ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ»

Διπλωματική Εργασία

Μπαλαούρας Ιωάννης

13-11-2008

ΑΘΗΝΑ

Μπαλαούρας Ιωάννης

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΑ ΣΚΑΦΗ»

13-11-2008

Διπλωματική Εργασία

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Μέλη Τριμελούς Επιτροπής

Χαρίλαος Ν. Ψαραύτης, Καθηγητής ΕΜΠ
Απόστολος Δ. Παπανικολάου, Καθηγητής ΕΜΠ
Νικόλαος Π. Βεντίκος, Λέκτορας ΕΜΠ (Επιβλέπων Καθηγητής)

ΑΘΗΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 4
2. ΔΟΜΗ 6
3. ΣΤΟΧΟΣ 7
4. ΠΕΡΙΛΗΨΗ 8
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ 10
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ 10
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 13
φ>>1 15
φ<<1 17
Σύνοψη 19
ΡΗΓΜΑΤΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΣΑΛΟ 20
ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΛΙΜΝΗΣ 22
ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΕΥΦΛΕΚΤΟΤΗΤΑΣ (LFL) 23
ΕΚΡΗΞΗ 25
6. ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΑΠΟ ΕΝΑ LNG ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΟ 27
6.1 ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΑΠΟ LNG ΠΛΟΙΟ 27
6.2 ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ 28
6.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΛΙΜΝΗΣ 28
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ 29
6.3.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ 29
6.3.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ 32
7. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ 36
8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ 41

8.1 ΡΕΒΥΘΟΥΣΑ 47

8.2 ΝΕΑ ΚΑΡΒΑΛΗ 60

8.3 ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ ΑΠΟ ΑΛΓΕΡΙΑ 67

9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ 81

ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΥΓΡΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΡΗΓΜΑ 81

ΥΠΑΡΞΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ 82

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΩΣ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ 5 kW/m^2 82

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΩΣ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ 37,5 kW/m^2 83

ΧΡΟΝΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ 83

ΜΕΓΕΘΟΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ 84

ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ 85

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΩΣ ΤΟ LFL 85

ΧΡΟΝΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ 88

ΜΕΓΕΘΟΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ 89

10. ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 91

VALLEJO 91

QUEST 92

LEHR 93

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 96

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεράστια αύξηση στην παγκόσμια ναυτιλία του ακατέργαστου πετρελαίου μετά τον 2° Παγκόσμιο Πόλεμο και τα συνεπακόλουθα καταστροφικά ατυχήματα διαρροών πετρελαίου από τα πετρελαιοφόρα που έπληξαν το παράκτιο περιβάλλον, οδήγησαν στην ανάπτυξη μοντέλων για τη διάδοση των διαρροών πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας και την επιβεβαίωση εργαστηριακών μετρήσεων. Αυτά τα μοντέλα επιβεβαίωσαν την κοινή παρατήρηση ότι οι μεγάλες διαρροές διαδίδονται ραγδαία καταλαμβάνοντας μεγάλες περιοχές της επιφάνειας της θάλασσας, χωρίς να είναι δυνατός ο περιορισμός τους με μηχανικά μέσα κατά τη μικρή διάρκεια της διάδοσης.

Τη δεκαετία του 70, η ανάπτυξη υγραεριοφόρων μεταφοράς κρυογενών υγρών (όπως LNG, LPG, αιθυλένιο) έθεσε επιπλέον ρίσκα σχετικά με την καύση, είτε στη περιοχή που γινόταν η διαρροή είτε στις περιοχές που πιθανόν να «ταξίδευε» το σύννεφο ατμών που προέκυπτε, λόγω του αέρα. Στα χρόνια που μεσολάβησαν, παρατηρήθηκε ένας σημαντικός αριθμός θεωρητικών και πειραματικών ερευνών σχετικά με την εξάτμιση των κρυογενών διαρροών στο νερό και στη ξηρά, με τη διασπορά και καύση των συσχετιζόμενων σύννεφων ατμού και της εμφάνισης πυρκαγιάς λίμνης στις περιοχές της διαρροής.

Στη τοποθεσία κατασκευής και στη χορήγηση αδειών των τερματικών σταθμών LNG όπου αποθηκεύεται το LNG από τα υγραεριοφόρα, οι τοπικές αρχές θα πρέπει να έχουν υπόψη τους την πιθανότητα τυχαίων διαρροών, συνήθως λόγω σύγκρουσης μεταξύ πλοίων ή λόγω προσάραξης. Εξαιτίας, όμως, των πρόσφατων γεγονότων βομβαρδισμού, συμπεριλαμβανομένου της επίθεσης στο αμερικάνικο πολεμικό πλοίο USS COLE, έχουν αυξηθεί τα ζητήματα σχετικά με τους πιθανούς τρόπους που μπορεί να προκληθεί μια τέτοια διαρροή που θα σχηματίσει πυρκαγιές λίμνης γύρω από το πλοίο. Μέσα στα όρια ενός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος, η διαρροή μπορεί να θεωρηθεί στιγμιαία και η πυρκαγιά που προκύπτει, εξαπλώνεται σε μέγεθος και σε ρυθμό καύσης, που καθορίζονται από τον όγκο του υγρού που απελευθερώθηκε καθώς και από τις μηχανικές ιδιότητες του LNG. Στη αντίθετη περίπτωση, μίας μεγάλης περιόδου απελευθέρωσης φορτίου, τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς λίμνης καθορίζονται από τον ογκομετρικό ρυθμό διαρροής.

Το φυσικό αέριο (Natural Gas) μεταφέρεται συνήθως θαλάσσια με τη μορφή κρυογενούς υγρού, το οποίο αποθηκεύεται σε μεγάλες δεξαμενές υγραεριοφόρων πλοίων, σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία κάτω από το σημείο βρασμού του υγροποιημένου φυσικού αερίου, τους -160 ^{o}C. Στη περίπτωση σοβαρού ατυχήματος όπου παραβιάζεται μια ή περισσότερες από τις δεξαμενές του LNG πλοίου, το υγρό φορτίο θα απελευθερωθεί άμεσα από τη δεξαμενή και θα επιπλεύσει στο νερό, εξαιτίας της μικρότερης πυκνότητας του από το νερό. Λόγω της επαφής με το κατά πολύ θερμότερο θαλασσινό νερό, το υγροποιημένο φυσικό αέριο θα αρχίζει να

εξατμίζεται ενώ θα εξαπλώνεται πολύ γρήγορα μέχρι να εξατμιστεί στην ατμόσφαιρα όλη η ποσότητα που διέρρευσε. Η ποσότητα που έχει εξατμιστεί αναμιγνύεται με τον αέρα της ατμόσφαιρας σχηματίζοντας ένα τρισδιάστατο σύννεφο ατμού, το οποίο μπορεί να είναι εύφλεκτο ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε μεθάνιο με συνέπεια την εμφάνιση κινδύνων πυρκαγιάς και έκρηξης.

Σχήματα 1, 2. Γενική όψη του ρήγματος στη γάστρα του αμερικανικού πολεμικού πλοίου USS COLE

Ο όγκος διαρροής, ο ρυθμός και η διάρκεια της απελευθέρωσης είναι οι μεταβλητές που καθορίζουν τη συμπεριφορά της διαρροής. Για μια διαρροή από ένα πετρελαιοφόρο, αυτές εξαρτώνται από το μέγεθος και το σχήμα των δεξαμενών του, το μέγεθος και την τοποθεσία του ρήγματος από το οποία θα απελευθερώνεται το φορτίο και φυσικά από τις ιδιότητες του υγρού φορτίου. Αυτή η μελέτη μοντελοποιεί τόσο τη διαδικασία απελευθέρωσης όσο και τη συμπεριφορά της λίμνης που διαδίδεται, εκφράζοντας τα σημαντικά αποτελέσματα (μέγεθος λίμνης, διάρκεια πυρκαγιάς, θερμική απελευθέρωση) ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών μεγεθών της δεξαμενής συγκράτησης και του ρήγματος.

2. ΔΟΜΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο υπάρχει μια εισαγωγή σχετικά με τη διαρροή του υγροποιημένου φυσικού αερίου και την αύξηση του ενδιαφέροντος για τις επιπτώσεις και τους κινδύνους που προκύπτουν από αυτή.

Στο δεύτερο, τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται η δομή του τεύχους, ο στόχος του και μια περίληψη τόσο στην ελληνική γλώσσα όσο και στην αγγλική, αντίστοιχα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο υπολογισμών και οι διάφοροι τομείς που εξετάζονται σε αυτό όπως ο μηχανισμός της διαδικασίας, το μέγεθος της λίμνης, η εξάπλωση της, υπολογισμοί σχετικά με την πυρκαγιά λίμνης κ.α.

Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται ορισμένα γενικά στοιχεία της διαρροής και πυρκαγιάς υγροποιημένου φυσικού αερίου από ένα LNG πλοίο, ενώ γίνεται μια ανάλυση των επιπτώσεων που προκύπτουν από τους κίνδυνους μιας τέτοιας διαρροής και συγκεκριμένα πως επηρεάζονται οι άνθρωποι και οι κατασκευές από μια πιθανή πυρκαγιά λίμνης ή από μια ενδεχόμενη έκρηξη.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα ηλεκτρονικό μοντέλο υπολογισμών όλων των μεγεθών σχετικά με τη διαρροή του LNG από ένα ρήγμα (πάνω και κάτω από την ίσαλο), στο οποίο φαίνεται ο τρόπος εισαγωγής των αρχικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Γίνεται, επίσης, στη συνέχεια περιγραφή όλων των παραμέτρων που αναφέρονται ώστε να γίνει πιο προσιτός και κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του φύλλου εργασίας

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται η εφαρμογή του μοντέλου που κατασκευάστηκε σε διάφορες περιοχές, όπως το νησί της Ρεβυθούσας (κοντά στα Μέγαρα), η Νέα Καρβάλη στη Καβάλα, και στο νησί της Αίγινας (δρομολόγιο πλοίων από τη Αλγερία). Στις περιοχές αυτές, θέτουμε ορισμένες αρχικές συνθήκες και στη συνέχεια προβάλουμε και σχολιάζουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου που προκύπτουν από αυτές στο χάρτη κάθε περιοχής.

Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας των διαφόρων παραμέτρων του φαινόμενου της διαρροής από το μέγεθος του ρήγματος, ενώ παρουσιάζεται και μια πληθώρα διαγραμμάτων που καταδεικνύουν αυτή τη σχέση με τον ανάλογο σχολιασμό κάθε φορά.

Στο δέκατο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται στο μοντέλο υπολογισμών που κατασκευάσαμε, τα αρχικά δεδομένα και οι υποθέσεις που χρησιμοποίησαν οι άλλοι μελετητές, ώστε να μελετηθεί η απόκλιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου μας συγκριτικά με τα υπόλοιπα. Στη συνέχεια σχολιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής και γίνεται μια προσπάθεια ερμηνείας τους.

3. ΣΤΟΧΟΣ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να κατασκευαστεί ένα μοντέλο υπολογισμού των επιπτώσεων που προκύπτουν από μια διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό, καθώς και η επεξήγηση των μηχανισμών του φαινόμενου αυτού, χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες πληροφορίες που συλλέξαμε σχετικά με τα υπάρχοντα μοντέλα τέτοιου είδους. Κύριο μέλημα της μελέτης είναι να εμπλουτιστεί το μοντέλο υπολογισμών της, με όσον το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους ώστε να καλύπτονται τα βασικότερα ζητήματα γύρω από την απελευθέρωση του LNG στο νερό, σε αντίθεση με τα μοντέλα που υπάρχουν μέχρι σήμερα, τα οποία δεν παρέχουν μια ολοκληρωμένη μελέτη γύρω από όλα τα ενδεχόμενα μιας τέτοιας διαρροής. Σκοπός των άνω υπολογισμών είναι να εφαρμοστούν τα αποτελέσματα τους σε διάφορες περιοχές που σχετίζονται με την μεταφορά του LNG, όπως τερματικοί σταθμοί και κατοικημένες περιοχές κοντά σε δρομολόγια υγραεριοφόρων, ώστε να γίνει μια εκτίμηση των κινδύνων που εμφανίζονται και της επίδρασης που έχουν στους ανθρώπους και στις παράκτιες κατασκευές (κτίρια, δεξαμενές κτλ.).

4. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα αναλυτικό μοντέλο για τη πρόβλεψη της δυναμικής των διαρροών υγροποιημένου φυσικού αερίου από τα αντίστοιχα υγραεριοφόρα κατασκευάζεται από τις αρχές της μηχανικής των ρευστών και τις εμπειρικές ιδιότητες των διαρροών του LNG στο νερό. Η ανάλυση χρησιμοποιεί τις σημαντικές διαστάσεις της δεξαμενής συγκράτησης του φορτίου καθώς και τις διαστάσεις της περιοχής από την οποία διαρρέει, ώστε να καθορίσει το ιστορικό της εκροής του φορτίου από τη δεξαμενή και τα χαρακτηριστικά της λίμνης που πρόκειται να δημιουργηθεί, συμπεριλαμβανομένης και της πυρκαγιάς της. Η περιοχή της πυρκαγιάς της λίμνης, η διάρκεια και ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας καθορίζονται ως συνάρτηση των μεταβλητών της δεξαμενής συγκράτησης. Παραδείγματα διαρροής LNG και πετρελαίου δείχνουν ότι για παρόμοιες περιοχές (επιφάνειες) εκροής του φορτίου, αυτές οι διαρροές μπορούν να θεωρηθούν στιγμιαίες, απλοποιώντας την αξιολόγηση των συνεπειών κινδύνου.

Οι κίνδυνοι αυτοί προκύπτουν από την εξάτμιση του LNG, λόγω της επαφής του με το νερό, καθώς και από τη καύση του, στη περίπτωση ύπαρξης κάποιας πηγής ανάφλεξης. Έτσι, ο άνθρωπος και οι κοντινές κατασκευές θα κινδυνεύουν, στην πρώτη περίπτωση, από το εύφλεκτο σύννεφο LNG ατμού που δημιουργείται και μπορεί να επεκταθεί σε κατοικημένες περιοχές υπό την επίδραση του αέρα, και στη δεύτερη περίπτωση από την ένταση της θερμικής ακτινοβολίας λόγω της εμφάνισης της πυρκαγιάς της λίμνης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου υπολογισμού που κατασκευάσαμε σε διάφορες περιοχές υψηλής επικινδυνότητας, δείχνουν ότι η φύση και το μέγεθος των επιβλαβών επιπτώσεων μιας διαρροής είναι αρκετά σημαντικό και επικίνδυνο.

A comprehensive model for predicting the dynamics of spills from LNG tankers is constructed from fluid mechanics principles and empirical properties of LNG spills on water. The analysis utilizes the significant tanker hold and discharge flow area dimensions to specify the cargo liquid outflow history and the ensuing pool characteristics, including the establishment of a pool fire. The pool fire area, duration, and heat release rate are determined as functions of the tanker cargo variables. Examples of an LNG and gasoline spill show that for likely discharge flow areas these spills may be regarded as instantaneous, simplifying the evaluation of risk consequences.

The aforementioned risks arise from the boiling of the liquefied natural gas due to its contact with the warmer seawater and from the burning heat, in case there is a significant source of ignition that will set the liquid pool on fire. As a result, both persons and structures will be set in danger, in the first case, coming from the flammable LNG vapor cloud created by the evaporation, that can travel downwind, and in the second case, coming from the thermal radiation of the pool fire. Using the model we created to predict the consequences of an LNG

spill, and applying its results to several areas of high concern, it was revealed that the nature and extent of the danger that population faces is both significant and hazardous.

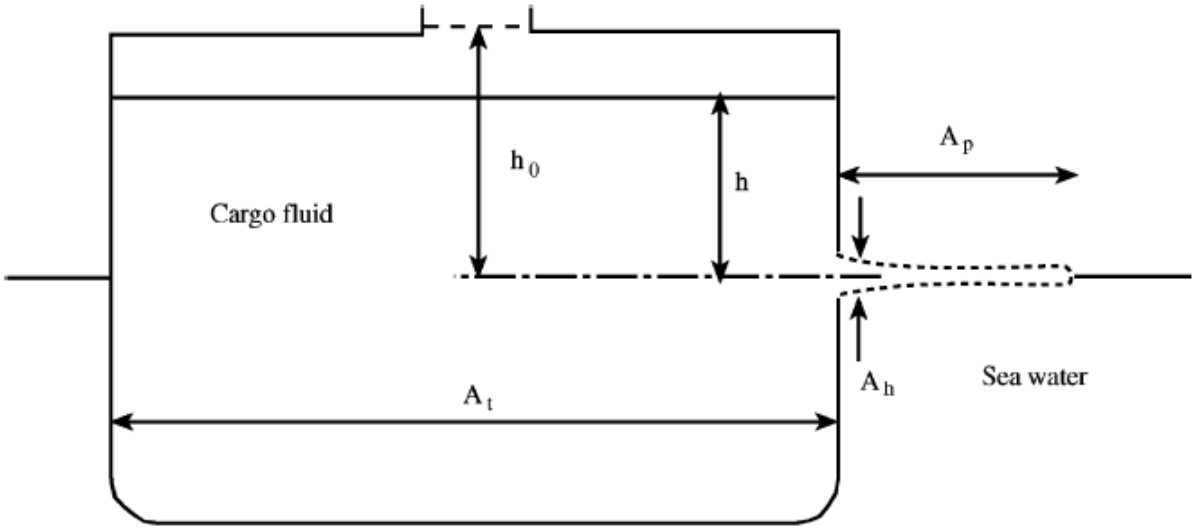
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

Τα υγρεαριοφόρα μεταφοράς υγρών υδρογονανθράκων μεταφέρουν φορτίο που είναι λιγότερο πυκνό από το νερό. Οι απαιτήσεις για πλήρη αντοχή της γάστρας και επιπλέον πλευστότητα οδηγούν σε δεξαμενές συγκράτησης όπου η άνω επιφάνεια του υγρού φορτίου είναι ανυψωμένη πάνω από την επιφάνεια του θαλασσινού νερού που την περιβάλει, σε τέτοιο μέγεθος ώστε να δημιουργείται μια υγρή υδροστατική πίεση μέσα στη δεξαμενή υπερβαίνοντας τη πίεση της ατμόσφαιρας ή του θαλασσινού νερού στο ίδιο ύψος. Κάθε ρήγμα στα πλευρικά τοιχώματα του πλοίου επιτρέπει στο υγρό φορτίο να απελευθερωθεί από τη δεξαμενή με ταχύτητα που καθορίζεται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ του φορτίου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας ή του θαλασσινού νερού στο επίπεδο του ρήγματος.

Το υγρό φορτίο υδρογονανθράκων που αναδύεται, το οποίο δεν αναμιγνύεται και είναι λιγότερο πυκνό από το νερό, επιπλέει στην θαλάσσια επιφάνεια. Σχηματίζει μια λίμνη με κέντρο την περιοχή του ρήγματος, που διαδίδεται οριζοντίως λόγω μιας οριζόντιας πίεσης που προκύπτει από μια δύναμη βαρύτητας στο στρώμα του υγρού. Για τους πολύ μεγάλους ρυθμούς που θεωρούνται εδώ, ο ρυθμός διάδοσης καθορίζεται από μια ισορροπία μεταξύ της αδράνειας του ρευστού και της δύναμης της βαρύτητας. Αν και η διάδοση του υγρού ενισχύεται από τη ροή του υγρού που εκρέει από τη δεξαμενή, αυτό συνεχίζεται εφόσον υπάρχει ένας πεπερασμένος όγκος υγρού στη λίμνη. Η λίμνη μπορεί να εξατμιστεί με δυο τρόπους. Εάν είναι ένα κρυογόνο υγρό, όπως το υγροποιημένο φυσικό αέριο, το προπάνιο ή το αιθυλένιο, τα οποία έχουν σημείο βρασμού κάτω από τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού, θα βράσει σθεναρά λόγω της επαφής του με το νερό. Ο δεύτερος τρόπος παρουσιάζεται στη περίπτωση όπου το σύννεφο ατμού που έχει δημιουργηθεί πιάσει φωτιά, σχηματίζοντας μια πυρκαγιά λίμνης πάνω από το υγρό που απελευθερώνεται, έτσι ώστε η θερμική ακτινοβολία να εξατμίζει το υγρό καύσιμο. Στη περίπτωση των πυρκαγιών λίμνης πάνω από διαρροές κρυογόνων καυσίμων, και οι δυο παραπάνω διαδικασίες δρουν παράλληλα ώστε να αυξάνεται ο ρυθμός καύσης.

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 παρακάτω σχήμα. 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 3. Εγκάρσια όψη μιας δεξαμενής LNG πλοίου, με τα χαρακτηριστικά στοιχεία 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 $\sqrt{g \cdot h_0}$ 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:

$$t_d \sim \frac{A_t h_0}{\sqrt{g h_0} A_h} = \frac{A_t}{A_h}\sqrt{\frac{h_0}{g}} \qquad (1)$$

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 νερό 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 εξαφάνισης 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:

$$A_p \sim \frac{\sqrt{gh_0}A_h}{w} \tag{2}$$

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 επιφάνειας της λίμνης A_p, που εμφανίζεται σε μια ακαριαία διαρροή όγκου $A_t h_0$, μετά από χρόνο t_v είναι περίπου:

$$A_p \sim (\sqrt{g\Delta(A_t h_0)})t_v \tag{3}$$

όπου

$$\Delta \equiv \frac{\rho_w - \rho_f}{\rho_w} \tag{4}$$

όπου 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:

$$A_p w t_v \sim h_0 A_t \tag{5}$$

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

$$t_v \sim \frac{(A_t h_0)^{1/4}}{w^{1/2}(g\Delta)^{1/4}} \tag{6}$$

$$A_p \sim \frac{(A_t h_0)^{3/4}(g\Delta)^{1/4}}{w^{1/2}} \tag{7}$$

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 7). Σε αυτήν 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 μεγάλο. Τέλος, οι μικρές και οι μεγάλες επιφάνειες A_h δίνουν τις ίδιες τιμές για τα Ap και t_v όταν η A_h είναι:

$$A_h \sim A_t^{3/4} w^{1/2} \Delta^{1/4} \left(\frac{h_0}{g}\right)^{1/4} \tag{8}$$

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.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για την ανάπτυξη ενός πιο αναλυτικού μοντέλου σχετικά με τη διαρροή και τη συμπεριφορά της λίμνης, ο θεωρούμε 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:

$$-\left(\frac{\mathrm{d}(hA_t)}{\mathrm{d}t}\right) = \sqrt{2gh}A_h \tag{9}$$

και ολοκληρώνοντας έχουμε:

$$h = \begin{cases} \left(\sqrt{h_0} - \sqrt{\frac{g}{2}}\frac{A_h}{A_t}t\right)^2, & \text{if } 0 \le t \le \sqrt{\frac{2h_0}{g}}\left(\frac{A_t}{A_h}\right) \\ 0, & \text{if } t \ge \sqrt{\frac{2h_0}{g}}\left(\frac{A_t}{A_h}\right) \end{cases} \tag{10}$$

Στη συνέχεια καθορίζεται ο ρυθμός αλλαγής του όγκου Vp του ρευστού της λίμνης, σαν το αποτέλεσμα της αφαίρεσης της εξάτμισης της επιφάνειας της λίμνης από την εκροή στο ρήγμα:

$$\frac{\mathrm{d}V_p}{\mathrm{d}t} = \sqrt{2gh}A_h - wA_p \tag{11}$$

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

$$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t} = \beta\left(g\Delta\frac{V_p}{\pi R^2/2}\right)^{1/2} \tag{12}$$

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:

$$\frac{\mathrm{d}A_\mathrm{p}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(\pi R^2/2)}{\mathrm{d}t} = \beta\sqrt{2\pi g \Delta V_\mathrm{p}} \tag{13}$$

Οι εξισώσεις (10), (11) και (13) 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:

$$t^* \equiv \left(\frac{A_\mathrm{h}}{A_\mathrm{t}}\right)\sqrt{\frac{g}{h_0}}t, \qquad v^* \equiv \frac{V_\mathrm{p}}{h_0 A_\mathrm{t}}, \qquad a^* \equiv \frac{wA_\mathrm{p}}{A_\mathrm{h}\sqrt{gh_0}}, \qquad h^* \equiv \frac{h}{h_0} \tag{14}$$

Στις εξισώσεις αυτές έχουν εισαχθεί τα μεγέθη του χρόνου , του όγκου, της επιφάνειας και κλίμακες μήκους ($\sqrt{h_0/g}$ A_t, $A_t h_0$, $A_h\sqrt{h_0 g}/w$ και h_0 για τον καθορισμό των αδιάστατων μεταβλητών. Έτσι από τις εξισώσεις (10), (11) και (13) έχουμε:

$$h^* = \begin{cases} \left(1 - \dfrac{t^*}{\sqrt{2}}\right)^2, & 0 \le t^* \le \sqrt{2} \\ 0, & t^* \ge \sqrt{2} \end{cases} \tag{15}$$

$$\frac{\mathrm{d}v^*}{\mathrm{d}t^*} = \sqrt{2h^*} - a^* \tag{16}$$

$$\frac{\mathrm{d}a^*}{\mathrm{d}t^*} = \phi\sqrt{v^*} \tag{17}$$

όπου η τιμή της παραμέτρου φ είναι:

$$\phi \equiv \beta\sqrt{2\pi\Delta}w\sqrt{\frac{h_0}{g}}\frac{A_\mathrm{t}^{3/2}}{A_\mathrm{h}^2} \tag{18}$$

Συγκριτικά με τη σχέση (8), οι τιμές του φ>>1 αναφέρονται για μικρές περιοχές A_h, οι τιμές φ<<1 αναφέρονται σε μεγάλες A_h.

Επίσης, μια γενική σχέση για την τιμή α*, ενσωματώνοντας τις εξισώσεις (15) και (16) πέρα από το χρονικό διάστημα που χρειάζεται η λίμνη για την εξάτμιση της ($t_v \ge \sqrt{2}$) είναι:

$$\overline{a^*} = \frac{1}{t_v^*} \tag{19}$$

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.

φ>>1

Σε αυτήν την περίπτωση, μετά από μια μικρή χρονική περίοδο $t_s^* << \sqrt{2}$ ασταθούς ροής, μια σταθερή ροή θα προκύψει, κατά την διάρκεια της οποίας η ποσότητα του υγρού που διαρρέει προς την λίμνη θα ισούται με αυτή που θα εξατμίζεται. Αυτή η ισορροπία εκφράζεται μηδενίζοντας το δεξί μέρος της εξίσωσης (16) και βάζοντας το α* ως συνάρτηση του χρόνου:

$$a^* = \sqrt{2} - t^*, \quad t_s^* \le t^* \le \sqrt{2} \tag{20}$$

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, α_s^*, είναι:

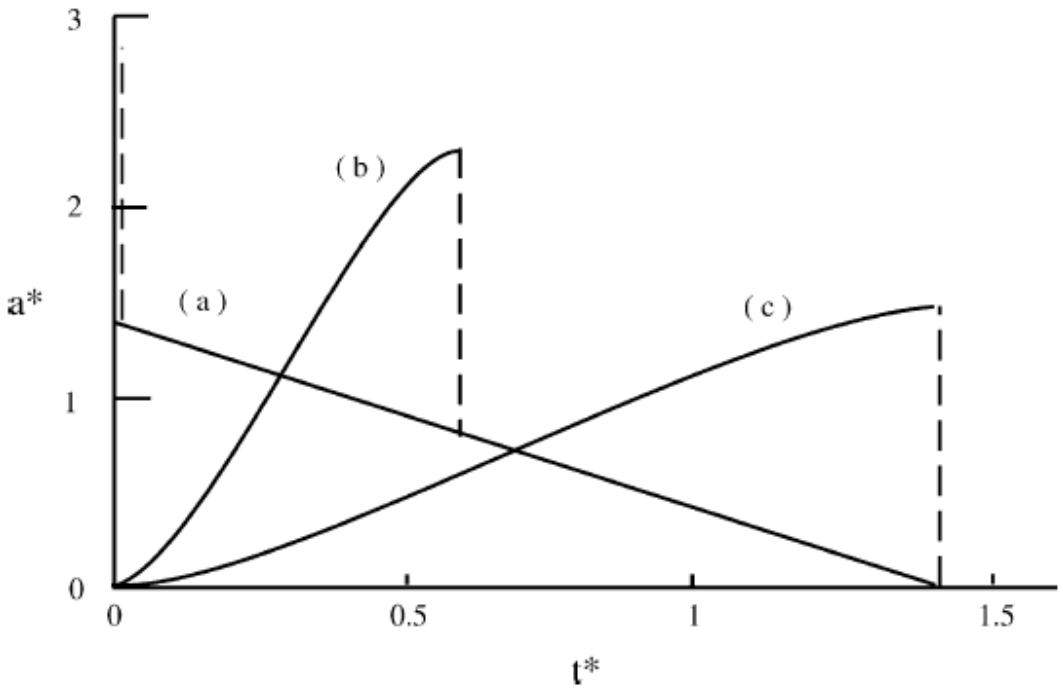
$$a_s^* = \sqrt{2} - t_s^* \tag{21}$$

Εξετάζεται στη συνέχεια η παροδική ροή στη χρονική περίοδο $0 \le t^* \le t_s^*$, για την οποία $t_s << \sqrt{2}$ και $h^*=1$. Έτσι η σχέση (16) γίνεται:

$$\frac{dv^*}{dt^*} = \sqrt{2} - a^* \tag{22}$$

το οποίο μπορεί να λυθεί ταυτόχρονα με τη σχέση (17) για να καθορίσει το $υ^*$ ως συνάρτηση του $α^*$:

$$v^* = \left[\frac{3a^*}{2\phi}\left(\sqrt{2} - \frac{a^*}{2}\right)\right]^{2/3} \tag{23}$$



Σχήμα 4. Η εξάρτηση της επιφάνειας της λίμνης, α*, από τον χρόνο για φ→∞ (a), φ=10 (b) και $\varphi=\varphi_c=1.784$

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

$$a_m^* = 2\sqrt{2} \tag{24}$$

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 (23) στη (17):

$$\begin{aligned} t_s^* &= \phi^{-2/3} \int_0^{2\sqrt{2}} \frac{\mathrm{d}a^*}{[(3a^*/2)(\sqrt{2} - a^*/2)]^{1/3}} \\ &= \left(2^{7/6}(3^{2/3})\frac{(\Gamma\{4/3\})^2}{\Gamma\{5/3\}}\right)\phi^{-2/3} = 4.124\phi^{-2/3} \end{aligned} \tag{25}$$

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

Για $\varphi \to \infty$, 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 α^* από το χρόνο t^* σε αυτή την περίπτωση φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (a).

Στις περιπτώσεις όπου το φ δεν είναι αρκετά μεγάλο για να πληρεί τις απαιτήσεις $t_s << \sqrt{2}$ και τις σχέσεις (15)-(17), πρέπει να ενσωματωθεί αριθμητικά. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα (b) για φ=10. Εδώ η παροδική φάση επεκτείνεται σε $t^*_s = 0.588$, όπου $\alpha_m^* = 2.233$ και $\alpha_s^*=0.827$, και τα δυο μικρότερα από τις τιμές $2\sqrt{2}$ και $\sqrt{2}$, αντίστοιχα για $\varphi \to \infty$. Η τιμή του α^* 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 α_m^* και α_s^* μειώνονται, μέχρι τη στιγμή που το φ αποκτήσει την τιμή $\varphi_c = 1.784$, $t^*_s=\sqrt{2}$, όπου η παροδική φάση καλύπτει όλη την διάρκεια της εκροής.

φ<<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 $0 \le t^* \le \sqrt{2}$, μπορούμε να αγνοήσουμε τον όρο της εξάτμισης στη σχέση (16) και με ολοκλήρωση να βρούμε:

$$v^* = \sqrt{2}t^* \left(1 - \frac{t^*}{2\sqrt{2}}\right), \quad t^* \le \sqrt{2} \tag{26}$$

Συνδυάζοντας την προηγούμενη εξίσωση με την σχέση (17) και ολοκληρώνοντας γύρω από την περίοδο της διαρροής, βρίσκουμε την επιφάνεια της λίμνης, α^*_d, την στιγμή $t^*=\sqrt{2}$ να είναι:

$$a_d^* = 2^{1/4}\phi \int_0^{\sqrt{2}} \left(t^*\left[1 - \frac{t^*}{2\sqrt{2}}\right]\right)^{1/2} \mathrm{d}t^* = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}\phi \tag{27}$$

Για $t^* \ge \sqrt{2}$ οι σχέσεις (16) και (17) δίνουν:

$$\frac{\mathrm{d}v^*}{\mathrm{d}t^*} = -a^* \tag{28}$$

$$\frac{\mathrm{d}a^*}{\mathrm{d}t^*} = \phi\sqrt{v^*} \tag{29}$$

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

$$v^* = \left(1 - \frac{3}{4\phi}[(a^*)^2 - (a_{\mathrm{d}}^*)^2]\right)^{2/3} \tag{30}$$

Η μέγιστη τιμή της επιφάνειας της λίμνης α^*_m βρίσκεται για $\upsilon^*=0$ και είναι:

$$(a_{\mathrm{m}}^*)^2 = \frac{4\phi}{3} + \left(\frac{\pi\,\phi}{2\sqrt{2}}\right)^2$$

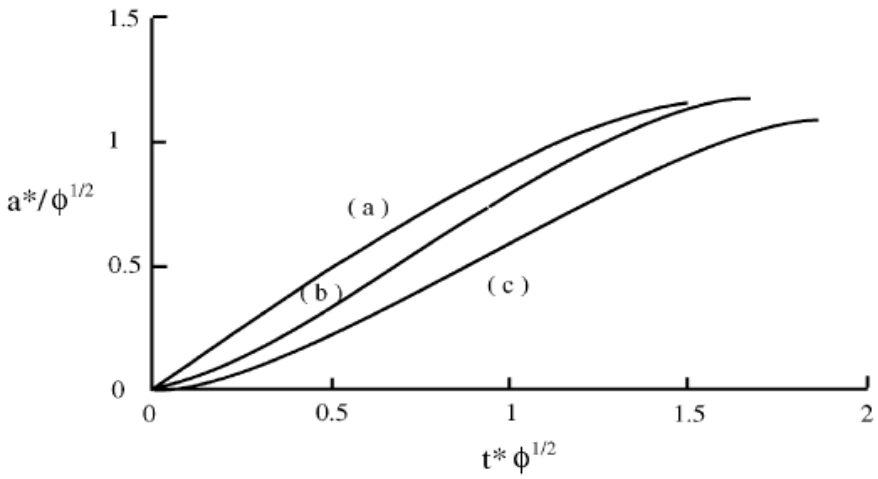
$$a_{\mathrm{m}}^* \simeq \left(\frac{4\phi}{3}\right)^{1/2}\left[1 + \frac{3\pi^2}{64}\phi\right] = 0.971\,\phi^{1/2}(1 + 0.463\phi) \tag{31}$$

Ο χρόνος, t^*_v, που απαιτείται για να εξατμιστεί ολόκληρη η λίμνη, βρίσκεται συνδυάζοντας τις (31) και (29) και ολοκληρώνοντας:

$$\int_{\sqrt{2}}^{t_{\mathrm{v}}^*} \mathrm{d}t^* = \frac{1}{\phi}\int_{a_{\mathrm{d}}^*}^{a_{\mathrm{m}}^*} \frac{\mathrm{d}a^*}{\sqrt{v^*}}$$

$$t_{\mathrm{v}}^* = \frac{\sqrt{3\pi}}{2}\frac{\Gamma\{5/3\}}{\Gamma\{7/6\}}\phi^{-1/2} + \sqrt{2} - \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.493\phi^{-1/2} + 0.304 \tag{32}$$

Για να εκφραστεί το α^* ως συνάρτηση του χρόνου, πρέπει να ολοκληρωθούν οι (28) και (29). Για $\varphi\to 0$, η ολοκλήρωση αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (a). Όπως είναι αναμενόμενο, η επιφάνεια της λίμνης μεγαλώνει με τον χρόνο έως ότου η εξάτμιση φτάσει μια τιμή, την χρονική στιγμή όπου $t^*\sqrt{\phi}=1.493$ με $\alpha^*/\sqrt{\phi}=1.155$.



Σχήμα 5. Η εξάρτηση της επεξεργασμένης επιφάνειας λίμνης, $\alpha^*/\sqrt{\phi}$ στον επεξεργασμένο χρόνο, $t^*\sqrt{\phi}$ για $\varphi\le\varphi_c$:(a),$\varphi\to 0$:(b),$\varphi=1/3$:(c),$\varphi=\varphi_c=1.784$

<u>$\varphi \leq \varphi_c$</u>

Γενικά, για τιμές του φ, στο εύρος $\varphi \leq \varphi_c$, που δεν είναι αρκετά μικρές ώστε να είναι έγκυρες οι παραπάνω προσεγγίσεις, η χρονική εξάρτηση του υ* και του α* καθώς και του α^*_m, t^*_v βρίσκεται από ολοκληρώσεις των σχέσεων (15)-(17).

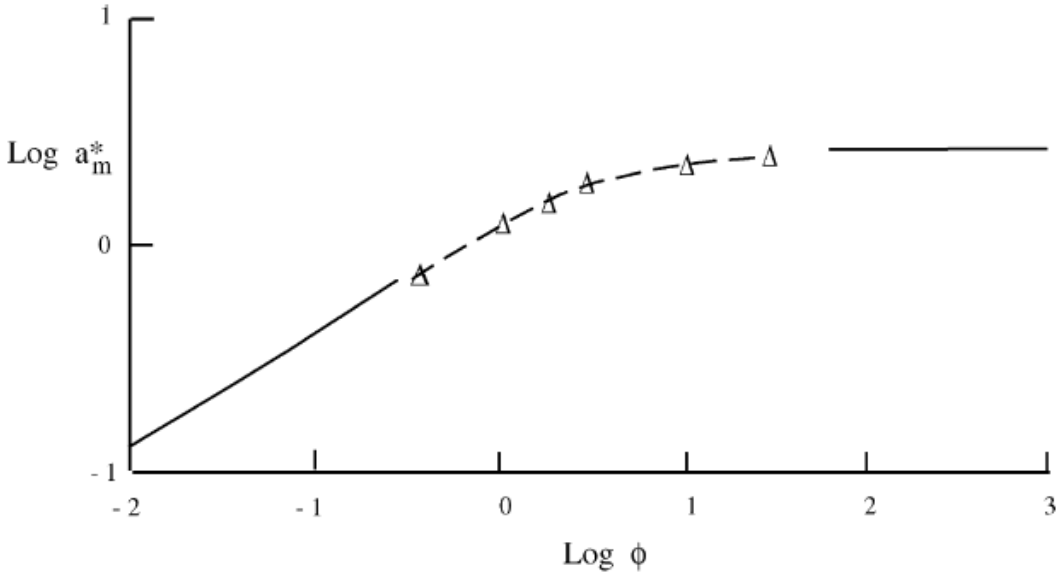
Σύνοψη

Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα, στον οποίο περιέχονται οι τιμές των α^*_m, t^*_s, α^*_s, t^*_v και $\alpha^*_m t^*_v$, για 8 διαφορετικές τιμές του φ στο εύρος $0 \leq \varphi \leq \infty$. Ως συναρτήσεις του φ, το α^*_m μεγαλώνει όσο το t^*_v μειώνεται, στο εύρος $0 \leq \varphi \leq \infty$, φτάνοντας τα όρια $2\sqrt{2}$ και $\sqrt{2}$,αντίστοιχα, για $\varphi \to \infty$.

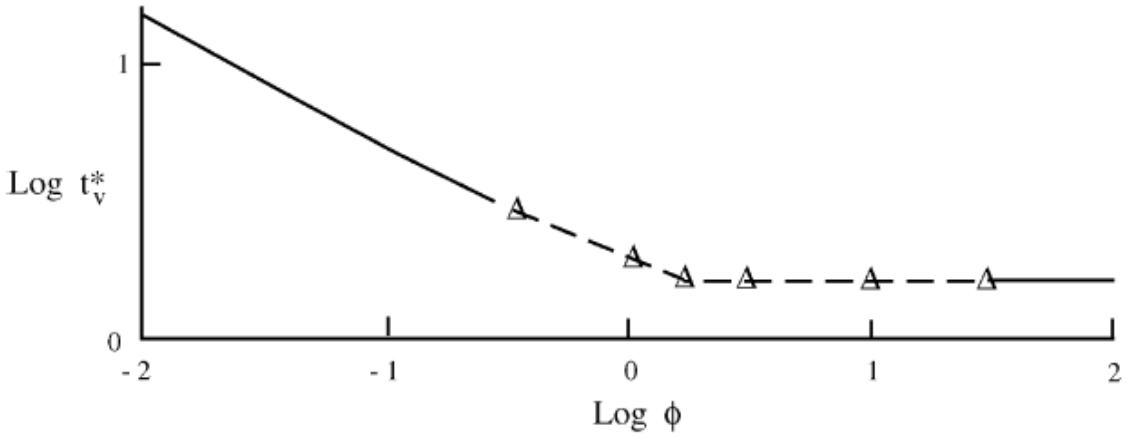
Τα δεδομένα του πίνακα για τα α^*_m και t^*_v ως συνάρτηση του φ φαίνονται και στα επόμενα σχήματα αντίστοιχα, με τη χρήση λογαριθμικών συντεταγμένων:

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 6. Η αδιαστατοποιημένη μέγιστη επιφάνεια λίμνης, α^*_m, ως συνάρτηση της παραμέτρου εκροής φ.



Σχήμα 7. Η αδιαστατοποιημένη διάρκεια εξάτμισης t^*_v, ως συνάρτηση της παραμέτρου φ.

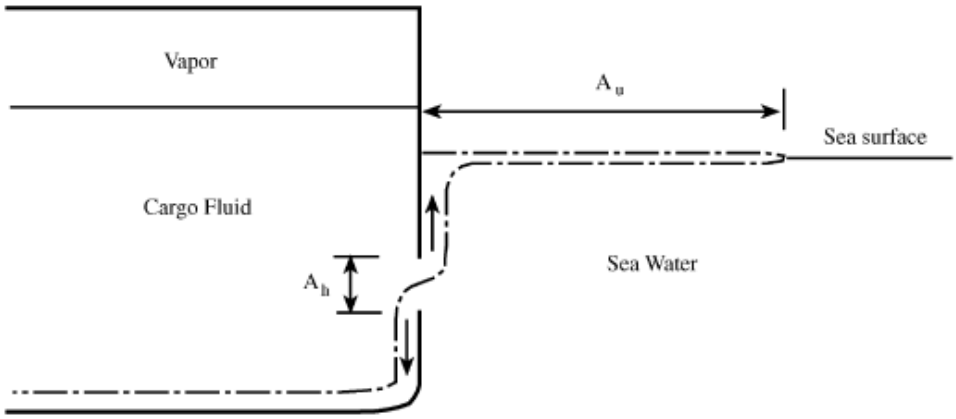
ΡΗΓΜΑΤΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΣΑΛΟ

Για ένα ρήγμα κάτω από το νερό, όπως σε περίπτωση προσάραξης ή σύγκρουσης μεταξύ δυο πλοίων η απόσταση h (Σχήμα 3) που οδηγεί την απελευθέρωση του υγρού θα μειωθεί κατά [Δ/(1-Δ]d, όπου d είναι η κάθετη απόσταση της ισάλου από το κέντρο του ρήγματος στη γάστρα του πλοίου. Η αρχική ροή θα δίνεται από τον ίδιο τύπο που παρουσιάστηκε προηγουμένως με τη διαφορά ότι αντί για h θα έχουμε h^:

$$\hat{h} \equiv h - \left(\frac{\Delta}{1-\Delta}\right) d \tag{33}$$

Η αρχική ροή θα σταματήσει όταν h^=0, με την στάθμη του υγρού φορτίου σε απόσταση [Δ/(1-Δ]d πάνω από την ίσαλο γραμμή.

Στο τέλος του σταδίου της διαρροής υπάρχει, κατά μέσο όρο, μια ισορροπία της υδροστατικής πίεσης μεταξύ του υγρού φορτίου και του θαλάσσιου νερού εξωτερικά του πλοίου, τουλάχιστον στο μέσο της επιφάνειας του ρήγματος. Πάνω, όμως, και κάτω από αυτό το επίπεδο υπάρχει μια ανισορροπία με αποτέλεσμα να διαρρέει το υγρό φορτίο έξω και να εισέρχεται το νερό μέσα στη δεξαμενή, με ίσους ρυθμούς εισροής – εκροής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8. Το θαλασσινό νερό που εισέρχεται εκτοπίζει το υγρό φορτίο από το πυθμένα της δεξαμενής οδηγώντας σε περαιτέρω εκροή φορτίου από το ρήγμα από κάτω, αντίθετα δηλαδή από τον τρόπο που απελευθερωνόταν το φορτίο στο αρχικό στάδιο που ήταν από πάνω. Αυτή η διαρροή συνεχίζεται μέχρι το κατώτερο μέρος της δεξαμενής να γεμίσει με θαλασσινό νερό μέχρι το άνω άκρο της επιφάνειας του ρήγματος.



Σχήμα 8. Τρόπος διαρροής του φορτίου στη περίπτωση υποθαλάσσιου ρήγματος

Ο ρυθμός εκροής του όγκου του φορτίου μπορεί να υπολογιστεί. Θεωρούμε πρώτο το φαινόμενο εκροής του υγρού από άνω μέρος του ρήγματος. Υποθέτοντας ότι το κάθετο ύψος του ρήγματος είναι $\sqrt{A_h}$, και ότι ένα ποσοστό f του ύψους αυτού και της επιφάνειας καλύπτει τις ανάγκες της εκροής, η διαφορά πίεσης που καθοδηγεί την εκροή είναι περίπου $(\rho_w - \rho_c)gf\sqrt{A_h}$ και η αντίστοιχη ταχύτητα $(2[\rho_w - \rho_c]gf\sqrt{A_h}/\rho_c)^{1/2}$, οδηγώντας σε ένα ρυθμό εκροής dV/dt:

$$\frac{dV}{dt} \sim \left(\frac{2(\rho_w - \rho_c)gf\sqrt{A_h}}{\rho_c}\right)^{1/2} fA_h \sim \left(\frac{2(\rho_w - \rho_c)g(1-f)\sqrt{A_h}}{\rho_w}\right)^{1/2} (1-f)A_h \tag{34}$$

όπου το δεξί μέλος της εξίσωσης είναι ο αντίστοιχος ρυθμός εισροής του θαλασσινού νερού στη δεξαμενή. Με απαλοιφή του f έχουμε:

$$\frac{dV}{dt} = \gamma(2g\Delta_u A_h^{5/2})^{1/2} \tag{35}$$

με γ μια εμπειρική σταθερά και

$$\Delta_u \equiv \frac{\rho_w - \rho_c}{(\rho_w^{1/3} + \rho_c^{1/3})^3} \tag{36}$$

Αυτή ο ρυθμός εκροής είναι σταθερός κατά τη περίοδο της απελευθέρωσης διότι η διαφορά πίεσης στην οποία οφείλεται το φαινόμενο δεν εξαρτάται από τον χρόνο. Συνεπώς, μετά από μια αρχική ασταθής ροή, η λίμνη που εμφανίζεται στην επιφάνεια της θάλασσας έχει μια επιφάνεια A_u, ανεξάρτητη από τον χρόνο ίση με:

$$A_u = \frac{\gamma(2g\Delta_u A_h^{5/2})^{1/2}}{w} \tag{37}$$

Σε περίπτωση μεγάλης επιφάνειας A_u, ο σχηματισμός της λίμνης θα είναι ασταθής όμοιος με αυτόν στη περίπτωση ακαριαίας διαρροής.

Για κάθε, ρήγμα του οποίου η επιφάνεια εκτείνεται τόσο πάνω όσο και κάτω από την ίσαλο γραμμή, το αποτέλεσμα θα είναι να διαρρεύσει <u>όλη η ποσότητα</u> του υγροποιημένου φυσικού αερίου που υπάρχει στη δεξαμενή.

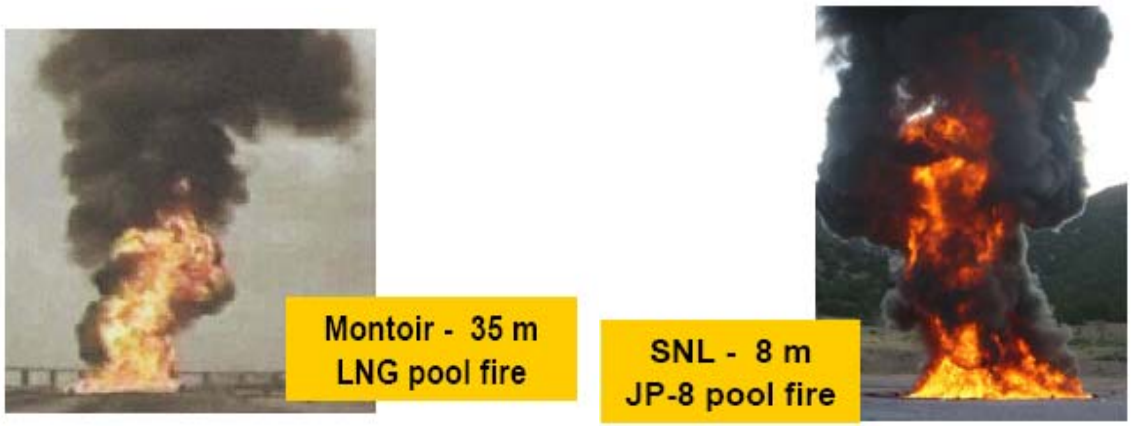
ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΛΙΜΝΗΣ

Τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν μια πυρκαγιά λίμνης είναι η ένταση της ροής της ακτινοβολίας που εκπέμπει και το μέγεθος της φλόγας, που στο συγκεκριμένο μοντέλο εκφράζεται από το ύψος. Η ένταση καθορίζεται στη συνέχεια ενώ το γεωμετρικό σχήμα της φλόγας που εμφανίζεται σε μια LNG λίμνη είναι ένας ελλειπτικός κύλινδρος ακριβώς 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:

$$L = 42 \cdot D_h \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\rho_a \cdot (g \cdot D_h)^{0.5}} \right)^{0.61} \qquad (38)$$

όπου L= το ύψος της φλόγας σε m
D_h= διάμετρος της λίμνης σε m
m΄= μαζική ροή καύσης σε kg/(m s^2)
ρ_α= πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3
g= επιτάχυνση της βαρύτητας

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



Σχήματα 9, 10. Μορφή και μέγεθος φλόγας από μια πυρκαγιά λίμνης LNG.

Στη περίπτωσης πυρκαγιάς λίμνης, η θερμική ακτινοβολία μπορεί να εκτιμηθεί από τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας της καύσης του υγρού καυσίμου. Ο ρυθμός αυτός Q_{av} κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς λίμνης είναι:

$$Q_{av} = \frac{(h_0 A_t)\rho_c h_c}{t_v} \qquad (39)$$

όπου h_c είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου. Στη περίπτωση ρηγμάτων κάτω από την ίσαλο γραμμή, ο ρυθμός είναι:

$$Q_u = \frac{\gamma(2g\Delta_u A_h^{5/2})^{1/2}}{w}\rho_c h_c \qquad (40)$$

Η θερμική ροή ακτινοβολίας q σε απόσταση r από το κέντρο της πυρκαγιάς λίμνης είναι ίση με:

$$q = \frac{\eta Q}{4\pi r^2} \qquad (41)$$

όπου η είναι το τμήμα της θερμότητας που απελευθερώνεται από τη πυρκαγιά που εκλύεται ως θερμική ακτινοβολία. Η εξίσωση αυτή εφαρμόζεται μόνο στις περιπτώσεις όπου η απόσταση r από το κέντρο της πυρκαγιάς είναι αρκετά μεγάλη.

ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΕΥΦΛΕΚΤΟΤΗΤΑΣ (LFL)

Για τον υπολογισμό του κατώτερου ορίου ευφλεκτότητας, κάτω του οποίου το σύννεφο ατμού δεν μπορεί να αναφλεγεί, δεν υπάρχει διαθέσιμη μοντελοποίηση. Συνεπώς, για την εκτίμηση κάθε φορά της τιμής αυτής, συγκεντρώσαμε όλα τα αποτελέσματα που υπολόγισαν οι διάφοροι μελετητές και με γραμμική παρεμβολή βγάλαμε τα δικά μας.

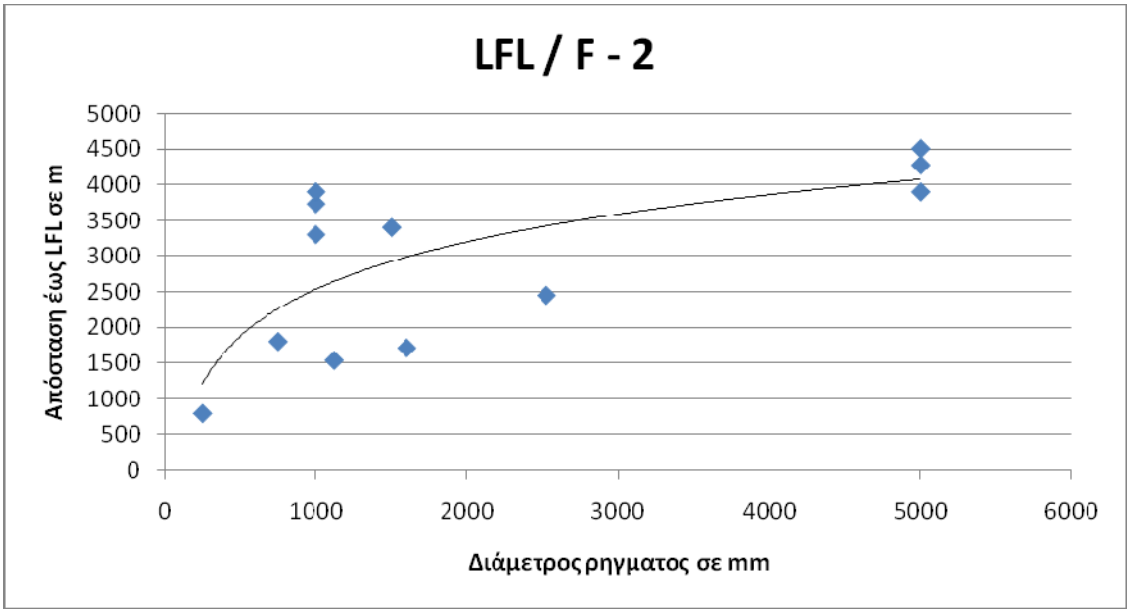
Πρέπει να σημειωθεί, ότι οι παραπάνω μελέτες αναφέρονται σε συγκεκριμένες τιμές ταχύτητας ανέμου, ενός παράγοντα καθοριστικού για τον υπολογισμό του LFL. Οι τιμές αυτές ήταν συνολικά τρεις (3) και μικρής έντασης (3-5 m/s). Έτσι, προκείμενου να μελετήσουμε και περιπτώσεις με διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, χρησιμοποιήσαμε μια παρόμοια μέθοδος γραμμικής παρεμβολής ώστε να μπορούν να γίνουν οι υπολογισμοί μας και να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα στη συνέχεια.

Η κατάσταση ατμοσφαιρικής σταθερότητας εκφράζεται μέσω ενός γράμματος, συνήθως F ή D αλλά και A ορισμένες φορές. Η σταθερότητα D χαρακτηρίζεται από μερική συννεφιά κατά τη διάρκεια τόσο της μέρας όσο και της νύχτας. Η ατμοσφαιρική αναταραχή / στροβιλότητα δεν είναι τόσο μεγάλη στη κατάσταση D όσο στην A, με συνέπεια το αέριο νέφος να μην αναμιγνύεται αρκετά γρήγορα με την τριγύρω ατμόσφαιρα όπως στην A.

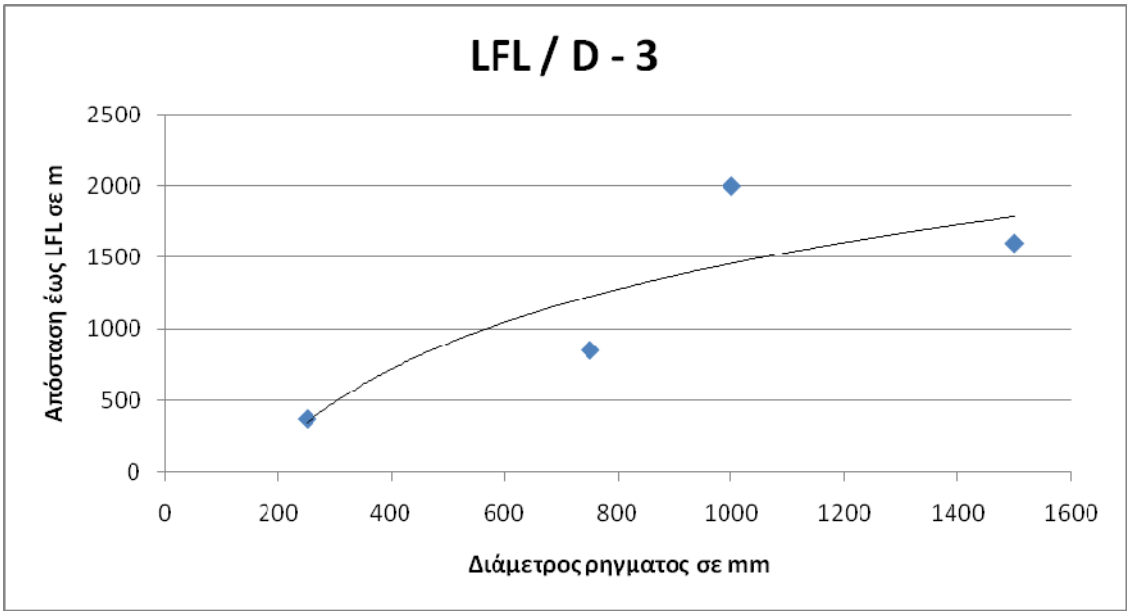
Η σταθερότητα F αντικατοπτρίζει τη πιο σταθερή ατμοσφαιρική κατάσταση. Η κατάσταση αυτή συνήθως εμφανίζεται κατά τη διάρκεια των πολύ πρωινών ωρών πριν την ανατολή του ηλίου

(δηλαδή χωρίς την ύπαρξη ηλιακής ακτινοβολίας) και κάτω από χαμηλούς ανέμους. Ο συνδυασμός των ανέμων χαμηλής ταχύτητας με την έλλειψη ηλιακής ακτινοβολίας επιτρέπουν σε μια ατμόσφαιρα που εμφανίζεται ήρεμη και αμετάβλητη, να περιορίζει την ικανότητα αραίωσης του LNG σύννεφου σε αυτή.

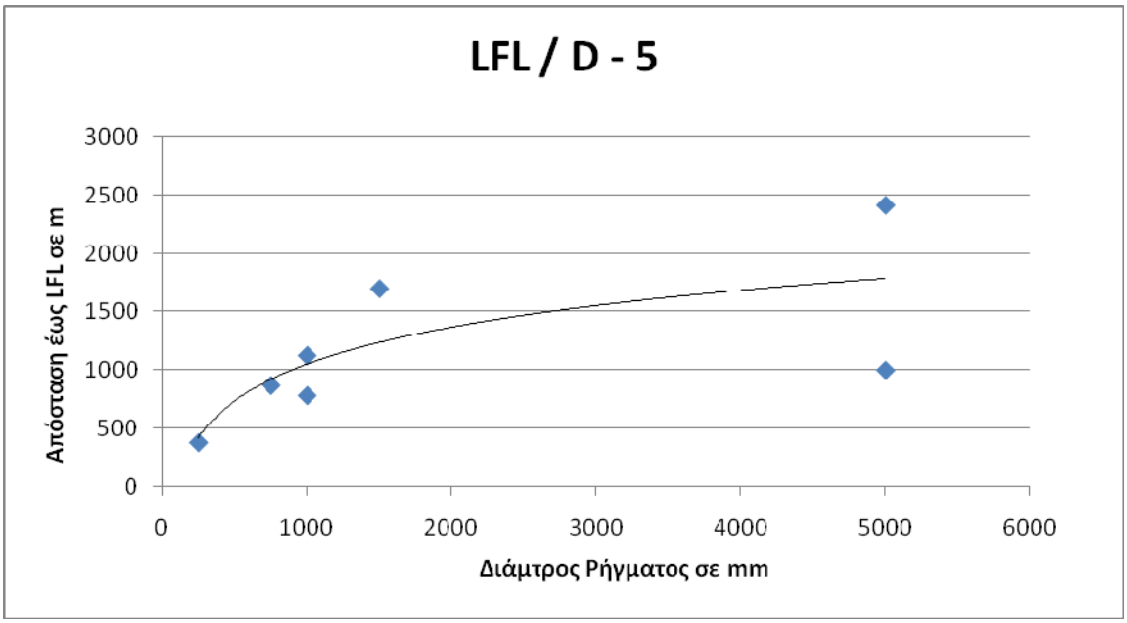
Στη συνέχεια παραθέτουμε τα διάφορα διαγράμματα που προέκυψαν από τη επεξεργασία των αποτελεσμάτων προηγούμενων μελετών σχετικά με τις διάφορες ατμοσφαιρικές καταστάσεις. Με βάση λοιπόν αυτά τα διαγράμματα μπορούμε να υπολογίζουμε τις διάφορες αποστάσεις έως το LFL για ρήγματα διαφόρων διαμέτρων. Ανάλογη διαδικασία ακολουθούμε και για τον υπολογισμό του LFL για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου (5, 10, 15 m/s κτλ.).



Σχήμα 11. Απόσταση έως το LFL ως συνάρτηση του ρήγματος για ατμοσφαιρική κατάσταση F-2.



Σχήμα 12. Απόσταση έως το LFL ως συνάρτηση του ρήγματος για ατμοσφαιρική κατάσταση D-3.



Σχήμα 13. Απόσταση έως το LFL ως συνάρτηση του ρήγματος για ατμοσφαιρική κατάσταση D-5.

ΕΚΡΗΞΗ

Το ενδεχόμενο να εμφανιστούν φαινόμενα έκρηξης σε μια διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό είναι κάτι αρκετά δύσκολο και σπάνιο. 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.

Η ενέργεια μια πιθανές έκρηξης, Ε (MJ), που εκλύεται βρίσκεται από την ενθαλπία καύσης του υγρού καυσίμου (ΔΗ), από τον όγκο του νέφους (V), την πυκνότητα του φυσικού αερίου (ρ) και από την στοιχειομετρία της αντίδρασης (αναλογία φυσικού αερίου : αέρα). Έχουμε δηλαδή ότι:

$$E = V \cdot [\Delta \mathrm{H} \cdot \rho \cdot \text{αναλογία}]$$

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα παραδείγματα ώστε να γίνει πιο κατανοητή η ένταση μιας τέτοιας πιθανής έκρηξης και των επιπτώσεων της:

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικές επιπτώσεις εκρήξεων συγκεκριμένης ενέργειας.

GJ	**Μέγεθος ενέργειας**
1.2	Το θεωρητικό ελάχιστο ποσό ενέργειας που απαιτείται για την τήξη 1 t χάλυβα
1.5	Η ενέργεια ενός κεραυνού
1.6	Η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια στον μαγνήτη του πειράματος “ATLAS” στο CERN
23	Η κινητική ενέργεια ενός Airbus A380 σε πτήση (560 t με ταχύτητα 562 kn)
50	Η ενέργεια που εκλύεται από μια βόμβα MOAB (Massive Ordnance Air Blast)
72	Η ενέργεια που καταναλώθηκε από ένα μέσο αυτοκίνητο το 2000
900	Η ενέργεια που εκλύεται από ένα πύραυλο Atlas στην εκτόξευση του

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για τη διαρροή 14,300 m^3 LNG από μια δεξαμενή 25,000 m^3 ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (125,000 m^3) μέσω ενός ρήγματος διαμέτρου 6 m, μια πιθανή έκρηξη θα έχει ως αποτέλεσμα να εκλυθεί ενέργεια της τάξης των 18 – 54 GJ.

6. ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΑΠΟ ΕΝΑ LNG ΥΓΡΑΕΡΙΟΦΟΡΟ

Μετά τα γεγονότα της 11^{ης} Σεπτεμβρίου το 2001 στις ΗΠΑ, έχουν μεγαλώσει οι ανησυχίες σχετικά με επιθέσεις τρομοκρατών σε κατασκευές με μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο. Συγκεκριμένα, η πιθανότητα ενός πλοίου βόμβα με στόχο ένα υγραεριοφόρο που να βρίσκεται σε ύδατα κοντά στη ξηρά, δεν είναι τόσο μικρή όσο θα φανταζόμασταν. Οι επιπτώσεις από ένα τέτοιο γεγονός είναι πολύ μεγάλες, και αποτελούν ένα πρόβλημα μεγάλου βεληνεκούς για τη δημόσια ασφάλεια.

Οι ανησυχίες ασφάλειας για το κοινό, προέρχονται από τα αποτελέσματα της καύσης του υγρού φορτίου του υγραεριοφόρου, το οποίο θα διαρρεύσει από τη δεξαμενή συγκράτησης λόγω του ρήγματος που θα δημιουργηθεί. Η πυρκαγιά που θα ακολουθήσει θα επεκταθεί πάνω στη επιφάνεια της θάλασσας προς τις κοντινές ακτές και πιθανόν να βάλει φωτιά στα κτίρια της ακτής.

Η πυρκαγιά που θα ακολουθήσει από μια επίθεση με πλοίο βόμβα σε ένα LNG πλοίο θα έχει απρόβλεπτο μέγεθος και ένταση. Όπως και η επίθεση στους δίδυμους πύργους στη Νέα Υόρκη, δεν υπάρχει κάποια παρόμοια περίπτωση με πυρκαγιές τέτοιας κλίμακας, ώστε να ληφθούν τα ανάλογα μέτρα προστασίας. Μη έχοντας τέτοια εμπειρία, τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συμβάντος θα ληφθούν από πειράματα με πολύ μικρότερες πυρκαγιές.

6.1 ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΑΠΟ LNG ΠΛΟΙΟ

Τα υγρά καύσιμα, όπως το LNG, όταν μεταφέρονται με πλοία, αποθηκεύονται σε ξεχωριστές δεξαμενές, κάθε μια από τις οποίες έχει συνήθως χωρητικότητα περίπου 25,000 m^3. Αυτό θα είναι και το μέγεθος των δεξαμενών που θα χρησιμοποιήσουμε στις παρακάτω εφαρμογές. Μια ισχυρή έκρηξη κοντά στις πλευρές του πλοίου μπορεί να τρυπήσει τη δεξαμενή ώστε να επιτραπεί η διαρροή του υγρού στην επιφάνεια της θάλασσας. Το τμήμα του υγρού φορτίου που βρίσκεται πάνω από το ρήγμα, είναι αυτό που διαρρεύσει, ενώ μπορεί να εκτοξευτεί και επιπλέον ποσότητα. Δεδομένου του μεγάλου μεγέθους του ρήγματος από τη έκρηξη, τέτοια φορτία διαρρέουν σε διάρκεια λεπτών.

Το LNG είναι ελαφρύτερο από το θαλασσινό νερό. Επιπλέει, χωρίς να αναμιχθεί, στην επιφάνεια του νερού, εξαπλώνεται γρήγορα και είναι εκτεθειμένο στον αέρα. Στη περίπτωση που αναφλεγεί, κάτι που είναι σχεδόν σίγουρο σε μια έκρηξη, η λίμνη του LNG θα καίγεται σθεναρά. Ο χρόνος που θα χρειαστεί για να εξατμιστεί ολόκληρος ο όγκος του υγρού που διέρρευσε, ο οποίος στις εφαρμογές μας είναι συνήθως 14,300 m^3, μπορεί να είναι της τάξεως ελάχιστων λεπτών.

Η πυρκαγιά που καίει χιλιάδες τόνους LNG μέσα σε λίγα λεπτά είναι πολύ μεγάλη, και βρίσκεται έξω από το εύρος της πυροσβεστικής εμπειρίας. Τέτοιες πυρκαγιές δεν μπορούν να

καταπολεμηθούν, ενώ η θερμική ακτινοβολία τους μπορεί να προκαλέσει ζημιές στους ανθρώπους και να κάψει κτίρια.

6.2 ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Στη πλειονότητα των εφαρμογών μας θεωρούμε ότι ο όγκος του υγρού που απελευθερώνεται από μια δεξαμενή χωρητικότητας 25,000m^3 είναι περίπου 14,300m^3. Αυτά τα νούμερα αναφέρονται σε δεξαμενή μεμβρανικής μορφής με διαστάσεις που φαίνονται στη συνέχεια. Βάσει αυτών των δεδομένων και σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Fay, η μέγιστη περιοχή της πυρκαγιάς της λίμνης (επιφάνεια λίμνης) είναι 180,000m^2 ενώ η διάρκεια της πυρκαγιάς είναι κοντά στα 3 λεπτά.

Η πυρκαγιά της λίμνης ξεκινάει τη στιγμή της έκρηξης και μεγαλώνει αναλογικά με τον χρόνο, φτάνοντας στη μέγιστη έκταση της πριν από το τέλος της διαδικασίας της καύσης.

Για αυτού του είδους τη διαρροή, στις συγκεκριμένες τοποθεσίες, κοντά σε παράκτιες κατασκευές, είναι δυνατόν το εξωτερικό άκρο της πυρκαγιάς λίμνης, στη μέγιστη έκταση της, να προσκρούσει στις κατασκευές αυτές. Είναι σχεδόν σίγουρο ότι κτίρια με εκρηκτική ικανότητα θα αναφλεγούν εάν έρθουν σε επαφή με τη φλόγα.

Η έκταση της πυρκαγιάς λίμνης, η οποία εκτείνεται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από το μήκος του πλοίου σε μικρό χρονικό διάστημα, καθιστά αδύνατο το γεγονός μετακίνησης του πλοίου μακριά από την επικίνδυνη περιοχή. Η δυνατότητα, επίσης, καθυστέρησης της εξάπλωσης της λίμνης δεν είναι εφικτή.

6.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΛΙΜΝΗΣ

Η καύση του LNG εκλύει θερμική ακτινοβολία, η οποία αν είναι αρκετά έντονη, μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα στους ανθρώπους που εκτίθενται σε αυτή καθώς και να βάλει φωτιά σε υλικά και κτίρια. Όσο πιο έντονη η ακτινοβολία, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος έκθεσης που χρειάζεται για να εμφανιστούν εγκαύματα και ανάφλεξη υλικών.

Για την έκθεση του ανθρώπινου δέρματος στη θερμική ακτινοβολία της πυρκαγιάς, μια θερμική ροή των 5 kW/m^2 οδηγεί σε αφόρητους πόνους μετά από έκθεση 13 δευτερολέπτων σε αυτή, και εγκαύματα δευτέρου βαθμού μετά από έκθεση 40 δευτερολέπτων. Η έκθεση σε διπλάσια επίπεδα, 10 kW/m^2, για διάρκεια 40 δευτερολέπτων είναι θανατηφόρα. Επιπλέον, η τιμή των 5 kW/m^2 είναι ικανή να προκαλέσει ανάφλεξη του ξύλου μέσα σε 40 δευτερόλεπτα.

Ως κριτήριο έχει επιλεγεί η θερμική ροή των 5 kW/m^2 σαν το όριο για σημαντικές βλάβες στον άνθρωπο και σε εύφλεκτα υλικά, και κατά συνέπεια η απόσταση ασφαλείας που υπολογίζεται σε διαρροές LNG γίνεται με βάση αυτό το όριο. Έτσι σε κάθε εφαρμογή του μοντέλου που θα ακολουθήσει, στη περίπτωση που θα υπάρξει πυρκαγιά, η τιμή που θα καθορίζει τη ζώνη επικινδυνότητας είναι τα 5 kW/m^2.

Ένα παράδειγμα ενδεικτικό της μεγάλης ποσότητας που εκλύεται είναι το ότι ο μέσος ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης από μια διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι περίπου ίσος με τη διπλάσια θερμική κατανάλωση όλων των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ. Συγκριτικά με το πετρέλαιο η ένταση της πυρκαγιάς του είναι το 8% αυτής του LNG, μεγαλύτερη από τη μέση θερμική κατανάλωση των εγκαταστάσεων της Νέας Αγγλίας.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ 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.

6.3.1 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.

ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΛΙΜΝΗΣ- ΑΣΦΥΞΙΑ

Σε μία μεγάλης κλίμακας απελευθέρωση κρυογενούς 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.

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

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά συμπτώματα έλλειψης O_2.

%O_2 στο επίπεδο της θάλασσας	Τοπική πίεση O_2 (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 δραπετεύσουν 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 δραπετεύσουν. 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.

ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΛΙΜΝΗΣ– ΕΓΚΑΥΜΑΤΑ

Η έκταση της βλάβης στους ανθρώπους από την έκθεση τους στη θερμική ακτινοβολία, εξαρτάται από τη ροή της ακτινοβολίας 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 αρχικά 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.

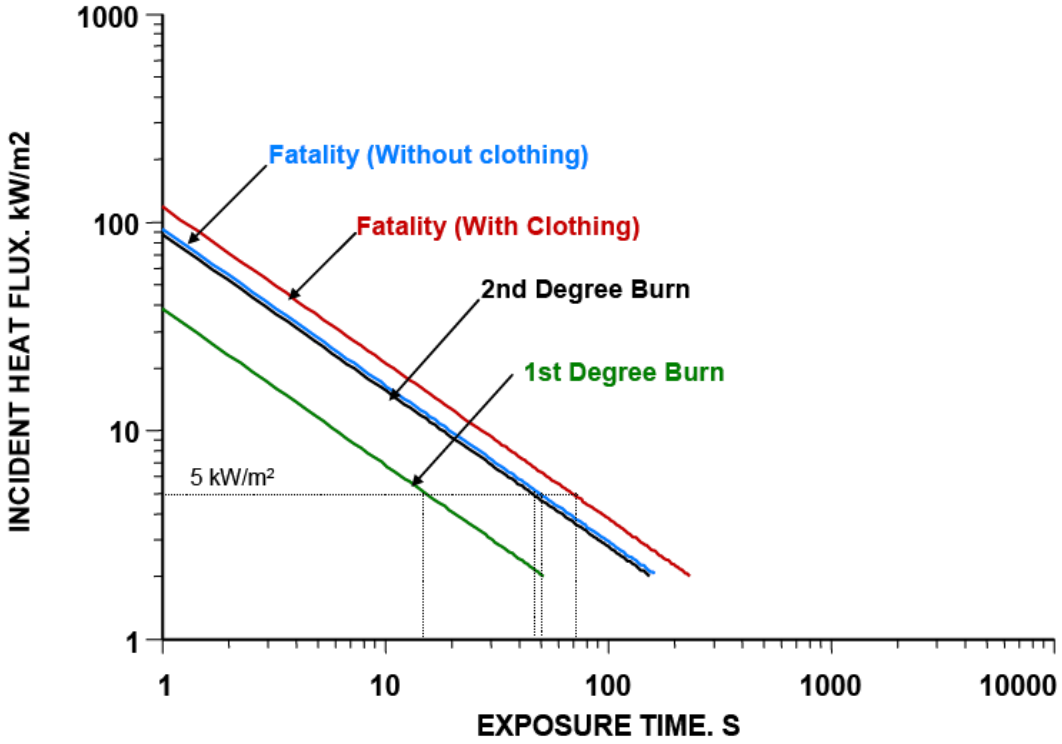
Λεπτομερείς περιλήψεις των διαθέσιμων στοιχείων και των μοντέλων παρέχονται σε διάφορες αναφορές όπως του Lees (1996) και του TNO (1992). Σε αυτήν την έκθεση δεν παρέχονται λεπτομερώς αυτές οι αναφορές αλλά μια περίληψη τους. Παρουσιάζονται τα παραδείγματα των στοιχείων που είναι κατάλληλα για πυρκαγιές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

Πίνακας 2. Κριτήρια τραυματισμών εγκαυμάτων από την Federal Emergency Management Agency (FEMA, 1990).

Ένταση θερμικής ακτινοβολίας		Χρόνος για δριμύτατο πόνο	Χρόνος για 2ου βαθμού εγκαύματα
BTU/hr/ft2	KW/m2	sec	sec
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

Πίνακας 3. Όρια έκθεσης που συστήνει η API (1997) για την έκθεση εργαζομένων στη θερμική ακτινοβολία από τις φλόγες.

Ένταση θερμικής ακτινοβολίας		Τύπος βλάβης
BTU/hr/ft2	KW/m2	
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 14. Επιπτώσεις της έκθεσης σε θερμική ακτινοβολία.

6.3.2 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.

ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ – ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ

Το μέγεθος και η τοποθεσία του ρήγματος και της πιθανής διαρροής κρυογόνου LNG αποτελούν τη βάση για την ανάλυση των κρυογονικών επιπτώσεων στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Όπως είναι γνωστό η επαφή κρυογόνων 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 [Linser 2004] [Shell 2002] [Wellman 1983].

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 4. Εκτίμηση ζημιάς πλοίου ανάλογα με το μέγεθος του ρήγματος.

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
Σκόπιμο ρήγμα[5]	0.5 m^2	1	Μικρή
Σκόπιμο ρήγμα	2 m^2	1	Μικρή
Σκόπιμο ρήγμα	2 m^2	3	Μέτρια
Σκόπιμο ρήγμα	12 m^2	1	Σοβαρή
Σκόπιμο 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 ζημία μπορεί να επηρεάσει την ακεραιότητα του πλοίου και του φορτίου
4 – σοβαρός σημαίνει σημαντική δομική ζημία. 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.

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

Ένταση θερμικής ακτινοβολίας		Τύπος ζημιάς
BTU/hr/ft2	KW/m2	
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

Πίνακας 6. Αποτελέσματα ζημιών από θερμική ακτινοβολία για διάφορα υλικά από τον TNO (1992)

Τύπος ζημιάς	Κρίσιμη ένταση ακτινοβολίας1 (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 ζημίας των κατασκευών απαιτεί υπολογισμούς ισορροπίας θερμότητας ώστε να καθοριστεί η θερμοκρασία επιφάνειας για να συγκριθεί με τις αποδεκτές θερμοκρασίες για την κάθε κατασκευή. Ο TNO (1992) παρουσιάζει μια συζήτηση και ένα παράδειγμα τέτοιων υπολογισμών.

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 7. 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 Dinenno (1982)		
9500	30	Αβίαστη ανάφλεξη του ξύλου
4800	15	Ελεγχόμενη ανάφλεξη του ξύλου

6300	20	Ανάφλεξη της Fuel Oil δεξαμενής σε 40 sec
3200	10	Ανάφλεξη της Fuel Oil δεξαμενής σε 120 sec
5700 - 6300	18-20	Αστοχία μόνωσης καλωδίων
3800	12	Λιώσιμο πλαστικού
12000	37.5	Ζημιά εξοπλισμού
2900	9	Ζημιά εξοπλισμού – συντηρητική τιμή

7. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Στην αρχή του τεύχους αυτού περιγράψαμε το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε, το οποίο είναι επηρεασμένο κυρίως από το αντίστοιχο μοντέλο του Fay ενώ έχει και στοιχεία από άλλες μελέτες σχετικά με τομείς που ο Fay αγνόησε, είτε γιατί δεν τον ενδιέφεραν είτε γιατί δεν μπορούσε να εκτιμήσει.

Όλες αυτές οι πληροφορίες, λοιπόν, συγκεντρώθηκαν σε ένα αρχείο στο οποίο χρησιμοποιούνται οι διάφοροι τύποι για τον υπολογισμό των επιπτώσεων από μια διαρροή LNG στη θάλασσα. Η μορφή του αρχείου αυτού και τα μεγέθη που υπολογίζονται φαίνονται στις επόμενες σελίδες.

Στο μοντέλο παρουσιάζεται και το σχήμα μιας μεμβρανικής δεξαμενής με αναγραφόμενες τις χαρακτηριστικές της διαστάσεις, οι οποίες καθορίζονται ακριβώς δίπλα, βάση των οποίων υπολογίζεται ο συνολικός όγκος του φορτίου που διέρρευσε. Τα μεγέθη που χρειάζονται για τους υπολογισμούς (αρχικά δεδομένα) είναι αυτά με το κίτρινο χρώμα ενώ αυτά που προκύπτουν από τους υπολογισμούς έχουν μπλε χρώμα.

Εισάγοντας τα αρχικά δεδομένα στα κίτρινα κελιά, του ηλεκτρονικού μοντέλου υπολογισμών για ρήγματα πάνω από την ίσαλο γραμμή, υπολογίζεται ο αριθμός φ και ανάλογα με το μέγεθος του κατευθυνόμαστε στην αντίστοιχη στήλη. Έτσι αν ο αριθμός φ είναι πολύ μεγαλύτερος της μονάδας ($\varphi >> 1$) τα αποτελέσματα είναι αυτά της πρώτης στήλης, για $\varphi << 1$ είναι αυτά της δεύτερης και για φ πεπερασμένο είναι σε μια από τις δυο τελευταίες στήλες (ανάλογα με τον αν είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από τη τιμή 0,251 σύμφωνα με το μοντέλο του Fay). Ποια από τις παραπάνω στήλες είναι αυτή που μας ενδιαφέρει φαίνεται από την ένδειξη «ΟΚ» ή «-» που υπάρχει ακριβώς από πάνω της.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση του ρήγματος κάτω από την ίσαλο γραμμή του πλοίου, όπου συμπληρώνονται τα μεγέθη με το κίτρινο χρώμα και προκύπτουν τα μεγέθη με το μπλε χρώμα.

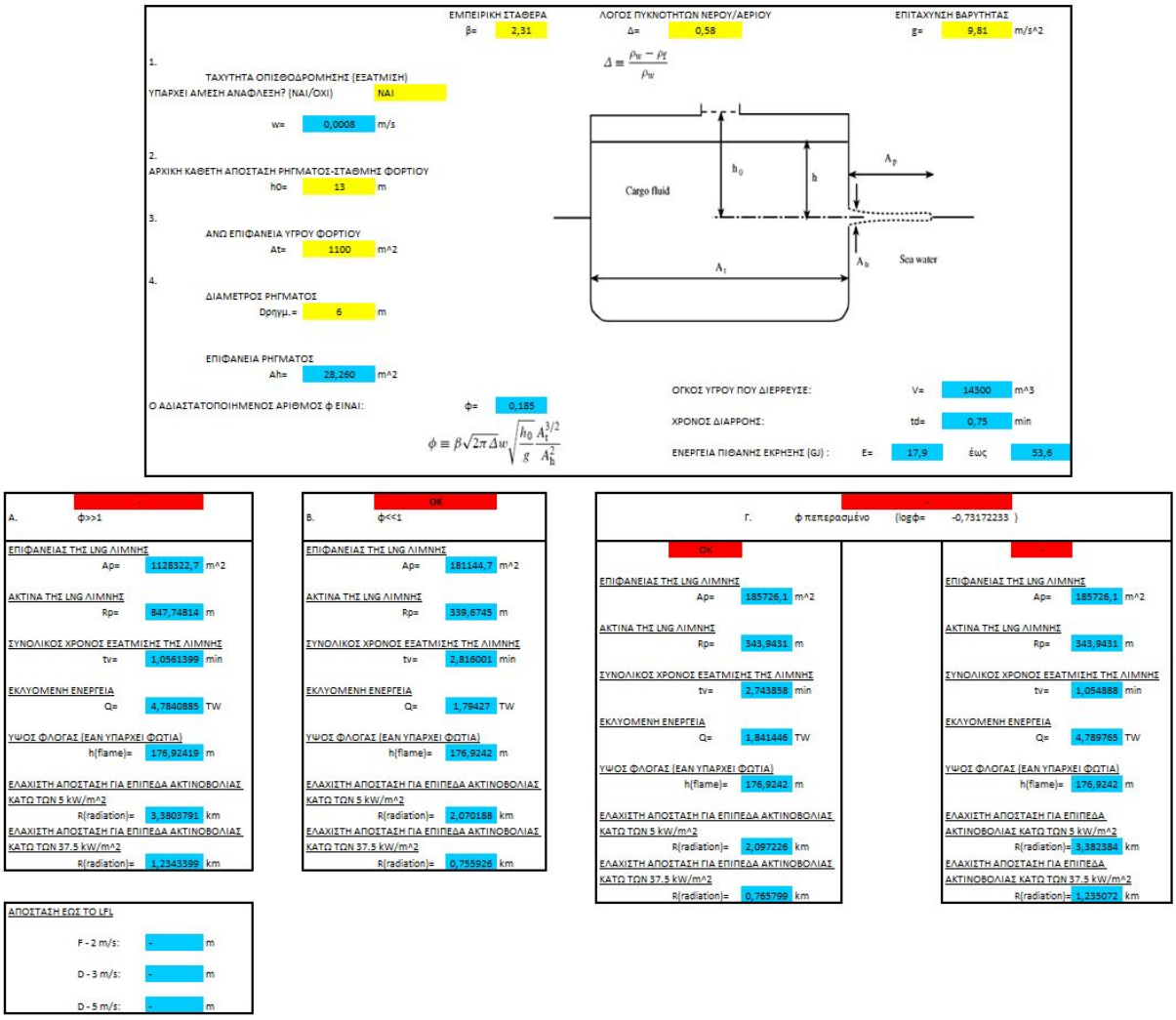
Τα αρχικά δεδομένα με τη μεγαλύτερη σημασία είναι αυτά με τους αριθμούς από το 1 έως το 4, ενώ υπάρχουν και μερικά δευτερεύοντα, η τιμή των οποίων παραμένει συνήθως σταθερή σε όλες τις εφαρμογές (εμπειρική σταθερά, επιτάχυνση βαρύτητας, λόγος πυκνοτήτων).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στις στήλες αναγράφονται αποτελέσματα τα οποία δεν μπορούν να ισχύουν ταυτόχρονα. Αν δηλαδή αναφερόμαστε σε περίπτωση άμεσης ανάφλεξης δεν μπορούμε

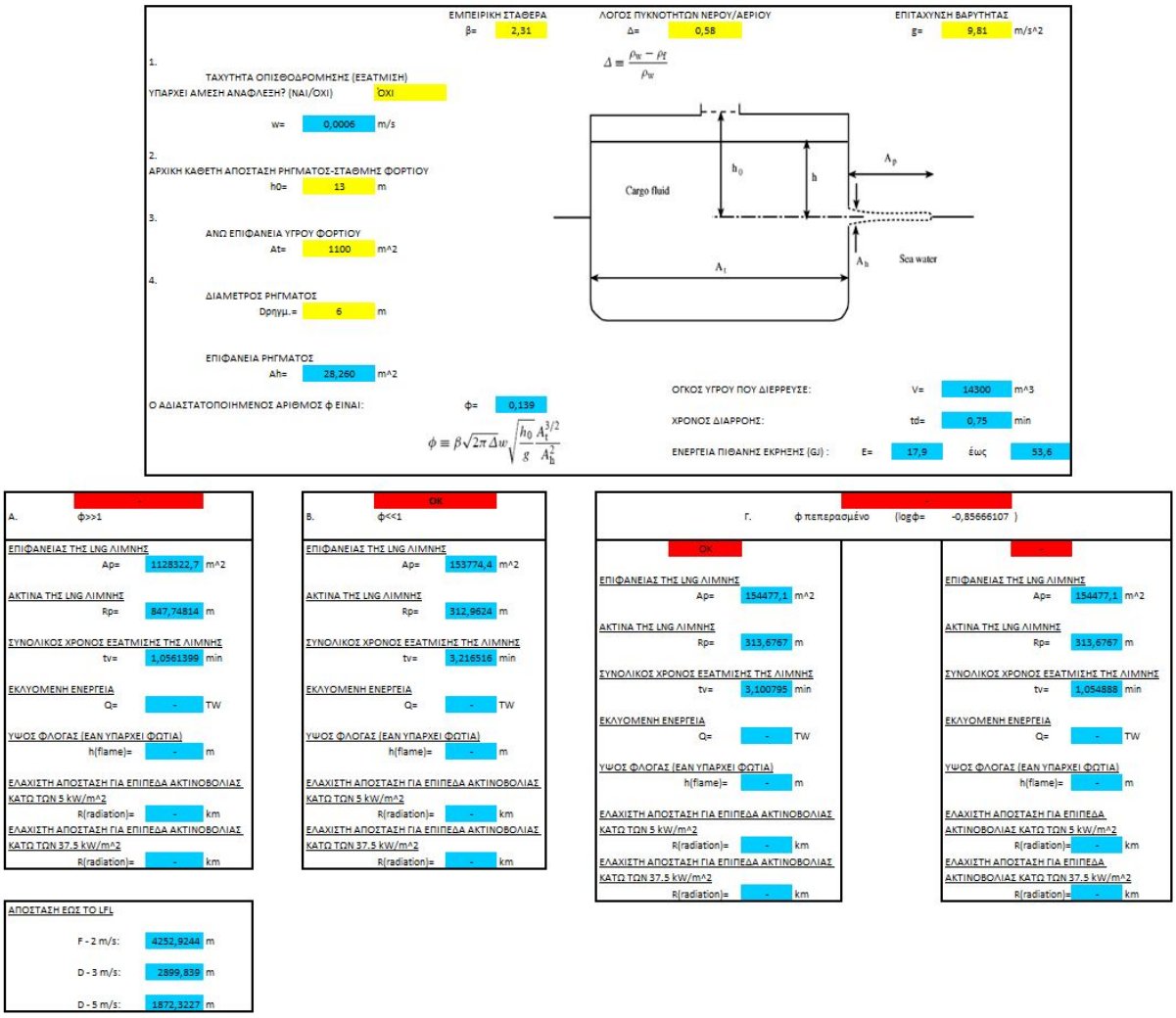
να έχουμε τιμές της εκλυόμενης ενεργείας μαζί με την απόσταση έως το LFL που θα φτάσει το εύφλεκτο σύννεφο ατμού. Αυτό συγκεκριμένα συμβαίνει γιατί στην περίπτωση ανάφλεξης δεν υπάρχει σύννεφο ατμού και άρα δεν υπάρχει απόσταση έως το LFL. Έτσι λοιπόν ανάλογα με το αν υπάρχει ανάφλεξη ή όχι θα υπολογίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα ενώ αυτά που δεν θα μας ενδιαφέρουν δεν θα έχουν κάποια τιμή (σύμβολο «-»).

Παρουσιάζεται, τέλος, το μοντέλο υπολογισμών που περιγράψαμε σε δυο μορφές (ανάφλεξη / χωρίς ανάφλεξη) για κάθε τοποθεσία του ρήγματος (άνω και κάτω από την ίσαλο γραμμή). Η μια μορφή αναφέρεται σε περίπτωση ανάφλεξης και η άλλη σε περίπτωση που δεν έχουμε ανάφλεξη έτσι ώστε να γίνει κατανοητό ποια αποτελέσματα μας ενδιαφέρουν κάθε φορά.

- *Ρήγμα πάνω από τη ίσαλο γραμμή*

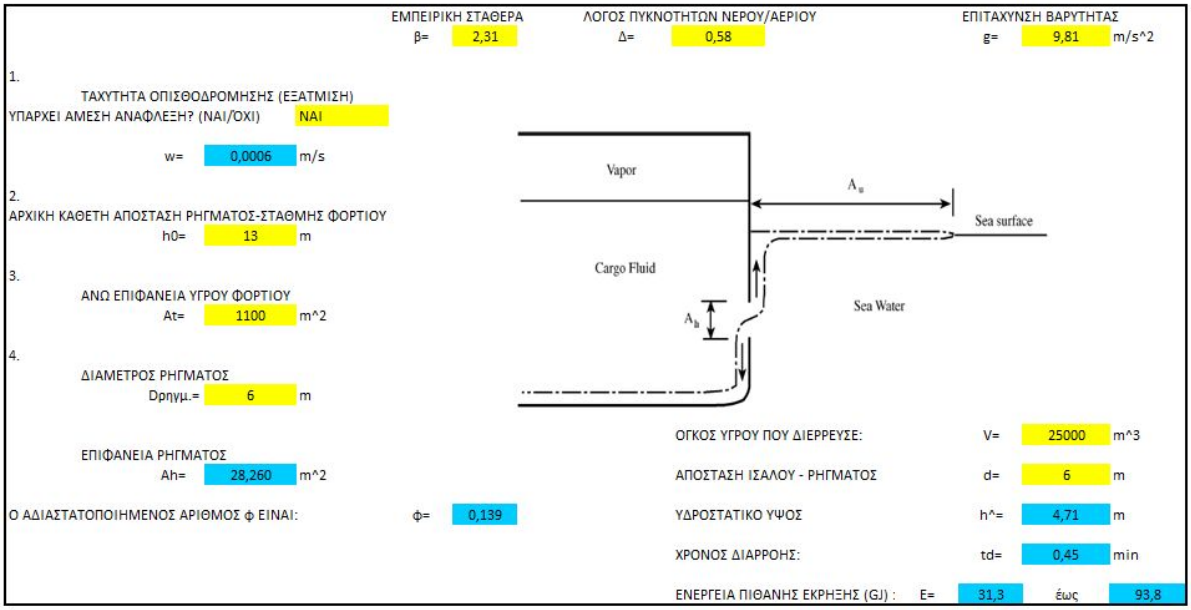


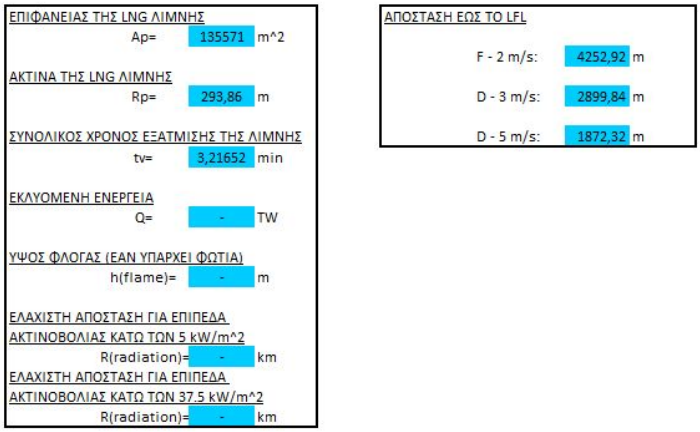
Σχήμα 16. Μορφή ηλεκτρονικού μοντέλου υπολογισμών στη περίπτωση ανάφλεξης



Σχήμα 17. Μορφή ηλεκτρονικού μοντέλου υπολογισμών στη περίπτωση που δεν υπάρχει ανάφλεξη

Ρήγμα πάνω από τη ίσαλο γραμμή





Σχήμα 18. Μορφή ηλεκτρονικού μοντέλου υπολογισμών στη περίπτωση που υπάρχει ανάφλεξη

ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ β= 2,31

ΛΟΓΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΩΝ ΝΕΡΟΥ/ΑΕΡΙΟΥ Δ= 0,58

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ g= 9,81 m/s^2

1.
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΟΠΙΣΘΟΔΡΟΜΗΣΗΣ (ΕΞΑΤΜΙΣΗ)
ΥΠΑΡΧΕΙ ΑΜΕΣΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗ? (ΝΑΙ/ΌΧΙ) ΌΧΙ

w= 0,0006 m/s

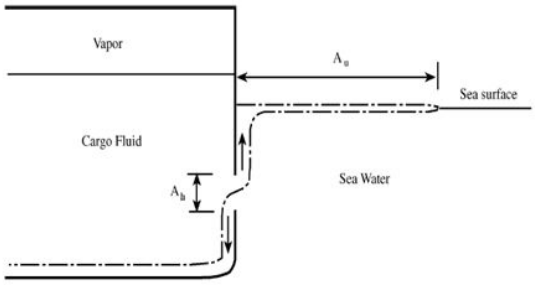
2.
ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΘΕΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ
h0= 13 m

3.
ΑΝΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΓΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ
At= 1100 m^2

4.
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ
Dρηγμ.= 6 m

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΡΗΓΜΑΤΟΣ
Ah= 28,260 m^2

Ο ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ φ ΕΙΝΑΙ: φ= 0,139



ΟΓΚΟΣ ΥΓΡΟΥ ΠΟΥ ΔΙΕΡΡΕΥΣΕ: V= 25000 m^3

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΙΣΑΛΟΥ - ΡΗΓΜΑΤΟΣ d= 6 m

ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΥΨΟΣ h^= 4,71 m

ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ: td= 0,45 min

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΙΘΑΝΗΣ ΕΚΡΗΞΗΣ (GJ) : E= 31,3 έως 93,8

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ
Ap= 135571 m^2

ΑΚΤΙΝΑ ΤΗΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ
Rp= 293,86 m

ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ
tv= 3,21652 min

ΕΚΛΥΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
Q= - TW

ΥΨΟΣ ΦΛΟΓΑΣ (ΕΑΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΦΩΤΙΑ)
h(flame)= - m

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΩ ΤΩΝ 5 kW/m^2
R(radiation)= - km

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΩ ΤΩΝ 37.5 kW/m^2
R(radiation)= - km

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΩΣ ΤΟ LFL

F - 2 m/s: 4252,92 m

D - 3 m/s: 2899,84 m

D - 5 m/s: 1872,32 m

Σχήμα 19. Μορφή ηλεκτρονικού μοντέλου υπολογισμών στη περίπτωση που δεν υπάρχει ανάφλεξη

8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μια σειρά από εφαρμογές σχετικά με τη διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου από ένα υγραεριοφόρο και τα επακόλουθα ενός τέτοιου γεγονότος. Οι αρχικές συνθήκες, όπως το μέγεθος του ρήγματος (βασικότερη), η ατμοσφαιρική κατάσταση, το μέγεθος της δεξαμενής και ο όγκος του υγρού που απελευθερώνεται, είναι ορισμένα από τα δεδομένα που θα αναφέρονται στην αρχή κάθε παραδείγματος.

Η κυριότερη των αρχικών συνθηκών που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τα παραδείγματα αυτά είναι η επιφάνεια A_h του ρήγματος στη γάστρα του πλοίου. Η μεταβλητή αυτή μπορεί να πάρει τιμές από 1 m^2 (≈1 m διάμετρο) έως 100 m^2 (≈11 m διάμετρο). Η πρώτη τιμή αντικατοπτρίζει τη μικρότερη διάμετρο ρήγματος με τις μικρότερες επιπτώσεις ενώ η δεύτερη αποτελεί τη μέγιστη τιμή της, που πιθανόν να προκληθεί από μια τεράστια έκρηξη ή σύγκρουση.

Οι τοποθεσίες που επιλέχτηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου έχουν άμεση ή έμμεση σχέση με το υγροποιημένο φυσικό αέριο (όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια) και είναι οι εξής:

- Ο Τερματικός Σταθμός στη Ρεβυθούσσα
- Νέα Καρβάλη (ΒΦΛ Καβάλας)
- Δρομολόγιο από Αλγερία (έξω από Αίγινα)

Τα αποτελέσματα των παραπάνω εφαρμογών έχουν σχέση με την διάμετρο της LNG λίμνης που δημιουργείται από τη διαρροή, τη διάρκεια της καύσης της και της ενέργειας που εκλύεται σε περίπτωση εμφάνισης πυρκαγιάς κ.α. Τα βασικά όμως αποτελέσματα που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι 2:

- Σε περίπτωση πυρκαγιάς (<u>άμεση ανάφλεξη</u> της λίμνης), η απόσταση πέραν της οποίας η ένταση της ακτινοβολίας είναι μικρότερη των 5 kW/m^2.
- Σε περίπτωση <u>μη ανάφλεξης</u>, η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσει το εύφλεκτο σύννεφο του μίγματος LNG – αέρα μέχρι να αραιωθεί στην ατμόσφαιρα και να μην είναι πλέον εύφλεκτο.

Λόγω της συνεχούς εξέλιξης τόσο στον κατασκευαστικό τομέα αλλά και στο θέμα της ασφάλειας σχετικά με τα πλοία μεταφοράς LNG, η δημιουργία ενός ρήγματος μεγέθους παρόμοιου με αυτά που αναφέρονται στις επόμενες εφαρμογές (όπως 1 ή 5 μέτρα), είναι σχεδόν απίθανο να προκληθούν από συνηθισμένα αίτια όπως προσαράξεις, συγκρούσεις μικρών ταχυτήτων, αστοχία υλικού ή άλλα. Ο μοναδικός ίσως τρόπος για τη δημιουργία ενός τέτοιου ρήγματος σε γάστρες διπλού τοιχώματος με ενισχυμένες δεξαμενές, όπως συμβαίνει στα υγραεριοφόρα, είναι μέσω τρομοκρατικών ενεργειών.

Μέχρι στιγμής, τα ατυχήματα σχετικά με υγραεριοφόρα είναι ελάχιστα στα 40 χρόνια ζωής τους, ενώ αυτά τα λίγα που έχουν συμβεί οφείλονται σε ανθρώπινο λάθος σε τερματικούς σταθμούς, κυρίως τα πρώτα χρόνια εμφάνισης αυτής της μορφής ενέργειας. Διαρροή LNG στη θάλασσα έχει σημειωθεί ελάχιστες φορές.

Τέτοιου είδους τρομοκρατικές ενέργειες έχουν απασχολήσει ιδιαίτερα τις αμερικάνικες αρχές, οι οποίες είναι αρκετά ευαισθητοποιημένες σε αυτό το θέμα (ιδιαίτερα μετά και από τις επιθέσεις της 9/11). Απόδειξη αυτού αποτελούν οι αρκετές μελέτες σχετικά με τις επιπτώσεις και τις παρενέργειες μια επίθεσης εις βάρους ενός υγραεριοφόρου σε κάποιο αμερικάνικο λιμάνι ή σε ένα δρομολόγιο τέτοιων πλοίων κοντά σε κατοικημένες περιοχές (όπως κανάλια, διώρυγες κτλ.). Παραδείγματα τέτοιων μελετών είναι η εργασία του Koopman σχετικά με απελευθέρωση LNG στο Humbolt Bay του Vallejo και του Fay στον τερματικό σταθμό στο Harpswell, Main καθώς και πολλές άλλες.

Η μορφή αυτών των επιθέσεων δεν μπορεί να καθοριστεί ακριβώς, καθώς μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση ενός άλλου πλοίου βόμβα, είτε μέσω ρουκετών ή ακόμα και με τη ρίψη μικρού αεροπλάνου, καθιστώντας τα ενδεχόμενα αδύνατα να προβλεφθούν. Συνεπώς, είναι προφανές ότι η διαρροή τόσο μεγάλων ποσοτήτων υγροποιημένου φυσικού αερίου προϋποθέτει την εμφάνιση μιας τεράστιας δύναμης, ικανή να προκαλέσει ρήγμα τέτοιου μεγέθους ώστε να βρει δίοδο το υγρό και να απελευθερωθεί στη θάλασσα.

Στις επόμενες εφαρμογές θα παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα κάθε περίπτωσης μέσω ενός πίνακα (όπως διάμετρος ρήγματος και ατμοσφαιρικές συνθήκες) και στη συνέχεια θα ακολουθούν τα αποτελέσματα (ακτίνα λίμνης, χρόνος εξάτμισης κτλ.). Ανάλογα με τις προϋποθέσεις κάθε εφαρμογής θα διαφέρουν και τα αποτελέσματα. Έτσι όταν θα αναφερόμαστε σε περίπτωση άμεσης ανάφλεξης της LNG λίμνης θα μιλάμε για ένταση ακτινοβολίας ενώ στο αντίθετο ενδεχόμενο (μη εμφάνιση ανάφλεξης) θα ασχοληθούμε με την απόσταση που θα φτάσει το σύννεφο LNG που θα έχει δημιουργηθεί μέχρι να ξεπεράσει το κατώτατο όριο ευφλεκτότητας του (LFL).

Θεωρούμε ότι το πλοίο που χρησιμοποιείται στα παραδείγματα είναι ένα υγραεριοφόρο με δεξαμενές μεμβρανικού τύπου συνολικής χωρητικότητας κοντά στα 125,000m^3. Το ρήγμα που προκαλείται περιορίζεται σε μια μόνο δεξαμενή εκ των πέντε (5), χωρητικότητας 25,000m^3.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες των αρχικών υποθέσεων και των αποτελεσμάτων, ενώ ακολουθεί και μια συνοπτική περιγραφή του καθενός. Τα στοιχεία που αναφέρονται μπορούν να γίνουν καλύτερα κατανοητά με τη βοήθεια του Σχήματος 1.

- Πίνακας αρχικών δεδομένων. Παρουσιάζονται συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία που χρειάζεται το μοντέλο για να βγάλει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Πίνακας 8. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Διάμετρος ρήγματος		**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου		**m**
Επιφάνεια φορτίου		**m^2**

Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	**-**
Ταχύτητα ανέμου	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**-**

Διάμετρος ρήγματος

Ίσως το βασικότερο δεδομένο για τον υπολογισμό των επιπτώσεων. Το ρήγμα θεωρείται κυκλικής μορφής και είναι αυτό που καθορίζει τη ποσότητα του υγρού φορτίου που θα διαρρεύσει καθώς και το ρυθμό απελευθέρωσης από τη δεξαμενή. Στο Σχήμα 3 εκφράζεται μέσω της επιφάνειας του ρήγματος A_h.

Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου

Η απόσταση στον κατακόρυφο άξονα μεταξύ της στάθμης του φορτίου και του σημείου που εμφανίστηκε το ρήγμα. Η σημασία του παράγοντα αυτού είναι καθοριστική καθώς καθορίζει τη συνολική ποσότητα που θα διαρρεύσει από τη δεξαμενή στο νερό. Απεικονίζεται στο Σχήμα 3 ως το h_0.

Επιφάνεια φορτίου

Η επιφάνεια της στάθμης του φορτίου μέσα στη δεξαμενή μεμβρανικού τύπου. Μαζί με την αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου, είναι τα δυο στοιχεία που εκφράζουν το μέγεθος και τις διαστάσεις της δεξαμενής. Απεικονίζεται στο Σχήμα 3 ως το A_t.

Συνολική ποσότητα που διέρρευσε

Ο συνολικός όγκος υγρού που απελευθερώνεται από τη δεξαμενή μέσω του ρήγματος. Είναι η ποσότητα του φορτίου που βρίσκεται από το ύψος του ρήγματος μέχρι επάνω. Η πιθανότητα να διαρρεύσει και περισσότερο υγρό υπάρχει, δεν εμφανίζεται όμως τόσο συχνά και συνεπώς και για την βοήθεια των υπολογισμών μας, θεωρούμε ότι διαρρέει μόνο η ποσότητα που αναφέρθηκε αρχικά. Ισοδυναμεί με το γινόμενο των δυο προηγούμενων στοιχείων ($V_{total}= h_0 \cdot A_t$).

Ατμοσφαιρική σταθερότητα

Η κατάσταση ατμοσφαιρικής σταθερότητας εκφράζεται μέσω ενός γράμματος, συνήθως F ή D αλλά και A ορισμένες φορές. Η σταθερότητα D χαρακτηρίζεται από μερική συννεφιά κατά τη διάρκεια τόσο της μέρας όσο και της νύχτας. Η ατμοσφαιρική αναταραχή / στροβιλότητα δεν

είναι τόσο μεγάλη στη κατάσταση D όσο στην A, με συνέπεια το αέριο νέφος να μην αναμιγνύεται αρκετά γρήγορα με την τριγύρω ατμόσφαιρα όπως στην A.

Η σταθερότητα F αντικατοπτρίζει τη πιο σταθερή ατμοσφαιρική κατάσταση. Η κατάσταση αυτή συνήθως εμφανίζεται κατά τη διάρκεια των πολύ πρωινών ωρών πριν την ανατολή του ηλίου (δηλαδή χωρίς την ύπαρξη ηλιακής ακτινοβολίας) και κάτω από χαμηλούς ανέμους. Ο συνδυασμός των ανέμων χαμηλής ταχύτητας με την έλλειψη ηλιακής ακτινοβολίας επιτρέπουν σε μια ατμόσφαιρα που εμφανίζεται ήρεμη και αμετάβλητη, να περιορίζει την ικανότητα αραίωσης του LNG σύννεφου σε αυτή.

Ταχύτητα ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου στη περιοχή της διαρροής μετρημένη σε m/s. Ακολουθεί μετά τον ορισμό της ατμοσφαιρικής σταθερότητας. Έτσι όταν αναφερόμαστε σε ατμοσφαιρική κατάσταση F – 2 αναφερόμαστε σε ατμοσφαιρική σταθερότητα F και ταχύτητα ανέμου 2 m/s (2 Beaufort).

Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης

Η εμφάνιση ή όχι άμεσης ανάφλεξης είναι ένα χαρακτηριστικό μέγιστης σημασίας καθώς από αυτή την επιλογή καθορίζεται το είδος των επιπτώσεων. Διαφορετικά είναι τα αποτελέσματα για διαρροή φορτίου που ακολουθείται από άμεση ανάφλεξη (θερμική ακτινοβολία κτλ.) και διαφορετικά στην αντίθετη περίπτωση (απόσταση που διανύει το LNG σύννεφο μέχρι να μην είναι πλέον εύφλεκτο).

- Πίνακας αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται συγκεντρωμένα όλα τα μεγέθη που προκύπτουν από τη χρήση του μοντέλου ανάλογα κάθε φορά με τις αρχικές συνθήκες.

Πίνακας 9. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Αριθμός φ		**-**
Χρόνος διαρροής		**min**
Ακτίνα LNG λίμνης		**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης		**m^2**
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης		**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *		**TW**

Ύψος φλόγας*	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m^2 *	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2 *	**m**
Απόσταση έως το LFL (F-2)*	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	**m**

* Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι ανάφλεξης της LNG λίμνης θα εμφανίζεται και το αντίστοιχο αποτέλεσμα.

Αριθμός φ

Είναι ο αδιάστατος αριθμός που χρησιμοποιεί ο Fay στο μοντέλο υπολογισμών του. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια το μοντέλο του Fay είναι αυτό στο οποίο βασίζεται το μοντέλο υπολογισμών που χρησιμοποιούμε στις επόμενες εφαρμογές. Συμπεριλαμβάνει στην εξίσωση του όλες τις απαραίτητες παραμέτρους που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά μιας διαρροής LNG στο νερό (λόγος πυκνοτήτων νερού / LNG, μέγεθος δεξαμενής, όγκος διαρροής, ταχύτητα καύσης, διάμετρο ρήγματος). Συνεπώς, είναι προφανής η σημασία του καθώς είναι συνάρτηση όλων των αρχικών δεδομένων ενώ η τιμή του μας δίνει αρκετές πληροφορίες για τον τρόπο της απελευθέρωσης.

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

Ανάλογα με τον αριθμό αυτό και την τάξη μεγέθους του όπως έχει καθοριστεί από τα πειράματα του Fay (φ>>1, φ<<1 κτλ.) αλλάζουν τα χαρακτηριστικά του τρόπου απελευθέρωσης και της ροής του υγρού φορτίου από τη δεξαμενή. Σύμφωνα με τον Fay για $\varphi > 30$ θεωρούμε ότι $\varphi >> 1$, για $\varphi < 0.3$ έχουμε ότι $\varphi << 1$, ενώ για τις ενδιάμεσες τιμές $0.3 < \varphi < 30$ ότι φ είναι πεπερασμένο.

Χρόνος διαρροής

Ο χρονική διάρκεια που χρειάζεται το υγρό φορτίο να εξέλθει της δεξαμενής πέραν του οποίου σταματάει η διαδικασία της απελευθέρωσης από το ρήγμα.

Ακτίνα λίμνης

Σύμφωνα με το μοντέλο που χρησιμοποιούμε η λίμνη του υγρού φορτίου που σχηματίζεται μετά από μια απελευθέρωση εξαπλώνεται σε μορφή κύκλου (σε αντίθεση με την πλειονότητα των

άλλων μοντέλων που χρησιμοποιούν κυκλική μορφή), με κέντρο τη περιοχή του ρήγματος. Η ακτίνα της λίμνης είναι η απόσταση από το ρήγμα έως το άκρο μέχρι το οποίο έχει φτάσει η λίμνη. Η ακτίνα αυτή αποτελεί ένα ενδεικτικό χαρακτηριστικό του μεγέθους της λίμνης και της θαλάσσιας έκτασης που καλύπτεται από μια τέτοια διαρροή.

Χρόνος εξάτμισης λίμνης

Είναι ο χρόνος που χρειάζεται μια λίμνη υγροποιημένου φυσικού αερίου μέχρι να εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Η εξάτμιση αυτή οφείλεται στη θερμότητα που μεταδίδεται στη λίμνη από το θαλασσινό νερό κάτω από αυτή αλλά και από τη θερμότητα της πυρκαγιάς που πιθανόν να εμφανιστεί πάνω από τη λίμνη στη περίπτωση ανάφλεξης της.

Εκλυόμενη ενέργεια

Είναι η ενέργεια που εκλύεται στη περίπτωση πυρκαγιάς της λίμνης. Εξαρτάται από τη ποσότητα που διαρρέει, τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου και από τη διάρκεια της καύσης της λίμνης μέχρι να εξατμιστεί ολόκληρη.

Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m^2

Είναι η απόσταση πέραν της οποίας η ροή θερμικής ακτινοβολίας έχει πέσει σε επίπεδα κάτω από 5 kW/m^2. Η τιμή αυτή είναι το ελάχιστο όριο ακτινοβολίας που προκαλεί βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό. Συγκεκριμένα αν κάποιος εκτεθεί σε τέτοια ακτινοβολία για περίπου 40 δευτερόλεπτα χωρίς να προστατευτεί από κάποιο καταφύγιο η άλλο μέσο θα υποστεί εγκαύματα 2^{ου} βαθμού.

Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2

Είναι η απόσταση πέραν της οποίας η ροή θερμικής ακτινοβολίας έχει πέσει σε επίπεδα κάτω από 37.5 kW/m^2. Τέτοια επίπεδα ακτινοβολίας προκαλούν σοβαρές βλάβες σε κτίρια και κατασκευές μέσα σε 10 μόλις λεπτά.

Ύψος φλόγας

Το γεωμετρικό σχήμα της φλόγας καθορίζεται ως ένας ελλειπτικός κύλινδρος πάνω από τη λίμνη. Το μέγεθος της βάσης του κυλίνδρου αυτού καθορίζεται από τις διαστάσεις της λίμνης. Το βασικό στοιχείο του κυλίνδρου που μας ενδιαφέρει είναι το ύψος του, δηλαδή το πόσο ψηλά θα φτάσουν οι φλόγες στη περίπτωση πυρκαγιάς.

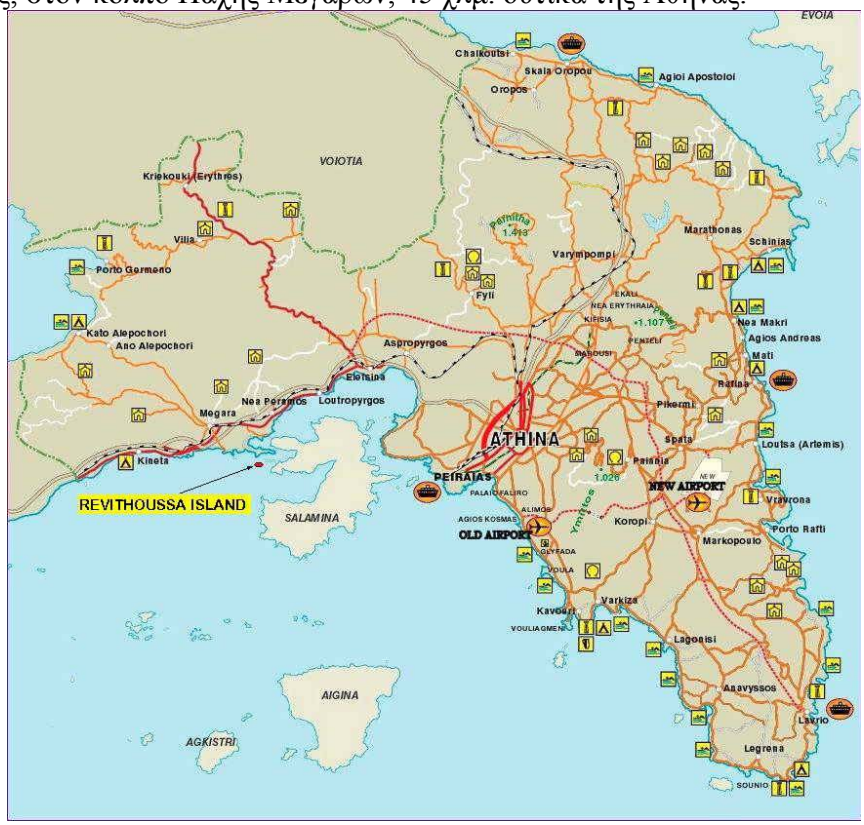
Απόσταση έως το LFL

Το σύννεφο που δημιουργείται από την εξάτμιση της LNG λίμνης εξαπλώνεται στον αέρα και ανάλογα με τη ταχύτητα και τη φορά του ανέμου μπορεί να επεκταθεί στις τριγύρω περιοχές. Όταν η περιεκτικότητα του σε μεθάνιο βρίσκεται σε επίπεδα μεταξύ 5 – 15 %, το σύννεφο είναι εύφλεκτο και μπορεί να αναφλεγεί αν υπάρξει η ανάλογη πηγή. Μετά από μια απόσταση, όμως, η ανάμιξη του με τον αέρα φτάνει σε τέτοιο σημείο όπου η περιεκτικότητα αυτή είναι κάτω του 5% και συνεπώς ο κίνδυνος ανάφλεξης του δεν υφίσταται. Η απόσταση λοιπόν αυτή ονομάζεται απόσταση έως το LFL (lower flammability limit), δηλαδή απόσταση έως το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας και εξετάζεται για ατμοσφαιρικές καταστάσεις F-2, D-3, D-5.

8.1 ΡΕΒΥΘΟΥΣΑ

Στη Ρεβυθούσα, στον κόλπο των Μεγάρων Αττικής, λειτουργεί ένας από τους πιο σύγχρονους σταθμούς Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου σε όλη τη Μεσόγειο. Στο νησί αυτό έχουν κατασκευαστεί και λειτουργήσει από το 1999 δύο δεξαμενές, χωρητικότητας 65.000 κυβικών μέτρων η κάθε μία, εγκαταστάσεις ελλιμενισμού δεξαμενόπλοιων, κρυογενικές εγκαταστάσεις, αεριοποιητές, για την επαναεριοποίηση του LNG και την τροφοδοσία του συστήματος μεταφοράς, που γίνεται με δύο αγωγούς διασύνδεσης της Ρεβυθούσας με το σύστημα μεταφοράς.

Ο Σταθμός είναι εγκατεστημένος στη νήσο Ρεβυθούσα, 500 μέτρα περίπου από την ακτή της Αγίας Τριάδας, στον κόλπο Πάχης Μεγάρων, 45 χλμ. δυτικά της Αθήνας.



Σχήμα 20. Τοποθεσία της νήσου Ρεβυθούσας στο χάρτη.

Εκεί παραλαμβάνονται προμήθειες φυσικού αερίου, που φθάνουν στη χώρα μας με δεξαμενόπλοια, σε υγροποιημένη μορφή, από την Αλγερία. Το φυσικό αέριο αποθηκεύεται στις δύο προαναφερθείσες δεξαμενές, συνολικής χωρητικότητας 130,000 m^3 και στη συνέχεια, στις ειδικές εγκαταστάσεις της μονάδας, μετατρέπεται ξανά σε αέριο και τροφοδοτεί τους αγωγούς του Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου.

Η εισαγωγή του αλγερινού φυσικού αερίου άρχισε τον Φεβρουάριο του 2000. Σύμφωνα με τη σύμβαση που έχει υπογραφεί, προβλέπεται προμήθεια ποσότητας από 0,51 έως 0,68 δισ. κυβικά μέτρα αερίου ετησίως. Είναι μία από τις τρεις πηγές τροφοδοσίας του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Φυσικού Αερίου και συγκαταλέγεται στους δέκα αντίστοιχους σταθμούς υγροποιημένου φυσικού αερίου, που λειτουργούν σήμερα σε όλο το χώρο της Μεσογείου και της Ευρώπης.

Σχήματα 21, 22. Εγκαταστάσεις νήσου Ρεβυθούσας.

Τον Οκτώβριο του 2007, ο ΔΕΣΦΑ ολοκλήρωσε τις εργασίες αναβάθμισης του Τερματικού Σταθμού Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ) Ρεβυθούσας, πραγματοποιώντας μια από τις σημαντικότερες επενδύσεις για την ενεργειακή υποδομή της χώρας μας. Με την αναβάθμιση, ο Σταθμός θα μπορεί πλέον να παραλαμβάνει και να επεξεργάζεται τριπλάσιες ποσότητες φυσικού αερίου και να τροφοδοτεί το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς με 5,2-5,3 δισ. κυβικά μέτρα ετησίως.

Συγκεκριμένα, το έργο περιελάμβανε την επέκταση των υποδομών και την ενίσχυση του εξοπλισμού, ώστε να αυξηθεί η δυναμικότητα αεριοποίησης του Σταθμού σε 1.000 m^3 φυσικού αερίου ανά ώρα, από 271 m^3 ανά ώρα.

Ο Τερματικός Σταθμός Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου της Ρεβυθούσας, είναι μια από τις σημαντικότερες εθνικές υποδομές της Ελλάδας. Συμβάλλει στην εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων αερίου, ώστε να καλύπτουν τις υπάρχουσες και αλλά και τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες της χώρας μας. Παράλληλα, παρέχει περισσότερη αξιοπιστία και ευελιξία στο σύστημα μεταφοράς και διανομής, ώστε να μπορεί να ικανοποιεί αποτελεσματικά τις απαιτήσεις των καταναλωτών, ακόμα και σε ζήτηση αιχμής.

Σχήμα 23. Γενική όψη της προβλήτας φορτοεκφόρτωσης.

Σε αυτήν, λοιπόν, την τοποθεσία θα εφαρμοστεί το μοντέλο μας και στη συνέχεια θα υπολογιστούν οι πιθανοί κίνδυνοι που προκύπτουν από τη διαρροή του υγροποιημένου φυσικού αερίου. Ο πίνακας των αρχικών δεδομένων συμπληρώνεται κάθε φορά ανάλογα με τις συνθήκες που θέλουμε να μελετήσουμε. Συγκεκριμένα έχουμε ότι:

Πίνακας 10. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Διάμετρος ρήγματος	5	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	13	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	**m^2**
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	14300	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΟΧΙ**	**-**

Το ρήγμα που εξετάζεται είναι ένα ρήγμα κυκλικής διαμέτρου 5 μέτρων στο ύψος της ισάλου γραμμής από το οποίο διαρρέει μια ποσότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου 14,300 m^3. Η ποσότητα αυτή εξαπλώνεται πάνω στο νερό και εξατμίζεται συνεχώς μέχρι να εξατμιστεί όλη.

Θεωρούμε στο παράδειγμα αυτό ότι δεν υπάρχει κάποια πηγή ανάφλεξης ώστε να πυροδοτήσει το LNG και να προκληθεί πυρκαγιά.

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επιλέχθηκαν είναι οι δυσμενέστερες που μπορεί να υπάρχουν σε ένα τέτοιο γεγονός, καθώς δεν βοηθούν το LNG σύννεφο να αναμιχτεί γρήγορα με τον αέρα και να εξατμιστεί, με αποτέλεσμα να παραμένει για αρκετή ώρα εύφλεκτο και να «ταξιδεύει» όλο και πιο μακριά λόγω του ανέμου. Οι συνθήκες αυτές είναι μια ταχύτητα ανέμου 2 m/s και μια ατμοσφαιρική σταθερότητα κατάστασης F (έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η ερμηνεία αυτού του δείκτη).

Σύμφωνα με αυτές τις αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα και η σημασία τους παρουσιάζονται παρακάτω με τη βοήθεια του αντίστοιχου πίνακα:

Πίνακας 11. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Αριθμός φ	0.288	**-**
Χρόνος διαρροής	1.08	**min**
Ακτίνα LNG λίμνης	323	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$16.3 \cdot 10^4$	$\mathbf{m^2}$
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	3.31	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	-	**TW**
Ύψος φλόγας*	-	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m² *	-	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m² *	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (F-2)*	4078	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	2753	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	1789	**m**

Σύμφωνα με το μοντέλο που χρησιμοποιούμε ο αδιάστατος αριθμός φ υπολογίζεται ίσος με 0.288, μια τιμή που θεωρούμε ότι είναι αρκετά μικρότερη του 1. Συνεπώς, όπως έχουμε περιγράψει σχετικά με την ερμηνεία του φ, η ροή του υγρού από το ρήγμα της δεξαμενής είναι πολύ μεγάλη και ασταθής με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται το υγρό πάνω στη θάλασσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Στη συνέχεια σχηματίζεται μια λίμνη, σχήματος ημικυκλίου με ακτίνα 323 μέτρα και κέντρο το σημείο της διαρροής, που εξατμίζεται συνεχώς έως ότου εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Το τέλος της

εξάτμισης έρχεται 3.31 λεπτά μετά από την έναρξη της απελευθέρωσης, χρόνος ικανός να εξαπλωθεί όλη η ποσότητα των 14,300 m^3 και να εξατμιστεί.

Βάση των αρχικών δεδομένων έχουμε υποθέσει ότι δεν έχουμε εμφάνιση πυρκαγιάς. Το βασικό, επομένως, αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός του εύφλεκτου σύννεφου ατμού και το πόσο μακριά μπορεί να παρασυρθεί από τον άνεμο των 2 m/s μέχρι να χάσει την ευφλεκτότητα του. Αυτό θα γίνει όταν αναμιχτεί με τον αέρα σε τέτοιο σημείο ώστε η περιεκτικότητα του σε μεθάνιο να είναι κάτω του 5% κατά όγκο.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας χάρτης της νήσου Ρεβυθούσας πάνω στον οποίο φαίνεται με ένα κύκλο η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσει το σύννεφο από τη περιοχή της διαρροής. Η κατεύθυνση του άνεμου δεν μπορεί να είναι γνωστή, άρα συμπεραίνουμε ότι οι περιοχές που πιθανόν να πληγούν είναι όλες αυτές που περικλείονται στο σχήμα αυτό.

Σχήμα 24. Περιοχές που επηρεάζονται από σύννεφο ατμού έως απόσταση LFL των 4078m.

Στην ακτίνα αυτή των 4078 μέτρων κινδυνεύουν αρκετές περιοχές οι οποίες, όπως φαίνεται και από το σχήμα είναι η νήσος Ρεβυθούσα, η Νέα Πέραμος (Οικισμός Ήρεμο Κύμα), η Σαλαμίνα (Στενό Φανερωμένης, Ιλιαχτή, Γαλήνη) και η Πάχη Μεγάρων.

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Ρεβυθούσα	Εργαζόμενοι στις εγκαταστάσεις
Νέα Πέραμος	7480
Στενό Σαλαμίνας	180
Ηλιαχτή / Γαλήνη Σαλαμίνας	250

Προκειμένου να μελετήσουμε και τις επιπτώσεις στην περίπτωση εμφάνισης πυρκαγιάς αμέσως μετά την απελευθέρωση του υγρού, θεωρούμε ότι υπάρχει μια πηγή ανάφλεξης που πυροδοτεί τη λίμνη LNG αμέσως μόλις αυτή σχηματιστεί. Τα αρχικά δεδομένα τα κρατάμε σταθερά, όμοια με την προηγούμενη εφαρμογή με τη διαφορά ότι υπάρχει πηγή ανάφλεξης:

Πίνακας 12. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Διάμετρος ρήγματος	5	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	13	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	**m^2**
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	14300	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΝΑΙ**	**-**

Οι διαστάσεις του ρήγματος, η ποσότητα του φορτίου που διαρρέει, οι διαστάσεις της δεξαμενής καθώς και η ατμοσφαιρική κατάσταση είναι οι ίδιες με προηγουμένως. Η μόνη διαφορά, αλλά μεγάλης σημασίας, είναι ότι στην παρούσα εφαρμογή θεωρούμε ότι εμφανίζεται άμεση ανάφλεξη, κάτι που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν είναι εντελώς διαφορετικά. Έτσι έχουμε ότι:

Πίνακας 13. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Αριθμός φ	0.385	**-**
Χρόνος διαρροής	1.08	**min**

Ακτίνα LNG λίμνης	354	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$19.7 \cdot 10^4$	$\mathbf{m^2}$
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	2.9	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	1.74	**TW**
Ύψος φλόγας*	177	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m² *	2040	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m² *	745	**m**
Απόσταση έως το LFL *	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	-	**m**

Ο αδιάστατος αριθμός φ υπολογίζεται ίσος με 0.385, μια τιμή που θεωρούμε πεπερασμένη συγκριτικά με αυτές μικρότερες του 1 (<0.30) και αυτές αρκετά μεγαλύτερες από 1 (>30), σύμφωνα πάντα με το μοντέλο που χρησιμοποιούμε.

Η λίμνη που σχηματίζεται έχει σχήμα ημικυκλίου με ακτίνα 354 μέτρα και κέντρο το σημείο της διαρροής. Η εξάτμιση πραγματοποιείται συνεχώς έως ότου εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Το τέλος της εξάτμισης έρχεται 2.9 λεπτά μετά από την έναρξη της απελευθέρωσης, χρόνος ικανός να εξαπλωθεί όλη η ποσότητα των 14,300 m^3 και να εξατμιστεί.

Βάση των αρχικών δεδομένων έχουμε υποθέσει ότι έχουμε εμφάνιση πυρκαγιάς. Το βασικό, επομένως, αποτέλεσμα είναι η ένταση της ακτινοβολίας και η απόσταση μέχρι την οποία μπορούν να φτάσουν συγκεκριμένα επίπεδα της. Στη περίπτωση μας εξετάζονται οι αποστάσεις πέρα των οποίων τα επίπεδα της ακτινοβολίας είναι μικρότερα από 5 kW/m^2 και 37.5 kW/m^2 κάθε φορά. Η επιλογή των τιμών αυτών έχει εξηγηθεί πιο πάνω καθώς και οι δύο αυτές τιμές αποτελούν χαρακτηριστικά όρια όσο αναφορά τις επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και τις τριγύρω κατασκευές.

Ακολουθεί ο χάρτης της νήσου Ρεβυθούσας πάνω στον οποίο φαίνονται με κύκλους η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσουν τα επίπεδα ακτινοβολίας 5 kW/m^2 και 37.5 kW/m^2 αντίστοιχα. Όλες οι περιοχές που περικλείονται μέσα στους κύκλους είναι αυτές που θα δεχτούν ακτινοβολίες της τάξης των 5 kW/m^2 και πάνω, είναι συνεπώς οι περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο από μια τέτοια διαρροή.

Σχήμα 25. Απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας έως και 5 kW/m^2 (2040m).

Στην ακτίνα αυτή των 2040 μέτρων κινδυνεύουν οι περιοχές της Ρεβυθούσας και της Νέας Περάμου (Οικισμός Ήρεμο Κύμα).

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Ρεβυθούσα	Εργαζόμενοι στις εγκαταστάσεις
Νέα Πέραμος	7480

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε στην ίδια τοποθεσία το σενάριο με το μεγαλύτερο ρήγμα που μπορεί να υπολογίσει το μοντέλο. Το ρήγμα αυτό έχει διάμετρο 11 m και μας οδηγεί στα δυσμενέστερα

αποτελέσματα, τόσο στο ενδεχόμενο ανάφλεξης όσο και στην περίπτωση που δεν αναφλέγεται το σύννεφο ατμού που δημιουργείται.

Πίνακας 14. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Διάμετρος ρήγματος	11	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	13	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	$\mathbf{m^2}$
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	14300	$\mathbf{m^3}$
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΝΑΙ**	**-**

Ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα της διαρροής αυτής είναι:

Πίνακας 15. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Αριθμός φ	0.016	**-**
Χρόνος διαρροής	0.22	**min**
Ακτίνα LNG λίμνης	327	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$16.8 \cdot 10^4$	$\mathbf{m^2}$
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	2.65	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	1.9	**TW**
Ύψος φλόγας*	177	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m² *	2131	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m² *	778	**m**
Απόσταση έως το LFL (F-2)*	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	-	**m**

Παρατηρούμε ότι συγκριτικά με το προηγούμενο παράδειγμα έχουν αυξηθεί οι τιμές της ελάχιστης απόστασης για τα συγκεκριμένα επίπεδα ακτινοβολίας καθώς οι επιπτώσεις είναι δυσμενέστερες, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, σε αυτή τη περίπτωση. Μεγαλύτερη είναι επίσης και η ενέργεια που εκλύθηκε από την πυρκαγιά. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος διαρροής μειώθηκε αισθητά καθώς το ρήγμα έχει μεγαλύτερες διαστάσεις στο δεύτερο σενάριο, κάτι που επιτρέπει στο υγρό φορτίο να απελευθερώνεται με γρηγορότερο ρυθμό. Τα μοναδικά μεγέθη που μειώθηκαν είναι η ακτίνα της λίμνης (και κατά συνέπεια και η επιφάνεια της) καθώς και ο χρόνος που χρειάστηκε η λίμνη για να εξατμιστεί. Αυτό συνέβη διότι το υγρό απελευθερώθηκε πολύ πιο γρήγορα από τη δεξαμενή με αποτέλεσμα να αλλάξει η τιμή του αριθμού φ και ως συνέπεια να αλλάξει και η συμπεριφορά της διάδοσης. Ο ρυθμός εξάτμισης της λίμνης μεγάλωσε με αποτέλεσμα το μέγεθός της να είναι μικρότερο συγκριτικά με πριν και να χρειαστεί λιγότερο χρόνο να εξατμιστεί.

Σχήμα 26. Απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας έως και 5 kW/m^2 (2131m).

Στην ακτίνα αυτή των 2131 μέτρων κινδυνεύουν οι περιοχές της Ρεβυθούσας και της Νέας Περάμου (Οικισμός Ήρεμο Κύμα).:

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Ρεβυθούσα	Εργαζόμενοι στις εγκαταστάσεις
Νέα Πέραμος	7480

Στην αντίστοιχη περίπτωση, όπου η διάμετρος του ρήγματος είναι 11 m ενώ δεν υπάρχει ανάφλεξη του σύννεφου ατμού και κατ' επέκταση πυρκαγιά λίμνης έχουμε τους επόμενους πίνακες:

Πίνακας 16. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Διάμετρος ρήγματος	11	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	13	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	$\mathbf{m^2}$
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	14300	$\mathbf{m^3}$
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΟΧΙ**	**-**

Πίνακας 17. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Αριθμός φ	0.012	**-**
Χρόνος διαρροής	0.22	**min**
Ακτίνα LNG λίμνης	304	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$14.5 \cdot 10^4$	$\mathbf{m^2}$
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	3.05	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	-	**TW**
Ύψος φλόγας*	-	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m² *	-	**m**

Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2 *	**-**	**m**
Απόσταση έως το LFL *	4833	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	3386	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	2148	**m**

Όπως και προηγουμένως, έτσι και εδώ, οι επιπτώσεις της διαρροής (απόσταση έως το LFL) μεγάλωσαν καθώς αναφερόμαστε σε δυσμενέστερες συνθήκες. Το ίδιο συμβαίνει και για τα υπόλοιπα μεγέθη τα οποία συμπεριφέρονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που συμπεριφέρονται τα αντίστοιχα μεγέθη του προηγούμενου παραδείγματος.

Ακολουθούν η φωτογραφία της τοποθεσίας την νήσου Ρεβυθούσας με την ανάλογη απόσταση σημειωμένη σχετικά με τις δυσμενέστερες αρχικές συνθήκες.

Σχήμα 27. Περιοχές που επηρεάζονται από σύννεφο ατμού έως απόσταση LFL των 4833m.

Στην ακτίνα αυτή των 4833 μέτρων κινδυνεύουν αρκετές περιοχές οι οποίες, όπως φαίνεται και από το σχήμα είναι επιγραμματικά η νήσος Ρεβυθούσα, η Σαλαμίνα (στις περιοχές Στενό Φανερωμένης, Ιλιαχτή, Γαλήνη, Στενό, Παραλία Αγ.Γεωργίου), η Πάχη Μεγάρων (ολόκληρη η περιοχή), το Αεροδρόμιο των Μεγάρων και η Νέα Πέραμος (Οικισμός Ήρεμο Κύμα μαζί με το λιμάνι).

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Ρεβυθούσα	Εργαζόμενοι στις εγκαταστάσεις
Νέα Πέραμος	7480
Στενό Σαλαμίνας	180

Ηλιαχτή / Γαλήνη Σαλαμίνας	300
Πάχη Μεγάρων	368

8.2 ΝΕΑ ΚΑΡΒΑΛΗ

Μέχρι σήμερα ο τερματικός σταθμός υγροποιημένου φυσικού αερίου στη Ρεβυθούσα είναι ο μοναδικός στην Ελλάδα. Υπάρχουν αρκετές σκέψεις για τη δημιουργία δεύτερου αλλά και περισσότερων σταθμών τέτοιου είδους σε αρκετές περιοχές τις Ελλάδας. Μια από αυτές είναι και η Νέα Καρβάλη στη Καβάλα, στη περιοχή που μέχρι πρότινος ήταν οι εγκαταστάσεις της ΒΦΛ (ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΦΩΣΦΟΡΙΚΩΝ ΛΙΠΑΣΜΑΤΩΝ).

Σύμφωνα με πληροφορίες, ο νέος σταθμός LNG θα εγκατασταθεί στον ιδιόκτητο χώρο της ΒΦΛ στην Καβάλα, η συνολική έκταση του οποίου ανέρχεται σήμερα σε 2.500 στρέμματα, και μάλιστα σε μια στρατηγική τοποθεσία πάνω ακριβώς στο εμπορικό λιμάνι, με ιδιόκτητο αγκυροβόλιο. Θα έχει δυναμικότητα 8 – 10 δισ. κυβικών μέτρων αερίου το χρόνο, ενώ για την τροφοδοσία του γίνονται συζητήσεις με προμηθευτές από την Αραβική Χερσόνησο. Αντίστοιχα, ο σταθμός της Ρεβυθούσας μετά την πρόσφατη αναβάθμιση έχει δυναμικότητα 4,7 δισ. κυβικών μέτρων και τροφοδοτείται με φυσικό αέριο από την Αλγερία.

Με βάση το δημοσίευμα, η ΔΕΠΑ βρίσκεται ήδη σε προχωρημένες συζητήσεις με διεθνείς ενεργειακές εταιρείες, προμηθευτές LNG και όχι μόνον, από την Αίγυπτο, το Κατάρ, την Αλγερία κ.λπ. για τον νέο τερματικό σταθμό, που θα γίνει ως κοινοπραξία ή συνεργασία εταιριών και δεν θα ανήκει στον Διαχειριστή του Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ). Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι η ΔΕΠΑ ετοιμάζει μια απολύτως ιδιωτική επένδυση, με σκοπό να πρωταγωνιστήσει για τα επόμενα χρόνια στον τομέα της ενέργειας.

Σχήμα 28. Εγκαταστάσεις ΒΦΛ στη Νέα Καρβάλη

Θεωρούμε τις παρακάτω αρχικές συνθήκες για μια πιθανή διαρροή LNG στην περιοχή της Νέας Καρβάλης:

Πίνακας 18. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Διάμετρος ρήγματος	9	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	13	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	**m^2**
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	14300	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΝΑΙ**	**-**

Το ρήγμα που εξετάζεται είναι ένα ρήγμα κυκλικής διαμέτρου 9 μέτρων στο ύψος της ισάλου γραμμής από το οποίο διαρρέει μια ποσότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου 14,300 m^3. Η ποσότητα αυτή εξαπλώνεται πάνω στο νερό και εξατμίζεται συνεχώς μέχρι να εξατμιστεί όλη. Θεωρούμε στο παράδειγμα αυτό ότι υπάρχει κάποια πηγή ανάφλεξης ώστε να πυροδοτήσει το LNG και να προκληθεί πυρκαγιά.

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επιλέχθηκαν είναι οι δυσμενέστερες που μπορεί να υπάρχουν σε ένα τέτοιο γεγονός, καθώς δεν βοηθούν το LNG σύννεφο να αναμιχτεί γρήγορα με τον αέρα και να εξατμιστεί, με αποτέλεσμα να παραμένει για αρκετή ώρα εύφλεκτο και να «ταξιδεύει» όλο και πιο μακριά λόγω του ανέμου. Οι συνθήκες αυτές είναι μια ταχύτητα ανέμου 2 m/s και μια ατμοσφαιρική σταθερότητα κατάστασης F.

Σύμφωνα με αυτές τις αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα και η σημασία τους παρουσιάζονται παρακάτω με τη βοήθεια του αντίστοιχου πίνακα:

Πίνακας 19. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Αριθμός φ	0.037	**-**
Χρόνος διαρροής	0.33	**min**
Ακτίνα LNG λίμνης	329	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$16.9 \cdot 10^4$	**m^2**

Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	2.7	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	1.87	**TW**
Ύψος φλόγας*	177	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m^2 *	2118	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2 *	773	**m**
Απόσταση έως το LFL *	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	-	**m**

Ο αδιάστατος αριθμός φ υπολογίζεται ίσος με 0.037, μια τιμή που θεωρούμε μικρότερη του 1 (<0.30) ενώ η λίμνη που σχηματίζεται έχει σχήμα ημικυκλίου με ακτίνα 329 μέτρα και κέντρο το σημείο της διαρροής. Η εξάτμιση πραγματοποιείται συνεχώς έως ότου εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Το τέλος της εξάτμισης έρχεται 2.7 λεπτά μετά από την έναρξη της απελευθέρωσης, χρόνος ικανός να εξαπλωθεί όλη η ποσότητα των 14,300 m^3 και να εξατμιστεί.

Βάση των αρχικών δεδομένων έχουμε υποθέσει ότι έχουμε εμφάνιση πυρκαγιάς. Το βασικό, επομένως, αποτέλεσμα είναι η ένταση της ακτινοβολίας και η απόσταση μέχρι την οποία μπορούν να φτάσουν συγκεκριμένα επίπεδα της. Στη περίπτωση μας εξετάζονται οι αποστάσεις πέρα των οποίων τα επίπεδα της ακτινοβολίας είναι μικρότερα από 5 kW/m^2 και 37.5 kW/m^2 κάθε φορά. Η επιλογή των τιμών αυτών έχει εξηγηθεί πιο πάνω καθώς και οι δύο αυτές τιμές αποτελούν χαρακτηριστικά όρια όσο αναφορά τις επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και τις τριγύρω κατασκευές.

Ακολουθεί ο χάρτης με τη περιοχή της Νέας Καρβάλης πάνω στον οποίο φαίνονται με κύκλους η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσουν τα επίπεδα ακτινοβολίας 5 kW/m^2 και 37.5 kW/m^2 αντίστοιχα. Όλες οι περιοχές που περικλείονται μέσα στους κύκλους είναι αυτές που θα δεχτούν ακτινοβολίες της τάξης των 5 kW/m^2 και πάνω, είναι συνεπώς οι περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο από μια τέτοια διαρροή.

Σχήμα 29. Απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας έως και 5 kW/m^2 (2118m).

Στην ακτίνα αυτή των 2118 μέτρων όπως φαίνεται και στο προηγούμενο σχήμα εκτός από τις εγκαταστάσεις του φυσικού αερίου κινδυνεύει και ένα μικρό τμήμα της πόλης της Νέας Καρβάλης.

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Νέα Καρβάλη	2220

Ο πίνακας των αρχικών δεδομένων για την περίπτωση που δεν εμφανίζεται ικανή πηγή ανάφλεξης ώστε να προκληθεί πυρκαγιά λίμνης, είναι:

Πίνακας 20. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Διάμετρος ρήγματος	9	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	13	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	**m^2**
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	14300	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΟΧΙ**	**-**

Εξετάζεται το ίδιο ρήγμα κυκλικής διαμέτρου 9 μέτρων στο από το οποίο διαρρέει μια ποσότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου 14,300 m^3. Η ποσότητα αυτή εξαπλώνεται πάνω στο νερό και εξατμίζεται συνεχώς μέχρι να εξατμιστεί όλη. Θεωρούμε στο παράδειγμα αυτό ότι δεν υπάρχει κάποια πηγή ανάφλεξης ώστε να πυροδοτήσει το LNG και να προκληθεί πυρκαγιά.

Σύμφωνα με αυτές τις αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα και η σημασία τους παρουσιάζονται παρακάτω με τη βοήθεια του αντίστοιχου πίνακα:

Πίνακας 21. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Αριθμός φ	0.027	**-**
Χρόνος διαρροής	0.33	**min**
Ακτίνα LNG λίμνης	305	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$14.6 \cdot 10^4$	**m^2**
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	3.1	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	-	**TW**
Ύψος φλόγας*	-	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m^2 *	-	**m**

Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2 *	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (F-2)*	4641	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	3225	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	2057	**m**

Σύμφωνα με το μοντέλο που χρησιμοποιούμε ο αδιάστατος αριθμός φ υπολογίζεται ίσος με 0.027, μια τιμή που θεωρούμε ότι είναι αρκετά μικρότερη του 1. Συνεπώς, όπως έχουμε περιγράψει σχετικά με την ερμηνεία του φ, η ροή του υγρού από το ρήγμα της δεξαμενής είναι πολύ μεγάλη και ασταθής με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται το υγρό πάνω στη θάλασσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Στη συνέχεια σχηματίζεται μια λίμνη, σχήματος ημικυκλίου με ακτίνα 305 μέτρα και κέντρο το σημείο της διαρροής, που εξατμίζεται συνεχώς έως ότου εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Το τέλος της εξάτμισης έρχεται 3.1 λεπτά μετά από την έναρξη της απελευθέρωσης, χρόνος ικανός να εξαπλωθεί όλη η ποσότητα των 14,300 m^3 και να εξατμιστεί.

Βάση των αρχικών δεδομένων έχουμε υποθέσει ότι δεν έχουμε εμφάνιση πυρκαγιάς. Το βασικό, επομένως, αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός του εύφλεκτου σύννεφου ατμού και το πόσο μακριά μπορεί να παρασυρθεί από τον άνεμο των 2 m/s μέχρι να χάσει την ευφλεκτότητα του. Αυτό θα γίνει όταν αναμιχτεί με τον αέρα σε τέτοιο σημείο ώστε η περιεκτικότητα του σε μεθάνιο να είναι κάτω του 5% κατά όγκο.

Παρακάτω παρουσιάζεται η περιοχή της Νέας Καρβάλης πάνω στην οποία φαίνεται με ένα κύκλο η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσει το σύννεφο από τη περιοχή της διαρροής. Η κατεύθυνση του άνεμου δεν μπορεί να είναι γνωστή, άρα συμπεραίνουμε ότι οι περιοχές που πιθανόν να πληγούν είναι όλες αυτές που περικλείονται στο σχήμα αυτό.

Σχήμα 30. Περιοχές που επηρεάζονται από σύννεφο ατμού έως απόσταση LFL των 4641m.

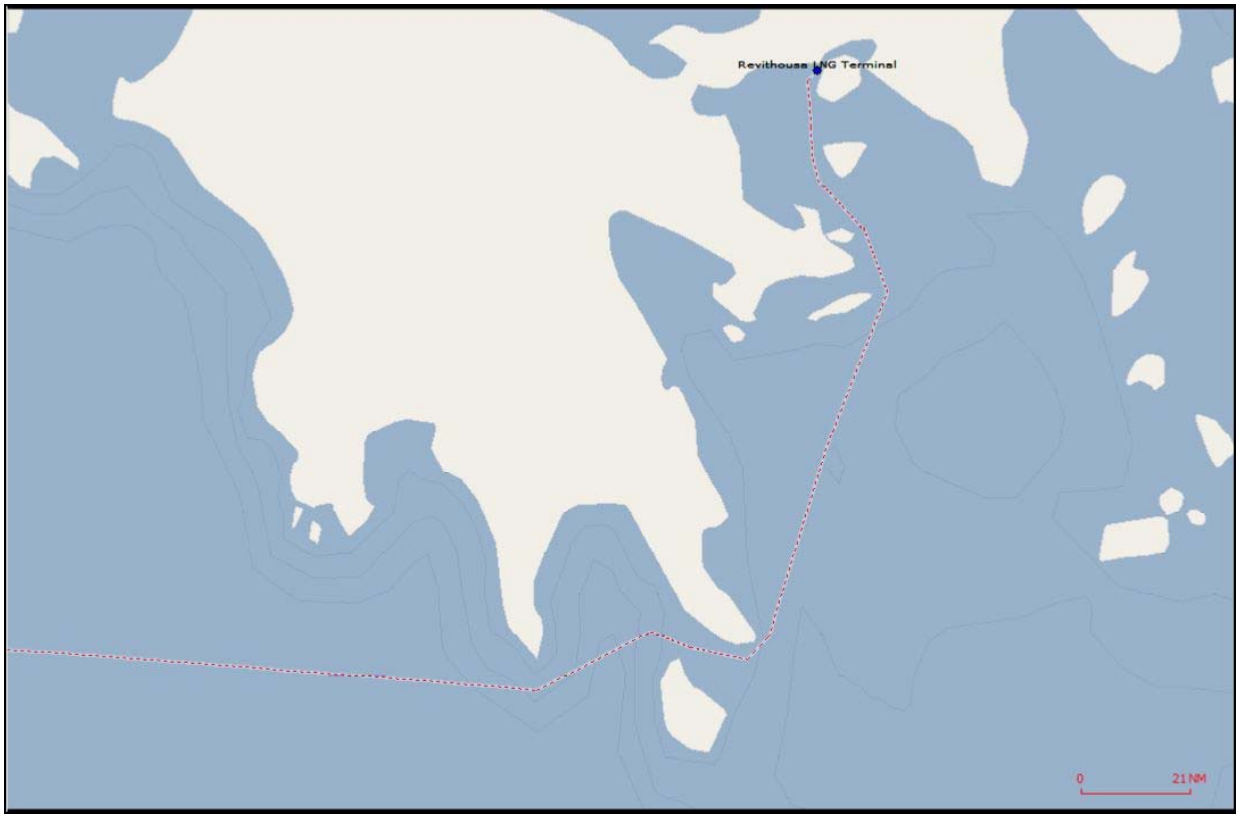
Στην ακτίνα αυτή των 4641 μέτρων όπως φαίνεται και στο προηγούμενο σχήμα εκτός από τις εγκαταστάσεις του φυσικού αερίου κινδυνεύει ολόκληρη η Νέα Καρβάλη μαζί και με τις εγκαταστάσεις στον όρμο Τσάρη.

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Νέα Καρβάλη	2220

8.3 ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ ΑΠΟ ΑΛΓΕΡΙΑ

Το φυσικό αέριο που εισάγει η Ελλάδα προέρχεται από τρεις προμηθευτές με δυο διαφορετικούς τρόπους. Η Ιταλία και η Ρωσία είναι οι δύο κύριοι προμηθευτές φυσικού αερίου το οποίο φτάνει στη χώρα μας μέσω υποθαλάσσιων / υπόγειων αγωγών. Ο τρίτος προμηθευτής είναι η Αλγερία από την οποία το φυσικό αέριο φτάνει στην Ελλάδα με τη βοήθεια των υγραεριοφόρων, των πλοίων δηλαδή που είναι ειδικά κατασκευασμένα να μεταφέρουν υγρά καύσιμα. Έτσι, η Αλγερία είναι ο αποκλειστικός προμηθευτής φυσικού αερίου μέσω της θαλάσσιας οδού, από την οποία έρχεται το φυσικό αέριο σε υγροποιημένη μορφή και επανατμοποιείται στις εγκαταστάσεις της νήσου Ρεβυθούσας ώστε μα ακολουθήσει η διανομή του στην υπόλοιπη χώρα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ένας χάρτης με το δρομολόγιο που ακολουθούν τα πλοία που έρχονται από την Αλγερία με προορισμό τη Ρεβυθούσα. Παρατηρούμε ότι οι περιοχές που κινδυνεύουν από μια διαρροή LNG είναι αρκετές καθώς η διαδρομή των πλοίων περνάει κοντά από παράκτιες περιοχές τόσο της Πελοποννήσου όσο και των τριγύρω νησιών. Η περιοχή που θα χρησιμοποιήσουμε για την εφαρμογή ενός ακόμα παραδείγματος διαρροής μαζί με τις ανάλογες επιπτώσεις, είναι το νησί της Αίγινας, καθώς είναι αυτό που βρίσκεται πιο κοντά από όλες τις υπόλοιπες περιοχές και με το κέντρο του νησιού να διατρέχει αρκετά μεγάλο κίνδυνο λόγο της τοποθεσίας του.



Σχήμα 31. Δρομολόγιο πλοίων από Αλγερία προς Ρεβυθούσα.

Οι εφαρμογές θα μπορούσαν να επεκταθούν και σε άλλες περιοχές όπως η Ελαφόνησος ή τα Κύθηρα κάτι που δεν έγινε όμως καθώς οι περιοχές που ήταν πιο κοντά στη διαδρομή του πλοίου από τη Αλγερία ήταν όλες ερημικές και ακατοίκητες, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος ούτε για ανθρώπους αλλά ούτε και για παράκτιες κατασκευές.

Σχήμα 32. Δρομολόγιο πλοίων από την Αλγερία προς τη Ρεβυθούσα (περιοχή Αίγινας)

Αίγινα

Θεωρούμε τις παρακάτω αρχικές συνθήκες για μια πιθανή διαρροή LNG στην θαλάσσια περιοχή έξω από την Αίγινα:

Πίνακας 22. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	*Τιμή*	*Μονάδες*
Διάμετρος ρήγματος	7	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	13	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	**m^2**
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	14300	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΝΑΙ**	**-**

Το ρήγμα που εξετάζεται είναι ένα ρήγμα κυκλικής διαμέτρου 9 μέτρων στο ύψος της ισάλου γραμμής από το οποίο διαρρέει μια ποσότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου 14,300 m^3. Η ποσότητα αυτή εξαπλώνεται πάνω στο νερό και εξατμίζεται συνεχώς μέχρι να εξατμιστεί όλη. Θεωρούμε στο παράδειγμα αυτό ότι υπάρχει κάποια πηγή ανάφλεξης ώστε να πυροδοτήσει το LNG και να προκληθεί πυρκαγιά.

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επιλέχθηκαν είναι οι δυσμενέστερες που μπορεί να υπάρχουν σε ένα τέτοιο γεγονός, καθώς δεν βοηθούν το LNG σύννεφο να αναμιχτεί γρήγορα με τον αέρα και να εξατμιστεί, με αποτέλεσμα να παραμένει για αρκετή ώρα εύφλεκτο και να «ταξιδεύει» όλο και πιο μακριά λόγω του ανέμου. Οι συνθήκες αυτές είναι μια ταχύτητα ανέμου 2 m/s και μια ατμοσφαιρική σταθερότητα κατάστασης F.

Σύμφωνα με αυτές τις αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα και η σημασία τους παρουσιάζονται παρακάτω με τη βοήθεια του αντίστοιχου πίνακα:

Πίνακας 23. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	*Τιμή*	*Μονάδες*
Αριθμός φ	0.1	**-**
Χρόνος διαρροής	0.55	**min**
Ακτίνα LNG λίμνης	333	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$17.4 \cdot 10^4$	**m^2**
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	2.75	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	1.83	**TW**
Ύψος φλόγας*	177	**m**

Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m^2 *	2093	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2 *	764	**m**
Απόσταση έως το LFL *	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	-	**m**

Ο αδιάστατος αριθμός φ υπολογίζεται ίσος με 0.1, μια τιμή που θεωρούμε μικρότερη του 1 (<0.30) ενώ η λίμνη που σχηματίζεται έχει σχήμα ημικυκλίου με ακτίνα 333 μέτρα και κέντρο το σημείο της διαρροής. Η εξάτμιση πραγματοποιείται συνεχώς έως ότου εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Το τέλος της εξάτμισης έρχεται 2.75 λεπτά μετά από την έναρξη της απελευθέρωσης, χρόνος ικανός να εξαπλωθεί όλη η ποσότητα των 14,300 m^3 και να εξατμιστεί.

Βάση των αρχικών δεδομένων έχουμε υποθέσει ότι έχουμε εμφάνιση πυρκαγιάς. Το βασικό, επομένως, αποτέλεσμα είναι η ένταση της ακτινοβολίας και η απόσταση μέχρι την οποία μπορούν να φτάσουν συγκεκριμένα επίπεδα της. Στη περίπτωση μας εξετάζονται οι αποστάσεις πέρα των οποίων τα επίπεδα της ακτινοβολίας είναι μικρότερα από 5 kW/m^2 και 37.5 kW/m^2 κάθε φορά. Η επιλογή των τιμών αυτών έχει εξηγηθεί πιο πάνω καθώς και οι δύο αυτές τιμές αποτελούν χαρακτηριστικά όρια όσο αναφορά τις επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και τις τριγύρω κατασκευές.

Ακολουθεί ο χάρτης με τη περιοχή έξω από την Αίγινα πάνω στον οποίο φαίνονται με κύκλους η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσουν τα επίπεδα ακτινοβολίας 5 kW/m^2 και 37.5 kW/m^2 αντίστοιχα. Όλες οι περιοχές που περικλείονται μέσα στους κύκλους είναι αυτές που θα δεχτούν ακτινοβολίες της τάξης των 5 kW/m^2 και πάνω, είναι συνεπώς οι περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο από μια τέτοια διαρροή.

Σχήμα 33. Απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας έως και 5 kW/m^2 (2093m).

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, ένα μέρος του κέντρου της Αίγινας συμπεριλαμβανομένου και του λιμανιού της και παράκτιων περιοχών, κινδυνεύει άμεσα από μια διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στη θάλασσα σε αυτή τη περιοχή του δρομολογίου του πλοίου από την Αλγερία προς τη Ρεβυθούσα.

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Αίγινα	7467

Ο πίνακας των αρχικών δεδομένων για την περίπτωση που δεν εμφανίζεται ικανή πηγή ανάφλεξης ώστε να προκληθεί πυρκαγιά λίμνης, είναι:

Πίνακας 24. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	*Τιμή*	*Μονάδες*
Διάμετρος ρήγματος	7	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	13	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	**m^2**
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	14300	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΟΧΙ**	**-**

Εξετάζεται το ίδιο ρήγμα κυκλικής διαμέτρου 9 μέτρων από το οποίο διαρρέει μια ποσότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου 14,300 m^3. Η ποσότητα αυτή εξαπλώνεται πάνω στο νερό και εξατμίζεται συνεχώς μέχρι να εξατμιστεί όλη. Θεωρούμε στο παράδειγμα αυτό ότι δεν υπάρχει κάποια πηγή ανάφλεξης ώστε να πυροδοτήσει το LNG και να προκληθεί πυρκαγιά.

Σύμφωνα με αυτές τις αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα και η σημασία τους παρουσιάζονται παρακάτω με τη βοήθεια του αντίστοιχου πίνακα:

Πίνακας 25. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	*Τιμή*	*Μονάδες*
Αριθμός φ	0.075	**-**
Χρόνος διαρροής	0.55	**min**
Ακτίνα LNG λίμνης	308	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$14.9 \cdot 10^4$	**m^2**
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	3.15	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	-	**TW**
Ύψος φλόγας*	-	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m^2 *	-	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2 *	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (F-2)*	4400	**m**

Απόσταση έως το LFL (D-3)*	3023	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	1942	**m**

Σύμφωνα με το μοντέλο που χρησιμοποιούμε ο αδιάστατος αριθμός φ υπολογίζεται ίσος με 0.075, μια τιμή που θεωρούμε ότι είναι αρκετά μικρότερη του 1. Συνεπώς, όπως έχουμε περιγράψει σχετικά με την ερμηνεία του φ, η ροή του υγρού από το ρήγμα της δεξαμενής είναι πολύ μεγάλη και ασταθής με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται το υγρό πάνω στη θάλασσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Στη συνέχεια σχηματίζεται μια λίμνη, σχήματος ημικυκλίου με ακτίνα 308 μέτρα και κέντρο το σημείο της διαρροής, που εξατμίζεται συνεχώς έως ότου εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Το τέλος της εξάτμισης έρχεται 3.15 λεπτά μετά από την έναρξη της απελευθέρωσης, χρόνος ικανός να εξαπλωθεί όλη η ποσότητα των 14,300 m^3 και να εξατμιστεί.

Βάση των αρχικών δεδομένων έχουμε υποθέσει ότι δεν έχουμε εμφάνιση πυρκαγιάς. Το βασικό, επομένως, αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός του εύφλεκτου σύννεφου ατμού και το πόσο μακριά μπορεί να παρασυρθεί από τον άνεμο των 2 m/s μέχρι να χάσει την ευφλεκτότητα του. Αυτό θα γίνει όταν αναμιχτεί με τον αέρα σε τέτοιο σημείο ώστε η περιεκτικότητα του σε μεθάνιο να είναι κάτω του 5% κατά όγκο.

Παρακάτω παρουσιάζεται η περιοχή της Αίγινας πάνω στην οποία φαίνεται με ένα κύκλο η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσει το σύννεφο από τη περιοχή της διαρροής. Η κατεύθυνση του άνεμου δεν μπορεί να είναι γνωστή, άρα συμπεραίνουμε ότι οι περιοχές που πιθανόν να πληγούν είναι όλες αυτές που περικλείονται στο σχήμα αυτό.

Σχήμα 34. Περιοχές που επηρεάζονται από σύννεφο ατμού έως απόσταση LFL των 4400m.

Όπως φαίνεται και από αυτό το σχήμα, ένα αρκετά μεγάλο μέρος του κέντρου της Αίγινας συμπεριλαμβανομένου και του λιμανιού της και παράκτιων περιοχών, κινδυνεύει άμεσα από μια διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στη θάλασσα σε αυτή τη περιοχή του δρομολογίου του πλοίου από την Αλγερία προς τη Ρεβυθούσα.

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Αίγινα	7467

Ρήγμα κάτω από την ίσαλο

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τις πιθανές επιπτώσεις που προκύπτουν από μια διαρροή LNG σε αυτή τη περιοχή, στη περίπτωση όπου το ρήγμα είναι υποθαλάσσιο, βρίσκεται δηλαδή κάτω από την ίσαλο γραμμή του πλοίου.

Θεωρούμε τις παρακάτω αρχικές συνθήκες:

Πίνακας 26. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Διάμετρος ρήγματος	6	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	19	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	**m^2**
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	25000	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΝΑΙ**	**-**

Το ρήγμα που εξετάζεται είναι ένα ρήγμα κυκλικής διαμέτρου 9 μέτρων στο ύψος της ισάλου γραμμής από το οποίο διαρρέει μια ποσότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου 14,300 m^3. Η ποσότητα αυτή εξαπλώνεται πάνω στο νερό και εξατμίζεται συνεχώς μέχρι να εξατμιστεί όλη. Θεωρούμε στο παράδειγμα αυτό ότι υπάρχει κάποια πηγή ανάφλεξης ώστε να πυροδοτήσει το LNG και να προκληθεί πυρκαγιά.

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επιλέχθηκαν είναι οι δυσμενέστερες που μπορεί να υπάρχουν σε ένα τέτοιο γεγονός, καθώς δεν βοηθούν το LNG σύννεφο να αναμιχτεί γρήγορα με τον αέρα και να εξατμιστεί, με αποτέλεσμα να παραμένει για αρκετή ώρα εύφλεκτο και να «ταξιδεύει» όλο και πιο μακριά λόγω του ανέμου. Οι συνθήκες αυτές είναι μια ταχύτητα ανέμου 2 m/s και μια ατμοσφαιρική σταθερότητα κατάστασης F.

Σύμφωνα με αυτές τις αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα και η σημασία τους παρουσιάζονται παρακάτω με τη βοήθεια του αντίστοιχου πίνακα:

Πίνακας 27. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	***Τιμή***	***Μονάδες***
Αριθμός φ	0.246	**-**
Χρόνος διαρροής	0.99	**min**

Ακτίνα LNG λίμνης	293	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$13.5 \cdot 10^4$	**m^2**
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	3.28	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	1.54	**TW**
Ύψος φλόγας*	177	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m^2 *	1918	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2 *	700	**m**
Απόσταση έως το LFL *	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-3)*	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	-	**m**

Ο αδιάστατος αριθμός φ υπολογίζεται ίσος με 0.246, ενώ η λίμνη που σχηματίζεται έχει σχήμα κύκλου με ακτίνα 293 μέτρα και κέντρο το σημείο της διαρροής. Η εξάτμιση πραγματοποιείται συνεχώς έως ότου εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Το τέλος της εξάτμισης έρχεται 3.28 λεπτά μετά από την έναρξη της απελευθέρωσης, χρόνος ικανός να εξαπλωθεί όλη η ποσότητα της δεξαμενής (25,000 m^3)και να εξατμιστεί, καθώς στη περίπτωση υποθαλάσσιου ρήγματος απελευθερώνεται όλη η ποσότητα του φορτίου που υπάρχει στη δεξαμενή.

Βάση των αρχικών δεδομένων έχουμε υποθέσει ότι έχουμε εμφάνιση πυρκαγιάς. Το βασικό, επομένως, αποτέλεσμα είναι η ένταση της ακτινοβολίας και η απόσταση μέχρι την οποία μπορούν να φτάσουν συγκεκριμένα επίπεδα της. Στη περίπτωση μας εξετάζονται οι αποστάσεις πέρα των οποίων τα επίπεδα της ακτινοβολίας είναι μικρότερα από 5 kW/m^2 και 37.5 kW/m^2 κάθε φορά. Η επιλογή των τιμών αυτών έχει εξηγηθεί πιο πάνω καθώς και οι δύο αυτές τιμές αποτελούν χαρακτηριστικά όρια όσο αναφορά τις επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και τις τριγύρω κατασκευές.

Ακολουθεί ο χάρτης με τη περιοχή έξω από την Αίγινα πάνω στον οποίο φαίνονται με κύκλους η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσουν τα επίπεδα ακτινοβολίας 5 kW/m^2 και 37.5 kW/m^2 αντίστοιχα. Όλες οι περιοχές που περικλείονται μέσα στους κύκλους είναι αυτές που θα δεχτούν ακτινοβολίες της τάξης των 5 kW/m^2 και πάνω, είναι συνεπώς οι περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο από μια τέτοια διαρροή.

Σχήμα 35. Απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας έως και 5 kW/m^2 (2093m).

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, ένα μέρος του κέντρου της Αίγινας συμπεριλαμβανομένου και του λιμανιού της και παράκτιων περιοχών, κινδυνεύει άμεσα από μια διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στη θάλασσα σε αυτή τη περιοχή του δρομολογίου του πλοίου από την Αλγερία προς τη Ρεβυθούσα.

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Αίγινα	7467

Ο πίνακας των αρχικών δεδομένων για την περίπτωση που δεν εμφανίζεται ικανή πηγή ανάφλεξης ώστε να προκληθεί πυρκαγιά λίμνης, είναι:

Πίνακας 28. Αρχικά δεδομένα

Στοιχεία	*Τιμή*	*Μονάδες*
Διάμετρος ρήγματος	6	**m**
Αρχική κάθετη απόσταση ρήγματος – στάθμης φορτίου	19	**m**
Επιφάνεια φορτίου	1100	**m^2**
Συνολική ποσότητα που διέρρευσε	25000	**m^3**
Ατμοσφαιρική σταθερότητα	F	**-**
Ταχύτητα ανέμου	2	**m/s**
Εμφάνιση άμεσης ανάφλεξης	**ΟΧΙ**	**-**

Εξετάζεται το ίδιο ρήγμα κυκλικής διαμέτρου 9 μέτρων στο από το οποίο διαρρέει μια ποσότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου 14,300 m^3. Η ποσότητα αυτή εξαπλώνεται πάνω στο νερό και εξατμίζεται συνεχώς μέχρι να εξατμιστεί όλη. Θεωρούμε στο παράδειγμα αυτό ότι δεν υπάρχει κάποια πηγή ανάφλεξης ώστε να πυροδοτήσει το LNG και να προκληθεί πυρκαγιά.

Σύμφωνα με αυτές τις αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα και η σημασία τους παρουσιάζονται παρακάτω με τη βοήθεια του αντίστοιχου πίνακα:

Πίνακας 29. Αποτελέσματα διαρροής

Στοιχεία	*Τιμή*	*Μονάδες*
Αριθμός φ	0.184	**-**
Χρόνος διαρροής	0.99	**min**
Ακτίνα LNG λίμνης	293	**m**
Επιφάνεια LNG λίμνης	$13.5 \cdot 10^4$	**m^2**
Χρόνος εξάτμισης LNG λίμνης	3.74	**min**
Εκλυόμενη ενέργεια *	-	**TW**
Ύψος φλόγας*	-	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 5 kW/m^2 *	-	**m**
Ελάχιστη απόσταση για επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από 37.5 kW/m^2 *	-	**m**
Απόσταση έως το LFL (F-2)*	4252	**m**

Απόσταση έως το LFL (D-3)*	2899	**m**
Απόσταση έως το LFL (D-5)*	1872	**m**

Σύμφωνα με το μοντέλο που χρησιμοποιούμε ο αδιάστατος αριθμός φ υπολογίζεται ίσος με 0.184 ενώ στη συνέχεια σχηματίζεται μια λίμνη, κυκλικού σχήματος με ακτίνα 293 μέτρα και κέντρο το σημείο της διαρροής, που εξατμίζεται συνεχώς έως ότου εξατμιστεί ολοκληρωτικά. Το τέλος της εξάτμισης έρχεται 3.74 λεπτά μετά από την έναρξη της απελευθέρωσης, χρόνος ικανός να εξαπλωθεί όλη η ποσότητα των 25,000 m^3 και να εξατμιστεί.

Βάση των αρχικών δεδομένων έχουμε υποθέσει ότι δεν έχουμε εμφάνιση πυρκαγιάς. Το βασικό, επομένως, αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός του εύφλεκτου σύννεφου ατμού και το πόσο μακριά μπορεί να παρασυρθεί από τον άνεμο των 2 m/s μέχρι να χάσει την ευφλεκτότητα του. Αυτό θα γίνει όταν αναμιχτεί με τον αέρα σε τέτοιο σημείο ώστε η περιεκτικότητα του σε μεθάνιο να είναι κάτω του 5% κατά όγκο.

Παρακάτω παρουσιάζεται η περιοχή της Αίγινας πάνω στην οποία φαίνεται με ένα κύκλο η μέγιστη απόσταση που μπορεί να φτάσει το σύννεφο από τη περιοχή της διαρροής. Η κατεύθυνση του άνεμου δεν μπορεί να είναι γνωστή, άρα συμπεραίνουμε ότι οι περιοχές που πιθανόν να πληγούν είναι όλες αυτές που περικλείονται στο σχήμα αυτό.

Σχήμα 36. Περιοχές που επηρεάζονται από σύννεφο ατμού έως απόσταση LFL των 4252m.

Όπως φαίνεται και από αυτό το σχήμα, ένα αρκετά μεγάλο μέρος του κέντρου της Αίγινας συμπεριλαμβανομένου και του λιμανιού της και παράκτιων περιοχών, κινδυνεύει άμεσα από μια διαρροή υγροποιημένου φυσικού αερίου στη θάλασσα σε αυτή τη περιοχή του δρομολογίου του πλοίου από την Αλγερία προς τη Ρεβυθούσα.

Περιοχή	**Κάτοικοι**
Αίγινα	7467

9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

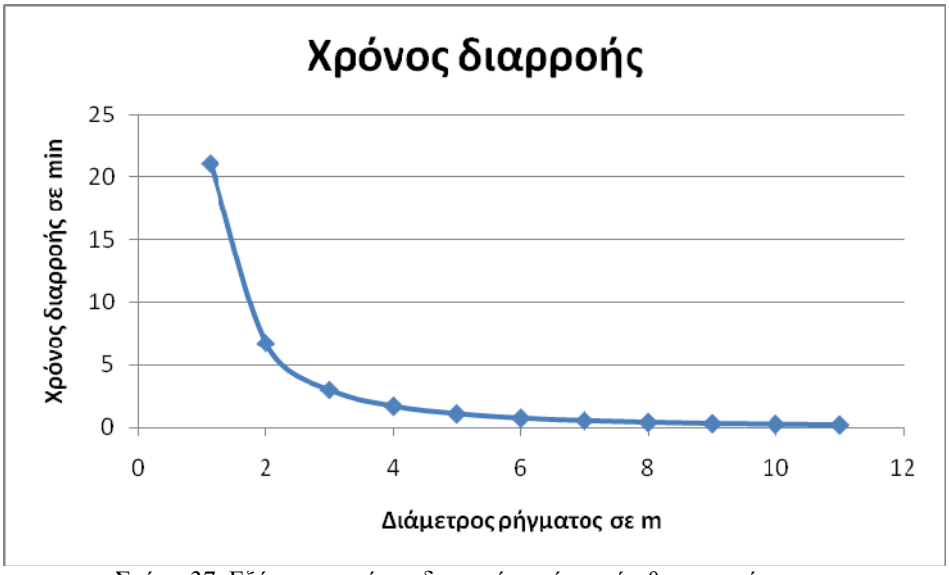
Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, οι δύο βασικές παράμετροι που καθαρίζουν κατά πολύ το είδος και το μέγεθος των επιπτώσεων μιας διαρροής υγροποιημένου φυσικού αερίου στο νερό είναι το μέγεθος του ρήγματος (διάμετρος) και η ύπαρξη ή όχι ανάφλεξης ώστε να καθοριστεί αν θα υπάρξει πυρκαγιά λίμνης.

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται τα διάφορα μεγέθη ως συνάρτηση της διαμέτρου του ρήγματος χρησιμοποιώντας το μοντέλο υπολογισμών που έχουμε κατασκευάσει. Φαίνεται επίσης και η επίδραση της ύπαρξης ανάφλεξης ή όχι καθώς σε κάθε περίπτωση προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα, η συμπεριφορά των οποίων αναλύεται στη συνέχεια ως προς τη διάμετρο του ρήγματος.

ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΥΓΡΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΡΗΓΜΑ

Η σχέση του χρόνου που χρειάζεται το υγρό φορτίο να εξέλθει της δεξαμενής εξαρτάται, όπως φαίνεται και από τη σχέση που τον υπολογίζει, από το μέγεθος της δεξαμενής, το ύψος που έχει παρουσιαστεί το ρήγμα αλλά ο βασικότερος παράγοντας είναι το μέγεθος του ρήγματος, που εκφράζεται μέσω της επιφάνειας του A_h.

$$t_d \sim \frac{A_t h_0}{\sqrt{g h_0} A_h} = \frac{A_t}{A_h}\sqrt{\frac{h_0}{g}}$$



Σχήμα 37. Εξάρτηση χρόνου διαρροής από το μέγεθος του ρήγματος

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της διαμέτρου του ρήγματος (αύξησης επιφάνειας) οδηγεί σε μείωση του χρόνου διαρροής. Η μείωση αυτή είναι αρκετά ραγδαία στην αρχή διότι για πολύ

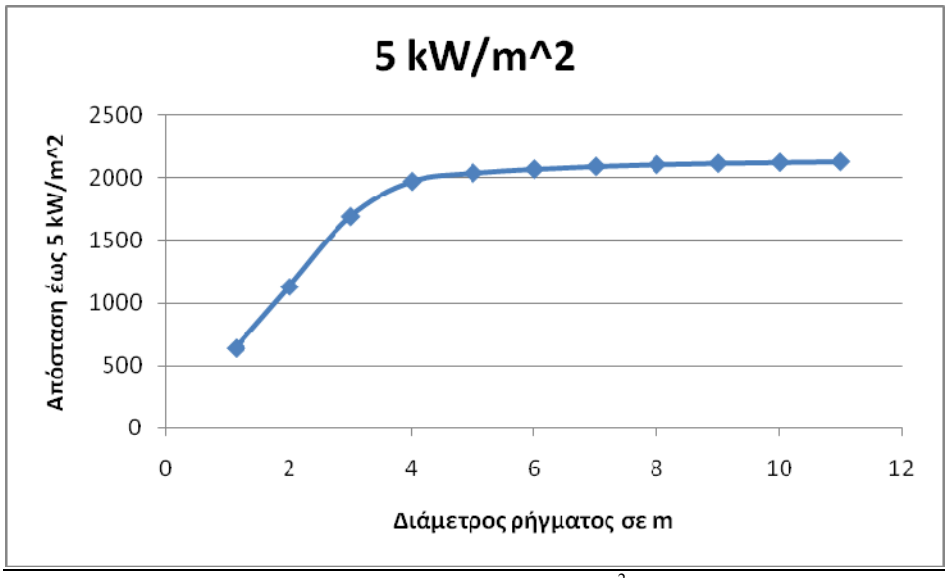
μικρά ρήγματα η τιμή του αριθμού φ είναι αρκετά μεγάλη και σύμφωνα με το μοντέλο του Fay η ροή του υγρού από τη δεξαμενή θα είναι αρκετά αργή και με μικρό ρυθμό, με αποτέλεσμα να χρειαστεί αρκετός χρόνος για να απελευθερωθεί όλη η ποσότητα.

Για τις τιμές της διαμέτρου 2 με 4 m περίπου, ο αριθμός φ μειώνεται αρκετά, εξακολουθεί όμως να μην βρίσκεται σε πολύ μικρές τιμές με συνέπεια να βρισκόμαστε σε ένα μεταβατικό στάδιο όπου η ροή αυξάνεται όλο και περισσότερο μειώνοντας τον χρόνο διαρροής. Για τις τιμές άνω των 5 - 6 m ο αριθμός φ έχει πέσει σε πολύ χαμηλά επίπεδα στα οποία σύμφωνα με το μοντέλο η ροή έχει ασταθή και πολύ γρήγορο ρυθμό.

ΥΠΑΡΞΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

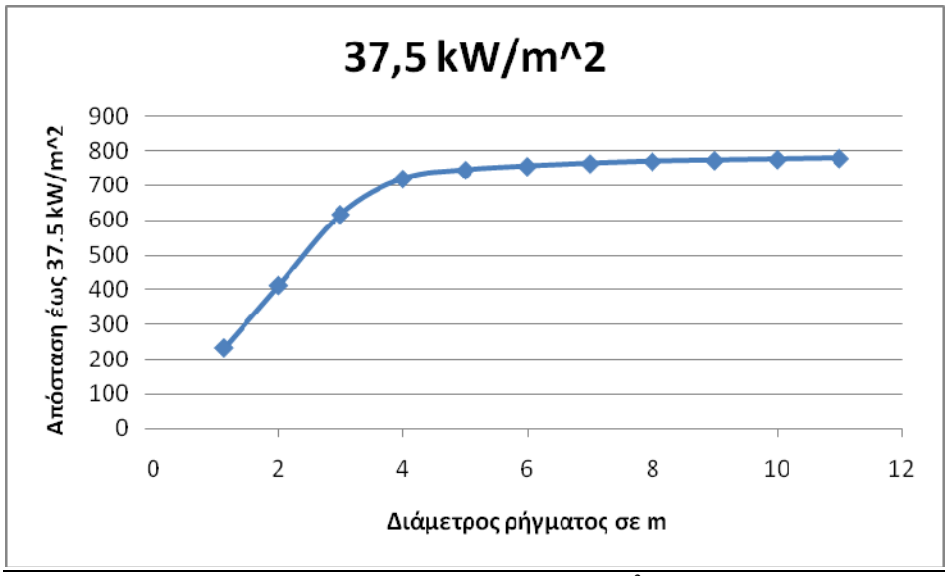
Όπως έχουμε αναλύσει και σε προηγούμενα κεφάλαια, στη περίπτωση ανάφλεξης της λίμνης του υγροποιημένου φυσικού αερίου μελετάμε τη ροή της ακτινοβολίας της καύσης αυτής στις τριγύρω περιοχές. Εξετάζουμε δηλαδή το μέγεθος της ροής αυτής και την απόσταση μέχρι την οποία είναι επικίνδυνη. Έτσι για τα επίπεδα ακτινοβολίας 5 και 37.5 kW/m^2 (τιμές με χαρακτηριστικές επιπτώσεις) έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα σε σχέση πάντα με τη διάμετρο του ρήγματος.

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΩΣ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ 5 kW/m^2



Σχήμα 38. Εξάρτηση απόστασης έως ακτινοβολία 5 kW/m^2 από το μέγεθος του ρήγματος

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΩΣ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ 37,5 kW/m²



Σχήμα 39. Εξάρτηση απόστασης έως ακτινοβολία 37.5 kW/m^2 από το μέγεθος του ρήγματος

Η μορφή και των δυο διαγραμμάτων είναι παρόμοια για αυτό και ο σχολιασμός αναφέρεται και στα δυο μαζί.

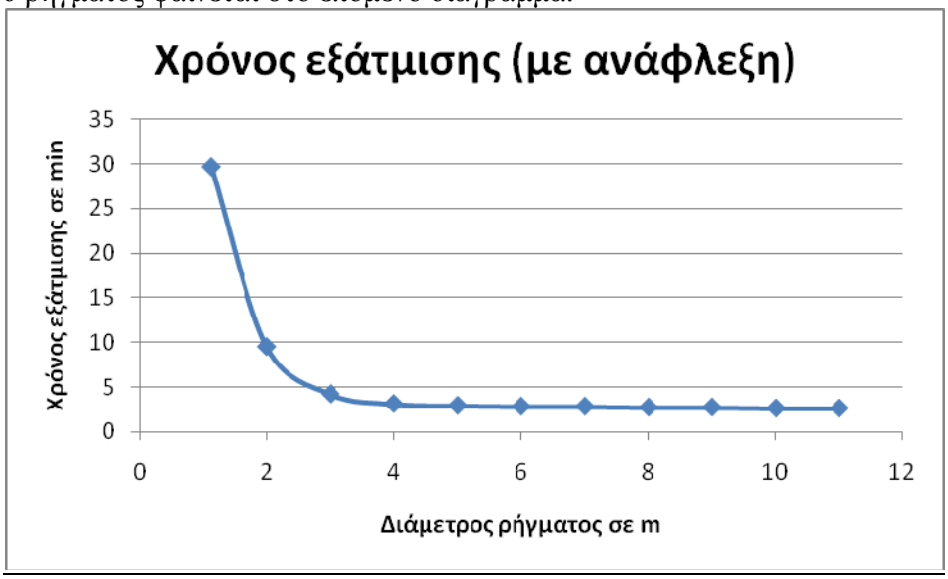
Τα επίπεδα έντασης της ροής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται εξαρτώνται από την ενέργεια που εκλύεται κατά τη διάρκεια της καύσης της λίμνης. Η ενέργεια αυτή εξαρτάται (αναλογικά) από το μέγεθος και τις διαστάσεις της δεξαμενής (κατά συνέπεια και από τη ποσότητα του υγρού που απελευθερώνεται), από τα χαρακτηριστικά του υγρού καυσίμου (φυσικό αέριο) και τέλος εξαρτάται (αντίστροφα) και από το χρόνο εξάτμισης της λίμνης. Όσο πιο γρήγορα εξατμιστεί η λίμνη τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που εκπέμπεται, όσο πιο γρήγορο και έντονο είναι δηλαδή το φαινόμενο της πυρκαγιάς θα έχουμε και μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας.

Στα παραπάνω διαγράμματα λοιπόν συμπεραίνουμε ότι για μεγαλύτερα ρήγματα (μεγαλύτερη διάμετρο) το υγρό θα απελευθερώνεται πιο γρήγορα από τη δεξαμενή (σύμφωνα με τον αδιάστατο αριθμό φ του μοντέλου) σχηματίζοντας μεγαλύτερη λίμνη η οποία με τη σειρά της θα εξατμιστεί πιο γρήγορα (λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου που θα υπάρχει και της μεγαλύτερης επιφάνειας) εκλύοντας μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και αυξάνοντας συνεπώς τις αποστάσεις μέχρι τις οποίες θα διατηρούνται τα άνω επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας.

ΧΡΟΝΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ

Όταν το υγροποιημένο φυσικό αέριο απελευθερωθεί από τη δεξαμενή θα αρχίζει ακαριαία να εξατμίζεται λόγω της θερμότητας που μεταδίδεται σε αυτό, επαναφέροντας το στην αρχική

αέρια κατάσταση, πριν δηλαδή ψυχθεί στους -160 ^{o}C. Η θερμότητα αυτή προέρχεται από το νερό της θάλασσας και από την πυρκαγιά πάνω από την LNG λίμνη με αποτέλεσμα να εξατμίζεται όλη η λίμνη μέσα σε λίγα μόνο λεπτά. Η εξάρτηση του χρόνου αυτού από το μέγεθος του ρήγματος φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα:

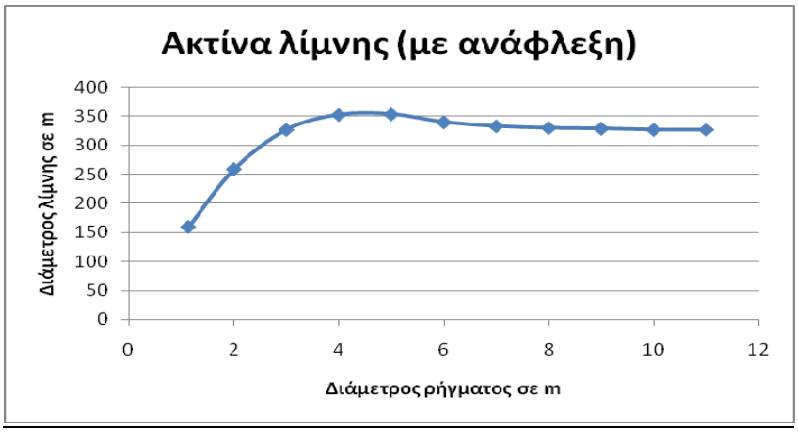


Σχήμα 40. Εξάρτηση χρόνου εξάτμισης από το μέγεθος του ρήγματος

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος του ρήγματος ελατώνεται και ο χρόνος που χρείαζεται όλη η ποσότητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου που διέρρευσε να εξατμιστεί. Η διακύμανση της σχέσης αυτής είναι παρόμοια με αυτή του χρόνου διαρροής καθώς βασικό ρόλο στις μεταβολές της, παίζει ο αδιάστατος αριθμός φ. Έτσι λοιπόν ο χρόνος εξάτμισης όλης της ποσότητας που απελευθερώνεται, θα είναι μεγάλος στην περίπτωση μικρού ρήγματος, καθώς το υγρό θα απελευθερώνεται με αργό ρυθμό, και μικρότερος στις μεγάλες επιφάνειες ρηγματος. Ο τρόπος που γίνεται αυτό ωφείλεται στον αριθμό φ.

ΜΕΓΕΘΟΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ

Η λίμνη που σχηματίζεται μετά τη διαρροή του LNG στο νερό είναι ημικυκλικής μορφής με κέντρο το σημείο της διαρροής. Εξαρτάται από τις διαστάσεις της δεξαμενής, τον όγκο του υγρού φορτίου που απελευθερώνεται αλλά κυριότερα εξαρτάται από το μέγεθος του ρήγματος με τον τρόπο που φαίνεται στη συνέχεια:



Σχήμα 41. Εξάρτηση μεγέθους λίμνης από το μέγεθος του ρήγματος

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, το μέγεθος της λίμνης αυξάνεται, με την αύξηση της διαμέτρου του ρήγματος, μέχρι μια μέγιστη τιμή πέραν της οποίας ελαττώνεται ελάχιστα και στη συνέχεια σχεδόν σταθεροποιείται όσο και αν μεγαλώσει το μέγεθος του ρήγματος.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το ότι ολόκληρο το φαινόμενο της διαρροής εξαρτάται από την τιμή του αριθμού φ. Συνεπώς για μικρές τιμές της διαμέτρου ο αριθμός φ είναι αρκετά μεγάλος και σύμφωνα με το μοντέλο του Fay το LNG απελευθερώνεται αργά από το ρήγμα με αποτέλεσμα η ποσότητα που διαρρέει να σχηματίζει λίμνη μικρής διαμέτρου συγκριτικά με μεγάλα ρήγματα όπου το φορτίο απελευθερώνεται σχεδόν ακαριαία.

Έτσι στην περίπτωση μας βλέπουμε μια σταδιακή αύξηση της ακτίνας της λίμνης μέχρι τη διάμετρο των 5m περίπου, όπου ο αριθμός φ είναι αρχικά μεγάλος και ελαττώνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος, έως ότου φτάσει σε ένα σημείο στο οποίο η διάμετρος της λίμνης έχει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει για το συγκεκριμένο παράδειγμα. Στο σημείο εκείνο η τιμή του αριθμού φ γίνεται αρκετά μικρότερη του 1 (έχει προηγηθεί σχετική επεξήγηση) αλλάζοντας έτσι τον μηχανισμό της διαρροής και κατά συνέπεια τα χαρακτηριστικά της διαρροής (όπως η ακτίνα της λίμνης). Η διαρροή γίνεται πιο βίαια και πιο απότομη με συνέπεια να προκύπτουν μεν μεγάλες τιμές της ακτίνας άλλα όχι μέγιστες, σύμφωνα πάντα με το μοντέλο υπολογισμών μας.

ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗ

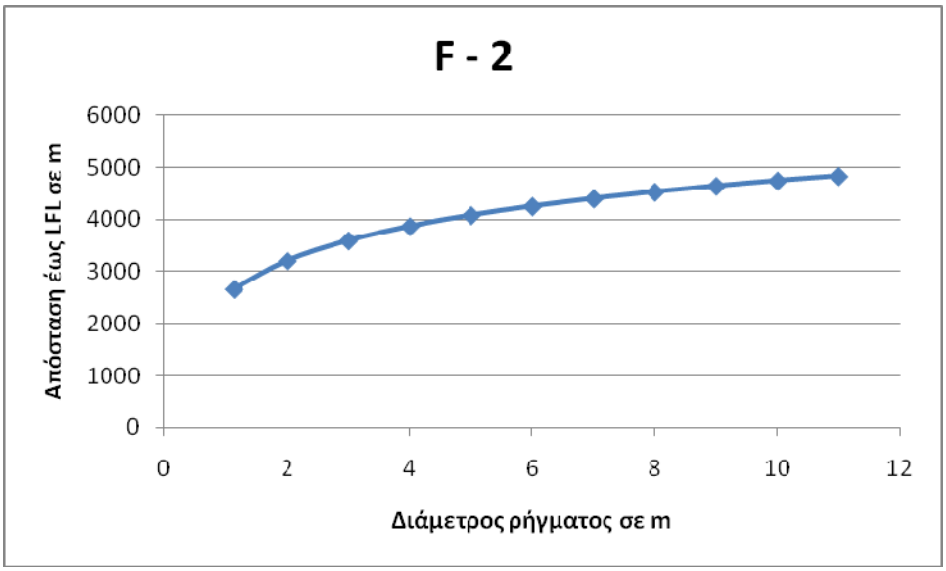
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΩΣ ΤΟ LFL

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει ανάφλεξη ώστε να προκύψει πυρκαγιά λίμνης, η εξάτμιση οφείλεται εξολοκλήρου στη θερμότητα που μεταδίδεται στο LNG από το νερό της θάλασσας, με αποτέλεσμα να εξατμίζεται σχηματίζοντας ένα σύννεφο ατμού πάνω από την περιοχή της λίμνης. Το σύννεφο αυτό είναι εύφλεκτο όταν η περιεκτικότητα του μεθανίου είναι σε τιμές

μεταξύ του 5 – 15 % κατά όγκο. Επίσης, λόγω των ανέμων, το σύννεφο μπορεί να κατευθυνθεί και σε άλλες περιοχές θέτοντας τες σε πιθανό κίνδυνο ανάφλεξης.

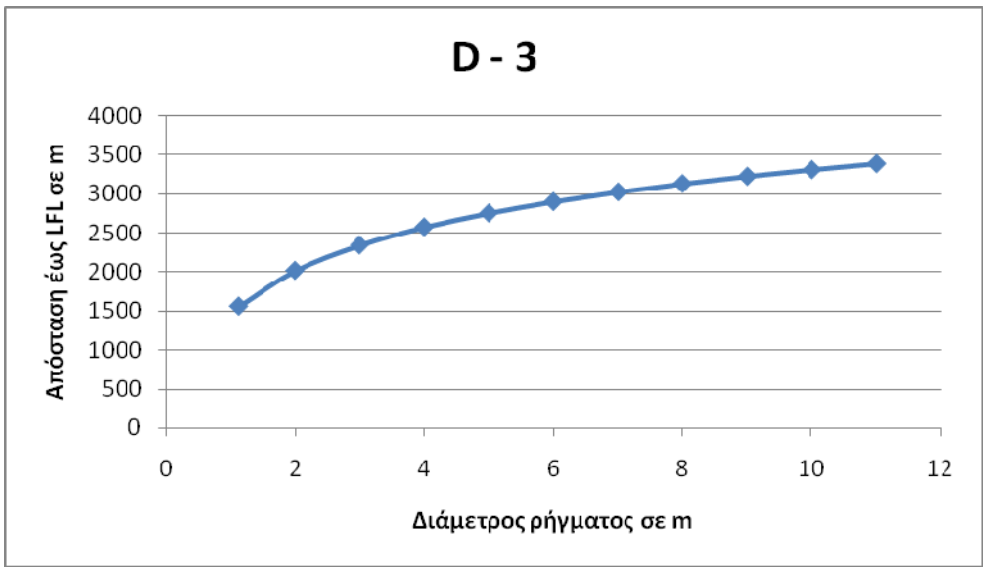
Οι ικανοί άνεμοι για να μετακινήσουν του σύννεφο αυτό είναι αρκετά ασθενής καθώς αν έχουν μεγαλύτερη ένταση το σύννεφο θα διαλυθεί στην ατμόσφαιρα πολύ γρήγορα και δεν θα αποτελεί κίνδυνο. Έτσι στη συνέχεια εξετάζουμε την μέγιστη απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει το σύννεφο στις 3 πιο επικίνδυνες ατμοσφαιρικές καταστάσεις (F-2, D-3, D-5).

- F - 2



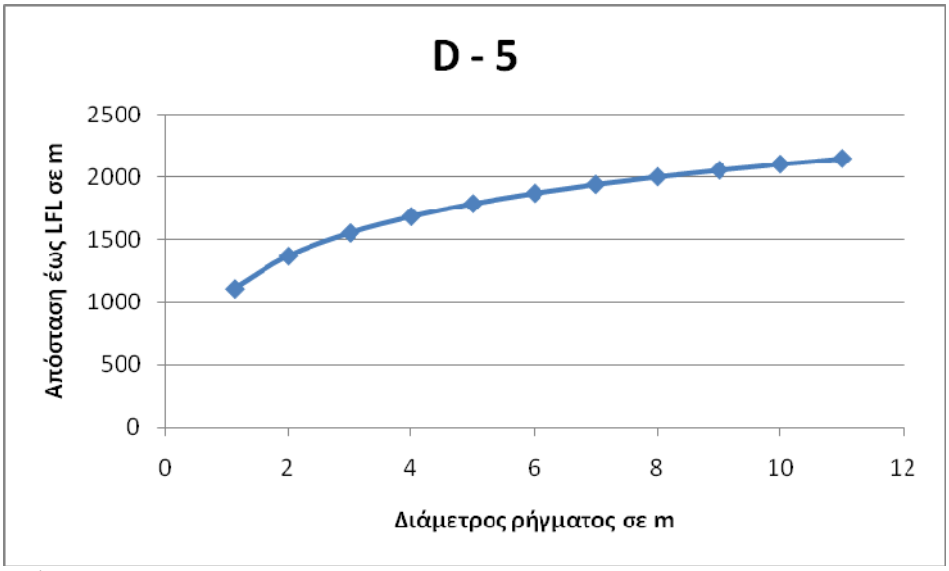
Σχήμα 42. Εξάρτηση απόστασης έως το LFL από το μέγεθος του ρήγματος, για ατμοσφαιρική συνθήκες F-2

- D – 3



Σχήμα 43. Εξάρτηση απόστασης έως το LFL από το μέγεθος του ρήγματος, για ατμοσφαιρική συνθήκες D-3

- D – 5



Σχήμα 44. Εξάρτηση απόστασης έως το LFL από το μέγεθος του ρήγματος, για ατμοσφαιρική συνθήκες D-5

Η ερμηνεία των συμβόλων έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια όπου το γράμμα αναφέρεται στην ατμοσφαιρική κατάσταση και ο αριθμός στην ένταση του ανέμου σε m/s.

Παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες του ανέμου που εξετάζονται είναι μικρής κλίμακας και αυτό γιατί αποτελούν τις καλύτερες συνθήκες για την εξάπλωση του σύννεφου.

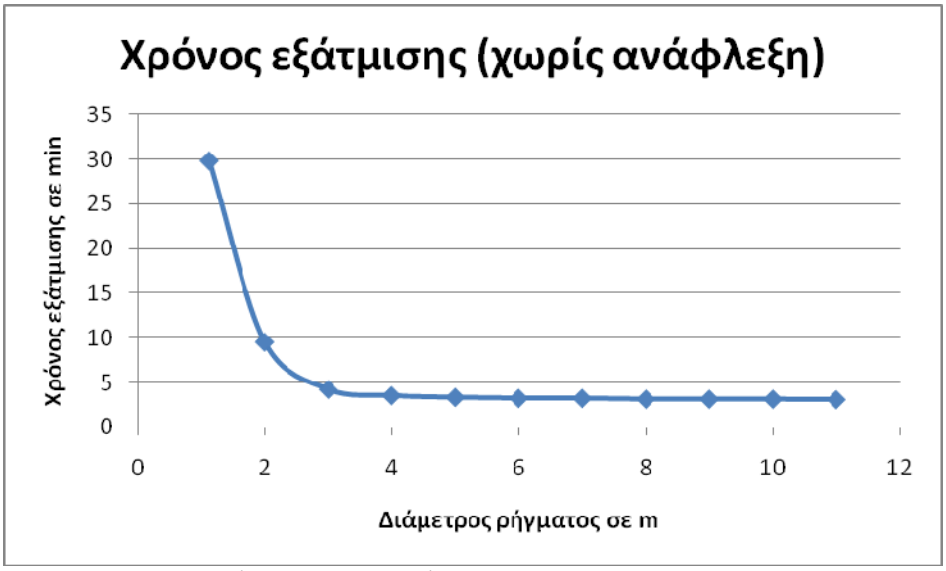
Ο τρόπος που εξαρτώνται από τη διάμετρο του ρήγματος είναι παρόμοιος και για τις τρεις περιπτώσεις, συνεπώς ο σχολιασμός είναι κοινός.

Με την αύξηση της επιφάνειας του ρήγματος μεγαλώνει η ένταση της διαρροής και διαρρέει περισσότερο απότομα το υγρό από τη δεξαμενή με αποτέλεσμα να εξατμίζεται περισσότερη ποσότητα φορτίου την ίδια στιγμή και να σχηματίζεται μεγαλύτερο σύννεφο εύφλεκτου ατμού.

Να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα έχουν κατασκευαστεί με βάση τα δεδομένα που συλλέξαμε από τις διάφορες μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με τη διασπορά του σύννεφου ατμού. Είναι συνεπώς προφανές ότι τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων αυτών αποτελούν μια ¨μέση λύση¨ καθώς εμπεριέχουν αποτελέσματα διαφόρων μελετητών με αρκετές διαφορές στις υποθέσεις του ενός από του άλλου.

ΧΡΟΝΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ

Όταν το υγροποιημένο φυσικό αέριο απελευθερωθεί από τη δεξαμενή θα αρχίζει ακαριαία να εξατμίζεται λόγω της θερμότητας που μεταδίδεται σε αυτό, επαναφέροντας το στην αρχική αέρια κατάσταση, πριν δηλαδή ψυχθεί στους -160 ^{o}C. Η θερμότητα αυτή προέρχεται αποκλειστικά από το νερό της θάλασσας (καθώς δεν υπάρχει πυρκαγιά πάνω από τη λίμνη) με αποτέλεσμα να εξατμίζεται όλη η λίμνη που σχηματίζεται μέσα σε λίγα μόνο λεπτά. Η εξάρτηση του χρόνου αυτού από το μέγεθος του ρήγματος φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα:



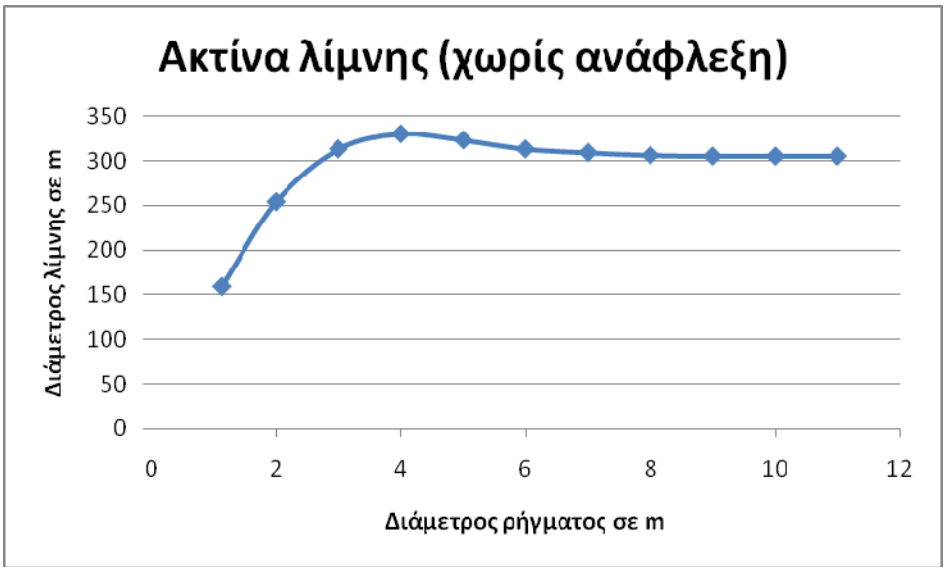
Σχήμα 45. Εξάρτηση χρόνου εξάτμισης από το μέγεθος του ρήγματος

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος του ρήγματος ελατώνεται και ο χρόνος που χρείαζεται όλη η ποσότητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου που διέρρευσε να εξατμιστεί. Η

διακύμνση της σχέσης αυτής είναι παρόμοια με αυτή του χρόνου διαρροής καθώς βασικό ρόλο στις μεταβολές της, παίζει ο αδιάστατος αριθμός φ. Έτσι λοιπόν ο χρόνος εξάτμισης όλης της ποσότητας που απελευθερώνεται, θα είναι μεγάλος στην περίπτωση μικρού ρήγματος, καθώς το υγρό θα απελευθερώνεται με αργό ρυθμό, και μικρότερος στις μεγάλες επιφάνειες ρηγματος. Ο τρόπος που γίνεται αυτό ωφείλεται στον αριθμό φ.

ΜΕΓΕΘΟΣ LNG ΛΙΜΝΗΣ

Η λίμνη που σχηματίζεται μετά τη διαρροή του LNG στο νερό είναι ημικυκλικής μορφής με κέντρο το σημείο της διαρροής. Εξαρτάται από τις διαστάσεις της δεξαμενής, τον όγκο του υγρού φορτίου που απελευθερώνεται αλλά κυριότερα εξαρτάται από το μέγεθος του ρήγματος με τον τρόπο που φαίνεται στη συνέχεια:



Σχήμα 46. Εξάρτηση μεγέθους λίμνης από το μέγεθος του ρήγματος

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το ότι ολόκληρο το φαινόμενο της διαρροής εξαρτάται από την τιμή του αριθμού φ. Συνεπώς για μικρές τιμές της διαμέτρου ο αριθμός φ είναι αρκετά μεγάλος και σύμφωνα με το μοντέλο του Fay το LNG απελευθερώνεται αργά από το ρήγμα με αποτέλεσμα η ποσότητα που διαρρέει να σχηματίζει λίμνη μικρής διαμέτρου συγκριτικά με μεγάλα ρήγματα όπου το φορτίο απελευθερώνεται σχεδόν ακαριαία.

Έτσι στην περίπτωση μας βλέπουμε μια σταδιακή αύξηση της ακτίνας της λίμνης μέχρι τη διάμετρο των 5m περίπου, όπου ο αριθμός φ είναι αρχικά μεγάλος και ελαττώνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος, έως ότου φτάσει σε ένα σημείο στο οποίο η διάμετρος της λίμνης έχει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει για το συγκεκριμένο παράδειγμα. Στο σημείο εκείνο η τιμή του αριθμού φ γίνεται αρκετά μικρότερη του 1 (έχει προηγηθεί σχετική επεξήγηση) αλλάζοντας έτσι τον μηχανισμό της διαρροής και κατά συνέπεια τα χαρακτηριστικά της διαρροής (όπως η ακτίνα της λίμνης). Η διαρροή γίνεται πιο βίαια και πιο απότομη με συνέπεια να προκύπτουν

μεν μεγάλες τιμές της ακτίνας άλλα όχι μέγιστες, σύμφωνα πάντα με το μοντέλο υπολογισμών μας.

10. ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Μελέτες σχετικά με διαρροές υγροποιημένου φυσικού αερίου από ένα υγραεριοφόρο έχουν γίνει αρκετές, οι οποίες εξετάζουν διάφορα δεδομένα και στη συνέχεια αναλύουν τα εκάστοτε αποτελέσματα. Μεταξύ των αποτελεσμάτων αυτών υπάρχουν αρκετές διαφορές, λόγω κυρίως των διαφορετικών αρχικών συνθηκών που επεξεργάζεται η κάθε μελέτη αλλά και λόγω της διαφορετικής μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται. Οι αποκλίσεις αυτές κυμαίνονται μέσα σε ένα μεγάλο εύρος και μπορούν να είναι από σχεδόν ανύπαρκτές έως πάρα πολύ μεγάλες.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό μοντέλο που περιγράψαμε προηγουμένως, με το οποίο έγιναν και οι εφαρμογές στις διάφορες περιοχές, συγκρίνουμε τα αποτελέσματα ορισμένων μελετών με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο αυτό, θέτοντας ως αρχικές συνθήκες τα δεδομένα της μελέτης που συγκρίνεται κάθε φορά.

Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο τεύχος, οι αρχικές μελέτες σχετικά με τη διαδικασία της απελευθέρωσης LNG φορτίου από μια δεξαμενή στη θάλασσα, ήταν τέσσερις (4). Πάνω σε αυτές βασίστηκαν και οι επόμενες μελέτες που ακολούθησαν. Οι τέσσερις αυτές μελέτες είναι:

- Fay
- Vallejo
- Quest
- Lehr

Λόγω του ότι το μοντέλο μας είναι βασισμένο, στο μεγαλύτερο μέρος του, στη μελέτη του Fay, οι συγκρίσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια γίνονται με τα υπόλοιπα τρία (3) μοντέλα με τα οποία συγκρίνονται κάθε φορά τα αντίστοιχα αποτελέσματα ενώ υπολογίζεται και το ποσοστό που διαφέρει το νέο αποτέλεσμα ως προς το ποσοστό της αρχικής μελέτης.

VALLEJO

Στη μελέτη του Vallejo εξετάζονται τα αποτελέσματα τόσο στη περίπτωση που υπάρχει ανάφλεξη και πυρκαγιά λίμνης όσο και στη αντίθετη περίπτωση όπου το LNG σύννεφο που σχηματίζεται ταξιδεύει με τη βοήθεια του ανέμου. Τα ρήγματα που μελετώνται είναι ενός (1) και πέντε (5) μέτρων και στις δυο παραπάνω περιπτώσεις.

Στο ενδεχόμενο που δεν εμφανίζεται πυρκαγιά, υπολογίζονται οι αποστάσεις μέχρι το LFL πέραν του οποίου το εύφλεκτο LNG σύννεφο που έχει φτάσει μέχρι εκεί παύει να αποτελεί κίνδυνο, καθώς δεν είναι πλέον ικανό να αναφλεγεί. Η ταχύτητα του ανέμου και η ατμοσφαιρική σταθερότητα φαίνονται στην αντίστοιχη στήλη, όπως και οι αποστάσεις που αναφέρθηκαν.

Πίνακας 30. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ του μοντέλου υπολογισμού μας και του Koopman.

		Χωρίς ανάφλεξη		
Διάμετρος	**Ατμοσφαιρική**	**Απόσταση έως**	**Απόσταση έως**	**Διαφορα**

Ρήγματος (m)	Κατάσταση	Το LFL σε m (Vallejo)	Το LFL σε m (model)	(%)
1	D-5	1126	1055	-6,3
5	D-5	2414	1790	-25,8
5	F-2	4506	4006	-11,1

Όπως προκύπτει από τη σύγκριση των δυο τρόπων υπολογισμού των συνεπειών, φαίνεται ότι υπάρχει μια απόκλιση στις τιμές τους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο δίνουν τιμές μικρότερες από τις αρχικά υπολογισμένες ενώ το ποσοστό αυτής της διαφοράς μεταβάλλεται. Με εξαίρεση την περίπτωση όπου το ρήγμα είναι 5 μέτρα και η ατμοσφαιρική κατάσταση D – 5, στην οποία παρουσιάζεται σημαντική απόκλιση (25,8%), οι τιμές βρίσκονται σε συγκρίσιμα επίπεδα.

Στη περίπτωση της ανάφλεξης η καύση της LNG λίμνης εκλύει μεγάλη ποσότητα ενέργειας ενώ αναλύονται μόνο ρήγματα κυκλικής μορφής, διαμέτρου πέντε (5) μέτρων. Η ροή της θερμικής ακτινοβολίας ελέγχεται για τις τιμές των 5 και 22 kW/m^2. Οι συγκεκριμένες επιλέχτηκαν καθώς η έκθεση σε αυτές αποτελεί την αρχή για σοβαρές βλάβες στον άνθρωπο και σε κατασκευές. Έτσι στα 5 kW/m^2 μπορεί να προκληθούν εγκαύματα 2^{ου} βαθμού στον άνθρωπο ενώ στα 22 kW/m^2 μπορεί να αναφλεγεί εφημερίδα αν εκτεθεί για μερικά μόνο δευτερόλεπτα.

Πίνακας 31. Σύγκριση αποτελεσμάτων Fay και Quest.

Διάμετρος Ρήγματος (m)	Ροή θερμικής Ακτινοβολίας (kW/m^2)	Με ανάφλεξη Απόσταση έως Θερμ. Ακτιν. Σε m (Vallejo)	Απόσταση έως Θερμ. Ακτιν. Σε m (model)	Διαφορα (%)
5	5	1287	2040	+58,508
5	22	660	973	+47,424

Αντίθετα με το ενδεχόμενο της απουσίας πυρκαγιάς, οι τιμές που υπολογίζονται εδώ έχουν αρκετά σημαντική απόκλιση από τις αρχικές τιμές της μελέτης του Koopman ως προς το ποσοστό της διαφοράς. Στους υπολογισμούς αυτούς, όμως, οι τιμές που προκύπτουν από τη χρήση του μοντέλου μας είναι μεγαλύτερες, τη στιγμή που στη προηγούμενη περίπτωση ήταν μικρότερες. Αυτό συμβαίνει λόγω των πολλών διαφορών μεταξύ των μοντέλων υπολογισμού, καθώς οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κάθε φορά είναι αρκετά περίπλοκοι. Φαίνεται συνεπώς πως ο κίνδυνος που αντιμετωπίζουμε βάση των υπολογισμών μας στη περίπτωση εμφάνισης πυρκαγιάς παρουσιάζεται μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του Quest (μεγαλύτερη απόσταση για συγκεκριμένα επίπεδα ακτινοβολίας), και μικρότερος στη περίπτωση μη εμφάνισης πυρκαγιάς (απόσταση έως το LFL).

QUEST

Το ρήγμα, από το οποίο διαρρέει το υγρό φορτίο από τη δεξαμενή στο μοντέλο του Quest, έχει κυκλική μορφή και διάμετρο πέντε (5) μέτρων. Ο Quest είναι ο μόνος που στη μελέτη του εξετάζει την επίδραση των κυματισμών στο μέγεθος της λίμνης. Σύμφωνα με αυτόν, η ύπαρξη θαλάσσιων κυματισμών οδηγεί στην γρήγορη εξάπλωση της λίμνης και λόγω της αναταραχής που προκαλούν, επιταχύνεται ο ρυθμός εξάτμισης της λίμνης με αποτέλεσμα να μειώνεται αισθητά η μέγιστη τιμή της διαμέτρου της λίμνης. Παρόλα αυτά η εξέταση τις επίδρασης των κυμάτων είναι πολύ περίπλοκη και για αυτό δεν έχουμε άλλα δεδομένα τόσο από τον Quest όσο και από τους υπόλοιπους. Θεωρείται ότι υπάρχει πηγή ανάφλεξης και συνεπώς υπολογίζεται η απόσταση για επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας 5kW/m^2 καθώς και ο χρόνος που διαρκεί η καύση της λίμνης.

Πίνακας 32. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ του μοντέλου υπολογισμού μας και του Quest.

	Quest	model	Διαφορά (%)
Διάμετρος Ρήγματος (m)	**5**	**5**	**-**
Όγκος υγρού που διέρρευσε	**12500**	**12500**	**-**
Διάμετρος λίμνης (χωρίς κυματισμούς)	**253**	**238**	**-5,929**
Διάμετρος λίμνης (με κυματισμούς)	**55**	**-**	**-**
Dist. Έως 5kW/m^2 (για D λίμνης 55m)	**493**	**353**	**-28,398**
Διάρκεια καύσης	**28,6**	**2,8**	**-90,210**

Θέτοντας στο μοντέλο μας ως δεδομένα τη διάμετρο του ρήγματος, ίση με πέντε μέτρα, και τον συνολικό όγκο του υγρού που χάθηκε, ίσο με 12,500 m^3, βρίσκουμε τη διάμετρο της λίμνης να είναι αρκετά κοντά στη αρχική τιμή του Quest. Αυτό παρατηρείται στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν κυματισμοί, διότι στο αντίθετο ενδεχόμενο, όπου θεωρούμε ότι η θαλάσσια αναταραχή υπάρχει και επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της διαρροής, βλέπουμε ότι το μοντέλο μας δεν μπορεί να υπολογίσει τη διάμετρο της λίμνης, καθώς θεωρεί ήρεμη θάλασσα και συνεπώς δεν μπορεί να γίνει σύγκριση.

Σχετικά με την απόσταση που φτάνει η ανωτέρω ακτινοβολία, παρατηρούμε σημαντική απόκλιση, η οποία γίνεται ακόμα μεγαλύτερη στη σύγκριση του χρόνου που χρειάζεται η λίμνη για να καεί. Η σύγκριση για την ακτινοβολία έχει γίνει θεωρώντας στους υπολογισμούς του μοντέλου μας ότι η διάμετρο της λίμνης είναι 55 μέτρα, ίση δηλαδή με τη διάμετρο που αναφέρει ο Quest στη περίπτωση κυματισμών. Αυτό γίνεται ώστε τα αρχικά δεδομένα να είναι τα ίδια και τα αποτελέσματα να γίνουν συγκρίσιμα με σκοπό να μπορέσουμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα. Όσον αναφορά τη διάρκεια της καύσης, η τόσο μεγάλη διαφορά οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο που προσεγγίζεται η ροή του υγρού από το ρήγμα από το κάθε μοντέλο. Υπάρχουν πολλές διαφορές τόσο στο ρυθμό απελευθέρωσης όσο και στο τρόπο εξάπλωσης πάνω στο νερό (λόγω κυματισμών).

LEHR

Ο Lehr είναι ο μοναδικός από όλους τους παραπάνω που έχει θεωρήσει στη μελέτη του τόσο μικρή ποσότητα υγρού που διαρρέει. Θεωρεί ότι ο όγκος του υγροποιημένου φυσικού αερίου

που απελευθερώνεται καταλαμβάνει όγκο ίσο με 500 m^3, τη στιγμή που στις προηγούμενες μελέτες ο όγκος αυτός κυμαίνεται περίπου στα 13,000 m^3. Είναι προφανές λοιπόν, ότι η αποκλίσεις που θα εμφανιστούν θα έχουν αρκετά μεγάλο μέγεθος καθώς μια διαρροή τόσο μικρής ποσότητας, συγκριτικά με τη ποσότητα που θεωρούν οι υπόλοιποι, έχει πολλές ιδιαιτερότητες και διαφορετικά χαρακτηριστικά τόσο στο ρυθμό διάδοσης όσο και στην εξάπλωση της.

Πίνακας 33. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ του μοντέλου υπολογισμού μας και του Lehr.

	Lehr	**model**	**Διαφορά (%)**
Διάμετρος Ρήγματος (m)	**1**	**1**	**-**
Όγκος υγρού που διέρρευσε	**500**	**500**	**-**
Απόσταση Έως 5kW/m^2 (για D λίμνης 55m)	**500**	**1588**	**+217,6**
Διάρκεια καύσης	**2,5**	**4,78**	**+91,2**

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, γίνεται αντιληπτό ότι η διαφορά στη ποσότητα του όγκου είναι κάτι πολύ βασικό στην περεταίρω συγκριτική ανάλυση των μοντέλων. Η διαφορά στη απόσταση που φτάνει η ακτινοβολία επιπέδου των 5kW/m^2 είναι της τάξης του 200% ενώ στη διάρκεια καύσης 90%. Προφανώς, ο τρόπος που επεξεργάζονται τα μοντέλα τις αρχικές συνθήκες (όπως ο όγκος διαρροής και οι διαστάσεις της δεξαμενής) διαφέρει αρκετά, με αποτέλεσμα διαφορές στα αρχικά δεδομένα να οδηγούν σε μεγάλες αποκλίσεις.

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 υποθέσει 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.

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.

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.
- 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 Respons".
- 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.
- 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.
- 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".

- 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.