να φτάσει στα 165 – 175 εκ. δολάρια σήμερα στα ναυπηγεία της Νοτίου Κορέας και της Ιαπωνίας αντίστοιχα (σχήμα 2).

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

Η διακύμανση αυτή στη τιμή των νέων κατασκευών LNG πλοίων παρουσιάζεται στα επόμενα διαγράμματα:



Σχήμα 2. Διακύμανση κόστους κατασκευής LNG πλοίων.



Σχήμα 3. Παραγγελίες LNG πλοίων από το 1990 έως το 2011.

4.2. Κατασκευαστικά Στοιχεία

Λαμβάνοντας υπόψη τους διάφορους τρόπους που μπορεί να μεταφερθεί το LNG με πλοίο, η πιο οικονομική πρόταση περιλαμβάνει μέχρι σήμερα τα συστήματα τα οποία μεταφέρουν το LNG ως μαζικό φορτίο (bulk cargo) το οποίο ψύχεται κάτω από την θερμοκρασία βρασμού του και σε πίεση λίγο παραπάνω από την ατμοσφαιρική πίεση.

Οι διάφορες τεχνικές φύλαξης μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές ομάδες:

1. Το ανεξάρτητο σύστημα δεξαμενών όπου η βασική δεξαμενή – container – είναι αυτό-υποστηριζόμενη και ανεξάρτητη με την υπόλοιπη κατασκευή του πλοίου. Αυτές οι δεξαμενές μπορεί να είναι ή πρισματικές ή κυλινδρικές ή και συνδυασμός και των δύο.
2. Το ολοκληρωμένο σύστημα δεξαμενών όπου η βασική δεξαμενή – container – ανήκει στην όλη κατασκευή του πλοίου. Αυτές αναφέρονται σαν μεμβρανικού τύπου ημιανεξάρτητες ή ημιμεμβρανικού τύπου.

4.2.1. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Τα LNG carriers αποτελούνται από δύο βασικά μέρη, την γάστρα σε συνδυασμό με την εγκατάσταση πρόωσης, και τον κρυογόνο τομέα που διασφαλίζει την σωστή φύλαξη του φορτίου.

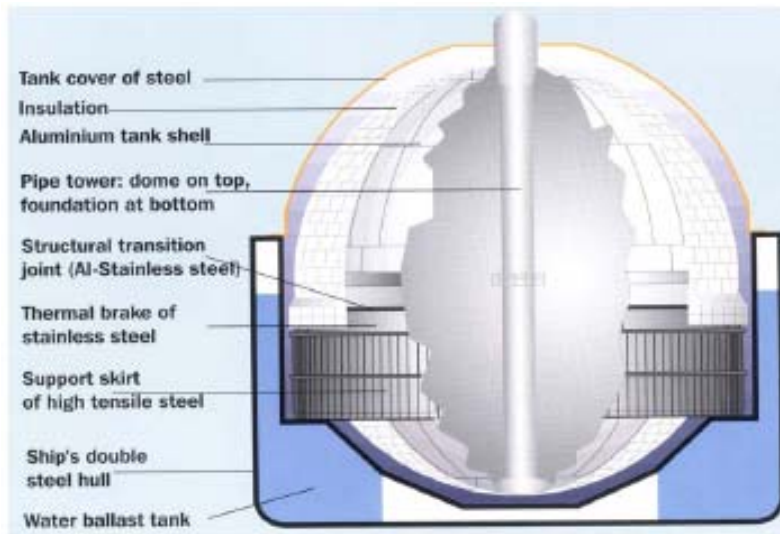
Όλα τα LNGC είναι απαραίτητο να σχεδιάζονται με διπλά τοιχώματα τόσο στον πυθμένα όσο και στα πλαϊνά του πλοίου ώστε σε περίπτωση σύγκρουσης ή προσάραξης η ζημιά στις δεξαμενές φορτίου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και να μην υπάρξει διαρροή.

Επειδή το υγροποιημένο φυσικό αέριο έχει πολύ μικρή πυκνότητα ($0,4 - 0,5 \text{ tn/m}^3$), ένα πλοίο που σχεδιάζεται για την μεταφορά του θα έχει τεράστια χωρητικότητα σε σχέση με το DWT του. Σε αντίθεση με τα δεξαμενόπλοια πετρελαίου τα LNGC σε μία κατάσταση Ballast δεν μπορούν να γεμίσουν τις δεξαμενές φορτίου με νερό. Μάλιστα πολλές φορές κρατείται μικρή ποσότητα LNG μέσα στις δεξαμενές (κατά την διάρκεια μιας κατάστασης ερματισμού) προκειμένου αυτές να διατηρήσουν την κανονική θερμοκρασία μεταφοράς.

Τέλος όσο αναφορά την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου, αυτή εξαρτάται άμεσα από την εγκατάσταση πρόωσης.

4.2.2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η γάστρα ενός LNG δεξαμενόπλοιου κατασκευάζεται συνήθως από έναν συνδυασμό βαθμών ελαφρού χάλυβα. Κατά Lloyd's Register χάλυβες βαθμού A χρησιμοποιούνται συνήθως για ελάχιστες θερμοκρασίες κοντά στους $0 \text{ }^\circ\text{C}$, βαθμού D από $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ και βαθμού E για ακόμα χαμηλότερες.



Σχήμα 4. Κατασκευαστική δομή σφαιρικών δεξαμενών

Βασική επιδίωξη είναι η αποφυγή της άμεσης επαφής του LNG με την μεταλλική κατασκευή της γάστρας του πλοίου ώστε η θερμοκρασία του χάλυβα να μην πέσει πιο κάτω από εκείνη για την οποία έχει δοκιμαστεί και εγκριθεί. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο είναι πολύ σημαντικό πολλές φορές να χρησιμοποιούνται κάποια μέσα πρόσδωσης θερμότητας στις γειτονικές χαλύβδινες περιοχές των δεξαμενών.

Για την επιλογή των υλικών κατασκευής τόσο της γάστρας του πλοίου όσο και των δεξαμενών φύλαξης του LNG ισχύουν κάποιες προϋποθέσεις:

- Συμβασιμότητα μεταξύ του φορτίου και των υλικών κατασκευής σε όλες τις θερμοκρασίες και καταστάσεις.
- Τα υλικά θα πρέπει να είναι ικανά ώστε να αντέχουν σε όλες τις πιέσεις συμπεριλαμβανομένων και αυτών από το στατικό βάρος του φορτίου, των γειτονικών θερμοκρασιών, ιδιαίτερα όταν ψύχονται οι δεξαμενές κατά τις δυναμικές φορτίσεις που δημιουργούνται όταν κινείται το πλοίο.
- Τέλος τα υλικά αυτά θα πρέπει να είναι λειτουργικά τόσο ως προς την καλή κατασκευή (συγκολλήσεις), όσο και ως προς τον οικονομικό τομέα.



Σχήμα 5. Κατασκευαστική δομή μεμβρανικών δεξαμενών

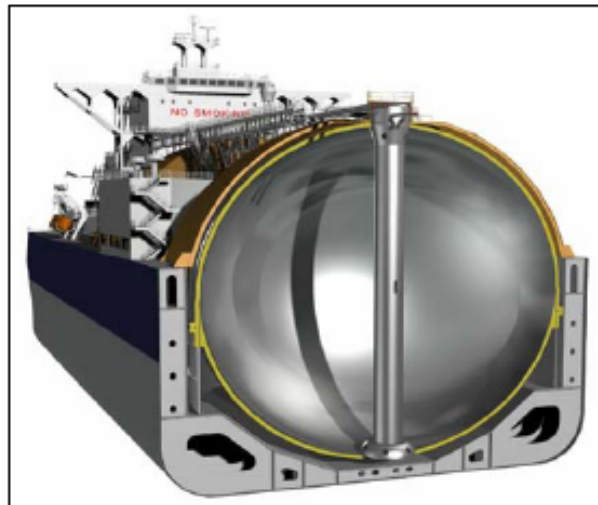
4.2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

Όπως προαναφέραμε υπάρχουν δύο είδη δεξαμενών κατηγοριοποιώντας τες σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής τους:

1. Αυτοφερόμενες (self-supporting)
2. Μεμβρανικές (membrane-type)

Έχουν αναπτυχθεί και σχεδιαστεί και διάφορες υποκατηγορίες των δύο παραπάνω τύπων LNG δεξαμενών:

- a. Moss tanks που αναπτύχθηκε από την Νορβηγική εταιρία Moss Maritime. Πρόκειται για σφαιρική **αυτοφερόμενη** δεξαμενή από αλουμίνιο.
- b. IHI που αναπτύχθηκε από την Ishikawajima-Harima Heavy Industries. Πρόκειται για **αυτοφερόμενη** δεξαμενή από αλουμίνιο.
- c. TGZ Mark III που αναπτύχθηκε από την Technigaz. Πρόκειται για δεξαμενή **μεμβρανικού τύπου** με μεμβράνη από ανοξείδωτο χάλυβα με ειδικές εσοχές (waffles) για την απορρόφηση θερμικών συστολών καθώς ψύχεται η δεξαμενή.
- d. GT96 που αναπτύχθηκε από τη Gas Transport. Πρόκειται για δεξαμενή **μεμβρανικού τύπου** που αποτελείται από μία πρωτεύουσα και μια δευτερεύουσα λεπτή μεμβράνη από το υλικό Invar το οποίο έχει μηδενικές θερμικές συστολές. Η μόνωση είναι φτιαγμένη από ειδικά κουτιά από κόντρα πλακέ γεμισμένα με περλίτη.



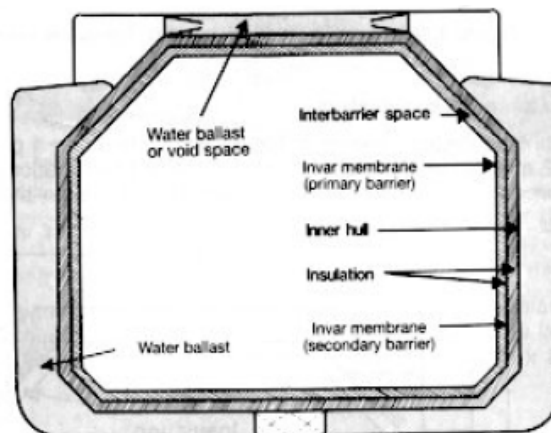
Σχήμα 6. Εγκάρσια όψη σφαιρικής δεξαμενής.

4.2.4 ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Η μόνωση στην φύλαξη του LNG σε δεξαμενές διαφόρων τύπων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, γιατί χάρη σε αυτήν μειώνονται στο ελάχιστο οι λοιπές θερμικές ροές από και προς την δεξαμενή και προστατεύεται η υπόλοιπη μεταλλική κατασκευή του πλοίου από τις κρυογονικές αρνητικές ιδιότητες του LNG. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία μονωτικών υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιούνται με επιτυχία. Μερικά από τα μονωτικά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι:

- Ξύλο από Balsa
- Ίνες γυαλιού
- Πολυουρεθάνη
- Σιλκόνη με περλιτική επίστρωση

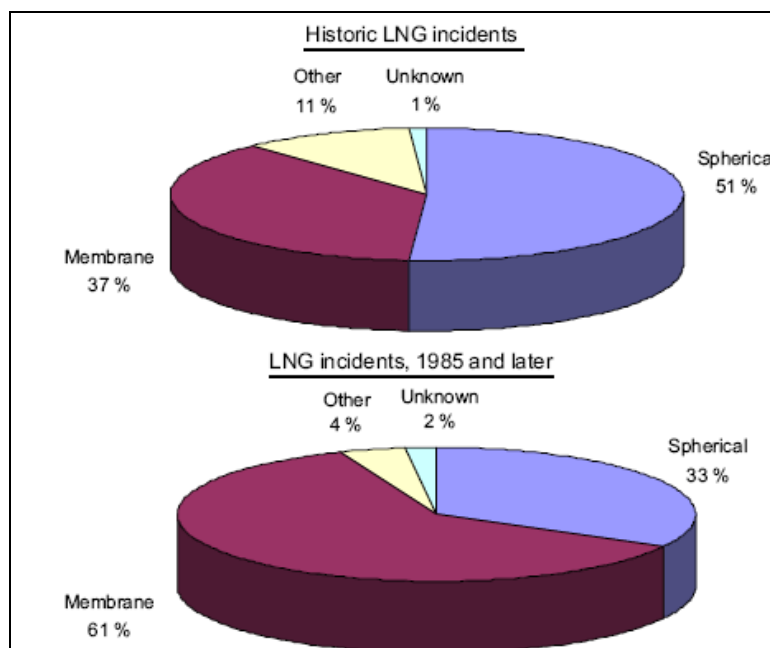
Η επιλογή των μονωτικών υλικών θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέξουν οποιοδήποτε πιθανό φορτίο τους επιβληθεί, να είναι αδιάβροχα σε υδρατμούς, να εμποδίσουν την περαιτέρω διείσδυση της εξωτερικής γάστρας και τέλος να έχουν αντιπυρικές ιδιότητες.



Σχήμα 7. Εγκάρσια όψη μεμβρανικής πρισματικής δεξαμενής.

5. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

Η μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου μέσω θαλάσσης έχει αυξηθεί σταδιακά από τη πρώτη θαλάσσια μεταφορά LNG το 1959 και τη πρώτη φορά που κατασκευάστηκε δεξαμενόπλοιο με αποκλειστικό σκοπό το εμπόριο και τη μεταφορά του φυσικού αερίου το 1964. Έτσι, υπάρχουν περισσότερα από 40 χρόνια εμπειρίας στη κατασκευή και λειτουργία τέτοιου είδους πλοίων. Μια βιβλιογραφική επιθεώρηση στην ιστορία της LNG ναυτιλίας αποκαλύπτει πληροφορίες για 182 γεγονότα, με ή χωρίς διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου, περιλαμβάνοντας υγραεριοφόρα χωρητικότητας μεγαλύτερης από 6000 GRT. Από αυτά, 24 συνέβησαν σε πλοία που βρίσκονταν εκτός λειτουργίας (π.χ. σε γιάρδες κατά τη διάρκεια επισκευών ή κατασκευής ή ακόμα σε ρυμουλκήσεις και δοκιμαστικά) και θεωρούνται εκτός θέματος της συγκεκριμένης μελέτης. Έτσι, η σχετική εμπειρία σε ατυχήματα αποκτήθηκε από τα υπόλοιπα 158 γνωστά ενώ η κατανομή τους συγκριτικά με το είδος τους παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα. Το διαθέσιμο υλικό καταδεικνύει ότι ατυχήματα εμφανίζονται συχνότερα σε δεξαμενές σφαιρικής μορφής, αλλά κατά την διάρκεια των τελευταίων 20 χρόνων ο αριθμός ατυχημάτων σε δεξαμενές μεμβρανικού τύπου παρουσιάζεται μεγαλύτερος. Διαθέσιμα στατιστικά είναι πολύ αποσπασματικά (sparse to draw) για να προκύψουν συγκεκριμένα συμπεράσματα ενώ αυτά τα συμπεράσματα δεν μπορούν να βγουν εάν δεν συμπεριληφθεί στα στατιστικά ο πληθυσμός του κάθε υγραεριοφόρου, αλλά παρόλα αυτά σημειώνεται ότι έχουν συμβεί ατυχήματα για όλα τα είδη αυτών των πλοίων. Για το σκοπό, λοιπόν, αυτής της μελέτης, η συχνότητα των ατυχημάτων θεωρείται ανεξάρτητη του τύπου των υγραεριοφόρων.



Σχήμα 8. Ατυχήματα ανάλογα με το είδος της δεξαμενής πριν και μετά το 1985

Τα 158 γνωστά ατυχήματα σχετικά με τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με κάποια συγκεκριμένους τύπους ατυχημάτων. Στους

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

επόμενους πίνακες (1 και 2) φαίνονται οι κατηγορίες και οι διάφορες χρονικές περίοδοι. Αυτή η κατηγοριοποίηση των γεγονότων είναι σε γενική συμφωνία με τα σενάρια που προκύπτουν από την αναγνώριση των γεγονότων. Μερικές από τις κατηγορίες δεν σχετίζονται με αρκετές συνέπειες σε περιπτώσεις θανάτων. Για παράδειγμα, η κατηγορία βλάβης εξοπλισμού και μηχανημάτων έχει σχέση με ατυχήματα όπου η βλάβη οδήγησε σε διάφορα γεγονότα όπως συγκρούσεις, προσαράξεις ή φωτιά. Σε αντίθετες περιπτώσεις όπου εμφανίστηκαν τέτοια επακόλουθα, π.χ. βλάβη πηδαλίου, και συνέβη κάποια σύγκρουση, το ατύχημα κατηγοριοποιήθηκε στη κατηγορία που αναφέρετε στο ανάλογο επακόλουθο (σύγκρουση). Συνεπώς, αν και η βλάβη εξοπλισμού και μηχανημάτων έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, η κατηγορία αυτή και η επιπλέον πιθανή κλιμάκωση των σεναρίων είναι συγκεκριμένα για πλοία μεταφοράς LNG εξαιτίας των χαρακτηριστικών του φορτίου τους.



Σχήμα 9. Γενική όψη ρήγματος σε γάστρα πλοίου

Πίνακας 1. Συνεισφορά του ιστορικού των ατυχημάτων με LNG σε κατηγορίες

Κατηγορία ατυχήματος	Αριθμός Ατυχημάτων	Συχνότητα (ανά έτος πλοίου)	Πιθανότητα εμφάνισης ατυχήματος (ανά έτος πλοίου) %
Σύγκρουση	19	0.79	0.023
Προσάραξη	8	0.33	0.01
Επαφή	8	0.33	0.01
Φωτιά και έκρηξη	10	0.42	0.0125
Αστοχία εξοπλισμού και μηχανολογικής εγκατάστασης	55	2.29	0.068
Κακοκαιρία	9	0.37	0.011
Συμβάντα κατά τη φόρτωση/εκφόρτωση του φορτίου	22	0.91	0.027
Αστοχία συστήματος αποθήκευσης του φορτίου	27	1.12	0.033
Σύνολο	158	6.58	0.19

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ**

Πίνακας 2(α). Γενικά στοιχεία χαρακτηριστικών ατυχημάτων (1944-1974)

Major LNG Incidents							
Incident Date	Ship/Facility Name	Location	Ship Status	Injuries/Fatalities	Ship/Property Damage	LNG Spill/Release	Comment
1944	East Ohio Gas LNG Tank	Cleveland, Ohio, US	NA	128 deaths	NA	NA	LNG peakshaving facility. Tank failure and no earthen berm. Vapor cloud formed and filled the surrounding streets and storm sewer system. Natural gas in the vaporizing LNG pool ignited.
1965		Canvey Island, UK	A transfer operation	1 seriously burned		Yes	
1965	Jules Verne		Loading	No	Yes	Yes	Overfilling. Tank covered and deck fractures.
1965	Methane Princess		Disconnecting after discharge	No	Yes	Yes	Valve leakage. Deck fractures.
1971	LNG ship Esso Brega, La Spezia LNG Import Terminal	Italy	Unloading LNG into the storage tank	NA	NA	Yes	First documented LNG rollover incident. Tank developed a sudden increase in pressure. LNG vapor discharged from the tank safety valves and vents. Tank roof slightly damaged. No ignition.
1973	Texas Eastern Transmission, LNG Tank	Staten Island, NY, US	NA	40 killed	No	No	Industrial incident unrelated to the presence of LNG (construction incident). During the repairs, vapors associated with the cleaning process apparently ignited the mylar liner. Fire caused temperature in the tank to rise, generating enough pressure to dislodge a 6-inch thick concrete roof, which then fell on the workers in the tank.
1973		Canvey Island, UK	NA	No	Yes	Yes	Glass breakage. Small amount of LNG spilled upon a puddle of rainwater, and the resulting flameless vapor explosion, called a rapid phase transition (RPT), caused the loud "booms". No injuries resulted.
1974	Massachusetts		Loading	No	Yes	Yes	Valve leakage. Deck fractures.

Πίνακας 2(β). Γενικά στοιχεία χαρακτηριστικών ατυχημάτων (1974-1980)

Major LNG Incidents							
Incident Date	Ship/Facility Name	Location	Ship Status	Injuries/Fatalities	Ship/Property Damage	LNG Spill/Release	Comment
1974	Methane Princess		In port	No	Yes	No	Touched bottom at Arzew.
1975	Philadelphia Gas Works		NA	No	Yes	NA	Not caused by LNG. An iso-pentane intermediate heat transfer fluid leak caught fire and burned the entire vaporizer area.
1977	Arzew	Algeria	NA	1 worker frozen to death	NA	Yes	Aluminum valve failure on contact with cryogenic temperatures. Wrong aluminum alloy on replacement valve. LNG released, but no vapor ignition (LNG liquefaction facility).
1977	LNG Aquarius		Loading	No	No	Yes	Tank overfilled.
1979	Columbia Gas LNG Terminal	Cove Point, Maryland, US	NA	1 killed, 1 seriously injured	Yes	Yes	An explosion occurred within an electrical substation. LNG leaked through LNG pump electrical penetration seal, vaporized, passed through 200 feet of underground electrical conduit, and entered the substation. Since natural gas was never expected in this building, there were no gas detectors installed in the building. The normal arcing contacts of a circuit breaker ignited the natural gas-air mixture, resulting in an explosion. (LNG regasification terminal)
1979	Mostefa Ben-Boualid Ship	?	Unloading	No	Yes	Yes	Valve leakage. Deck fractures.
1979	Pollenger Ship	?	Unloading	No	Yes	Yes	Valve leakage. Tank cover plate fractures.
1979	El Paso Paul Kayser Ship		At sea	No	Yes	No	Stranded. Severe damage to bottom, ballast tanks, motors water damaged, bottom of containment system set up.
1980	LNG Libra		At sea	No	Yes	No	Shaft moved against rudder. Tail shaft fractured.
1980	LNG Taurus		In port	No	Yes	No	Stranded. Ballast tanks all flooded and listing. Extensive bottom damage.

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ**

Πίνακας 2(γ). Γενικά στοιχεία χαρακτηριστικών ατυχημάτων (1984-2004)

Major LNG Incidents							
Incident Date	Ship/Facility Name	Location	Ship Status	Injuries/Fatalities	Ship/Property Damage	LNG Spill/Release	Comment
1984	Melrose		At sea	No	Yes	No	Fire in engine room. No structural damage sustained - limited to engine room.
1985	Gradinia		In port	No	Not reported	No	Steering gear failure. No details of damage reported.
1985	Isabella		Unloading	No	Yes	Yes	Cargo valve failure. Cargo overflow. Deck fractures.
1989	Tellier		Loading	No	Yes	Yes	Broke moorings. Hull and deck failures.
1990	Bachir Chihani		At sea	No	Yes	No	Sustained structural cracks allegedly caused by stressing and fatigue in inner hull.
1993	Indonesian liquefaction facility	Indonesia	NA	No	NA	NA	LNG leak from open run-down line during a pipe modification project. LNG entered an underground concrete storm sewer system and underwent a rapid vapor expansion that overpressured and ruptured the sewer pipes. Storm sewer system substantially damaged.
2002	LNG ship Norman Lady	East of the Strait of Gibraltar	At sea	No	Yes	No	Collision with a U.S. Navy nuclear-powered attack submarine, the U.S.S. Oklahoma City. In ballast condition. Ship suffered a leakage of seawater into the double bottom dry tank area.
2004	Skikda I	Algeria	NA	27 killed 56 injured (The casualties are mainly due to the blast, few casualties due to fire)	NA	NA	On January 2004: No wind, semi-confined area (cold boxes, boiler, control room on 3 sides). The fire completely destroyed the train 40, 30, and 20, although it did not damage the loading facilities or three large LNG storage tanks also located at the terminal. Complete details are pending until completion of ongoing accident investigation.

Sources: University of Houston, "LNG Safety and Security," October 2003. <http://www.beq.utexas.edu/energyecon/lng/>. Cited with permission; Sonatrach, "The Incident at the Skikda Plant: Description and Preliminary Conclusions", March 2004.

ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ

Από την έναρξη του παγκόσμιου εμπορίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου το 1959, έχουν πραγματοποιηθεί πάνω από 80,000 ταξίδια LNG υγροιοφόρων, καλύπτοντας συνολικά απόσταση άνω των 100 εκ. μιλίων, χωρίς να υπάρξει καμία σημαντική απώλεια φορτίου και κανένα ατύχημα σχετικά με έκρηξη ή πυρκαγιά στη διαδικασία της μεταφοράς.

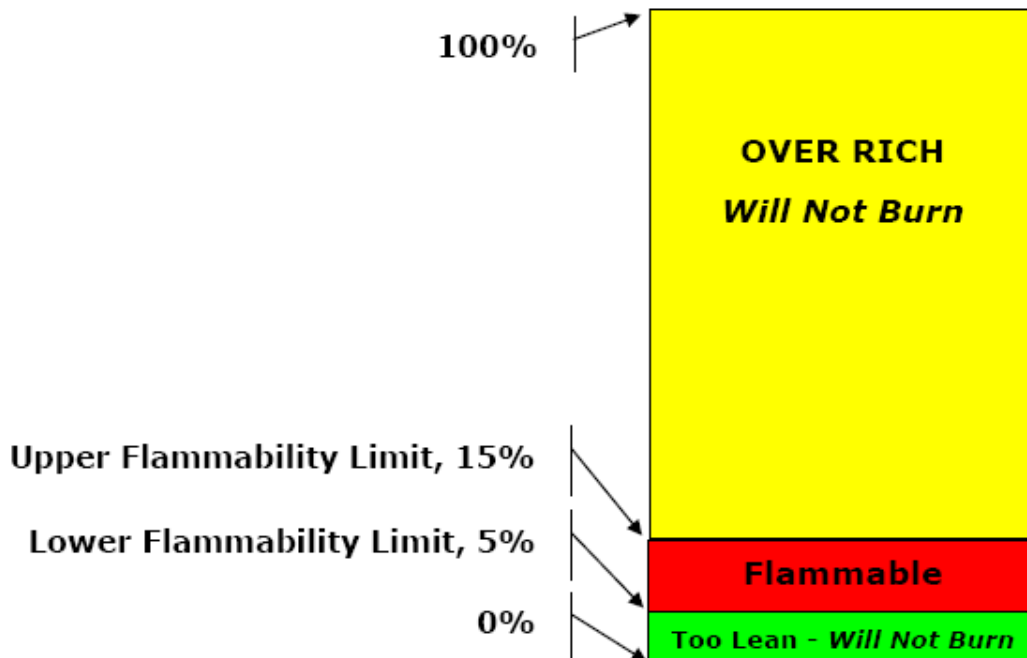
Σήμερα πάνω από 300 πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου ταξιδεύουν μεταφέροντας πάνω από 200 εκ. τόνους κάθε χρόνο σε λιμάνια όλου του κόσμου. Το ιστορικό ασφάλειας των μεταφορών αυτών οφείλεται στη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας, των λεπτομερών διαδικασιών ασφάλειας, της εκπαίδευσης, της συντήρησης και των αυστηρών κυβερνητικών κανονισμών.

Η πιθανότητα εμφάνισης ενός τέτοιου ατυχήματος όπως έχει υπολογιστεί στον πίνακα 1 είναι πάρα πολύ μικρή, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την πιθανότητα εμφάνισης σύγκρουσης να είναι 0.023 % σε ένα δρομολόγιο LNG πλοίου.

6. ΚΙΝΔΥΝΟΙ LNG

Οι κύριοι κίνδυνοι από LNG προκύπτουν από την κρυογόνο θερμοκρασία του (-162 °C), την ευφλεκτότητα του και τα χαρακτηριστικά διασποράς του ατμού που δημιουργείται. Σε υγρή μορφή, το LNG από μόνο του ούτε θα καεί ούτε θα εκραγεί. Το μεθάνιο, το κύριο συστατικό του LNG, είναι άχρωμο και άγευστο και είναι ταξινομημένο ως απλό ασφυξιογόνο στην ανθρώπινη έκθεση. Το LNG εξατμίζεται ταχύτατα όταν εκτίθεται σε περιβαλλοντικές περιοχές θερμότητες όπως το θαλασσινό νερό, δημιουργώντας 620 με 630 m³ φυσικού αερίου για κάθε 1 m³ υγροποιημένου φυσικού αερίου.

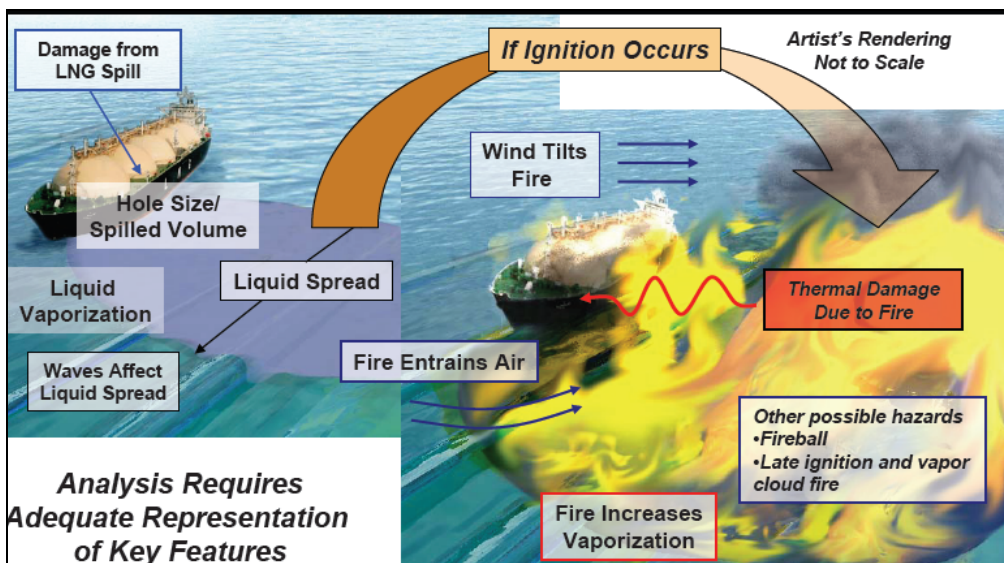
Όταν διαρρεύσει πάνω στο νερό, το LNG θα παράγει αρχικά ένα σύννεφο ατμού (οι κρύοι ατμοί είναι πυκνότεροι από τον αέρα και μένουν πιο κοντά στο νερό ή στο έδαφος). Καθώς αναμιγνύεται το σύννεφο αυτό με τον αέρα, θερμαίνεται και διασκορπίζεται στην ατμόσφαιρα. Εάν δεν υπάρξει ανάφλεξη, το εύφλεκτο σύννεφο ατμού θα παρασυρθεί από τον αέρα έως ότου τα αποτελέσματα της διασποράς αραιώσουν τους ατμούς σε επίπεδα κάτω από την ελάχιστη συγκέντρωση που το κάνει εύφλεκτο. Σε μια συγκέντρωση 5% του αερίου στον αέρα, οι LNG ατμοί βρίσκονται στο κατώτερο εύφλεκτο όριο τους (lower flammability limit). Κάτω από αυτή την αναλογία ατμού-αέρα, το σύννεφο είναι πολύ αραιωμένο για να υπάρξει ανάφλεξη. Σε ένα ποσοστό 15% αυτής της αναλογίας, οι LNG ατμοί βρίσκονται στο ανώτερο εύφλεκτο όριο τους και είναι η κατάσταση πέρα της οποίας το σύννεφο είναι πολύ πλούσιο και ανίκανο για ανάφλεξη.



Σχήμα 10. Ανώτατο και κατώτατο όριο ευφλεκτότητας του LNG.

Η απόσταση που μπορεί να φτάσει ένα εύφλεκτο σύννεφο ατμού LNG εξαιτίας του αέρα, είναι μια συνάρτηση του όγκου του υγρού που διέρρευσε, του ρυθμού της διαρροής αυτής και των καιρικών συνθηκών που επικρατούν εκείνη τη στιγμή. Επίσης, προκειμένου να φτάσει το σύννεφο σε αυτές τις αποστάσεις, θα πρέπει να αποφύγει την ανάφλεξη. Διαπιστώνεται, ότι οι μεγάλες απελευθερώσεις από ένα LNG πλοίο θα απαιτούσαν πιθανώς μια σημαντική πηγή ενέργειας για ανάφλεξη (να παραβιαστεί δηλαδή το εξωτερικό τμήμα της γάστρας, το εσωτερικό μέρος του double hull και η δεξαμενή αποθήκευσης). Ένα γεγονός ικανοποιητικού μεγέθους ώστε να παραβιάσει τη δεξαμενή του LNG, μπορεί να παρέχει τις πηγές ανάφλεξης. Εάν το εύφλεκτο σύννεφο αναφλέγεται από το γεγονός της έναρξης του ρήγματος ή από κάποιες άλλες πηγές (π.χ. στο σκάφος, σε άλλα κοντινά σκάφη, στην ακτή), η φλόγα θα κατευθυνθεί προς την πηγή παραγωγής του ατμού και το εύφλεκτο σύννεφο δεν θα απομακρυνθεί πολύ από το σημείο εκείνο.

Όταν ένα εύφλεκτο μίγμα αερίου-αέρα από LNG διαρροή αναφλέγεται, μπορεί να οδηγήσει σε μια πυρκαγιά λάμψης, η οποία είναι μια πυρκαγιά μικρής διάρκειας που καίει τους ατμούς που ήδη αναμίχθηκαν με τον αέρα σε εύφλεκτες συγκεντρώσεις. Το μέτωπο της φλόγας κατευθύνεται προς τα πίσω στη περιοχή της διαρροής, υπό τον όρο ότι η συγκέντρωση ατμού κατά μήκος αυτής της πορείας είναι αρκετά υψηλή να συνεχίσει. Ο ρυθμός με τον οποίο το μέτωπο αυτό ταξιδεύει εξαρτώμενο από το άκαυστο αέριο ονομάζεται ελασματική ταχύτητα καψίματος (laminar burning velocity). Ένα μίγμα μεθανίου-αέρα θα καίγεται αργά, τείνοντας να αναφλέξει τα καύσιμα συστατικά του σύννεφου ατμού, ενώ οι γρήγορες ταχύτητες της φλόγας οδηγούν περισσότερο σε πυρκαγιές λάμψης παρά σε αυτούποστηριζόμενες αναφλέξεις.



Σχήμα 11. Διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό.

Αν και οι LNG ατμοί μπορούν να εκραγούν (δημιουργώντας τεράστιες υπερπτήσεις) εάν υπάρξει ανάφλεξη μέσα σε περιορισμένο χώρο, όπως ένα κτίριο ή μια κατασκευή, δεν υπάρχει καμία ένδειξη που να προτείνει ότι το LNG εκρήγνυται σε περίπτωση ανάφλεξης σε ανοιχτό χώρο. Έχουν γίνει πειράματα σχετικά με τον καθορισμό του πότε μπορεί να εκραγούν τα μίγματα μεθανίου – αέρα και, μέχρι σήμερα, είναι όλα αρνητικά.

Οι κύριοι κίνδυνοι από LNG σχετίζονται με την εύφλεκτη διασπορά του ατμού και την θερμική ακτινοβολία που προκαλείται. Δευτερογενείς κίνδυνοι, όπως κρυογόνα εγκαύματα και ασφυξία, είναι χαρακτηριστικά εντοπισμένα στις διαδικασίες μεταφορών και αποθήκευσης του LNG.

Το LNG είναι λιγότερο επικίνδυνο από το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG) και το υγροποιημένο αιθυλένιο, τα οποία έχουν μεγαλύτερο ειδικό βάρος, μεγαλύτερη τάση στο να δημιουργήσουν εκρηκτικά σύννεφα ατμού, απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την ανάφλεξη τους και έχουν υψηλότερες θεμελιώδεις ταχύτητες καψίματος. Το LNG δεν είναι τοξικό και εξατμίζεται ακαριαία, επομένως οι μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιδράσεις από μια απελευθέρωση είναι αμελητέες εάν δεν υπάρχει καμία ανάφλεξη των φυσικών ατμών αερίου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφοροι κίνδυνοι που σχετίζονται με μια διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό, όπως τους έχει κατηγοριοποιήσει ο ABS (2004).

- Κίνδυνοι πυρκαγιάς
- Εκρήξεις
- Άμεση μεταβατική φάση (RPT)
- Κρυογόνες επιδράσεις

6.1 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Το LNG ατμοποιείται γρήγορα δεδομένου ότι απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον, και ο προκύπτων ατμός είναι εύφλεκτος όταν αναμιγνύεται στον αέρα στις συγκεντρώσεις από 5 σε 15% (κατά όγκο). Οι ιδιότητες του σχετικά με τη φωτιά είναι συγκρίσιμες με άλλα ελαφριά καύσιμα υδρογονανθράκων. Η μόνη σημαντική διαφορά είναι ότι το μοριακό βάρος του είναι αρκετά μικρότερο από αυτό του αέρα, έτσι μόλις θερμανθεί πάνω από περίπου $-162\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-108\text{ }^{\circ}\text{C}$) θα γίνει λιγότερο πυκνό από τον αέρα και θα τείνει να αυξηθεί και να διασκορπίσει γρηγορότερα. Εντούτοις, ο LNG ατμός στο κανονικό σημείο βρασμού του $-259\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$) είναι 1.5 φορές πυκνότερος από τον αέρα σε $77\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Υπάρχουν 3 είδη πυρκαγιών: η πυρκαγιά λίμνης, jet fires και πυρκαγιές λάμψης.

Πυρκαγιά λίμνης - Όταν ένα εύφλεκτο υγρό απελευθερώνεται από μια δεξαμενή αποθήκευσης ή μια σωλήνωση, μια υγρή λίμνη μπορεί να δημιουργηθεί. Καθώς σχηματίζεται αυτή η λίμνη, ένα μέρος του υγρού θα εξατμιστεί, και αν το εύφλεκτο αυτό σύννεφο βρει μια πηγή ανάφλεξης, η φλόγα μπορεί να ταξιδέψει προς τα πίσω στη διαρροή, προκαλώντας μια πυρκαγιά στη λίμνη, πάνω από την οποία καίγεται το σύννεφο ατμού που μόλις είχε εξατμιστεί από αυτήν και αναμίχθηκε με τον αέρα.

Jet fire - Εάν τα συμπιεσμένα ή υγροποιημένα αέρια διαρρεύσουν από την δεξαμενή αποθήκευσης ή από διάφορες σωληνώσεις, τα υλικά που απελευθερώνονται από την τρύπα θα σχηματίσουν ένα gas jet που παρασύρεται και αναμιγνύεται με τον περιβάλλον αέρα. Εάν το υλικό αυτό συναντήσει κάποια πηγή ανάφλεξης καθώς βρίσκεται εύφλεκτη απόσταση, μια jet πυρκαγιά μπορεί να συμβεί. Για LNG αποθηκευμένα σε χαμηλή πίεση ως υγρά, όπως γίνεται στα LNG βυτιοφόρα, τέτοιου είδους πυρκαγιά είναι απίθανη. Μπορούν μόνο να συμβούν κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης ή της μεταφοράς όταν οι πιέσεις είναι αυξημένες λόγω της άντλησης.



Σχήμα 12. Πυρκαγιά λίμνης

Πυρκαγιά λάμψης - Όταν ένα πτητικό, εύφλεκτο υλικό απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, ένα σύννεφο ατμού σχηματίζεται και διασκορπίζεται (αναμιγνύεται με τον αέρα). Εάν το επακόλουθο σύννεφο ατμού αναφλέγεται προτού να αραιωθεί κάτω από LFL του, μια πυρκαγιά λάμψης μπορεί να εμφανιστεί. Η καύση εμφανίζεται συνήθως σε τμήματα του σύννεφου (εκεί όπου αναμιγνύεται με τον αέρα στις εύφλεκτες συγκεντρώσεις) παρά σε ολόκληρο το σύννεφο. Μια πυρκαγιά λάμψης μπορεί να κάψει προς τα πίσω στο σημείο απελευθέρωσης, με συνέπεια μια πυρκαγιά λίμνης ή jet fire, αλλά είναι απίθανο να παραγάγει τις καταστρεπτικές υπερπιέσεις και να οδηγήσει σε έκρηξη.

6.2 ΕΚΡΗΞΕΙΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μια πυρκαγιά λάμψης μπορεί να εμφανιστεί εάν απελευθερωθεί LNG στην ατμόσφαιρα και αναφλεγεί. Εάν συμβεί αυτό σε ανοιχτές περιοχές, το μεθάνιο δεν είναι γνωστό για τις καταστρεπτικές υπερπιέσεις που δημιουργεί. Εντούτοις, εάν υπάρχει κάποιος περιορισμός στο σύννεφο ατμού, το μεθάνιο μπορεί να προκαλέσει τέτοιες καταστρεπτικές υπερπιέσεις που θα οδηγήσουν σε έκρηξη. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να παρασχεθεί από διαστήματα μέσα στο πλοίο ή γειτονικών κατασκευών, όπως κτίρια στη ξηρά ή διπλανά πλοία. Περιοχές ασφυκτικά γεμάτες με εξοπλισμό και κατασκευές μπορούν επίσης να διευκολύνουν τις καταστρεπτικές υπερπιέσεις εάν ένα σύννεφο ατμού αναφλεγεί μέσα σε αυτές. Παραδείγματος χάριν εάν ένα σύννεφο ατμού διεισδύσει σε εγκαταστάσεις χημικών διαδικασιών σε μια περιοχή με διάφορα σκάφη, κατασκευές, και σωληνώσεις και το σύννεφο αναφλεγεί, το τμήμα του σύννεφου μέσα σε εκείνη την κορεσμένη περιοχή μπορεί να παραγάγει τις καταστρεπτικές υπερπιέσεις.

Ένα μεγαλύτερο μέρος όγκου των βαρύτερων υδρογονανθράκων LNG (1) μειώνει την ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης που απαιτείται για την εκपुरσοκρότηση και (2) αυξάνει το ειδικό βάρος του μίγματος υδρογονανθράκων (και ως εκ τούτου μειώνει την τάση να διασκορπιστεί γρήγορα).

Και τα δύο αυτά αποτελέσματα αυξάνουν την πιθανότητα της εμφάνισης καταστροφικών υπερπίεσεων.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί κάτι τέτοιο, είναι η διαρροή του υγρού να γίνει σε ένα περιορισμένο χώρο με την ύπαρξη εμποδίων. Μονάχα σε εκείνη την περίπτωση εμφανίζεται το φαινόμενο της έκρηξης, κάτι το οποίο είναι εξαιρετικά δύσκολο να συμβεί, παρόλα αυτά όμως πρέπει να εξεταστεί και το ενδεχόμενο αυτό όσο μικρό και αν είναι. Μέχρι στιγμής δεν έχει παρατηρηθεί τέτοιο συμβάν σε υγραεριοφόρα καθώς κατά ένα συντριπτικό ποσοστό το υγρό διαρρέει στη θάλασσα και όχι σε εσωτερικά τμήματα του πλοίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια μέθοδος που μπορούμε να ακολουθήσουμε σε περίπτωση έκρηξης, έτσι ώστε να εκτιμήσουμε τις επιπτώσεις στον άνθρωπο και στις κοντινές κατασκευές.

Μέθοδος βέλτιστης φλόγας (Baker strehlow)

Η μέθοδος Baker-Strehlow (Baker et al. 1996, et al. 1998) προτάθηκε το 1996 και βασίζεται στη ιδέα των παρεμποδιζομένων περιοχών στην οποία η παρουσία εμποδίων στην εξάπλωση της φλόγας προκαλεί έκρηξη μεγάλης ισχύος. Η καθοριστική παράμετρος στην επιλογή της ισχύος της έκρηξης είναι η Ταχύτητα της Φλόγας. Αυτή καθορίζεται από:

1. τον τρόπο εξάπλωσης της φλόγας
2. τη δραστηριότητα του καυσίμου
3. την πυκνότητα των εμποδίων

Θα καθοριστούν πρώτα οι διαστάσεις του νέφους και στη συνέχεια η ενέργεια της έκρηξης. Στη συνέχεια η υπερπίεση θα υπολογιστεί ως συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης με παράμετρο την ταχύτητα της φλόγας. Οι επιπτώσεις της έκρηξης στους ανθρώπους και στα υλικά θα υπολογιστούν στο τέλος ως συνάρτηση της υπερπίεσης σε δεδομένη απόσταση.

Διαστάσεις νέφους

Ο όγκος του προκύπτοντος νέφους (που αποτελείται από το φυσικό αέριο και τον απαιτούμενο αέρα), V (m^3), υπολογίζεται με βάση τη στοιχειομετρία της αντίδρασης, από τη οποία προκύπτει ο όγκος του απαιτούμενου οξυγόνου και συνεπώς του απαιτούμενου αέρα. Στην περίπτωση μας, που το διαρρέον ρευστό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί ο ρυθμός εξάτμισης του υγρού, με το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μέχρι την έναρξη της έκρηξης προκειμένου να υπολογιστεί η ποσότητα του υλικού που συμμετέχει στη δημιουργία του αέριου νέφους.

Η ακτίνα του προκύπτοντος νέφους, $R_{\text{νέφους}}(m)$, προκύπτει από τον όγκο, V (m^3), του νέφους ως ημισφαίριο:

$$R_{\text{νέφους}} = \left(\frac{3V}{2\pi}\right)^{1/3}$$

Ταχύτητα φλόγας

Όπως ήδη ειπώθηκε, η βασική παράμετρος επιλογής της ισχύος της έκρηξης είναι η ταχύτητα της φλόγας. Η παρουσία εμποδίων στην εξάπλωση της φλόγας δημιουργεί επιπλέον συνιστώσες ταχύτητας με αποτέλεσμα το μέτωπο της φλόγας να εμφανίζει πτυχώσεις και έτσι να αυξάνεται η επιφάνεια του. Λόγω της αύξησης του μετώπου της φλόγας, απαιτείται περισσότερη κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα χρόνου, και έτσι αυξάνει ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η αύξηση της ταχύτητας της φλόγας.

Πίνακας 3. Ταχύτητα φλόγας σε αριθμούς Mach (M_w)

Εξάπλωση Φλόγας	Δραστικότητα καυσίμου	Πυκνότητα εμποδίων		
		Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή
1-D	Υψηλή	5.2	5.2	5.2
	Μεσαία	2.27	1.77	1.03
	Χαμηλή	2.27	1.03	0.294
2-D	Υψηλή	1.77	1.03	0.588
	Μεσαία	1.24	0.662	0.118
	Χαμηλή	0.662	0.471	0.079
3-D	Υψηλή	0.588	0.153	0.071
	Μεσαία	0.206	0.100	0.037
	Χαμηλή	0.147	0.100	0.037

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα της φλόγας σύμφωνα με τη μέθοδο Baker-Strehlow, είναι ο τρόπος εξάπλωσης της, η δραστικότητα του φυσικού αερίου και η πυκνότητα των εμποδίων.

Πιο αναλυτικά:

Ο τρόπος εξάπλωσης της φλόγας χωρίστηκε σε 3 κατηγορίες:

3-D: Όταν μια φλόγα είναι ελεύθερη να επεκταθεί σε 3 διαστάσεις (σφαιρικά ή ημισφαιρικά), η συνολική επιφάνεια της φλόγας αυξάνεται ανάλογα με του τετραγώνου της απόστασης από το σημείο ανάφλεξης. Το πεδίο ροής που προκαλείται από τη φλόγα μπορεί να εξασθενίσει ελεύθερα σε 3 διαστάσεις. Για το λόγο αυτό οι ταχύτητες ροής είναι χαμηλές, και έτσι οι αναταραχές ροής λόγω εμποδίων είναι μικρές. Επιπλέον η επίδραση αυτών των αναταραχών στην ταχύτητα της φλόγας είναι μικρή, καθότι επηρεάζουν μόνον ένα μικρό τμήμα τη αρχικής επιφάνειας.

2-D: τη δυσδιάστατη εξάπλωση (π.χ. εξάπλωση κυλινδρικής φλόγας κάτω από συμπαγές κατάστρωμα) η συνολική επιφάνεια της φλόγας είναι ανάλογη της απόστασης από το σημείο ανάφλεξης. Συνεπώς, παραμορφώσεις της επιφάνειας της φλόγας, θα έχουν μεγαλύτερη επίδραση από την τρισδιάστατη εξάπλωση και αναταράξεις στο πεδίο ροής θα είναι επίσης ισχυρότερες.

1-D: Κατά τη μονοδιάστατη εξάπλωση (π.χ. εξάπλωση φλόγας μέσα σε ένα σωλήνα) η επιφάνεια της φλόγας είναι σταθερή, σχεδόν δεν υφίσταται εξασθένιση του πεδίου, και δεν

υπάρχει απόκλιση από το ισχύον πεδίο ροής. Αποτέλεσμα αυτών είναι ένας ισχυρότατος μηχανισμός ανάδρασης για την αύξηση της επιτάχυνσης της φλόγας.

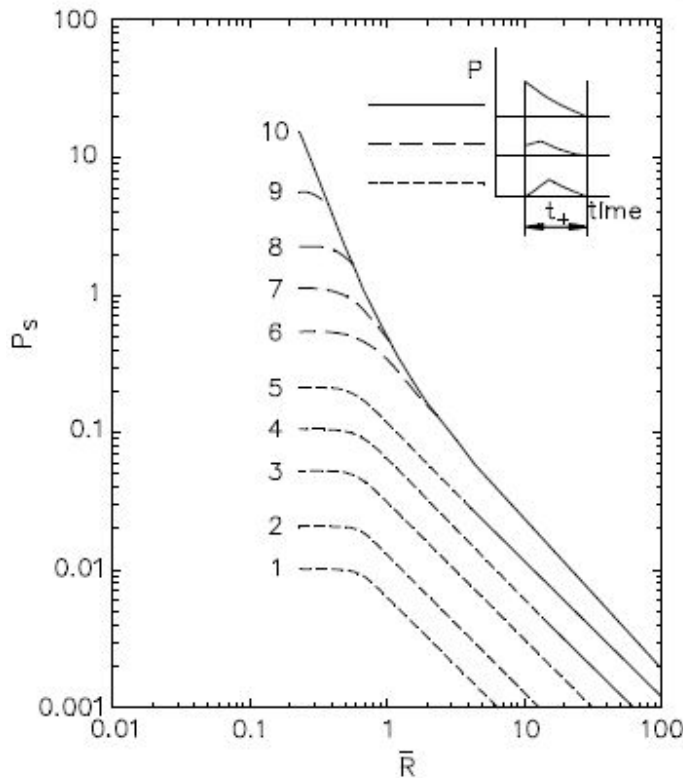
Για τους λόγους αυτούς παρατηρούμε στον Πίνακα 3 τις υψηλότερες τιμές σε μονοδιάστατη εξάπλωση.

Η δραστικότητα του καυσίμου χωρίστηκε επίσης σε 3 κατηγορίες. Χαμηλή δραστικότητα θεωρήθηκε ότι παρουσιάζουν μόνο αέρια όπως το μεθάνιο, το οποίο στη περίπτωση του φυσικού αερίου είναι το βασικότερο συστατικό. Υψηλή παρουσιάζουν το υδρογόνο, το ακετυλένιο και μερικά άλλα ενώ η πλειοψηφία των καυσίμων ανήκει στη μεσαία δραστικότητα.

Η πυκνότητα των εμποδίων είναι η δυσκολότερη παράμετρος για να ποσοτικοποιηθεί. Έχουν γίνει πολλές, πολύ πολύπλοκες προσπάθειες για το σκοπό αυτό που είναι πέραν του σκοπού της μελέτης αυτής. Έτσι η μεταβλητή αυτή παραμένει στη λογική κρίση του αναγνώστη.

Ισχύς Έκρηξης – Υπερπίεση

Για τον υπολογισμό της ισχύς της έκρηξης προτάθηκε το διάγραμμα αδιάστατης υπερπίεσης ως συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13. Αδιάστατη υπερπίεση ως συνάρτηση αδιάστατης απόστασης.

Η αδιάστατη πίεση και απόσταση ορίζεται ως εξής:

$$P'_s = \frac{P_s}{P_a}$$
$$r' = x \left(\frac{E}{P_a} \right)^{-1/3}$$

Όπου, P_s είναι η υπερπίεση που προκαλείται από την έκρηξη, P_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση ($=0.1$ MPa), x (m) η απόσταση από το κέντρο της έκρηξης και E (MJ) η συνολική ενέργεια που απελευθερώνεται.

Ο υπολογισμός της υπερπίεσης ακολουθεί τον ακόλουθο αλγόριθμο:

1. Για κάθε περιοχή, επιλέγεται η ταχύτητα της φλόγας από τον αντίστοιχο πίνακα.
2. Υπολογίζεται η ενέργεια, E , που ελευθερώνεται κατά την έκρηξη στην περιοχή αυτή.
3. Στη συνέχεια για μια συγκεκριμένη απόσταση x , υπολογίζεται η αδιάστατη απόσταση r' .
4. Από το διάγραμμα του Πίνακα 3 λαμβάνεται η αδιάστατη υπερπίεση που αντιστοιχεί την υπολογισμένη αδιάστατη απόσταση, και από αυτή η υπερπίεση P_s (MPa), της έκρηξης.

Σήμερα για τον υπολογισμό της υπερπίεσης μιας έκρηξης, επικρατεί η τάση να χρησιμοποιούνται CFD πακέτα που προσομοιώνουν όλη τη μονάδα σε τρεις διακρίσεις. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ πολύπλοκη, χρονοβόρα και με αρκετά μεγάλο κόστος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται αρκετά η μέθοδος αυτή καθώς δίνει μια καλή περιγραφή και εκτίμηση της υπερπίεσης. Παρόμοια αποτελέσματα με τα παραπάνω λαμβάνουμε και από τη χρήση άλλων πακέτων υπολογισμού όπως αυτό της ισοδύναμης μάζας TNT (δίνει μια πρώτη εκτίμηση) και της Multi Energy.

6.3 ΑΜΕΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΦΑΣΗ (RAPID PHASE TRANSITION)

Η άμεση μεταβατική φάση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα φαινόμενο που αναγνωρίζεται σε μερικά LNG πειράματα απελευθέρωσης, που περιλαμβάνουν τη σχεδόν στιγμιαία μετάβαση του υγρού στη φάση ατμού και μια σχετικά γρήγορη αύξηση πίεσης.

Όταν το LNG διαμορφώνει μια λίμνη στο νερό, η θερμότητα από το νερό το ατμοποιεί γρήγορα, εντούτοις, αυτός ο βρασμός δεν είναι το φαινόμενο καλούμενο RPT. Σε ένα RPT, ένα μέρος του LNG αλλάζει από την υγρή στην αέρια μορφή ουσιαστικά στιγμιαία.

Αν και ο φυσικός μηχανισμός δεν γίνεται απόλυτα κατανοητός, η RPT αποδίδεται στην υπερθέρμανση του LNG. Μια RPT μπορεί να οδηγήσει σε δύο τύπους αποτελεσμάτων: (1) υπερπίεση ως αποτέλεσμα της γρήγορης αλλαγής φάσης και (2) διασπορά της «ριπής» LNG που αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα. Οι γρήγορες αλλαγές φάσης έχουν προκαλέσει πολυάριθμες εκρήξεις ατμού σε χυτήρια και σε άλλες βιομηχανικές διαδικασίες, αλλά δεν έχουν οδηγήσει σε σημαντικά ατυχήματα σχετικά με τη μεταφορά LNG.

Τα γεγονότα άμεσης μεταβατικής φάσης μπορεί να είναι αρκετά βίαια και να εκτινάξουν τμήμα του υγρού στον αέρα. Ένα μεγάλο μέρος του LNG θα εκτιναχθεί και στην συνέχεια θα εξατμιστεί καθώς θα πέφτει προς τα κάτω. Η πηγή από την οποία παράγεται ο ατμός θα είναι διαφορετική συγκριτικά με μια ομαλώς διαδιδόμενη λίμνη, με πιθανές μεγάλες επιδράσεις στην διασπορά του σύννεφου στον αέρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η επικύρωση μοντέλων σχετικά με ομαλή εξάπλωση και ατμοποίηση της λίμνης σε πειράματα μεγάλης κλίμακας, μπορεί να μην είναι εφικτή ή ακόμα και σχετική.

Η RPT δημιουργεί ένα εκρηκτικό κύμα, το οποίο μπορεί να προκαλέσει ζημιές στις παρακείμενες περιοχές. Παρά όλα αυτά όμως, όλες οι ενδείξεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι δεν θα υπάρξει κάποιο ιδιαίτερα σοβαρό πρόβλημα σχετικά με γεγονότα RPT σε πλοία LNG με γάστρα από χάλυβα. Σαν ένα παράδειγμα, μπορεί να αναλυθεί ένα σενάριο διαρροής 150 m³ από ένα LNG πλοίο. Η εκτιμώμενη ενέργεια που θα εκλυθεί πάνω στη γάστρα του LNG πλοίου είναι 60KJ/m³, ικανή να την παραμορφώσει αλλά όχι να την παραβιάσει.

6.4 ΚΡΥΟΓΟΝΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

Τα LNG βυτιοφόρα σχεδιάζονται ώστε αποτρέψουν την επαφή των εσωτερικών και εξωτερικών τοιχωμάτων της γάστρας με το LNG. Είναι δυνατό ότι μια απελευθέρωση υγρού LNG στο εσωτερικό τοίχωμα θα προκαλούσε χαμηλές θερμοκρασίες σε περιοχές του τοιχώματος που δεν σχεδιάζονται για αντοχή σε κρυογόνες θερμοκρασίες.

Μια μελέτη από τον Lloyds (2001) περιλαμβάνει συνοπτικές περιγραφές 10 LNG διαρροών από LNG βυτιοφόρα που εμφανίστηκαν μεταξύ 1965 και 1989. Επτά από αυτές τις δέκα οδήγησαν στο σπάσιμο των καλυμμάτων του καταστρώματος ή της δεξαμενής αποθήκευσης, αλλά κανένα από τα δεν προκάλεσε τη σοβαρή δομική ζημία. Λαμβάνοντας υπόψη τα σημεία όπου η ζημία εμφανίστηκε (δηλ. κάλυμμα δεξαμενής ή καταστρώματος), είναι πιθανό ότι όλες αυτές οι απελευθερώσεις εμφανίστηκαν από τα συστήματα σωληνώσεων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των LNG μεταφορών. Επίσης, τα σκάφη που χτίζονται από το 1976 πρέπει να συμμορφωθούν με τους τρέχοντες κανόνες σχεδίου σκαφών και σχεδιάζονται με χάλυβα που απαιτείται για τις χαμηλές αυτές θερμοκρασίες.

7. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΡΡΟΗ LNG

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ένα ευρύ φάσμα πληροφοριών που συγκεντρώθηκαν μετά από πειράματα διάχυσης υγροποιημένου φυσικού αερίου ώστε να κατανοήσουμε τις πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να έχει μία απελευθέρωση LNG στο περιβάλλον. Αυτές οι επιπτώσεις εξαρτώνται από:

- Την ζημιά της δεξαμενής αποθήκευσης του LNG (είτε σκόπιμη είτε ατυχηματική), το μέγεθος του ρήγματος, καθώς επίσης και από την τοποθεσία και τον ρυθμό ροής του φυσικού αερίου που διαρρέεται.
- Τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες που επικρατούν όπως: άνεμος, παλίρροια και τους κυματισμούς.
- Την κρυογεννητική ή θερμική ζημιά που έχει υποστεί το πλοίο καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω ζημιά του πλοίου
- Την τοποθεσία και το μέγεθος της διαρροής, όπου κίνδυνοι όπως πυρκαγιά και θερμική ακτινοβολία μπορούν να βλάψουν εγκαταστάσεις, γέφυρες, κτίρια, την τοπική χλωρίδα και πανίδα ακόμα και την ανθρώπινη ζωή.

Αυτές οι επιπτώσεις θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν σε επιπτώσεις στον άνθρωπο, στο πλοίο, περιβαλλοντολογικές και οικονομικές.

7.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ

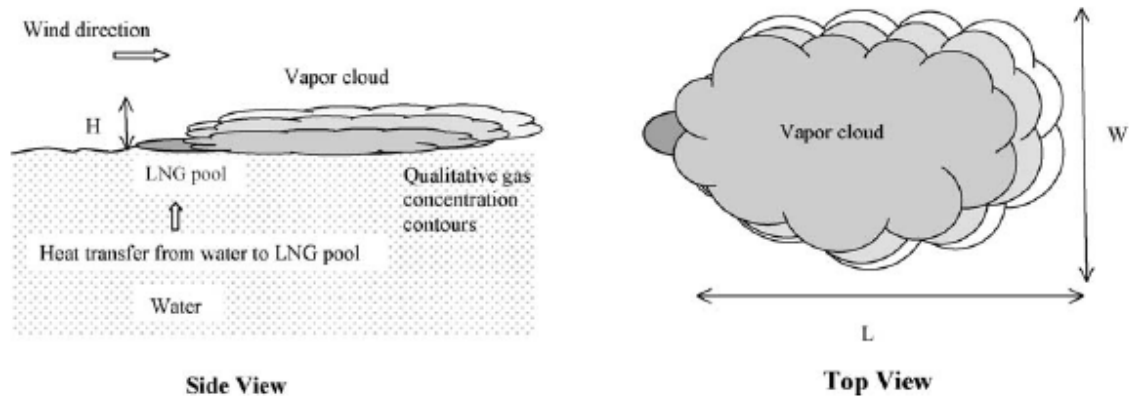
Αυτές οι επιπτώσεις έχουν να κάνουν αποκλειστικά με την υγεία και την ασφάλεια του ανθρώπου. Το LNG όπως γνωρίζουμε αποτελείται κατά κύριο λόγο από μεθάνιο το οποίο θεωρείται εύφλεκτο και ασφυξιογόνο με μικρή όμως τοξικότητα στον άνθρωπο.

7.1.1 ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ - ΑΣΦΥΞΙΑ

Σε μία μεγάλης κλίμακας απελευθέρωση κρυογεννητικού υγροποιημένου αερίου, αυτό θα αρχίσει να εξατμίζεται. Εάν το ήδη εξατμισμένο LNG δεν αναφλεγεί, και η συγκέντρωση του αερίου στον αέρα είναι αρκετά υψηλή, τότε αυτό είναι ικανό να δημιουργήσει ασφυξία στα μέλη του πληρώματος του πλοίου, των σωστικών μέσων και των ρυμουλκών.

Τα μέχρι σήμερα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι το LNG τείνει να διαδίδεται δημιουργώντας μια επιφάνεια που έχει σχήμα που φαίνεται στη συνέχεια:

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ



Σχήμα 14. Αναπαράσταση διασποράς του εξατμίζόμενου LNG

Πίνακας 4. Ο ANSI Z88.2-1992 αναφέρει τις επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου η μείωση του οξυγόνου στο επίπεδο της θάλασσας.

%O2 στο επίπεδο της θάλασσας	Τοπική πίεση O2 (mmHg)	Φυσιολογικά συμπτώματα
20.9	159	Φυσιολογικά
19	144	Αντίξοα αλλά ασήμαντα.
16	121	Μείωση αντανακλαστικών.
14	106	Μη φυσιολογική κόπωση, συναισθηματικά ταραγμένοι, ελαττωματικά αντανακλαστικά, μειωμένη κρίση.
12.5	95	Πολύ φτωχή κριτική ικανότητα και μηδενικά αντανακλαστικά. Εξασθενημένη αναπνοή που ενδέχεται να προκαλέσει μόνιμο πρόβλημα στην καρδιά. Ναυτία, εμετός.
<10	<76	Αδυναμία στην οποιαδήποτε κίνηση, απώλεια των αισθήσεων. Σπασμοί, θάνατος.

Ο ANSI Z88.2-1992 απαιτεί να υπάρχουν αναπνευστικές συσκευές για τους εργαζομένους που βρίσκονται σε μια ατμόσφαιρα που το επιπέδου του οξυγόνου είναι λιγότερο από 16% στο επίπεδο της θάλασσας. Τα πρότυπα ANSI υποθέτουν ότι σχεδόν όλοι οι εργαζόμενοι θα είναι σε θέση να δραπέτεύσουν από μια ατμόσφαιρα με οξυγόνο 16%. Όταν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου είναι λιγότερο από 19.5% στο επίπεδο της θάλασσας, ο ANSI Z88.2-1992 απαιτεί από τους εργαζομένους να χρησιμοποιήσει αναπνευστικές συσκευές που έχουν μια παροχή αέρα έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση διαφυγής. Υποθέτει ότι μερικοί τους εργαζομένους θα τραυματιστούν ή θα εξασθενίσουν από μια ατμόσφαιρα οξυγόνου 12.5%, στο οποίο δεν θα μπορούσαν να δραπέτεύσουν. Οι συστάσεις του ANSI προορίζονται να προστατεύσουν σχεδόν όλους τους εργαζομένους και υποθέτει ότι οι εργαζόμενοι έχουν πολύ καλή φυσική κατάσταση για το καθήκον τους. Θεωρείται ότι οι εργαζόμενοι έχουν, κατά μέσο όρο, καλύτερη φυσική κατάσταση από το γενικό πληθυσμό.

Συνοψίζοντας, οποιαδήποτε μείωση στην συγκέντρωση του οξυγόνου έχει κάποιο ρίσκο όσο αναφορά τον πληθυσμό λόγω της αυξημένης ευαισθησίας τους (πνευμονικές, καρδιακές

παθήσεις). Πάντως αναφορές έχουν δείξει ότι το ποσοστό μόνιμων τραυματισμών είναι πολύ μικρό σε ανθρώπους με καλή φυσική κατάσταση και σε συνθήκες με συγκέντρωση οξυγόνου πάνω από 12.5% στο επίπεδο της θάλασσας. Για συγκέντρωση πάνω από 14% η συχνότητα των τραυματισμών (μόνιμων) είναι ακόμα μικρότερη.

7.1.2 ΑΝΑΦΛΕΞΗ – ΕΓΚΑΥΜΑΤΑ

Η έκταση της βλάβης στους ανθρώπους από την έκθεση τους στη θερμική ακτινοβολία, εξαρτάται από τη ροή της θερμότητας αλλά και από το χρόνο της έκθεσης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των επιδράσεων στους ανθρώπους περιλαμβάνουν και εκείνα από:

- Πειράματα με ανθρώπους (σε χαμηλότερα επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας).
- Πειράματα με ζώα.
- Εξέταση δεδομένων από πραγματικά περιστατικά εγκαυμάτων λόγω της θερμικής ακτινοβολίας.

Με βάση αυτά τα στοιχεία, οι διάφοροι ερευνητές έχουν παρουσιάσει τις εκτιμήσεις των αποτελεσμάτων τους πρώτιστα υπό μορφή (1) ταξινομημένων, σε πίνακες, επιπέδων ακτινοβολίας και χρόνων έκθεσης για διάφορα αποτελέσματα και (2) πιθανοθεωρητικά μοντέλα που υπολογίζουν την πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων αποτελεσμάτων.

Λεπτομερείς περιλήψεις των διαθέσιμων στοιχείων και των μοντέλων παρέχονται σε διάφορες αναφορές όπως του Lees (1996) και του TNO (1992). Σε αυτήν την έκθεση δεν παρέχονται λεπτομερώς αυτές οι αναφορές αλλά μια περίληψη τους. Παρουσιάζονται τα παραδείγματα των στοιχείων που είναι κατάλληλα για πυρκαγιές υδρογονανθράκων και χρησιμοποιούνται συχνά για την επιλογή επιπέδων ανησυχίας σε μελέτες αξιολόγησης κινδύνου.

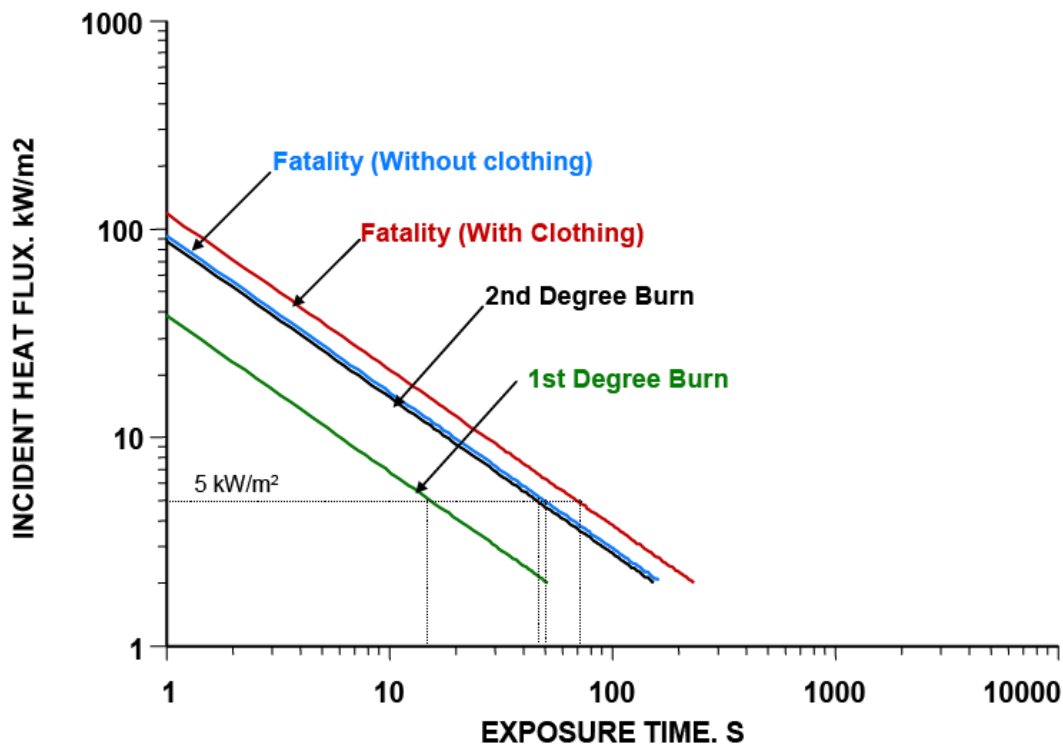
Πίνακας 5. Κριτήρια τραυματισμών εγκαυμάτων από την Federal Emergency Management Agency (FEMA, 1990).

Ένταση θερμικής ακτινοβολίας		Χρόνος για δριμύτατο πόνο	Χρόνος για 2 ^{ου} βαθμού εγκαύματα
BTU/hr/ft ²	KW/m ²		
300	1	115	663
600	2	45	187
1000	3	27	92
1300	4	18	57
1600	5	13	40
1900	6	11	30
2500	8	7	20
3200	10	5	14
3800	12	4	11

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

Πίνακας 6. Όρια έκθεσης που συστήνει η API (1997) για την έκθεση εργαζομένων στη θερμική ακτινοβολία από τις φλόγες.

Ένταση θερμικής ακτινοβολίας		Τύπος ζημιάς
BTU/hr/ft ²	KW/m ²	
500	1.6	Επιτρεπτό επίπεδο σε οποιαδήποτε θέση όπου το προσωπικό εκτίθεται συνεχώς.
1500	4.7	Επιτρεπτό επίπεδο στις περιοχές όπου οι ενέργειες έκτακτης ανάγκης που διαρκούν αρκετά λεπτά μπορούν να απαιτηθούν από το προσωπικό χωρίς προστατευτικό κάλυμμα αλλά με τον κατάλληλο ρουχισμό.
2000	6.3	Επιτρεπτό επίπεδο στις περιοχές όπου οι ενέργειες έκτακτης ανάγκης που διαρκούν μέχρι 1 λεπτό μπορούν να απαιτηθούν από το προσωπικό χωρίς προστατευτικό κάλυμμα αλλά με τον κατάλληλο ρουχισμό.
3000	9.5	Επιτρεπτό επίπεδο στις περιοχές όπου η έκθεση στο προσωπικό περιορίζεται σε μερικά δευτερόλεπτα, ικανοποιητικά για τη διαφυγή μόνο.



Σχήμα 15. Διάγραμμα τραυματισμών σε συνάρτηση της θερμικής ακτινοβολίας και της έκθεσης σε αυτήν.

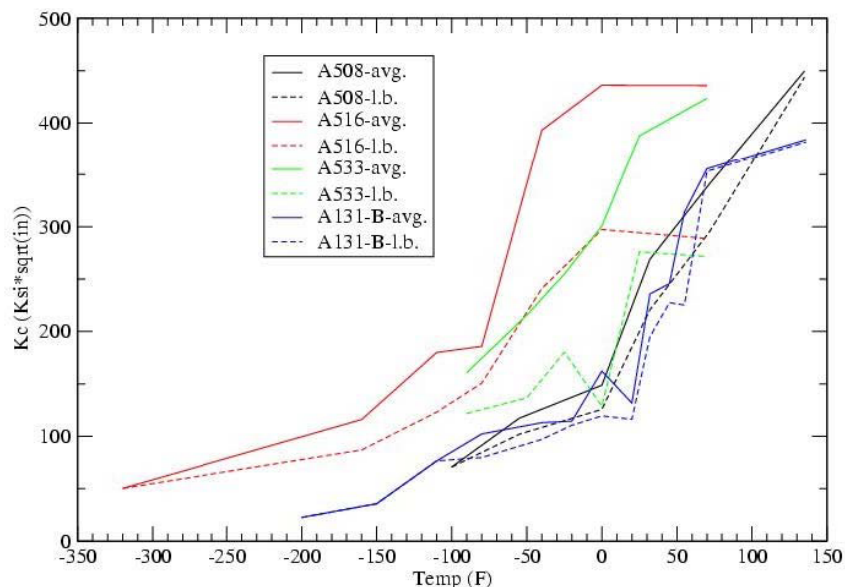
7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Ανάλογα με την εξέλιξη της διαρροής του LNG (ανάφλεξη ή όχι) οι επιπτώσεις που έχει μια απελευθέρωση υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι διαφορετικές.

7.2.1 ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ - ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ

Το μέγεθος και η τοποθεσία του ρήγματος και της πιθανής διαρροής κρυογονικού LNG αποτελούν τη βάση για την ανάλυση των κρυογονικών επιπτώσεων στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Όπως είναι γνωστό η επαφή κρυογονικών υγρών με τον χάλυβα έχει ως αποτέλεσμα την ψαθυροποίησή του, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της αντοχής του [Vaudolon 2000]. Αναλύσεις που αφορούν την ψαθυροποίηση της μεταλλικής κατασκευής των LNG carriers καθοδηγήθηκαν από πληροφορίες σχετικά με τον σχεδιασμό των δεξαμενών τους και τα υλικά κατασκευής τους [Linsler 2004] [Shell 2002] [Wellman 1983].

Μια ανασκόπηση στα υλικά κατασκευής των LNG πλοίων δείχνει την εκτενή χρήση χάλυβα ABS κλάσης A, B, και C. Επίσης συζητήσεις που έγιναν με την U.S. Coast Guard, χάλυβες κλάσης E και F μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μερικές νέες κατασκευές LNG πλοίων. Οι επιλεγμένες ιδιότητες του χάλυβα κατηγορίας B-ABS περιλαμβάνουν [Wellman 1983] πλην των άλλων και αντοχή - απόδοση (σε θερμοκρασία δωματίου) ίση με 37×10^3 psi, συντελεστή θερμικής επέκτασης ίσος με 8.3×10^{-6} in/in^oF, ίσος σταθερά του Young (E) ίση με 30×10^6 PSI. Όπως με όλους τους χάλυβες χαμηλής συγκέντρωσης σε άνθρακα, στον A131, B και C η μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή συμπεριφορά πραγματοποιείται με μείωση της θερμοκρασίας. Για αυτούς τους χάλυβες, το όριο θραύσης (K_{IC}) μειώνεται περίπου γραμμικά από 90×10^3 psi^{1/2} in σε -60° F σε 20×10^3 psi^{1/2} in σε -260° F. Αυτό είναι και το όριο θραύσης για όλους του χάλυβες χαμηλής συγκέντρωσης σε άνθρακα σε θερμοκρασίες κοντά σε αυτές του κρυογονικού LNG όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Το όριο θραύσης θα είναι τελικά ο παράγοντας με βάση τον οποίο θα εκτιμηθεί η ζημιά που ενδέχεται να προκαλέσουν στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου οι κρυογονικές ιδιότητες του LNG. Έτσι όσο μικρότερο είναι το όριο θραύσης τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να προκληθεί ζημιά. Τέλος είναι αναγκαίο να ειπωθεί ότι λόγω έλλειψης πληροφοριών για το όριο θραύσης των χαλύβων σε θερμοκρασίες κοντά σε αυτές του κρυογόνου υγροποιημένου φυσικού αερίου κατά την κατασκευή των LNG carriers, η χρήση συσχετισμών και προσεγγίσεων κρίνεται αναγκαία.



Σχήμα 16. Τύποι χάλυβα

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με την εκτιμώμενη ζημιά στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου μετά από μία απελευθέρωση κρυογόνου LNG χωρίς ανάφλεξη συναρτήσει με το μέγεθος του ρήγματος και τον αριθμό των δεξαμενών που υπέστησαν ρήγμα.

Πίνακας 7. Εκτίμηση ζημιάς της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου

Συμβάν	Μέγεθος ρήγματος	Αριθμός δεξαμενών	Εκτίμηση ζημιάς πλοίου
Τυχαία σύγκρουση με μικρό σκάφος	-	-	Μικρή ²
Τυχαία σύγκρουση με μεγάλο σκάφος	5 – 12 m ² (Έκταση διαρροής 0.5 – 1 m ²) ¹	1	Μέτρια ³
Τυχαία προσάραξη	-	-	Μικρή
Σκόπιο ρήγμα ⁵	0.5 m ²	1	Μικρή
Σκόπιο ρήγμα	2 m ²	1	Μικρή
Σκόπιο ρήγμα	2 m ²	3	Μέτρια
Σκόπιο ρήγμα	12 m ²	1	Σοβαρή
Σκόπιο ρήγμα	5 m ²	2	Σοβαρή
Σκόπιμη διαρροή	Πρόωρος ανεφοδιασμός	-	Μέτρια - σοβαρή

1 - υποθέτει ότι τα σκάφη παραμένουν ενωμένα κατά τη διάρκεια του γεγονότος απελευθέρωσης LNG και η παραβίαση είναι συνήθως συνδεμένη

2 - μικρή σημαίνει ότι το σκάφος μπορεί να κινηθεί και να ξεφορτωθεί ακίνδυνα

3 - μέτριο σημαίνει ότι η ζημιά μπορεί να επηρεάσει την ακεραιότητα του πλοίου και του φορτίου

4 - σοβαρός σημαίνει σημαντική δομική ζημιά. Το πλοίο δεν είναι πλέον σε θέση να κινηθεί

5 - Μία σκόπιμη δημιουργία ρήγματος μπορεί να γίνει μετά από μια επίθεση, από ένα σαμποτάζ, από μία ομηρία σε ένα LNG carrier.

7.2.2 ΑΝΑΦΛΕΞΗ

Όπως οι επιδράσεις της θερμικής ακτινοβολίας στους ανθρώπους, έτσι και οι επιδράσεις στις δομικές κατασκευές εξαρτώνται επίσης από τη ροή θερμότητας και το χρόνο έκθεσης. Δεν θα περιοριστούμε μόνο σε κατασκευές που αφορούν μόνο το πλοίο αλλά και κατασκευές (σε τερματικούς σταθμούς, κτίρια, λιμάνια κ.ο.κ) που μπορούν να επηρεαστούν άμεσα από την θερμική ακτινοβολία της καύσης του εξατμιζόμενου LNG. Το μέγεθος της ζημιάς εξαρτάται, επίσης, έντονα από τα υλικά της κατασκευής (π.χ., ξύλο, χάλυβας, τσιμέντο κτλ.).

Πίνακας 8. Κριτήρια ζημιάς των κατασκευών από την έκθεση σε θερμική ακτινοβολία από την World Bank (1998)

Ένταση θερμικής ακτινοβολίας		Τύπος ζημιάς
BTU/hr/ft ²	KW/m ²	
11890	37.5	Αρκετό για να προκληθεί ζημιά σε βασικό εξοπλισμό (χαλύβδινες κατασκευές και εξοπλισμό)
7930	25	Είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να αναφλεγεί το ξύλο σε επ' αορίστου χρόνου έκθεση χωρίς την ύπαρξη φωτιάς
3960	12.5	Είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να αναφλεγεί το ξύλο με ύπαρξη φωτιάς ή να προκληθεί λιώσιμο πλαστικών σωλήνων

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

Πίνακας 9. Αποτελέσματα ζημιών από θερμική ακτινοβολία για διάφορα υλικά από τον TNO (1992)

Τύπος ζημιάς	Κρίσιμη ένταση ακτινοβολίας ¹ (kW/m ²)	
	Επίπεδο ζημιάς 1 ²	Επίπεδο ζημιάς 2 ³
Χάλυβας	100	25
Ξύλο	15	2
Σύνθετα υλικά	15	2
Γυαλί	4	-

1 – ένταση ακτινοβολίας που μπορεί να προκαλέσει ζημιά από μακρόχρονη έκθεση

2 – επίπεδο ζημιάς 1: οι επιφάνειες των εκτεθειμένων υλικών πιάνουν φωτιά και τα κατασκευαστικά στοιχεία αστοχούν και καταρρέουν

3 – επίπεδο ζημιάς 2: οι επιφάνειες των εκτεθειμένων υλικών υφίστανται σοβαρό αποχρωματισμό καθώς και αποφλοίωση και τα κατασκευαστικά στοιχεία υποβάλλονται σοβαρή υλική παραμόρφωση

Ως μακρόχρονη έκθεση σε ακτινοβολία λαμβάνονται και στις δύο περιπτώσεις το χρονικό διάστημα των 30 λεπτών. Μια ακριβέστερη αξιολόγηση της δομικής ζημιάς των κατασκευών απαιτεί υπολογισμούς ισορροπίας θερμότητας ώστε να καθοριστεί η θερμοκρασία επιφάνειας για να συγκριθεί με τις αποδεκτές θερμοκρασίες για την κάθε κατασκευή.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας από τον Lees (1996) για τα διάφορα όρια της θερμικής ακτινοβολίας για κατασκευές. Για απελευθερώσεις LNG μεγάλης κλίμακας, η επιλογή των επιπέδων ανησυχίας είναι αρκετά περίπλοκη. Αυτό οφείλεται στο ότι η φωτιά διαρκεί λίγο (περίπου 5 λεπτά για λίμνη φωτιάς). Παρ' όλα αυτά ο οδηγός που παρουσιάζεται παρακάτω είναι βασισμένος για μακρόχρονη έκθεση σε ακτινοβολία.

Πίνακας 10. Όρια θερμικής ακτινοβολίας από τον Lees (1996)

Όριο έντασης θερμικής ακτινοβολίας		Περιγραφή
BTU/hr/ft ²	KW/m ²	
Design Guidance from Kletz (1980)		
12000	38	Ένταση στις δεξαμενές φορτίου
4000	12.5	Ένταση στο ξύλο ή πλαστικό
1600	5	Ένταση σε άτομα που εκτελούν επείγουσες ανάγκες
Design and Assessment Guidance from British Standard 5908 (BS 5908, 1990)		
12000	37.5	Ένταση που προκαλεί ζημιά σε εξοπλισμό
7900	25	Ένταση που προκαλεί μη ελεγχόμενη ανάφλεξη στο ξύλο
4000	12.5	Ένταση που προκαλεί ελεγχόμενη ανάφλεξη στο ξύλο
Design and Assessment Guidance from Mecklenburgh (1985)		
4400	14	Ένταση στην οποία τα κτίρια θα πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να αντέχουν
3200-3800	10-12	Ένταση που προκαλεί ανάφλεξη στην βλάστηση
Assessment Guidance from Dinno (1982)		
9500	30	Ακαριαία ανάφλεξη του ξύλου
4800	15	Ελεγχόμενη ανάφλεξη του ξύλου
6300	20	Ανάφλεξη της Fuel Oil δεξαμενής σε 40 sec

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

3200	10	Ανάφλεξη της Fuel Oil δεξαμενής σε 120 sec
5700 - 6300	18-20	Αποσύνθεση μόνωσης καλωδίων
3800	12	Λιώσιμο πλαστικού
12000	37.5	Ζημιά εξοπλισμού
2900	9	Ζημιά εξοπλισμού – συντηρητική τιμή

7.3 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΕΚΡΗΞΕΩΝ

Είναι επόμενο ότι οι επιπτώσεις μιας έκρηξης στον άνθρωπο και στα κτίρια θα είναι συνάρτηση και της υπερπίεσης που δημιουργείται και της διάρκειας της έκρηξης. Παρακάτω μελετούνται οι επιπτώσεις αυτές ακριβώς ως συνάρτηση των δυο προαναφερθέντων μεταβλητών.

Στον επόμενο Πίνακα δίνεται ένας απλός, πρόχειρος εμπειρικός κανόνας ο οποίος συσχετίζει απευθείας την υπερπίεση, που μπορούμε να υπολογίσουμε με τη μέθοδο Baker Strehlow, με την αστοχία διάφορων υλικών. Οι τιμές του πίνακα είναι εμπειρικοί μέσοι όροι χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η χρονική διάρκεια της υπερπίεσης.

Πίνακας 11. Αστοχία διάφορων υλικών στις υπερπίεσεις των εκρήξεων.

	P _s (kPa)
Υαλοπίνακες	
Θραύση 5%	0.7-1
Θραύση 50%	1.4-3
Θραύση 90%	3-6
Κτίρια	
Μετακίνηση κεραμιδιών	3-5
Καταστροφή σκελετών / κασών από πόρτες / παράθυρα	6-9
Καταστροφή 50 – 70% Εξωτερικής τοιχοποιίας	35-80
Σχεδόν πλήρη κατεδάφιση	80-260
Στύλοι	
Καταστροφή	80-260
Μεγάλα δέντρα	
Καταστροφή	50-100
Βαγόνια τρένου	
Όριο εκτροχιασμού	80-190

Επιπτώσεις στον άνθρωπο

Οι επιπτώσεις μιας έκρηξης στον άνθρωπο συνήθως ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Άμεσες επιπτώσεις

Η υπερπίεση που δημιουργείται από την έκρηξη μπορεί να προκαλέσει τραύματα στα ευαίσθητα ανθρώπινα όργανα ή ακόμα και τον θάνατο.

2. Έμμεσες επιπτώσεις

Οι έμμεσες επιπτώσεις χωρίζονται σε δυο κατηγορίες

- **Δευτερογενείς επιπτώσεις** που αναφέρονται σε τραυματισμούς ή θανάτους από θραύσματα και αντικείμενα που εκτινάχτηκαν από τη έκρηξη
- **Τριτογενείς επιπτώσεις** που αναφέρονται σε τραυματισμούς ή θανάτους λόγω της εκτίναξης από το ωστικό κύμα, ολόκληρου του ανθρώπινου σώματος και την συνεπακόλουθη πρόσκρουση του σε άλλα σταθερά αντικείμενα ή κατασκευές.

Ένας επιπλέον λόγος για τον ανωτέρω διαχωρισμό έγκειται στο γεγονός ότι στις άμεσες περιπτώσεις, είναι "σίγουρο" ότι ο άνθρωπος θα υποστεί τις συνέπειες της πίεσης, ενώ στις έμμεσες επιπτώσεις, είναι "πιθανόν" ότι ένα αντικείμενο μπορεί να χτυπήσει τον άνθρωπο ή ότι ολόκληρος ο άνθρωπος μπορεί να εκτιναχτεί από το ωστικό κύμα.

I. Σύνθλιψη πνεύμονα

Η έκρηξη προξενεί μια απότομη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού των πνευμόνων και του εξωτερικού του σώματος, καθώς η πίεση στην οποία υπόκειται το ανθρώπινο σώμα ξαφνικά αυξάνεται πολύ. Αποτέλεσμα της διαφοράς αυτής στη πίεση είναι ότι ο θώρακας πιέζεται έντονα προς τα μέσα με επακόλουθη σύνθλιψη των πνευμόνων και πιθανό θάνατο. Οι παράγοντες που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο αυτό είναι το μέγεθος της υπερπίεσης και η διάρκεια της.

II. Ρήξη τυμπάνου ώτος

Η πιθανότητα να προκληθεί ρήξη τυμπάνου ώτος σε περίπτωση έκρηξης είναι αρκετά μεγάλη λόγω του ισχυρού ωστικού κύματος που δέχεται ο άνθρωπος.

III. Θλαστικά τραύματα / κατάγματα κεφαλής

Ενώ η σύνθλιψη του πνεύμονα και η ρήξη τυμπάνου ώτος αποτελούν άμεσες επιπτώσεις του ωστικού κύματος.

8. ΒΗΜΑΤΑ-ΚΛΕΙΔΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ LNG ΔΙΑΡΡΟΩΝ

Οι όλο και αυξανόμενες ποσότητες υγροποιημένου φυσικού αερίου που μεταφέρονται στις παγκόσμιες αγορές, έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη του μηχανολογικού εξοπλισμού και των διαδικασιών χειρισμού του LNG, τόσο στις τερματικές εγκαταστάσεις όσο και πάνω στα πλοία, για την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας τους. Αν και κανένα LNG πλοίο δεν έχει υποστεί απώλεια του φορτίου του στη θάλασσα εδώ και 40 χρόνια, είναι πολύ σημαντικό για την ανάλυση διαχείρισης κινδύνου να γίνουν κατανοητές οι προβλεπόμενες συνέπειες μιας διαρροής. Μια τυχαία απελευθέρωση LNG και η εξάτμιση που ακολουθεί, με ή χωρίς καύση, περιλαμβάνει πολύ σύνθετα φαινόμενα. Για την πρόβλεψη τέτοιων επιδράσεων, χρησιμοποιούνται συνήθως μοντέλα με ιδιαίτερες απλοποιήσεις, αλλά είναι σημαντικό να περιλαμβάνουν τις επιδράσεις των πιο σημαντικών φαινομένων. Τα καλύτερα μοντέλα έχουν όσο μεγαλύτερη θεωρητική βάση μπορούν και είναι ικανά να συγκριθούν με πειραματικά δεδομένα. Δυστυχώς, τα πειράματα έως σήμερα έχουν κάποιους περιορισμούς σχετικά με τις καταστάσεις που γίνονται οι προβλέψεις. Είναι συνήθως μικρής κλίμακας και υπάρχει ιδιαίτερη αβεβαιότητα σε ότι αναφορά τη κλιμακοποίηση σημαντικών παραμέτρων σχετικά με τη διαρροή. Τα περισσότερα πειράματα πυρκαγιών λίμνης έχουν γίνει στη ξηρά ενώ τα λιγότερα που έχουν γίνει στο νερό είχαν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Ο λόγος για αυτήν τη διαφορά είναι ότι στις διαρροές στο νερό υπάρχει η ταραχώδης μίξη του LNG και του νερού, το οποίο οδηγεί σε αρκετά μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας από ότι μια διαρροή στη ξηρά. Οι περισσότερες δοκιμές έχουν γίνει σε διαρροές που δεν αναφλέγονται και θεωρούν ιδανικές συνθήκες. Σε όλες τις δοκιμές εκτός από μια, λήφθηκαν μέτρα για την ελαχιστοποίηση της μίξης του LNG και του νερού, κάτι το οποίο ελαχιστοποιεί τη δράση αυτής της μίξης. Λόγω της επιπρόσθετης πολυπλοκότητας μιας λίμνης που καίγεται, οι πυρκαγιές της λίμνης έχουν μοντελοποιηθεί με ένα λιγότερο θεωρητικό τρόπο συγκριτικά με τις λίμνες που δεν αναφλέγονται.

Παρακάτω φαίνονται τα βήματα που πρέπει να μελετηθούν για να εξεταστεί καλύτερα το φαινόμενο της διαρροής LNG στο νερό (Hissong, 2006):

1. Πρόβλεψη του ρυθμού διάδοσης του LNG, που διαρρέει από ένα πλοίο, ανάλογα με το χρόνο.
2. Πρόβλεψη της διαμέτρου της LNG λίμνης (είτε αναφλεγεί είτε όχι) ανάλογα με το χρόνο.
3. Εάν η λίμνη δεν αναφλεγεί:
 - Πρόβλεψη του ρυθμού εξάτμισης της λίμνης με τη πάροδο του χρόνου.
 - Πρόβλεψη της διασποράς του ατμού στην ατμόσφαιρα.
 - Εκτίμηση των πιθανών αποτελεσμάτων μιας καθυστερημένης ανάφλεξης, βάσει των συγκεντρώσεων αερίου ανάλογα με τα όρια ευφλεκτότητας του όταν αναμιγνύεται με τον αέρα.

4. Εάν η λίμνη αναφλεγεί:

- Πρόβλεψη του μεγέθους της πυρκαγιάς της λίμνης με τη πάροδο του χρόνου και της θερμικής ακτινοβολίας στις περιοχές ενδιαφέροντος.
- Εκτίμηση των αποτελεσμάτων από τα επίπεδα ακτινοβολίας και την πιθανή διάρκεια έκθεσης σε αυτά.

Είναι πολύ σημαντικό σε όλα τα παραπάνω βήματα να υπάρχει και η παράμετρος του χρόνου. Η «ακαριαία απελευθέρωση» είναι ένα ασυμπτωτικό όριο που δεν είναι ρεαλιστικό ακόμα και για πολύ μεγάλα ρήγματα. Από την άλλη μεριά, ένας «σταθερός ρυθμός απελευθέρωσης» αποτελεί ασυμπτωτικό όριο για πολύ μικρά ρήγματα. Και οι δυο αυτές υποθέσεις μπορούν να εισαγάγουν σημαντικά λάθη στις προβλέψεις.

9. ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ LNG ΔΙΑΡΡΟΕΣ

Στις LNG διαρροές στο νερό, το LNG εξαπλώνεται και βράζει με πολύ υψηλό ρυθμό. Ο ρυθμός ατμοποίησης διατηρείται συνεχώς σε υψηλά επίπεδα λόγω της συνεχούς επαφής με το, κατά πολύ μεγαλύτερης θερμοκρασίας, νερό. Εάν η διαρροή περιορίζεται και βρίσκεται σε ήρεμο νερό, τότε η αποφυγή της διασποράς μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό ενός στρώματος πάγου κάτω από το LNG. Όσο αυξάνεται το πάχος του στρώματος πάγου, ο ρυθμός που μεταφέρεται η θερμότητα μειώνεται, μειώνοντας συνεπώς και τον ρυθμό εξάτμισης του υγρού. Μικρές ποσότητες σχηματιζόμενου πάγου έχουν παρατηρηθεί σε διαρροές στο νερό χωρίς περιορισμό, αλλά κατά τη διάρκεια της εξάπλωσης η ταραχώδης επαφή μεταξύ του LNG και του νερού, όπως και η μεγάλη ποσότητα θερμότητας που μεταδίδεται από το νερό, αποτρέπει τον σημαντικό σχεδιασμό πάγου. Μόλις το LNG εξαπλωθεί στη μέγιστη επιφάνεια του, το πάχος (≈ 1 mm) δεν είναι αρκετό για να παρέχει τη μέγιστη θερμική αδράνεια για να παγώσει μεγάλες ποσότητες νερού.

Υψηλοί ρυθμοί εξάτμισης παρατηρούνται σε μεγαλύτερη απόσταση από το LFL, το οποίο έχει επιπτώσεις στην έκταση της φωτιάς του σύννεφου ατμού και των κινδύνων από μια έκρηξη. Μια αύξηση στο ρυθμό εξάτμισης θα αυξήσει επίσης τον συνολικό ρυθμό καύσης από τη θερμότητα που προέρχεται από το νερό και τη πυρκαγιά. Αν και προκύπτει μια μικρότερου μεγέθους πυρκαγιά λίμνης, εμφανίζεται υψηλότερη φλόγα λόγω της αύξησης του ρυθμού καύσης. Το σχήμα της λίμνης θα καθορίσει επίσης τις αποστάσεις θερμικού κινδύνου από την πυρκαγιά. Κατά συνέπεια, ο καθορισμός του ρυθμού εξάτμισης, όπως και το σχήμα και το μέγεθος της λίμνης συμβάλουν στην πρόβλεψη των κινδύνων. Παρακάτω παρουσιάζεται η περιγραφή των πειραμάτων και της μοντελοποίησης των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν τον σχηματισμό μιας LNG λίμνης.

9.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΤΟΥ LNG ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Υπάρχουν διάφορα, μικρής κλίμακας, πειράματα τα οποία παρατηρούν τη μαζική ροή και την εξάπλωση της LNG λίμνης στο νερό, αλλά τα λίγα μεγάλης κλίμακας πειράματα δεν παρέχουν τέτοιες πληροφορίες, καθώς έχουν ως στόχο τη μελέτη της διασποράς και των εκρηκτικών χαρακτηριστικών του σύννεφου ατμού. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα διάφορα πειράματα με τις ακτίνες της λίμνης και τις τιμές του όγκου που διέρρευσε, που έχουν υπολογίσει για μια λίμνη χωρίς να έχει αναφλεγεί. Τα πειράματα έχουν χρησιμοποιήσει σημάδια στις λίμνες και φωτογραφίες πάνω από αυτές για την καταγραφή του ρυθμού εξάπλωσης και του μεγέθους της, συναρτήσει του χρόνου. Από τη γνώση του ρυθμού απελευθέρωσης του υγρού και της περιοχής της λίμνης, μια μέση μαζική ροή μπορεί να καθοριστεί. Υπάρχει ένας μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας στη μέθοδο αυτή καθώς η περιοχή της λίμνης μπορεί γίνει ανώμαλη λόγω του αέρα, κάνοντας συνεπώς δύσκολο τον καθορισμό της περιοχής. Επιπλέον, η οπτική καταγραφή των γεγονότων πάνω από τη λίμνη είναι αρκετά δύσκολη λόγω του σύννεφου ατμού που

δημιουργείται. Έτσι, η πολύ λεπτομερής σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων δεν είναι δυνατή με τα διαθέσιμα σήμερα στοιχεία.

Έχουν υπάρξει διάφορα μοντέλα σχετικά με τη διάδοση του LNG στο νερό. Οι **Otterman, Briscoe** και **Shaw** παρέχουν μια σύγκριση των μοντέλων για διαρροές όγκου 103 έως 104 m³. Η πλειοψηφία των προτύπων υποθέτει ότι η λίμνη είναι κυκλική και ότι η εξάπλωση οδηγείται μόνο από τη βαρύτητα, και αγνοεί την επίδραση των κυμάτων και των ρευμάτων, και της διάσπασης της λίμνης. Τα ακόλουθα μοντέλα είναι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύσουν τη διάδοση του LNG στο νερό.

Ο **Opschoor** ανέπτυξε ένα μοντέλο για την εξάπλωση και την εξάτμιση LNG σε ανοικτές και περιορισμένες ήρεμες επιφάνειες νερού. Για μια επιφάνεια νερού χωρίς περιορισμούς, το πρότυπο υποθέτει ότι θα εμφανιστεί ο βρασμός ενός «οριακού στρώματος» και ότι δεν θα υπάρξει σχηματισμός πάγου. Για τις περιορισμένες επιφάνειες ύδατος, το πρότυπο υποθέτει ότι κατά τη διάρκεια της φάσης της εξάπλωσης κανένας σχηματισμός πάγου δεν εμφανίζεται λόγω του βρασμού του «στρώματος», και ότι μετά το τέλος της φάσης αυτής ένα στρώμα πάγου διαμορφώνεται εξαιτίας μιας μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του LNG και του νερού. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειράματα των **Boyle** και **Kneebone** για διαρροές 38 kg. Υπήρξαν παρόμοια αποτελέσματα για τον ρυθμό εξάτμισης για τις περιορισμένες επιφάνειες νερού, στην περίοδο σχηματισμού πάγου, καθώς και για τα αποτελέσματα για την ακτίνα των λιμνών στις επιφάνειες νερού χωρίς περιορισμούς. Όταν συγκρίθηκαν με τα πειράματα από το U.S. Bureau of Mines για διαρροές 163 kg, τα μοντέλα έβγαζαν μικρότερες ακτίνες λιμνών με την πάροδο του χρόνου.

Ο **Waite και άλλοι** ενσωμάτωσαν τη μεταφορά θερμότητας, τον βρασμό του μεθανίου (90%) και του αιθανίου (10%), και την εξάπλωση της λίμνης λόγω της βαρύτητας. Υποθέτοντας μια ροή θερμότητας για τον βρασμό του «στρώματος» περίπου 25 kW/m², το πρότυπο είχε παρόμοια αποτελέσματα για το 20% στην ακτίνα λιμνών συγκριτικά με τα πειράματα από το U.S. Bureau of Mines και των Boyle και Kneebon. Αυτή η ροή θερμότητας έδωσε πιο συγκρίσιμα αποτελέσματα από τη ροή θερμότητας που αρχικά υποτέθηκε στα 100 kW/m².

Οι **Brandeis και Ermak** ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο με εξισώσεις που αναφέρονται σε ήρεμο νερό. Μοντελοποιήθηκαν οι στιγμιαίες και συνεχείς διαρροές, σχετικά με την επίδραση της μεταφοράς μάζας και θερμότητας, τις διατμητικές δυνάμεις, και τη τάση της επιφάνειας. Η διάσπαση των λιμνών εξετάστηκε με τη συμπερίληψη της επίδρασης των διατμητικών δυνάμεων και της τάσης της επιφάνειας. Διαπιστώθηκε ότι ο απαιτούμενος χρόνος για να αποκτήσει η λίμνη μια σταθερή ακτίνα σε μια συνεχή διαρροή, αυξήθηκε με την αύξηση της τάσης επιφάνειας. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειράματα που εκτελέστηκαν από τους Boyle και Kneebone σε μια διαρροή 0.0817m³, και έδειξαν παρόμοια αποτελέσματα.

Ο **Cavanaugh** και άλλοι ανέπτυξαν έναν κώδικα LSM90 που εξομοιώνει διαρροές πολλών συστατικών στο έδαφος ή στο νερό. Η εξάπλωση οδηγείται από τη βαρύτητα και οι ενέργειες των κυμάτων δεν μοντελοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά του Esso και του Bugro, που περιγράφονται παρακάτω. Η διαφορά μεταξύ των πειραματικών και των υπολογισμένων αποτελεσμάτων για τον ρυθμό εξάτμισης ποίκιλε από 1 έως 48% με 8 από τις 10 περιπτώσεις περίπου στο 14%. Η μέση διαφορά για τη σύγκριση του μεγέθους της λίμνης ήταν 12%. Το μέγεθος της διαρροής για το οποίο η σύγκριση έγινε, δεν δηλώθηκε.

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

Πίνακας 12. Πειράματα σε νερό για τη μέτρηση της ακτίνας της λίμνης και της μαζικής ροής του LNG*

Πείραμα	Όγκος διαρροής (m ³)	Ακτίνα λίμνης (m)	Μαζική ροή (Kg/m ² s)
Boyle και Kneebone	0.023- 0.093 (λίμνη)	1.97- 3.63	0.029
Burgess et al.	0.0055- 0.36 (λίμνη)	0.75- 6.06	0.181
Feldbauer et al.	0.73- 10.2 (Κόλπος Matagorda)	7- 14	0.195
Maplin Sands	5- 20 (κολπίσκος περιβαλλόμενος από 300 m τάφρο)	~10	0.085
Koopman et al. (Avocet LLNL)	4.2- 4.52 (λίμνη)	6.82- 7.22	0.12
* Μερικά πειράματα χρησιμοποιούν ως μονάδα μέτρησης του ρυθμού εξάτμισης του LNG τα m/s. Οι τιμές της μαζικής ροής του LNG προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό του ρυθμού εξάτμισης του με τη πυκνότητά του (450 kg/m ³).			

9.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΡΑΣΜΟΥ ΛΙΜΝΗΣ

Ο βρασμός της λίμνης εμφανίζεται όταν το LNG διαρρέει στο νερό, εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς (περίπου -93 °C). Οι τρόποι βρασμού και οι αντίστοιχοι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας εξαρτώνται από τη διαφορά αυτή. Αυτή η εξάρτηση μπορεί να περιγραφεί εξετάζοντας μια θερμαινόμενη επιφάνεια που βυθίζεται σε ένα υγρό και η θερμοκρασία της επιφάνειας αυτής να φτάσει στο σημείο βρασμού του υγρού. Σε αυτή τη θερμοκρασία, εμφανίζεται ο σχηματισμός ατμού ή ο βρασμός του, ενώ αναπτύσσονται και κάποιες κοιλότητες, που περιέχουν είτε αέρα είτε ατμό, στην επιφάνεια επιτρέποντας τη δημιουργία φυσαλίδων ατμού. Αν και ο σχηματισμός αυτών των κοιλοτήτων γίνεται συνήθως σε στερεά επιφάνεια, μπορεί να κάνει την εμφάνιση του και σε ομοιογενές υγρό.

Με μια περαιτέρω αύξηση στη θερμοκρασία επιφάνειας, ο ρυθμός σχηματισμού φυσαλίδων αυξάνεται, παράγοντας υψηλές τοπικές ταχύτητες μέσα στο υγρό “στρώμα” δίπλα στην επιφάνεια, ενισχύοντας τη μεταφορά θερμότητας. Κατά συνέπεια, μια αύξηση στη διαφορά θερμοκρασίας θα αυξήσει τη μεταφορά θερμότητας στο υγρό. Τελικά, ο σχηματισμός φυσαλίδων είναι τόσο γρήγορος όπου το υγρό αποτρέπεται από την επαφή της επιφάνειας και μειώνεται η ροή θερμότητας. Αυτή είναι η μεταβατική κατάσταση.

Με τις περαιτέρω αυξήσεις στη θερμοκρασία επιφάνειας, ένα συνεχές στρώμα ατμού θα καλύψει την επιφάνεια και η μεταφορά θερμότητας θα μειωθεί δεδομένου ότι η θερμότητα μεταφέρεται μερικώς πέρα από το στρώμα ατμού χαμηλής αγωγιμότητας. Αυτό το καθεστώς καλείται βρασμός του στρώματος και η ελάχιστη θερμοκρασία για τον σταθερό βρασμό καλείται θερμοκρασία Leidenfrost. Μια ελάχιστη ροή θερμότητας από το βρασμό του στρώματος εμφανίζεται σε αυτήν την θερμοκρασία. Με επιπλέον αυξήσεις στη θερμοκρασία ο τρόπος μεταφοράς θερμότητας γίνεται μέσω ακτινοβολίας και η μεταφορά θερμότητας αυξάνεται, αν και τα περισσότερα υλικά αστοχούν σε αυτό το σημείο.

Δεδομένου ότι το LNG είναι ένα μίγμα υδρογονανθράκων διαφορετικών μοριακών βαρών, θα πραγματοποιηθεί εξάτμιση κατά προτίμηση, στην οποία ο βρασμός εμφανίζεται ανάλογα με το μοριακό βάρος των καυσίμων. Κατά συνέπεια, το μεθάνιο θα βράσει πρώτο δεδομένου ότι έχει χαμηλότερο μοριακό βάρος από το αιθάνιο και το προπάνιο. Αυτή η διαδικασία που οδηγεί στον εμπλουτισμό του LNG με τους βαρύτερους υδρογονάνθρακες αναφέρεται μερικές φορές ως «γήρανση» ή «διάβρωση» στη βιομηχανία. Η ροή θερμότητας του βρασμού για τα μίγματα μπορεί να είναι πολύ διαφορετική απ' ό,τι για τα επιμέρους συστατικά του μίγματος. Το αιθάνιο και το προπάνιο έχουν τα υψηλότερα σημεία βρασμού, $-88\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα, από το μεθάνιο ($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ο βρασμός του στρώματος εμφανίζεται για το καθαρό υγροποιημένο μεθάνιο στο νερό, αλλά με την προσθήκη του αιθανίου και του προπανίου που βράζουν θα εμφανιστεί είτε στην αρχική είτε στην μεταβατική κατάσταση κυρίως στα μεταγενέστερα στάδια της εξάτμισης της λίμνης, αν και αυτός ο τρόπος βρασμού μπορεί να εμφανιστεί οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της εξάτμισης όταν υπάρχει επαφή με το νερό και τις εμπλουτισμένες περιοχές. Τα πειράματα και οι μελέτες μοντελοποίησης έχουν δείξει ότι η χημική σύνθεση έχει επιπτώσεις στο ρυθμό εξάτμισης του LNG, και πρέπει έτσι να περιληφθούν στα πρότυπα εξάτμισης.

Ο **Boe (1998)** εκτέλεσε πειράματα εργαστηριακής κλίμακας με τα υγροποιημένα μίγματα μεθανίου-αιθανίου και μεθανίου-προπανίου που βράζουν στο νερό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη του αιθανίου ή του προπανίου έχει επιπτώσεις στο ρυθμό που βράζει. Υψηλός αρχικός ρυθμός βρασμού παρατηρήθηκε στα πλούσια μίγματα μεθανίου παρόμοια με αυτά του LNG. Ο ρυθμός αυτός αυξάνεται με έναν παράγοντα 1.5-2 από αυτόν του καθαρού μεθανίου όταν προστεθεί είτε αιθάνιο είτε προπάνιο για ένα μίγμα μεθανίου 97%. Ένα από τα αποτελέσματα ήταν ότι υπήρχε μια πτώση στο βρασμό της ταινίας εξαιτίας της στενής επαφής μεταξύ του μίγματος και του νερού προκαλώντας υψηλότερη ροή θερμότητας και μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά ώστε να διατηρηθεί μια συνεχής ταινία ατμού.

Αποτελέσματα από τον **Drake και άλλων (1975)** σε εργαστηριακά πειράματα κλίμακας έδειξαν ότι το LNG είχε ένα υψηλότερο ρυθμό βρασμού από το καθαρό μεθάνιο σε μια επιφάνεια χωρίς περιορισμούς. LNG με ελαφρά συστατικά όπως με μεθάνιο 98% και αιθάνιο 2% εξετάστηκαν, καθώς επίσης και βαριές συνθέσεις, μεθάνιο 82-89% με τις αναλογίες αιθάνιο-προπανίου μεταξύ 4 και 5. Η αύξηση του ποσού βαρύτερων υδρογονανθράκων οδήγησε στη γρηγορότερη εξάτμιση. Ο ρυθμός βρασμού αυξανόταν με το χρόνο και εμφανίστηκε άφρισμα του LNG στην επιφάνεια του νερού. Αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν με αυτά των **Valencia-Chavez και Reid (1979)** στις περιορισμένες διαρροές εργαστηριακής κλίμακας.

Οι **Conrado και Vesovic (2000)** ανέπτυξαν ένα πρότυπο για να ερευνήσουν την επιρροή της χημικής σύνθεσης στη συμπεριφορά διαρροών LNG και LPG για τις επιφάνειες νερού χωρίς περιορισμούς. Η διάδοση του υγρού βασίστηκε στην ισορροπία βαρύτητας-αδράνειας, στην μεταφορά θερμότητας καθώς και στην εξάτμιση. Επισήμαναν ότι εμφανίζεται εξάτμιση και ότι ο βρασμός δεν πραγματοποιείται σε μια σταθερή θερμοκρασία. Διαπίστωσαν ότι μια μείωση στο ρυθμό εξάτμισης λόγω της αλλαγής στη σύνθεση της λίμνης εμφανίζεται στα μεταγενέστερα στάδια της λίμνης. Ο ρυθμός εξάτμισης για LNG (μεθάνιο 90%, αιθάνιο 10%) σε σχέση με αυτόν του «καθαρού» μεθανίου βρέθηκε διαφορετικός. Για τις στιγμιαίες διαρροές, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το να μην υπολογιστεί η εξάτμιση κατά την διάρκεια της εξάπλωσης του υγρού είναι μια λογική υπόθεση. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα πρότυπα πρέπει να

χρησιμοποιήσουν τις ιδιότητες LNG που απεικονίζουν όλες τις ενώσεις και όχι αυτήν του καθαρού μεθανίου.

9.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ (RPT)

Η γρήγορη επέκταση του ατμού καλείται άμεση μεταβατική φάση στην LNG βιομηχανία. Συμβαίνει όταν το πολύ κρύο LNG έρχεται σε επαφή με το νερό. Αυτή η επέκταση δεν σχετίζεται με καύση αλλά ταξινομείται ως μια φυσική ή μηχανική επέκταση, στην οποία υπάρχει μια, υψηλής πίεσης, απελευθέρωση ενέργειας. Οι επεκτάσεις του ατμού έχουν μελετηθεί εκτενώς στην βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας και στη βιομηχανία βιομηχανικής διαδικασίας, όπως τα χυτήρια. Οι σχετικές έρευνες έχουν γίνει σε εργαστηριακή κλίμακα.

Η σειρά πειραμάτων **Coyote (1982-84)**, που εκτελέστηκαν από την LLNL, είναι η μόνη που ασχολείται με δοκιμές μεγάλης κλίμακας για τη μελέτη της RPT. Αυτές οι δοκιμές είχαν επίσης ως στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών σύννεφων LNG ατμού. Τα πειράματα αυτά ήταν μια συνέχεια της σειράς πειραμάτων **Burro (1982)** για την περαιτέρω μελέτη των κινδύνων από την καύση και από την RPT. Έγιναν από την LLNL και το Naval Weapons Center στο China Lake, California και χρηματοδοτήθηκαν από την DOE της Αμερικής και το Gas Research Institute. Για την μελέτη της RPT εκτελέστηκαν πειράματα με 13 διαρροές των 3-14 m³ με ρυθμό 6-19 m³/min, με καύσιμα διαφορετικών αναλογιών μεθανίου, προπανίου και αιθανίου και με συγκεντρώσεις μεθανίου μεταξύ 75 και 92% κατά όγκο.

Σε 6 από τις 18 διαρροές που μελετήθηκαν στα πειράματα Coyote εμφανίστηκε RPT. Στα περισσότερα ήταν πρόωρη RPT που εμφανίστηκε αμέσως με τη διαρροή, και σε μερικές περιπτώσεις, που συνεχίστηκε και κατά τη διάρκεια (περίπου ενός λεπτού) αυτής. Γενικά βρέθηκαν κοντά στο σημείο της διαρροής και ήταν κυρίως υποβρύχιες. Παρατηρήθηκαν επίσης καθυστερημένες RPTs, που εμφανίστηκαν (σε 3 δοκιμές) στο τέλος της διαρροής και που εντοπίστηκαν μακριά από το αρχικό σημείο.

Έχει αποδειχθεί ότι αρκετά διαφορετική συμπεριφορά εμφανίζεται στις μεγαλύτερες κλίμακες, κάτι που δεν προβλέφθηκε από τις μελέτες μικρότερης κλίμακας. Οι **Enger** και **Hartman** [24] από τη Shell εκτέλεσαν μια σειρά πειραμάτων μικρής κλίμακας, στο σχηματισμό 0.1m³ RPT και διαπίστωσαν ότι η περιεκτικότητα σε μεθάνιο του LNG πρέπει να είναι λιγότερο από 40 mol% (□35 vol.%) για να εμφανιστεί η RPT. Οι δοκιμές Coyote βρήκαν ότι RPT μπορεί να εμφανιστεί με πλούσια μίγματα μεθανίου μέχρι 88% κατά όγκο, δείχνοντας ότι άλλοι μηχανισμοί γίνονται κυρίαρχοι για μεγαλύτερες διαρροές. Επίσης διαπιστώθηκε ότι ακόμα και όταν υπήρξαν παρόμοιες συνθέσεις, οι RPTs ήταν πιθανόν και να εμφανιστούν αλλά και να μην εμφανιστούν. Κατά συνέπεια, η σύνθεση προ-διαρροής δεν είναι ο μόνος παράγοντας που καθορίζει το περιστατικό RPT.

Το περιστατικό RPT εμφανίστηκε να συσχετίζεται με τη θερμοκρασία του νερού και το βάθος της διείσδυσης του LNG μέσα σε αυτό. Η RPT εμφανίστηκε όταν η θερμοκρασία ύδατος ήταν πάνω από 17 °C.

Η δύναμη της RPT βρέθηκε να συσχετίζεται με το ρυθμό διαρροής. Μια απότομη αύξηση στην παραγωγή δύναμης RPT βρέθηκε περίπου σε 15m³/min, και περίπου σε 18m³/min η δύναμη

αυξήθηκε κατά 5 φορές. Η μέγιστη ισοδύναμη έκρηξη σε ελεύθερο αέρα και σημειακής πηγής TNT που εμφανίστηκε ήταν 6.3 kg για ένα ρυθμό διαρροής 18m³/min. Αυτό θεωρείται μια σημαντική υποτίμηση της πραγματικής ενέργειας που απελευθερώνεται, δεδομένου ότι η πλειοψηφία της έκρηξης ήταν κατευθυνόμενη υποβρύχια.

Η RPT βρέθηκε επίσης να αυξάνει την απόσταση προς το LFL κατά τουλάχιστον 65% λόγω της αύξησης στον ρυθμό εξάτμισης από την επέκταση. Οι RPT που εμφανίστηκαν αργά στη διαρροή οδήγησαν στον εμπλουτισμό αιθανίου, 40% κατά όγκο, που οφείλεται στην υψηλότερη συγκέντρωση αιθανίου στην LNG λίμνη. Το αιθάνιο έχει ένα LFL 3%, και συνεπώς η απόσταση προς το LFL αυξήθηκε κατά περίπου 60% για αυτές τις περιοχές.

Αρκετά θεωρητικά μοντέλα έχουν προταθεί για την εξήγηση του σχηματισμού της άμεσης μεταβατικής φάσης, κανένα όμως δεν έχει δώσει εξήγηση στη, μεγάλης-κλίμακας, συμπεριφορά των πειραμάτων Coyote. Υπάρχουν αρκετές πρόσφατες μελέτες σχετικά με τις θεωρίες που προτείνονται για την εξήγηση παρόμοιων φαινομένων για την επέκταση του ατμού. Η επικρατούσα θεωρία είναι η θεωρία υπερθέρμανσης η οποία προτείνει ότι αμέσως μετά από τη διαρροή του LNG στο νερό, εμφανίζεται βρασμός του «οριακού στρώματος». Κατόπιν λόγω των πιθανών ασταθειών και μιας μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς το στρώμα ατμού της ταινίας που βράζει καταρρέει στις εντοπισμένες περιοχές με συνέπεια την υγρή/υγρή επαφή. Αυτή η άμεση επαφή οδηγεί στην άμεση εξάτμιση από την αυξανόμενη μεταφορά θερμότητας, έτσι ώστε να παραχθεί ένα κύμα πίεσης για να επιτευχθεί μια γρήγορη επέκταση. Για την εμφάνιση μιας άμεσης μεταβατικής φάσης, το νερό πρέπει να είναι ίσο ή ελαφρώς μεγαλύτερο από τη θερμοκρασία υπερθέρμανσης του LNG ($T_{\text{superheat}} < T_{\text{water}} < 1.1T_{\text{superheat}}$). Η θερμοκρασία υπερθέρμανσης για το μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο, και το βουτάνιο είναι -105, -4, 53, και 103 °C αντίστοιχα. Η θερμοκρασία υπερθέρμανσης των μιγμάτων υδρογονανθράκων είναι περίπου ο μοριακός μέσος όρος των θερμοκρασιών υπερθέρμανσης των συστατικών.

Οι **Napier** και **Roochland (1984)** θέτουν το ζήτημα ότι η άμεση μεταβατική φάση (RPT) μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη, είτε από ηλεκτροστατική εκκένωση είτε από σπινθήρες τριβής στις περιοχές όπου εμφανίζεται καθώς και από στιγμιαία υπερθέρμανση του μίγματος μεθανίου-αέρα. Κατέληξαν στο ότι στιγμιαία υπερθέρμανση εύφλεκτων μιγμάτων μεθανίου χωρίς περιορισμούς σε θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης (540 °C) δεν είναι δυνατή. Η διαθέσιμη, πειραματικά καθορισμένη, θερμοκρασία είναι στους 177 °C και θεωρητικά στους 227 °C. Δηλώνουν ότι η ανάφλεξη είναι δυνατή μέσω μιας ηλεκτροστατικής εκκένωσης ή σπινθήρων τριβής, αλλά αυτοί οι τρόποι ανάφλεξης είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν.

9.4 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΝΝΕΦΟΥ LNG ΑΤΜΟΥ

Για τις, χωρίς περιορισμούς, διαρροές στο νερό, το σύννεφο θα ταξιδέψει κατά προσέγγιση με την ταχύτητα του αέρα πριν διαλυθεί και διασκορπιστεί. Αρχικά η θερμοκρασία των LNG ατμών θα είναι κοντά σε αυτή της λίμνης και συνεπώς θα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τον αέρα που τους περιβάλλει. Οι ατμοί του φυσικού αερίου πρέπει να είναι στους 166K για να αιωρούνται ουδέτερα σε αέρα με 289K. Η διάρκεια για την οποία το σύννεφο θα εμμείνει είναι δέκατα του λεπτού.

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

Στο σχήμα 12 φαίνεται το σχήμα ενός LNG σύννεφου ατμού. Το μήκος του σύννεφου συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος του λόγω του αέρα που το επιμηκώνει, ενώ για τις χαμηλές ταχύτητες αέρα, περίπου 1-2 m/s, το μήκος και το πλάτος είναι περίπου ίσα. Ο λόγος μήκους προς πλάτος είναι κοντά στο 5 για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Το σύννεφο βρίσκεται σε μικρό υψόμετρο ($\square 10$ m) σχετικά με το μήκος και/ή το πλάτος του. Ο λόγος μήκους προς ύψος βρίσκεται συνήθως κοντά στο 100. Οι συγκεντρώσεις αερίου ποικίλλουν στο σύννεφο όπως φαίνεται και στο σχήμα. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις θα εμφανιστούν κοντά στη διαρροή και έπειτα θα μειωθούν για να φθάσουν στο χαμηλότερο όριο ευφλεκτότητας (LFL) στις περιφερειακές περιοχές του σύννεφου.

Στον επόμενο πίνακα παρέχονται τα πειράματα σχετικά με την διασπορά του LNG στον αέρα μετά από διαρροή σε νερό, μαζί με τη μέγιστη αναμενόμενη απόσταση έως το LFL του μεθανίου. Ο όγκος του υγρού που απελευθερώθηκε και ο ρυθμός με τον οποίο έγινε αυτό είναι φανερό ότι παίζουν πρωταρχικό ρόλο στον υπολογισμό της παραπάνω απόστασης. Η απόσταση την οποία θα διανύσει το σύννεφο, εξαρτάται επίσης και από τον ρυθμό εξάτμισης του LNG, την παρουσία εμποδίων και τις συνθήκες της ατμόσφαιρας, όπως η ταχύτητα του αέρα, η υγρασία, η ατμοσφαιρική σταθερότητα καθώς και από τον τρόπο της απελευθέρωσης, περιλαμβάνοντας και το αν αυτή έγινε κάτω ή πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Συνθήκες που ευνοούν την ανάμιξη του σύννεφου με τον αέρα θα μειώσουν την απόσταση του LFL. Εμπόδια και ανώμαλο έδαφος επίσης τείνουν να μειώσουν την απόσταση αυτή, όπως το ίδιο προκαλεί και η υψηλή υγρασία. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι, γενικά, χαμηλές ταχύτητες ανέμου και αρκετά σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες οδηγούν στη μέγιστη απόσταση έως το LFL. Μια διαρροή κάτω από τη στάθμη της θάλασσας θα είχε ως αποτέλεσμα ένα σύννεφο μεγαλύτερης πλευστότητας εξαιτίας της μεγαλύτερης μεταφοράς θερμότητας από τη διαδρομή του LNG να φτάσει στην επιφάνεια του νερού, με συνέπεια τη μείωση της απόστασης μέχρι το LFL.

Πίνακας 13. Πειράματα εξάπλωσης και διασποράς του LNG σε νερό

Πείραμα	Όγκος διαρροής (m ³)	Ρυθμός διαρροής (m ³ /min)	Ακτίνα λίμνης (m)	Μέγιστη απόσταση από το LFL (m)
ESSO	0.73-10.2	18.9	7-14	442
Shell	27-193	2.7-19.3	Μη Διαθέσιμο	2250 ¹ (εικονικό)
Maplin Sands	5-20	1.5-4	~10	190±20
Avocet (LLNL)	4.2-4.52	4	6.82-7.22	220
Burro (LLNL)	24-39	11.3-18.4	~5	420
Coyote (LLNL)	8-28	14-19	Μη καταγεγραμμένο	310
Falcon (LLNL) ²	20.6-66.4	8.7-30.3	Μη καταγεγραμμένο	380
Συνολική έκταση του σύννεφου (η μέγιστη LFL απόσταση μη υπολογισμένη). Επομένως, η μέγιστη απόσταση στο LFL είναι μικρότερη από αυτήν την τιμή.				
² Ατμοί που μερικούς συγκεντρώνονταν σε δοχείο ατμού.				

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ LNG ΑΤΜΟΥ

Esso [1973]

Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν από την Esso Research and Engineering Company και την American Petroleum Institute in Matagorda Bay, Texas [46–47]. Οι όγκοι υγρού που διέρρευσαν κυμαίνονται από 0.73 έως 10.2 m³ με ένα ρυθμό 18.9m³/min. Παρατηρήθηκε ότι τα σύννεφα LNG ατμού ήταν ορατά και σε πολύ χαμηλό ύψος. Υπολογισμοί της πυκνότητας των μιγμάτων

του αέρα σε θερμοκρασία 21 °C και του μεθανίου στους -162 °C σε διαφορετικά επίπεδα υγρασίας, έδειξαν ότι η πυκνότητα του μίγματος LNG ατμού-αέρα επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική υγρασία, όπου αύξηση της οδηγεί σε μίγματα μικρότερης πυκνότητας. Σε μια μόνο δοκιμή, παρατηρήθηκε μια καθυστερημένη άμεση μεταβατική φάση (RPT).

Παρατηρήθηκαν, οπτικά, ακτίνες λιμνών μεταξύ 7 και 14 μέτρων, ενώ η μαζική ροή εξάτμισης υπολογίστηκε κοντά στο 0.195kg/m². Η μέγιστη απόσταση μέχρι το LFL μετρήθηκε από αισθητήρες υδρογονανθράκων και ήταν κατά προσέγγιση 442m για μια διαρροή όγκου 7.12m³ και ταχύτητα αέρα 4.9m/s. Υπήρξαν μερικές διαρροές για τις οποίες το σύννεφο υπερέβη τη σειρά των αισθητήρων και επομένως η απόσταση για το LFL δεν βρέθηκε. Η μεγαλύτερη απόσταση του τελευταίου ορατού σύννεφου από το σημείο της διαρροής ήταν 1372m για ένα όγκο υγρού 8.37m³ και ταχύτητα αέρα 4 m/s.

Shell Jettision Tests [1973]

Η **Shell** εκτέλεσε μια σειρά έξι δοκιμών στις οποίες ρίχτηκε LNG στη θάλασσα, από ένα σκάφος (Gadila) μεταφορικής ικανότητας 75.000 m³, σε μια περιοχή περίπου 70 μίλια δυτικά του St. Nazaire, στη Γαλλία [51]. Αυτές οι δοκιμές περιελάμβαναν το μεγαλύτερο όγκο LNG που απελευθερώθηκε στο νερό μέχρι σήμερα. Ο αρχικός στόχος των δοκιμών ήταν να καθοριστεί η εφικτότητα της απόρριψης του φορτίου καυσίμου έκτακτης ανάγκης με υψηλούς ρυθμούς απελευθέρωσης, ενώ το σκάφος είναι στάσιμο, καθώς επίσης και με χαμηλούς ρυθμούς απελευθέρωσης ενώ το σκάφος κινείται. Οι ρυθμοί ροής που εξετάστηκαν κυμάνθηκαν από 2.7 ως 19.3m³/min, διαρκώντας δέκα λεπτά για να δώσουν συνολικούς όγκους μεταξύ 27 και 193m³. Τέσσερις δοκιμές εκτελέστηκαν ενώ το σκάφος κινούταν με 1.5 έως 5.4 m/s (3-10.5 knots), καθώς και δύο δοκιμές με ακίνητο πλοίο, μια από τις οποίες ήταν με τη μεγαλύτερη ποσότητα LNG που διέρρευσε. Υγροποιημένο φυσικό αέριο ρίχτηκε στη θάλασσα από δύο, διαφορετικού μεγέθους, αεριοθούμενων ακροφυσίων, 51 και 102mm, εντοπισμένα 18m πάνω από το νερό, με ταχύτητες αέρα κυμαινόμενες από 1.9 έως 5.1 m/s.

Δεν έγιναν μετρήσεις της συγκέντρωσης, αλλά η έκταση του ορατού σύννεφου παρατηρήθηκε χρησιμοποιώντας υπερυψωμένες κάμερες. Τα αποτελέσματα της υπέρυθρης κάμερας ήταν ότι με το ακροφύσιο των 51mm δεν παρατηρήθηκε δημιουργία LNG λίμνης και ότι μόνο κάποια απομονωμένα κομμάτια δημιουργήθηκαν με τη χρήση του ακροφυσίου των 102mm. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην εξάτμιση του LNG πριν φτάσει στην επιφάνεια της θάλασσας καθώς απελευθερωνόταν από ύψος 18 μέτρων πάνω από το νερό. Κατά συνέπεια δεν παρατηρήθηκε ούτε σχηματισμός πάγου ούτε PRT. Επίσης δεν υπήρξε ούτε και κάποια σημαντική στατική φόρτιση για να λειτουργήσει ως πηγή ανάφλεξης.

Το πυκνό σύννεφο ατμού διασκορπίστηκε εντελώς μέσα σε 5-10 λεπτά μετά από το τέλος της απελευθέρωσης χρησιμοποιώντας το ακροφύσιο των 51mm, και μέσα σε 15-20 λεπτά χρησιμοποιώντας το ακροφύσιο των 102mm. Για τη μεγαλύτερη ποσότητα που διέρρευσε, 193m³ σε αέρα 3.9 m/s, το ορατό σύννεφο εμφανίστηκε να είναι ομοιόμορφο σε ολόκληρο το μήκος του, είχε ένα ύψος 10 με 12m, το μέγιστο συνεχές πλάτος του ήταν 550m, και το μήκος του 2250m.

Το κύριο συμπέρασμα από τη μελέτη ήταν ότι το LNG θα μπορούσε να ριχτεί στη θάλασσα χωρίς το σύννεφο ατμού να καλύπτει το σκάφος, και χωρίς να έρχεται σε επαφή με αυτό οδηγώντας σε κρουγόνο ζημιές.

Maplin Sands tests [1980]

Οι δοκιμές έγιναν από το National Maritime Institute στα Maplin Sands, England και χρηματοδοτήθηκαν από την Shell. Σκοπός τους ήταν η καταγραφή της διασποράς του σύννεφου και η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται σε 20 διαρροές LNG και 14 διαρροές προπανίου πάνω στο νερό για συνεχείς αλλά και στιγμιαίες απελευθερώσεις.

Εικοσιτέσσερις συνεχείς και δέκα στιγμιαίες διαρροές εκτελέστηκαν με μέση ταχύτητα αέρα 3.8-8.1 m/s. Οι στιγμιαίες διαρροές εκτελέστηκαν βυθίζοντας γρήγορα μια φορτηγίδα που φορτώθηκε με LNG ή προπάνιο, όγκου 5-20m³, ενώ για τις συνεχείς διαρροές, χρησιμοποιήθηκε ένας ρυθμός 1.54m³/min. Ένα ανάχωμα διαμέτρου 300m περιέβαλε το σημείο της διαρροής για να το περιορίσει.

Διαπιστώθηκε ότι η συμπεριφορά διασποράς του σύννεφου επηρεάστηκε από τη μέθοδο απελευθέρωσης του LNG. Για μια υποβρύχια απελευθέρωση, προήλθε σύννεφο με μεγαλύτερη πλευστότητα, ενώ για απελευθέρωση πάνω από το νερό, προήλθε σύννεφο χαμηλότερου ύψους και μεγαλύτερου μήκους λόγω του αέρα. Παρατηρήθηκε RPT σε μια από τις στιγμιαίες LNG διαρροές, οδηγώντας σε μια μέγιστη υπερπίεση των 1.8 kPa (0.26 PSI) και σε ζημιά της φορτηγίδας.

Μια χαρακτηριστική ακτίνα λιμών ήταν κατά προσέγγιση 10m, και ο ρυθμός εξάτμισης υπολογίστηκε να είναι περίπου 2×10^{-4} m/s. Η ακτίνα της λίμνης ως συνάρτηση του ρυθμού διαρροής δεν αναφέρθηκε. Χρησιμοποιώντας μετρήσεις τριών δευτερολέπτων, η μέγιστη απόσταση διασποράς έως το LFL για ένα ρυθμό διαρροής 3.2m³/min και ταχύτητα αέρα 5.5 m/s, ήταν 190±20m από το σημείο της απελευθέρωσης. Η απόσταση αυτή βρέθηκε να είναι μέσα στο ορατό όριο του σύννεφου ατμού για μια υπολογισμένη υγρασίας 50-100%.

Burro tests [1980]

Οι δοκιμές **Burro** έγιναν από το by Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) στο Naval Weapons Center στη China Lake, California και χρηματοδοτήθηκε από το U.S. DOE και το Gas Research Institute [22–23]. Ένα σύνολο 8 LNG διαρροών πραγματοποιήθηκε, με τους όγκους που χάθηκαν να κυμαίνονται από 24 έως 39m³, ο ρυθμός διάδοσης από 11.3 έως 18.4m³/min, η ταχύτητα ανέμου από 1.8 έως 9.1 m/s και με μια σταθερότητα ατμοσφαιρικών συνθηκών ασταθή έως ελαφρώς σταθερή. Διασπορά εμφανίστηκε 29 μέτρα πάνω από το σημείο της διαρροής, στη οποία δημιουργήθηκε λίμνη με διάμετρο 58 m και βάθος 1m. Πριν από αυτές τις δοκιμές είχαν προηγηθεί οι δοκιμές Avocet για διαρροές 5m³. Οι δοκιμές Avocet εκτελέστηκαν προκειμένου να αποκτηθεί γνώση των απαιτούμενων μετρήσεων για τον υπολογισμό απελευθερώσεων μεγαλύτερου όγκου στα πειράματα Burro.

Σε μια από τις δοκιμές, το σύννεφο προκάλεσε τη μετατόπιση της ατμοσφαιρικής ροής και οδήγησε σε μηδενισμό της ταχύτητας του αερίου μέσα στο σύννεφο. Αυτή η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με μια χαμηλή ταχύτητα αέρα, 1.8 m/s, ελαφρώς σταθερή ατμόσφαιρα, ρυθμό διαρροής 16m³/min και όγκου 28.4m³. Για τις άλλες δοκιμές με υψηλότερες ταχύτητες αέρα, το σύννεφο ήταν ευρύτερο και χαμηλότερο στο ύψος από οποιαδήποτε άλλη δοκιμή. Η μέγιστη απόσταση έως το LFL σε ύψος 1m ήταν περίπου 420m. Το σύννεφο παρέμεινε επίσης στην περιοχή της διαρροής μετά και το τέλος της διάδοσης, σε αντίθεση με τις άλλες δοκιμές όπου το σύννεφο μεταφέρθηκε, ανάλογα με τον αέρα, μέσα σε 10-20 s μετά από τη λήξη της.

Διαφορετική εξάτμιση παρατηρήθηκε στις δοκιμές όπου ο εμπλουτισμός αιθανίου και προπανίου μέχρι 40% εμφανίστηκε στο σύννεφο, το οποίο μεταφέρθηκε μέχρι 140m λόγω του αέρα. Επίσης διαπιστώθηκε ότι μια σχετική αύξηση στην υγρασία συσχετίζεται με μια αύξηση στη συγκέντρωση αερίου. Μια συγκέντρωση αερίου 1% στο σύννεφο συνδέθηκε με μια αύξηση 15% στην απόλυτη υγρασία. Κατά συνέπεια, νερό παρασύρθηκε στο σύννεφο, έτσι ώστε η περιεκτικότητα σε νερό του σύννεφου ατμού ήταν ουσιαστικά υψηλότερη από ότι του αέρα.

Για το πείραμα Νο 8 του Burro, αεροφωτογραφίες έδειξαν ότι το μεγαλύτερο μέρος του πλάτους του σύννεφου περιοριζόταν μέσα σε ένα τόξο 140 μέτρων, στο οποίο τοποθετήθηκαν σειρές αισθητήρων αερίου, αν και μέρος του σύννεφου εξαπλώθηκε και πέρα από αυτούς. Οι μετρήσεις συγκέντρωσης αερίου έδειξαν ότι το LFL επιτεύχθηκε μέσα στα 140m. Συνεπώς, η απόσταση μέχρι το LFL βρισκόταν μέσα στο ορατό τμήμα του σύννεφου, ακόμα και για υγρασία 5%. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στην παράσυρση υδρατμών από τη λίμνη στο σύννεφο.

Η άμεση μεταβατική φάση (RPT) εμφανίστηκε επίσης σε αυτές τις δοκιμές παράγοντας υπερπιέσεις (στατικές) μέχρι 5 kPa που μετρήθηκαν σε μια απόσταση 30m από το σημείο διαρροής. Ήταν αρκετά ισχυρές για να προκαλέσουν ζημιά στο έδρανο υποστήριξης και στις σωληνώσεις.

Falcon tests [1987]

Οι δοκιμές Falcon πραγματοποιήθηκαν από την LLNL στη Frenchman Flat, Nevada και χρηματοδοτήθηκαν από το Gas Research Institute και το U.S. DOT [57]. Σκοπός τους ήταν η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων σχετικά με την διασπορά του LNG ατμού από διαρροές περιλαμβάνοντας εμπόδια καθώς και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας φρακτών ατμού, ώστε να περιοριστούν οι κίνδυνοι της διασποράς. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε μια λίμνη 40m x 60m που εσωκλείστηκε από ένα φράκτη μήκους 88m, πλάτους 44m και ύψους 9.1m. Ένα εμπόδιο με πλάτος 22m και ύψους 13.7m τοποθετήθηκε αντίθετα στον άνεμο της λίμνης προκειμένου να μιμηθεί την παρεμπόδιση μιας δεξαμενής αποθήκευσης.

Πέντε δοκιμές εκτελέστηκαν με ρυθμούς διαρροής 8.7-30.3m³/min, όγκους 20.6-66.4m³, ταχύτητες αέρα 1.7-5.3 m/s, και συγκεντρώσεις μεθανίου 88-94.7%.

Η δοκιμή Falcon-1, ήταν αυτή με τον μεγαλύτερο όγκο που απελευθερώθηκε, 66.4m³, ρυθμό διαρροής 28.7m³/min και τις πιο σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αποτέλεσμα της ήταν το σύννεφο ατμού να υπερχειλίσει τον φράκτη ατμού και στις τέσσερις μεριές, αν και προσομοιώσεις σηράγγων αέρα προ-διαρροής προέβλεπαν ότι θα παραμείνει μέσα στα όρια του. Υποτέθηκε, ότι η μεταφορά πάνω από την κορυφή του φράκτη οφειλόταν στην ενισχυμένη ταραχώδη μίξη από τον μεγάλο ρυθμό διαρροής αλλά και στην υπερθέρμανση του LNG από το νερό. Αυτός ο ισχυρισμός δεν θα μπορούσε να τεκμηριωθεί, λόγω των ανεπαρκών μετρήσεων της συγκέντρωσης και της θερμοκρασίας στην περιοχή της πηγής. Μια μέγιστη απόσταση, έως το LFL, των 330 μέτρων μετρήθηκε για αυτήν την περίπτωση.

Δοκιμές εκτελέστηκαν με φράκτη ατμού αλλά και χωρίς αυτόν. Με το φράκτη, η απόσταση για συγκέντρωση 2.5% στο έδαφος, μειώθηκε από περίπου 380m σε 235m ενώ παρατηρήθηκε και μια ουσιαστική μείωση των επικίνδυνων περιοχών. Η εμμονή του σύννεφου σε μια συγκέντρωση 2.5% κοντά στο κέντρο της διαρροής ήταν 530 sec με το φράκτη, συγκριτικά με τα 330 sec χωρίς το φράκτη. Αν και ο φράκτης μείωσε την απόσταση την οποία καλύπτουν οι

επικίνδυνες περιοχές και καθυστέρησε το χρόνο άφιξης σύννεφων, παράτεινε το χρόνο παραμονής των σύννεφων μέσα στο φράκτη, παρατείνοντας τη δυνατότητα ανάφλεξης σε περίπτωση ύπαρξης ανάλογης πηγής μέσα στη περιοχή

Για την τελευταία δοκιμή, Falcon-5, μια μεγάλη RPT εμφανίστηκε περίπου 60 δευτερόλεπτα μετά από τη διαρροή και μια φλεγόμενη μπάλα δημιουργήθηκε μέσα στο φράκτη ατμού σε 81 δευτερόλεπτα. Αυτή η δοκιμή είχε ένα ρυθμό διαρροής $30.3\text{m}^3/\text{min}$, συνολικό όγκο 43.9m^3 και περιεκτικότητα σε μεθάνιο 88%. Η φλεγόμενη μπάλα υποτέθηκε ότι προήλθε λόγω μιας έκρηξης ενός σωλήνα μόνωσης κατά τη διάρκεια της RPT, ο οποίος πιθανόν έχει παγώσει από το οξυγόνο στην επιφάνειά του, εξαιτίας της αρχικής ψύξης του με υγρό άζωτο πριν από τη δοκιμή, εκθέτοντας το φυσικό αέριο στο οξυγόνο. Μόνο περιορισμένα στοιχεία έξω από τον φράκτη λήφθηκαν για έναν χρόνο περίπου 100 δευτερολέπτων. Η RPT επίσης εμφανίστηκε κατά τη δοκιμή Falcon-3, με ένα ρυθμό διαρροής $18.9\text{m}^3/\text{min}$, συνολικό όγκο 50.7m^3 και περιεκτικότητα σε μεθάνιο 91%.

9.5 ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΚΑΥΣΗΣ

9.5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΝΕΦΟΥ ΑΤΜΟΥ LNG

Έχει πραγματοποιηθεί πλήθος πειραμάτων για την ανάφλεξη του LNG που διαρρέεται και δημιουργεί λίμνη ή σύννεφο ατμού επάνω στο νερό, από τα οποία βγήκαν συμπεράσματα σχετικά με τη ροή θερμικής ακτινοβολίας, τον ρυθμό καύσης, τη γεωμετρία και την ταχύτητα της φωτιάς.

U.S Coast Guard China Lake [1978]

Μία σειρά από 16 δοκιμές πραγματοποιήθηκε διαρρέοντας 3-5.7 m^3 μη περιορισμένου LNG στο νερό με αντίστοιχους ρυθμούς 0.02-0.11 m^3/s στο κέντρο ναυτικών όπλων στην China Lake, California, βασισμένες στις μελέτες των P.K. Raj και άλλων (1979). Σκοπός αυτών των δοκιμών ήταν η μέτρηση της θερμικής ακτινοβολίας από φωτιά λίμνης και σύννεφου ατμού LNG. Τρεις τύποι πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν: άμεση ανάφλεξη της LNG λίμνης, καθυστερημένη ανάφλεξη (η οποία συνέβη μετά την έναρξη της διαρροής αλλά πριν την ολοκλήρωση της ατμοποίησης), και ανάφλεξη προσήνεμη με το σύννεφο ατμού. Από τις 16 δοκιμές, 7 ήταν φωτιάς λίμνης, 3 καθυστερημένης ανάφλεξης, και 6 φωτιάς σύννεφου ατμού. Οι ταχύτητες του ανέμου ποικίλουν από 3.1 με 4.1 m/s .

Για τις πυρκαγιές λίμνης η έκλυση ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας κοντά στη βάση της φωτιάς κυμαίνεται από 190 kW/m^2 μέχρι 230 kW/m^2 χρησιμοποιώντας ραδιόμετρα μικρής γωνίας, ενώ για ολόκληρη την επιφάνεια της φωτιάς από 170 kW/m^2 μέχρι 270 kW/m^2 χρησιμοποιώντας μεγάλης γωνίας ραδιόμετρα. Το ποσοστό του μεθανίου στο LNG που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση ποίκιλλε από 75 σε 95 %. Παρά όλα αυτά δεν λήφθηκε υπόψη σαν παράμετρος. Η υψηλότερη έκλυση ενέργειας (spot) συνέβη με την υψηλότερη συγκέντρωση μεθανίου (250 kW/m^2).

Το μέσο ύψος της φωτιάς κατά τη διάρκεια της σταθερής καύσης του LNG κυμαίνεται από 25 σε 55m με μια απόκλιση $\pm 10\text{m}$ για ανεξάρτητες δοκιμές. Το μέσο μήκος κυμαίνεται από 3 σε

4m με μία μέγιστη τιμή στα 6m. Η λίμνη δεν ήταν συμμετρική (κυκλική), αλλά πλησίαζε ένα ελλειπτικό σχήμα. Το μέγεθος αυτών των δακτύλων δεν μπορούσε να προσδιοριστεί. Εξισώνοντας το εμβαδό της λίμνης με αυτό ενός κύκλου, η μέγιστη σταθερή διάμετρος της ήταν περίπου 15m για μία διαρροή 5.7 m^3 και ρυθμό απελευθέρωσης $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ο ρυθμός καύσης προσεγγίστηκε διαιρώντας τον ολικό όγκο του LNG που έχει διαρρεύσει με την υπολογισμένη περιοχή της λίμνης και τη διάρκεια της έντονης ή σταθερής καύσης. Οι ρυθμοί καύσης που υπολογίστηκαν κυμαίνονται από 4×10^{-4} σε $11 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο όγκος του LNG που διαρρέει κατά τη σταθερή καύση είναι μικρότερος από τον ολικό όγκο του LNG που διαρρέει. Έτσι οι ρυθμοί καύσης χρησιμοποιώντας τον ολικό όγκο είναι μεγαλύτεροι απ' ό,τι στη σταθερή καύση.

Για την καθυστερημένη ανάφλεξη η λίμνη LNG αναφλέχθηκε περίπου 30s μετά την έναρξη της διαρροής. Το σύννεφο ατμού κάηκε μέχρι την πηγή του ώστε τέλος να καεί σαν λίμνη για την οποία μιλήσαμε παραπάνω.

Για τη φωτιά του σύννεφου ατμού η έκλυση ισχύος ανά μονάδα επιφανείας κυμαίνεται από 180 kW/m^2 μέχρι 250 kW/m^2 χρησιμοποιώντας ραδιόμετρα μικρής γωνίας και από 110 kW/m^2 μέχρι 290 kW/m^2 χρησιμοποιώντας μεγάλης γωνίας ραδιόμετρα. Οι φωτιές αυτές έχουν παρατηρηθεί να διαδίδονται κατά μήκος της περιοχής προς τη λίμνη. Το μέσο ύψος της φωτιάς σε αναλογία με το πλάτος της είναι 0.5, ενώ η ταχύτητα της κυμαίνεται από 8 σε 17 m/s . Πύρινες μπάλες δεν έχουν παρατηρηθεί για τέτοιου μεγέθους διαρροές.

Maplin sands [1980]

Αυτή η σειρά των δοκιμών έγινε για να παραχθούν αποτελέσματα για τη διασπορά και τη θερμική ακτινοβολία 20 διαρροών $5\text{-}20 \text{ m}^3$ LNG στο νερό. Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, η σχετική υγρασία και η ακτινοβολία μετρήθηκαν με 26 μικρής γωνίας ραδιόμετρα.

Η έναρξη της ανάφλεξης έγινε σε απόσταση 90-180m (προσήμεμα) από το σημείο της διαρροής. Επιτυχής ανάφλεξη πραγματοποιήθηκε σε 4 μόνο δοκιμές. Και αυτό γιατί σε ορισμένες περιπτώσεις τα σημεία έναρξης της ανάφλεξης είχαν επιλεγεί σε περιφέρειες του σύννεφου όπου το μείγμα ήταν αρκετά φτωχό (για καύση) και ανομοιογενές. Από τις 4 δοκιμές, 3 ήταν συνεχόμενης διαρροής με ρυθμό $3.2\text{-}5.8 \text{ m}^3/\text{min}$, και 1 ακαριαίας με όγκο διαρροής 12 m^3 .

Και στις 4 δοκιμές αναπτύχθηκε φωτιά σύννεφου ατμού, αλλά μόνο στη μία αυτή η φωτιά διαδόθηκε προς το σημείο της διαρροής, προκαλώντας πυρκαγιά λίμνης διάρκειας λίγων δευτερολέπτων. Μία ενεργή λίμνη διαμέτρου 30m υπολογίστηκε προσεγγίζοντας τη βάση της φωτιάς ως έλλειψη. Το μέσο ύψος της πυρκαγιάς ήταν 80m ενώ η μέση έκλυση ισχύος ανά μονάδα επιφανείας υπολογίστηκε 203 kW/m^2 με εύρος από $178\text{-}248 \text{ kW/m}^2$ χρησιμοποιώντας ένα κυλινδρικό μοντέλο φωτιάς, και ρυθμό καύσης του LNG $2.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ και την διόρθωση του Thomas (1963). Η φωτιά διαδόθηκε μέσω του σύννεφου ατμού προς τα πίσω είτε με τη μορφή φωτεινής προσήμεμης και αδύναμης φωτιάς κινούμενης μέσω τμημάτων του σύννεφου με ανομοιογενές μείγμα LNG, είτε με τη μορφή φωτεινής, αντίθετης με τον άνεμο και κινούμενης μέσω τμημάτων του σύννεφου με πλούσιο μείγμα LNG.

Η ταχύτητα της διάδοσης της προσήνεμης φωτιάς προς τα πίσω μετρήθηκε 4.5-6.0 m/s. Το εύρος της ταχύτητας του ανέμου ήταν πολύ περιορισμένο προκειμένου να συσχετισθεί η διάδοσης της πυρκαγιάς με αυτήν.

Σε μία δοκιμή συνεχόμενης διαρροής η προ-ανάμιξης φλόγα διαδόθηκε μέσω του σύννεφου ατμού μέχρι και 130 m από το σημείο της διαρροής. Η αναλογία ύψος προς πάχος της πυρκαγιάς σύννεφου ήταν από 0.2-0.4 ενώ η μέση έκλυση ισχύος ανά μονάδα επιφανείας υπολογίστηκε 174 kW/m² με εύρος από 137-225 kW/m².

Coyote [1981]

Αυτή η σειρά των δοκιμών πραγματοποιήθηκε από τον LLNL και το Κέντρο Ναυτικών Όπλων στην China Lake, στην California και χρηματοδοτήθηκε από την U.S DOE και το Gas Research Institute (H.C. Rodean και άλλοι, 1984). Η μελέτη της καύσης των σύννεφων ατμού από τις LNG διαρροές στο νερό έγινε για να καθοριστεί η διάδοση της φλόγας και η θερμική ροή. Πραγματοποιήθηκαν 4 δοκιμές με διαρροές από 14.6-28 m³ και ρυθμούς ροής από 13.5-17.1 m³/s με καύσιμα με διαφορετικές συγκεντρώσεις μεθανίου προπανίου και αιθανίου. Οι ταχύτητες του ανέμου ποικίλλουν από 4.6 σε 9.7 m/s ενώ η ατμοσφαιρική κατάσταση από άστατη σε ουδέτερη.

Το σημείο ανάφλεξης εντοπίστηκε κοντά στην CL του σύννεφου περίπου 60 με 90 m προσήνεμα από το σημείο της διαρροής, ενώ η ανάφλεξη πραγματοποιήθηκε είτε με φωτοβολίδα, είτε με jet fire. Η ανάφλεξη έλαβε μέρος 100-150s μετά την έναρξη της διαρροής. Οι φλόγες παρατηρήθηκαν να ξεκινούν κοντά στο κέντρο του σύννεφου και να επεκτείνονται ακτινικά με διεύθυνση είτε αυτή του ανέμου, είτε αντίθετη. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκαν ορατές, κίτρινες, φωτεινές και διαυγείς φλόγες. Δημιουργήθηκαν και φωτιές λίμνης αλλά δεν πάρθηκαν μετρήσεις.

Ο προσδιορισμός της γραμμής της προ-ανάφλεξης έγινε με παρεμβολή σε 2 μετρήσεις με αισθητήρες αερίου. Βρέθηκε ότι η γραμμή της προ-ανάφλεξης (5% συκέντρωση αερίου) δεν είναι ενδεικτική της ενδεχόμενης περιοχής καύσεως. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην έλλειψη αισθητήρων μεταξύ του σημείου διαρροής και 140m.

Στη δοκιμή με τον υψηλότερο ρυθμό ροής ή ολικό όγκο διαρροής (17.1m³/min ή 28m³) η RPT αύξησε την απόσταση στο LFL περίπου 65% και την ολική περιοχή καύσης κατά 200%. Η φλόγα επεκτάθηκε μέχρι 280m (προσήνεμα) με μέγιστο πάχος 60m.

Η δοκιμή που πραγματοποιήθηκε στη χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου και στις πιο σταθερές ατμοσφαιρικές καταστάσεις είχε το μεγαλύτερο σύννεφο πυρκαγιάς με μέγιστο πάχος 130m και προσήνεμη απόσταση 210m.

Τα ύψη της φωτιάς φαίνονται να ποικίλλουν ανάλογα με το ύψος της προ-ανάφλεξης του εύφλεκτου μείγματος κοντά την πηγή της ανάφλεξης. Ο λόγος του ύψους της φλόγας προς το ύψος του σύννεφου κυμαίνεται από 5 σε 10. Τα σύννεφα έχουν ύψος 3-8m. Οι μέγιστες ταχύτητες της φλόγας παρατηρήθηκαν κοντά στις αδύναμες πηγές ανάφλεξης (30 m/s) και σε ισχυρότερες πηγές ανάφλεξης (40-50 m/s). Αυτές οι ταχύτητες μειώνονται καθώς αυξάνεται η απόσταση από τις πηγές, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμιά επιτάχυνση της φλόγας. Οι υπέρ-πίεσεις που μετρήθηκαν ήταν μερικών millibars.

Τέλος η ροή της θερμότητας μέσα στο σύννεφο φωτιάς μετρήθηκε και βρέθηκε μεταξύ 150-340 kW/m². Η ροή της ακτινοβολίας στις φωτεινές κίτρινες περιοχές των φλογών μετρήθηκε 220-280 kW/m² χρησιμοποιώντας μικρής και μεγάλης γωνίας ραδιόμετρα.

9.5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΤΑΧΕΙΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ – ΤΑΧΕΙΑΣ ΕΚΡΗΞΗΣ

Εκρήξεις που μπορεί να συμβούν από μείγματα αερίων καυσίμων είναι γνωστές είτε ως ταχείες αναφλέξεις είτε ως ταχείες εκρήξεις (deflagrations-detonations). Σε μία ταχεία ανάφλεξη το μείγμα καίγεται σχετικά αργά (1 m/s για υδρογονάνθρακες). Αυτή η ταχύτητα της φωτιάς έχει μεγάλη διαφορά με την ταχεία έκρηξη, όπου η φλόγα ταξιδεύει σαν ένα κρουστικό κύμα ακολουθούμενο από ένα εκρηκτικό κύμα, που με τη σειρά του παράγει μεγάλα ποσά ενέργειας ικανά να παρατείνουν την διάρκεια του κρουστικού. Η ταχύτητα της ταχείας έκρηξης μπορεί να φτάσει και τα 2000-3000 m/s. Για αυτόν τον λόγο οι ταχείες εκρήξεις δημιουργούν πολύ μεγαλύτερες υπέρ-πιέσεις (300 psi) από τις ταχείες αναφλέξεις (115psi)· άρα και πιο καταστρεπτικές.

Bull and Martin [1977]

Αυτή η σειρά των πειραμάτων μελέτησε τη σφαιρική ταχεία έκρηξη μιγμάτων μεθανίου-οξυγόνου, αραιωμένα με άζωτο. Η ταχεία έκρηξη του μείγματος που ήταν μέσα σε σάκουσ από πολυαιθυλένιο διαστάσεων 1,8×1.8 m και 3.05×1.52m άρχισε μέσω του εκρηκτικού Tetryl.

U.S Coast Guard China Lake [1978]

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μέσα σε έναν σωλήνα έκρηξης (detonation tube) και σε ημισφαίρια ακτίνας 5 και 10m. και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε μείγμα μεθανίου-αέρα και μείγμα μεθανίου-προπανίου. Για τα πειράματα με τον σωλήνα έκρηξης το μίγμα μεθανίου-αέρα δεν εκρήχτηκε ούτε με κάποιο είδος τονωτικού ούτε με σπίθα. Το μίγμα μεθανίου-προπανίου (60-40%, 70-30%, 85-15%) εκρήχθηκε χρησιμοποιώντας 1 kg εκρηκτικού τονωτικού. Τα πειράματα έδωσαν και αποτελέσματα σχετικά με σενάρια ατυχημάτων.

Vander Molen and Nicholls [1979]

Τα πειράματα έγιναν για μετρηθεί η επίδραση του αιθανίου στο σύννεφο μεθανίου στην έκρηξη. Η συγκέντρωση του αιθανίου ήταν μεταξύ 0 και 5.66% κατ' όγκο του ολικού μείγματος μεθανίου-αιθανίου-αέρα. Χρησιμοποιήθηκε σωλήνας κρουστικός ακτίνας 147.6cm και πάχους 5cm για τη μοντελοποίηση 20^o κυλινδρικού σύννεφου. Για επιτυχή έκρηξη του μείγματος (1% ή 10% αιθάνιο κατ' όγκο του ολικού μείγματος) χρειαζόταν 5.5g εκρηκτικού ή 25,000 J/cm.

Moen et al. [1980]

Οι δοκιμές έγιναν στο McGill University στο Montreal, Canada πάνω στην επιτάχυνση της φλόγας και στην μετάβαση από την ταχεία ανάφλεξη στην ταχεία έκρηξη (*deflagration to detonation*).

Harrison and Eyre [1987]

Στα πειράματα αυτά έγινε μία σειρά δοκιμών για να ερευνηθεί η επίδραση των εμποδίων στην επιτάχυνση της φλόγας προ-μειγμένου μείγματος φυσικού αερίου-αέρα και προπανίου-αέρα.

Shell /2001

Η επιτάχυνση της φλόγας ερευνήθηκε σε μία κατασκευή μήκους 10m, πάχους 8.75m και ύψους 6.25m χρησιμοποιώντας μείγματα μεθανίου-αέρα και προπανίου-αέρα, και τη βοήθεια ενός μπούζι για την έναρξη της έκρηξης.

10. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ LNG ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Σκοπός της μοντελοποίησης των διαφόρων καταστάσεων κατά τη διάρκεια μια LNG διαρροής στο νερό, είναι η εκτίμηση και η δημιουργία μεθόδων για τον υπολογισμό των αποστάσεων από το κέντρο της διαρροής, του εύφλεκτου σύννεφου και των βλαβερών κινδύνων από την θερμική ακτινοβολία.

Για τη μελέτη αυτή θεωρείται ότι ο εύφλεκτος ατμός και οι κίνδυνοι από τη θερμική ακτινοβολία προέρχονται από μια, μη περιορισμένη απελευθέρωση, LNG από μια δεξαμενή συγκράτησης του, πάνω στο νερό. Η μελέτη περιλαμβάνει εξέταση της βιβλιογραφίας, σχετικά με πειράματα σε LNG διαρροές, και των μεθοδολογιών αξιολόγησης των συνεπειών μιας τέτοιας διαρροής.

Τα βασικά σημεία που πρέπει να εξεταστούν για να αναλυθεί το φαινόμενο της διαρροής φαίνονται παρακάτω (ABS, 2004):

- ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ LNG
- ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΜΙΑΣ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ
- ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΤΜΟΥ (ΕΞΑΤΜΙΣΗ) ΑΠΟ ΜΙΑ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΣΤΟ ΝΕΡΟ
- ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΕΥΦΛΕΚΤΟΥ ΑΤΜΟΥ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΔΙΑΡΡΟΗ LNG
- ΑΜΕΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΦΑΣΗ (RPT)
- ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΛΙΜΝΗΣ

Γενικά αυτές οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στη συνέχεια για την ανάλυση των παραπάνω θεμάτων, παρέχουν εκτιμήσεις, κατά προσέγγιση, του μεγέθους των αποτελεσμάτων, για γεγονότα που περιλαμβάνουν μεγάλες LNG διαρροές. Αυτό είναι σύνηθες στις περιπτώσεις αξιολόγησης συνεπειών, και είναι σημαντικό να έχουμε υπόψη μας ότι οι προτεινόμενες μεθοδολογίες δεν μπορούν να παρέχουν ακριβείς εκτιμήσεις των επιδράσεων εξαιτίας της μεταβλητότητας των πραγματικών συνθηκών, όπως και λόγω της έμφυτης αβεβαιότητας των μεθόδων.

Οι δημοσιοποιημένες μεθοδολογίες που αναλύθηκαν είναι αυτές του **Fay (2003)**, του **Lehr (2004)**, του **Quest (2001)** και του **Vallejo (2003)**. Παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις και τα αποτελέσματα τους για κάθε ένα από τα παραπάνω βασικά σημεία ενώ παρουσιάζονται και κάποιες άλλες μοντελοποιήσεις. Εντούτοις, η μελέτη του Vallejo δεν παρέχει ικανοποιητικές τεχνικές πληροφορίες και δεν συζητείται.

10.1 ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ LNG

Εάν σε μια δεξαμενή μεταφοράς LNG φορτίου προκληθεί ρήγμα κάτω ή πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, το LNG θα διαρρεύσει μέσω αυτού. Αυτό το τμήμα παρουσιάζει μια αξιολόγηση διαφόρων μεθόδων για να υπολογίσει πόσο γρήγορα θα διαρρεύσει το υγρό.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ

Ο Fay (2003) παρουσιάζει δύο μοντέλα ρυθμού απελευθέρωσης, ένα για ρήγματα επάνω από το επίπεδο της θάλασσας και ένα για ρήγματα κάτω από αυτό. Το πρώτο μοντέλο είναι ισοδύναμο με τις γνωστές σχέσεις για τη ροή μέσω ενός στομίου, καθοδηγούμενη από τη βαρύτητα. Το μοντέλο στομίων παρουσιάζεται σε πολλές αναφορές αξιολόγησης της συνεπειών, όπως στην AIChE (2000) και στον TNO (1997), όπως και στα περισσότερα εγχειρίδια ρευστομηχανικής. Αυτό το μοντέλο παρουσιάζει την περίπτωση διαρροής LNG από ένα ρήγμα στην πλευρά ενός μονόγαστρου πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Συχνά χρησιμοποιείται ένας συντελεστής εκτόνωσης για να συμπεριλάβει την απώλεια λόγω τριβής στην ροή μέσω του στομίου. Ο Fay δεν περιλαμβάνει αυτόν τον συντελεστή, ο οποίος είναι ίσος με υποθετική τιμή 1.0 (καμία απώλεια λόγω τριβής). Αυτό το πρότυπο δεν λαμβάνει υπόψη τα διπλά τοιχώματα των LNG πλοίων, και επομένως μπορεί να υπερεκτιμήσει τον ρυθμό με τον οποίο το LNG θα διέρρει.

Το μοντέλο του Fay για τα ρήγματα κάτω από το επίπεδο του νερού της θάλασσας είναι μια ιδανική προσέγγιση στην οποία η διαφορά στην πυκνότητα των ρευστών αναγκάζει (1) το LNG να ρεύσει έξω από το ρήγμα προς την επιφάνεια νερού και (2) το νερό να ρεύσει μέσα στο σκάφος. Εντούτοις, αυτή η μέθοδος αγνοεί το γεγονός ότι το σημείο βρασμού του LNG είναι αρκετά κάτω από τη θερμοκρασία του νερού. Στην πραγματικότητα, το LNG θα ατμοποιούταν ακαριαία καθώς έβγαινε από την τρύπα και ερχόταν σε επαφή με το νερό, με πολύ γρήγορη ανάδυσή του στην επιφάνεια. Το νερό που θα εισχωρούσε στο σκάφος κατά πάσα πιθανότητα θα πάγωνε και θα επηρέαζε τον ρυθμό απελευθέρωσης του LNG.

Ο Lehr (2004) δεν παρουσιάζει ούτε χρησιμοποιεί μοντέλα για τον ρυθμό απελευθέρωσης του υγρού. Η μελέτη του ασχολείται με μια απλή στιγμιαία διαρροή 500m³ LNG.

Ο Quest (2001, 2003) με τη μελέτη του θεωρεί ρήγματα-τρύπες διαμέτρου 1m και 5m αλλά δεν περιγράφει τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τον ρυθμό ροής από αυτές.

10.2 ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΜΙΑΣ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Το LNG έχει μικρότερη πυκνότητα από το νερό και όταν διαρρέεται σε αυτό θα διαμορφώσει μια επιπλέουσα λίμνη που θα διαδοθεί και θα εξατμιστεί. Αυτό το τμήμα παρουσιάζει μια αξιολόγηση των μεθόδων για τον ρυθμό και την έκταση της εξάπλωσης της λίμνης LNG στο νερό.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ

Ο Fay (2003) παρουσιάζει ένα μοντέλο βασισμένο σε μια ισορροπία της ρευστής δύναμης αδράνειας και βαρύτητας. Αυτό το μοντέλο υποθέτει ότι η επιφάνεια του νερού είναι ήρεμη.

Ο Lehr (2004), όπως και ο Fay εφαρμόζει ένα μοντέλο βασισμένο σε μια ισορροπία της ρευστής δύναμης αδράνειας και βαρύτητας ~ το πρότυπο περιλαμβάνει εμπειρικές σταθερές, τις οποίες παίρνει από τον Briscoe (1980). Για τις μεγάλες διαρροές, ο Lehr επισημαίνει ότι η εξάπλωση μπορεί να γίνει ελεγχόμενη από μια ισορροπία των ιξωδών και των δυνάμεων της βαρύτητας. Εντούτοις, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος στον οποίο αυτό θα εμφανιζόταν θα ήταν πιθανώς μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο χρόνο καύσης για μια πυρκαγιά LNG λίμνης. Αυτό το μοντέλο υποθέτει ότι η επιφάνεια του νερού είναι ομαλή.

Ο Quest (2001, 2003) εφάρμοσε επίσης ένα μοντέλο για την εξάπλωση βασισμένο σε μια ισορροπία της ρευστής δύναμης αδράνειας και βαρύτητας. Επιπλέον, προσπάθησε να λάβει υπόψη τις επιδράσεις των κυμάτων. Τα κύματα προσεγγίστηκαν από μια κυκλοειδή συνάρτηση, και οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν για να εφαρμόσουν τις οριακές συνθήκες στο (βαρυτικό) μοντέλο εξάπλωσης. Η επίδραση αυτών των οριακών συνθηκών είναι ότι η λίμνη σταματά να εξαπλώνεται μόλις το ύψος του LNG πάνω από το επίπεδο του νερού πέσει κάτω από το 60% του ύψους κυμάτων. Μια διόρθωση έγινε επίσης για την αυξανόμενη περιοχή επιφάνειας ύδατος που προκαλούν τα κύματα, η οποία οδηγεί σε μια αύξηση της ροής εξάτμισης κατά 27%.

10.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΤΜΟΥ ΑΠΟ ΜΙΑ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Καθώς μια LNG λίμνη εξαπλώνεται στη επιφάνεια του νερού, η θερμότητα που μεταφέρεται από αυτό και από άλλες πηγές οδηγούν το υγρό στην εξάτμιση. Σε αυτό το κομμάτι περιλαμβάνονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ρυθμού εξάτμισης του LNG.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΑΤΜΟΠΟΙΗΣΗΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ

Ο Fay (2003) δεν εξετάζει την παραγωγή ατμού με λεπτομερή τρόπο, ενώ για τους υπολογισμούς του παραδείγματος του χρησιμοποιεί ένα ρυθμό οπισθοδρόμησης καύσης 8×10^{-4} m/s (ρυθμός εξάτμισης $0.34 \text{ kg/m}^2/\text{s}$) για τις πυρκαγιές της λίμνης. Αυτή η τιμή είναι υπολογισμένη με βάση την εξάτμιση που προκαλείται από τη μεταδιδόμενη θερμότητα της πυρκαγιάς, η οποία δίνει ένα ρυθμό οπισθοδρόμησης 1.9×10^{-4} m/s (ρυθμός εξάτμισης $0.080 \text{ kg/m}^2/\text{s}$), και από τη θερμότητα προερχόμενη από το νερό, που δίνει ένα ρυθμό οπισθοδρόμησης 5×10^{-4} έως 7×10^{-4} m/s (ρυθμός εξάτμισης 0.21 έως $0.30 \text{ kg/m}^2/\text{s}$).

Ο Lehr (2004) στη μελέτη του ασχολείται κυρίως με τις ενδεχόμενες πυρκαγιές μιας LNG λίμνης και παρέχει πληροφορίες μόνο για την εξάτμιση σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Ο Quest (2001, 2003) χρησιμοποίησε για τους υπολογισμούς του μια ροή θερμότητας προς το LNG 92 kW/m^2 και ένα ρυθμό εξάτμισης $0.18 \text{ kg/m}^2/\text{s}$. Όπως έχει αναφερθεί, προσπάθησε να συμπεριλάβει την επίδραση των κυμάτων στην παραγωγή ατμού προσεγγίζοντας τα κύματα σαν μια κυκλοειδή συνάρτηση. Στο μοντέλο εξάπλωσης χρησιμοποίησε οριοθετήσεις, κάτι που οδήγησε σε λίμνες με μικρότερη διάμετρο. Επίσης, έγινε μια ρύθμιση για την αυξανόμενη επιφάνεια του νερού, προκαλούμενη από τα κύματα, η οποία οδήγησε σε μια αύξηση του ρυθμού εξάτμισης κατά 27%

10.4 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΕΥΦΛΕΚΤΟΥ ΑΤΜΟΥ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΔΙΑΡΡΟΗ LNG

Εάν υγροποιημένο φυσικό αέριο διαρρέυσει στο νερό αλλά δεν αναφλεγεί αμέσως ή σύντομα, θα εξατμιστεί. Ο ατμός θα αναμιχτεί με τον αέρα και θα κινηθεί σύμφωνα με τους επικρατούντες ανέμους στην περιοχή του συμβάντος. Το προκύπτον σύννεφο ατμού μπορεί να προκαλέσει μια πυρκαγιά λάμψης αν αναφλεγεί πριν αραιωθεί κάτω από το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας (LFL). Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζονται οι διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση των αποστάσεων που τα σύννεφα ατμού μπορούν να φτάσουν.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΕΥΦΛΕΚΤΟΥ ΑΤΜΟΥ

Ούτε ο Fay (2003) αλλά ούτε και ο Lehr (2004) δεν ασχολούνται στη μελέτη τους με τη διασπορά του ατμού.

Ο Quest (2001) για να υπολογίσει την απόσταση έως το LFL, χρησιμοποίησε ένα λογισμικό πακέτο μοντελοποίησης της διασποράς, που πωλείται εμπορικά, το οποίο βασίζεται στο μοντέλο SLAB. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και το μοντέλο DEGADIS.

Για πυρκαγιές λάμψης, το επίπεδο ανησυχίας ορίζεται τυπικά είτε στο LFL, είτε στο 1/2 του LFL της ουσίας. Επομένως, η μοντελοποίηση των πυρκαγιών λάμψης είναι ουσιαστικά ένα θέμα ένα μοντελοποίησης της διασποράς. Είναι σαφές ότι για τις μεγάλες απελευθερώσεις LNG, οι επιδράσεις του πυκνού αερίου θα είναι σημαντικές και πρέπει να συμπεριληφθούν στο χρησιμοποιούμενο πρότυπο. Αρκετά τέτοια μοντέλα είναι διαθέσιμα σε μορφή ελεύθερου λογισμικού, συμπεριλαμβανομένου του DEGADIS, SLAB και HGSYSTEM. Επιπλέον, διάφορα εμπορικά πακέτα λογισμικού περιλαμβάνουν μοντέλα για τις επιδράσεις του πυκνού-αερίου. Για περισσότερες πληροφορίες, εξετάσεις και μελέτες επικύρωσης για τα διάφορα μοντέλα διασποράς έχουν πραγματοποιηθεί από ποικίλες οργανώσεις και οργανισμούς. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν τα EPA (1991) και το API (1992).

10.5 ΑΜΕΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΦΑΣΗ (RPT)

Μια άμεση μεταβατική φάση μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια μιας LNG διαρροής, όταν ένα τμήμα της LNG λίμνης μετατραπεί από υγρό σε ατμό, σχεδόν ακαριαία. Αυτή η εξάτμιση θα αποβάλει ατμό πολύ γρήγορα στο περιβάλλον και μπορεί να δημιουργήσει υπερπίεσεις. Επίσης, η εξάτμιση μπορεί να αυξήσει την απόσταση έως το LFL ή να επηρεάσει το μέγεθος της πυρκαγιάς της λίμνης. Η άμεση μεταβατική φάση είναι μια φυσική έκρηξη ενός υγρού, δεν περιλαμβάνει φωτιά ή άλλες χημικές αντιδράσεις, ενώ έχει εμφανιστεί μόνο σε δοκιμές LNG διαρροών στο νερό.

Ο Fay (2003), ο Lehr (2004) και ο Quest (2001) δεν αναφέρθηκαν σε άμεση μεταβατική φάση.

Η άμεση μεταβατική φάση (rapid phase transition) είναι ένα φαινόμενο που δεν έχει γίνει ακόμα πλήρως κατανοητό. Έχουν εμφανιστεί τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλες απελευθερώσεις LNG στο νερό. Το νερό είναι πολύ θερμό συγκριτικά με το LNG, το σημείο βρασμού του οποίου είναι στους -260 °F. Τυπικές τιμές θερμοκρασίας της θάλασσας κυμαίνονται από 30 °F έως 80 °F. Η μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δυο ρευστών οδηγεί σε μια πολύ γρήγορη εξάτμιση του υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Μερικές φορές, η RPT εμφανίζεται μετά από τη διαρροή, καθώς το LNG ατμοποιείται. Μερικοί έχουν υποθέσει ότι ο διαφορετικός βρασμός (δηλαδή αλλαγή στη σύνθεση καθώς το μεθάνιο βράζει πρώτα) μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην έναρξη RPT. Σε μερικά γεγονότα, περισσότερες από μια RPT έχουν εμφανιστεί κατά τη διάρκεια μιας απλής διαρροής.

Αν και ο φυσικός μηχανισμός της άμεσης μεταβατικής φάσης δεν γίνεται πλήρως κατανοητός, εάν διαδοθεί αρκετά γρήγορα, ένα κύμα υπερπίεσης μπορεί να διαμορφωθεί. Σε μερικές υποθέσεις, οι υπερπίεσεις που παρήχθησαν ήταν αρκετά ισχυρές να βλάψουν τον εξοπλισμό δοκιμής. Τα μεγέθη των γεγονότων υπερπίεσης είναι γενικά μικρά, με μια μέγιστη ισοδυναμία TNT που υπολογίζεται σε μερικές λίβρες TNT. Ένα τέτοιο μικρό γεγονός υπερπίεσης δεν αναμένεται να προκαλέσει σημαντική ζημία σε ένα LNG σκάφος. Εντούτοις, η RPT μπορεί να αυξήσει τον ρυθμό εξάπλωσης της LNG λίμνης καθώς και τον ρυθμό εξάτμισης της.

Ο Atallah (1997) ερεύνησε τη βιβλιογραφία σχετικά με την RPT και εξέτασε τις διαθέσιμες πειραματικές και θεωρητικές μελέτες και παρέχει μια καλή περίληψη για το τι είναι, μέχρι σήμερα, γνωστό για την RPT:

1. Η άμεση μεταβατική φάση έχει παρατηρηθεί σε πολλά πειράματα και δοκιμές διαρροών LNG στο νερό.
2. Η αύξηση του ρυθμού απελευθέρωσης από τη δεξαμενή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης μιας έκρηξης.
3. Η μεγαλύτερη έκρηξη που παρατηρήθηκε σε δοκιμή είχε ένταση ισοδύναμη με μια έκρηξη 5.5 kg TNT.
4. Η RPT δεν εμφανίστηκε σε όλες τις δοκιμές διαρροής.
5. Καμία παρούσα θεωρία για την άμεση μεταβατική φάση δεν μπορεί να συνυπολογίσει όλα τα στοιχεία που παρατηρούνται.
6. Δεν υπάρχει καμία υπάρχουσα θεωρητική μέθοδος για να προβλέψει τη δριμύτητα ενός γεγονότος RPT σε μια απελευθέρωση LNG από ένα δεξαμενόπλοιο.

10.6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΛΙΜΝΗΣ

Μια πυρκαγιά λίμνης μπορεί να εμφανιστεί αν LNG διαρρεύσει στο νερό, δημιουργηθεί μια λίμνη και αναφλεγεί ο ατμός που αναπτύσσεται. Η πυρκαγιά πάνω από τη λίμνη συνεχίζει να τροφοδοτείται από την εξάτμιση της. Οι φλόγες που προκύπτουν από την πυρκαγιά εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, η οποία μπορεί να τραυματίσει τους ανθρώπους και να προκαλέσει δομικές ζημιές. Στο νερό, το LNG θα εξαπλωθεί και θα καεί γρήγορα, έτσι η πυρκαγιά θα τείνει να σταματήσει σύντομα μετά από το τέλος της διαρροής, όπου θα μειωθούν αισθητά και οι θερμικοί κίνδυνοι ακτινοβολίας. Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζετε μια αξιολόγηση των μεθόδων για την εκτίμηση των αποστάσεων στις οποίες τα επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας είναι ανησυχητικά.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΛΙΜΝΗΣ

Ο Fay (2003) για τους υπολογισμούς του χρησιμοποιεί ένα μοντέλο σημειακής πηγής. Σε αυτό, η ενέργεια που παράγεται από την καύση υποτίθεται ότι προήλθε από ένα απλό σημείο στο κέντρο της πυρκαγιάς. Μια βασική παράμετρος για αυτό το πρότυπο είναι το μέρος της θερμότητας που εκπέμπεται ως θερμική ακτινοβολία. Όπως ο Fay επισημαίνει σωστά, αυτό το

μοντέλο σημειακής πηγής εφαρμόζεται μόνο σε μεγάλες αποστάσεις από την πυρκαγιά. Ο ρυθμός οπισθοδρόμησης καύσης για τις πυρκαγιές της λίμνης λαμβάνεται ως 8×10^{-4} m/s (ρυθμός εξάτμισης $0.34 \text{ kg/m}^2/\text{s}$). Αυτή η τιμή είναι υπολογισμένη με βάση τη συνεισφορά στην εξάτμιση της θερμότητας της πυρκαγιάς, που δίνει ένα ρυθμό οπισθοδρόμησης 1.9×10^{-4} m/s (ρυθμό εξάτμισης $0.080 \text{ kg/m}^2/\text{s}$), και της θερμότητας από το νερό, που δίνει ένα ρυθμό οπισθοδρόμησης 5×10^{-4} έως 7×10^{-4} m/s (ρυθμός εξάτμισης 0.21 έως $0.30 \text{ kg/m}^2/\text{s}$). Το μέρος της θερμότητας που εκπέμπεται ως θερμική ακτινοβολία λαμβάνεται ως 0.15.

Ο Lehr (2004) χρησιμοποιεί το μοντέλο συμπαγούς φλόγας. Η πυρκαγιά προσομοιώνεται ως κύλινδρος, και χρησιμοποιείται μια μορφή της εξίσωσης του Thomas (Brown, 1974) για να υπολογίσει το ύψος των φλογών (κύλινδρος). Στη μελέτη του ο Lehr δηλώνει ότι τα πειράματα σχετικά με πυρκαγιές LNG λιμνών στο νερό παρουσιάζουν ρυθμό οπισθοδρόμησης καύσης που κυμαίνονται από 4×10^{-4} έως 1×10^{-3} m/s (ρυθμό εξάτμισης 0.17 έως $0.42 \text{ kg/m}^2/\text{s}$). Επιπλέον, για τις μεγαλύτερες συνεχείς απελευθερώσεις, ο ρυθμός καύσης έχει υπολογιστεί ως 2.5×10^{-4} m/s (ρυθμός εξάτμισης $0.11 \text{ kg/m}^2/\text{s}$).

Ο Quest (2001) επίσης υιοθετεί το μοντέλο συμπαγούς φλόγας. Σε αυτήν όμως την περίπτωση η πυρκαγιά προσομοιώνεται σαν ένας κάθετος ελλειπτικός κύλινδρος με κλίση. Αυτό το ελλειπτικό σχήμα και η κλίση χρησιμοποιούνται για να εξεταστεί η επίδραση του αέρα στη πυρκαγιά, η οποία μπορεί να αυξήσει την απόσταση όπου φτάνει η βλαβερή θερμική ακτινοβολία. Η συνάρτηση του Thomas (1965) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μήκους της φλόγας. Η κλίση της φλόγας υπολογίζεται βάσει μιας εμπειρικής σχέσης από τον Walker (1970), ενώ η έλξη των φλογών (που αυξάνει τις διαστάσεις στη βάση της φλόγας σύμφωνα με τον άνεμο) υπολογίζεται βάσει της μελέτης του Moorhouse (1982). Ο Quest, επίσης, χωρίζει τη φλόγα σε δυο ζώνες: μια καθαρή ζώνη και μια καπνώδη ζώνη, στην οποία καπνώδη ένα τμήμα της φλόγας κρύβεται από τον καπνό. Το μήκος της καθαρής ζώνης βρίσκεται από τη μελέτη του Prichard (1992). Για την ροή επιφάνειας υπάρχει μια εξίσωση που εξαρτάται από τη μέγιστη ροή επιφάνειας, ένα συντελεστή εξάλειψης και τη διάμετρο της λίμνης. Καμία όμως πληροφορία δεν δίνεται για τις τιμές που χρησιμοποιούνται για τη μέγιστη ροή επιφάνειας ή το συντελεστή εξάλειψης. Στην καπνώδη ζώνη, η ροή επιφάνειας για τις καπνώδεις περιοχές λαμβάνεται ίση με 20 kW/m^2 , και οι καθαρές περιοχές θεωρούνται ότι έχουν την ίδια ροή με αυτή που έχει η καθαρή ζώνη. Το μέρος του καπνού στη καπνώδη ζώνη θεωρείται το 10%.

11. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο τμήμα αυτό παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι μελέτες/μοντελοποιήσεις που έχουν γίνει σχετικά με τις μεγάλες διαρροές υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό, από μια δεξαμενή ενός υγραεριοφόρου. Οι μελέτες αυτές είναι τέσσερις και αναφέρονται σε θέματα όπως η διάδοση του υγρού από τη δεξαμενή, η λίμνη που σχηματίζεται, η εξάπλωση της, η διασπορά του σύννεφου LNG ατμού στην ατμόσφαιρά κ.α. Κάθε μια από αυτές έχει διαφορετική δομή, ενώ τα θέματα που θίγουν μπορεί να διαφέρουν. Για παράδειγμα μια μελέτη συμπεριλαμβάνει, στα θέματα που ασχολείται, την επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας στον άνθρωπο, ενώ μια άλλη όχι, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στον τρόπο εξάπλωσης της LNG λίμνης. Οι διαθέσιμες πληροφορίες, επίσης, για κάθε ένα από αυτά τα τέσσερα μοντέλα δεν είναι και οι καλύτερες δυνατές. Έτσι, σε ένα μοντέλο μπορεί να γνωρίζουμε ακριβώς τις μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν και τις υποθέσεις που έγιναν, ενώ σε κάποιο άλλο να είναι διαθέσιμες μόνο οι αρχικές συνθήκες. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι τα τελικά αποτελέσματα κάθε μελετητή και των μοντέλων του, είναι αυτά που θα μας βοηθήσουν στη σύγκριση και στα συμπεράσματα που θα καταλήξουμε στη συνέχεια. Οι μελέτες αυτές είναι:

- Lehr, W. and Simecek-Beatty, D. “Comparison of Hypothetical LNG and Fuel Oil Fires on Water.” [Lehr and Simecek-Beatty 2003].
- Fay, J.A. “Model of spills and fires from LNG and oil tankers.” [Fay 2003].
- Quest Consultants, Inc., “Modeling LNG Spills in Boston Harbor.” [Quest 2003].
- “Liquefied Natural Gas in Vallejo: Health and Safety Issues.” [Koopman 2004].

11.1 Lehr and Simecek-Beatty 2003

Στη μελέτη του ο Lehr συγκρίνει τις ομοιότητες και τις διαφορές μεταξύ, τυχαίων απελευθερώσεων από ένα πλοίο, παρόμοιων ποσοτήτων υγροποιημένου φυσικού αερίου και πετρελαίου σχετικά με την εξάπλωση και την συμπεριφορά τους σε πιθανή πυρκαγιά λίμνης.

11.1.1 Διάδοση

Ο Lehr, για τον υπολογισμό της διάδοσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου, από το ρήγμα της δεξαμενής στο νερό, καθορίζει την μειωμένη σταθερά βαρύτητας g' ως εξής:

$$g' = g \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_w} \right) \quad (1)$$

Όπου ρ_1 και ρ_w η πυκνότητα του πετρελαίου και του νερού αντίστοιχα. Χρησιμοποιεί τις τυπικές υποθέσεις σχετικά με την αδρανή διάδοση, σύμφωνα με τις οποίες το υγρό εξαπλώνεται ακτινωτά και το πάχος του στρώματος του μειώνεται σταδιακά από το κέντρο προς τα άκρα. Εάν

r είναι το άκρο αυτό και h το πάχος στο κέντρο, η ακτινωτή επιτάχυνση της άκρης αγνοώντας την απώλεια μάζας από την εξάτμιση ή τη καύση λόγω πυρκαγιάς, είναι:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -\varepsilon g' \frac{h}{r} \quad (2)$$

Η παράμετρος ε καθορίζεται συνήθως εμπειρικά, ενώ οι τιμές τις κυμαίνονται από 1.33 έως 2. Ο Serag-Eldin προσθέτοντας έναν ακόμα όρο στο δεξιό μέρος της σχέσης (2) για τις συνεχόμενης διάρκειας διαρροές, δίνει ότι:

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{\varepsilon g' h} \quad (3)$$

Αυτή η σχέση μπορεί να ενσωματωθεί για να παραγάγει τους τύπους βαρύτητας-αδράνειας του Fay σχετικά με στιγμιαίες διαρροές όγκου V_0 , όπου:

$$r = \sqrt{t \sqrt{k_1 \varepsilon g' V_0}} \quad (4)$$

ενώ για ένα σταθερό ρυθμό διαρροής, με όγκο V_0' :

$$r = \sqrt[4]{t \sqrt{k_2 \varepsilon g' V_0'}} \quad (5)$$

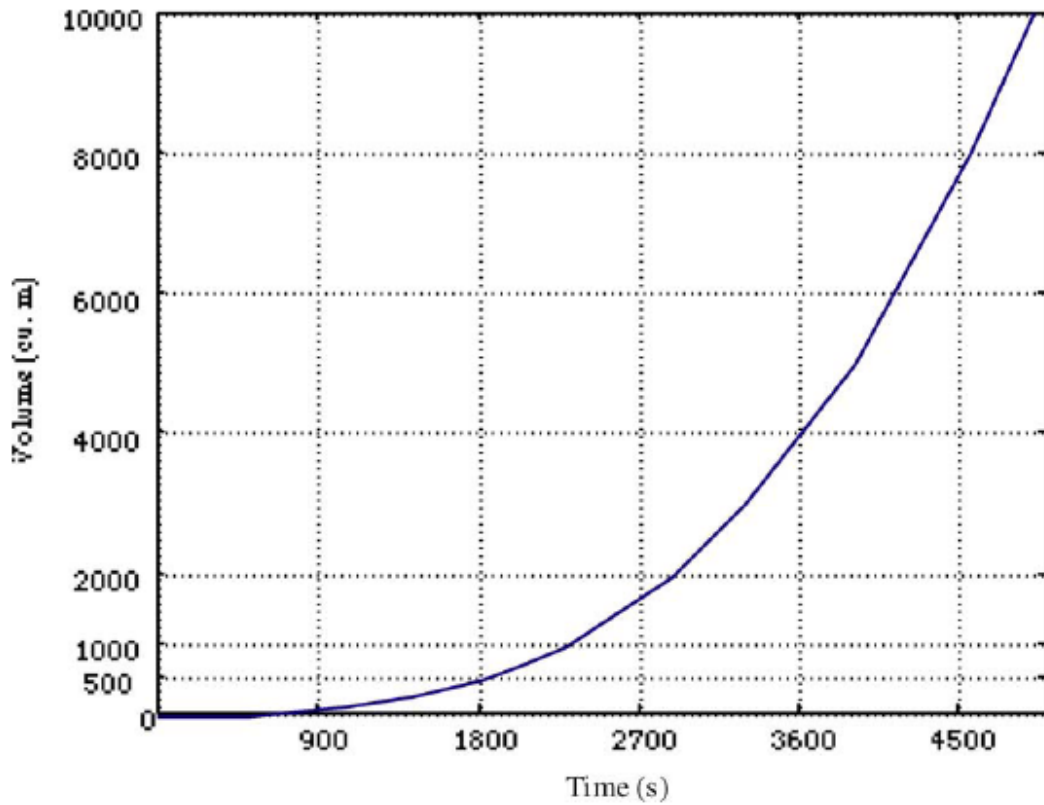
όπου $k_1=4/\pi$ και $k_2=9/16\pi$ βασισμένα σε γεωμετρικές εκτιμήσεις.

Για μεγαλύτερες διαρροές μπορεί η εξάπλωση να μεταβεί από τη φάση βαρύτητας-αδράνειας στη φάση βαρύτητας-ιξώδους. Για μια στιγμιαία διαρροή αυτός ο χρόνος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$t = k_3 \left(\frac{V_0}{g' v_w} \right)^{1/3} \quad (6)$$

όπου v_w είναι το κινηματική ιξώδες του νερού και $k_3 = 2.6$, εάν όλοι οι υπόλοιποι όροι εκφράζονται σε μονάδες MKS.

Για μια τυπική διαρροή 500m^3 καυσίμου diesel, η μετάβαση από τη μια φάση στην άλλη είναι περίπου 30 λεπτά. Για τη διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου ο χρόνος αυτός είναι λίγο μικρότερος. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα διάγραμμα του χρόνου αυτού για διαρροή diesel.



Σχήμα 17. Ρυθμός εκροής υγρού φορτίου.

Αυτές οι τιμές του χρόνου μετάβασης είναι μεγαλύτεροι από τους αναμενόμενους χρόνους καύσης για στιγμιαίες διαρροές. Κατά συνέπεια, εάν είτε μια διαρροή πετρελαίου είτε υγροποιημένου φυσικού αερίου συνοδευτεί αμέσως από μια ικανοποιητική πηγή ανάφλεξης και μια επακόλουθη πυρκαγιά λίμνης, είναι αμφίβολο εάν θα έχουμε τη μετάβαση από τη μια φάση εξάπλωσης στην άλλη. Αυτό μπορεί να μη συμβεί εάν εμφανιστεί ανάφλεξη καθυστερημένα. Η εξάπλωση μπορεί να συνεχιστεί, είτε έως ότου γίνει η μετάβαση στη φάση εξάπλωσης έντασης – ιξώδους είτε όταν το πάχος της λίμνης φτάσει σε μια ελάχιστη τιμή. Ο Dodge (1983) προτείνει ότι η εξάπλωση σταματάει όταν το παχύ τμήμα της λίμνης αποκτήσει πάχος 0.1 mm.

Ο Opschoor (1977) βασισμένος σε προηγούμενες μελέτες, συστήνει ένα μεγαλύτερο μέσο ελάχιστο πάχος των 0.17cm της LNG λίμνης. Σύμφωνα με τις σχέσεις (4) και (6), το πάχος μιας στιγμιαίας διαρροής LNG θα φτάσει στο ελάχιστο περίπου στη στιγμή της μετάβασης, εάν η αρχική ποσότητα που του υγρού είναι 200m³. Αυτό, όμως, δεν περιλαμβάνει την απώλεια μάζας λόγω της εξάτμισης, που είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας σε τέτοιου είδους διαρροές.

Εάν η διαρροή συνοδευτεί και από άμεση ανάφλεξη του απελευθερωμένου υγρού, τότε ο όγκος V, της λίμνης θα διαφέρει ανάλογα με το χρόνο σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\frac{dV}{dt} \equiv \dot{V} = \dot{V}_0 - \dot{h}A \quad (7)$$

Με A την επιφάνεια της διαρροής και h' τον ρυθμό καύσης. Πειράματα με πυρκαγιές λιμνών LNG στο νερό δείχνουν ότι ο ρυθμός καύσης κυμαίνεται από 0.4 έως 1.0mm/s. Για μεγαλύτερες και συνεχείς διαρροές, ο ρυθμός καύσης υπολογίζεται στα 0.25mm/s. Ο λόγος της μείωσης αυτής είναι πιθανόν η ελλιπής μίξη με τον αέρα.

Αν και το πάχος της λίμνης δεν είναι ομοιόμορφο παντού, οι διαφορές στο πάχος είναι μικρότερες συγκριτικά με την οριζόντια κλίμακα της. Εάν θεωρηθεί κυκλική εξάπλωση, $V=hA=h\pi r^2$, και η σχέση (3) μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τη μεταβολή της επιφάνειας αντί της αλλαγής της ακτίνας. Διαφοροποιώντας τη σχέση (7) και εισάγοντας τον ρυθμό αύξησης της επιφάνειας στις δυο προκύπτουσες σχέσεις, έχουμε άλλη μια σχέση για τον όγκο του στρώματος της λίμνης:

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -2\dot{h}\sqrt{\varepsilon\pi g'V} + \ddot{V}_0 \quad (8)$$

όπου V_0'' είναι ο ρυθμός αλλαγής της πηγής διαρροής, η οποία θεωρείται αμελητέα. Από τη σχέση (8) προκύπτει:

$$\dot{V}_0^2 - \dot{V}^2 = \frac{8}{3}\dot{h}\sqrt{\varepsilon\pi g'}(V^{3/2} - V_0^{3/2}) \quad (9)$$

Για μια στιγμιαία διαρροή, ο μεγαλύτερος όγκος LNG στο νερό θα υπάρχει αμέσως μετά το τέλος του γεγονότος της διαρροής. Εάν η διαρροή είναι μεγάλης διάρκειας και συνεχόμενη, ο όγκος του υγρού στο νερό θα αυξάνεται έως ότου το ποσοστό που καίγεται εξισωθεί με αυτό που απελευθερώνεται. Ο μέγιστος όγκος υγρού στο νερό για συνεχόμενη διαρροή βρίσκεται όταν $\dot{V}'=0$ στη σχέση (9). Αυτό παράγει ένα μέγιστο όγκο V_{\max} ίσο με:

$$V_{\max} = \left(\frac{3}{8\dot{h}\sqrt{\varepsilon\pi g'}} \dot{V}_0^2 \right)^{2/3} \quad (10)$$

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ο αναμενόμενος μέγιστος όγκος συναρτήσει του ρυθμού διαρροής για μια συνεχόμενη απελευθέρωση.

Ο Orpschoor (1977) παρέχει την παρακάτω σχέση για την μέγιστη επιφάνεια σε ακαριαία διαρροή. Εξισώνοντας το \dot{V}' στις σχέσεις (7) και (9) έχουμε:

$$A_{\max} = \frac{1}{9\dot{h}^2} \left[\sqrt{16\varepsilon\pi g'h_{\min}^3 + 18\dot{h}\dot{V}_0} - 4\sqrt{\varepsilon\pi g'h_{\min}^3} \right]^2 \quad (11)$$

Ενώ η τελική επιφάνεια είναι:

$$A_f = \frac{\dot{V}_0}{\dot{h}} \quad (12)$$

11.1.2 Εξάτμιση

Ακόμα και αν το LNG που διαρρέει δεν αναφλεγεί αμέσως, το υγρό θα υποστεί εξάτμιση. Το LNG συνήθως αποτελείται από 95% μεθάνιο και ένα μίγμα αιθανίου και άλλων βαρύτερων υδρογονανθράκων. Από τη στιγμή που το σημείο βρασμού του μεθανίου είναι στους $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, θα βράσει αμέσως μόλις έρθει σε επαφή με το νερό. Υποθέτοντας ότι το σώμα του νερού είναι αρκετά μεγάλο ώστε να ενεργεί σαν μια απέραντη πηγή θερμότητας, η ενδιάμεση αναταραχή μεταξύ του LNG και του νερού είναι ικανή να διατηρεί τη θερμοκρασιακή διαφορά τους σταθερή. Ο ρυθμός μαζικής εξάτμισης ανά μονάδα επιφάνειας είναι:

$$\dot{m}_{\text{evap}} = \frac{h_e \Delta T}{L} \quad (13)$$

όπου L είναι η συγκεκριμένη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, h_e ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του LNG και του νερού. Ο Orpschoor προτείνει ένα ρυθμό μαζικής εξάτμισης της τάξης των $0.05\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$. Η διάλυση του σύννεφου ατμού, που προκύπτει από την εξάτμιση, εξαρτάται από τις συνθήκες της ατμόσφαιρας. Έτσι, καθώς η εξάτμιση εξελίσσεται στη λίμνη θα κυριαρχεί το αιθάνιο, καθώς το μεθάνιο είναι αυτό που εξατμίζεται πρώτο.

11.1.3 Παραγωγή ισχύος και ατμού

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως σχετικά με τις μεγάλες πυρκαγιές είναι το μοντέλο συμπαγούς φλόγας. Σύμφωνα με αυτό η φλόγα είναι κυλινδρικής μορφής ισοδύναμης επιφάνειας με την κυκλική λίμνη, ενώ ακτινοβολεί ομοιόμορφα γύρω από το κύλινδρο που σχηματίζει. Εξαιτίας του μεγέθους τους, οι πυρκαγιές μεγάλων διαρροών θεωρούνται οπτικά παχίες. Η θερμική ακτινοβολία, I , είναι παράγωγο της μέσης ισχύος της επιφάνειας της φλόγας, E_{av} , ενός ατμοσφαιρικού παράγοντα μεταβασιμότητας, τ , και ενός γεωμετρικού παράγοντα F .

$$I = E_{\text{av}} F \tau \quad (14)$$

Ο παράγοντας F υπολογίζεται κάνοντας την υπόθεση ότι η φλόγα από την πυρκαγιά της λίμνης σχηματίζεται σαν ένας κάθετος κύλινδρος, με το ύψος φλόγας L_f να αντιπροσωπεύει το ύψος του κυλίνδρου. Το ύψος αυτό συνήθως βρίσκεται από τη σχέση του Thomas (1974) :

$$L_f = C_{\text{Tr}} \left(\frac{\dot{h} \rho_l}{\rho_{\text{air}} \sqrt{2 g r}} \right)^{0.61} \quad (17)$$

όπου ρ_{air} είναι η πυκνότητα του αέρα. Ο όρος C_{Tr} εκφράζεται, ορισμένες φορές, ως μια αδύναμη συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα. Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι ο συσχετισμός στη σχέση (17) είναι βασισμένος σε πυρκαγιές λιμνών μικρής κλίμακας.

Κατά την καύση του LNG, παράγονται ελάχιστες ποσότητες καπνού, αν και στις μεγάλες πυρκαγιές LNG η ποσότητα αυτή είναι περισσότερο ορατή. Η μέγιστη ισχύς που απελευθερώνεται αναφέρεται να είναι 200 με 270 kW/m^2 .

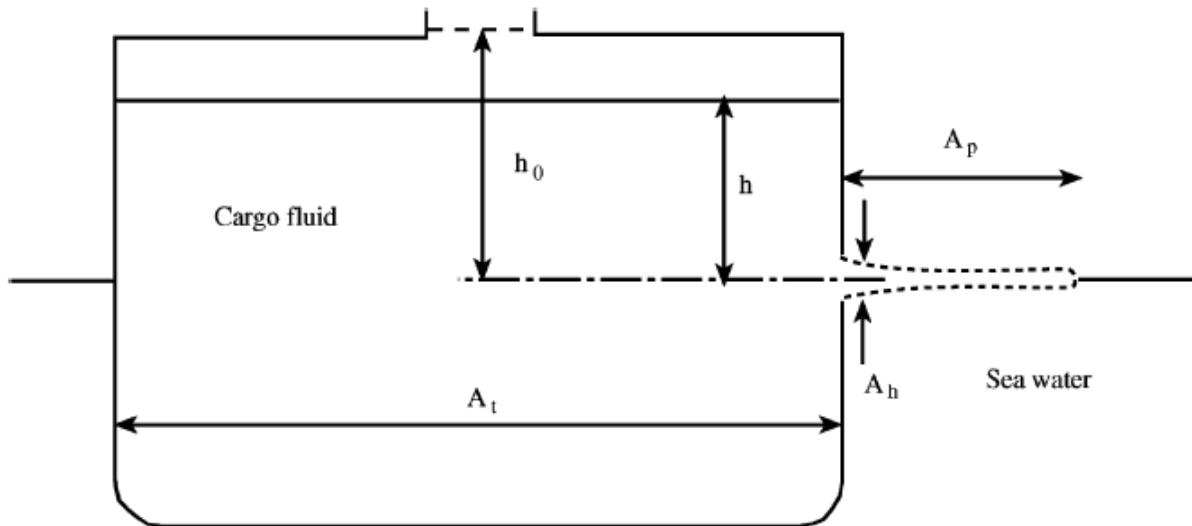
Η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια τέτοια πυρκαγιά σε ένα αντικείμενο, μπορεί να μειωθεί αρκετά λόγω της απορρόφησης και της διασποράς από την ατμόσφαιρα. Βασισμένοι σε μια μελέτη σχετικά με την θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την έκρηξη μιας πυρηνικής βόμβας, οι Glasstone και Dolan (1984) δείχνουν την μείωση από την ατμόσφαιρα, τ , λόγω της απορρόφησης ως:

$$\tau = \exp(-kx) \quad (18)$$

όπου x είναι η απόσταση της πυρκαγιάς από το αντικείμενο και k ένας συντελεστής απορρόφησης

11.2 Fay 2003

Σύμφωνα με τον Fay, ο τρόπος με τον οποίο διαρρέει το υγρό φορτίο από τη δεξαμενή συγκράτησης του, μέσω ενός ρήγματος, στο επίπεδο της στάθμης του νερού της θάλασσας, φαίνεται στο Σχήμα 18. Η περιοχή του ρήγματος ονομάζεται A_h ενώ η επιφάνεια του υγροποιημένου φυσικού αερίου μέσα στη δεξαμενή είναι A_t . Η κάθετη απόσταση μεταξύ των δυο αυτών επιφανειών είναι η h και είναι η απόσταση από την οποία εξαρτάται η ταχύτητα διαρροής τους υγρού. Η περιοχή που καλύπτει η σχηματιζόμενη λίμνη έξω από το πλοίο είναι η A_p , το μέγεθος της οποίας είναι συνάρτηση του χρόνου, ανάλογα με την εξάπλωση του υγρού φορτίου που διαρρέει από τη δεξαμενή.



Σχήμα 18. Διάταξη δεξαμενής με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διαρροής

Υπάρχει ένα χρονικό διάστημα t_d που χαρακτηρίζει τη διάρκεια της διαρροής από το ρήγμα. Το μέγεθος της ταχύτητας εκροής από αυτό το ρήγμα είναι $\sqrt{g \cdot h_0}$, ενώ το γινόμενο του ρυθμού του όγκου που διαρρέει $\sqrt{g \cdot h_0} \cdot A_h$ με το χρονικό διάστημα t_d πρέπει να ισούται με τον συνολικό όγκο $A_t h_0$ (όπου h_0 είναι η αρχική τιμή του h) που απελευθερώνεται, δίνοντας:

$$t_d \sim \frac{A_t h_0}{\sqrt{g h_0} A_h} = \frac{A_t}{A_h} \sqrt{\frac{h_0}{g}} \quad (19)$$

Η εξάτμιση της σχηματιζόμενης λίμνης που προκαλείται, είτε από τη μεταφορά θερμότητας από το νερό, είτε από μια ενδεχόμενη πυρκαγιά, δεν μπορεί να διαρκέσει λιγότερο από t_d .

Ο ρυθμός με τον οποίο εξατμίζεται η λίμνη χαρακτηρίζεται από μια ταχύτητα οπισθοδρόμησης w , που είναι και ο ρυθμός που χάνεται ο όγκος λόγω εξάτμισης ανά μονάδα επιφάνειας. Η ταχύτητα οπισθοδρόμησης είναι μια συνάρτηση της διαδικασίας εξάτμισης του υγρού, της μεταφοράς θερμότητας (από τα νερά ή/και από πυρκαγιά) και των ιδιοτήτων του ρευστού. Καθορίζει το μέγιστο μέγεθος της επιφάνειας της λίμνης, το οποίο θα αυξανόταν κατά αόριστο τρόπο αν δεν υπήρχε.

Μπορούμε να διακρίνουμε δυο περιοριστικές περιπτώσεις για το μέγεθος της λίμνης. Εάν η περιοχή του ρήγματος A_h είναι πολύ μικρή, θα εμφανιστεί μια σταθερή διαδικασία εξάτμισης, στην οποία ο ρυθμός εξάτμισης της λίμνης θα ισούται με τον ρυθμό εκροής του υγροποιημένου φυσικού αερίου από το ρήγμα. Σε αυτή την περίπτωση, η χρονική διάρκεια σχηματισμού της λίμνης και ολικής εξαφάνισής της θα είναι ίση με το χρονικό διάστημα t_d . Αντιθέτως, εάν η επιφάνεια του ρήγματος A_h είναι πολύ μεγάλη, η λίμνη που θα σχηματιστεί θα είναι από μια ακαριαία απελευθέρωση και θα επιμένει για ένα πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από το t_d , με σκοπό να εξατμιστεί όλο το υγρό που διέρρευσε.

Η μέγιστη επιφάνεια της λίμνης για την περίπτωση της μικρής επιφάνειας ρήγματος μπορεί να βρεθεί εξισώνοντας το ρυθμό του όγκου που απελευθερώνεται με το ρυθμό εξάτμισης:

$$A_p \sim \frac{\sqrt{g h_0} A_h}{w} \quad (20)$$

Επειδή το w είναι πάντα πολύ μικρότερο από το $\sqrt{g \cdot h_0}$ για πρακτικούς λόγους, η επιφάνεια της λίμνης είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την επιφάνεια του ρήγματος.

Ο υπολογισμός της αντίστοιχης περιόδου εξάτμισης και επιφάνειας λίμνης, για τα μεγάλα ρήγματα, είναι πολύ πολύπλοκος λόγω δυναμικής εξάπλωσης των λιμνών. Η επιφάνεια της λίμνης A_p , που εμφανίζεται σε μια ακαριαία διαρροή όγκου $A_t h_0$, μετά από χρόνο t_v είναι περίπου:

$$A_p \sim (\sqrt{g \Delta (A_t h_0)}) t_v \quad (21)$$

όπου

$$\Delta \equiv \frac{\rho_w - \rho_f}{\rho_w} \quad (22)$$

ρ_w και ρ_f οι πυκνότητες του θαλασσινού νερού και του υγρού, αντίστοιχα. Εξισώνοντας την απώλεια του όγκου από τη λίμνη λόγω εξάτμισης σε χρόνο t_v με το συνολικό όγκο που διέρρευσε έχουμε ότι:

$$A_p w t_v \sim h_0 A_t \quad (23)$$

Λύνοντας τις παραπάνω δυο εξισώσεις βρίσκουμε για τον χρόνο εξάτμισης και την επιφάνεια της λίμνης ότι:

$$t_v \sim \frac{(A_t h_0)^{1/4}}{w^{1/2} (g \Delta)^{1/4}} \quad (24)$$

$$A_p \sim \frac{(A_t h_0)^{3/4} (g \Delta)^{1/4}}{w^{1/2}} \quad (25)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται η διαφορετική συμπεριφορά του σχηματισμού της λίμνης και της ολοκληρωτικής εξαφάνισης τους για μικρές και μεγάλες A_h . Για μικρές A_h η επιφάνεια της λίμνης είναι μέγιστη στην αρχή της διαρροής, ενώ μειώνεται σε μέγεθος ανάλογα με το ρυθμό εκροής και το ρυθμό που εξαφανίζεται κατά τη διάρκεια της απελευθέρωσης. Η μέγιστη περιοχή της λίμνης είναι ανάλογη με το A_h και ο ρυθμός εξάτμισης της είναι αντιστρόφως ανάλογος με το A_h . Σε αντίθεση, για μεγάλες επιφάνειες ρηγμάτων A_h , το μέγεθος της λίμνης μεγαλώνει κατά τη διάρκεια της απελευθέρωσης, φτάνοντας σε μια μέγιστη τιμή στο τέλος της περιόδου εξάτμισης της (σχέση 25). Σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος εξάτμισης αλλά και η μεγιστοποίηση του μεγέθους είναι ανεξάρτητα από το μέγεθος του ρήγματος A_h , με την προϋπόθεση ότι είναι αρκετά μεγάλα. Τέλος, οι μικρές και οι μεγάλες επιφάνειες A_h δίνουν τις ίδιες τιμές για τα A_p και t_v όταν η A_h είναι:

$$A_h \sim A_t^{3/4} w^{1/2} \Delta^{1/4} \left(\frac{h_0}{g} \right)^{1/4} \quad (26)$$

Αυτή είναι η τιμή του A_h που καθορίζει πότε το A_h είναι μικρό η μεγάλο. Θα φανεί, στη συνέχεια, ότι ο λόγος των δυο μερών της παραπάνω εξίσωσης, είναι μια παράμετρος στη ακριβή περιγραφή της συμπεριφοράς της λίμνης.

11.2.1 Αναλυτικό μοντέλο

Για την ανάπτυξη ενός πιο αναλυτικού μοντέλου σχετικά με τη διαρροή και τη συμπεριφορά της λίμνης, ο Fay θεωρεί ότι η απελευθέρωση του υγρού γίνεται από ένα ρήγμα περιοχής A_h . Εξισώνοντας το ρυθμό απώλειας του όγκου του φορτίου με τον ογκομετρικό ρυθμό εκροής έχουμε ότι:

$$-\left(\frac{d(hA_t)}{dt} \right) = \sqrt{2gh} A_h \quad (27)$$

και ολοκληρώνοντας έχουμε:

$$h = \begin{cases} \left(\sqrt{h_0} - \sqrt{\frac{g}{2}} \frac{A_h}{A_t} t \right)^2, & \text{if } 0 \leq t \leq \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \left(\frac{A_t}{A_h} \right) \\ 0, & \text{if } t \geq \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \left(\frac{A_t}{A_h} \right) \end{cases} \quad (28)$$

Στη συνέχεια καθορίζει το ρυθμό αλλαγής του όγκου V_p του ρευστού της λίμνης, σαν το αποτέλεσμα της αφαίρεσης της εξάτμισης της επιφάνειας της λίμνης από την εκροή στο ρήγμα:

$$\frac{dV_p}{dt} = \sqrt{2gh}A_h - wA_p \quad (29)$$

Ο ρυθμός εξάπλωσης της λίμνης, η οποία θεωρείται ότι έχει σχήμα ημικυκλίου, ακτίνα R και επιφάνεια $A_p = \pi R^2/2$ είναι:

$$\frac{dR}{dt} = \beta \left(g \Delta \frac{V_p}{\pi R^2/2} \right)^{1/2} \quad (30)$$

όπου β είναι μια εμπειρική σταθερά και ο παράγοντας $V_p/(\pi R^2/2)$ είναι το μέσο πάχος της λίμνης. Αυτό μπορεί να πάρει την εξής μορφή:

$$\frac{dA_p}{dt} = \frac{d(\pi R^2/2)}{dt} = \beta \sqrt{2\pi g \Delta V_p} \quad (31)$$

Οι εξισώσεις (28), (29) και (31) καθορίζουν την χρονική διάρκεια της εκροής του υγρού από το ρήγμα του πλοίου, καθώς και τον σχηματισμό και την εξάτμιση της λίμνης. Η χρονική αυτή διάρκεια εξαρτάται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σημαντικά από το μέγεθος της A_h μέσω της σχέσης της με άλλες παραμέτρους της ροής. Για την απλοποίηση και την διευκρίνιση της σχέσης αυτής, είναι χρήσιμο να εκφραστούν οι παραπάνω εξισώσεις σε μια αδιάστατη μορφή, που παρουσιάζεται παρακάτω:

$$t^* \equiv \left(\frac{A_h}{A_t} \right) \sqrt{\frac{g}{h_0}} t, \quad v^* \equiv \frac{V_p}{h_0 A_t}, \quad a^* \equiv \frac{w A_p}{A_h \sqrt{g h_0}}, \quad h^* \equiv \frac{h}{h_0} \quad (32)$$

Στις εξισώσεις αυτές έχουν εισαχθεί τα μεγέθη του χρόνου, του όγκου, της επιφάνειας και κλίμακες μήκους ($\sqrt{h_0/g}$, A_t , $A_h h_0$, $A_h \sqrt{h_0 g}/w$ και h_0 για τον καθορισμό των αδιάστατων μεταβλητών. Έτσι από τις εξισώσεις (28), (29) και (31) έχουμε:

$$h^* = \begin{cases} \left(1 - \frac{t^*}{\sqrt{2}}\right)^2, & 0 \leq t^* \leq \sqrt{2} \\ 0, & t^* \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad (33)$$

$$\frac{dv^*}{dt^*} = \sqrt{2h^*} - a^* \quad (34)$$

$$\frac{da^*}{dt^*} = \phi \sqrt{v^*} \quad (35)$$

όπου η τιμή της παραμέτρου ϕ είναι:

$$\phi \equiv \beta \sqrt{2\pi \Delta w} \sqrt{\frac{h_0}{g} \frac{A_t^{3/2}}{A_h^2}} \quad (36)$$

Συγκριτικά με τη σχέση (26), οι τιμές του $\phi \gg 1$ αναφέρονται για μικρές περιοχές A_h , οι τιμές $\phi \ll 1$ αναφέρονται σε μεγάλες A_h .

Επίσης, μια γενική σχέση για την τιμή a^* , ενσωματώνοντας τις εξισώσεις (33) και (34) πέρα από το χρονικό διάστημα που χρειάζεται η λίμνη για την εξάτμιση της ($t_v \geq \sqrt{2}$) είναι:

$$\overline{a^*} = \frac{1}{t_v^*} \quad (37)$$

Αυτή η σχέση εκφράζει τη διατήρηση της μάζας. Όλη η ποσότητα του υγρού που απελευθερώνεται από τη δεξαμενή του πλοίου εξατμίζεται μέχρι το τέλος της χρονικής περιόδου t_v .

➤ $\phi \gg 1$

Σε αυτή την περίπτωση, μετά από μια μικρή χρονική περίοδο $t_s^* \ll \sqrt{2}$ ασταθούς ροής, μια σταθερή ροή θα προκύψει, κατά την διάρκεια της οποίας η ποσότητα του υγρού που διαρρέει προς την πύλη θα ισούται με αυτή που θα εξατμίζεται. Αυτή η ισορροπία εκφράζεται μηδενίζοντας το δεξί μέρος της εξίσωσης (34) και βάζοντας το a^* ως συνάρτηση του χρόνου:

$$a^* = \sqrt{2} - t^*, \quad t_s^* \leq t^* \leq \sqrt{2} \quad (38)$$

Σε αυτή την περίοδο, η επιφάνεια της λίμνης συρρικνώνεται γραμμικά με το χρόνο, φτάνοντας στο μηδέν στο τέλος της απελευθέρωσης, δηλαδή όταν $t_s^* = \sqrt{2}$. Η επιφάνεια της λίμνης στην αρχή της σταθερής ροής, a_s^* , είναι:

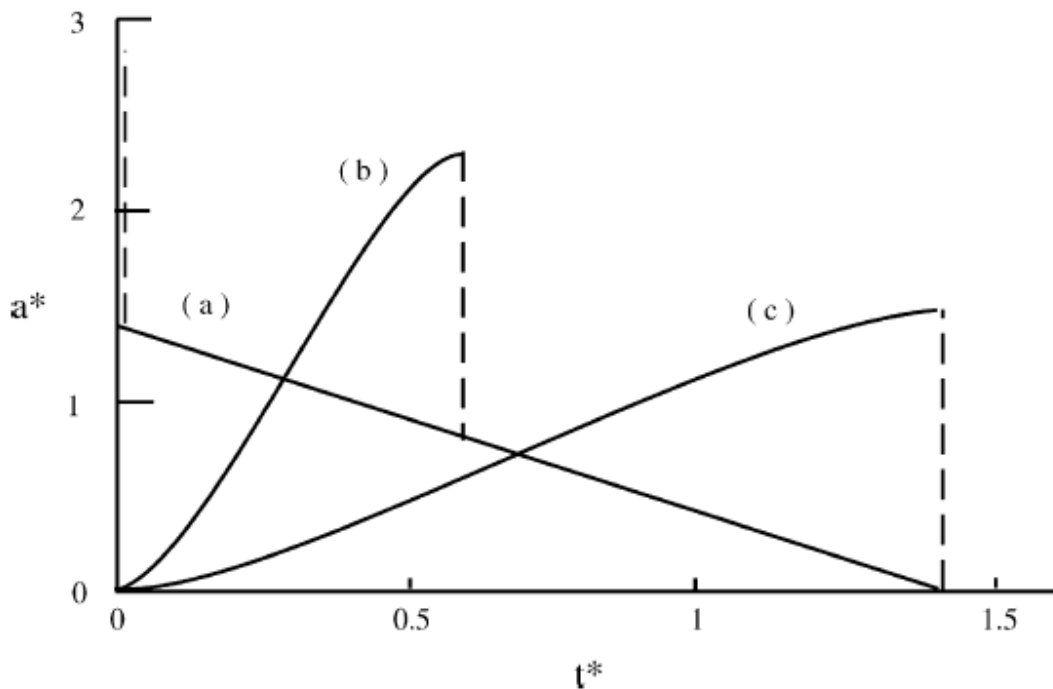
$$a_s^* = \sqrt{2} - t_s^* \quad (39)$$

Εξετάζεται στη συνέχεια η παροδική ροή στη χρονική περίοδο $0 \leq t^* \leq t_s^*$, για την οποία $t_s \ll \sqrt{2}$ και $h^*=1$. Έτσι η σχέση (34) γίνεται:

$$\frac{dv^*}{dt^*} = \sqrt{2} - a^* \quad (40)$$

το οποίο μπορεί να λυθεί ταυτόχρονα με τη σχέση (35) για να καθορίσει το v^* ως συνάρτηση του a^* :

$$v^* = \left[\frac{3a^*}{2\phi} \left(\sqrt{2} - \frac{a^*}{2} \right) \right]^{2/3} \quad (41)$$



Σχήμα 19. Η εξάρτηση της επιφάνειας της λίμνης, a^* , από τον χρόνο για $\phi \rightarrow \infty$ (a), $\phi=10$ (b) και $\phi=\phi_c=1.784$

Ο όγκος της λίμνης αυξάνεται σε αυτή την περίοδο, φτάνοντας σε μια μέγιστη τιμή όταν $a^* = \sqrt{2}$ και στη συνέχεια μειώνεται έως ότου μηδενιστεί όταν το a^* μεγιστοποιηθεί, a_m^* , με:

$$a_m^* = 2\sqrt{2} \quad (42)$$

Για $a_m^* \geq \sqrt{2} \cdot a_s^*$, η περιοδική φάση αφήνει μια μεγαλύτερη λίμνη από αυτή στην αρχή της φάσης σταθερής ροής. Η διάρκεια της παροδικής ροής μπορεί να βρεθεί με αντικατάσταση της σχέσης (41) στη (35):

$$\begin{aligned} t_s^* &= \phi^{-2/3} \int_0^{2\sqrt{2}} \frac{da^*}{[(3a^*/2)(\sqrt{2} - a^*/2)]^{1/3}} \\ &= \left(2^{7/6} (3^{2/3}) \frac{(\Gamma\{4/3\})^2}{\Gamma\{5/3\}} \right) \phi^{-2/3} = 4.124\phi^{-2/3} \end{aligned} \quad (43)$$

όπου $\Gamma\{x\}$ είναι η λειτουργία γάμμα του επιχειρήματος X.

Για $\phi \rightarrow \infty$, η παροδική φάση έχει αμελητέα διάρκεια ενώ η σταθερή ροή είναι αυτή που συμβαίνει σε όλη τη διάρκεια εκτός από την αρχή της διαρροής. Η εξάρτηση της επιφάνειας a^* από το χρόνο t^* σε αυτή την περίπτωση φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 19.

Στις περιπτώσεις όπου το ϕ δεν είναι αρκετά μεγάλο για να πληρεί τις απαιτήσεις $t_s \ll \sqrt{2}$ και τις σχέσεις (33)-(35), πρέπει να ενσωματωθεί αριθμητικά. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 19(b) για $\phi=10$. Εδώ η παροδική φάση επεκτείνεται σε $t_s^* = 0.588$, όπου $a_m^* = 2.233$ και $a_s^* = 0.827$, και τα δυο μικρότερα από τις τιμές $2\sqrt{2}$ και $\sqrt{2}$, αντίστοιχα για $\phi \rightarrow \infty$. Η τιμή του a^* εξαρτάται σχεδόν γραμμικά με το t^* στη παροδική φάση αλλά και στη φάση σταθερής ροής.

Για ακόμα μικρότερες τιμές του ϕ , η διάρκεια της παροδικής φάσης t_s^* αυξάνεται όταν τα a_m^* και a_s^* μειώνονται, μέχρι τη στιγμή που το ϕ αποκτήσει την τιμή $\phi_c = 1.784$, $t_s^* = \sqrt{2}$, όπου η παροδική φάση καλύπτει όλη την διάρκεια της εκροής.

➤ $\phi \ll 1$

Σε αυτό το όριο, η απελευθέρωση συμβαίνει πολύ γρήγορα και στη συνέχεια η λίμνη εξαπλώνεται και εξατμίζεται. Εάν επικεντρωθούμε στη μικρή περίοδο της διαρροής όπου $0 \leq t^* \leq \sqrt{2}$, μπορούμε να αγνοήσουμε τον όρο της εξάτμισης στη σχέση (34) και με ολοκλήρωση να βρούμε:

$$v^* = \sqrt{2}t^* \left(1 - \frac{t^*}{2\sqrt{2}} \right), \quad t^* \leq \sqrt{2} \quad (44)$$

Συνδυάζοντας την προηγούμενη εξίσωση με την σχέση (35) και ολοκληρώνοντας γύρω από την περίοδο της διαρροής, βρίσκουμε την επιφάνεια της λίμνης, a_d^* , την στιγμή $t^* = \sqrt{2}$ να είναι:

$$a_d^* = 2^{1/4} \phi \int_0^{\sqrt{2}} \left(t^* \left[1 - \frac{t^*}{2\sqrt{2}} \right] \right)^{1/2} dt^* = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \phi \quad (45)$$

Για $t^* \geq \sqrt{2}$ οι σχέσεις (34) και (35) δίνουν:

$$\frac{dv^*}{dt^*} = -a^* \quad (46)$$

$$\frac{da^*}{dt^*} = \phi \sqrt{v^*} \quad (47)$$

με αρχικές συνθήκες τη στιγμή $t^* = \sqrt{2}$ να είναι $v^* = 1$ και $a^* = a_d^*$. Ολοκληρώνοντας έχουμε την σχέση του v^* με το a^* να είναι:

$$v^* = \left(1 - \frac{3}{4\phi} [(a^*)^2 - (a_d^*)^2] \right)^{2/3} \quad (48)$$

Η μέγιστη τιμή της επιφάνειας της λίμνης a_m^* βρίσκεται για $v^* = 0$ και είναι:

$$(a_m^*)^2 = \frac{4\phi}{3} + \left(\frac{\pi \phi}{2\sqrt{2}} \right)^2$$

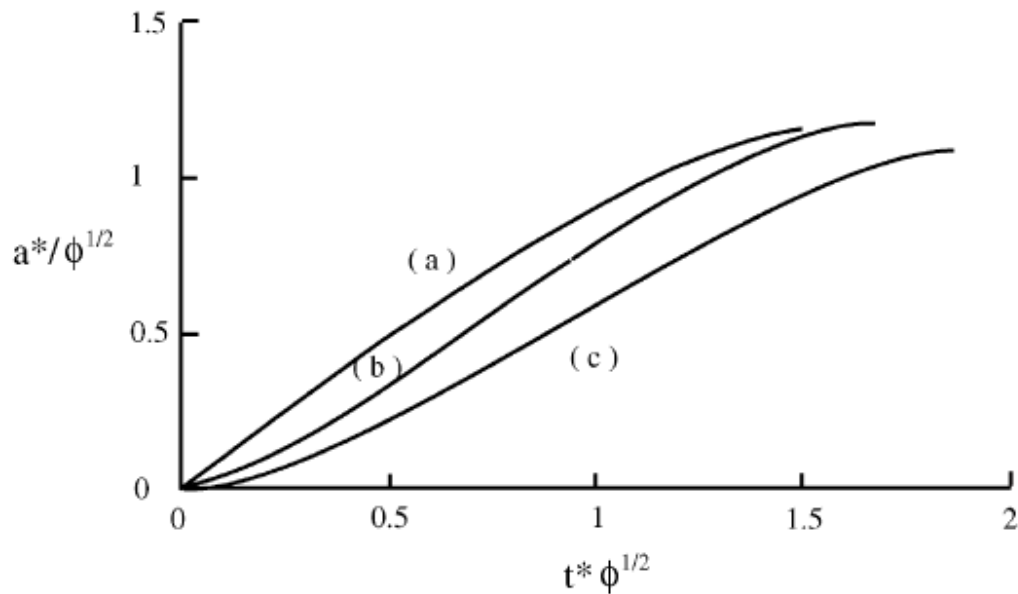
$$a_m^* \simeq \left(\frac{4\phi}{3} \right)^{1/2} \left[1 + \frac{3\pi^2}{64} \phi \right] = 0.971 \phi^{1/2} (1 + 0.463\phi) \quad (49)$$

Ο χρόνος, t_v^* , που απαιτείται για να εξατμιστεί ολόκληρη η λίμνη, βρίσκεται συνδυάζοντας τις (49) και (47) και ολοκληρώνοντας:

$$\int_{\sqrt{2}}^{t_v^*} dt^* = \frac{1}{\phi} \int_{a_d^*}^{a_m^*} \frac{da^*}{\sqrt{v^*}}$$

$$t_v^* = \frac{\sqrt{3\pi}}{2} \frac{\Gamma\{5/3\}}{\Gamma\{7/6\}} \phi^{-1/2} + \sqrt{2} - \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.493 \phi^{-1/2} + 0.304 \quad (50)$$

Για να εκφραστεί το a^* ως συνάρτηση του χρόνου, πρέπει να ολοκληρωθούν οι (46) και (47). Για $\phi \rightarrow 0$, η ολοκλήρωση αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 20. Όπως είναι αναμενόμενο, η επιφάνεια της λίμνης μεγαλώνει με τον χρόνο έως ότου η εξατμηση φτάσει μια τιμή, την χρονική στιγμή όπου $t^* \sqrt{\phi} = 1.493$ με $a^*/\sqrt{\phi} = 1.155$.



Σχήμα 20. Η εξάρτηση της επεξεργασμένης επιφάνειας λίμνης, $a^*/\sqrt{\phi}$ στον επεξεργασμένο χρόνο, $t^*\sqrt{\phi}$ για $\phi \leq \phi_c$: (a), $\phi \rightarrow 0$: (b), $\phi = 1/3$: (c), $\phi = \phi_c = 1.784$

➤ $\phi \leq \phi_c$

Γενικά, για τιμές του ϕ , στο εύρος $\phi \leq \phi_c$, που δεν είναι αρκετά μικρές ώστε να είναι έγκυρες οι παραπάνω προσεγγίσεις, η χρονική εξάρτηση του v^* και του a^* καθώς και του a_m^* , t_v^* βρίσκεται από ολοκληρώσεις των σχέσεων (33)-(35).

11.2.2 Σύνοψη

Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα, στον οποίο περιέχονται οι τιμές των a_m^* , t_s^* , a_s^* , t_v^* και $a_m^*t_v^*$, για 8 διαφορετικές τιμές του ϕ στο εύρος $0 \leq \phi \leq \infty$. Ως συναρτήσεις του ϕ , το a_m^* μεγαλώνει όσο το t_v^* μειώνεται, στο εύρος $0 \leq \phi \leq \infty$, φτάνοντας τα όρια $2\sqrt{2}$ και $\sqrt{2}$, αντίστοιχα, για $\phi \rightarrow \infty$.

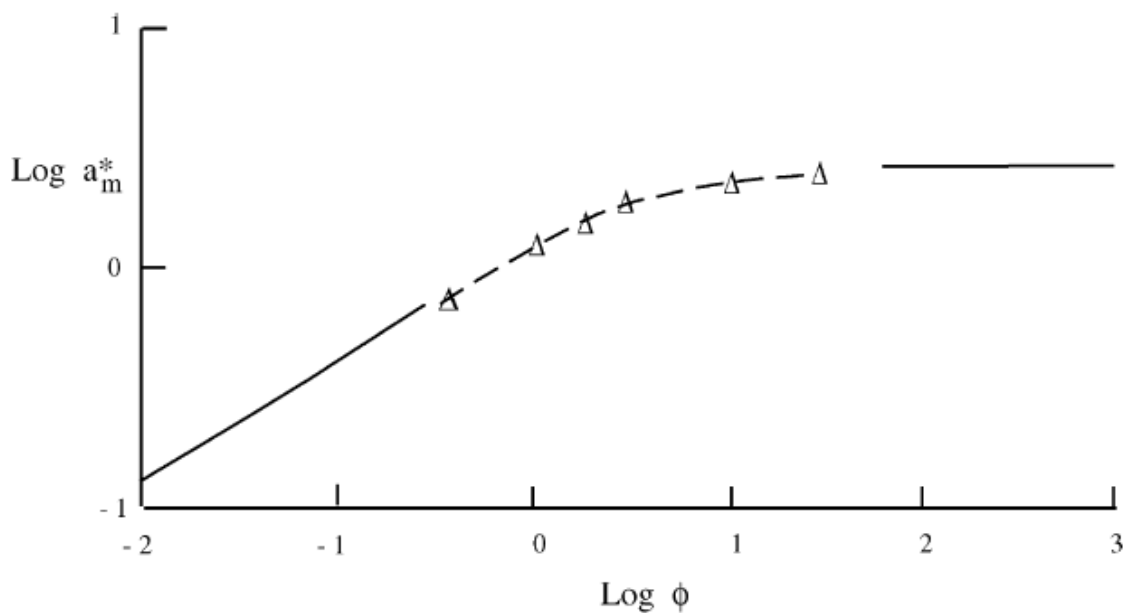
Τα δεδομένα του πίνακα για τα a_m^* και t_v^* ως συνάρτηση του ϕ φαίνονται και στα επόμενα σχήματα αντίστοιχα, με τη χρήση λογαριθμικών συντεταγμένων:

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

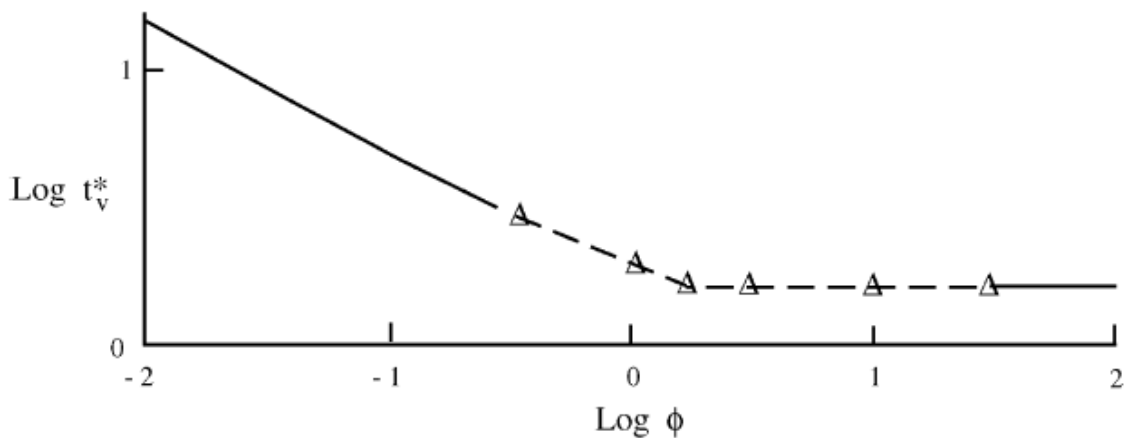
Pool area and evaporation time

	ϕ							
	$\ll 1$	1/3	1	1.784	3	10	30	$\gg 1$
a_m^*	$1.155\sqrt{\phi}(1 + 0.463\phi)$	0.661	1.113	1.431	1.716	2.233	2.521	2.828
t_s^*				1.414	1.113	0.588	0.300	$4.124\phi^{-2/3}$
a_s^*				0	0.302	0.827	1.114	$(1.414-4.124)\phi^{-2/3}$
t_v^*	$1.493/(\sqrt{\phi} + 0.304)$	2.875	1.775	1.414	1.414	1.414	1.414	1.414
$a_m^* t_v^*$	$1.724 + 0.351\sqrt{\phi}$	1.899	1.976	2.024	2.427	3.157	3.565	4.000

Σχήμα 21. Έκταση λίμνης και χρόνο εξάτμισης.



Σχήμα 22. Η αδιαστατοποιημένη μέγιστη επιφάνεια λίμνης, a_m^* , ως συνάρτηση της παραμέτρου εκροής ϕ .



Σχήμα 23. Η αδιαστατοποιημένη διάρκεια εξάτμισης t_v^* , ως συνάρτηση της παραμέτρου ϕ .

11.3 Quest 2003

11.3.1 Μοντελοποίηση ακτινοβολίας πυρκαγιάς λίμνης

Σκοπός

Ο σκοπός του μοντέλου αυτού είναι να προβλέψει τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας από την πυρκαγιά και τις φλόγες της, που τροφοδοτούνται από τους ατμούς που παράγονται στη λίμνη. Ειδικότερα, το μοντέλο προβλέπει την μέγιστη ροή θερμότητας σαν συνάρτηση της απόστασης μεταξύ του σημείου στόχου και της φλόγας.

Μεθοδολογία

Καθορίζεται το γεωμετρικό σχήμα της φλόγας ως ένας ελλειπτικός κύλινδρος πάνω από τη λίμνη. Το μέγεθος της βάσης του κυλίνδρου αυτού καθορίζεται από τις διαστάσεις της λίμνης. Το ύψος της φλόγας βρίσκεται από τη σχέση του Thomas (1965) και είναι:

$$L = 42 \cdot D_h \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\rho_a \cdot (g \cdot D_h)^{0.5}} \right)^{0.61} \quad (51)$$

όπου L= το ύψος της φλόγας σε m

D_h = διάμετρος της λίμνης σε m

\dot{m} '= μαζική ροή καύσης σε kg/(m s²)

ρ_a = πυκνότητα του αέρα σε kg/m³

g= επιτάχυνση της βαρύτητας

Για λίμνες με διάμετρο μεγαλύτερη από 100 m, το ύψος L υπολογίζεται με $D_h=100$ m.

Η γωνία (Φ) που ορίζει τη κλίση της φλόγας από το κατακόρυφο επίπεδο εξαιτίας του αέρα βρίσκεται από τις σχέσεις των Welker και Sliepceovich (1970):

$$\frac{\tan(\Phi)}{\cos(\Phi)} = 3.2 \cdot \left(\frac{D_h \cdot u \cdot \rho_a}{\mu_a} \right)^{0.07} \cdot \left(\frac{u^2}{g \cdot D_h} \right)^{0.7} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_a} \right)^{-0.6} \quad (52)$$

όπου Φ = η γωνία κλίσης της φλόγας από την κατακόρυφο σε μοίρες

u= η ταχύτητα του αέρα σε m/s

μ_a = ιξώδες του αέρα σε kg/(m s)

ρ_v = πυκνότητα του εύφλεκτου ατμού σε kg/m³

Η αύξηση της βάσης της λίμνης, σύμφωνα με την κατεύθυνση του αέρα, βρίσκεται από τη σχέση του Moorhouse (1982) για μεγάλες πυρκαγιές κυκλικών λιμνών:

$$D_w = 1.5 \cdot D_x \cdot \left(\frac{u^2}{g \cdot D_x} \right)^{0.069} \quad (53)$$

όπου D_w = η διάσταση της βάσης της φλόγας με την αύξηση σύμφωνα με τη φορά του ανέμου

D_x = η διάσταση της βάσης της λίμνης με την αύξηση σύμφωνα με τη φορά του ανέμου

Η φλόγα χωρίζεται σε δυο ζώνες: στην καθαρή ζώνη στη οποία δεν υπάρχει καπνός και στην καπνώδη ζώνη όπου ένα τμήμα της φλόγας είναι κρυμμένο από τον καπνό. Το μήκος της καθαρής ζώνης υπολογίζεται από μια σχέση των Pritchard και Binding (1992) και είναι:

$$L_c = 55.05 \cdot D_h^{-0.6} \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\rho_a} \right)^{1.13} \cdot (u+1)^{0.179} \cdot \left(\frac{C}{H} \right)^{-2.49} \quad (54)$$

όπου L_c = το μήκος της καθαρής ζώνης σε m

C/H = λόγος άνθρακα/υδρογόνου του καυσίμου

Η ροή θερμότητας της επιφάνειας στη καθαρή ζώνη είναι:

$$q_{cz} = q_{sm} \cdot (1 - e^{-b \cdot D_h}) \quad (55)$$

όπου q_{cz} = η ροή επιφάνειας της καθαρής ζώνης σε kW/m²

q_{sm} = η μέγιστη ροή επιφάνειας σε kW/m²

b = συντελεστής εξάλειψης σε m⁻¹

Η επιφάνεια της φλόγας χωρίζεται σε έναν αριθμό διαφορετικών περιοχών. Παρακάτω υπολογίζεται ένας οπτικός συντελεστής, που έχει σχέση με την απόσταση ενός σταθερού σημείου έξω από τη φλόγα και των διαφορετικών αυτών περιοχών. Είναι απαραίτητος, επίσης, και για τον υπολογισμό της ροής θερμικής ακτινοβολίας. Ο συντελεστής αυτός είναι:

$$F_{dA_i \rightarrow dA_f} = \frac{\cos(\beta_i) \cdot \cos(\beta_f)}{\pi \cdot r^2} \cdot dA_f \quad \text{for } [\beta_i] \text{ and } [\beta_f] < 90^\circ \quad (56)$$

όπου dA_f = η διαφορετική, κάθε φορά, επιφάνεια στην επιφάνεια της φλόγας σε m²

dA_i = η διαφορετική, κάθε φορά, επιφάνεια στην επιφάνεια της επιφάνειας στόχου σε m²

r = η απόσταση μεταξύ των δυο παραπάνω επιφανειών

$\beta_i =$ η γωνία μεταξύ του dA_i και της ευθείας που σχηματίζεται από τα dA_i και dA_f

$\beta_f =$ η γωνία μεταξύ του dA_f και της ευθείας που σχηματίζεται από τα dA_i και dA_f

Έτσι η ροή θερμικής ακτινοβολίας είναι:

$$q_{ai} = \sum_{A_f} q_{sf} \cdot F_{dA_i \rightarrow dA_f} \cdot \tau \quad (57)$$

όπου q_{ai} = η μειωμένη ροή θερμικής ακτινοβολίας που προέρχεται από τη φλόγα σε kW/m²

A_f = η επιφάνεια της φλόγας

q_{sf} = η ροή θερμικής ακτινοβολίας από τη επιφάνεια της φλόγας σε kW/m²

τ = ατμοσφαιρική μετάδοση, συνάρτηση της απόλυτης υγρασίας

11.3.2 Μοντελοποίηση «πύρινης μπάλας»

Σκοπός

Ο σκοπός του μοντέλου αυτού είναι να προβλέψει τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας από μια πύρινη μπάλα, που προέρχεται από ανάφλεξη του σύννεφου LNG ατμού. Ειδικότερα, το μοντέλο προβλέπει την μέση ροή θερμότητας σε ένα σημείο «στόχο» σαν συνάρτηση της οριζόντιας απόστασης μεταξύ του σημείου αυτού και του κέντρου της «πύρινης μπάλας».

Μεθοδολογία

Η μέγιστη διάμετρος της «πύρινης μπάλας» καθορίζεται από την εμπειρική σχέση του Roberts (1981/82) και είναι:

$$D_{\max} = 5.8 \cdot M_f^{1/3} \quad (58)$$

όπου D_{\max} = η μέγιστη διάμετρος σε m

M_f = η ποσότητα του καυσίμου στην «πύρινη μπάλα» σε kg

Σύμφωνα με τους Hasegawa και Sato (1977) η ποσότητα αυτή του καυσίμου είναι τρεις φορές η ποσότητα του καυσίμου που ατμοποιείται όταν απελευθερωθεί στη ατμόσφαιρα.

Η διάρκεια της «πύρινης μπάλας» από τη σχέση των Martinsen και Marx (1999) είναι:

$$t_d = 0.9 \cdot M_f^{1/4} \quad (59)$$

όπου t_d = η διάρκεια σε s

M_f = η ποσότητα του καυσίμου στην «πύρινη μπάλα» σε kg

Η «πύρινη μπάλα» υποτίθεται ότι αυξάνεται με ένα ρυθμό ανάλογο με τη τρίτη ρίζα του χρόνου, φτάνοντας σε μια μέγιστη διάμετρο, D_{max} , σε χρόνο ανύψωσης $t_d/3$.

Το τμήμα της συνολικής διαθέσιμης θερμικής ενέργειας που εκλύεται ως ακτινοβολία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση του Roberts (1981/82):

$$f = 0.0296 \cdot P^{0.32} \quad (60)$$

όπου f = το τμήμα της ενέργειας που γίνεται ακτινοβολία

P = η πίεση μέσα στο σκάφος της στιγμή του ρήγματος σε kPa

Η συνολική ενέργεια που μετατρέπεται σε ακτινοβολία είναι:

$$E_r = f \cdot M_f \cdot \Delta H_c \quad (61)$$

όπου E_r = η ενέργεια που εκλύεται ως ακτινοβολία σε kJ

ΔH_c = θερμότητα καύσης σε kJ/kg

Η ροή θερμότητας της επιφάνειας εκτιμάται διαιρώντας την E_r με την μέση επιφάνεια της «πύρινης μπάλας» και την διάρκεια της, ενώ δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει τα 400 kW/m².

11.3.3 Μοντελοποίηση διασποράς σύννεφου ατμού

Σκοπός

Σκοπός του μοντέλου αυτού είναι η πρόβλεψη της διασποράς και της βαρυτικής ροής του σύννεφου ατμού που προκύπτει από την εξάτμιση της LNG λίμνης. Χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της, σύμφωνης με την κατεύθυνση του ανέμου, μετακίνησης του εύφλεκτου αυτού σύννεφου.

Μεθοδολογία

Το μοντέλο διασποράς λύνει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\frac{d}{dx}(\rho \cdot U \cdot B \cdot h \cdot m) = \rho_i \cdot W_i \cdot B_i \quad (62)$$

$$\frac{d}{dx}(\rho \cdot U \cdot B \cdot h) = \rho_a \cdot (V_e \cdot h + W_e \cdot B) + \rho_i \cdot W_i \cdot B_i \quad (63)$$

$$\frac{d}{dx}(\rho \cdot U \cdot B \cdot h \cdot C_p \cdot T) = \rho_a \cdot (V_e \cdot h + W_e \cdot B) \cdot C_{pa} \cdot T_a + \rho_z \cdot W_z \cdot B_z \cdot C_{pz} \cdot T_z + f_t \quad (64)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(\rho \cdot U \cdot B \cdot h \cdot U) \\ = -0.5 \cdot \alpha_z \cdot g \cdot \frac{d}{dx}[(\rho - \rho_a) \cdot B \cdot h^2] + \rho_a \cdot (V_e \cdot h + W_e \cdot B) \cdot U_a + f_u \end{aligned} \quad (65)$$

$$\frac{d}{dx}(\rho \cdot U \cdot B \cdot h \cdot V_z) = g \cdot (\rho - \rho_a) \cdot h^2 + f_{vg} \quad (66)$$

$$U \cdot \frac{dZ_c}{dx} = -V_z \cdot \frac{Z_c}{B} \quad (67)$$

$$U \cdot \frac{dB}{dx} = \frac{\rho_a}{\rho} \cdot V_e + V_z \quad (68)$$

$$\rho \cdot T = \frac{\rho_a \cdot T_a \cdot M_z}{[M_z + (M_a - M_z) \cdot m]} \quad (69)$$

όπου:

x = η απόσταση σε m (σύμφωνη με την κατεύθυνση του αέρα)

ρ = πυκνότητα σε kg/m³

U = η ταχύτητα στην κατεύθυνση του αέρα

B = παράμετρος πλάτους του σύννεφου σε m

h = παράμετρος ύψους του σύννεφου σε m

m = τμήμα μάζας του αερίου πηγής

T = θερμοκρασία σε K

C_p = ειδική θερμότητα σε J/(kgK)

f_t = ροή θερμότητας εδάφους σε J/(ms)

f_u = όρος τριβής σύμφωνα με την κατεύθυνση του αέρα σε kg/s²

f_{vg} = όρος τριβής κάθετα με την κατεύθυνση του αέρα σε kg/s²

V_e = οριζόντιος ρυθμός παράσυρσης σε m/s

V_z = οριζόντια βαρυτική ταχύτητα σε m/s

W_e = κάθετος ρυθμός παράσυρσης σε m/s

W_s = κάθετος ταχύτητα ψεκασμού του αερίου σε m/s

M = μοριακό βάρος σε kg/kmole

s = αναφέρεται σε ιδιότητες της πηγής

α = αναφέρεται σε ιδιότητες του περιβάλλοντος

Η τρισδιάστατη διανομή συγκέντρωσης υπολογίζεται από τη μέση μαζική συγκέντρωση υποθέτοντας τις επόμενες σχέσεις:

$$C(x, y, z) = C(x) \cdot C_1(y) \cdot C_2(z) \quad (70)$$

$$C(x) = \frac{M_a \cdot m(x)}{M_s + (M_a - M_s) \cdot m(x)} \quad (71)$$

$$C_1(y) = \frac{1}{4 \cdot b} \cdot \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{y+b}{2 \cdot \beta} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-b}{2 \cdot \beta} \right) \right\} \quad (72)$$

$$B^2 = b^2 + 3 \cdot \beta^2 \quad (73)$$

$$C_2(z) = \left(\frac{6}{\pi} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{h} \cdot \exp \left(\frac{-3 \cdot z^2}{2 \cdot h^2} \right) \quad (74)$$

όπου $C(x, y, z)$ = η συγκέντρωση στις 3 διαστάσεις σε kg/m^3

y = συντεταγμένη διαγώνια στη διεύθυνση του αέρα σε m

z = κάθετη συντεταγμένη σε m

b, B, β = μέσου-πλάτους παράμετροι σε m

για τον υπολογισμό του b χρειάζεται η παρακάτω σχέση:

$$U \cdot \left(\frac{db}{dx} \right) = V_s \cdot \frac{b}{B} \quad (75)$$

Ο ρυθμός κάθετης παράσυρσης είναι:

$$W_e = \frac{\sqrt{3} \cdot \alpha \cdot k \cdot U_\phi \cdot \delta \left(\frac{h}{H} \right)}{\Phi_h \left(\frac{h}{L} \right)} \quad (76)$$

όπου:

α = σταθερά ίση με 1.5

k = σταθερά ίση με 0.41

U_ϕ = ταχύτητα τριβής σε m/s

L = μήκος Monin – Obukhov για τη συγκεκριμένη ατμοσφαιρική κατάσταση

Η συνάρτηση δ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ύψους H του στρώματος μίξης και για τον περιορισμό του ύψους του σύννεφου. Το H είναι συνάρτηση της κλάσης σταθερότητας και ορίζεται ως εξής:

$$\delta \left(\frac{h}{H} \right) = 1 - \frac{h}{H} \quad (77)$$

Η Monin – Obukhov συνάρτηση, Φ_h , ορίζεται ως:

$$\Phi_h \left(\frac{h}{L} \right) = \begin{cases} 1 + 5 \cdot \frac{h}{L} & L \geq 0 \text{ (stable)} \\ \left[1 - 16 \cdot \frac{h}{L} \right]^{-1/2} & L < 0 \text{ (unstable)} \end{cases} \quad (78)$$

Αφού έχουν λυθεί οι παραπάνω εξισώσεις, μια διόρθωση διασποράς εφαρμόζεται για τις διαρροές μικρής διάρκειας. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Palazzi (1982).

11.4 Koorman (Vallejo) 2004

Σκοπός της μελέτης του Koorman ήταν η εκτίμηση των κινδύνων που προκύπτουν από τον χειρισμό μεγάλων ποσοτήτων υγροποιημένου φυσικού αερίου και των επιδράσεων μια διαρροής στο γειτονικό περιβάλλον.

Το αναλυτικό μοντέλο του Koorman στο Vallejo σχετικά με τον σχηματισμό του εύφλεκτου LNG σύννεφου αμού και της πυρκαγιάς μιας LNG λίμνης, δεν ήταν διαθέσιμο. Παρά όλα αυτά, όμως, τα αποτελέσματα της μελέτης του είναι γνωστά και παρουσιάζονται παρακάτω, καθώς

εφαρμόζονται σε δυο σενάρια ώστε να γίνουν περισσότερο αντιληπτοί οι κίνδυνοι που σχετίζονται με μια τέτοια διαρροή. Τα σενάρια αυτά είναι:

- ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΓΩΓΟΥ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ-ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΕΥΦΛΕΚΤΟΥ ΣΥΝΝΕΦΟΥ ΑΤΜΟΥ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΕΡΑ.

Οι περιοχές οι οποίες βρίσκονται σε μεγάλο κίνδυνο λόγω της απελευθέρωσης ποσοτήτων LNG είναι τέσσερις και φαίνονται παρακάτω. Η ακτίνα εκείνη, μετά την οποία το ατμοποιημένο σύννεφο δεν είναι πλέον εύφλεκτο, ορίζει το LFL (Lower Flammability Limit), το οποίο είναι η ελάχιστη συγκέντρωση LNG ικανή να καεί στον αέρα. Έτσι για:

1. ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΓΩΓΟΥ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ

- 208 m³/min διαρρέονται για 10 λεπτά στο νερό
- Ταχύτητα ανέμου 5 m/s, σταθερότητα ατμόσφαιρας D
- Απόσταση από το LFL: 643 m

2. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

- Ρήγμα σε δεξαμενή 25.000 m³, διαρροές στο νερό.
- 1 μέτρο ρήγμα (κυκλικό) στη δεξαμενή.
- Ταχύτητα ανέμου 5 m/s, σταθερότητα ατμόσφαιρας D
- Απόσταση από το LFL: 1,126 m

3. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

- Ρήγμα σε δεξαμενή 25.000 m³, διαρροές στο νερό.
- 5 μέτρο ρήγμα στη δεξαμενή.
- Ταχύτητα ανέμου 5 m/s, σταθερότητα ατμόσφαιρας D
- Απόσταση από το LFL: 2,414 m

4. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

- Ρήγμα σε δεξαμενή 25.000 m³, διαρροές στο νερό.
- 5 μέτρο ρήγμα στη δεξαμενή.
- Ταχύτητα ανέμου 5 m/s, σταθερότητα ατμόσφαιρας F
- Απόσταση από το LFL: 4,506 m

Ατμοσφαιρική σταθερότητα D χαρακτηρίζεται από πλήρη συννεφιά ή μερική κάλυψη σύννεφων κατά τη διάρκεια τόσο της ημέρας όσο και της νύχτας. Η ατμοσφαιρική αναταραχή δεν είναι τόσο μεγάλη στην D όσο στην A. Κατά συνέπεια, το αέριο δεν θα αναμιχτεί τόσο γρήγορα με την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα.

Ατμοσφαιρική σταθερότητα F αντιστοιχεί «στις σταθερότερες» ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η κατάσταση F εμφανίζεται γενικά κατά τη διάρκεια των πολύ πρωινών ωρών πριν από την ανατολή (μηδενική ηλιακή ακτινοβολία) και στους πολύ χαμηλούς ανέμους. Ο συνδυασμός

αυτός (χαμηλοί άνεμοι και μηδενική ηλιακή ακτινοβολία) περιορίζει τη δυνατότητα να αναμιχτεί η ατμόσφαιρα ενεργά με το απελευθερωμένο αέριο.



Σχήμα 24. Διάφορες αποστάσεις έως το LFL στο Humboldt Bay.

➤ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ
ΜΕ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΚΑΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΛΙΜΝΗΣ.

Οι περιοχές οι οποίες βρίσκονται σε μεγάλο κίνδυνο λόγω της απελευθέρωσης ποσοτήτων LNG και μια επερχόμενη πυρκαγιά είναι τρεις. η ακτίνα ορίζεται από την απόσταση από το κέντρο της λίμνης - πυρκαγιάς μέχρι τον βαθμό των εγκαυμάτων.

1. LNG ΠΥΡΚΑΓΙΑ

- Ρήγμα σε δεξαμενή 25.000 m³
- 5 μέτρα ρήγμα στη δεξαμενή.
- Η διαρροή LNG σχηματίζει λίμνη στο νερό η οποία αναφλέγεται.

- Απόσταση ικανή για εγκαύματα τρίτου βαθμού: 563 Μ.

2. LNG ΠΥΡΚΑΓΙΑ

- Ρήγμα σε δεξαμενή 25.000 m³
- 5 μέτρα ρήγμα στη δεξαμενή.
- Η διαρροή LNG σχηματίζει λίμνη στο νερό η οποία αναφλέγεται.
- Απόσταση ικανή για εγκαύματα δευτέρου βαθμού: 805 Μ.

3. LNG ΠΥΡΚΑΓΙΑ

- Ρήγμα σε δεξαμενή 25.000 m³
- 5 μέτρα ρήγμα στη δεξαμενή.
- Η διαρροή LNG σχηματίζει λίμνη στο νερό η οποία αναφλέγεται.
- Απόσταση ικανή για σκάσιμο δέρματος (φουσκάλες): 1,287 Μ.



Σχήμα 25. Διάφορες αποστάσεις επικινδυνότητας για εγκαύματα 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού στο Humboldt Bay

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

Πίνακας 14. Αποτελέσματα για την θερμική ακτινοβολία και την εμβέλεια της σε περίπτωση φωτιάς, και για τις αποστάσεις για το LFL του εξατμιζόμενου LNG

ΜΕΓΕΘΟΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ (m)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΛΟΓΩ ΦΩΤΙΑΣ		
	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ		
	30 kW/m ²	17 kW/m ²	5 kW/m ²
5	563 m	804 m	1287 m

ΜΕΓΕΘΟΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ (m)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΟΥ ΕΞΑΤΜΙΖΟΜΕΝΟΥ LNG		
	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ LFL (m)
5	2	F	4506
5	5	D	2414
1	5	D	1126

11.5 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΜΟΝΤΕΛΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πέρα από τα μοντέλα που αναλύθηκαν παραπάνω, υπάρχουν και άλλα τα οποία χρηματοδοτήθηκαν από διάφορους οργανισμούς για να εξετάσουν σενάρια και τις πιθανές επιδράσεις μια διαρροής υγροποιημένου φυσικού αερίου, τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον. Έτσι νηογνώμονες όπως ο DNV και ο ABS, και τα εργαστήρια της SANDIA National Laboratories αφού εξέτασαν τις αρχικές υποθέσεις, τα μοντέλα και τα πειραματικά δεδομένα των τεσσάρων αυτών μελετών, έκαναν τις δικές τους αναλύσεις και έβγαλαν τα δικά τους αποτελέσματα. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι αυτές οι μελέτες έγιναν θεωρώντας ως βάση τις προηγούμενες τέσσερις. Όσο αναφορά τη δομή τους καθώς και τους τομείς με τους οποίους ασχολούνται, ισχύει το ίδιο όπως και προηγουμένως, ότι δηλαδή εμφανίζουν μεγάλη διαφορετικότητα. Έτσι, και εδώ η σύγκριση των μελετών θα γίνει μέσω των αποτελεσμάτων τους. Οι μελέτες αυτές είναι:

- ABS Cons. “Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied LNG Carriers” [ABS, 2004]
- DNV “Consequences of LNG Marine Incidents” [Pitblado et al. Det Norske Veritas, 2004]

- SANDIA “Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water”. [SANDIA. Hightower et al., 2004]

11.5.1 ABS, 2004

ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ LNG

Στα πλοία μεταφοράς φορτίου LNG, το LNG περικλείεται μέσα σε δεξαμενή που βρίσκεται με τη σειρά της μέσα στην εσωτερική γάστρα του σκάφους. Τα σενάρια για αυτήν τη μελέτη περιλαμβάνουν ατυχήματα που τρυπούν την εσωτερική και εξωτερική γάστρα, το στρώμα μόνωσης, και την LNG δεξαμενή.

Επιπλέον, τα υπάρχοντα πρότυπα υποθέτουν ότι ο αέρας μπορεί να εισαχθεί στην κορυφή του διαμερίσματος LNG ή το LNG μπορεί να ατμοποιηθεί για να αντικαταστήσει το διερχόμενο υγρό σε ένα ογκομετρικό ποσοστό ίσο με το ποσοστό απαλλαγής από το ρήγμα στα πλευρικά τοιχώματα της δεξαμενή. Δηλαδή αγνοούν τη ικανότητα της χαμηλής πίεσης στο σκάφος να μειώνει το ποσοστό εκροής. Για ρήγματα μικρών διαμέτρων, ή για τα σενάρια όπου το ρήγμα επεκτείνεται επάνω από το επίπεδο του υγρού, αυτό μπορεί να είναι μια έγκυρη υπόθεση. Για τις τρύπες μεγάλων διαμέτρων, ο ρυθμός απελευθέρωσης μπορεί να είναι υψηλότερος από τον ρυθμό με τον οποίο ο ατμός μπορεί να παραχθεί ή στον οποίο ο αέρας μπορεί να εισαχθεί μέσω της κενής βαλβίδας ανακούφισης. Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να δημιουργηθεί ένα μερικό κενό στη δεξαμενή, το οποίο μειώνει το ποσοστό εκροής και ενδεχομένως να προκαλέσει ζημιά στο διαμέρισμα.

Ελλείψει μοντέλων που να λαμβάνουν υπόψη την αληθινή δομή ενός πλοίου μεταφοράς LNG και τους νόμους της απελευθέρωσης κρυογόνου LNG, το μοντέλο στομίων που συστήνεται είναι (ABS, 2004):

$$Q = C_d \cdot \pi \cdot \rho_1 \cdot R^2 \cdot \sqrt{2gH}$$

όπου

Q= ρυθμός ροής

C_d = συντελεστής απαλλαγής (που λαμβάνεται ως 1.0)

ρ_1 = πυκνότητα LNG

R= ακτίνα του ρήματος της γάστρας

H = ύψος υγρού επάνω από το ρήγμα της γάστρας

Κατά την εφαρμογή αυτού του μοντέλου είναι πολύ σημαντικό να λάβουμε υπόψη ότι το πρότυπο δεν απεικονίζει την πραγματική κατασκευή LNG πλοίων πολύ καλά, και τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνευθούν με βάση το ποσοστό απελευθέρωσης για ένα δεδομένο μέγεθος ρηγμάτων. Το μοντέλο στομίων αντιπροσωπεύει το δίγαστρο σκάφος ως μονόγαστρο, και επομένως τείνει να υπερεκτιμήσει την LNG εκροή για πολλά σενάρια.

Δεν υπάρχει κανένα κατάλληλο διαθέσιμο μοντέλο, για την απελευθέρωση μέσω ρήγματός σε μια δεξαμενή, που να είναι κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Ο Fay (2003) παρουσιάζει ένα μοντέλο για τις υποβρύχιες διαρροές, αλλά δεν συμβαδίζει με τις πραγματικές φυσικές λειτουργίες της απελευθέρωσης του κρυογόνου υγρού απευθείας στο νερό της θάλασσας ή την πραγματική γεωμετρία ενός πλοίου LNG. Ελλείψει ενός τέτοιου μοντέλου, το πρότυπο στομίων μπορεί να εφαρμοστεί για να παρέχει έναν οδηγό στο ποσοστό απελευθέρωσης.

Μια ποιοτική συζήτηση, για το τι μπορεί να συμβεί σε μια απελευθέρωση κάτω από την επιφάνεια του νερού της θάλασσας, είναι χρήσιμη για την κατανόηση της δυσκολίας της μοντελοποίησης μιας τέτοιας κατάστασης. Σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο κάτω από την επιφάνεια του νερού της θάλασσας, η πίεση του LNG θα υπερβεί την πίεση του νερού, έχοντας ως αποτέλεσμα τη ροή του LNG έξω από την τρύπα και τη γρήγορη ατμοποίησή του, δεδομένου ότι έρχεται σε επαφή με το νερό. Για τρύπες κάτω από το επίπεδο νερού της θάλασσας, υπάρχει ένα σημείο όπου θα επιτευχθεί ισότητα πιέσεων LNG και νερού, και το νερό της θάλασσας θα αρχίσει να μπαίνει μέσα στο πλοίο μέσω του ρήγματος. Οποιοδήποτε νερό που θα εισαγόταν στο σκάφος θα έτεινε να παγώσει γρήγορα, και η θερμότητα που μεταφέρει στο LNG μέσα στο σκάφος θα ατμοποιούσε το LNG, με ενδεχόμενη αύξηση στην πίεση του σκάφους αναγκάζοντας το LNG να διαρρεύσει έξω από το ρήγμα. Άλλα σενάρια περιλαμβάνουν τη διαρροή και του LNG και του νερού της θάλασσας στο κενό διάστημα μεταξύ δεξαμενής και εξωτερικής γάστρας.

Για πολλά σενάρια, το πρότυπο (στομίων) ροής αναμένεται να υπερεκτιμήσει το ποσοστό απελευθέρωσης επειδή δεν λαμβάνει υπ' όψιν τους παράγοντες όπως μια μείωση της πίεσης στη δεξαμενή καθώς το υγρό διέρχεται ή πρόσθετα εμπόδια που επηρεάζουν την απελευθέρωση, λόγω της σχεδίασης του συστήματος φορτίου και της δομής του σκάφους.

ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΜΙΑΣ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Με βάση τη βιβλιογραφία και του παραδείγματος του Shaw και του Webber για τις μεθοδολογίες εξάπλωσης, η μέθοδος Webber (όπως περιγράφεται σε TNO 1997) προτιμάται. Για πολλά σενάρια (π.χ., απελευθερώσεις μεγάλης διάρκειας), αυτή η μέθοδος θα παράσχει αποτελέσματα που είναι παρόμοια με εκείνα από τις διάφορες μεθόδους βασισμένες απλώς στην, οδηγούμενη από τη βαρύτητα, εξάπλωση. Εντούτοις, για μερικά σενάρια (π.χ., μεγάλες απελευθερώσεις μικρής διάρκειας), η μέθοδος Webber προβλέπει σημαντικά πιο αργή εξάπλωση της λίμνης (καθώς οι επιδράσεις της τριβής γίνονται σημαντικότερες). Επειδή η μέθοδος Webber (1) έχει μια καλύτερη θεωρητική βάση και (2) λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της τριβής, τα αποτελέσματα της θεωρούνται ρεαλιστικότερα από εκείνα των βαρυτικών μοντέλων που αγνοούν τα αποτελέσματα τριβής.

Η μέθοδος, που αναπτύχθηκε από τον Webber (όπως περιγράφεται στον TNO 1997), λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της τριβής. Αυτή η προσέγγιση είναι βασισμένη στις λύσεις εξισώσεων του ρηχού νερού και στην θεωρία λίπανσης. Η διατύπωση του Webber οδηγεί στην ακόλουθη περιγραφή της διάδοσης:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{4g_r\Phi h}{r} - C_F$$

Αδράνεια = βαρύτητα - αντίσταση

Όπου

Φ = συντελεστής, ο οποίος είναι συναρτήσει του $\frac{h_f}{h}$

h =βασικό ύψος (πάχος) LNG λίμνης

h_f = ύψος λιμνών (πάχος) στην κυρίαρχη αιχμή (άκρο)

C_F = τυρβώδης ή στρωτή δύναμη αντίστασης

Σε αυτήν τη διατύπωση, συμπεριλαμβάνονται και οι επιδράσεις της αντίστασης από τυρβώδη ή στρωτή τριβή, ενώ παρέχονται από τον Webber και οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των διαφόρων τιμών που απαιτούνται (π.χ. Φ, C_F).

Επίσης συνιστάται η μοντελοποίηση της εξάπλωσης της λίμνης να εφαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγει την ανάγκη να χαρακτηριστούν οι διαρροές είτε «στιγμιαίες» είτε «συνεχής». Εάν επιδιώκεται, μπορεί να προσαρμόσει μια «στιγμιαία» απελευθέρωση (δηλαδή ένας διευκρινισμένος όγκος λιμνών στο νερό στο χρόνο μηδέν) ή/και ένα σταθερό ή παροδικό ποσοστό απελευθέρωσης στη λίμνη.

Είναι επίσης χρήσιμο να σημειωθεί ότι για μερικά σενάρια, η λεπτομερής διαμόρφωση του μοντέλου εξάπλωσης των λιμνών δεν είναι απαραίτητη. Συγκεκριμένα, σε μια μακροπρόθεσμη (δηλαδή «συνεχή») απελευθέρωση, η λίμνη θα εξαπλώνεται έως ότου ο ρυθμός εξάτμισης της (ή ρυθμός καύσης, στην περίπτωση μιας πυρκαγιάς λίμνης) γίνει ίσος με το ρυθμό διαρροής από το ρήγμα. Σε μια περίπτωση όπως αυτή, η περιοχή της λίμνης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το ρυθμό διαρροής και το ρυθμό εξάτμισης ανά περιοχή. Φυσικά, όπως και με το πρότυπο Webber, αυτό αναφέρεται σε ομαλό και ήρεμο νερό.

Επειδή το συνιστώμενο πρότυπο εξάπλωσης δεν συμπεριλαμβάνει τη δράση των ρευμάτων ή των κυμάτων, μπορεί μόνο να παρέχει μια προσέγγιση της συμπεριφοράς της λίμνης. Όλα τα LNG πλοία διέρχονται από διάφορες υδάτινες οδούς στους ωκεανούς, και επομένως υπόκεινται σε παλιρροιακά ρεύματα και κύματα. Εντούτοις, κατά την εκφόρτωση του LNG σε τερματικούς σταθμούς τα παλιρροιακά ρεύματα και η δράση των κυμάτων μπορούν, κατά περιόδους, να είναι ελάχιστα. Η δράση των κυμάτων θα τείνει να αυξήσει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας στην LNG λίμνη που εξαπλώνεται, αυξάνοντας συνεπώς τον ρυθμό εξάτμισης της και περιορίζοντας το μέγεθος της περιοχής της λίμνης. Τα υδάτινα ρεύματα (παλιρροιακά, ποταμός, κ.λπ.) και η μετακίνηση κυμάτων τείνουν να «τεντώσουν» τη λίμνη στην κατεύθυνση της τρέχουσας ροής και να αυξήσουν το μέγεθος της. Επιπλέον, οι άνεμοι θα τείνουν να σύρουν την LNG λίμνη στην κατεύθυνση της ροής του αέρα, αυξάνοντας την περιοχή της διαρροής. Ο αυξανόμενος αέρας θα αυξήσει επίσης τη δράση των κυμάτων. Κανένα υπάρχον μοντέλο για μια LNG διαρροή δεν συνυπολογίζει τις επιδράσεις του αέρα, του ρεύματος, και της δράσης των κυμάτων.

Παραδειγματικά σενάρια και αποτελέσματα από την εξάπλωση των LNG λιμνών από τη μέθοδο του Webber, παρουσιάζονται παρακάτω. Αυτά τα σενάρια έχουν να κάνουν με διαρροές $12,500\text{m}^3$ με διάμετρο ρηγμάτων από 1m έως 5m. Αυτά τα μεγέθη επιλέχθηκαν για την

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

ανάλυση ευαισθησίας, δεδομένου ότι είναι αντιπροσωπευτικές τιμές μιας πιθανής ζημίας του σκάφους. Τα αποτελέσματα παρέχονται για δύο περιπτώσεις (1) υποθέτοντας ότι η πυρκαγιά εμφανίζεται αμέσως (στην αρχή της απελευθέρωσης) και (2) υποθέτοντας ότι καμία πυρκαγιά δεν εμφανίζεται. Η διάρκεια της διαρροής είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αδειάσει ο όγκος του υγρού που είναι επάνω από το ρήγμα στη δεξαμενή του φορτίου.

Μοντέλο του Webber για την εξάπλωση της λίμνης (περίπτωση ανάφλεξης)

Hole diameters: 3.3 ft (1 m) and 16 ft (5 m)

Initial liquid height above hole: 43 ft (13 m)

Total spill quantity: $4.4 \times 10^5 \text{ ft}^3$ ($12,500 \text{ m}^3$)

Burning rate: 0.058 lb/s/ft^2 (0.282 kg/s/m^2)

Αποτελέσματα μοντέλου του Webber για την εξάπλωση της λίμνης (περίπτωση ανάφλεξης)

Hole diameter	3.3 ft (1 m)	16 ft (5 m)
Initial spill rate	(5,300 kg/s)	(130,000 kg/s)
Total spill duration	33 min	1.3 min
Maximum pool radius	240 ft (74 m)	440 ft (130 m)
Total duration of fire	33 min	6.9 min

Μοντέλο του Webber για την εξάπλωση της λίμνης (περίπτωση μη ανάφλεξης)

Hole diameters: 3.3 ft (1 m) and 16 ft (5 m)

Total spill quantity: $4.4 \times 10^5 \text{ ft}^3$ ($12,500 \text{ m}^3$)

Air temperature: 71 °F (22 °C)

Water temperature: 70 °F (21 °C)

Αποτελέσματα μοντέλου του Webber για την εξάπλωση της λίμνης (περίπτωση μη ανάφλεξης)

Hole diameter	3.3 ft (1 m)	3.3 ft (5 m)
Initial spill rate	11,700 lb/s (5,300 kg/s)	290,000 lb/s (130,000 kg/s)
Total spill duration	33 min	1.3 min
Heat transfer to LNG	$11,700 \text{ BTU/hr/ft}^2$ (37 kW/m^2)	

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

pool		
Maximum pool radius	430 ft (130 m)	550 ft (170 m)
Total evaporation duration	34 min	18 min

ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΛΙΜΝΗΣ

Αν και το μοντέλο σημειακής πηγής εφαρμόζεται υπολογιστικά πιο εύκολα, το μεγάλο του μειονέκτημα είναι ότι δεν παράγει έγκυρες εκτιμήσεις για δέκτες κοντά στη πυρκαγιά. Σε μεγάλες αποστάσεις (και υποθέτοντας ότι παράμετροι όπως ο ρυθμός καύσης, η ισχύς και τμήμα της θερμικής ακτινοβολίας είναι ίσα) το μοντέλο σημειακής πηγής και το μοντέλο συμπαγούς φλόγας παρέχουν παρόμοια αποτελέσματα. Επομένως το μοντέλο συμπαγούς φλόγας χρησιμοποιείται.

Η μέθοδος που προτείνεται από τον ABS έχει επικυρωμένα αποτελέσματα για ένα εύρος διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων. Όμως δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα για πυρκαγιές λιμνών τόσο μεγάλου μεγέθους όσο οι πυρκαγιές που αναμένονται σε ένα ατύχημα υγραεριοφόρου.

ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΜΙΑΣ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Ο ABS προτείνει ότι η εξάτμιση της λίμνης θα πρέπει να εκτιμάται βάσει της ροής θερμότητας από το νερό στο LNG. Αυτή η ροή θερμότητας είναι ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα μεταδίδεται από το νερό στο LNG. Η θερμοκρασία του νερού υποτίθεται σταθερή ενώ η λίμνη βρίσκεται στο φυσιολογικό σημείο βρασμού έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί σταθερή ροή θερμότητας. Ο ρυθμός εξάτμισης υπολογίζεται κατευθείαν από τη ροή θερμότητας και τη θερμότητα της εξάτμισης του LNG.

Η ροή θερμότητας μπορεί να βρεθεί απευθείας από τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία όμως, εμφανίζουν μεγάλη διασπορά. Το εύρος που κυμαίνονται οι τιμές της είναι από 25kW/m^2 έως 100kW/m^2 . Σύμφωνα με τον ABS η διασπορά αυτή οφείλεται (1) στις διαφορές στην οργάνωση των πειραμάτων, (2) διαφορές στις τεχνικές των μετρήσεων και (3) στο γεγονός ότι οι ρυθμοί εξάτμισης προέκυψαν από άλλα δεδομένα και όχι από άμεση μέτρηση.

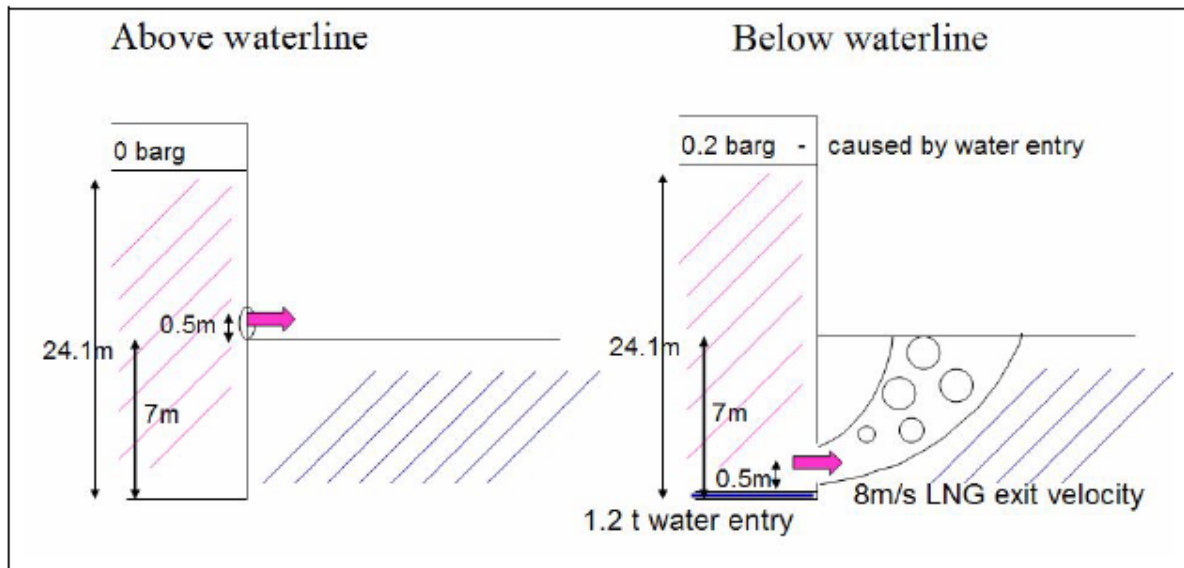
11.5.2 Pitblado et al. Det Norske Veritas, 2004

Ο DNV θεώρησε ρήγματα, πάνω και κάτω από την ίσαλο, με το μέγιστο αξιόπιστο μέγεθος που υπάρχει. Τα σενάρια που εξέτασε φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Οι διαρροές από ύψος πάνω από την ίσαλο είναι πιο απλοποιημένες συγκριτικά με αυτές που γίνονται κάτω από την ίσαλο. Τα ρήγματα θεωρούνται όλα τρύπες στην χειρότερη δυνατή κατάσταση (πλήρως ανοιχτά, κοφτερά στόμια, χωρίς περιορισμούς από κάποιο άλλο σκάφος όπως σε περίπτωση σύγκρουσης) και με ένα συντελεστή απελευθέρωσης $C_d = 0.6$. Ο DNV, επίσης, σύγκρινε τα σενάρια υποβρύχιας διαρροής με τα αντίστοιχα του Fay (2003). Το νερό θα είναι αυτό που θα

εισχωρήσει πρώτο μέσα στην δεξαμενή LNG, όπως αναφέρεται και στη μελέτη, αλλά είναι πιθανό μια ποσότητα ενός περίπου τόνου νερού να είναι ικανή να δημιουργήσει μια μικρή θετική πίεση μέσα στη δεξαμενή, ανίκανη βέβαια να προκαλέσει ζημιά στη κατασκευή, αλλά ικανή να αποτρέψει περαιτέρω είσοδο νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια απελευθέρωση σταθερού ρυθμού, του υγρού στη θάλασσα. Ο ρυθμός αυτός είναι μικρότερος από τον ρυθμό εκροής στη περίπτωση ρήγματος άνω της ισάλου, αλλά θα χαθεί όλη η ποσότητα που βρισκόταν μέσα στη δεξαμενή σε σύγκριση με το 69% του συνολικού όγκου, που χάνεται για ρήγμα άνω της ισάλου πλεύσης. Μερικές άλλες μελέτες (όπως του Fay, Cornwell) χρησιμοποίησαν μεγαλύτερα μεγέθη ρηγμάτων, αλλά δεν υπάρχουν ακόμα αξιόπιστοι μηχανισμοί που να τα προκαλούν.

Πίνακας 14. Αποτελέσματα διαρροών για διαφορετικά μεγέθη και τοποθεσία ρηγμάτων.

Discharge Case	Above waterline release			Below waterline release		
Hole Size (mm)	250	750	1500	250	750	1500
Initial rate (kg/s)	226	2030	8130	200	1800	7220
Duration (hr) †	19	2.2	0.54	30+ ^T	3+ ^T	0.8+ ^T
Total release (%)	69%			100%		



Σχήμα 26. Διαρροές LNG από ρήγμα πάνω και κάτω από την ίσαλο πλεύσης.

11.5.2.1 Αποστάσεις διασποράς σύννεφου ατμού

Η διασπορά μελετήθηκε για καταστάσεις αέρα F2, D3 και D5, όπου το γράμμα δείχνει την κατάσταση ατμοσφαιρικής σταθερότητας και το νούμερο την ταχύτητα του ανέμου σε m/s. Οι πιο συνηθισμένες συνθήκες στις περιοχές των λιμανιών είναι οι D5. Η θερμοκρασία αέρα και νερού θεωρήθηκε 20°C, 70% υγρασία, τραχύτητα επιφάνειας 0.3mm και περιβαλλοντική ηλιακή ροή 0.5 kW/m². Τα αποτελέσματα για τις διαρροές πάνω και κάτω από την ίσαλο φαίνονται στον Πίνακα 15.

Ένα χαρακτηριστικό των εύφλεκτων LNG διαρροών είναι ότι η αρχική περίοδος, που ακολουθεί την αρχή της διαρροής, συνήθως οδηγεί στο μεγαλύτερο μέγεθος λίμνης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

ρυθμός εκροής είναι στη μέγιστη τιμή του. Οι αποστάσεις διασποράς θεωρούνται οι αποστάσεις έως το ελάχιστο όριο ευφλεκτότητας (LFL), το οποίο καθιερώθηκε, από την επικύρωση πειραματικών δοκιμών, να αντιπροσωπεύεται από σημείο όπου είναι 0.85 του LFL.

Πίνακας 15. Αποτελέσματα αποστάσεων διασποράς στην ατμόσφαιρα για τα μέγιστα αξιόπιστα γεγονότα διαρροής LNG για καθαρό μεθάνιο.

Release case	Credible Scenarios	Highly Uncertain Scenarios	Non-credible Scenarios
Above waterline cases:			
250 mm Release Above Sea	D 3.0m/s = 370m D 5.0m/s = 380m	F 2.0m/s = 830m	
750 mm Release Above Sea	D 3.0m/s = 910m D 5.0m/s = 920m	F 2.0m/s = 1400m	
1500 mm Release Above Sea			D 3.0m/s = 1800m D 5.0m/s = 2000m F 2.0m/s = 3100m
Below waterline cases			
250 mm Release Below Sea	D 3.0m/s = 310m D 5.0m/s = 320m	F 2.0m/s = 430m	
750 mm Release Below Sea	D 3.0m/s = 810m D 5.0m/s = 840m	F 2.0m/s = 900m	
1500 mm Release Below Sea			D 3.0m/s = 1700m D 5.0m/s = 1900m F 2.0m/s = 3000m

Η επίδραση των διαφορετικών συστατικών του LNG στις επικίνδυνες ζώνες του κατώτερου ορίου ευφλεκτότητας (LFL) εξετάστηκε επίσης. Η συνήθης σύσταση του LNG από μεθάνιο είναι 92-99%. Το LNG που απομένει αποτελείται κυρίως από αιθάνιο και προπάνιο. Υπάρχουν ακόμα και άλλα συστατικά, όπως το βουτάνιο, αλλά η συνολική ποσότητα τους είναι πολύ μικρή (λιγότερη από 1%).

Για να μελετηθεί η επίδραση των συστατικών, πέρα του μεθανίου, στο σύννεφο ατμού στις ζώνες του LFL, έγινε μια ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιώντας ένα σύννεφο 94% μεθανίου και 6% αιθανίου. Βρέθηκε ότι χρησιμοποιώντας αυτό το μίγμα η υπολογισμένη απόσταση έως τις ζώνες του LFL θα αυξηθεί έως και 16% για κατάσταση F2, και περίπου 10% για ουδέτερη κατάσταση καιρού (D). Το μεθάνιο, ως πιο πτητικό, θα εξατμιστεί γρήγορα με αποτέλεσμα ο ατμός στη συνέχεια να εμπλουτιστεί με αιθάνιο. Αν και η μέγιστη απόσταση έως το LFL είναι αποτέλεσμα της προηγούμενης εξάτμισης, η απόσταση αυτή εξαρτάται κατά πολύ μεγάλο βαθμό από την σύσταση, σχεδόν εξολοκλήρου, μεθανίου. Έτσι αναμένεται να υπάρχει κάποια αύξηση στις αποστάσεις, αλλά θα είναι μικρότερη συγκριτικά με την αύξηση που θα είχαν εάν η σύσταση του σύννεφου ατμού είναι σαν το LNG.

11.5.2.2 Αποτελέσματα πυρκαγιάς λάμψης

Γενικά υποτίθεται στις εκτιμήσεις ρίσκου ότι οι μεγάλες πυρκαγιές λάμψης, που εμφανίζονται εδώ, θα έχουν κατεύθυνση από το σημείο της ανάφλεξης στη πηγή της διαρροής, με σχετικά μικρή ταχύτητα και μικρή εκπομπή ακτινοβολίας. Οι θερμικοί κίνδυνοι, στους οποίους εκτίθενται οι άνθρωποι μέσα στη εύφλεκτη περιοχή, είναι πολύ σοβαροί, αλλά περιορίζονται αρκετά πέρα από αυτή. Επομένως, οι επικίνδυνες ζώνες σχετικά με τις πυρκαγιές λάμψης είναι αυτές που φαίνονται στον πίνακα 16.

11.5.2.3 Αποτελέσματα πυρκαγιάς λίμνης

Τα αποτελέσματα της πυρκαγιάς λίμνης έγιναν με υπολογισμούς μέσω ενός προγράμματος (PHAST Model), αναγνωρίζοντας ότι το μοντέλο αυτό παρέχει μια συντηρητική εκτίμηση της διαμέτρου της λίμνης. Επιτρέπει το πάχος της LNG λίμνης από μια αρχική τιμή των 100mm να φτάσει στο 1mm στο τέλος της εξάπλωσης. Ο ρυθμός καύσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.8mm/s. Ο DNV πιστεύει ότι η πυρκαγιά λίμνης δεν μπορεί να αυτοδιατηρηθεί όταν η λίμνη έχει εξαπλωθεί πλήρως, το πάχος της είναι 1mm και ο ρυθμός καύσης είναι 0.8mm/s. Ένας ξεχωριστός υπολογισμός εξισώνοντας το ρυθμός απελευθέρωσης με τον σταθερό ρυθμό καύσης, δείχνει ότι η διάμετρος της διατηρούμενης πυρκαγιάς λίμνης είναι το 43 με 48% της αρχικής διαμέτρου της λίμνης που εξατμιζόταν. Οι εξωτερικές λεπτές μερίδες της αρχικής λίμνης θα καταναλωθούν σε δευτερόλεπτα, προτού η φλόγα φτάσει στο πίσω τμήμα της λίμνης, όπου θα είναι δύσκολο να διαφοροποιηθεί αυτή η μικρή έκρηξη από το γεγονός της πυρκαγιάς λάμψης που το προκαλεί. Η διατηρούμενη πυρκαγιά λίμνης θα είναι αρκετά διαφορετική από την πυρκαγιά λάμψης και θα παράγει μεγάλες ποσότητες θερμικής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα σχετικά με τις επικίνδυνες θερμικές ζώνες από την πυρκαγιά λίμνης έως 5kW/m², φαίνονται στον Πίνακα???. Αυτή η θερμική ροή είναι βλαβερή σε ανθρώπους απροστάτευτους και χωρίς καταφύγιο, που εκτίθενται σε αυτή για πάνω από 40 δευτερόλεπτα.

Πίνακας 16. Εύρος θερμικών κινδύνων για αξιόπιστα γεγονότα πάνω από την ίσαλο. (όλα για ακτινοβολία έως 5kW/m² και άνεμο 3m/s, μετρούμενα από το κέντρο της λίμνης)

Pool size	250mm hole	750mm case	1500mm case
Sustainable pool diameter	29m	86m	171m
Thermal hazard range	190m	440m	750m

11.5.3 SANDIA. Hightower et al., 2004

Η Sandia, για τους υπολογισμούς της, χρησιμοποίησε ένα παράδειγμα διαρροής LNG συνολικού όγκου 12,500m³ από μια δεξαμενή του σκάφους χωρητικότητας 25,000m³. Το αρχικό ύψος από το σημείο της παραβίασης της γάστρας και της στάθμης του υγρού μέσα στη δεξαμενή ήταν 15m, ενώ χρησιμοποιήθηκε μια πυκνότητα για το LNG ίση με 450 kg/m³.

Η ερμηνεία των συμβόλων είναι:

A_i = η επιφάνεια της διατομής της δεξαμενής

A_o = η επιφάνεια της διατομής του ρήγματος

m = η ποσότητα του υγρού στη δεξαμενή

v = ταχύτητα

v_o = αποτελεσματική ταχύτητα έξω από το ρήγμα

h_t = ύψος της στάθμης του υγρού

h_i = αρχικό ύψος υγρού

C_d = συντελεστής απελευθέρωσης

V = όγκος του υγρού

Οι αρχικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

$$\begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= (\rho A v)_{in} - (\rho A v)_{out} \\ (\rho A v)_{in} &= 0, \text{ thus} \\ \frac{dm}{dt} &= -(\rho A v)_{out} \end{aligned} \quad (79)$$

Η μάζα m μπορεί να εκφραστεί και ως ρV και ακόμα $V = A_t h$. Άρα:

$$\frac{d(\rho A_t h)}{dt} = -(\rho A v)_{out} \quad (80)$$

Η ταχύτητα του υγρού που εξέρχεται από τη δεξαμενή μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του ύψους μέσα από την εξίσωση του Bernoulli:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho v_t^2 + p_t + \rho g h_t &= \frac{1}{2} \rho v_o^2 + p_o + \rho g h_o \\ \rho g h_t &= \frac{1}{2} \rho v_o^2 \\ v_o &= \sqrt{2 g h_t} \end{aligned}$$

Και πολλαπλασιάζοντας με ένα συντελεστή απελευθέρωσης για να ληφθεί υπόψη και η αντίσταση στο ρήγμα, η ταχύτητα γίνεται:

$$v_o = C_d \sqrt{2 g h_t} \quad (81)$$

Ο συνολικός χρόνος της διαρροής βρίσκεται αντικαθιστώντας τη σχέση (81) στη (80) και ολοκληρώνοντας με αρχικές συνθήκες, $t=0$, $h=h_i$:

$$t = \sqrt{\frac{2}{g}} \frac{A_t}{C_d A_o} (\sqrt{h_i} - \sqrt{h})$$

και στη συνέχεια μπορεί να καθοριστεί το ύψος του υγρού συναρτήσει του χρόνου. Ο συνολικός χρόνος για να στραγγίσει είναι:

$$t = \sqrt{\frac{2}{g}} \frac{A_t}{C_d A_o} (\sqrt{h_i})$$

Ο ρυθμός εκροής του υγρού είναι μέγιστος στη αρχή της διαρροής, λόγω της μέγιστης υδροστατικής πίεσης μέσα στη δεξαμενή, ενώ είναι γραμμικής εξάρτησης με τον χρόνο έτσι ώστε να καθορίζεται ο μέσος ρυθμός εκροής διαιρώντας τον μέγιστο ρυθμό δια 2. Ο μέσος αυτός ρυθμός είναι:

$$\left(\frac{dV}{dt} \right)_{average} = \frac{-(Av)_{out}}{2} = -\frac{C_d A_o}{2} \sqrt{2gh_i} \quad (82)$$

Η διάμετρος της λίμνης που δημιουργείται υπολογίζεται υποθέτοντας σταθερή κατάσταση όπου η ποσότητα που εισέρχεται μέσα της είναι ίση με την ποσότητα που εξατμίζεται λόγω της ροής θερμότητας από το νερό, κάτω από τη λίμνη, και από την πυρκαγιά, πάνω από τη λίμνη. Έτσι:

$$(\rho Av)_{in} = (\rho Av)_{out}$$

$$\left(\frac{dV}{dt} \right)_{average} = (Av)_{out} = \frac{\pi D^2}{4} v_{total}$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi v_{total}} \left(\frac{dV}{dt} \right)_{average}}$$

(83)

Το μοντέλο της Sandia σχετικά με την πυρκαγιά λίμνης είναι το μοντέλο συμπαγούς κυλινδρικής φλόγας, όπου η επίδραση του ανέμου θεωρείται αμελητέα.

Για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγα, χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος του Moorhouse, όπου το u^* είναι η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα του ανέμου, η οποία εδώ θεωρήθηκε ότι είναι ίση με 1 (για χαμηλές ταχύτητες ανέμου).

$$H = 6.2 D \left[\dot{m}'' / \rho_a \sqrt{gD} \right]^{0.254} u^{*-0.044}$$

(84)

Η θερμική ακτινοβολία πάνω σε ένα αντικείμενο είναι:

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

$$q'' = E_p \tau F \quad (85)$$

Πίνακας 17. Αποτελέσματα από την διαρροή LNG στο νερό με βάση το μοντέλο της SANDIA.

HOLE SIZE (m ²)	TANKS BREACHED	DISCHARGE COEFFICIENT	BURN RATE (m/s)	SURFACE EMISSIVE POWER (kW/m ²)	POOL DIAMETER (m)	BURN TIME (min)	DISTANCE TO 37.5 kW/m ² (m)	DISTANCE TO 5 kW/m ² (m)
ACCIDENTAL EVENTS								
1	1	.6	3X10 ⁻⁴	220	148	40	177	554
2	1	.6	3X10 ⁻⁴	220	209	20	250	784
INTENTIONAL EVENTS								
2	3	.6	3 x 10 ⁻⁴	220	209	20	250	784
5	3	.6	3 x 10 ⁻⁴	220	572	8.1	630	2118
5*	1	.6	3 x 10 ⁻⁴	220	330	8.1	391	1305
5	1	.9	3 x 10 ⁻⁴	220	405	5.4	478	1579
5	1	.6	2 x 10 ⁻⁴	220	395	8.1	454	1538
5	1	.6	3 x 10 ⁻⁴	350	330	8.1	529	1652
10	1	.6	3 x 10 ⁻⁴	220	467	4.1	549	1823

12. ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ 4 ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στον Πίνακα 18 και στον Πίνακα 19 φαίνονται οι αρχικές υποθέσεις που έγιναν στους υπολογισμούς των τεσσάρων μοντέλων και τα αποτελέσματά τους, αντίστοιχα.

Πίνακας 18. Αρχικές υποθέσεις μοντέλων

STUDY	TIME TO EMPTY (min)	VAPORIZES DURING SPREAD	WAVE EFFECTS INCLUDED	SHAPE OF POOL	IGNITION TIME	FLAME MODEL	COMBUSTION MODE	IGNITION OCCURS AT POOL, NOT IN VAPOR CLOUD
Lehr	Instantly	Yes	No	Circle	Instantly upon release	Solid cylinder	Diffusion flame; No explosion	Yes
Fay	Varies with hole size	Yes	No	Semi-circle	Instantly upon release	Point source	Diffusion flame; No explosion	Yes
Quest	2	Yes	Yes	Circle	Instantly after spread	Solid cylinder; including tilt for wind effects	Diffusion flame; No explosion	Yes
Vallejo	Varies with hole size	Yes	No	Circle	Instantly upon release	Point Source	Diffusion flame; No explosion	Yes

Πίνακας 19. Αποτελέσματα μοντέλων

STUDY	FUEL SPILL VOLUME (m ³)	AREA OF FUEL SPILL (m ²)	"SKIN BURN" DISTANCE ^a (m)	"PAPER IGNITION" DISTANCE ^b (m)	FIRE DURATION (min)
Lehr	500 (hole area not specified)	Not reported	500 ^c	Not reported	2-3
Fay ^e	14,300 (20m ² hole area)	200,000	1900	930	3.3
Quest	12,500 (20m ² hole area)	9503	490 ^d	281 ^d	28.6
Vallejo	14,300 (20m ² hole area)	120,000	1290	660	9.0

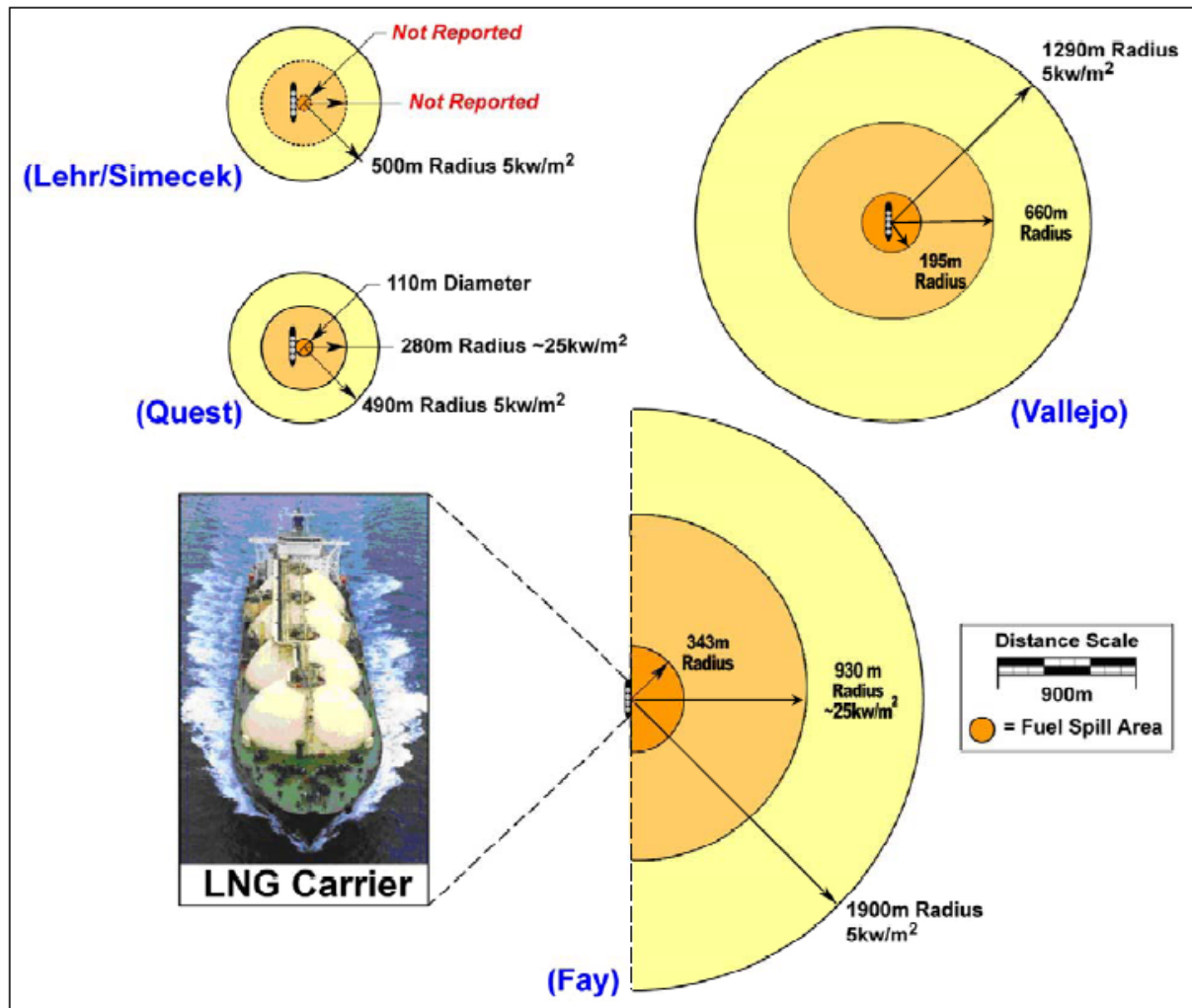
^a Μια έκθεση 30 δευτερολέπτων σε ακτινοβολία 5kW/m² προκαλεί εγκαύματα 2^{ου} βαθμού σε αυτή την απόσταση.

^b Μια έκθεση 17 δευτερολέπτων σε ακτινοβολία 22kW/m² προκαλεί την ανάφλεξη εφημερίδας σε αυτή την απόσταση.

^c Απόσταση από το άκρο της διαρροής.

^d Υποθέτοντας ταχύτητα ανέμου 9m/s

^e Ο Fay αναλύει ένα εύρος μεγέθους τρυπών. Εδώ έγινε μια επιλογή για τη σύγκριση.



Σχήμα 27. Γραφική επισκόπηση των αποτελεσμάτων των μοντέλων των Lehr, Fay, Quest και Koorman (Vallejo studies)

ΓΙΑΤΙ ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΦΕΡΟΥΝ:

Είναι δύσκολο να γίνει μια άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων διότι κάθε μια παρέχει ένα διαφορετικό σενάριο και υποθέσεις. Το παράδειγμα που δίνεται από τον Lehr είναι αρκετά δύσκολο να συγκριθεί με αυτά των υπολοίπων εξαιτίας της κατά πολύ μικρότερης ποσότητας LNG που διαρρέει. Η διάμετρος της λίμνης, η θερμική ακτινοβολία, η διάρκεια της καύσης θα εξαρτώνται από τις υποθέσεις που γίνονται αρχικά. Προφανώς, μια μεγαλύτερη πυρκαγιά λίμνης θα προέκυπτε εάν και οι πέντε δεξαμενές του σκάφους παραβιαζόντουσαν, οδηγώντας έτσι σε διαρροή μεγαλύτερης ποσότητας.

Η άμεση σύγκριση είναι επίσης δύσκολη λόγω της έλλειψης πληροφοριών για αυτές τις μελέτες. Οι μελέτες των Lehr και Vallejo δεν δηλώνουν την επιφάνεια της λίμνης που υπολόγισαν. Ο Quest δεν παρέχει την εκλυόμενη ισχύ επιφάνειας που χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς

μεταφοράς θερμότητας που κάνει. Η μελέτη του Vallejo δεν δίνει πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο φλόγας που υιοθετεί.

Στον Quest, ο χρόνος της ανάφλεξης της λίμνης δεν είναι ξεκάθαρος στην ανάλυση. Τονίζεται ότι προκύπτει ένας υψηλότερος ρυθμός εξάτμισης λόγω της ακτινοβολίας από τη φλόγα της λίμνης. Όταν αυτό συμπεριληφθεί στο μοντέλο, μειώνεται ο χρόνος εξάτμισης της λίμνης αλλά όχι η διάμετρος της. Προφανώς, επιτρέπεται στην λίμνη να εξαπλωθεί πλήρως με την επίδραση των κυμάτων πριν την ανάφλεξη. Αυτό συγκρούεται με τη δήλωση ότι η ανάφλεξη προκύπτει εξαιτίας της σύγκρουσης με άλλο σκάφος, κάτι το οποίο εννοεί άμεση ανάφλεξη.

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η επίδραση της ακτινοβολίας στο ρυθμό εξάτμισης, μπορούμε να θεωρήσουμε μια περίπτωση σταθερής κατάστασης, στην οποία ο ρυθμός ροής του υγρού στη λίμνη εξισορροπείται από τον ρυθμό εξάτμισης, ο οποίος με τη σειρά του, προέρχεται από τη μεταφορά θερμότητας του νερού αλλά και της πυρκαγιάς, στη λίμνη. Αν χρησιμοποιηθεί ένας ρυθμός εκροής 40,056 kg/s (από τον Quest) και ένας ρυθμός εξάτμισης 8×10^{-4} m/s (0.346 kg/m²s), προκύπτει μια ακτίνα λίμνης 192 m. Όμως, μειώνεται η ακτίνα συγκριτικά με την ακτίνα των 253 m, πριν συμπεριληφθεί η επίδραση των κυμάτων. Αυτό είναι μια προσέγγιση γιατί, στην πραγματικότητα, ο ρυθμός εκροής του υγρού από τη δεξαμενή, μειώνεται με το χρόνο, τη στιγμή που το προηγούμενο παράδειγμα υποθέτει μια αστείρευτη πηγή που παρέχει σταθερή ροή.

Από τις μελέτες, είναι δυνατό να συγκριθούν τα αποτελέσματα για την επιφάνεια της λίμνης του Quest και του Fay, επειδή η ποσότητα υγρού που διαρρέει είναι παρόμοια: 12,500 εναντίον 14,300 m³ αντίστοιχα, καθώς παρόμοια είναι και τα μεγέθη των ρηγμάτων. Η τιμή της ακτίνας της λίμνης του Quest, πριν συμπεριλάβει την επίδραση των κυμάτων, είναι 253 m. Ο Fay αναφέρει μια τιμή των 252 m, εάν η ακτίνα υπολογίζεται με βάση το σχήμα του κύκλου. Επομένως, και οι δύο μελέτες έχουν παρόμοια αποτελέσματα στη περίπτωση όπου δεν λαμβάνεται υπόψη τα κύματα. Ο Quest βρήκε, ότι περιλαμβάνοντας την επίδραση των κυμάτων, η ακτίνα της λίμνης μειώθηκε στα 55 m σε περιπτώσεις μεγάλων ανέμων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο Quest δίνει μια τιμή ακτίνας λίμνης αρκετά διαφορετική από τις άλλες. Ο Fay θεώρησε μια τελείως ομαλή επιφάνεια νερού πάνω στην οποία εξαπλώνεται το LNG, σε αντίθεση με τον Quest που χρησιμοποίησε και κύματα.

Η απόσταση, που υπολόγισαν οι Quest και Fay, που απαιτείται για ένα αντικείμενο να δεχθεί ακτινοβολία περίπου 5kW/m², έχει σημαντική απόκλιση: 493 m έναντι 1900 m, αντίστοιχα. Ένας προφανής λόγος για αυτή τη διαφορά είναι το ότι στην ανάλυση του ο Fay εκτιμά μια πολύ μεγαλύτερη πυρκαγιά λίμνης. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας τη σχέση του Fay για τον υπολογισμό τη ροής θερμικής ακτινοβολίας και την επιφάνεια λίμνης του Quest, η απόσταση που προκύπτει για ακτινοβολία 5kW/m² είναι 353 m. Συνεπώς, η επιλογή της επιφάνειας λίμνης είναι πολύ σημαντική.

Ο Fay, επίσης, δεν μοντελοποίησε τη φλόγα στην ανάλυση του. Η σχέση που χρησιμοποίησε παρέχει μια προσέγγιση της θερμικής ακτινοβολίας που εκλύεται από μια πυρκαγιά λίμνης. Αυτή η ροή θερμότητας από την πυρκαγιά σε ένα αντικείμενο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος της λίμνης, το σχήμα της φλόγας, οπτικοί παράγοντες κ.α.

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ
ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ

Οι μελέτες του Lehr και του Fay χρησιμοποιούν λογικές τιμές για τους ρυθμούς καύσης του LNG. Ο Quest δεν καθορίζει ρητά την τιμή που χρησιμοποίησε, αν και προκύπτει ότι ήταν $2.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ($0.09 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

Η διάρκεια καύσης των 28.6 λεπτών που δίνει ο Quest είναι λογική σε σχέση με την ακτίνα της λίμνης και την ποσότητα που διέρρευσε. Ένας χρόνος καύσης 31.6 λεπτών προκύπτει, υποθέτοντας μια μαζική ροή $0.3 \text{ kg/m}^2\text{s}$, μια ακτίνα λίμνης 55 m και διαρροή $12,500 \text{ m}^3$. Ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα καύσης προκύπτει για αυτό το παράδειγμα γιατί θεωρείται ότι όλο το LNG που διαρρέει είναι διαθέσιμο για καύση. Για μια ακτίνα λίμνης 252 m, ένας χρόνος καύσης 1.7 λεπτών προκύπτει, για διαρροή $14,300 \text{ m}^3$ και μαζική ροή 0.3 kg/m^2 . Αυτή η περίπτωση υποθέτει ότι η λίμνη αναφλέγεται αφού εξαπλωθεί στα 252 m. Ο Fay αναφέρει μια διάρκεια καύσης 3.3 λεπτών με ένα όγκο διαρροής $14,300 \text{ m}^3$, ακτίνα 252 m και ροή 0.345 kg/m^2 . Ο χρόνος του Fay διαφέρει γιατί αναφέρεται σε μια λίμνη που καίγεται ενώ εξαπλώνεται.

Έτσι, υπάρχει μια αντίστροφη σχέση μεταξύ της διάρκειας της καύσης και του μεγέθους της φωτιάς. Για πυρκαγιές αυξανόμενου μεγέθους, η διάρκεια της καύσης μειώνεται. Είναι ενδιαφέρον το ότι ο Quest ανέφερε ότι χρειάστηκαν 2 λεπτά για μια ποσότητα $12,500 \text{ m}^3$ LNG να διαρρεύσουν από ένα ρήγμα διαμέτρου 5 m τη στιγμή που ο Fay δίνει χρόνο καύσης 3.3 λεπτά για διάμετρο λίμνης ίδιου μεγέθους ρήγματος. Η διάρκεια διαρροής του Fay θα είναι μεγαλύτερη, καθώς θεώρησε διαρροή $14,300 \text{ m}^3$. Συνεπώς, ο χρόνος για τη διαρροή του υγρού θα ήταν περίπου ίδιος με το χρόνο καύσης στο παράδειγμα του Fay.

Πίνακας 20. Σύγκριση των αποτελεσμάτων του Fay και του Quest.

STUDY	HOLE SIZE (m)	VOLUME SPILLED (m^3)	POOL RADIUS; NO WAVES (m)	POOL RADIUS; WAVES (m)	DISTANCE TO 5 kW/m^2	BURN DURATION (min)
Quest	5	12,500	253	55	493 m**	28.6
Fay	5	14,300	252	Not considered	1900 m*	3.3

*με το μοντέλο του Fay, αυτή η τιμή θα ήταν 353m αν η λίμνη είχε 55m ακτίνα

**βασισμένο σε ακτίνα λίμνης 55m

13. ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΜΙΑΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια γενική περιγραφή των μέτρων που θα πρέπει να λαμβάνονται για την μείωση και την πρόληψη πιθανής απελευθέρωσης από τις διεθνείς κοινότητες, τις εκάστοτε κυβερνήσεις, τις ναυτιλιακές επιχειρήσεις, και άλλες εταιρίες που ασχολούνται με τον τομέα LNG. Πιο συγκεκριμένα το κεφάλαιο θα καλύψει τα παρακάτω:

- Εξοπλισμός
 - Αναφορά στους βασικούς τύπους των LNG πλοίων
- Μέτρα πρόληψης
 - Διεθνείς κανονισμοί και βιομηχανικές προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό LNG πλοίων
 - Σχεδίαση και λειτουργικά χαρακτηριστικά σχετικά με την πρόληψη πιθανής απελευθέρωσης
 - Μέτρα ασφάλειας σχετικά με την πρόληψη πιθανής απελευθέρωσης
- Μέτρα μείωσης
 - Μέτρα που μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση των επιπτώσεων μιας απελευθέρωσης υγροποιημένου φυσικού αερίου

13.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Όπως είναι γνωστό το υγροποιημένο φυσικό αέριο μεταφέρεται μέσω θάλασσας με τρεις βασικούς τύπους πλοίων: πλοία μεμβρανικού τύπου, πλοία με ανεξάρτητες πρισματικές δεξαμενές και πλοία με ανεξάρτητες σφαιρικές δεξαμενές. Καθένας από τους τρεις τύπους που αναφέραμε πρέπει να εκπληρεί ορισμένες διεθνείς και U.S Coast Guard (USCG) απαιτήσεις. Επειδή το καθένα έχει διαφορετική σχεδίαση δεξαμενών δεν θα γίνει αναλυτική περιγραφή αυτών καθώς δεν αποτελεί σκοπό.

Παρόλα αυτά όλες οι δεξαμενές μεταφοράς LNG έχουν είτε δύο ειδικά σχεδιασμένους χώρους για αποθήκευση σε χαμηλές θερμοκρασίες (μεμβρανικού τύπου) είτε απλούστερους χώρους ώστε να χειρίζονται με ευκολία πιθανές διαρροές. Επίσης οι δεξαμενές και των τριών τύπων πλοίων LNG είναι διαχωρισμένες από το εξωτερικό περιβάλλον με την ύπαρξη διπλών τοιχωμάτων. Έτσι σε περίπτωση ατυχήματος διαρροή LNG θα είχαμε μόνο εάν είχαμε διάτρηση όχι μόνο της γάστρας (εξωτερική και εσωτερική) αλλά και της δεξαμενής.

13.2 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ

13.2.1 Κανονισμοί και βιομηχανικές προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό LNG πλοίων

Τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου αερίου όπως και τα περισσότερα υπερωκεάνια πλοία ακολουθούν κανόνες και κανονισμούς οι οποίοι έχουν ιδρυθεί από πολλούς φορείς. Αυτοί οι φορείς είναι γνωστοί και έχουν κατηγοριοποιηθεί ως τον Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO), το κράτος σημαίας (flag state), τις λιμενικές αρχές (port state) και τους νηογνώμονες (classification societies). Καθένας από αυτούς τους φορείς έχει συγκεκριμένες ευθύνες και το αποτέλεσμα αυτών των κανόνων και των κανονισμών είναι ότι όλες οι όψεις του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας των LNG πλοίων έχουν διευθετηθεί από αυτούς. Γενικά τα LNG carriers είναι μοναδικά τόσο στον σχεδιασμό και στην κατασκευή τους όσο και στον χειρισμό τους και αυτό λόγω στις κρυογόνες ιδιότητες του LNG. Έτσι χρησιμοποιούνται ειδικά υλικά, ειδικές μέθοδοι κατασκευής και ο τρόπος λειτουργίας τους πρέπει να είναι σωστά σχεδιασμένους. Γενικοί κανονισμοί που αφορούν γενικά τα πλοία στη θάλασσα δεν ισχύουν πάντοτε και για τα πλοία LNG. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί πιο ειδικό κανονισμοί από τους διάφορους φορείς ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια στα LNG δεξαμενόπλοια καθώς και στα λιμάνια.

13.2.2 Καθορισμός εννοιών

International Maritime Organization (IMO): Ένας κλάδος των Ηνωμένων Εθνών που λειτουργεί υπό την αιγίδα της Συνθήκης Ηνωμένων Εθνών σχετικά με το νόμο της θάλασσας. Η Συνθήκη IMO τέθηκε σε ισχύ το 1958, και η νέα οργάνωση συστάθηκε για πρώτη φορά το επόμενο έτος. Οι σκοποί της οργάνωσης, όπως συνοψίζονται από το άρθρο 1 (a) της Συνθήκης, είναι «να παράσχει το υπόβαθρο για συνεργασία μεταξύ των κυβερνήσεων στον τομέα των κυβερνητικών κανονισμών και των πρακτικών σχετικά με τα τεχνικά θέματα όλων των ειδών που έχουν επιπτώσεις στη ναυτιλία που εμπεριέχεται και στο διεθνές εμπόριο για να ενθαρρυνθεί και να διευκολυνθεί η γενική θέσπιση των υψηλότερων εφαρμόσιμων προτύπων σε θέματα σχετικά με τη ναυτιλιακή ασφάλεια, την αποδοτικότητα της ναυσιπλοΐας και την πρόληψη και τον έλεγχο της θαλάσσιας ρύπανσης από τα σκάφη. « Η οργάνωση εξουσιοδοτείται επίσης για να εξετάσει τα διοικητικά και νομικά θέματα σχετικά με αυτούς τους σκοπούς. Ο IMO χρησιμεύει να γράψει τις διεθνείς απαιτήσεις για την ασφάλεια και την πρόληψη ρύπανσης για τα σκάφη σε διεθνές επίπεδο. Αυτοί οι κανόνες αντιμετωπίζονται έπειτα με τους διάφορους τρόπους από τη σημαία και τις λιμενικές αρχές.

Flag States: το κράτος σημαίας του πλοίου, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, ο Παναμάς, οι Μπαχάμες, κ.λπ. Στις Συνθήκες του IMO, το κράτος σημαίας αναφέρεται μερικές φορές ως «διοίκηση». Το κράτος σημαίας καθιερώνει τους κανονισμούς για την κατασκευή και τη λειτουργία των σκαφών που καταχωρούνται κάτω από τη σημαία του. Πολλές από τις απαιτήσεις κράτους σημαίας είναι βασισμένες στο σκάφος που συμμορφώνεται με τους κανονισμούς του IMO.

Port State: Η αρχή που έχει την αρμοδιότητα πέρα από την περιοχή λιμένων και των υδάτων υπό εθνικό έλεγχο. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, αυτό είναι χαρακτηριστικά το USCG, που συμπληρώνεται από το κράτος και τις τοπικές αρχές. Όπως καθορίζεται από τον IMO, ο κρατικός έλεγχος λιμένων (Port State Control - PSC) είναι η επιθεώρηση των ξένων σκαφών στους εθνικούς λιμένες για να ελεγχτεί ότι ο όρος του σκάφους και ο εξοπλισμός του συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις των διεθνών κανονισμών και ότι το σκάφος είναι

επανδρωμένο και λειτουργεί σύμφωνα με αυτούς τους κανόνες. Το USCG καθορίζει τον κρατικό έλεγχο λιμένων ως «τη διαδικασία από την οποία ένα έθνος ασκεί τη διεθνή αρχή του στα ξένα σκάφη όταν εκείνα βρίσκονται σε ύδατα υποκείμενα στην αρμοδιότητά του.»

Νηογνώμονες: Νηογνώμονας είναι μια βιομηχανική οργάνωση, η οποία εκδίδει τα πιστοποιητικά ταξινόμησης ή/και των διεθνών πιστοποιητικών Συνθηκών. Τα πιστοποιητικά ταξινόμησης είναι βασισμένα στους κανόνες που δημοσιεύονται από τον Νηογνώμονα ο οποίος έχει εγκρίνει την σχεδίαση και κατασκευή των πλοίων και των παράκτιων εγκαταστάσεων. Ένας Νηογνώμονας έχει συγκεκριμένες διαδικασίες σχετικά με το επίπεδο αναθεώρησης και έρευνας σχεδίου που απαιτούνται για να επιτρέψουν σε ένα πλοίο για «να ταξινομηθεί.» Η ταξινόμηση δείχνει ότι το πλοίο κάλυψε τους εφαρμόσιμους κανόνες, τις διεθνείς απαιτήσεις, και τις συγκεκριμένες εθνικές απαιτήσεις.

Μεμβρανικού τύπου δεξαμενές: Μη αυτοφερόμενες δεξαμενές που αποτελούνται από ένα πολύ λεπτό επίπεδο (μεμβράνη) ενισχυμένο με ένα στρώμα μόνωσης. Η μεμβράνη είναι σχεδιασμένη με τρόπο ώστε θερμικές διαστολές και άλλες συστολές να αντισταθμίζονται χωρίς αδικαιολόγητη τάνυση της μεμβράνης.

Ανεξάρτητες δεξαμενές: αυτοφερόμενες δεξαμενές οι οποίες δεν αποτελούν μέρος της γάστρας του πλοίου και δεν είναι απαραίτητες για την αντοχή του. Υπάρχουν τρεις τύποι ανεξάρτητων δεξαμενών:

- Τύπος A – σχεδιασμένες κυρίως με βάση standards κατασκευαστικής ανάλυσης κλασσικών πλοίων
- Τύπος B – που σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας τις πρότυπες δοκιμές, τα αναλυτικά εργαλεία, και τις μεθόδους ανάλυσης ώστε να καθοριστούν τα επίπεδα πίεσης, η ζωή κόπωσης, και τα χαρακτηριστικά διάδοσης ρωγμών.
- Τύπος C – δεξαμενές σχεδιασμένες για τα ειδικά κριτήρια πίεσης ατμού (τυπικά όχι εφαρμόσιμα για LNG πλοία)

13.2.3 Καθορισμός σχεδίασης LNG πλοίων

Ο IMO παρέχει τη βάση για το πλαίσιο των διεθνών κανονισμών για την ναυτιλία μέσω των ενεργών μελών του. Ο IMO δημοσιεύει έγγραφα που περιγράφουν τις διεθνείς απαιτήσεις για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των πλοίων, τη λειτουργία, την ασφάλεια και την επάνδρωσή τους. Υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις και συνθήκες που αφορούν τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και την κατασκευή των πλοίων LNG. Αυτές είναι οι παρακάτω:

- Διεθνείς συνθήκες για την αποφυγή σύγκρουσης στη θάλασσα, 1972/1981
- Ασφάλεια ζωής στη θάλασσα (SOLAS), 1974/1981
- Κώδικας για την κατασκευή και τον εξοπλισμό πλοίων που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια χύδην (Gas Carrier Code), 1983
- Διεθνής κώδικας για πλοία που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια χύδην (IGC Code), 1993
- 1994/1996 τροποποίηση του IGC
- Διεθνής συνθήκη για τα πρότυπα στην εκπαίδευση των ναυτικών (Standards of Training, Certification and Watchkeeping, STCW), 1978

- Διεθνής κώδικας διαχείρισης για την ασφαλή λειτουργία των πλοίων (IMC) και την πρόληψη ρύπανσης (ISM Code) που υιοθετήθηκε από τον IMO Resolution A.741 (18) το 1994

Η σημαντικότερη από αυτές τις διεθνείς απαιτήσεις για τις νέες κατασκευές πλοίων LNG είναι ο IGC Code.

Το κράτος σημαίας είναι υπεύθυνο για να εξασφαλίσει ότι τα πλοία που σκοπεύουν να φορέσουν τη σημαία του είναι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα με βάση τα διεθνή πρότυπα. Συνήθως εκτελεί τα καθήκοντά του (1) με επιθεωρήσεις στον σχεδιασμό από το προσωπικό του και (2) απαιτώντας τα πλοία να κατασκευάζονται σε συμφωνία με τους κανόνες σχεδίασης και επιθεώρησης ενός νηογνώμονα. Επίσης έχει ευθύνες όσο αναφορά την λειτουργία και τη σωστή συντήρηση του πλοίου.

Το κράτος λιμένος θέτει κανόνες και νόμους για τα λιμάνια του και τις περιοχές που ανήκουν στην δικαιοδοσία του. Για παράδειγμα, σε περίπτωση πλοίων που θέλουν να εισέλθουν στις U.S, ο USCG ασκεί έλεγχο στο κράτος λιμένος (port states). Έτσι ως μέτρα ελέγχου οι λιμενικές αρχές μπορούν να καθυστερήσουν ένα πλοίο για πολλούς και διάφορους λόγους όπως για θέματα ασφάλειας, θέματα ρύπανσης, θέματα λειτουργικότητας, την κατάσταση του πλοίου καθώς και όσο αναφορά και την κατάσταση του πληρώματος (μετανάστες κ.α).

Επιχειρήσεις (όπως αυτές που ναυλώνουν τα πλοία) μπορούν να πραγματοποιήσουν περιοδικούς ελέγχους όσο αναφορά την ασφάλεια του πλοίου και την ικανοποίηση κάποιων απαιτήσεων. Τέτοιες επιθεωρήσεις εξυπηρετούν όχι μόνο στην εξασφάλιση της ασφάλειας του πλοίου αλλά στην συνεισφορά της αξιόπιστης ομαλότητας του εμπορίου του LNG.

13.2.4 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά για την πρόληψη απελευθέρωσης LNG

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχουν όλα τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου όσο αναφορά την σχεδιάσή τους είναι:

- Κατασκευή διπλών τοιχωμάτων
- Απομόνωση των χώρων φορτίου και του δικτύου σωληνώσεων
- Δυνατότητα προσέγγισης για λοιπές επιθεωρήσεις
- Συστήματα ανίχνευσης πιθανών διαρροών LNG από τις δεξαμενές
- Σχεδιαστικές απαιτήσεις συγκράτησης του φορτίου
- Κατασκευαστικές απαιτήσεις
- Δευτεροβάθμιοι χώροι συγκράτησης φορτίου σε περίπτωση διαρροής
- Χρήση κατάλληλων υλικών και συστημάτων για χαμηλές θερμοκρασίες
- Απαιτήσεις κατασκευής και δοκιμών για τα containers του φορτίου
- Απαιτήσεις δικτύων σωλήνωσης
- Συστήματα και βαλβίδες ασφάλειας
- Συστήματα ελέγχου πίεσης και θερμοκρασίας
- Συστήματα εκτόνωσης πιέσεων
- Συστήματα προστασίας κενού
- Συστήματα προστασίας φωτιάς
- Πίνακας ελέγχου των δεξαμενών φορτίων

- Συστήματα ανίχνευσης αερίου
- Συστήματα ασφάλειας τερματισμού σε κατάσταση ανεφοδιασμού
- Συνδέσεις έκτακτης απελευθέρωσης

Κατασκευή διπλών τοιχωμάτων: Όλα τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου πρέπει να έχουν διπλά τοιχώματα και διπύθμενα, ώστε να παρέχεται σημαντική προστασία ενάντια σε οποιαδήποτε απελευθέρωση LNG που μπορεί να συμβεί λόγω οποιασδήποτε εξωτερικής ζημιάς όπως προσάραξη, σύγκρουση, τρομοκρατική επίθεση κ.α.. Ο κώδικας IGC απαιτεί οι δεξαμενές του φορτίου, για να προστατευτούν από ζημιά που μπορεί να προκληθεί από μία σύγκρουση ή μία προσάραξη, να απέχει από το εσωτερικό κέλυφος του πλοίου μια ελάχιστη απόσταση. Επίσης τα LNG πλοία πρέπει να αντέχουν τις φυσιολογικές επιπτώσεις της εκροής που πιθανόν να συμβεί λόγω μιας εξωτερικής ζημιάς. Τυπικά μία σύγκρουση ή μία προσάραξη θα συμβεί κατά πάσα πιθανότητα είτε από (1) βλάβη του συστήματος πρόωσης ή του πηδαλιού, είτε (2) βλάβη του εξοπλισμού πλοήγησης είτε (3) ανθρώπινο λάθος.

Απομόνωση των χώρων φορτίου και του δικτύου σωληνώσεων: Ο IGC κώδικας απαιτεί ότι τα hold spaces (ο εσώκλειστος χώρος της κατασκευής του πλοίου στον οποίο εδράζονται τα μέσα αποθήκευσης του φορτίου) να είναι διαχωρισμένος από τους χώρους των μηχανολογικών εγκαταστάσεων, της ενδιαίτησης, των σταθμών ελέγχου, των δεξαμενών πόσιμου νερού, των chain lockers, των stores κ.α. Επίσης υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις για τον απομόνωση του δικτύου σωληνώσεων του φορτίου από άλλες σωληνώσεις με σκοπό την αποφυγή της μεταφοράς του φορτίου ή ατμών του μέσω άλλων σωληνώσεων. Επίσης στον IGC Code καθορίζονται και οι πιο κατάλληλοι χώροι για την ενδιαίτηση, για τα δωμάτια υπηρεσίας, τους σταθμούς ελέγχου και τους χώρους των μηχανολογικών εγκαταστάσεων.

Δυνατότητα προσέγγισης για λοιπές επιθεωρήσεις: Προκειμένου να διευκολυνθεί η επιθεώρηση των διάφορων κατασκευαστικών στοιχείων και του εξοπλισμού στα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου αερίου, ο κώδικας IGC απαιτεί τις ρυθμίσεις που επιτρέπουν την οπτική επιθεώρηση τουλάχιστον της μιας πλευράς της εσωτερικών γάστρας και της μόνωσης που βρίσκονται στα hold spaces. Απαιτείται επίσης η επαρκής πρόσβαση στις δεξαμενές του φορτίου ώστε να επιτρέπεται η εσωτερική επιθεώρησή τους. Η δυνατότητα να προσεγγίζονται αυτές οι περιοχές επιτρέπει στις περιοδικές έρευνες και τις επιθεωρήσεις να εκτελούνται προκειμένου να προσδιοριστεί η οποιαδήποτε ζημιά που έχει εμφανιστεί.

Συστήματα ανίχνευσης πιθανών διαρροών LNG από τις δεξαμενές: Ο IGC Code απαιτεί την ύπαρξη hold spaces και περιοχές μόνωσης (όπου μπορεί να συμβεί μία διαρροή φορτίου) εξοπλισμένα με ανιχνευτές αερίου και συναγερμούς χαμηλής θερμοκρασίας.

Σχεδιαστικές απαιτήσεις συγκράτησης του φορτίου: Ο IGC Code απαιτεί την ανάπτυξη ενός σχεδίου φύλαξης του φορτίου που να λαμβάνει υπόψη τις μέγιστες πιέσεις του ατμού του και το μέγιστο επιτρεπτό όριο των βαλβίδων ανακούφισης. Επίσης η επιλογή των υλικών κατασκευής των δεξαμενών του πρέπει να είναι βασισμένη σε μία ελάχιστη θερμοκρασία σχεδίασης, και πρέπει να φαίνεται ότι η θερμοκρασία της δεξαμενής δεν πρέπει να πέφτει κάτω από αυτή για την οποία έχει σχεδιαστεί. Τέλος οι φορτίσεις σχεδίασης που δέχεται το σύστημα φύλαξης του φορτίου πρέπει να βασίζονται σε συγκεκριμένους συνδυασμούς πιθανών φορτίσεων (εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις, δυναμικά φορτία λόγω κίνησης του πλοίου, κρουστικά φορτία, κατανομές βαρών)

Κατασκευαστικές απαιτήσεις: Ο IGC Code απαιτεί ότι η κατασκευαστική ανάλυση είναι σύμφωνη με τη σχεδίαση του κάθε τύπου χώρου φύλαξης του φορτίου ώστε να λαμβάνονται υπόψη όλες οι φορτίσεις σε κάθε τύπο φύλαξης του φορτίου. Ο IGC καθορίζει τα επιτρεπτά όρια αντοχής για κάθε ανεξάρτητη δεξαμενή.

Δευτεροβάθμιοι χώροι συγκράτησης φορτίου σε περίπτωση διαρροής: Τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου που χτίζονται σύμφωνα με τον IGC Code είναι υποχρεωμένα να έχουν ένα δευτεροβάθμιο χώρο συγκράτησης φορτίου. Σκοπός αυτών των χώρων είναι να κατακρατούν πιθανές διαρροές LNG από τις κύριες δεξαμενές του (περίπου για 15 μέρες), ώστε να αποφεύγεται η μείωση της θερμοκρασίας σε μη επιθυμητό επίπεδο της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Μεμβρανικού τύπου και ανεξάρτητες δεξαμενές τύπου A χρειάζονται έναν ολοκληρωμένο δευτεροβάθμιο τέτοιο χώρο, ενώ ανεξάρτητες δεξαμενές τύπου B μόνο ένα μέρος αυτού. Σε κάθε περίπτωση όμως το εσωτερικό κέλυφος του πλοίου που είναι παρακείμενο των δεξαμενών του φορτίου πρέπει με κάθε τρόπο να προστατεύεται από πιθανή επαφή με το υγρό φορτίο.

Χρήση κατάλληλων υλικών και συστημάτων για χαμηλές θερμοκρασίες: Εκτός από τις απαιτήσεις που προϋποθέτει ο IGC Code για την αντιμετώπιση πιθανών διαρροών, απαιτεί επίσης έναν συνδυασμό κατάλληλων υλικών, μόνωσης και χρήσης συστημάτων θέρμανσης, ώστε να διασφαλιστεί η γάστρα του πλοίου από την επαφή της με το κρυογόνο LNG.

Απαιτήσεις κατασκευής και δοκιμών για τα containers του φορτίου: Ο IGC Code περιλαμβάνει και την ύπαρξη απαιτήσεων σχετικά με τις συγκολλήσεις, την δεξιοτεχνία των κατασκευαστών, τον ποιοτικό έλεγχο, τις δοκιμές για τις υδροπνευματικές και υδροστατικές πιέσεις, δοκιμές διαρροών κ.α..

Απαιτήσεις δικτύων σωλήνωσης: Ο IGC Code παρέχει κανονισμούς για γενικό σχεδιασμό, πάχος σωληνώσεων, δείκτες πιέσεων σχεδίασης, επιτρεπτά όρια αντοχής τους, τον τύπο των δοκιμών τους, την συγκόλληση τους, δοκιμές διαρροών κ.α.. Τέτοιες απαιτήσεις είναι απαραίτητες ώστε να εξασφαλιστεί ότι όλα τα δίκτυα σωλήνωσης είναι κατάλληλα σχεδιασμένα και κατασκευασμένες. Άλλες απαιτήσεις καθορίζουν τον τύπο της μόνωσης των βαλβίδων που απαιτούνται στις συνδέσεις των δεξαμενών.

Συστήματα και βαλβίδες ασφάλειας: Ο IGC Code απαιτεί τον αυτοματοποιημένο και απομακρυσμένο έλεγχο της έκτακτης διακοπής της λειτουργίας των βαλβίδων ασφάλειας για την διακοπή μεταφοράς υγρού και αερίου. Έτσι όλες οι αντλίες και οι συμπιεστές του φορτίου θα πρέπει να κλείνουν αυτόματα με το αυτόματο κλείσιμο των βαλβίδων ασφάλειας. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει μια βαλβίδα ασφάλειας για κάθε σύνδεση σωλήνα που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του φορτίου. Το σύστημα ελέγχου έκτακτης διακοπής θα πρέπει να είναι ικανό να ενεργοποιείται από έναν απλό πίνακα ελέγχου σε δύο διαφορετικά μέρη του πλοίου. Θα πρέπει επίσης να ενεργοποιείται από την ύπαρξη εύτηκτων συνδέσμων που θα αντιδρούν σε μια περίπτωση φωτιάς.

Συστήματα ελέγχου πίεσης και θερμοκρασίας: Ο IGC Code απαιτεί την ύπαρξη συστήματος ελέγχου πίεσης των δεξαμενών με σκοπό την διατήρηση της πίεσης κάτω από το επιτρεπτό όριο ή κάτω από την μέγιστη πίεση που αντέχουν οι βαλβίδες εκτόνωσης. Το σύστημα ελέγχου πίεσης μπορεί επίσης να (1) εφαρμόζει μηχανική ψύξη και να (2) χρησιμοποιεί τον κορεσμένο ατμό ως καύσιμο ή ως μέσο θέρμανσης.

Συστήματα εκτόνωσης πιέσεων: Ο IGC Code απαιτεί την ύπαρξη συστημάτων εκτόνωσης πιέσεων για τις δεξαμενές του φορτίου που είναι ανεξάρτητες από το σύστημα ελέγχου της πίεσης. Για τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου ο IGC Code προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον δύο βαλβίδων εκτόνωσης πιέσεων, οι οποίες θα πρέπει να παρέχονται με ένα δίκτυο σωλήνωσης ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση του LNG στο κατάστρωμα ή σε περιοχές με μεγάλη επικινδυνότητα.

Συστήματα προστασίας κενού: Ο IGC Code απαιτεί (για οποιαδήποτε δεξαμενή μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου που δεν είναι σχεδιασμένη για μέγιστες πιέσεις) την ύπαρξη συστήματος προστασίας κενού (vacuum protection system). Αποδεκτά τέτοια συστήματα (σύμφωνα με τον IGC Code) πρέπει να διαθέτουν τουλάχιστον δύο διακόπτες (switches) που χτυπούν συναγερμό και ενεργοποιούν το κλείσιμο της αναρρόφησης οποιουδήποτε υγρού ή αέριου φυσικού αερίου από τις δεξαμενές του, απενεργοποιώντας το σύστημα ψύξης. Επίσης τέτοια συστήματα παρέχουν βαλβίδες εκτόνωσης πιθανών κενών που είναι σχεδιασμένες για τον μέγιστο ρυθμό εκτόνωσης (εκροής) του κενού. Από την στιγμή που μία τέτοια βαλβίδα εισάγει αέρα μέσα στις δεξαμενές, σε πρακτικό επίπεδο, τα συστήματα ελέγχου πίεσης του πλοίου είναι σχεδιασμένα με τρόπο ώστε να εμποδίσουν την ανάπτυξη αρνητικών πιέσεων μέσα σε αυτήν.

Συστήματα προστασίας φωτιάς: Σύμφωνα με τον IGC Code όλα τα LNG πλοία είναι υποχρεωμένα να διαθέτουν ένα κύριο σύστημα πυρόσβεσης (νερό) καθώς και αρκετές πυροσβεστικές φωλιές με ικανότητα να τροφοδοτούν με νερό οποιοδήποτε τμήμα του καταστρώματος και όχι μόνο. Επίσης η τροφοδοσία του νερού πυρόσβεσης πρέπει να παρέχει νερό και για συστήματα ψύξης με σκοπό την πρόληψη φωτιάς και την προστασία του πλήρωματος σε συγκεκριμένες περιοχές. Ως πυροσβεστικό μέσο πρέπει να χρησιμοποιείται μία ξηρή χημική σκόνη ώστε να δίνεται η δυνατότητα στο πλήρωμα να σβήνουν τις φωτιές κοντά στην περιοχή του φορτίου.

Πίνακας ελέγχου των δεξαμενών φορτίων: Είναι απαραίτητος επίσης ειδικός εξοπλισμός (IGC Code) ώστε να ελέγχεται η κάθε δεξαμενή φορτίου από το πλήρωμα. Ενδεικτικά έχουμε:

- Εξοπλισμό ανίχνευσης αερίου που να θέτει σε συναγερμό το πλήρωμα για πιθανή διαρροή
- Τουλάχιστον μία συσκευή μέτρησης του επιπέδου του υγρού για κάθε δεξαμενή
- Ένα υψηλού επιπέδου ακουστικό και οπτικό συναγερμό που να σταματάει την ροή φορτίου μέσα στην δεξαμενή όταν αυτός ενεργοποιηθεί
- Μετρητές πίεσης στις δεξαμενές μαρκαρισμένοι με τις ελάχιστες και μέγιστες πιέσεις των δεξαμενών
- Δύο μετρητές θερμοκρασίας (μία στο πάνω και μία στο κάτω μέρος της δεξαμενής) μαρκαρισμένοι ώστε να δείχνουν την ελάχιστη θερμοκρασία σχεδίασης της δεξαμενής
- Μετρητές θερμοκρασίας και συναγερμούς ώστε να ελέγχονται πιθανές διαρροές στο επίπεδο της μόνωσης ή στους χώρους της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου που είναι παρακείμενοι στις δεξαμενές

Ο εξοπλισμός που αναφέρθηκε, μαζί με τα συστήματα εκτόνωσης πιέσεων και προστασίας κενών, έχουν τον κυρίαρχο ρόλο στην πρόληψη της ζημιάς μιας LNG δεξαμενής και στην πιθανή μεγάλη κλίμακας απελευθέρωση υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Συστήματα ανίχνευσης αερίου: Για την ανίχνευση κάποιας διαρροής αερίου, ο IGC Code απαιτεί την ύπαρξη μόνιμα εγκατεστημένου συστήματος ανίχνευσης με ακουστικούς και οπτικούς συναγερμούς για χώρους του πλοίου όπως τα δωμάτια με τους συμπιεστές του φορτίου, ελέγχου του, με ηλεκτρογεννήτριες, μηχανολογικές εγκαταστάσεις κ.α.. Αυτοί οι ανιχνευτές ενεργοποιούν τους συναγερμούς όταν προσεγγιστεί το 30% του LFL(Lower Flammable Limit).

Συστήματα ασφάλειας τερματισμού σε κατάσταση ανεφοδιασμού: Τα συστήματα και οι αποβάθρες φορτοεκφόρτωσης LNG είναι εξοπλισμένα με ανιχνευτές ατμού LNG, ανιχνευτές φωτιάς, και τα σχετικά συστήματα ασφάλειας που κλείνουν τις βαλβίδες για να απομονώσουν τις γραμμές μεταφοράς. Τα συστήματα ασφάλειας μπορούν να ενεργοποιηθούν από το πλήρωμα του σκάφους ή από το προσωπικό του τερματικού σταθμού. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτά τα συστήματα αποκρίνονται επίσης αυτόματα σε οποιαδήποτε ανίχνευση LNG στην ατμόσφαιρα με αυτόματη διακοπή της άντλησης και το κλείσιμο των βαλβίδων για την απομόνωση των γραμμών μεταφοράς LNG. Τα συστήματα μπορούν επίσης να ενεργοποιηθούν και από το πλήρωμα του σκάφους ή το προσωπικό του τερματικού σταθμού. Αυτό χρησιμεύει για τον περιορισμό του ποσού του LNG που θα αποδεσμευόταν σε μια διαρροή που μπορεί να εμφανιζόταν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκφόρτωσης.

Συνδέσεις έκτακτης απελευθέρωσης: Τα ήδη υπάρχοντα σχέδια τερματικών σταθμών LNG έχουν συνδέσεις έκτακτης απελευθέρωσης που βρίσκονται μεταξύ των δεξαμενών του φορτίου και των τερματικών σταθμών. Αυτές οι συνδέσεις είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένες ώστε εάν μία τέτοια σύνδεση απελευθερωθεί τότε το ποσό του LNG που θα διοχετευθεί στην ατμόσφαιρα θα είναι πάρα πολύ μικρό.

13.2.5 Μέτρα χειρισμού για την πρόληψη ατυχηματικής απελευθέρωσης LNG

Εκτός από τα χαρακτηριστικά σχεδίασης, οι διεθνείς και ναυτιλιακοί φορείς έχουν αναγνωρίσει την ανάγκη για την ύπαρξη μέτρων χειρισμού με σκοπό την πρόληψη ή έστω και την μείωση της πιθανότητας για LNG ατυχήματα. Αυτά τα μέτρα περιλαμβάνουν:

- Την εκπαίδευση
- Τις διαδικασίες
- Τις επιθεωρήσεις

Εκπαίδευση: Οι προϋποθέσεις για την εκπαίδευση του πληρώματος σε ένα LNG carrier περιγράφονται στην συνθήκη του IMO STCW 78. Αυτό το επίπεδο εκπαίδευσης ξεπερνιέται από αυτό που ορίζει το κράτος σημαίας (flag state) και η εκάστοτε ναυτιλιακή εταιρία. Τα πληρώματα των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου θεωρούνται ως τα πλέον επαγγελματικά άξια στη διεθνή ναυτιλία, αναγνωρίζοντας φυσικά και τον σημαντικό τους ρόλο στους ασφαλείς χειρισμούς τους.

Διαδικασίες: Όλα τα πλοία άνω των 500 gross tons είναι υποχρεωμένα σύμφωνα με τον IMO να υπακούν στον ISM Code (International Safety Management Code). Αυτή η προσέγγιση ασφαλούς διοίκησης προϋποθέτει ανάπτυξη στις πολιτικές με τις οποίες διαχειρίζονται θέματα ασφάλειας και περιβαλλοντολογικά θέματα. Ο ISM Code εξηγεί της άμεσης αντίδρασης και πως αυτή θα γίνει σε μια μεγάλης κλίμακας απελευθέρωση LNG.

Επιθεωρήσεις: Επιθεωρήσεις στα πλοία γίνονται για μια μεγάλη ποικιλία λόγων. Τα κράτη σημαίας και οι διάφοροι νηογνώμονες έχουν απαιτήσεις για περιοδικές επιθεωρήσεις. Οι λιμενικές αρχές κάνουν πολύ συχνούς ελέγχους που περιλαμβάνουν περιοδικές επιθεωρήσεις πάνω σε θέματα ασφάλειας του πλοίου που θέλει είσοδο στο αντίστοιχο λιμάνι.

13.2.6 Μέτρα ασφάλειας για την πρόληψη απελευθέρωσης LNG μετά από τρομοκρατική επίθεση

Μετά την 11^η Σεπτεμβρίου, ο IMO πρόσθεσε το κεφάλαιο XI-2 στη συνθήκη του SOLAS παρέχοντας έτσι τον International Ship and Port Facility Security Code (ISPS). Εφαρμόσιμος και στα LNGC ο ISPS Code απαιτεί την δράση από το κράτος σημαίας, τις λιμενικές αρχές, τις ναυτιλιακές εταιρίες και τις εγκαταστάσεις των λιμανιών με απώτερο σκοπό την μείωση της πιθανότητας μιας τρομοκρατικής ενέργειας. Έτσι από την 1^η Ιουλίου, 2004 ο ISPS Code προϋποθέτει:

- Επίπεδα ασφάλειας
- Σχέδια ασφάλειας του πλοίου
- Συστήματα συναγερμών ασφάλειας του πλοίου
- Αυτόματα συστήματα αναγνώρισης (Automatic Identification Systems – AIS)
- Σχέδια ασφάλειας του λιμανιού
- Πρωτόκολλο ασφάλειας
- Σχέδια ασφάλειας των εγκαταστάσεων

Επίπεδα ασφάλειας: Το κράτος σημαίας και οι λιμενικές αρχές απαιτούνται να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ασφάλεια στα πλοία και στις εγκαταστάσεις των λιμανιών τους με σκοπό τον καθορισμό των επιπέδων ασφάλειας. Αυτά τα επίπεδα προστασίας απεικονίζουν την εκτίμηση της πιθανότητας ενός τρομοκρατικού γεγονότος, όπου καθένα από αυτά σκοπεύει να ενεργοποιήσει μέτρα προστασίας για το πλοίο, το λιμάνι, και άλλες εγκαταστάσεις.

Σχέδια ασφάλειας του πλοίου: Το κράτος σημαίας απαιτείται να επαναπροσδιορίσει και να εγκρίνει όλα τα σχέδια προστασίας – ασφάλειας του πλοίου. Αυτά τα σχέδια πρέπει να περιέχουν μέτρα προστασίας για:

- Εύκολη πρόσβαση στο πλοίο από το πλήρωμα, επιβάτες, επισκέπτες
- Απαγορευμένοι χώροι
- Χειρισμός φορτίου
- Εύκολη πρόσβαση στις αποθήκες
- Χειρισμός αποσκευών
- Παρακολούθηση της προστασίας του πλοίου

Αυτά τα μέτρα έχουν σκοπό να προστατέψουν το πλοίο και να εμποδίσουν να χρησιμοποιηθεί ως όπλο με στόχο άλλα πλοία ή εγκαταστάσεις.

Συστήματα συναγερμών ασφάλειας του πλοίου: Κάθε πλοίο που υπάγεται στον ISPS Code είναι υποχρεωμένο να έχει ειδικό εξοπλισμό συναγερμών ασφάλειας (SSA – Ship Security Alarm) που θα μπορεί να ενεργοποιηθεί από το πλήρωμα σε περίπτωση τρομοκρατικής

ενέργειας. Αυτά τα συστήματα συναγερμών που δεν ακούγονται επάνω στο πλοίο έχουν σκοπό να ειδοποιήσουν τους αρμόδιους φορείς (π.χ. USCG).

Αυτόματα συστήματα αναγνώρισης (AISs): Τα AISs έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Αποτελούνται από έναν αναμεταδότη που παρέχει ένα σήμα που προσδιορίζει το όνομα του πλοίου, τη θέση, το φορτίο, τον τίτλο, κ.λπ. Αρχικά ήταν προορισμένος για την μείωση των συγκρούσεων των πλοίων και να καταστήσει τις δραστηριότητες των λιμενικών αρχών ευκολότερες. Αλλά σήμερα αναγνωρίζεται ως ένα άλλο βήμα που συμβάλλει στην ασφάλεια λιμένων. Υπό αυτήν τη μορφή, η εφαρμογή των AISs επιταχύνθηκε για μερικά πλοία ως τμήμα των αλλαγών του SOLAS που έγινε όταν εισήχθη ο κώδικας ISPS.

Σχέδια ασφάλειας του λιμανιού: Κάθε λιμένας που εξυπηρετείται με τα διεθνή πλοία υποκείμενα στον κώδικα ISPS απαιτείται να έχει έναν ανώτερο υπάλληλο ασφάλειας λιμένων ώστε να αναπτύξει ένα σχέδιο ασφάλειας λιμένων. Το σχέδιο πρέπει να διευκρινίζει τα μέτρα ασφάλειας που αναμένονται στις τοπικές εγκαταστάσεις λιμένων και τα μέτρα που αναμένονται με τα διεθνή σκάφη που διασυνδέονται (π.χ., το φορτίο, φορτοεκφόρτωση, ανεφοδιασμό καυσίμων) με εκείνες τις εγκαταστάσεις. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο USCG καπετάνιος του λιμένα (COTP) χρησιμεύει ως ο ανώτερος υπάλληλος ασφάλειας των λιμένων και, από κοινού, με μια επιτροπή ασφάλειας λιμένων, είναι αρμόδιος για την ανάπτυξη ενός σχεδίου ασφάλειας λιμένων. Μεταξύ άλλων, το σχέδιο ασφάλειας λιμένων προσδιορίζει τα μέσα ατομικής εξυπηρέτησης μέσα στο λιμένα που θα απαιτήσει το σχέδιο ασφαλείας τους. Επίσης, τα σχέδια ασφάλειας λιμένων καθορίζουν ποιοι λειτουργικοί έλεγχοι (π.χ., ζώνες ασφάλειας, συνοδείες) ισχύουν για τα διάφορα είδη πλοίων ώστε να εισέλθουν στο λιμένα. Το USCG χρησιμοποιεί επίσης την απαίτηση για μια προηγμένη ειδοποίηση της άφιξης (ANOA – Advanced Notice of Arrival) από τα πλοία που εισέρχονται στις ΗΠΑ.

Πρωτόκολλα ασφαλείας: Σε εθνικό επίπεδο, ο USCG έχει ορίσει ότι όλες οι επισκέψεις με πλοία όπως τα LNGC απαιτούν μια δήλωση ασφάλειας (DoS – Declaration of Security) που πρέπει να προετοιμαστεί από το πλοίο. Ένα DoS καθορίζει τις ευθύνες ασφάλειας και για τις εγκαταστάσεις και για το πλοίο για τη χρονική περίοδο που αυτό είναι σε εκείνες τις εγκαταστάσεις. Πρέπει να συντονίζεται μεταξύ του ανώτερου υπαλλήλου ασφάλειας πλοίων και του ανώτερου υπαλλήλου ασφάλειας εγκαταστάσεων και να υπογράφεται πριν από οποιαδήποτε δραστηριότητα διεπαφών (π.χ., μεταφορές φορτίου ή μετακίνηση προσωπικού) μεταξύ του πλοίου και των εγκαταστάσεων.

Σχέδια ασφάλειας των εγκαταστάσεων: Σύμφωνα με τους ναυτικούς κανονισμούς του USCG οι τερματικοί σταθμοί LNG που δέχονται LNGC θα πρέπει να έχουν αναπτύξει ένα σχέδιο προστασίας. Αυτοί οι κανονισμοί περιλαμβάνουν:

- Διεύθυνση ασφάλειας των εγκαταστάσεων
- Εκπαίδευση προσωπικού
- Πρακτική εκπαίδευση και ασκήσεις
- Άμεση απόκριση αλλαγής του επιπέδου ασφάλειας
- DoS
- Επικοινωνίες
- Συντήρηση των συστημάτων ασφάλειας και του εξοπλισμού
- Μέτρα ασφάλειας για έλεγχο του φορτίου, των απαγορευμένων περιοχών
- Διαδικασίες ασφάλειας σε περίπτωση ατυχήματος
- Έλεγχοι και τροποποιήσεις των σχεδίων ασφάλειας

13.3 ΜΕΤΡΑ ΜΕΙΩΣΗΣ

13.3.1 Μέτρα μείωσης σε σκοπό την άμεση απόκριση σε μία πιθανή απελευθέρωση

Για τις απελευθερώσεις υγροποιημένου φυσικού αερίου, η βιομηχανία έχει εστιάσει κυρίως στην πρόληψη της απελευθέρωσης. Εντούτοις, υπάρχουν μερικά μέτρα που είναι αρμόδια για να βοηθήσουν στον μετριασμό αυτών των απελευθερώσεων μόλις αυτές εμφανιστούν. Παρακάτω θα γίνει συζήτηση για εκείνα τα μέτρα, τα οποία ισχύουν και για τις τυχαίες απελευθερώσεις αλλά και για τις απελευθερώσεις που προκαλούνται από σκόπιμα γεγονότα (π.χ., τρομοκρατικές πράξεις).

Η αρχική εστίαση στην απόκριση μιας LNG απελευθέρωσης είναι η ασφάλεια κοινού και των υπαλλήλων και ύστερα η ελαχιστοποίηση του ποσού ζημίας πλοία και στις εγκαταστάσεις. Μερικά από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που συζητήθηκαν και προηγουμένως ως στοιχεία σχεδίου (design elements) για την πρόληψη μιας σημαντικής απελευθέρωσης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και κατά την εμφάνισή της. Αυτά περιλαμβάνουν τους ανιχνευτές αερίου, τα συστήματα κλεισίματος (Shutdown Systems), και τα συστήματα πυρασφάλειας. Πέρα από εκείνα τα στοιχεία υπάρχουν άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μετριασμού όπως:

- Ζώνες ασφάλειας και προστασίας
- Σχέδια άμεσης απόκρισης για τα πλοία και τις εγκαταστάσεις (response plans)
- Συντονισμό με τον USCG
- Σχέδια εκκένωσης

Ζώνες ασφάλειας και προστασίας: Η ύπαρξη ζωνών ασφάλειας γύρω από το πλοίο έχουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην μείωση της πιθανότητας μιας σύγκρουσης. Οι ζώνες προστασίας βοηθούν το πλοίο και τον USCG να αναγνωρίσουν εάν ένα πλοίο που βρίσκεται κοντά σε ένα LNGC είναι πρόθυμο να τηρήσει τους θεσπισμένους κανονισμούς.

Σχέδια άμεσης απόκρισης για τα πλοία και τις εγκαταστάσεις: Και τα πλοία και οι τερματικοί σταθμοί LNG είναι υποχρεωμένα να αναπτύξουν σχέδιο άμεσης – έκτακτης απόκρισης. Αυτά τα σχέδια βοηθούν στο να εξασφαλιστεί η άμεση και αποτελεσματική αντίδραση σε περίπτωση μιας ατυχηματικής απελευθέρωσης. Βοηθούν στην απομόνωση της απελευθέρωσης (αν είναι εφικτό), στην ελαχιστοποίηση των πιθανών πηγών ανάφλεξης και στην εκκένωση του πλοίου ή άλλων κοντινών (στην απελευθέρωση του LNG) περιοχών άμεσα εκτεθειμένων στον κίνδυνο.

Συντονισμό με τον USCG: Επειδή το πλήρωμα του πλοίου μπορεί να μην καταφέρει να αντιμετωπίσει την πιθανή απελευθέρωση είναι αναγκαίο τα σχέδια άμεσης απόκρισης να συντονίζονται με τον USGC.

Σχέδια εκκένωσης: Εάν είναι απαραίτητο, ένα σχέδιο άμεσης απόκρισης θα απαιτεί την εκκένωση των περιοχών του πλοίου και όχι μόνο, στις οποίες μπορεί να αναπτυχθούν κίνδυνοι. Ιδιαίτερα για η απελευθέρωση χωρίς ανάφλεξη, τα σχέδια άμεσης απόκρισης μπορούν να περιλαμβάνουν την σωστή επιβολή του νόμου για να βοηθήσουν να ειδοποιηθούν το προσωπικό για να λάβει μέτρα και να απομακρυνθούν από τον τομέα του κινδύνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABS Consulting, May 2004, “Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers”.
- Anay Luketa-Hanlin, “A review of large-scale LNG spills: Experiments and modelling”, *Journal of Hazardous Materials A132* (2006) 119–140.
- Barry Rogliano Salles, 2008, “Shipping and shipbuilding markets, 2008”.
- John Cushing, 2006, “LNG Vessel Safety and Security”.
- US Department of Energy, February 12, 2002, “Properties of LNG”.
- Det Norske Veritas, (2004), “Consequences of LNG Marine Incidents”, CCPS Conference Orlando June 29-July 1 2004.
- European Maritime Safety Agency, June 2007, “Action Plan for Hazardous and Noxious Substances Pollution Preparedness and Response”.
- J.A. Fay, 2003, “Model of Spills and Fires from LNG and Oil Tankers,” *Journal of Hazardous Materials*, B96, pp. 171-188.
- J.A. Fay, 2006, “Model of large pool fires”, *Journal of Hazardous Materials B136* (2006) 219–232.
- J.A. Fay, 2007, “Spread of large LNG pools on the sea”, *Journal of Hazardous Materials* 140 (2007) 541–551.
- GAO, February 2007, “Public Safety Consequences of a Terrorist Attack on a Tanker Carrying Liquefied Natural Gas Need Clarification”.
- Ahmed F. Ghoniem, Xiaoming Zhang, Omar Knio, Howard R. Baumb and Renald G. Rehmb, 1993, “Dispersion and deposition generated in massive fires”, *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam , 33 275-293.
- D.W. Hissong, 2007, “Keys to modelling LNG spills on water”, *Journal of Hazardous Materials* 140 (2007) 465–477.
- ioMosaic Corporation, 2006, “LNG Properties and Hazards Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT)”.

- David W. Johnson, John B. Cornwell, 2007, “Modeling the release, spreading, and burning of LNG, LPG, and gasoline on water”, *Journal of Hazardous Materials* 140 (2007) 535–540.
- J.C. Jones, 2007, “Comments on LNG fire hazards”.
- Ronald P. Koopman, Donald L. Ermak, 2007, “Lessons learned from LNG safety research, *Journal of Hazardous Materials*” 140 412–428.
- William Lehr, Debra Simecek-Beatty, (2004), “Comparison of hypothetical LNG and fuel oil fires on water”, *Journal of Hazardous Materials* 107 (2004) 3–9.
- LNG Health and Safety Committee of the Disaster Council City of Vallejo, California, 2003, “Liquefied Natural Gas in Vallejo: Health and Safety Issues”.
- Paul W. Parfomak, Aaron M. Flynn, April 2005, “Liquefied Natural Gas (LNG) Import Terminals: Siting, Safety and Regulation”, CRS Report for Congress.
- Phani K. Raj, 2007, “LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges”, *Journal of Hazardous Materials* 143 (2007) 603.
- Phani K. Raj, 2007, “LNG pool fire spectral data and calculation of emissive power”, *Journal of Hazardous Materials* 142 (2007) 720–729.
- Quest Consultants, Inc., “Modeling LNG Spills in Boston Harbor”, Letter from John Cornwell of Quest Consultants to Don Juckett of the U.S. Department of Energy, October 2, 2001; Letter from John Cornwell of Quest Consultants to Don Juckett of the U.S. Department of Energy, October 3, 2001; and Letter from John Cornwell of Quest Consultants to Clifford Tomaszewski of the Office of Natural Gas & Petroleum Import & Export Activities, November 17, 2003.
- Quest Consultants Inc., 2005, “Hazards analysis of a proposed LNG import terminal in the port of Long Beach, California”.
- Sandia National Laboratories, 2005, “Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill over Water”.
- Sandia National Laboratories, “Review of the Independent Risk Assessment of the Proposed Cabrillo Liquefied Natural Gas Deepwater Port Project.