

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**Αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου
από πυροθερμικά φορτία**

Πασπαλάς Γεώργιος 2652

Επιβλέπων Καθηγητής: Σκόδρας Γεώργιος

Κοζάνη, Οκτώβριος 2024

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**Αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου
από πυροθερμικά φορτία**

Πασπαλάς Γεώργιος 2652

Επιβλέπων Καθηγητής: Σκόδρας Γεώργιος

Κοζάνη, Οκτώβριος 2024

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τις αποστάσεις ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται για τις δεξαμενές υγραερίου από πυροθερμικά φορτία, καθώς και τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής Οδηγίας 2014/68/ΕΕ. Η μελέτη επικεντρώνεται στις υπέργειες, απροστάτευτες δεξαμενές υγραερίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγραερίου σε βιομηχανικές, επαγγελματικές και οικιακές εφαρμογές.

Αρχικά, η εργασία παρουσιάζει τη σχετική νομοθεσία και τα βασικά σημεία της Οδηγίας 2014/68/ΕΕ, η οποία καλύπτει τον εξοπλισμό υπό πίεση. Αναλύονται οι διαδικασίες συμμόρφωσης που απαιτούνται για τις δεξαμενές υγραερίου, καθώς και οι απαιτήσεις για τα υλικά και τον σχεδιασμό τους. Στη συνέχεια, γίνεται μια ανασκόπηση των ιδιοτήτων των υγραερίων, με έμφαση στο προπάνιο, το οποίο θεωρείται το πιο αντιπροσωπευτικό υγραέριο για την εργασία λόγω των υψηλότερων πιέσεων που αναπτύσσει.

Η εργασία εξετάζει επίσης την κατασκευή και τον εξοπλισμό των δεξαμενών υγραερίου, δίνοντας έμφαση στις απαιτήσεις για την κατασκευή τους, σύμφωνα με τα εναρμονισμένα ευρωπαϊκά πρότυπα. Αναλύονται οι αποστάσεις ασφαλείας που απαιτούνται από διάφορους κανονισμούς, όπως ο ελληνικός, ο βρετανικός, ο ιταλικός, ο γαλλικός και ο αμερικάνικος, καθώς και οι πρόνοιες του γερμανικού κανονισμού TRBS 3146. Από την ανάλυση προκύπτει ότι ο γερμανικός κανονισμός είναι ο μόνος ο οποίος συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής οδηγίας και επομένως αποτελεί την βάση πάνω στην οποία θα στηριχθεί η μελέτη της διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια, προτείνονται αποστάσεις ασφαλείας για υπέργειες απροστάτευτες δεξαμενές. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την ανάπτυξη ενός απλού υπολογιστικού μοντέλου που βασίζεται σε ισοζύγιο ενέργειας και στη μετάδοση θερμότητας για τον προσδιορισμό των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας.

Συνοψίζοντας, η εργασία προσφέρει μια ολοκληρωμένη ανάλυση και προτάσεις για τη βελτίωση των κανονισμών ασφαλείας των δεξαμενών υγραερίου στην Ελλάδα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ευρωπαϊκές όσο και τις ελληνικές νομοθετικές απαιτήσεις.

Abstract

The present thesis examines the safety distances required for Liquefied Petroleum Gas (LPG) tanks from thermal radiation loads, as well as compliance with the requirements of the European Directive 2014/68/EU. The study focuses on above-ground, unprotected LPG tanks, which are used for storing LPG in industrial, commercial, and domestic applications.

To begin with, the thesis presents the relevant legislation and the key points of Directive 2014/68/EU, which covers pressure equipment. It analyzes the conformity procedures required for LPG tanks, as well as the material and design requirements. Subsequently, a review of LPG properties is conducted, with an emphasis on propane, which is considered the most representative LPG for the study due to the higher pressures it develops.

Moreover, the thesis addresses the construction and equipment of LPG tanks, focusing on the requirements for their construction according to harmonized European standards. It analyzes the safety distances required by various regulations, such as the Greek, British, French, and American regulation, as well as the provisions of German Regulation TRBS 3146. The analysis shows that the German regulation is the only one that complies with the requirements of the European Directive 2014/68/EU and therefore constitutes the basis on which the thesis will be based.

Furthermore, safety distances are proposed for unprotected above-ground tanks. The study concludes with the development of a simple calculation model based on energy balances and heat transfer for determining the minimum safety distances.

In summary, the thesis provides a comprehensive analysis and recommendations for improving the safety regulations of LPG tanks in Greece, taking into account both European and Greek legislative requirements.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σκόδρα, αρχικά για την εμπιστοσύνη του ως προς την διεκπεραίωση της εργασίας, για την καθοδήγηση που μου παρείχε, αλλά και την πολύ μεγάλη και άμεση βοήθεια του σε όποια δυσκολία ή απορία ανέκυπτε, καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, όπως επίσης και τους Καθηγητές μου κ. Στέφανο Γεράρδη και κ. Αλκιβιάδη Τσάμη.

Οφείλω επίσης ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, η οποία με στηρίζει αδιάκοπα και ανιδιοτελώς με όλες τις δυνάμεις σε όλα τα βήματα που ακολουθώ, παρέχοντας μου, πλην της οικονομικής, μεγάλη ηθική συμπαράσταση. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους μου τους φίλους, συμφοιτητές και καθηγητές για την βοήθεια, την υποστήριξη και τις εμπειρίες που μοιραστήκαμε.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
1. Εισαγωγή.....	10
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	10
1.2 Βήματα επίτευξης του στόχου.....	11
2. Η Οδηγία 2014/68/ΕΕ	12
2.1 Γενικά.....	12
2.2 Πεδίο εφαρμογής.....	12
2.3 Εφαρμογή της Οδηγίας	15
2.4 Τεκμηρίωση	16
2.5 Βασικές απαιτήσεις ασφαλείας	16
2.5.1 Γενικά	16
2.5.2 Υλικά	17
2.5.3 Ειδικές ποσοτικές απαιτήσεις	17
2.5.4 Σχεδιασμός.....	21
2.5.5 Παραγωγή/κατασκευή	23
2.6 Διαδικασίες αξιολόγησης της συμμόρφωσης.....	23
2.7 Επιλογή της διαδικασίας αξιολόγησης της συμμόρφωσης	24
3. Ιδιότητες των υγραερίων	25
3.1 Γενικά.....	25
3.2 Επιλογή του αντιπροσωπευτικού για την εργασία υγραερίου.....	27
3.3 Ιδιότητες του προπανίου	27
3.4 Η καμπύλη πίεσης-θερμοκρασίας.....	27
3.5 Λοιπές φυσικές ιδιότητες	29
3.6 Ταξινόμηση των καυσίμων αερίων με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 437	29
4. Δεξαμενές υγραερίου	31
4.1 Κατασκευή των δεξαμενών.....	31

4.2 Εξοπλισμός των δεξαμενών	32
4.3 Βαθμός πλήρωσης των δεξαμενών υγραερίου	34
4.4 Εξαερίωση του υγραερίου.....	34
4.5 Εγκατάσταση των δεξαμενών υγραερίου.....	37
5. Κατασκευή των δεξαμενών υγραερίου	38
5.1 Χρησιμοποιούμενοι χάλυβες.....	38
5.2 Υπολογισμοί παχών των κυλινδρικών περιβλημάτων	40
6. Αποστάσεις ασφαλείας για δεξαμενές υγραερίου σύμφωνα με ισχύοντες κανονισμούς	42
6.1 Γενικά.....	42
6.2 Οι ελληνικοί κανονισμοί.....	42
6.3 Ο βρετανικός κανονισμός	43
6.4 Ο γαλλικός κανονισμός.....	44
6.5 Ο ιταλικός κανονισμός.....	44
6.6 Ο αμερικανικός κανονισμός.....	45
6.7 Ο οδηγός καλής πρακτικής της WLPGA.....	45
6.8 Ο γερμανικός κανονισμός.....	45
6.8 Επιλογή της μεθόδου υπολογισμού των αποστάσεων ασφαλείας.....	47
7. Πρόνοιες του Κανονισμού TRBS 3146.....	48
7.1 Γενικά.....	48
7.2 Διαστασιολόγηση των βαλβίδων ασφαλείας.....	49
7.3 Καθορισμός των αποστάσεων ασφαλείας σταθερών δοχείων από πυροθερμικά φορτία	51
7.4 Καθορισμός των αποστάσεων ασφαλείας για δεξαμενές υγραερίου κατά DVFG-TRF.....	55
8. Καθορισμός των αποστάσεων ασφαλείας στην Ελλάδα με βάση τις πρόνοιες του Κανονισμού TRBS 3146.....	57
8.1 Γενικά.....	57
8.2 Επίδραση της μεταβολής της πίεσης ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας	57
8.3 Προσδιορισμός των μέγιστων επιτρεπόμενων θερμοκρασιών των χαλύβων	58
9. Αποστάσεις ασφαλείας προστατευμένων δεξαμενών υγραερίου	60
9.1 Γενικά.....	60
9.2 Προστατευτικός τοίχος έναντι πυροθερμικού φορτίου	60
9.3 Μόνωση πυροπροστασίας.....	61

9.4 Διαβροχή με νερό ή πλημμυρισμός με νερό	61
9.5 Υπόγειες και επιχωματωμένες δεξαμενές	62
9.6 Ημιυπόγειες και ημιεπιχωματωμένες δεξαμενές.....	62
10. Προτάσεις.....	62
11. Υπολογιστικό μοντέλο	63
11.1 Γενικά.....	63
11.2 Ισοζύγιο ενέργειας	63
11.3 Μετάδοση θερμότητας.....	64
11.3.1 Αγωγή.....	64
11.3.2 Συναγωγή.....	64
11.3.3 Ακτινοβολία.....	66
11.4 Παραδοχές.....	69
11.5 Εξεταζόμενο παράδειγμα εφαρμογής.....	70
11.6 Συγκρίσεις με την επίλυση της επιλεγμένης μεθόδου	74
Βιβλιογραφία.....	74

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Οι δεξαμενές υγραερίου, εικόνα 1.1, χρησιμοποιούνται στην αποθήκευση ποσοτήτων υγραερίου, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για καύση σε βιομηχανικές, επαγγελματικές και οικιακές συσκευές.



Εικόνα 1.1 Παράδειγμα υπέργειας δεξαμενής υγραερίου [31]

Οι δεξαμενές υγραερίου βρίσκονται σε αλληλεξάρτηση λειτουργίας, και επομένως ασφαλείας όσον αφορά τον κίνδυνο πυρκαγιάς, με γειτονικά κτίρια, μονάδες παραγωγής, εργαστήρια και λοιπά στοιχεία, συνεργαζόμενα (π.χ. συστήματα εξαερισμών) ή μη με αυτές, (π.χ. συστήματα αποθήκευσης άλλων μέσων) καθώς και με τα βυτία ανεφοδιασμού τους.

Οι δεξαμενές υγραερίου υπάγονται στο πεδίο εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τον εξοπλισμό υπό πίεση 2014/68/EE [1].

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να προσδιορισθούν οι ελάχιστες αναγκαίες αποστάσεις κυρίως των υπέργειων απροστάτευτων δεξαμενών υγραερίου από τα προαναφερόμενα στοιχεία, για την περίπτωση στην οποία τα στοιχεία αυτά καίγονται και τα εκπεμπόμενα από αυτά πυροθερμικά φορτία εν δυνάμει μπορούν να οδηγήσουν στην αστοχία των δεξαμενών, λόγω θέρμανσης των τοιχωμάτων τους και άρα απομείωσης κάτω από την αναγκαία τιμή της χαρακτηριστικής τιμής αντοχής (ανώτερο όριο διαρροής R_{eH} ή συμβατικό όριο διαρροής $R_{p0.2}$) του χάλυβα κατασκευής τους. Ο προσδιορισμός πρέπει να είναι συμβατός με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2014/68/EE. Μάλιστα, αφορά δεξαμενές υγραερίου οι οποίες πρόκειται να εγκατασταθούν στην Ελλάδα, οπότε πρέπει να ικανοποιούν επιπλέον τις απαιτήσεις της ελληνικής νομοθεσίας.

Επειδή οι δεξαμενές αποθήκευσης υγραερίου μπορούν βέβαια να εγκαθίστανται

- υπέργειες, απροστάτευτες ή προστατευμένες έναντι πυροθερμικών φορτίων,
- υπόγειες (θαμμένες),

- επιχωματωμένες ή
 - ημιεπιχωματωμένες,
- θα εξετασθούν ακόμη οι αποστάσεις ασφαλείας για τις υπόλοιπες περιπτώσεις εγκατάστασης, πέρα από τις απροστάτευτες υπέργειες δεξαμενές.

1.2 Βήματα επίτευξης του στόχου

Για τον προσδιορισμό των ελάχιστων αναγκαίων αποστάσεων των υπέργειων απροστάτευτων δεξαμενών υγραερίου από τα εν δυνάμει πυροθερμικά φορτία θα ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Ανάλυση του αντικειμένου και των απαιτήσεων της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2014/68/ΕΕ, ειδικά όσον αφορά τις δεξαμενές υγραερίου.
- Παρουσίαση των υγραερίων τα οποία χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα και των ιδιοτήτων τους, επιλογή του κατάλληλου υγραερίου για την επίτευξη του στόχου και ανάλυση των σχετικών με το πρόβλημα ιδιοτήτων του.
- Παρουσίαση των απαιτήσεων των ελληνικών κανονισμών για την κατασκευή και τον εξοπλισμό καθώς και των δυνατοτήτων εγκατάστασης των δεξαμενών υγραερίου.
- Επιλογή των χαλύβων οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην Ελλάδα στην κατασκευή δεξαμενών υγραερίου με βάση την ελληνική τεχνική νομοθεσία. Ανάλυση των ιδιοτήτων των χαλύβων. Υπολογισμός του πάχους δεξαμενών υγραερίου σε συμφωνία με την Οδηγία 2014/68/ΕΕ.
- Έρευνα του τρόπου καθορισμού των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου από ευρωπαϊκούς, διεθνείς κανονισμούς ή πρότυπα, καθώς και από εθνικούς κανονισμούς ή πρότυπα της Ελλάδας, άλλων κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και άλλων κρατών. Επιλογή του κατάλληλου τρόπου για την επίτευξη του στόχου της διπλωματικής εργασίας, συμβατού με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2014/68/ΕΕ.
- Ανάλυση της επιλεγμένης μεθόδου καθορισμού των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου από πυροθερμικά φορτία. Σύγκριση με την εφαρμογή της μεθόδου από άλλα κράτη.
- Προσδιορισμός των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας υπέργειων δεξαμενών υγραερίου από πυροθερμικά φορτία με εφαρμογή της επιλεγμένης μεθόδου, σε συμφωνία τις ιδιαίτερες απαιτήσεις που ισχύουν στην Ελλάδα.
- Προσδιορισμός των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου για τους λοιπούς τρόπους εγκατάστασής τους.
- Πρόταση καθορισμού των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου σε αναθεώρηση των ελληνικών κανονισμών.

Ακόμη, θα αναπτυχθεί ένα απλό μοντέλο υπολογισμού των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας των δεξαμενών βασισμένο σε ισοζύγιο ενέργειας και στη μετάδοση θερμότητας. Το μοντέλο θα εφαρμοσθεί σε μια επιλεγμένη περίπτωση και το αποτέλεσμα της εφαρμογής θα συγκριθεί με την επίλυση της επιλεγμένης μεθόδου.

2. Η Οδηγία 2014/68/ΕΕ

2.1 Γενικά

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα δοχεία υπό πίεση περιλαμβάνει ουσιαστικά τις τρεις Οδηγίες, — την Οδηγία 2014/68/ΕΕ σχετικά με τον εξοπλισμό υπό πίεση [1], — την Οδηγία 2010/35/ΕΕ σχετικά με τον μεταφερόμενο εξοπλισμό υπό πίεση [2] και — την Οδηγία 2014/29/ΕΕ σχετικά με τα απλά δοχεία πίεσης [3].

Θα παρουσιάσουμε σε συντομία μόνο την Οδηγία 2014/68/ΕΕ, στο πεδίο εφαρμογής της οποίας υπάγεται το αντικείμενό μας.

Η εφαρμογή των Οδηγιών μπορεί να γίνει

- είτε μέσω εναρμονισμένων προτύπων,
- είτε με άμεση εφαρμογή τους, η οποία, όμως, απαιτεί μετρήσεις για κατασκευή ειδικού εξοπλισμού, συμβαίνει σπάνια και είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα.

Τα εναρμονισμένα πρότυπα συντάσσονται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN), η εφαρμογή των οποίων δεν είναι υποχρεωτική. Η εφαρμογή των εναρμονισμένων προτύπων προφανώς είναι ένας προσιτός τρόπος για την βεβαίωση εφαρμογής των Οδηγιών, οπότε ακολουθείται αυτή η λύση, εκτός ειδικών περιπτώσεων.

Σήμερα είναι διαθέσιμο εκτενές σύνολο εναρμονισμένων ευρωπαϊκών προτύπων, τα οποία καλύπτουν

- τα υλικά,
- τον σχεδιασμό και τον υπολογισμό,
- την κατασκευή,
- τις επιθεωρήσεις και δοκιμές.

Τα βασικά εναρμονισμένα πρότυπα τα οποία αφορούν τα δοχεία υπό πίεση είναι

- τα πρότυπα της σειράς ΕΛΟΤ EN 13445 για τα δοχεία υπό πίεση χωρίς φλόγα [4],
- τα πρότυπα της σειράς ΕΛΟΤ EN 12953 για αεριαυλωτούς λέβητες (με υδροθάλαμο) [5],
- τα πρότυπα της σειράς ΕΛΟΤ EN 12952 για υδραυλωτούς λέβητες [6].

2.2 Πεδίο εφαρμογής

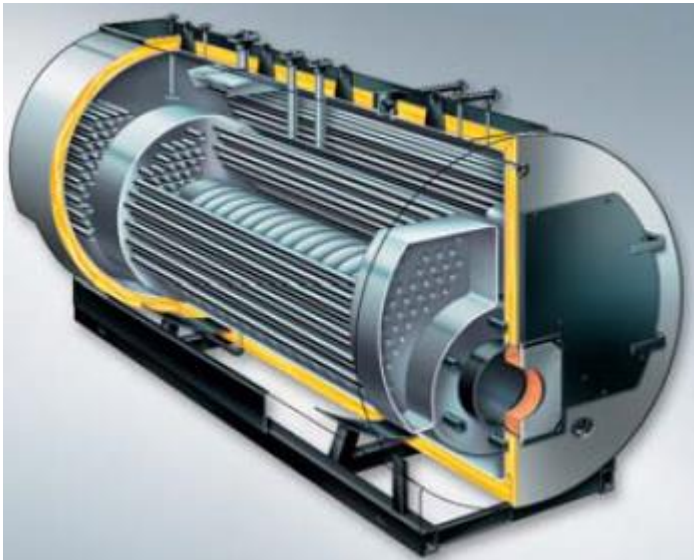
Τα δοχεία υπό πίεση, όπως οι δεξαμενές υγραερίου, ως προϊόντα ευρείας παραγωγής και χρήσης, καλύπτονται από την ευρωπαϊκή νομοθεσία και συγκεκριμένα από την Οδηγία 2014/68/ΕΕ. Η Οδηγία 2014/68/ΕΕ ονοματίζει το αντικείμενό της “εξοπλισμός υπό πίεση”, θεωρώντας τα δοχεία υπό πίεση ως μέρος του πεδίου εφαρμογής της, ενώ η Οδηγία συμπεριλαμβάνει ακόμη τις σωληνώσεις και τα αντίστοιχα εξαρτήματα (ασφαλείας,

μετρήσεων ελέγχου κλπ.).

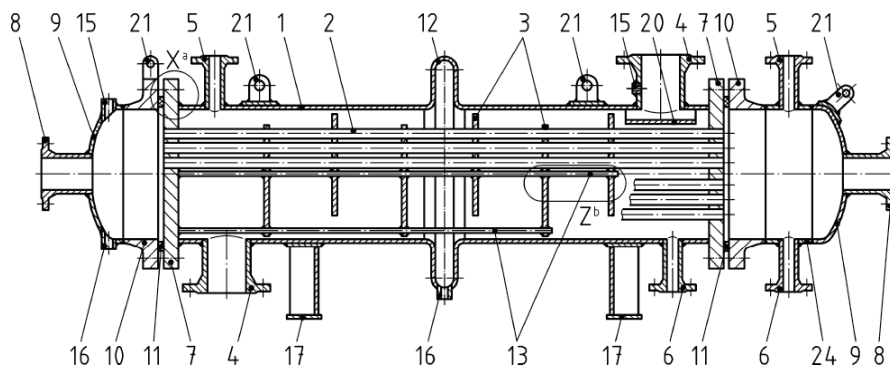
Η Οδηγία διακρίνει περαιτέρω τα δοχεία υπό πίεση σε

- δοχεία εκτεθειμένα σε φλόγα ή υποκείμενα σε θέρμανση με κίνδυνο υπερθέρμανσης και
- δοχεία μη εκτεθειμένα σε φλόγα ή μη υποκείμενα σε θέρμανση με κίνδυνο υπερθέρμανσης,

δηλαδή ουσιαστικά σε λέβητες, εικόνα 2.1, και λοιπά δοχεία, εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.1 Δοχείο εκτεθειμένο σε φλόγα - φλογαυλωτός λέβητας [7]



Εικόνα 2.2 Δοχείο μη εκτεθειμένο σε φλόγα – εναλλάκτης δέσμης σωλήνων-κελύφους [7]

Η Οδηγία συντάχθηκε για να καλύψει το ζήτημα της ασφάλειας των πολιτών όσον αφορά τους εξοπλισμούς υπό πίεση, αλλά και να προστατεύσει την ελεύθερη κυκλοφορία των προϊόντων.

Η Οδηγία 2014/68/ΕΕ εφαρμόζεται στους εξοπλισμούς υπό μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση PS μεγαλύτερη των 0,5 bar, καθώς θεωρεί ότι οι εξοπλισμοί που υπόκεινται σε πίεση μέχρι 0,5 bar δεν παρουσιάζουν ουσιαστικούς κινδύνους σχετιζόμενους με την πίεση.

Η Οδηγία καλύπτει τόσο μεμονωμένους εξοπλισμούς υπό πίεση, όσο και συγκροτήματα περισσότερων εξοπλισμών υπό πίεση, συναρμολογημένων από τον κατασκευαστή σε ενιαίο λειτουργικό σύνολο. Δεν καλύπτει, όμως, τη συναρμολόγηση εξοπλισμών υπό πίεση η οποία πραγματοποιείται στο χώρο του χρήστη (βιομηχανικές εγκαταστάσεις) και είναι υπ' ευθύνη του.

Επιπρόσθετα, εξαιρεί από το πεδίο εφαρμογής της ορισμένες εφαρμογές. Τέτοιες είναι

- οι αγωγοί για τη μεταφορά οποιουδήποτε ρευστού προς ή από (χερσαία ή θαλάσσια) εγκατάσταση (π.χ. αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου),
- οι ειδικά σχεδιασμένοι εξοπλισμοί για πυρηνικές εγκαταστάσεις,
- οι κινητήρες,
- τα θερμαντικά σώματα και οι σωλήνες των συστημάτων θέρμανσης διά θερμού ύδατος.

Η εφαρμογή της Οδηγίας 2014/68/ΕΕ οδηγεί στη σήμανση «CE» (εκτός ορισμένων οριακών περιπτώσεων). Η σήμανση «CE» συνεπάγεται τη βεβαίωση/δήλωση συμμόρφωσης των εξοπλισμών υπό πίεση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 2014/68/ΕΕ, αλλά και άλλων ενδεχομένως εφαρμοστέων Οδηγιών οι οποίες προβλέπουν τη σήμανση «CE». Η σήμανση «CE» δεν τίθεται σε εξοπλισμό υπό πίεση που παρουσιάζει αμελητέο κίνδυνο, όπως ορίζεται στην Οδηγία (πίεση PS < 0,5 bar).

Η Οδηγία καλύπτει πλήρως τους εξοπλισμούς υπό πίεση όσον αφορά

- τα υλικά,
- το σχεδιασμό και υπολογισμό,
- την κατασκευή,
- τις επιθεωρήσεις και δοκιμές.

Η Οδηγία καθορίζει βασικές απαιτήσεις ασφαλείας για τους εξοπλισμούς υπό πίεση (στο Παράρτημα Ι). Ο εξοπλισμός υπό πίεση ταξινομείται σε κατηγορίες αύξοντος κινδύνου.

Καθορίζει, επίσης, πλήρως τον τρόπο με τον οποίο κατά περίπτωση αποδεικνύεται η συμμόρφωση του εξοπλισμού υπό πίεση με τις απαιτήσεις της.

Για την απόδειξη της συμμόρφωσης, οι εξοπλισμοί υπό πίεση κατηγοριοποιούνται (άρθρο 4) σε δοχεία χωρίς ή με φλόγα, σωληνώσεις και εξαρτήματα.

Τα δοχεία κατηγοριοποιούνται περαιτέρω ανάλογα με τη φύση του ρευστού (η οποία παίζει ρόλο στον καθορισμό της πίεσης στη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας).

Η Οδηγία ταξινομεί τα ρευστά που περιέχονται στους εξοπλισμούς υπό πίεση σε επικίνδυνα και μη (άρθρο 13), ενώ ορίζει διαδικασίες αξιολόγησης της συμμόρφωσης του προϊόντος προς τις απαιτήσεις της (Παράρτημα III).

Οι διαδικασίες αξιολόγησης διακρίνονται σε 4 κατηγορίες I, II, III και IV (άρθρο 14).
Οι διαδικασίες αξιολόγησης της συμμόρφωσης καθορίζονται στο παράρτημα III.

Η κατάταξη ενός εξοπλισμού υπό πίεση σε μια κατηγορία εξαρτάται από

- το είδος του εξοπλισμού υπό πίεση,
- την σχετική φύση του ρευστού με την πίεση,
- την επικινδυνότητα του ρευστού,
- την πίεση PS,
- τον όγκο V ή αντίστοιχα την ονομαστική διάμετρο DN για σωληνώσεις,
- το γινόμενο $PS \cdot V$ ή αντίστοιχα το γινόμενο $PS \cdot DN$ για σωληνώσεις, κατά περίπτωση.

Η απόδειξη της συμμόρφωσης του προϊόντος προς τις απαιτήσεις της Οδηγίας (καθώς και της επιλογής της ενότητας αξιολόγησης της συμμόρφωσης) μπορεί να γίνει από τον κατασκευαστή, ή εντολοδόχο του κατασκευαστή εγκατεστημένο στην Ευρωπαϊκή Ένωση, αν ο κατασκευαστής δεν είναι εγκατεστημένος εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

2.3 Εφαρμογή της Οδηγίας

Η εφαρμογή της Οδηγίας μπορεί να γίνει

- είτε μέσω εναρμονισμένων προτύπων
- είτε με άμεση εφαρμογή της.

Άμεση εφαρμογή έχουμε όταν η απόδειξη ικανοποίησης των απαιτήσεων της Οδηγίας γίνεται με πειραματική μέθοδο.

Για την απόδειξη της συμμόρφωσης του προϊόντος προς τις απαιτήσεις της Οδηγίας απαιτείται η συνεργασία με έναν κοινοποιημένο οργανισμό (Notified body, άρθρο 20) σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμογής της επιλεγείσας ενότητας, εκτός από μία ενότητα (ενότητα A), η οποία καλύπτει σχετικά απλές περιπτώσεις και η απόδειξη της συμμόρφωσης μπορεί να γίνει από τον κατασκευαστή.

Κατά παρέκκλιση, μόνο για συγκεκριμένες ενότητες, η συμμόρφωση προς τις βασικές απαιτήσεις μπορεί να βεβαιωθεί, αντί από κοινοποιημένο οργανισμό, από ελεγκτική υπηρεσία των χρηστών (User inspectorate, άρθρο 25).

Στην απόδειξη της συμμόρφωσης του προϊόντος προς τις απαιτήσεις της Οδηγίας συμμετέχουν αναγνωρισμένοι τρίτοι φορείς (Recognised third-party organisation) στις

περιπτώσεις στις οποίες για την παραγωγή απαιτούνται

- εγκρίσεις των μεθόδων εργασίας και του προσωπικού (κυρίως για συγκολλήσεις) ή
- εγκρίσεις του ειδικευμένου προσωπικού το οποίο εκτελεί μη καταστρεπτικές δοκιμές των μονίμων συνδέσεων (κατηγορίες III και IV).

2.4 Τεκμηρίωση

Ο κατασκευαστής συντάσσει τεκμηρίωση (documentation), το περιεχόμενο και η έκταση της οποίας εξαρτώνται από την επιλεγόμενη ενότητα αξιολόγησης της συμμόρφωσης. Έτσι, η συνολική τεκμηρίωση μπορεί να περιέχει μόνο τεχνική τεκμηρίωση (technical documentation) ή και τεκμηρίωση του συστήματος ποιότητας, όπου η ενότητα προβλέπει τέτοιο.

Η τεχνική τεκμηρίωση πρέπει να καθιστά δυνατή την αξιολόγηση της συμμόρφωσης του εξοπλισμού προς τις απαιτήσεις της οδηγίας. Γενικά πρέπει να καλύπτει τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία του εξοπλισμού υπό πίεση και να περιέχει

- γενική περιγραφή του εξοπλισμού υπό πίεση,
- κατασκευαστικά σχέδια, καθώς και διαγράμματα κατασκευαστικών στοιχείων, υποσυγκροτημάτων, κυκλωμάτων κ.λπ.,
- τις αναγκαίες περιγραφές και επεξηγήσεις για την κατανόηση των σχεδίων και διαγραμμάτων και της λειτουργίας του εξοπλισμού υπό πίεση,
- πίνακα των εφαρμοζομένων εναρμονισμένων προτύπων ή άλλων λύσεων,
- τα αποτελέσματα των υπολογισμών σχεδιασμού, των διενεργηθέντων ελέγχων κ.λπ.,
- τις εκθέσεις δοκιμών
- τις λεπτομέρειες σχετικά με τις χρησιμοποιούμενες κατασκευαστικές και ελεγκτικές διαδικασίες, και τις εγκρίσεις του σχετικού προσωπικού, όπου προβλέπεται.

Η τεχνική τεκμηρίωση διατηρείται επί 10 έτη από την τελευταία ημερομηνία κατασκευής του εξοπλισμού υπό πίεση.

2.5 Βασικές απαιτήσεις ασφαλείας

2.5.1 Γενικά

Οι βασικές απαιτήσεις ασφαλείας της Οδηγίας δίνονται στο Παράρτημα I. Αφορούν

- τα υλικά και τις ιδιότητές τους,
- ειδικές ποσοτικές απαιτήσεις, για τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής και τους συντελεστές ασφαλείας,
- τον σχεδιασμό των προϊόντων, υπολογιστικά ή πειραματικά και
- την παραγωγή/κατασκευή των προϊόντων.

Καθορίζονται ακόμη ειδικές απαιτήσεις για

- τους λέβητες και
- τις σωληνώσεις.

Για την απόδειξη της τήρησής της, η Οδηγία 2014/68/ΕΕ καθορίζει διαδικασίες συμμόρφωσης. Η Οδηγία καθορίζει ακόμη ποιες διαδικασίες συμμόρφωσης μπορούν να εφαρμοσθούν ανάλογα με τη δεδομένη περίπτωση.

2.5.2 Υλικά

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά πρέπει να παραμένουν κατάλληλα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους, εκτός εάν προβλέπεται αντικατάσταση.

Πρέπει να είναι επαρκώς όλκιμα και σκληρά. Τα υλικά θα πρέπει γενικά να επιλέγονται έτσι ώστε να προλαμβάνεται ψαθυρή θραύση. Όταν απαιτείται η χρήση ψαθυρών υλικών, πρέπει να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα.

Πρέπει επίσης να παρουσιάζουν επαρκή χημική αντοχή έναντι του περιεχόμενου ρευστού. Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες, αναγκαίες για την ασφάλεια λειτουργίας, δεν πρέπει να αλλοιώνονται σημαντικά κατά την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

Πρέπει να μην παρουσιάζουν σημαντικές αλλοιώσεις λόγω γήρανσης, να επιδέχονται τις προβλεπόμενες κατεργασίες και να επιλέγονται έτσι ώστε να μην προκαλούνται σημαντικές αρνητικές επιδράσεις στην περίπτωση σύνδεσης διαφορετικών υλικών.

Η καταλληλότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών αποδεικνύεται με τη χρησιμοποίηση υλικών τα οποία

- είτε ικανοποιούν εναρμονισμένα πρότυπα,
- είτε έχουν λάβει ευρωπαϊκή έγκριση υλικών (άρθρο 15),
- είτε έχουν υποστεί ειδική αξιολόγηση (από αναγνωρισμένο τρίτο φορέα).

2.5.3 Ειδικές ποσοτικές απαιτήσεις

Ο ειδικές ποσοτικές απαιτήσεις αφορούν

- τους συντελεστές ασφαλείας για τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής (επιτρεπόμενες καταπονήσεις) των υλικών
- τους συντελεστές σύνδεσης (συντελεστές συγκολλητικών ραφών),
- την πίεση απόκρισης των ασφαλιστικών,
- την πίεση υδραυλικής δοκιμής,
- την ελάχιστη επιμήκυνση θραύσης και
- την ελάχιστη ενέργεια θραύσης σε κρουστική δοκιμή.

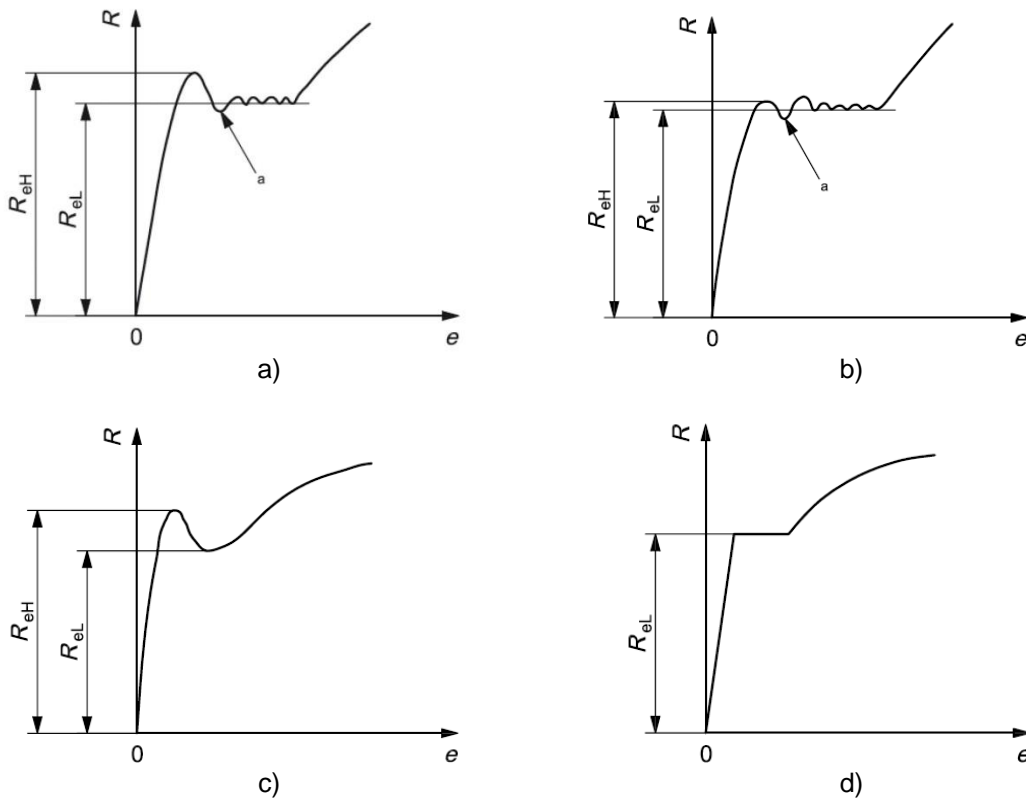
2.5.3.1 Επιτρεπόμενες καταπονήσεις

Η Οδηγία δίνει σύμβολα και ορισμούς των χαρακτηριστικών τιμών αντοχής. Ορίζονται:

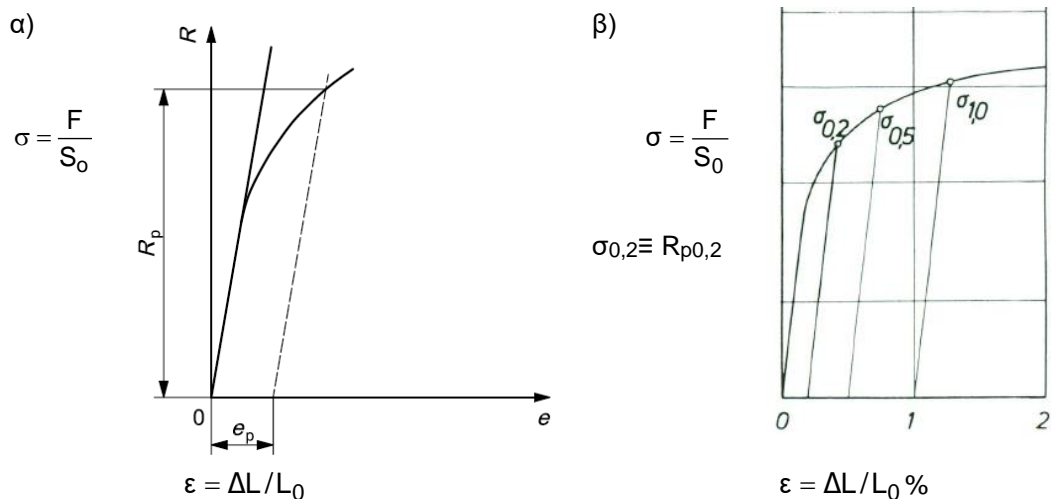
- $R_{e/t}$: Το όριο διαρροής στη θερμοκρασία υπολογισμού, ανάλογα με την περίπτωση:
— το ανώτατο όριο διαρροής για υλικό, το οποίο έχει ανώτατο και κατώτατο όριο διαρροής, εικόνα 2.3,
— το συμβατικό όριο διαρροής 1,0 % για τον οστενιτικό χάλυβα και το μη κεκραμένο αργίλιο, εικόνα 2.4,
— το συμβατικό όριο διαρροής 0,2 % στις άλλες περιπτώσεις, εικόνα 2.4.

$R_{m/20}$: Η ελάχιστη τιμή αντοχής σε εφελκυσμό σε θερμοκρασία 20°C, εικόνα 2.4.

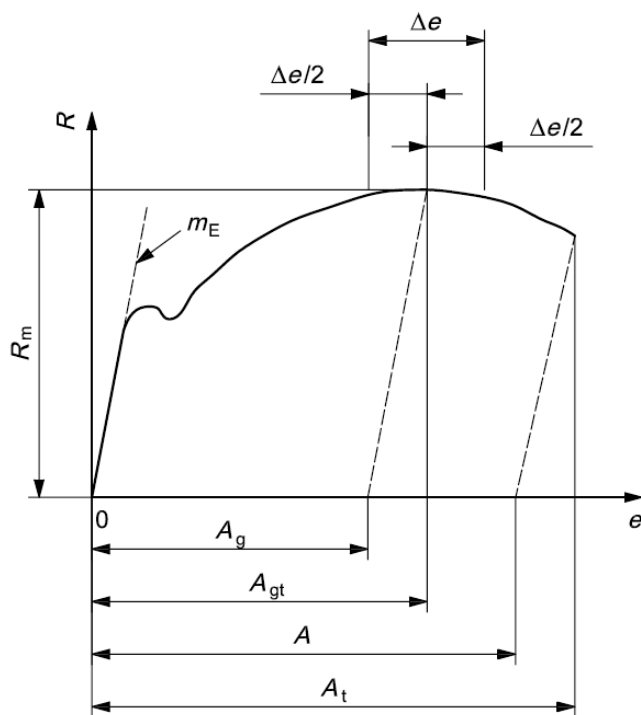
$R_{m/t}$: Η αντοχή σε εφελκυσμό στη θερμοκρασία υπολογισμού.



Εικόνα 2.3 Έννοιες του ανώτερου R_{eH} και κατώτερου R_{eL} ορίου διαρροής για διάφορες μορφές του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης [7]



Εικόνα 2.4 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για κάλυβες χωρίς σαφές όριο διαρροής [7]



Εικόνα 2.5 Η αντοχή σε εφελκυσμό R_m [7]

Η Οδηγία ορίζει ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό
 — την χρησιμοποιούμενη χαρακτηριστική τιμή αντοχής K (η οποία μπορεί να είναι κατά περίπτωση η τιμή ενός των $R_{e/t}$, $R_{m/20}$, $R_{m/t}$)
 — τον συντελεστή ασφαλείας S (οριζόμενο ως ποσοστό της χρησιμοποιούμενης χαρακτηριστικής τιμής αντοχής).

Η γενική επιτρεπόμενη τάση για φορτία κυρίως στατικά και για θερμοκρασίες που δεν δημιουργούν σημαντικά φαινόμενα ερπυσμού, δεν πρέπει να υπερβαίνει στην περίπτωση φερριτικού χάλυβα (ferritic steel), συμπεριλαμβανομένου του εξομαλυσμένου (normalized)

χάλυβα, (που αφορούν το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας) την κατώτερη από τις ακόλουθες τιμές: τα $2/3$ της $R_{e/t}$ ή τα $5/12$ της $R_{m/20}$ ($K = R_{e/t}$ ή $R_{m/20}$, $S = 2/3$ και αντίστοιχα $5/12$).

Σημείωση: Στα σχετικά πρότυπα υπολογισμού ο συντελεστής ασφαλείας S δίνεται όχι ως πολλαπλασιαστής $S = 2/3$, αλλά ως διαιρέτης με την αντίστροφη τιμή $S = 3/2 = 1,5$.

2.5.3.2 Συντελεστές σύνδεσης (συγκολλητικών ραφών)

Οι συγκολλητικές ραφές, ανάλογα με την ποιότητά τους, πιθανώς μειώνουν την αντοχή του τοιχώματος. Αυτό αντιμετωπίζεται υπολογιστικά με έναν συντελεστή ραφής.

Για τις συγκολλητικές ραφές ο συντελεστής ραφής v πρέπει να είναι το πολύ ίσος προς την ακόλουθη τιμή:

- Για τον εξοπλισμό που υποβάλλεται σε καταστρεπτικούς και μη ελέγχους για να διατυπωθεί ότι το σύνολο των συνδέσεων δεν παρουσιάζει σημαντικά ελαττώματα: $v = 1$,
- Για τον εξοπλισμό που υποβάλλεται δειγματοληπτικά σε μη καταστρεπτικούς ελέγχους: $v = 0,85$,
- Για τον εξοπλισμό που δεν υποβάλλεται σε μη καταστρεπτικούς ελέγχους εκτός του οπτικού ελέγχου: $v = 0,7$.

Σε αναγκαίες περιπτώσεις, πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη ο τύπος καταπόνησης και οι μηχανικές και τεχνολογικές ιδιότητες της ραφής.

2.5.3.3 Διατάξεις περιορισμού της πίεσης

Η προσωρινή υπέρβαση της πίεσης πρέπει να περιορίζεται στο 10% της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης PS . Αυτό σημαίνει ότι οι ασφαλιστικές βαλβίδες ανακούφισης πρέπει να ρυθμίζονται στην τιμή $P = 1,1 \cdot PS$.

2.5.3.4 Πίεση υδραυλικής δοκιμής

Για τα δοχεία υπό πίεση, η πίεση υδραυλικής δοκιμής πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση προς τη μεγαλύτερη από τις ακόλουθες δύο τιμές,

- την πίεση η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη φόρτιση στην οποία μπορεί να υποβληθεί ο εξοπλισμός σε λειτουργία, λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση PS και τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία TS για τον εξοπλισμό αυτό, πολλαπλασιαζόμενη επί τον συντελεστή 1,25 ή
- τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση πολλαπλασιαζόμενη επί τον συντελεστή 1,43, αναλόγως ποια τιμή είναι υψηλότερη.

2.5.3.5 Χαρακτηριστικά των υλικών

Η Οδηγία ορίζει απαιτήσεις για την ολκιμότητα του χρησιμοποιούμενου χάλυβα κατασκευής.

Οι απαιτήσεις αφορούν

- την ελάχιστη επιμήκυνση θραύσης και
- την ελάχιστη ενέργεια θραύσης σε κρουστική δοκιμή.

2.5.4 Σχεδιασμός

2.5.4.1 Γενικά

Ο εξοπλισμός υπό πίεση πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένος, ώστε να είναι ασφαλής καθ' όλη την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του.

Ο σχεδιασμός γίνεται με τους δέοντες συντελεστές ασφαλείας.

2.5.4.2 Σχεδιασμός επαρκούς αντοχής

2.5.4.2.1 Βάσεις σχεδιασμού

Ο εξοπλισμός υπό πίεση πρέπει να είναι σχεδιασμένος για φορτίσεις ανάλογες με την προβλεπόμενη χρήση του και για άλλες αναμενόμενες συνθήκες λειτουργίας. Ειδικότερα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράγοντες

- εσωτερική και εξωτερική πίεση,
- θερμοκρασίες λειτουργίας και περιβάλλοντος,
- στατική πίεση και μάζα της περιεχόμενης ουσίας σε συνθήκες λειτουργίας και δοκιμών,
- φορτίσεις από κυκλοφορία οχημάτων, ανέμου και σεισμού,
- δυνάμεις και ροπές αντιστάσεως που προκύπτουν από τα στηρίγματα, τις στερεώσεις, τις σωληνώσεις κ.λπ.,
- χημική και μηχανική διάβρωση, κόπωση κλπ.,
- αποσύνθεση ασταθών ρευστών.

Οι διάφορες φορτίσεις οι οποίες είναι δυνατόν να εκδηλωθούν συγχρόνως λαμβάνονται υπόψη σταθμίζοντας την πιθανότητα ταυτόχρονης επενέργειάς τους.

2.5.4.2.2 Μέθοδος υπολογισμού

Η μέθοδος υπολογισμού πρέπει να καλύπτει

- την αντοχή σε πίεση,
- τη δυνατότητα φόρτισης και
- τη δομική σταθερότητα του εξοπλισμού υπό πίεση.

2.5.4.2.3 Πειραματική μέθοδος σχεδιασμού

Ο ασφαλής σχεδιασμός του εξοπλισμού μπορεί να επικυρωθεί, συνολικά ή εν μέρει, από ένα πρόγραμμα δοκιμών σε αντιπροσωπευτικό δείγμα του εξοπλισμού ή μιας σειράς εξοπλισμών.

Το πρόγραμμα δοκιμών πρέπει να καθορισθεί πριν από τις δοκιμές και να γίνει δεκτό από τον κοινοποιημένο οργανισμό, όταν προβλέπεται συμμετοχή του.

2.5.4.3 Μέτρα ασφαλούς χειρισμού και λειτουργίας

Ο τρόπος λειτουργίας του εξοπλισμού υπό πίεση πρέπει να αποκλείει κάθε προβλέψιμο κίνδυνο κατά τη χρήση του.

2.5.4.4 Μέσα επιθεώρησης

Ο εξοπλισμός υπό πίεση πρέπει να είναι σχεδιασμένος και κατασκευασμένος έτσι ώστε να μπορούν να γίνονται όλες οι αναγκαίες επιθεωρήσεις για την ασφάλειά του.

2.5.4.5 Αποχέτευση και εξαέρωση

Ο σχεδιασμός του προϊόντος πρέπει να εξασφαλίζει τις δυνατότητες εκκένωσης του περιεχομένου καθώς και εξαέρωσης, δηλαδή αποβολής αέρα ο οποίος απελευθερώνεται από το περιεχόμενο του δοχείου.

2.5.4.6 Προβλέψεις για πλήρωση και εκκένωση

Ο εξοπλισμός υπό πίεση σχεδιάζεται και εφοδιάζεται με κατάλληλα εξαρτήματα, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής πλήρωση και εκκένωση για να αποφευχθούν κίνδυνοι, όπως
— κίνδυνοι από υπερπλήρωση ή από ανάπτυξη υπερπίεσης κατά την πλήρωση (π.χ. δεξαμενές υγραερίου)
— κίνδυνοι ανεξέλεγκτης διαφυγής ρευστού υπό πίεση κατά την εκκένωση.

2.5.4.7 Διάβρωση και άλλες χημικές προσβολές

Όταν απαιτείται, αυξάνεται το πάχος του υλικού ή παρέχεται κατάλληλη προστασία κατά της διάβρωσης ή άλλων χημικών προσβολών, λαμβάνοντας υπόψη την προβλεπόμενη χρήση.

Έτσι, οι εξισώσεις υπολογισμού του πάχους περιλαμβάνουν όρο προσαύξησης λόγω διάβρωσης, (σύμφωνα με τα εναρμονισμένα ευρωπαϊκά πρότυπα).

2.5.4.8 Φθορά

Όταν υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να υποστεί ο εξοπλισμός μηχανική διάβρωση ή φθορά, λαμβάνονται επαρκή μέτρα ώστε

- να μειώνονται στο ελάχιστο οι επιπτώσεις αυτές με τον κατάλληλο σχεδιασμό, π.χ. με πρόσθετο πάχος υλικού ή με τη χρήση επενδύσεων ή υλικών επικάλυψης,
- να επιδέχονται αντικατάσταση τα μέρη που προσβάλλονται περισσότερο,
- οι οδηγίες χρήσης να επιστούν την προσοχή για τα απαραίτητα μέτρα για ασφαλή χρήση του εξοπλισμού.

2.5.4.9 Προστασία έναντι της υπέρβασης των επιτρεπόμενων ορίων

Όταν ενδέχεται να σημειωθεί υπέρβαση των επιτρεπόμενων ορίων πίεσης ή θερμοκρασίας, ο εξοπλισμός υπό πίεση πρέπει να είναι εφοδιασμένος με κατάλληλες προστατευτικές διατάξεις, όπως βαλβίδες ασφαλείας.

2.5.5 Παραγωγή/κατασκευή

Η Οδηγία 2014/68/ΕΕ ορίζει απαιτήσεις για την κατασκευή/παραγωγή των εξοπλισμών υπό πίεση και για τον τελικό έλεγχο των προϊόντων.

Κατά τη διάθεσή του στην αγορά, ο εξοπλισμός υπό πίεση πρέπει να συνοδεύεται κατά περίπτωση από φυλλάδιο οδηγιών, το οποίο περιέχει όλες τις χρήσιμες πληροφορίες για τη συναρμολόγηση, τη θέση σε λειτουργία, τη χρήση και τη συντήρηση.

2.6 Διαδικασίες αξιολόγησης της συμμόρφωσης

Η Οδηγία 2014/68/ΕΕ καθορίζει πλήρως τον τρόπο με τον οποίο κατά περίπτωση αποδεικνύεται η συμμόρφωση του εξοπλισμού υπό πίεση με τις απαιτήσεις της.

Η συμμόρφωση του εξοπλισμού υπό πίεση με τις απαιτήσεις της Οδηγίας αποδεικνύεται με συγκεκριμένες διαδικασίες.

Οι διαδικασίες εφαρμόζονται τόσο στους μεμονωμένους εξοπλισμούς (δοχεία, σωληνώσεις, εξαρτήματα) όσο και στα συγκροτήματα. Καθορίζει, ακόμη, τις διαδικασίες αξιολόγησης της συμμόρφωσης του προϊόντος προς τις απαιτήσεις της στο Παράρτημα III.

Οι διαδικασίες αξιολόγησης διακρίνονται σε 4 κατηγορίες I, II, III και IV (άρθρο 14).

Η κατάταξη ενός εξοπλισμού υπό πίεση σε μια κατηγορία εξαρτάται από

- το είδος του εξοπλισμού υπό πίεση,
- τη φύση του ρευστού τη σχετική με την πίεση,
- την επικινδυνότητα του ρευστού,
- την πίεση PS,

- τον όγκο V ή αντίστοιχα την ονομαστική διάμετρο DN για σωληνώσεις,
- το γινόμενο $PS \cdot V$ ή αντίστοιχα το γινόμενο $PS \cdot DN$ για σωληνώσεις, κατά περίπτωση.

Οι διαδικασίες αξιολόγησης της συμμόρφωσης ανά κατηγορία είναι οι ακόλουθες:

α) κατηγορία I:

- ενότητα A

β) κατηγορία II:

- ενότητα A2

- ενότητα Δ1

- ενότητα E1

γ) κατηγορία III:

- ενότητες B (τύπος σχεδιασμού) + Δ

- ενότητες B (τύπος σχεδιασμού) + ΣΤ

- ενότητες B (τύπος παραγωγής) + E

- ενότητες B (τύπος παραγωγής) + Γ2

- ενότητα H

δ) κατηγορία IV:

- ενότητες B (τύπος παραγωγής) + Δ

- ενότητες B (τύπος παραγωγής) + ΣΤ

- ενότητα Z

- ενότητα H1.

Οι διαδικασίες κατάταξης ενός εξοπλισμού υπό πίεση σε μια κατηγορία περιγράφονται στο Παράρτημα II.

2.7 Επιλογή της διαδικασίας αξιολόγησης της συμμόρφωσης

Η επιλογή της διαδικασίας αξιολόγησης της συμμόρφωσης γίνεται αρχικά ανάλογα με

- το είδος του εξοπλισμού,

- το είδος του ρευστού και

- την επικινδυνότητα του ρευστού.

Περαιτέρω καθοριστικά μεγέθη για την επιλογή είναι

- η πίεση PS ,

- ο όγκος V σε λίτρα ή αντίστοιχα η ονομαστική διάμετρος DN

και κατά περίπτωση το γινόμενο

- $PS \cdot V$ ή αντίστοιχα $PS \cdot DN$.

Οι απαιτήσεις για την επιλογή της διαδικασίας αξιολόγησης της συμμόρφωσης δίνονται στο Παράρτημα III και αναλύονται με μορφή διαγραμμάτων (πινάκων) που δίνονται στο Παράρτημα II.

3. Ιδιότητες των υγραερίων

3.1 Γενικά

Ο όρος υγραέριο [8] είναι γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγραφούν τα υγροποιημένα αέρια καύσιμα, τα οποία αποτελούνται κυρίως από υδρογονάνθρακες με τρία ή τέσσερα άτομα άνθρακα (C3 και C4). Αυτοί οι υδρογονάνθρακες υπάρχουν ως αέρια (αέρια φάση) σε συνήθεις θερμοκρασίες και πιέσεις περιβάλλοντος, αλλά μπορούν να υγροποιούνται (υγρή φάση) σε συνήθεις θερμοκρασίες υπό μέσες πιέσεις.

Τα υγραέρια που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι [8]:

- εμπορικό βουτάνιο, το οποίο χρησιμοποιείται μόνο σε φιαλίδια,
- εμπορικό προπάνιο το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές χωρίς εξαεριστή,
- μίγμα βουτανίου-προπανίου το οποίο ονομάζεται υγραέριο μίγμα ή μίγμα.

Το εμπορικό προπάνιο περιέχει τουλάχιστον 85% κατά μάζα προπάνιο και προπένιο, με κύριο συστατικό το προπάνιο, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του προτύπου EN 437 [9] και τις σχετικές προδιαγραφές του Τεχνικού Κανονισμού [8] (Πίνακας του Παραρτήματος 4), σύμφωνα με τον πίνακα 3.1.

Στον πίνακα 3.1 δίνονται βέβαια οι φυσικές ιδιότητες για χημικώς καθαρό προπάνιο και κανονικό βουτάνιο. Δίνονται για καθορισμένες θερμοκρασίες πιέσεις γενικές ιδιότητες, όπως

- ο χημικός τύπος
 - η μοριακή μάζα
 - η πυκνότητα υγρού και η πυκνότητα αερίου
 - η σχετική πυκνότητα αερίου (αέρας = 1)
 - η ενθαλπία εξάτμισης
 - η κρίσιμη θερμοκρασία και η κρίσιμη πίεση
- αλλά και ιδιότητες σχετικές με την καύση, τον κίνδυνο έκρηξης, την ταξινόμηση σε οικογένειες αέριων καυσίμων και την ρύθμιση των συσκευών καύσης
- η ανώτερη H_s και η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα H_i (ενέργεια καύσης)
 - ο ανώτερος W_s και ο κατώτερος δείκτης Wobbe W_i
 - η θερμοκρασία/σημείο φλόγας - Flash point
 - η θερμοκρασία/σημείο έναυσης - Ignition Point
 - ο στοιχειομετρικός αέρας καύσης
 - το κατώτερο και το ανώτερο όριο έναυσης μίγματος αερίου – αέρα
 - η στοιχειομετρική ποσότητα καυσαερίων
 - η μέγιστη περιεκτικότητα CO₂ στα ξηρά καυσαέρια

Η θερμοκρασία ή σημείο έναυσης (ή ανάφλεξης) είναι η θερμοκρασία εκείνη, στην οποία πρέπει να θερμανθεί το σύστημα καυσίμου και αέρα (ώστε να λάβει την αναγκαία ενέργεια ενεργοποίησης με βάση το νόμο του Arrhenius) για να μπορέσει να ξεκινήσει η χημική αντίδραση (καύση).

Η θερμοκρασία ή σημείο φλόγας είναι η θερμοκρασία ενός υγρού, στην οποία παράγεται τόση ποσότητα ατμών, ώστε αυτή να σχηματίσει αναφλέξιμο μίγμα (εντός των ορίων έναυσης) με τον αέρα που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Το μίγμα μπορεί να καεί λάμποντας για σύντομο χρόνο, όταν προσαχθεί μια φλόγα. Χρησιμοποιείται ως κριτήριο εκρηξιμότητας.

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες υγραερίων. Οι τιμές αφορούν αέρια χημικώς καθαρά [8]

	μονάδα	προπάνιο	n-βουτάνιο
χημικός τύπος		C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
μοριακή μάζα	kg/kmol	44,094	58,120
μοριακός όγκος	m ³ /kmol	21,94	21,50
πυκνότητα υγρού στους 15°C	kg/lit	0,507	0,582
πυκνότητα υγρού στους 0°C	kg/lit	0,53	0,60
πυκνότητα αερίου υπό κανονικές συνθήκες	kg/m ³	1,97	2,59
σχετική πυκνότητα αερίου (αέρας = 1)	—	1,55	2,09
θερμοκρασία εξάτμισης υπό p _n = 1013,25 mbar	°C	-42	-0,5
κρίσιμη θερμοκρασία	°C	96,8	152,1
κρίσιμη πίεση - απόλυτη	bar	42,56	38,05
λόγος όγκου αερίου προς όγκο υγρού υπό ΠΣ	—	272,7	237,8
ενθαλπία εξάτμισης στους 0°C	kJ/kg	378,58	383,86
ανώτερη θερμογόνος ικανότητα H _s	kWh/kg MJ/kg MJ/m ³ kWh/m ³	13,980 50,337 101,205 28,115	13,740 49,491 133,795 37,165
κατώτερη θερμογόνος ικανότητα H _i	kWh/kg MJ/kg MJ/m ³ kWh/m ³	12,870 46,343 93,180 25,883	12,690 45,707 123,565 34,323
ανώτερος δείκτης Wobbe W _s	MJ/m ³	81,29	92,53
κατώτερος δείκτης Wobbe W _i	MJ/m ³	74,84	85,45
ειδική θερμοχωρητικότητα υγρού c _p σε 0°C	kJ/kgK	2,43	2,26
ειδική θερμοχωρητικότητα αερίου c _p υπό ΚΣ	kJ/m ³ K	3,22	4,31
θερμοκρασία/σημείο φλόγας - Flash point	°C	-105	-60
θερμοκρασία/σημείο έναυσης - Ignition Point	°C	510	465
στοιχειομετρικός αέρας καύσης	(m ³ /m ³ αερίου)	24,36	32,31
κατώτερο όριο έναυσης μίγματος αερίου – αέρα (υγραέριο εμπορίου)	% κατ' όγκο	2	1,5

ανώτερο όριο έναυσης μίγματος αερίου – αέρα (υγραέριο εμπορίου)	% κατ' όγκο	11	10
στοιχειομετρική ποσότητα υγρών καυσαερίων	(m ³ /m ³ αερίου)	26,24	34,71
στοιχειομετρική ποσότητα ξηρών καυσαερίων	(m ³ /m ³ αερίου)	22,3	29,68
μέγιστη περιεκτικότητα CO ₂ στα ξηρά καυσαέρια	% κατ' όγκο	13,8	14,1

3.2 Επιλογή του αντιπροσωπευτικού για την εργασία υγραερίου

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας το υγραέριο θα αντιμετωπισθεί ως **καθαρό προπάνιο**, καθώς αυτό αναπτύσσει υψηλότερες πιέσεις συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Λόγω των υψηλότερων πιέσεων του προπανίου οι δεξαμενές υγραερίου κατασκευάζονται και πιστοποιούνται για την περίπτωση χρήσης προπανίου, ακόμη και αν προορίζονται να χρησιμοποιηθούν για χρήση μίγματος βουτανίου-προπανίου, καθώς ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν αργότερα για χρήση προπανίου.

3.3 Ιδιότητες του προπανίου

Από τις ιδιότητες του προπανίου σημαντικές φυσικές ιδιότητες για την παρούσα εργασία είναι

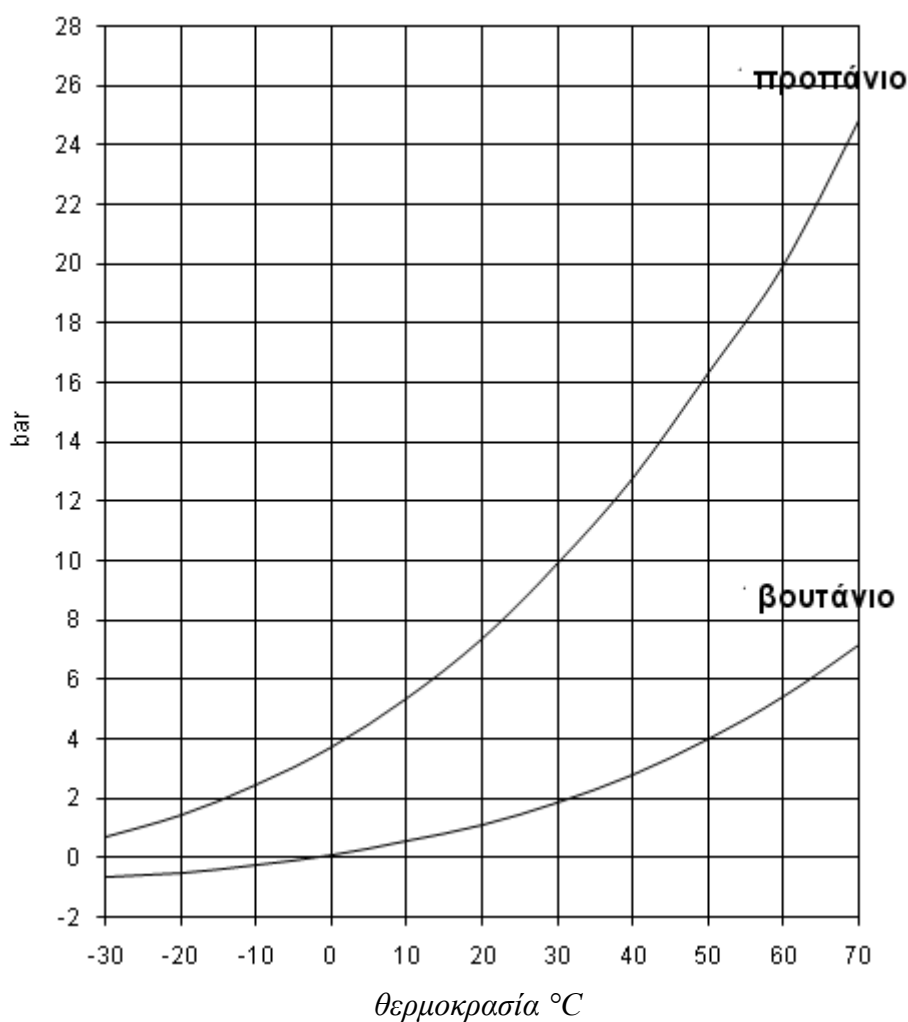
- η σχέση πίεσης - θερμοκρασίας
- η ενθαλπία εξάτμισης
- οι λοιπές φυσικές ιδιότητες που σχετίζονται με την μετάδοση θερμότητας, δηλαδή
 - η πυκνότητα ρ
 - η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p
 - ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k
 - το κινηματικό ιξώδες ν και το δυναμικό ιξώδες μ
 - ο αριθμός Pr.

3.4 Η καμπύλη πίεσης-θερμοκρασίας

Η καμπύλη (υπερ)πίεσης-θερμοκρασίας δίνεται στον πίνακα 3.2 και στην εικόνα 3.1 [8] τόσο για το προπάνιο, αλλά και για το βουτάνιο για να φανεί η διαφορά πιέσεων. Να διευκρινιστεί ότι για τους υπολογισμούς αντοχής λαμβάνουμε τα νούμερα της υπερπίεσης, ενώ για θερμοδυναμικούς υπολογισμούς παίρνουμε την απόλυτη πίεση.

Πίνακας 3.2 Πίεση ατμών υγραερίων σε bar

θερμοκρασία	προπάνιο		βουτάνιο	
	υπερπίεση	απόλυτη	υπερπίεση	απόλυτη
-30°C	0,691	1,704	-0,686	0,327
-20°C	1,443	2,456	-0,512	0,501
-10°C	2,424	3,437	-0,289	0,724
0°C	3,702	4,715	0,059	1,072
10°C	5,358	6,371	0,519	1,532
20°C	7,353	8,366	1,089	2,102
30°C	9,826	10,839	1,844	2,857
40°C	12,758	13,771	2,785	3,798
50°C	16,289	17,302	4,001	5,014
60°C	19,907	20,920	5,395	6,408
70°C	24,811	25,824	7,159	8,172



Εικόνα 3.1 Καμπύλες (υπερ)πίεσης ατμών

Από τον πίνακα και την εικόνα, επειδή οι ελληνικοί Κανονισμοί ορίζουν ως συνθήκες λειτουργίας

— μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 50°C

— ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας: -20°C,

προκύπτει ότι οι δεξαμενές υγραερίου πρέπει να κατασκευάζονται για πίεση σχεδιασμού τουλάχιστον 16,2 bar.

Επειδή η ασφαλιστική βαλβίδα εκτόνωσης της δεξαμενής με βάση την Οδηγία 2014/68/ΕΕ ρυθμίζεται σε πίεση 17,6 bar, η αντίστοιχη θερμοκρασία του προπανίου στην δεξαμενή προκύπτει 54°C.

3.5 Λοιπές φυσικές ιδιότητες

Ως λοιπές φυσικές ιδιότητες εννοούνται ιδιότητες οι οποίες αφορούν ισοζύγιο ενέργειας και υπολογισμούς μετάδοσης θερμότητας.

Οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων λαμβάνονται από το γερμανικό εγχειρίδιο VDI Heat Atlas [10].

Η τιμές λαμβάνονται για τους 54°C, οι οποίοι αντιστοιχούν στην πίεση ενεργοποίησης της βαλβίδας ασφαλείας. Λαμβάνονται

— ενθαλπία εξάτμισης	$r (\Delta h_v) = 280 \text{ [kJ/kg]}$
— πυκνότητα	$\rho = 445 \text{ kg/m}^3$
— ειδική θερμοχωρητικότητα	$c_p = 3,12 \text{ kJ/kgK}$
— συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	$k = 0,082 \text{ W/mK}$
— δυναμικό ιξώδες	$\mu = 72,5 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$
— κινηματικό ιξώδες	$\nu = 0,163 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
— αριθμός Prandtl	$Pr = 2,77$

3.6 Ταξινόμηση των καυσίμων αερίων με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 437

Τα αέρια καύσιμα, όπως τα υγραέρια, ταξινομούνται σε τρεις οικογένειες όσον αφορά την χρήση τους σε καυστήρες και λοιπές εφαρμογές καύσης, ενώ κάθε οικογένεια διαιρείται σε ομάδες, συναρτήσει του ανώτερου δείκτη Wobbe. Στην 1η οικογένεια ανήκουν τα φωταέρια, ενώ στην 2η ανήκουν τα φυσικά αέρια. Τα υγραέρια ανήκουν στην 3η οικογένεια.

Ο δείκτης Wobbe είναι ο λόγος της θερμογόνου ικανότητας του αερίου προς την τετραγωνική ρίζα της σχετικής πυκνότητας του αερίου υπό τις ίδιες συνθήκες αναφοράς. Μετριέται σε MJ/m³ ή kWh/m³, τα m³ στην κατάσταση αναφοράς.

Διακρίνουμε τον ανώτερο (W_s) και τον κατώτερο δείκτη Wobbe (W_i).

Ο ανώτερος δείκτης Wobbe ορίζεται W_s : $W_s = \frac{H_s}{\sqrt{d}}$

Ο δείκτης Wobbe είναι μια χαρακτηριστική τιμή για τη δυνατότητα εναλλαγής των αερίων από την άποψη της θερμικής φόρτισης των συσκευών αερίου.

Η ταξινόμηση των καυσίμων αερίων δίνεται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Ταξινόμηση των καυσίμων αερίων με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 437

Οικογένειες και ομάδες αερίων	δείκτης W_s [MJ/m^3] σε $15^\circ C$ και $1013,25$ mbar	
	ελάχιστη τιμή	μέγιστη τιμή
1η οικογένεια		
— ομάδα a	22,4	24,8
2η οικογένεια		
— ομάδα H	39,1	54,7
— ομάδα L	45,7	54,7
— ομάδα E	39,1	44,8
	40,9	54,7
3η οικογένεια		
— ομάδα B/P	72,9	87,3
— ομάδα P	72,9	87,3
— ομάδα B	72,9	76,8
	81,8	87,3

Τα αέρια της 3ης οικογένειας πρέπει από την άποψη των χαρακτηριστικών δεδομένων της τεχνικής της καύσης να ανταποκρίνονται στις τιμές του πίνακα 3.3.

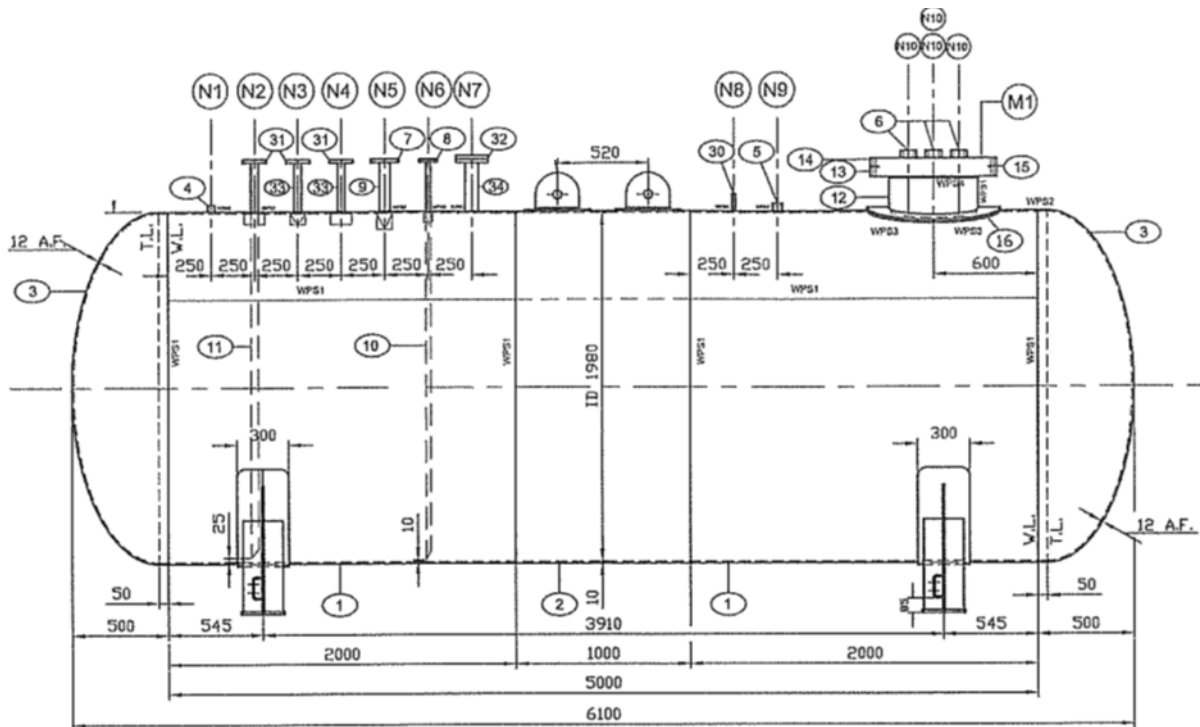
Πίνακας 3.3 Απαιτήσεις για τα αέρια της 3ης οικογένειας αερίων [8]

χαρακτηρισμός	σύμβολο	μονάδα	Ομάδα P	Ομάδα P/B	Ομάδα B
δείκτης Wobbe	W_s				
συνολική περιοχή		kWh/m^3	20,3 έως 21,3	20,3 έως 24,3	22,7 έως 24,3
		MJ/m^3	72,9 έως 76,8	72,9 έως 87,3	81,8 έως 87,3
ονομαστική τιμή		kWh/m^3	20,8	22,5	23,0
		MJ/m^3	74,9	80,8	82,8
σχετική πυκνότητα	d				
ονομαστική τιμή		1	1,55	1,95	2,09
ανώτερη θερμογόνος ικανότητα	H_s				
ονομαστική τιμή (ελάχιστη)		kWh/kg	13,2	13,8	13,7
		kWh/m^3	26,5	33	35,1
κατώτερη θερμογόνος ικανότητα	H_i				
ονομαστική τιμή (ελάχιστη)		kWh/kg	12,1	11,9	11,8
		kWh/m^3	24,3	30,2	32,2
πίεση σύνδεσης	p_{ev}				
συνολική περιοχή		mbar	25 έως 45	25 έως 35	20 έως 35
ονομαστική τιμή		mbar	37	29	29

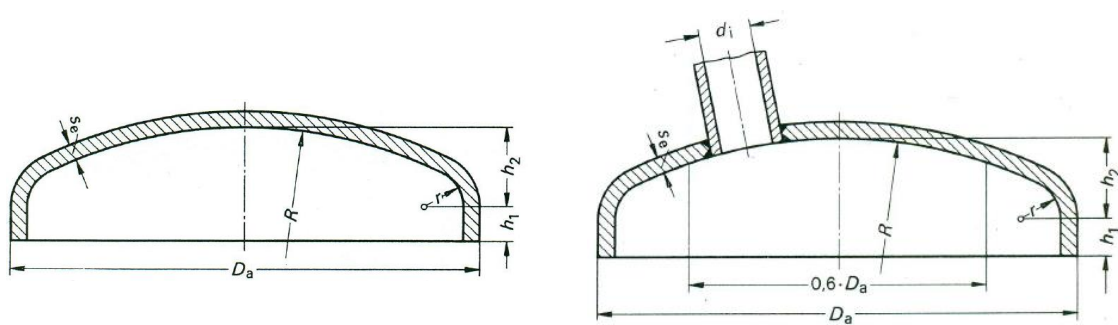
4. Δεξαμενές υγραερίου

4.1 Κατασκευή των δεξαμενών

Οι δεξαμενές υγραερίου, εικόνα 4.1, γενικά είναι δοχεία κυλινδρικής μορφής με θολωτά καλύμματα (συνήθως Klörper), εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.1 Δεξαμενή υγραερίου 18.000 lit



πλήρες κάλυμμα

κάλυμμα με άνοιγμα

Εικόνα 4.2 Θολωτά καλύμματα Klörper [7]

Οι δεξαμενές υγραερίου πρέπει ικανοποιούν τις απαιτήσεις της Οδηγίας 2014/68/ΕΕ για τον εξοπλισμό υπό πίεση.

Εναρμονισμένα με την Οδηγία 2014/68/ΕΕ είναι τα πρότυπα της σειράς ΕΛΟΤ EN 13445 [4] και το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12542 [11].

Στην έννοια της κατασκευής περιλαμβάνονται:

- η επιλογή των υλικών,
- η κατασκευαστική διαμόρφωση,
- οι υπολογισμοί αντοχής,
- οι μέθοδοι και το προσωπικό εκτέλεσης της κατασκευής,
- οι μέθοδοι και το προσωπικό εκτέλεσης δοκιμών.

Οι δεξαμενές υγραερίου υπό πίεση (χωρίς ψύξη) πρέπει να κατασκευάζονται για τις ακόλουθες συνθήκες λειτουργίας:

- μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 50°C
- ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας: -20°C
- μέγιστη πίεση λειτουργίας: 17,5 bar
- συντελεστής ασφαλείας: όπως ορίζεται από την Οδηγία 2014/68/ΕΕ
- κάλυψη υπόγειων δεξαμενών: $\geq 0,5$ m

Οι δεξαμενές χωρητικότητας άνω των 10 m³ πρέπει να διαθέτουν χειροθυρίδες ή ανθρωποθυρίδες. Η ανθρωποθυρίδα των υπόγειων δεξαμενών μπορεί να είναι υπό μορφή εκτεταμένου λαιμού και τα εξαρτήματα και οι συνδέσεις μπορεί να βρίσκονται εντός του φρεατίου της ανθρωποθυρίδας.

Οι δεξαμενές και τα στηρίγματά τους πρέπει να έχουν κατάλληλη κατά περίπτωση αντιδιαβρωτική προστασία.

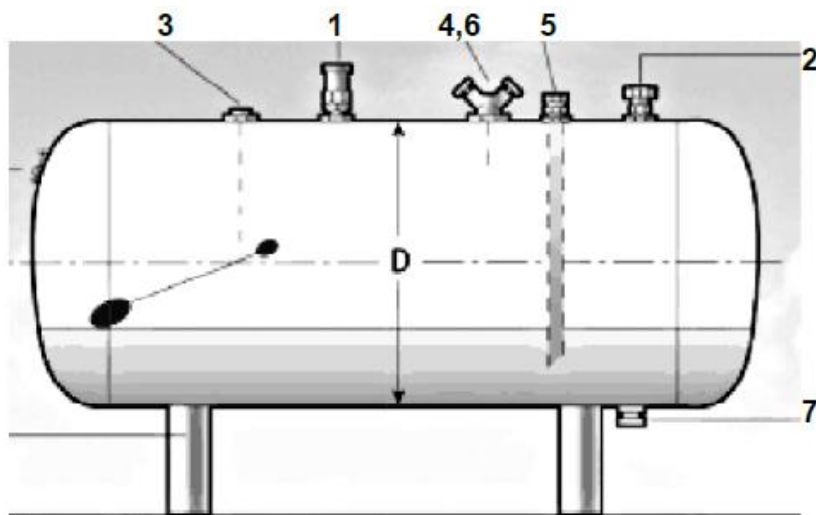
Οι υπέργειες δεξαμενές πρέπει να προστατεύονται έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας με κατάλληλη μέθοδο (π.χ. με ανακλαστική βαφή λευκού χρώματος).

Κάθε δεξαμενή πρέπει να διαθέτει πιστοποιητικό κατασκευής.

4.2 Εξοπλισμός των δεξαμενών

Κάθε δεξαμενή πρέπει να είναι εφοδιασμένη [8] τουλάχιστον με:

- μία ασφαλιστική βαλβίδα ανακούφισης της πίεσης, (1)
- μία βαλβίδα πλήρωσης, (2)
- ένα όργανο ένδειξης ποσότητας περιεχομένου (ή στάθμης), (3)
- ένα δείκτη μέγιστης στάθμης (3)
- μία βαλβίδα λήψης αέριας φάσης, (4)
- μία βαλβίδα λήψης υγρής φάσης, (5)
- ένα όργανο ένδειξης πίεσης (μανόμετρο ασφαλείας), (6)
- βαλβίδα εκκένωσης υγρού (αποστράγγιση, αφαίρεση των ακαθαρσιών του υγρού) (7)



Εικόνα 4.3 Απαιτούμενος εξοπλισμός δεξαμενών υγραερίου

Όλα τα εξαρτήματα πρέπει να είναι κατάλληλα για υγραέριο για πίεση τουλάχιστον 17,5 bar.

Ο Ελληνικός Κανονισμός [12] (του 1993!) απαιτεί υπό όρους την εγκατάσταση και μιας βαλβίδας υπερβολικής ροής για την περίπτωση θραύσης του αγωγού τροφοδοσίας μιας συσκευής κατανάλωσης υγραερίου. Σήμερα, όμως, μπορεί να προβλέπεται βαλβίδα υπερβολικής ροής στον αγωγό τροφοδοσίας της εκάστοτε συσκευής και όχι εγκατάσταση στην δεξαμενή, επειδή η βαλβίδα διαστασιολογείται με βάση την ισχύ της αντίστοιχης συσκευής και η δεξαμενή μπορεί να τροφοδοτεί περισσότερες από μία συσκευές.

Από τα στοιχεία του εξοπλισμού των δεξαμενών υγραερίου σημαντικό για το αντικείμενο της εργασίας μας είναι η ασφαλιστική βαλβίδα ανακούφισης της πίεσης. Η ασφαλιστική βαλβίδα, γνωστή και ως αυτόματη βαλβίδα ανακούφισης (ή απόρριψης), εικόνα 4.4, είναι διάταξη σχεδιασμένη να ανοίγει αυτόματα και ακαριαία και να επιτρέπει την εκροή αερίου, αν παραβιασθεί η ρυθμισμένη πίεση απόκρισής τους για οποιοδήποτε λόγο.



Εικόνα 4.4 Ασφαλιστική Βαλβίδα

Η ασφαλιστική βαλβίδα ανακούφισης, όταν μετά την ενεργοποίησή της απορριφθεί αέριο και μειωθεί η πίεση από την τιμή ρύθμισής της 17,6 bar στην τιμή της πίεσης σχεδιασμού 16 bar, κλείνει αυτόματα και δεν απορρίπτεται αέριο μέχρι μια πιθανή νέα ενεργοποίησή της.



- (από αριστερά)
- ασφαλιστική βαλβίδα
 - δείκτης στάθμης
 - βαλβίδα πλήρωσης
 - βαλβίδα λήψης υγρής φάσης
 - βαλβίδα λήψης αέριας φάσης με μανόμετρο

Εικόνα 4.5 Ασφαλιστική Βαλβίδα

Τα στοιχεία εξοπλισμού μιας δεξαμενής υγραερίου βρίσκονται συνήθως καλυμμένα με ένα κατάλληλο κάλυμμα, με εξαίρεση πιθανώς την ασφαλιστική βαλβίδα ανακούφισης και τον δείκτη στάθμης, εικόνα 4.5.

4.3 Βαθμός πλήρωσης των δεξαμενών υγραερίου

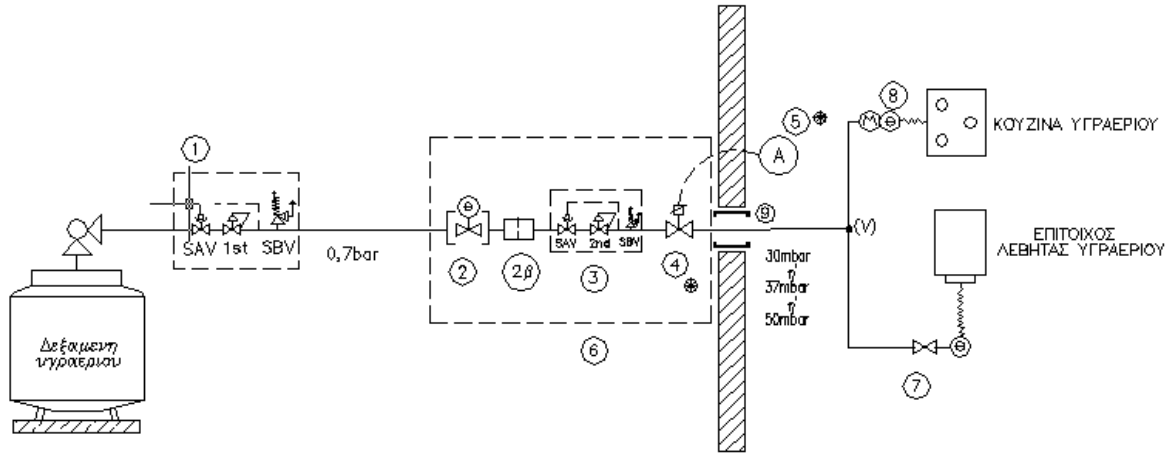
Το μέγιστο ποσοστό πλήρωσης μιας δεξαμενής υγραερίου είναι 85% κατ' όγκο [8]. Ο λόγος καθορισμού μέγιστου ποσοστού πλήρωσης είναι ότι τα υγραέρια στην υγρή φάση έχουν συντελεστή θερμικής διαστολής 7 φορές μεγαλύτερο από το νερό [13]. Αυτό σημαίνει ότι αν μια δεξαμενή πληρωθεί κοντά στο 100%, μια σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας θα προκαλέσει μεγάλη διαστολή της υγρής φάσης του υγραερίου, με αποτέλεσμα ανάπτυξη πίεσης λόγω της διαστολής και όχι της θερμοκρασίας η οποία μπορεί να υπερβεί κατά περίπτωση τα 60 bar. Για τον λόγο αυτό, εγκαθίσταται σε κάθε δεξαμενή ασφαλιστική βαλβίδα έναντι υπερπλήρωσης, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο.

Σημειώνεται πως έχουν συμβεί πολύνεκρα ατυχήματα στην χώρα μας λόγω παράνομης υπερπλήρωσης φιαλών υγραερίου, οι οποίες δεν διαθέτουν ασφαλιστική βαλβίδα έναντι υπερπλήρωσης.

4.4 Εξαερίωση του υγραερίου

Οι δεξαμενές υγραερίου περιέχουν υγραέριο κυρίως σε υγρή φάση και μικρή ποσότητα αέριας φάσης επάνω από την στάθμη της υγρής φάσης. Το υγραέριο, όμως, καταναλώνεται στην αέρια φάση, οπότε η υγρή φάση πρέπει να εξαεριώνεται.

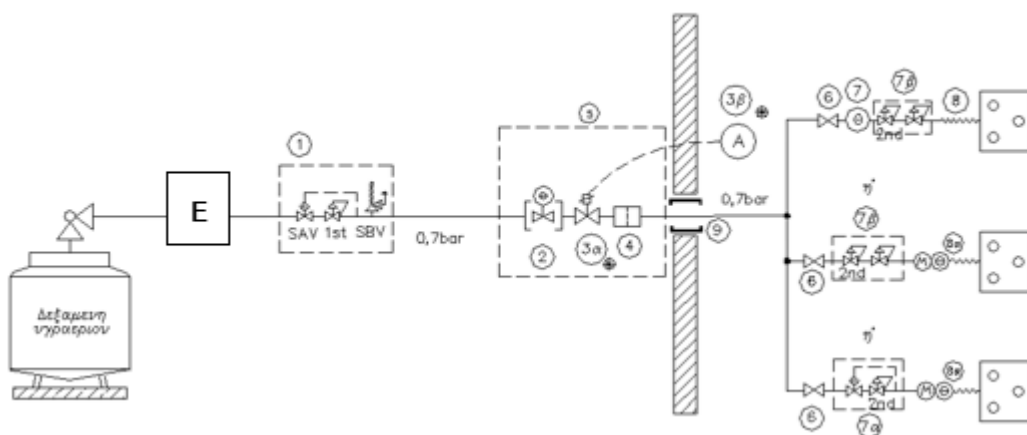
Η λήψη του υγραερίου μπορεί να γίνεται από την δεξαμενή
 — στην αέρια φάση και
 — στην υγρή φάση και η υγρή φάση στην συνέχεια να εξαεριώνεται με κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας μέσω εξαερωτή, συσκευής/εναλλάκτη. [13] (εικόνες 4.6 και 4.7)



Εικόνα 4.6 Εγκατάσταση υγραερίου με δεξαμενή. Λήψη από την αέρια φάση.

Ρυθμιστής πίεσης 1ου σταδίου στη δεξαμενή και ρυθμιστής 2ου σταδίου εκτός κτιρίου

1. ρυθμιστής πίεσης 1ου σταδίου με ενσωματωμένη ασφαλιστική βαλβίδα αυτόματης διακοπής (SAV) και ανακουφιστική βαλβίδα (SBV) κάτω από το προστατευτικό καπάκι της δεξαμενής
2. αποφρακτική διάταξη του κτιρίου με ενσωματωμένο διηλεκτρικό σύνδεσμο και βαλβίδα πυροπροστασίας (προαιρετική)
- 2.β φίλτρο αερίου
3. ρυθμιστής πίεσης 2ου σταδίου με ενσωματωμένη ασφαλιστική βαλβίδα αυτόματης διακοπής (SAV) και ανακουφιστική βαλβίδα (SBV)



Εικόνα 4.7 Εγκατάσταση υγραερίου με δεξαμενή και εξαερωτή. Λήψη από την υγρή φάση.

Ρυθμιστής πίεσης 1ου σταδίου μετά τον εξαεριωτή και ρυθμιστές 2ου σταδίου εκτός κτιρίου.

1. ρυθμιστής πίεσης 1ου σταδίου με ενσωματωμένη ασφαλιστική βαλβίδα αυτόματης διακοπής (SAV) και ανακουφιστική βαλβίδα (SBV) μετά τον εξαεριωτή
- 7α. ρυθμιστής πίεσης 2ου σταδίου με ενσωματωμένη ασφαλιστική βαλβίδα αυτόματης διακοπής
- 7β. ρυθμιστής πίεσης 2ου σταδίου με ρυθμιστή-επιτηρητή πίεσης
Ε εξαεριωτής

Στην περίπτωση εξαερίωσης με βοηθητική ενέργεια, το υγραέριο οδηγείται στον εξαεριωτή σε υγρή φάση και εκεί εξατμίζεται με την πρόσδοση θερμότητας. Η μετάδοση της αναγκαίας θερμότητας μπορεί να γίνεται άμεσα ή έμμεσα, συνήθως έμμεσα.

Η αναγκαία θερμότητα εξάτμισης μπορεί να προσδίδεται στο υγραέριο

- μέσω ηλεκτρικής ενέργειας,
- μέσω ενός θερμικού φορέα (θερμό νερό, ατμός) ή
- μέσω καύσης (ποσότητας υγραερίου).

Στην περίπτωση λήψης υγραερίου από την αέρια φάση, η εξαερίωση γίνεται χωρίς βοηθητική ενέργεια και η ενθαλπία εξάτμισης λαμβάνεται από

- την εσωτερική ενέργεια του υγραερίου,
- την εσωτερική ενέργεια του υλικού του δοχείου (η οποία είναι αναλογικά πολύ λίγη) και
- το ενεργειακό δυναμικό του περιβάλλοντος (αέρας, γη).

Προφανώς η λήψη της ενθαλπίας εξάτμισης από την εσωτερική ενέργεια του υγραερίου σημαίνει ότι το υγραέριο και αντίστοιχα τα χαλύβδινα τοιχώματα της δεξαμενής ψύχονται. Σε κάποιες περιπτώσεις πολύ έντονης λήψης αέριας φάσης έχουν σημειωθεί θερμοκρασίες τοιχωμάτων της δεξαμενής κάτω από -10°C (σε περιόδους με ήδη χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος κυρίως για το προπάνιο), οπότε εμφανίζονται προβλήματα ψαθυρότητας για ορισμένα είδη χαλύβων.

Λήψη από την υγρή φάση (συνήθως με χρήση υγραερίου μίγματος) έχουμε σε βιομηχανικές εφαρμογές, στις οποίες έχουμε συνήθως μεγάλες καταναλώσεις, οπότε η φυσική εξαερίωση δεν επαρκεί. Η παροχή (σε kg/h) λήψης από την υγρή φάση δεν εξαρτάται από το μέγεθος της δεξαμενής.

Λήψη από την αέρια φάση έχουμε σε μη βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. μαγειρεία) με χρήση συνήθως προπανίου, το οποίο εξαεριώνεται ευκολότερα λόγω υψηλότερης πίεσης και άρα μεγαλύτερης διαφοράς πίεσης στον ρυθμιστή πίεσης.

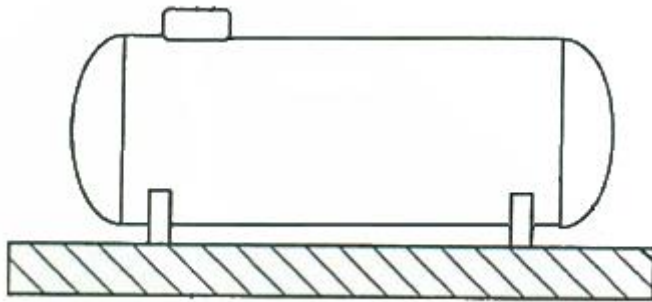
Η παροχή λήψης από την αέρια φάση εξαρτάται [13] από

- το μέγεθος της δεξαμενής
- την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και
- την ρύθμιση της πίεσης εξόδου του ρυθμιστή πίεσης.

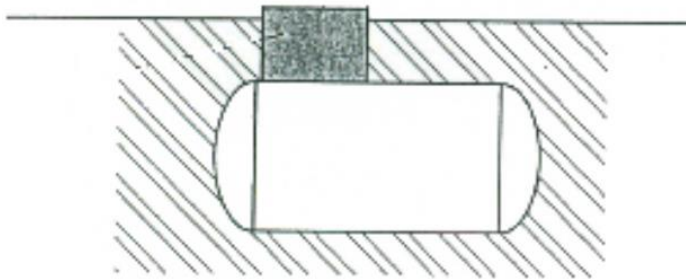
4.5 Εγκατάσταση των δεξαμενών υγραερίου

Οι δεξαμενές υγραερίου μπορούν να εγκαθίστανται [8]

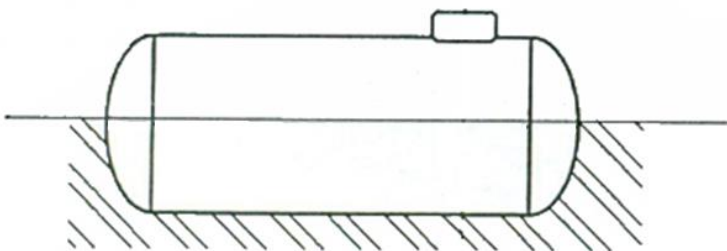
- υπέργειες, εικόνα 4.8,
- υπόγειες (θαμμένες), εικόνα 4.9,
- επιχωματωμένες ή
- ημιεπιχωματωμένες ή ημιυπόγειες, εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.8 Υπέργεια εγκατάσταση δεξαμενής



Εικόνα 4.9 Υπόγεια εγκατάσταση δεξαμενής



Εικόνα 4.10 Ημιυπόγεια εγκατάσταση δεξαμενή

Σημείωση: Σήμερα οι λύσεις επιχωματωμένης ή ημιεπιχωματωμένης (ή ημιυπόγειας) δεξαμενής πρακτικά δεν εφαρμόζονται.

Οι υπέργειες δεξαμενές υγραερίου μπορούν να εγκαθίστανται
— είτε απροστάτευτες,
— είτε προστατευμένες
έναντι πυρκαγιάς.

Η προστασία μπορεί να επιτυγχάνεται
— με θερμομόνωση,
— μέσω προστατευτικού τοίχου,
— μέσω διαβροχής με νερό ψύξης.

5. Κατασκευή των δεξαμενών υγραερίου

5.1 Χρησιμοποιούμενοι χάλυβες

Στην κατασκευή των δεξαμενών υγραερίου, με βάση την ελληνική νομοθεσία ([8], §5.1.1), μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο χάλυβες οι οποίοι είναι κατάλληλοι για τις ακόλουθες συνθήκες λειτουργίας:

- μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 50°C
- ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας: -20°C.

Ο βασικός περιορισμός στην επιλογή των χαλύβων είναι η απαίτηση για ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας -20°C.

Η ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας -20°C έχει επιλεγεί όχι επειδή αναμένεται αντίστοιχη θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά επειδή όταν η εγκατάσταση υγραερίου λειτουργεί με φυσική εξαερίωση η αέρια φάση εξαεριώνεται απορροφώντας θερμότητα κυρίως από την υγρή φάση, η οποία αναγκαστικά ψύχεται ακόμη και σε θερμοκρασίες κάτω από τους 0°C, κατά περίπτωση ακόμη και κάτω από τους -10°C.

Οι χάλυβες οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των δεξαμενών υγραερίου, επειδή ικανοποιούν και τις δύο απαιτήσεις, είναι χάλυβες οι οποίοι ικανοποιούν τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού προτύπου EN 10028-3 [14] και ανήκουν στον πίνακα 5.1. Από αυτούς προτιμώνται οι χάλυβες του πίνακα 5.2. Οι μηχανικές ιδιότητες των εν λόγω χαλύβων δίνονται τους πίνακες 5.3, 5.4 και 5.5, οι οποίοι περιέχουν αποσπάσματα (πάχη ελασμάτων μέχρι 40 mm) των αντίστοιχων πινάκων του προτύπου EN 10028-3 [14]

Πίνακας 5.1 Χάλυβες κατάλληλοι για την κατασκευή δεξαμενών υγραερίου

σύμβολο	αριθμός	σύμβολο	αριθμός	σύμβολο	αριθμός
P275NH	1.0487	P355N	1.0562	P460NH	1.8935
P275NL1	1.0488	P355NH	1.0565	P460NL1	1.8915
P275NL2	1.1104	P355NL1	1.0566	P460NL2	1.8918
		P355NL2	1.1106		

Πίνακας 5.2 Χάλυβες προτιμώμενοι στην Ελλάδα για την κατασκευή δεξαμενών υγραερίου

σύμβολο	αριθμός
P275NH	1.0487
P355NH	1.0565
P460NH	1.8935

Το σύμβολο P σημαίνει [15] ότι ο χάλυβας είναι κατάλληλος για εφαρμογές υπό πίεση.

Το σύμβολο N σημαίνει ότι ο χάλυβας είναι ανοπτημένος (εξομαλυμένος).

Το σύμβολο H σημαίνει ότι ο χάλυβας είναι κατάλληλος για κοίλες κατατομές.

Το σύμβολο L σημαίνει ότι ο χάλυβας είναι κατάλληλος για χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Πίνακας 5.3 Ιδιότητες εφελκυσμού σε θερμοκρασία δωματίου (20°C)
(απόσπασμα του πίνακα 4 του EN 10028-3 [14])

Είδος χάλυβα		Πάχος t	Όριο διαρροής R _{eH}	Όριο θραύσης R _m	Επιμήκυνση μετά την θραύση A	
σύμβολο	αριθμός	mm	Mpa	Mpa	%	
P275NH	1.0487	≤ 16	275	390 έως 510	24	
P275NL1	1.0488	16 < t ≤ 40	265			
P275NL2	1.1104					
P355N	1.0562	≤ 16	355	490 έως 630	22	
P355NH	1.0565					
P355NL1	1.0566		16 < t ≤ 40			345
P355NL2	1.1106					
P460NH	1.8935	≤ 16	460	570 έως 730	17	
P460NL1	1.8915	16 < t ≤ 40	445			
P460NL2	1.8918					

Πίνακας 5.4 Ελάχιστες τιμές του ορίου διαρροής σε αυξημένη θερμοκρασία (απόσπασμα του πίνακα 4 του EN 10028-3 [14])

Είδος χάλυβα		Πάχος t mm	Όριο διαρροής R _{p0,2} [Mpa] σε θερμοκρασία σε °C							
σύμβολο	αριθμός		50	100	150	200	250	300	350	400
P275NH	1.0487	≤ 16	266	250	232	213	195	179	166	156
		16 < t ≤ 40	256	241	223	205	188	173	160	150
P355NH	1.0565	≤ 16	343	323	299	275	252	232	214	202
		16 < t ≤ 40	334	314	291	267	245	225	208	196
P460NH	1.8935	≤ 16	445	419	388	356	326	300	278	261
		16 < t ≤ 40	430	405	375	345	316	290	269	253

Οι τιμές ισχύουν και για τους αντίστοιχους χάλυβες P...NL1, P...NL2

Πίνακας 5.5 Ελάχιστες τιμές της ενέργειας κρούσης για τους χάλυβες P...NH (απόσπασμα του πίνακα 6 του EN 10028-3 [14])

Είδος χάλυβα		Πάχος t mm	Ενέργειας κρούσης KV [J] σε θερμοκρασία σε °C					
σύμβολο	αριθμός		εγκάρσια			διαμήκως		
		-20	0	+20	-20	0	+20	
P275NH	1.0487	≤ 250	30	40	50	45	65	75
P355NH	1.0565							
P460NH	1.8935							

Οι τιμές ισχύουν και για τους αντίστοιχους χάλυβες P...NL1, P...NL2

5.2 Υπολογισμοί παχών των κυλινδρικών περιβλημάτων

Ο υπολογισμός των παχών των κυλινδρικών περιβλημάτων πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της Οδηγίας 2014/68/ΕΕ.

Γίνεται με την εφαρμογή εναρμονισμένων προτύπων ή εναρμονισμένων τεχνικών κανονισμών. Θα εφαρμόσουμε τον γερμανικό κανονισμό AD 2000-Merkblätter [16] ο οποίος είναι εναρμονισμένος με την Οδηγία 2014/68/ΕΕ.

Ο υπολογισμός γίνεται με

- την μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση (PS) $p = 17,5 \text{ bar}$ (από τον ελληνικό κανονισμό [8])
- θερμοκρασία υπολογισμού για τον καθορισμό τους χαρακτηριστικής τιμής αντοχής $\theta = 50 + 20 = 70^\circ\text{C}$ (20 K προσαύξηση από τον γερμανικό κανονισμό)
- χαρακτηριστική τιμή αντοχής K για τους 70°C
- συντελεστή ασφαλείας $S = 1,5$ τους ορίζεται από τον κανονισμό γερμανικό (B0, πίνακας 2 [16]) αλλά και την Οδηγία (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I, παραγρ. 7.1.2) [1]
- συντελεστή ραφών $\nu = 1$, (ραφές πιστοποιημένες)

Το απαιτούμενο πάχος τοιχώματος για κυλινδρικά κελύφη χωρίς ανοίγματα υπολογίζεται

$$s = \frac{D_a \cdot p}{20 \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 \quad (1)$$

Η προσαύξηση για αντιστάθμιση αρνητικών ανοχών των ελασμάτων $c_1 = 0$ λαμβάνεται από το πρότυπο EN 10029 [16] για την κλάση A: για αρνητικές ανοχές παχών εξαρτώμενες από το ονομαστικό πάχος για πάχος μέχρι 15 mm $c_1 = 0,5$, πίνακας 5.6.

Η προσαύξηση για διάβρωση λαμβάνεται (παρ. 9.2.1) για φερριτικούς χάλυβες $c_2 = 1$ mm.

Ο υπολογισμός θα γίνει για τους χάλυβες με το μικρότερο όριο διαρροής P275...

Στους 70°C λαμβάνεται από τον πίνακα 5.4 (με παρεμβολή για $t \leq 16$)

$$K = R_{p0,2} = 260 \text{ Mpa}$$

Ο υπολογισμός θα γίνει ενδεικτικά για μια σχετικά μεγάλη εξωτερική διάμετρο

$$D_a = 2000 \text{ mm}$$

Υπολογίζεται:

$$s = \frac{2000 \cdot 17,5}{20 \frac{260}{1,5} \cdot 1 + 17,5} + c_1 + c_2 = 10,1 + 0,5 + 1 = 11,6 \text{ mm}$$

Το πάχος υπολογίστηκε για να εκτιμηθεί η επίδρασή του στους υπολογισμούς μετάδοσης θερμότητας. Διαπιστώνεται ότι το πάχος γενικά είναι τάξης μεγέθους $s = 10$ mm, δεδομένου ότι ο υπολογισμός έγινε για τους χάλυβες με το μικρότερο όριο διαρροής P275....

Ανοχές παχών ελασμάτων

Οι ανοχές των παχών ελασμάτων διακρίνονται σε 4 κλάσεις:

- κλάση A: για αρνητικές ανοχές παχών εξαρτώμενες από το ονομαστικό πάχος
- κλάση B: για καθορισμένη αρνητική ανοχή 0,3 mm
- κλάση C: για καθορισμένη αρνητική ανοχή 0 mm
- κλάση D: για συμμετρικές ανοχές

Πίνακας 5.6 Ανοχές παχών ελασμάτων σε mm ΕΛΟΤ EN 10029 ([16] πίνακας 1)

Ονομαστικό πάχος t	Κλάση A		Κλάση B		Κλάση C		Κλάση D	
	κατώτερη	ανώτερη	κατώτερη	ανώτερη	κατώτερη	ανώτερη	κατώτερη	ανώτερη
3≤t<5	-0,3	+0,7	-0,3	+0,7	0	+1,0	-0,5	+0,5
5≤t<8	-0,4	+0,8	-0,3	+0,9	0	+1,2	-0,6	+0,6
8≤t<15	-0,5	+0,9	-0,3	+1,1	0	+1,4	-0,7	+0,7
15≤t<25	-0,6	+1,0	-0,3	+1,3	0	+1,6	-0,8	+0,8
25≤t<40	-0,7	+1,3	-0,3	+1,7	0	+2,0	-1,0	+1,0
40≤t<80	-0,9	+1,7	-0,3	+2,3	0	+2,6	-1,3	+1,3
80≤t<150	-1,1	+2,1	-0,3	+2,9	0	+3,2	-1,6	+1,6
150≤t<250	-1,2	+2,4	-0,3	+3,3	0	+3,6	-1,8	+1,8
250≤t<400	-1,3	+3,5	-0,3	+4,5	0	+4,8	-2,4	+2,4

6. Αποστάσεις ασφαλείας για δεξαμενές υγραερίου σύμφωνα με ισχύοντες κανονισμούς

6.1 Γενικά

Οι αποστάσεις ασφαλείας για δεξαμενές υγραερίου καθορίζονται από τους εθνικούς κανονισμούς των κρατών και δεν υφίσταται κάποιος ευρωπαϊκός ή διεθνής αντίστοιχος Κανονισμός.

Οι εθνικοί κανονισμοί γενικά καθορίζουν αποστάσεις ασφαλείας των δεξαμενών από μονάδες παραγωγής ή επεξεργασίας, εργαστήρια, συνεργεία, κτίρια (κατοικίες κλπ), εσωτερικούς δρόμους με πυκνή κυκλοφορία μη ελεγχόμενη, όρια ιδιοκτησίας, σταθερές πηγές έναυσης (π.χ. φλόγα μιας μαγειρικής εστίας), ανοίγματα προς υπόγειους χώρους (π.χ. φρεάτια) αλλά και από βυτιοφόρα οχήματα.

Ο καθορισμός των αποστάσεων ασφαλείας σε όλους τους εθνικούς κανονισμούς, πλην του γερμανικού, είναι εμπειρικός και βασίζεται στην παραδοχή ότι δεξαμενές υγραερίου αποτελούν ένα παράγοντα διακινδύνευσης για τις γειτονικές κτιριακές και λοιπές εγκαταστάσεις. Ακόμη και οι εθνικοί κανονισμοί των λοιπών κρατών μελών δεν βασίζονται στις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τον εξοπλισμό υπό πίεση [1].

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2014/68/ΕΕ θεωρεί ότι όποιος εξοπλισμός υπό πίεση, όπως μια δεξαμενή υγραερίου, ικανοποιεί τις απαιτήσεις της, έχει πιστοποιηθεί και φέρει την σήμανση CE, είναι ασφαλής και δεν αποτελεί παράγοντα διακινδύνευσης για τις γειτονικές κτιριακές και λοιπές εγκαταστάσεις. Αντιθέτως, η δεξαμενή υγραερίου πρέπει να προστατευθεί έναντι κινδύνων προερχόμενων από εξωτερικούς παράγοντες, όπως πυροθερμικά φορτία από πυρκαγιά σε γειτονικές κτιριακές και λοιπές εγκαταστάσεις.

Η γερμανική νομοθεσία περί εγκαταστάσεων δεξαμενών υγραερίου, η οποία μάλιστα θεσπίστηκε πριν τεθεί η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2014/68/ΕΕ για τον εξοπλισμό υπό πίεση στην πρώτη μορφή της το 1997 (ως Οδηγία 97/23/ΕΚ), βασισμένη στην τότε γερμανική νομοθεσία και τυποποίηση περί δοχείων υπό πίεση, θεωρεί ότι η δεξαμενή υγραερίου πρέπει να προστατευθεί έναντι κινδύνων προερχόμενων από εξωτερικούς παράγοντες, όπως πυροθερμικά φορτία από πυρκαγιά σε γειτονικές κτιριακές και λοιπές εγκαταστάσεις.

6.2 Οι ελληνικοί κανονισμοί

Στην Ελλάδα ισχύουν δυο τεχνικοί κανονισμοί για εγκαταστάσεις υγραερίου. Ο ένας καλύπτει τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις ενώ ο δεύτερος της μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Αμφότεροι οι κανονισμοί είναι παλιοί (1993 και 2003) και είχαν βασισθεί σε

παλαιότερη έκδοση του βρετανικού κανονισμού (HSE), όπως φαίνεται παρακάτω. Λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο την χωρητικότητα μιας δεξαμενής, αλλά και την συνολική χωρητικότητα της ομάδας δεξαμενών.

Στους πίνακες 6.1 και 6.2 δίνονται αντίστοιχα οι αποστάσεις ασφαλείας των ελληνικών κανονισμών για βιομηχανικές και μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Πίνακας 6.1 Αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου για βιομηχανικές εγκαταστάσεις (Απόσπασμα από τον πίνακα 2.1 του ΦΕΚ 477 Β/93 [12])

Χωρητικότητα της μεγαλύτερης δεξαμενής σε μία ομάδα m^3	μέγιστη της ομάδας m^3	απόσταση m
$V \leq 0,5$	1,5	1,5
$0,5 < V \leq 2,5$	5	3
$2,5 < V \leq 9$	27	7,5
$9 < V \leq 200$	600	15
$200 < V \leq 300$	1200	22,5
$300 < V$	2250	30

Πίνακας 6.2 Αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου για μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις (Απόσπασμα από τον πίνακα 5.1 του ΦΕΚ 1257 Β/2003 [8])

Χωρητικότητα της μεγαλύτερης δεξαμενής σε μία ομάδα m^3	μέγιστη της ομάδας m^3	απόσταση m
$V \leq 0,5$	1,5	1,5
$0,5 < V \leq 2,5$	5	3
$2,5 < V \leq 9$	27	7,5
$9 < V \leq 100$	100	15

Ο ελληνικός κανονισμός [8] ορίζει ακόμη για δεξαμενές υγραερίου

- μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση (PS) $p = 17,5 \text{ bar}$
- μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 50°C
- ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας: -20°C .

Όπως θα αναλύσουμε παρακάτω, οι απαιτήσεις αυτές καθορίζουν τα αποδεκτά είδη χαλύβων για την κατασκευή των δεξαμενών υγραερίου, σε συμφωνία με την Οδηγία 2014/68/ΕΕ [1].

Προφανώς οι ελληνικοί κανονισμοί δεν είναι εναρμονισμένοι με την Οδηγία 2014/68/ΕΕ.

6.3 Ο βρετανικός κανονισμός

Στον πίνακα 6.3 δίνονται οι αποστάσεις ασφαλείας του βρετανικού κανονισμού για μικρές εγκαταστάσεις. Λαμβάνει υπόψη όχι μόνο την χωρητικότητα μιας δεξαμενής, αλλά και την συνολική χωρητικότητα της ομάδας δεξαμενών

Πίνακας 6.3 Αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου [18]

Χωρητικότητα της μεγαλύτερης δεξαμενής σε μία ομάδα m^3	μέγιστη της ομάδας m^3	απόσταση
		m
$V \leq 0,5$	0,8	2,5
$0,5 < V \leq 2,5$	3,5	3
$2,5 < V \leq 9$	12,5	7,5

Η αντιπαράβολή με τους ελληνικούς κανονισμούς υποδεικνύει ότι ο βρετανικός κανονισμός χρησιμοποιήθηκε ως οδηγός για την σύνταξη των ελληνικών.

6.4 Ο γαλλικός κανονισμός

Το σχετικό γαλλικό διάταγμα [19] καθορίζει ως αποστάσεις ασφαλείας A δεξαμενών υγραερίου

- για χωρητικότητα $m \leq 3500$ kg: $A \geq 3$ m
- για χωρητικότητα 3500 kg $< m \leq 5000$ kg: $A \geq 5$ m

Με μέγιστη πλήρωση 85% και πυκνότητα ≈ 575 kg/ m^3 (βουτάνιο) αντιστοιχίζονται στις μάζες κατά προσέγγιση όγκοι

- για χωρητικότητα $V \leq 7$ m^3 : $A \geq 3$ m
- για χωρητικότητα 7 $m^3 < V \leq 10$ m^3 : $A \geq 5$ m

6.5 Ο ιταλικός κανονισμός

Ο ιταλικός κανονισμός (Προεδρικό Διάταγμα [20]) λαμβάνει κατ' αρχήν υπόψη την χωρητικότητα της δεξαμενής. Περαιτέρω διακρίνει

- εγκαταστάσεις σχετιζόμενες με ιδιωτικά, βιομηχανικά, αγροτικά κτίρια, φρεάτια κλπ. και
- εγκαταστάσεις σχετιζόμενες με κτίρια δημόσιας χρήσης, για τις οποίες προβλέπει μεγαλύτερες αποστάσεις ασφαλείας.

Πίνακας 6.4 Αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου του ιταλικού κανονισμού [17]

εφαρμογή	χωρητικότητα δεξαμενής [m^3]		
	$V \leq 3$	$3 < V \leq 5$	$5 < V \leq 13$
ιδιωτικά, βιομηχανικά, αγροτικά κτίρια, φρεάτια κλπ	5	7,5	15
κτίρια δημόσιας χρήσης	10	15	22
όρια ιδιοκτησίας	3	3	6
σιδηροδρομικές γραμμές	15		
ηλεκτρικές γραμμές	15		
βυτία μετάγγισης	3		

6.6 Ο αμερικανικός κανονισμός

Ο αμερικανικός κανονισμός NFPA 58 λαμβάνει υπόψη την συνολική χωρητικότητα της ομάδας δεξαμενών. Στον πίνακα 6.5 δίνονται οι αποστάσεις ασφαλείας του αμερικανικού κανονισμού NFPA 58/2017 [21].

Πίνακας 6.5 Αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου (Απόσπασμα από τον πίνακα 6.4.1.1 του NFPA 58/2017 [21])

χωρητικότητα δεξαμενής m^3	απόσταση m	χωρητικότητα δεξαμενής m^3	απόσταση m
$V \leq 0,5$	0	$265 < V \leq 341$	30
$0,5 < V \leq 1,9$	3	$341 < V \leq 454$	38
$1,9 < V \leq 7,6$	7,6	$454 < V \leq 757$	61
$7,6 < V \leq 114$	15	$757 < V \leq 3.875$	91
$114 < V \leq 265$	23	> 3.875	122

Όμως ο αμερικανικός κανονισμός NFPA 58 προβλέπει (§6.4.1.2) ότι αν οι δεξαμενές είναι πιστοποιημένα κατασκευασμένες σύμφωνα με τον αμερικανικό κώδικα ASME, τότε οι αποστάσεις για τις δεξαμενές με όγκο $7,6 < V \leq 114 m^3$ μπορούν να μειωθούν στο μισό. Περαιτέρω προβλέπει (§6.4.1.2) ότι αν τα κτίρια είναι άκαυστης κατασκευής η απόσταση μπορεί να μειωθεί στα $3 m^3$.

Συμπεραίνεται ότι ήδη και στις ΗΠΑ, αν και δεν υφίστανται αντίστοιχη ομοσπονδιακή νομοθεσία, όπως οι ευρωπαϊκές Οδηγίες, εισάγεται σταδιακά η αλλαγή του τρόπου αντιμετώπισης των αποστάσεων ασφαλείας των δεξαμενών υγραερίου.

6.7 Ο οδηγός καλής πρακτικής της WLPGA

Η διεθνής (παγκόσμια) ένωση εταιριών υγραερίου WLPGA (THE WORLD LPG ASSOCIATION, με 350 μέλη και έδρα το Παρίσι) με την έκδοση ενός οδηγού καλής πρακτικής [22] έχει ουσιαστικά υιοθετήσει τον αμερικανικό κανονισμό.

6.8 Ο γερμανικός κανονισμός

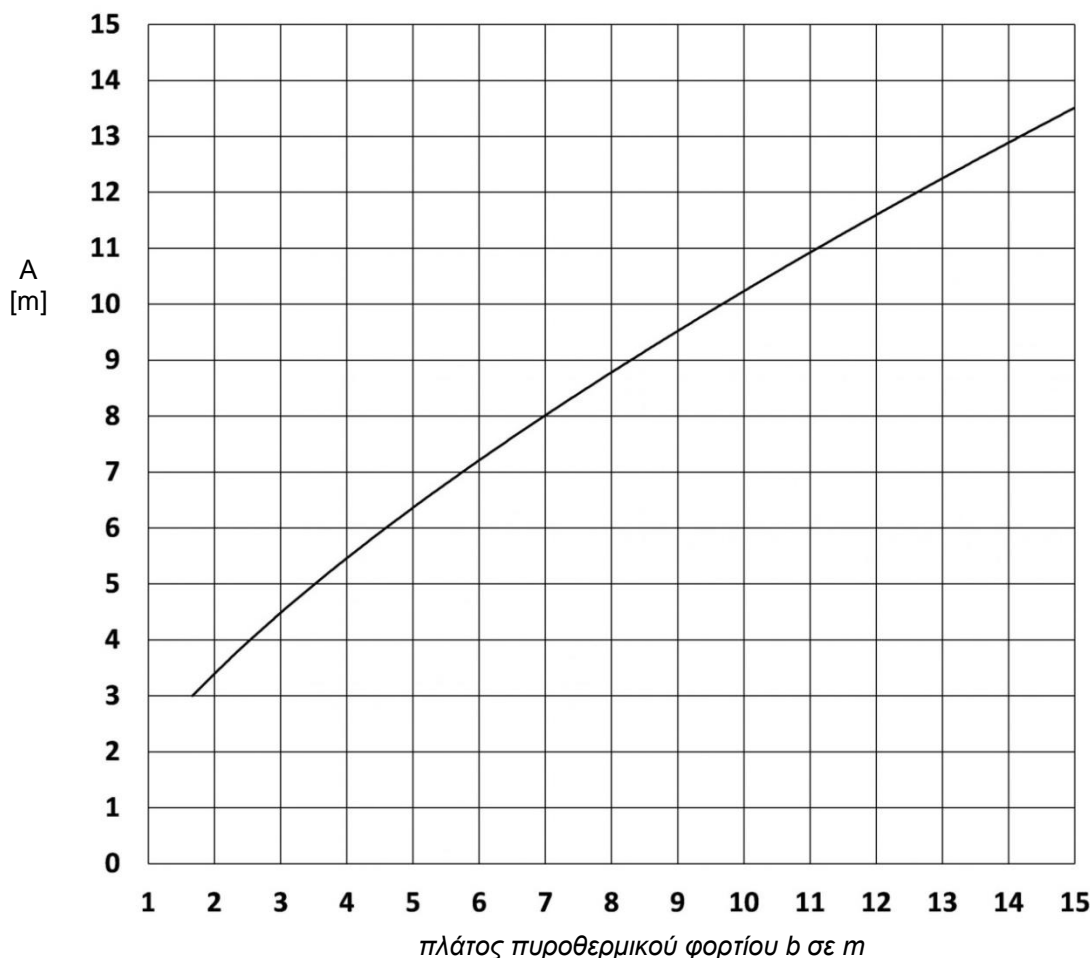
Ο γερμανικός κανονισμός DVFG-TRF [23] της γερμανικής ένωσης για τα υγραέρια DVFG, ο οποίος καλύπτει τις εγκαταστάσεις υγραερίου, όσον αφορά τις αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών υγραερίου βασίζεται στον γενικότερο γερμανικό κανονισμό για την ασφάλεια λειτουργίας για επικίνδυνες ουσίες TRBS 3146/TRGS 726 [24] του Γερμανικού Υπουργείου Εργασίας (στην συνέχεια θα αναφέρεται για συντόμευση ως TRBS 3146).

Ο γερμανικός κανονισμός TRBS 3146 βασίζεται στην παραδοχή ότι οι δεξαμενές υγραερίου, αλλά και όλων των αερίων, υγροποιημένων ή μη, πρέπει να προστατεύονται έναντι κινδύνων προερχόμενων από πυροθερμικά φορτία από πυρκαγιά σε γειτονικές κτιριακές και λοιπές εγκαταστάσεις. Οι αποστάσεις ασφαλείας προέκυψαν με βάση μελέτες και πειραματικές μετρήσεις του Ινστιτούτου Gas-Wärme-Institut [25].

Ο κανονισμός DVFG-TRF καθορίζει (§5.3.5.2) τις ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας A συναρτήσει του πλάτους b του πυροθερμικού φορτίου, οι οποίες δίνονται στον πίνακα 6.6 και αντίστοιχα στην εικόνα 6.1. Η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας, όταν υπάρχουν εν δυνάμει πυροθερμικά φορτία, είναι 5 m.

Πίνακας 6.6 Αποστάσεις ασφαλείας A συναρτήσει του πλάτους b πυροθερμικού φορτίου

πλάτος b [m]	$\leq 3,5$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
απόσταση ασφαλείας A [m]	5	5,5	6,4	7,2	8,0	8,7	9,5	10,2	10,9	11,6	12,3	12,9	13,6



Εικόνα 6.1 Αποστάσεις ασφαλείας A συναρτήσει του πλάτους b πυροθερμικού φορτίου

Για πλάτη πυροθερμικού φορτίου μεγαλύτερα από 15 m ο κανονισμός DVFG-TRF παραπέμπει στον ίδιο τον κανονισμό TRBS 3146.

6.8 Επιλογή της μεθόδου υπολογισμού των αποστάσεων ασφαλείας

Από τον καθορισμό του στόχου της διπλωματικής εργασίας και την ανωτέρω παρουσίαση των μεθόδων καθορισμού με βάση εθνικούς κανονισμούς, έγινε σαφές ότι για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις της Οδηγίας 2014/68/ΕΕ οι αποστάσεις ασφαλείας πρέπει να μην εκτιμηθούν εμπειρικά, αλλά να προσδιορισθούν

- είτε με υπολογιστική μέθοδο,
- είτε με πειραματική μέθοδο σχεδιασμού.

Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι ίδιος με τον στόχο της θέσπισης του γερμανικού κανονισμού TRBS 3146. Καθώς πρόκειται για ζήτημα ασφαλείας και επειδή δεν έχει αναπτυχθεί κάποια άλλη διεθνώς αποδεκτή μέθοδος υπολογισμού, ο υπολογισμός των αποστάσεων ασφαλείας πρέπει να στηριχθεί στον πειραματικά αποδεδειγμένο ως ασφαλή και εφαρμοζόμενο υπολογισμό με βάση τον κανονισμό TRBS 3146 στην Γερμανία, η οποία αποτελεί κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης με εξαιρετικά αναπτυγμένο σύστημα κανόνων ασφαλείας.

Η παρούσα εργασία πρέπει να προσαρμόσει τα συμπεράσματα του κανονισμού TRBS 3146 στις διαφορετικές απαιτήσεις των ελληνικών κανονισμών σε σύγκριση με τους γερμανικούς κανονισμούς.

Ο γερμανικός κανονισμός DVFG-TRF ορίζει για τις δεξαμενές υγραερίου

- μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 40°C
- ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας: -10°C
- μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση 15,6 bar.

Ο ελληνικός κανονισμός [2] ορίζει

- μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 50°C
- ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας: -20°C
- μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση (PS) $p = 17,5$ bar

Η σημαντική διαφοροποίηση του καθορισμού ελάχιστης θερμοκρασίας λειτουργίας οφείλεται στο ότι στην Ελλάδα πολλές μονάδες υγραερίου λειτουργούν λαμβάνοντας αέρια φάση με φυσική εξαερίωση, οπότε η εξαερίωση απορροφά ενέργεια από την μάζα του υγραερίου, ψύχοντάς το κατά περίπτωση μέχρι θερμοκρασίες μικρότερες από -10°C. Για αυτό το λόγο έχει οριστεί για λόγους ασφαλείας ως ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας -20°C.

Η ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας -20°C οδηγεί σε επιλογή κατάλληλων χαλύβων P275NH κλπ. κατά EN 10028-3 με ελάχιστο όριο διαρροής $R_{p0,2} = 275$ MPa. Αντιθέτως, οι γερμανικοί κανονισμοί δέχονται ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας -10°C, η οποία οδηγεί σε επιλογή ως κατάλληλων χαλύβων P235GH κλπ. κατά EN 10028-2 με ελάχιστο όριο διαρροής $R_{p0,2} = 235$ MPa, δηλαδή χαμηλότερο σε σχέση με τους χάλυβες στην Ελλάδα.

Ο καθορισμός από τον ελληνικό κανονισμό ως μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας τους 50°C καθορίζει επίσης υψηλότερη πίεση ενεργοποίησης της ασφαλιστικής βαλβίδας εκτόνωσης με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του υγραερίου μέσα στην δεξαμενή κατά την εκτόνωση είναι 54°C, ενώ για τον γερμανικό κανονισμό η θερμοκρασία του υγραερίου μέσα στη δεξαμενή κατά την εκτόνωση είναι 42°C.

Θα στηθεί, όμως και ένα σχετικά απλό σύστημα υπολογισμού με βάση τις αρχές της Θερμοδυναμικής και της Μετάδοσης Θερμότητας και θα γίνει σύγκριση με τις πειραματικά προσδιοριζόμενες αντίστοιχες τιμές.

7. Πρόνοιες του Κανονισμού TRBS 3146

7.1 Γενικά

Ο Κανονισμός TRBS 3146 [24] ισχύει για σταθερές εγκαταστάσεις αποθήκευσης αερίων, σε αέρια φάση ή υγροποιημένων, και καλύπτει την κατασκευή, εγκατάσταση, πλήρωση, εκκένωση, συντήρηση, θέση εκτός λειτουργίας και αποσυναρμολόγηση.

Θεωρεί μέγιστο χρόνο έκθεσης σε πυροθερμικό φορτίο 90 min, χρόνος μέσα στον οποίο εννοείται πως θα έχει γίνει παρέμβαση της πυροσβεστικής υπηρεσίας.

Ο Κανονισμός TRBS 3146 βασίστηκε σε μελέτες και πειραματικές μετρήσεις του Ινστιτούτου Gas-Wärme-Institut [25]. Είναι σε ισχύ μεγάλο χρονικό διάστημα (από την δεκαετία του 1990), και έχει αποδειχθεί ότι διασφαλίζει την ασφάλεια στις εγκαταστάσεις, χωρίς να απαιτεί αδικαιολόγητα μεγάλες αποστάσεις ασφαλείας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ως βάση για τους δικούς μας υπολογισμούς.

Ο Κανονισμός TRBS 3146 καλύπτει δύο παραρτήματα

- την διαστασιολόγηση των βαλβίδων ασφαλείας απόρριψης σε σταθερά δοχεία αερίου υπό πίεση για υγροποιημένα αέρια λόγω προσαγόμενης ακτινοβολίας θερμότητας, και
- τον καθορισμό των αποστάσεων ασφαλείας για σταθερά δοχεία αερίων υπό πίεση για υφιστάμενα πυροθερμικά φορτία.

Τα δύο παραρτήματα είναι συνεργαζόμενα, καθώς ο καθορισμός των αποστάσεων ασφαλείας στο δεύτερο παράρτημα στηρίζεται στην διαστασιολόγηση των βαλβίδων και άρα στην απαγόμενη παροχή υγραερίου με βάση το πρώτο παράρτημα.

Τα δύο παραρτήματα καλύπτουν προφανώς τα υγραέρια και γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν στο καθορισμό των αποστάσεων ασφαλείας του γερμανικού κανονισμού υγραερίου DVFG-TRF [23]. Παρακάτω αναλύονται αυτά τα δύο παραρτήματα, ώστε οι διατάξεις τους να χρησιμοποιηθούν στον καθορισμό των αποστάσεων ασφαλείας των εγκαθιστάμενων δεξαμενών υγραερίων στην Ελλάδα.

7.2 Διαστασιολόγηση των βαλβίδων ασφαλείας

Το παράρτημα 2 του TRBS 3146 ισχύει για υγροποιημένα αέρια, επειδή μόνο για αυτά, σε περίπτωση προσαγωγής θερμότητας, μπορούν να απαιτούνται σημαντικές παροχές απόρριψης των βαλβίδων ασφαλείας.

Εάν σε σταθερά δοχεία αερίου υπό πίεση υπερβληθεί η επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας (μέγιστη θερμοκρασία του περιεχόμενου αερίου), π.χ. λόγω ακτινοβολίας θερμότητας κατά μια πυρκαγιά, τότε θα υπερβληθεί η πίεση απόκρισης της βαλβίδας ασφαλείας εξαιτίας της ανόδου της πίεσης ατμών του αερίου.

Οι μέγιστες θερμοκρασίες προκύπτουν στο επάνω μέρος της δεξαμενής, επειδή σ' αυτήν λαμβάνει χώρα απορρόφηση θερμότητας από το χαλύβδινο τοίχωμα μόνο μέσω της αέριας φάσης, η οποία έχει χειρότερο συντελεστή συναγωγής σε σχέση με την υγρή φάση και άρα ψύχεται λιγότερο. Σ' αυτό το μέρος των τοιχωμάτων του δοχείου επιτρέπεται να αναπτυχθεί κατά μέγιστο η επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού.

Από τις γεωμετρικές αναλογίες κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας ενός δοχείου με μια πηγή θερμότητας και τη συντηρητική παραδοχή, ότι

— στο δοχείο αερίου προσάγεται μόνο θερμότητα με ακτινοβολία, και δεν απάγεται θερμότητα με ακτινοβολία ή συναγωγή και

— το δοχείο αερίου δέχεται ομοιόμορφη ακτινοβολία στον οριζόντιο άξονα του κυλίνδρου, λαμβάνεται από το ισοζύγιο θερμότητας η αντίστοιχη εξατμιζόμενη παροχή μάζας του υγροποιημένου αερίου. Αυτήν την παροχή μάζας πρέπει να είναι ικανή να απάγει η βαλβίδα ασφαλείας. Με περαιτέρω παραδοχές, λαμβάνεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{m} = 1,063 \cdot t^{1,64} \cdot \left(\frac{A}{r} \right) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

όπου

\dot{m} = απαγόμενη παροχή μάζας σε kg/s

t = επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού (υγραερίου) σε °C

A = ακτινοβολούμενη επιφάνεια του δοχείου = $d \cdot l$

d = διάμετρος του δοχείου σε m

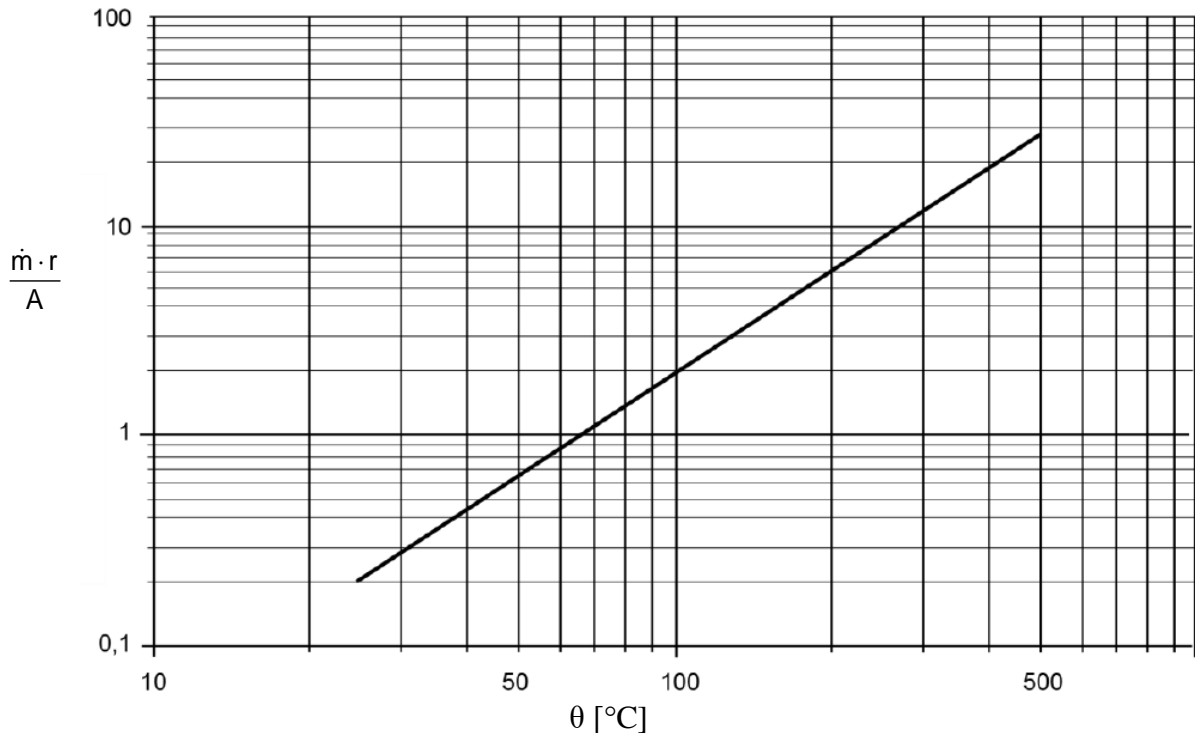
l = μήκος του δοχείου σε m

r = ενθαλπία εξατμίσεως του αερίου σε kJ/kg.

Με αναγωγή της εξίσωσης

$$\frac{\dot{m} \cdot r}{A} = 1,063 \cdot t^{1,64} \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

λαμβάνεται το διάγραμμα της εικόνας 7.1.



θερμοκρασία επιφάνειας του ακτινοβολούμενου δοχείου (επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού)
 Εικόνα 7.1: Υπολογισμός της αναγκαίας παροχής απόρριψης βαλβίδων ασφαλείας

Παράδειγμα 1: Δεξαμενή αποθήκευσης προπανίου

Το ακόλουθο παράδειγμα επεξηγεί τον υπολογισμό της απαιτούμενης παροχής απόρριψης μιας βαλβίδας ασφαλείας σε μια δεξαμενή προπανίου.

Το υποθετικό πυροθερμικό φορτίο θα πρέπει να οδηγήσει στην επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού (θερμοκρασία επιφάνειας στην περιοχή της αέριας φάσης) των 250°C στην δεξαμενή, το οποίο με

- υπολογισμό της απόστασης από το πυροθερμικό φορτίο σύμφωνα με το Παράρτημα 3 του TRBS 3146,
 - συνεχή φόρτιση από ακτινοβολία θερμότητας και
 - ενεργοποιημένη βαλβίδα ασφαλείας
- αποδίδει θερμοκρασία 42°C στην υγρή φάση του αερίου.

Αυτή η θερμοκρασία αντιστοιχεί σε πίεση 17,2 bar, η οποία είναι η πίεση κατά την οποία ενεργοποιείται η βαλβίδα ασφαλείας. Εξηγήσαμε στο κεφάλαιο 2 ότι η βαλβίδα ενεργοποιείται όταν η πίεση ξεπεράσει το 10% της επιτρεπόμενης πίεσης των 15,6 bar. Η ψύξη μέσω της εξάτμισης του αερίου διατηρεί την υγρή φάση στη θερμοκρασία των 42°C. Κατά την διαστασιολόγηση της βαλβίδας ασφαλείας με τις ανωτέρω καθορισμένες προδιαγραφές δίνεται πάντοτε η θερμοκρασία η οποία αντιστοιχεί στην πίεση απόρριψης του αερίου (δηλ. στην πίεση ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας). Οι ακόλουθες τιμές για το μήκος και τη διάμετρο της δεξαμενής είναι ενδεικτικές.

Πίεση ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας: $p = 15,6 \text{ bar}$

Ενθαλπία εξάτμισης του προπανίου στους $42 \text{ }^\circ\text{C}$: $r = 309 \text{ kJ/kg}$

Μήκος της δεξαμενής: $l = 4,8 \text{ m}$

Διάμετρος της δεξαμενής: $d = 1,25 \text{ m}$

Από την εξίσωση ή αντίστοιχα το διάγραμμα της εικόνας 7.1 προκύπτει στους 250°C

$$\frac{\dot{m}r}{A} = 9,1$$

Από αυτή προκύπτει η απαγόμενη ποσότητα αερίου μέσω της βαλβίδας ασφαλείας

$$\begin{aligned}\dot{m} &= 9,1 \cdot A/r = 9,1 \cdot 6/309 \\ &= 0,177 \text{ σε kg/s} \\ &= 636 \text{ σε kg/h.}\end{aligned}$$

7.3 Καθορισμός των αποστάσεων ασφαλείας σταθερών δοχείων από πυροθερμικά φορτία

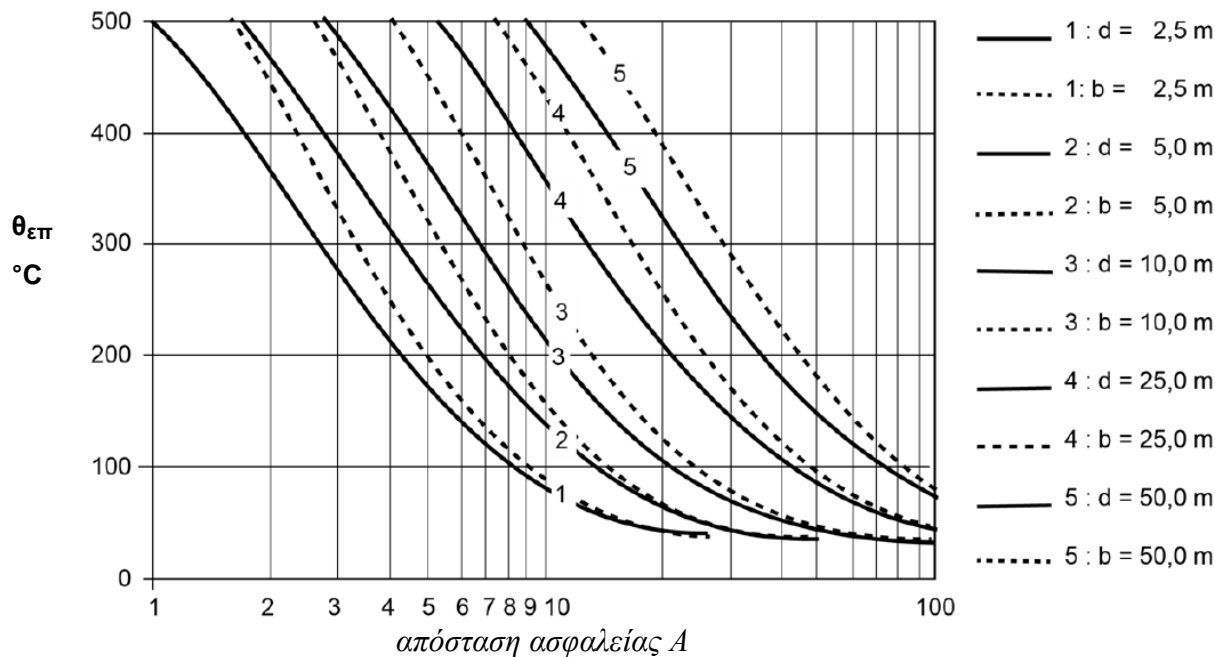
Οι παρακάτω υπολογισμοί καλύπτουν περιπτώσεις στις οποίες

- το πυροθερμικό φορτίο προέρχεται είτε από μια λεκάνη συλλογής υγρού καυσίμου, είτε από την καύση καυστών υλικών (όπως ξύλο ή συνθετικά υλικά) περιβλήματος γειτονικού κτιρίου ή άλλης παρόμοιας κατασκευής,
- το υλικό κατασκευής της δεξαμενής είναι χάλυβες οι οποίοι να μεν προορίζονται για την κατασκευή δοχείων υπό πίεση, αλλά δεν είναι κατάλληλοι για χαμηλές θερμοκρασίες (χάλυβες του πίνακα 7.1)

Σημείωση: Υπενθυμίζεται ότι στην χώρα μας προδιαγράφονται χάλυβες για χαμηλές θερμοκρασίες.

Η απόσταση ασφαλείας μεταξύ πυροθερμικού φορτίου και δεξαμενής υγραερίου σε εξάρτηση από την επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού και το πλάτος του πυροθερμικού φορτίου προκύπτει από την εικόνα 7.2.

Ως επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού χρησιμοποιείται η θερμοκρασία, στην οποία η ασφάλεια έναντι του ορίου διαρροής είναι ίση με την καθοριζόμενη στον πίνακα 7.1. Αυτή λαμβάνεται, αφού διαιρεθεί το όριο διαρροής στην επιτρεπόμενη θερμοκρασία δωματίου 20°C δια του συντελεστή ασφαλείας S ($S=1,5$) και με αυτή την τιμή του ορίου διαρροής από τους πίνακες υλικών προσδιορίζεται η αντίστοιχη θερμοκρασία. Ο πίνακας 7.1 περιέχει παραδείγματα για μερικά συνήθη είδη χάλυβων.



Εικόνα 7.2: Απόσταση ασφαλείας ως συνάρτηση της επιτρεπόμενης θερμοκρασίας υλικού και του πλάτους του πυροθερμικού φορτίου b ή d , όπου b πλάτος τετραγωνικού πυροθερμικού φορτίου και d κυκλικού.

Πίνακας 7.1 Επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού για μερικά είδη χαλύβων για όλα τα αέρια (για πάχη τοιχώματος ≤ 16 mm)

Είδος χάλυβα		όριο διαρροής K για θερμοκρασία δωματίου σε MPa	K/S (με $S = 1,5$) σε MPa	επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού σε °C
σύμβολο	αριθμός υλικού			
P235GH	1.0345	235	156	289
P265GH	1.0425	265	176	290
16Mo3	1.5415	275	183	329
S235JR	1.0038	235	156	214
S355J2	1.0577	355	236	164

Για τις τιμές της επιτρεπόμενης θερμοκρασίας υλικού έγινε παρεμβολή στις τιμές του πίνακα 7.1α.

Πίνακας 7.1α Όριο ροής 0,2% σε αυξημένες θερμοκρασίες χαλύβων κατά EN 10028-2

Είδος χάλυβα σύμβολο αρ. υλικού	πάχος t mm		ελάχιστο όριο ροής-0,2 $R_{p0,2}$ σε N/mm ² σε θερμοκρασία t_c °C											
			άνω	έως	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	P235GH 1.0345	-	16	227	214	198	182	167	153	142	133			
	16	40	218	205	190	174	160	147	136	128				
P265GH 1.0425	-	16	256	241	223	205	188	173	160	150				
	16	40	247	232	215	197	181	166	154	145				
16Mo3 1.5415	-	16	273	264	250	233	213	194	175	159	147	141		
	16	40	268	259	245	228	209	190	172	156	145	139		

Το διάγραμμα της εικόνας 7.2 υπολογίστηκε για το καύσιμο Diesel ως μέσο της πυρκαγιάς σε εξάρτηση από τη διάμετρο του πυροθερμικού φορτίου d (κυκλικά πυροθερμικά φορτία) ή το πλάτος του πυροθερμικού φορτίου b (ορθογώνια πυροθερμικά φορτία).

Οριακή συνθήκη για τις καμπύλες της εικόνας 7.2 είναι ένταση φλόγας 100 kW/m^2 (π.χ. καύσιμο Diesel). Επιφάνεια πυρκαγιάς $\pi(d/2)^2$ ή $b \times b$ σε m^2 .

Επειδή μόνο λίγα υλικά, π.χ. το πεντάνιο, έχουν μεγαλύτερη ένταση φλόγας (εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία $> 100 \text{ kW/m}^2$) από το καύσιμο Diesel, οι πυρκαγιές π.χ. από πλαστικό, ξύλο, άχυρα λόγω της μικρότερής τους έντασης φλόγας και της μικρότερης διάρκειας πυρκαγιάς καλύπτονται επίσης κατά τον υπολογισμό των αποστάσεων από το διάγραμμα. Περαιτέρω κατά τον υπολογισμό του διαγράμματος ενσωματώθηκαν το μήκος φλόγας (ενεργό ύψος φλόγας) καθώς και το βάθος του πυροθερμικού φορτίου και μπορούν να μην ληφθούν υπόψη στην πρακτική εφαρμογή.

Οι πυρκαγιές από υγραέριο λόγω της μικρότερης έντασης της τους φλόγας καλύπτονται επίσης κατά τον υπολογισμό των αποστάσεων από το διάγραμμα της εικόνας 7.2.

Αν αποφεύγεται η επαφή με την φλόγα, μπορεί να αμεληθεί η επίδραση του ανέμου στη γεωμετρία της φλόγας, επειδή με τις διαστασιολογήσεις για το διάγραμμα λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Πυροθερμικά φορτία επάνω από το ύψος της κορυφής του δοχείου π.χ. πυρκαγιά στέγης, έχουν καλυφθεί από τις προκείμενες τιμές, επειδή οι τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μικρότερες σ' αυτές τις περιπτώσεις.

Κατά τον προσδιορισμό της απαιτούμενης απόστασης ασφαλείας είναι δευτερεύον το μέγεθος και η τοποθέτηση του σταθερού δοχείου αερίων υπό πίεση. Καθοριστικό είναι το σημείο του δοχείου, το οποίο είναι πλησιέστερο στο πυροθερμικό φορτίο, επειδή η ένταση της ακτινοβολίας στο δοχείο μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης. (εικόνα 7.3)

Για παράκεντρη διάταξη του σταθερού δοχείου αερίων υπό πίεση σε ορθογώνια πυροθερμικά φορτία (όπως στην εικόνα 7.4, περιπτώσεις 2 και 3) οι απαιτούμενες αποστάσεις ασφαλείας πρέπει να προσδιορισθούν από διάγραμμα μέσω των βοηθητικών πλατών b_1 .

Στις περιπτώσεις 2 και 3 της εικόνας 7.4, στις οποίες ως πλάτη του πυροθερμικού φορτίου εφαρμόζονται τα βοηθητικά πλάτη b_1 ορίζονται ως εξής:

- Χαράσσουμε δύο ευθείες από τις δύο γωνίες, οι οποίες δεν είναι η εγγύτερη και η πλέον απομακρυσμένη, και συνδέουμε τα σημεία αυτά με την θεωρούμενη δεξαμενή.
- Χαράσσουμε την διχοτόμο της γωνίας η οποία σχηματίζεται από τις δύο ευθείες.
- Χαράσσουμε μία γραμμή κάθετη στην διχοτόμο, η οποία διέρχεται από την εγγύτερη γωνία.

Τα βοηθητικά πλάτη b_1 είναι τα μήκη των βάσεων των τριγώνων των σχηματιζόμενων από τις τρεις χαραχθείσες ευθείες.

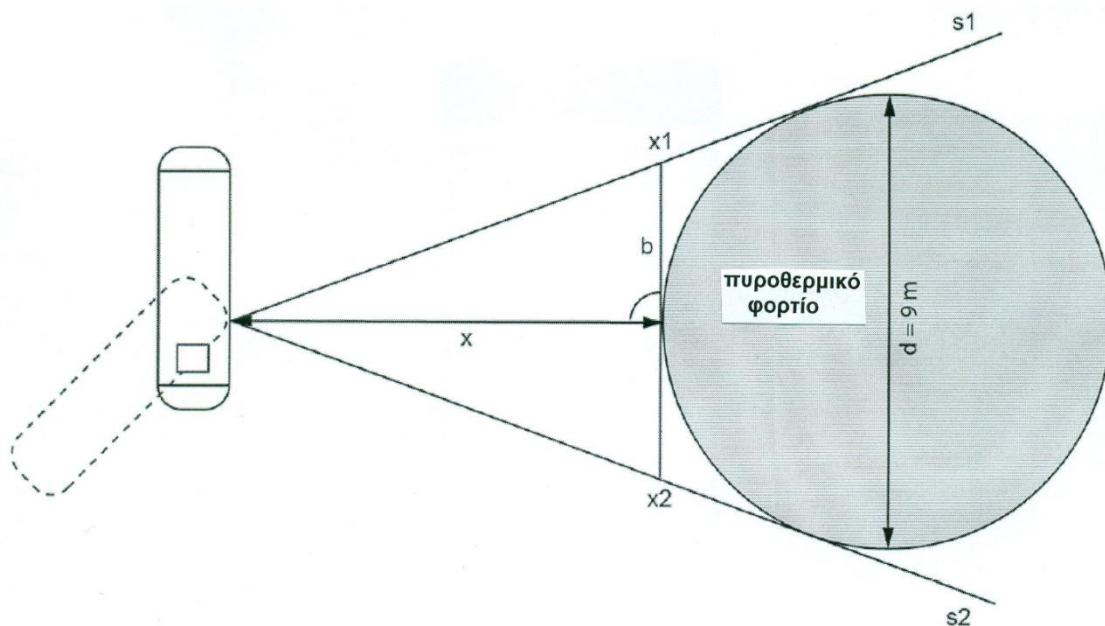
Η διαστασιολόγηση της βαλβίδας ασφαλείας πρέπει να γίνεται για την προσαγωγή θερμότητας στην προσδιορισμένη επιτρεπόμενη θερμοκρασίας υλικού έτσι ώστε να μην είναι δυνατή μια περαιτέρω αύξηση της πίεσης επάνω από την πίεση σχεδιασμού του σταθερού δοχείου αερίων υπό πίεση.

Αν μόνο ένα τμήμα κτιρίου αποτελείται από καυστά υλικά, π.χ. θύρες από καυστά υλικά, τότε το πλάτος αυτού του τμήματος καθορίζει το πλάτος του πυροθερμικού φορτίου.

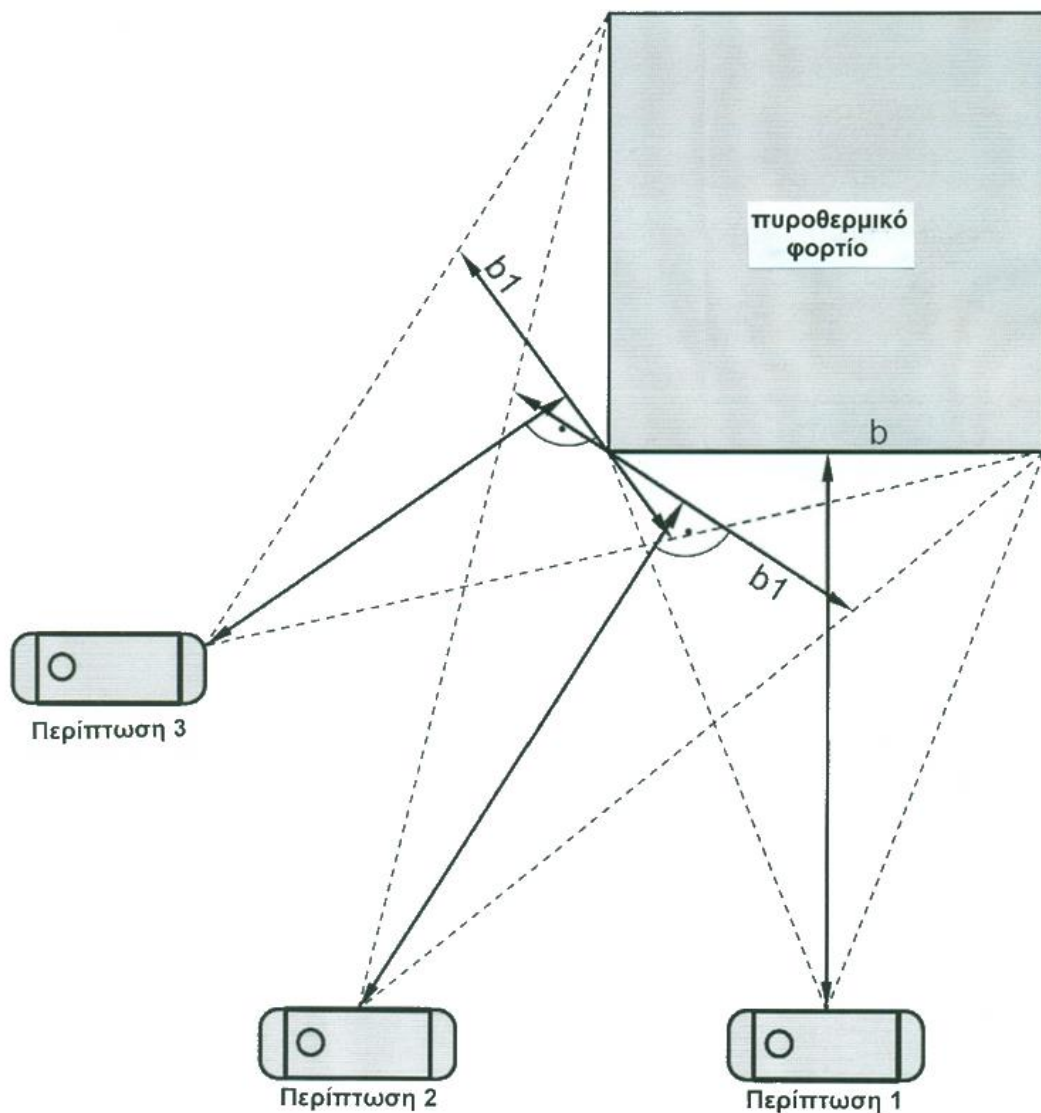
Παράδειγμα

- Υλικό σταθερού δοχείου αερίων υπό πίεση: P265GH
- Επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού: 290°C
- Πυροθερμικό φορτίο: συνθετικό υλικό (πλαστικό)
- Πλάτος πυροθερμικού φορτίου $b = 5\text{ m}$

Από το διάγραμμα της εικόνας 7.2 προκύπτει απόσταση ασφαλείας $= 5,8\text{ m}$



Εικόνα 7.3 Απόσταση ασφαλείας από κυκλικά πυροθερμικά φορτία



Εικόνα 7.4 Απόσταση ασφαλείας από ορθογώνια πυροθερμικά φορτία

7.4 Καθορισμός των αποστάσεων ασφαλείας για δεξαμενές υγραερίου κατά DVFG-TRF

Ο γερμανικός κανονισμός DVFG-TRF [23] για τις εγκαταστάσεις υγραερίου, όπως είδαμε παραπάνω, δίνει πίνακα αποστάσεων ασφαλείας A συναρτήσεως του πλάτους b πυροθερμικού φορτίου, πίνακας 7.2.

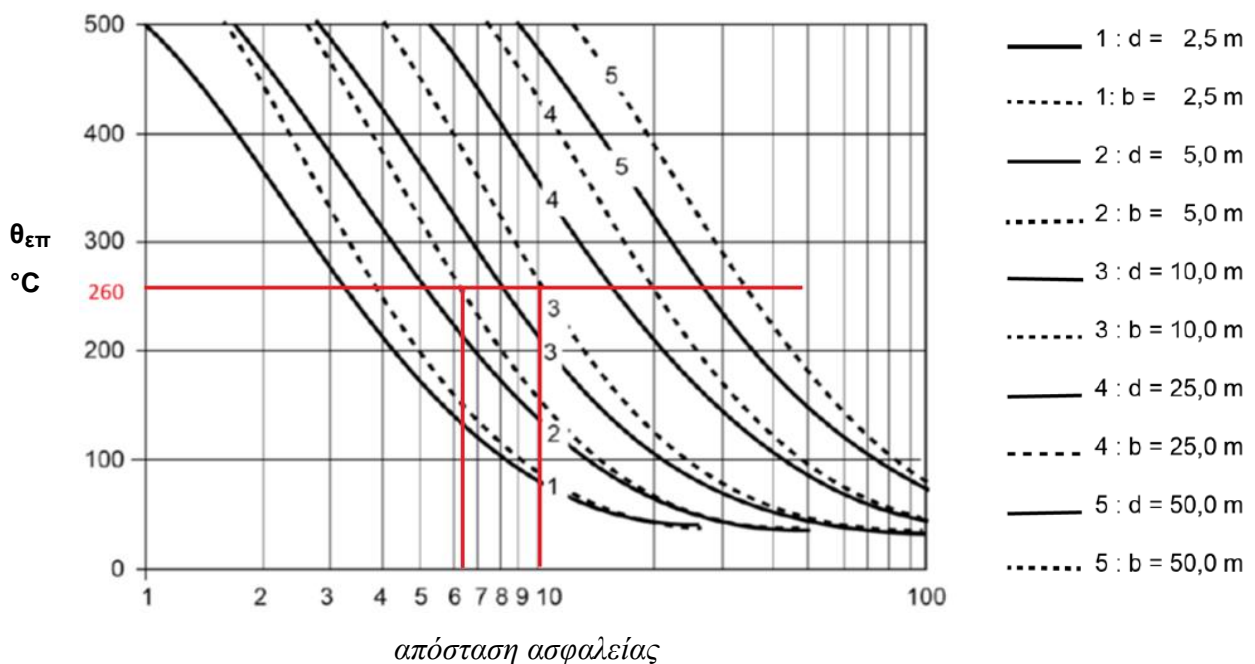
Πίνακας 7.2 Αποστάσεις ασφαλείας A συναρτήσεως του πλάτους b πυροθερμικού φορτίου για το υγραέριο

πλάτος b [m]	≤3,5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
απόσταση ασφαλείας A [m]	5	5,5	6,4	7,2	8,0	8,7	9,5	10,2	10,9	11,6	12,3	12,9	13,6

Η σύγκριση των τιμών του πίνακα 7.2 με τις τιμές οι οποίες λαμβάνονται από το διάγραμμα της εικόνας 7.2 υποδεικνύει ότι στον πίνακα του DVFG-TRF οι τιμές λήφθηκαν για την περίπτωση στην οποία το πυροθερμικό φορτίο είναι ορθογώνιο και το πλάτος του b λαμβάνεται όπως υποδεικνύεται στην εικόνα 7.2, δηλαδή από τις διακεκομμένες καμπύλες.

Επιπλέον, η σύγκριση των τιμών του πίνακα 7.2 με τις τιμές οι οποίες λαμβάνονται από το διάγραμμα της εικόνας 7.2 υποδεικνύει ότι στον πίνακα του DVFG-TRF, με την παραδοχή ότι χρησιμοποιούνται χάλυβες για σκοπούς πίεσης (P235GH, P265GH) και όχι κατασκευαστικοί χάλυβες (S235JR, S265JR), οι τιμές λήφθηκαν για επιτρεπόμενη θερμοκρασία με χαμηλότερη τιμή, όχι για 289°C (από τον πίνακα 7.1), αλλά για 260°C (περίπου 10% χαμηλότερη θερμοκρασία).

Από το διάγραμμα της εικόνας 7.2 (εκ του TRBS 3146) για πλάτος πυροθερμικού φορτίου $b=10\text{ m}$ και απόσταση $10,2\text{ m}$ (τιμές του πίνακα 5.5) προκύπτει θερμοκρασία $\theta = 260^{\circ}\text{C}$. (εικόνα 7.5) Προφανώς η επιλογή έγινε για αύξηση του επιπέδου ασφαλείας.



Εικόνα 7.5 Επιτρεπόμενη θερμοκρασία για απόσταση ασφαλείας ζεύγη τιμών του πίνακα 7.2

Η ελάχιστη τιμή της απόστασης ασφαλείας $A = 5\text{ m}$ για πλάτος $b \leq 3,5\text{ m}$ αποτελεί προφανώς επιλογή της επιτροπής σύνταξης του κανονισμού DVFG-TRF και δεν προκύπτει από τις καμπύλες.

8. Καθορισμός των αποστάσεων ασφαλείας στην Ελλάδα με βάση τις πρόνοιες του Κανονισμού TRBS 3146

8.1 Γενικά

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, ο υπολογισμός των αποστάσεων ασφαλείας στην Ελλάδα θα βασισθεί στον πειραματικά αποδεδειγμένο ως ασφαλή και εφαρμοζόμενο στην Γερμανία υπολογισμό, σύμφωνα με τον κανονισμό TRBS 3146.

Θα προσαρμόσουμε τα συμπεράσματα του κανονισμού TRBS 3146 στις διαφορετικές απαιτήσεις των ελληνικών κανονισμών σε σύγκριση με τον γερμανικό κανονισμό DVFG-TRF. Συγκεκριμένα θα εξεταστούν:

- η επίδραση της μεταβολής της πίεσης ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας και
- η επίδραση της μεταβολής των χρησιμοποιούμενων στην κατασκευή χαλύβων

8.2 Επίδραση της μεταβολής της πίεσης ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας

Η πίεση ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας σύμφωνα με τον γερμανικό κανονισμό για τα υγραέρια (DVFG-TRF) είναι:

$$p = 15,6 \text{ bar, όπως στο παράδειγμα 1.}$$

Η απαγόμενη μέσω της βαλβίδας ασφαλείας ποσότητα υπολογίστηκε $\dot{m} = 0,177$ σε kg/s ή = 636 σε kg/h.

Η πίεση ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό [8] είναι $p = 17,5$ bar. Σε αυτήν την θερμοκρασία αντιστοιχεί θερμοκρασία ισορροπίας 54 °C.

Άρα έχουμε

$$\text{Πίεση ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας: } p = 17,5 \text{ bar}$$

$$\text{Ενθαλπία εξάτμισης του προπανίου στους 54 °C: } r = 280 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Μήκος της δεξαμενής: } l = 4,8 \text{ m}$$

$$\text{Διάμετρος της δεξαμενής: } d = 1,25 \text{ m}$$

Από την εξίσωση ή αντίστοιχα το διάγραμμα της εικόνας 7.1 προκύπτει στους 280°C (εκτιμώμενη θερμοκρασία τοιχώματος της δεξαμενής).

$$\frac{\dot{m}r}{A} = 11$$

Από αυτήν προκύπτει η απαγόμενη μέσω της βαλβίδας ασφαλείας ποσότητα

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 11 \cdot A / r = 11 \cdot 6 / 280 \\ &= 0,238 \text{ σε kg/s ή } = 849 \text{ σε kg/h.} \end{aligned}$$

Η απαγόμενη ποσότητα των 0,238 kg/s είναι σημαντικά αυξημένη κατά $(0,238 - 0,177) / 0,177 = 0,344 = 34,4\%$

έναντι της απαγόμενης ποσότητας που αντιστοιχεί στον γερμανικό κανονισμό.

Όμως, όπως καθορίζεται στον κανονισμό TRBS 3146, η μεταβολή της πίεσης επηρεάζει μόνο την επιλογή και την ρύθμιση της βαλβίδας ασφαλείας απόρριψης και δεν έχει επίδραση στον καθορισμό της απόστασης ασφαλείας, εάν τηρείται ο κανονισμός TRBS 3146 ως σύνολο. Σημειώνεται ότι η βαλβίδα ασφαλείας απόρριψης δεν είναι διαρκώς ενεργοποιημένη και δεν απορρίπτει υγραέριο συνεχώς.

8.3 Προσδιορισμός των μέγιστων επιτρεπόμενων θερμοκρασιών των χαλύβων

Η πίεση της βαλβίδας ασφαλείας σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό μπορεί να ρυθμισθεί μέχρι τα 19,25 bar. Θεωρούμε ότι η ρύθμιση στα 17,5 bar είναι ήδη υψηλή, πόσο μάλλον στα 19,25 bar, καθώς η πίεση ισορροπίας του προπανίου στους 50°C είναι 16,2 bar.

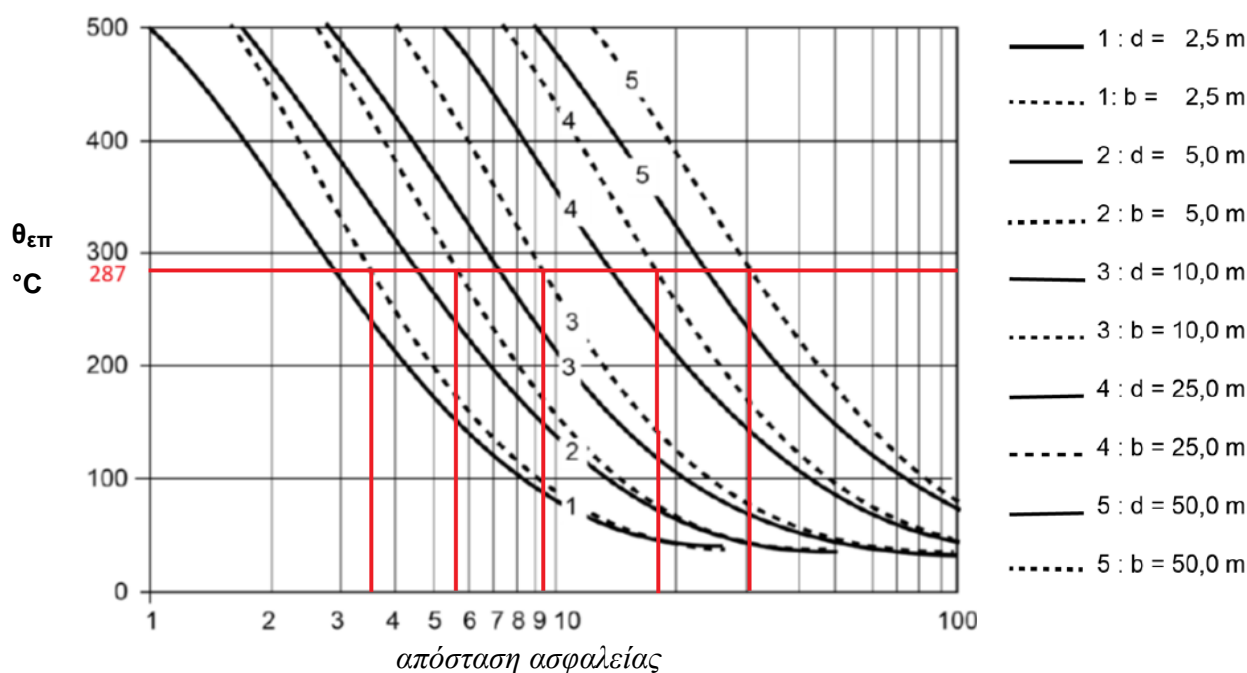
Ως επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού χρησιμοποιείται η θερμοκρασία, στην οποία η ασφάλεια έναντι του ορίου διαρροής είναι ίση με την καθοριζόμενη στον πίνακα 8.1. Αυτή λαμβάνεται, αφού διαιρεθεί το όριο διαρροής στην επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας δια του συντελεστή ασφαλείας S ($S=1,5$) και με αυτήν την τιμή του ορίου διαρροής από τον πίνακα 5.4 υλικών προσδιορίζεται η αντίστοιχη θερμοκρασία.

Πίνακας 8.1 Επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού για τα επιτρεπόμενα είδη χαλύβων στην Ελλάδα (για πάχη τοιχώματος ≤ 16 mm)

Είδος χάλυβα		όριο διαρροής K για θερμοκρασία δωματίου σε MPa	K/S (με $S = 1,5$) σε MPa	επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού σε °C
σύμβολο	αριθμός υλικού			
P275NH	1.0487	275	183	287
P275NL1	1.0488			
P275NL2	1.1104			
P355N	1.0562	355	236	290
P355NH	1.0565			
P355NL1	1.0566			
P355NL2	1.1106			
P460NH	1.8935	460	306	288
P460NL1	1.8915			
P460NL2	1.8918			

Από την σύγκριση των τιμών του πίνακα 8.1 με τον πίνακα 7.1 διαπιστώνουμε ότι οι επιτρεπόμενοι χάλυβες για την κατασκευή των δεξαμενών υγραερίου στην Ελλάδα, αν και έχουν διαφορετικό όριο διαρροής K για θερμοκρασία δωματίου από αυτούς που χρησιμοποιούνται στη Γερμανία, εντούτοις έχουν σχεδόν την ίδια επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού, περίπου 287°C (ενώ στη Γερμανία 289°C, πρακτικά ίδιες).

Από την σύγκριση των πινάκων 7.1 και 8.1 διαπιστώνουμε ότι οι επιτρεπόμενοι χάλυβες για την κατασκευή των δεξαμενών υγραερίου στην Ελλάδα έχουν ουσιαστικά την ίδια επιτρεπόμενη θερμοκρασία με τους χάλυβες οι οποίοι ικανοποιούν τις γερμανικές απαιτήσεις.



Εικόνα 8.1 Αποστάσεις ασφαλείας για επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού 287°C

Ως επόμενο βήμα, χαράσσουμε στο διάγραμμα της εικόνας 8.1 μια οριζόντια ευθεία για θερμοκρασία 287°C και λαμβάνουμε τις τιμές του πίνακα 8.2.

Πίνακας 8.2 Αποστάσεις ασφαλείας A συναρτήσει του πλάτους b πυροθερμικού φορτίου για επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού 287°C

πλάτος b [m]	2,5	5	10	25	50
απόσταση ασφαλείας A [m]	3,5	5,8	9,1	18	30

Με παρεμβολές στις τιμές του πίνακα σχηματίζουμε τον πίνακα 8.3, σε αντιστοιχία με τον πίνακα 6.6, ο οποίος λήφθηκε από τον γερμανικό κανονισμό DVFG-TRF

Πίνακας 8.3 Αποστάσεις ασφαλείας A συναρτήσει του πλάτους b πυροθερμικού φορτίου για επιτρεπόμενη θερμοκρασία υλικού 287°C

πλάτος b [m]	2,5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
απόσταση ασφαλείας A [m]	3,5	4,9	5,8	6,5	7,2	7,8	8,5	9,1	9,8	10,5	11,2	11,8	12,5

Αν επιλεγεί, όπως στον κανονισμό DVFG-TRF ελάχιστη τιμή της απόστασης ασφαλείας A = 5 m, τότε ο πίνακας 8.3 μετασχηματίζεται στον πίνακα 8.4.

Πίνακας 8.4 Αποστάσεις ασφαλείας A συναρτήσει του πλάτους b πυροθερμικού φορτίου

πλάτος b [m]	≤3,5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
απόσταση ασφαλείας A [m]	5	5,8	6,5	7,2	7,8	8,5	9,1	9,8	10,5	11,2	11,8	12,5

Η σύγκριση με τις τιμές του πίνακα 6.6 (DVFG-TRF) δείχνει ότι προέκυψαν μικρότερες τιμές, όπως και αναμενόταν, επειδή, όπως διαπιστώσαμε μέσω του διαγράμματος της εικόνας 7.5, οι τιμές του πίνακα 6.6 αντιστοιχούν σε θερμοκρασία χαμηλότερη από 287°C.

Αν και οι τιμές του πίνακα 8.4 είναι αποδεκτές καθώς βασίζονται στις τεκμηριωμένες τιμές του κανονισμού TRBS 3146, προτείνεται να υιοθετηθούν και για την Ελλάδα οι τιμές του αντίστοιχου πίνακα του κανονισμού DVFG-TRF (πίνακας 7.2), για αυξημένη ασφάλεια και επειδή αυξημένες τιμές είναι και περισσότερο αποδεκτές ψυχολογικά.

9. Αποστάσεις ασφαλείας προστατευμένων δεξαμενών υγραερίου

9.1 Γενικά

Οι δεξαμενές αποθήκευσης υγραερίου μπορούν να εγκαθίστανται

- υπέργειες,
- υπόγειες (θαμμένες),
- επιχωματωμένες ή
- ημιεπιχωματωμένες.

Οι υπέργειες δεξαμενές μπορούν να είναι ακάλυπτες. Μπορούν όμως για λόγους πυροπροστασίας

- είτε να προστατεύονται έναντι πυροθερμικού φορτίου με ένα προστατευτικό τοίχο
- είτε να καλύπτονται με άκαυστο θερμομονωτικό στρώμα (π.χ. πετροβάμβακας) με δείκτη πυραντίστασης 90 min,
- είτε να προστατεύονται με επαρκή διαβροχή με νερό.

Οι επιχωματωμένες δεξαμενές αντιμετωπίζονται ως υπόγειες (θαμμένες) και θα πρέπει να καλύπτονται με χώμα τουλάχιστον κατά 50 cm.

Ως ημιεπιχωματωμένες αντιμετωπίζονται και οι ημιυπόγειες (εν μέρει θαμμένες) δεξαμενές.

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να εξασφαλίζεται ο ελεύθερος αερισμός των δεξαμενών.

Οι προτεινόμενες λύσεις βασίζονται στον γερμανικό κανονισμό DVFG-TRF 2021.

9.2 Προστατευτικός τοίχος έναντι πυροθερμικού φορτίου

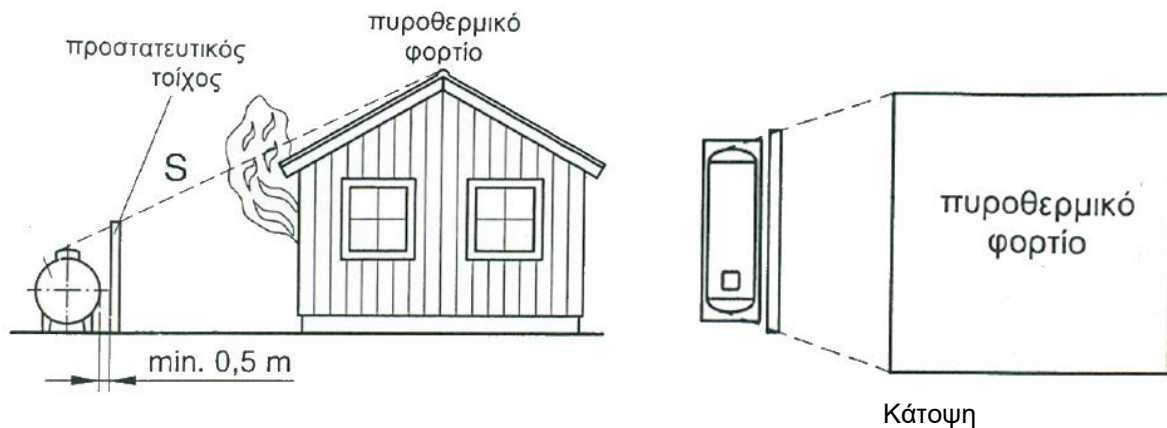
Ένας προστατευτικός τοίχος έναντι πυροθερμικού φορτίου πληροί τις απαιτήσεις για την πυροπροστασία, όταν

- έχει διαστασιολογηθεί επαρκώς,
- αποτελείται από άκαυστα δομικά τα οποία ικανοποιούν τον Κανονισμό (ΕΕ) 305/2011

[26] για τα προϊόντα δομικών κατασκευών (π.χ. κλάση δομικού υλικού A1 ή A2s1d0 κατά το ΕΛΟΤ EN 13501-1 [27]) και

— είναι επαρκούς αντοχής στην περίπτωση πυρκαγιάς.

Ο προστατευτικός τοίχος έχει διαστασιολογηθεί επαρκώς, όταν η δεξαμενή υγραερίου καλύπτεται από αυτόν, έτσι ώστε η δεξαμενή να μην "φαίνεται" από το πυροθερμικό φορτίο, εικόνα 9.1.



Εικόνα 9.1 Διαστασιολόγηση προστατευτικού τοίχου

9.3 Μόνωση πυροπροστασίας

Μια θερμομόνωση πληροί τις απαιτήσεις για την πυροπροστασία, όταν [23]

— έχει εγκατασταθεί σωστά,

— αποτελείται από άκαυστα υλικά τα οποία ικανοποιούν τον Κανονισμό (ΕΕ) 305/2011 (π.χ. κλάση υλικού A1 ή A2s1d0 κατά ΕΛΟΤ EN 13501-1) [23] με δείκτη πυραντίστασης 90 min,

— έχει συντελεστή θερμοπερατότητας (U ή k) της μόνωσης για μέση θερμοκρασία 350°C το πολύ 1,2 W/(m²K) και

— οι συνδέσεις και οι βαλβίδες, ιδιαίτερα τα στεγανοποιητικά τους, αντέχουν στις αναμενόμενες θερμοκρασίες στην περίπτωση πυρκαγιάς τουλάχιστον για 90 min.

9.4 Διαβροχή με νερό ή πλημμυρισμός με νερό

Η σταθερή διαβροχή με νερό ή ο σταθερός πλημμυρισμός με νερό πληροί τις απαιτήσεις για την πυροπροστασία δεξαμενών υγραερίου, όταν:

1) Είναι εγγυημένη η απαιτούμενη παροχή νερού

— για ομαλές επιφάνειες σε εξάρτηση από το είδος της προσαγωγής νερού αν υπολογίζεται σύμφωνα με το Παράρτημα I του Κανονισμού TRBS 3146 [24] και

— για μη ομαλές επιφάνειες, π.χ. στην περιοχή συνδέσεων, βαλβίδων και παρόμοιων περίπλοκων γεωμετριών, τουλάχιστον 600 l/(m²h).

2) Είναι εγγυημένη η ομοιόμορφη κατανομή του νερού για τον σχηματισμό ενός κλειστού φιλμ νερού σε όλη την επιφάνεια του προστατευόμενου αντικείμενου, όπως με πλημμυρισμό με νερό με ακροφύσια, οι κώνοι ψεκασμού των οποίων αλληλεπικαλύπτονται, τα οποία ψεκάζουν άμεσα κάθε τμήμα της δεξαμενής υγραερίου.

3) Μία εκδήλωση πυρκαγιάς προκαλεί σήμα συναγερμού με ένα σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και κατόπιν ενεργοποιείται αυτόματα η διαβροχή ή ο πλημμυρισμός με νερό.

4) Είναι εξασφαλισμένη η διαθεσιμότητα του νερού, π.χ. μέσω ζεύγους αντλιών για τη δημιουργία της απαιτούμενης πίεσης νερού, οι οποίες διασφαλίζουν πάντοτε τη διαβροχή ή τον πλημμυρισμό με νερό, για τουλάχιστον συνεχόμενα 90 min.

5) Η διαβροχή ή πλημμυρισμός με νερό ελέγχεται τακτικά και συντηρείται από την άποψη της κατάστασης και της λειτουργίας.

9.5 Υπόγειες και επιχωματωμένες δεξαμενές

Οι υπόγειες και οι επιχωματωμένες δεξαμενές θεωρείται ότι πληρούν τις απαιτήσεις για την πυροπροστασία δεξαμενών υγραερίου, όταν καλύπτονται με χώμα τουλάχιστον κατά 50 cm [23].

9.6 Ημιυπόγειες και ημιεπιχωματωμένες δεξαμενές

Οι ημιυπόγειες και οι ημιεπιχωματωμένες δεξαμενές υγραερίου πρέπει να αντιμετωπίζονται ως υπέργειες απροστάτευτες [23].

10. Προτάσεις

Από την ανωτέρω ανάλυση κατέστη σαφές ότι οι αποστάσεις ασφαλείας των δεξαμενών υγραερίου οι οποίες καθορίζονται από τους σχετικούς ελληνικούς κανονισμούς ([8] και [12]) δεν είναι συμβατές με τις πρόνοιες της Οδηγίας 2014/68/ΕΕ για τον εξοπλισμό υπό πίεση [1]. Οι ελληνικοί κανονισμοί επιβάλλουν για τις υπέργειες δεξαμενές εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις ασφαλείας, καθώς τις αντιμετωπίζουν ως εν δυνάμει κίνδυνο ως προς το περιβάλλον τους και όχι ως αντικείμενα που βρίσκονται υπό κίνδυνο.

Αποτέλεσμα της εσφαλμένης αντιμετώπισης είναι να επιβάλλονται όροι εγκατάστασης σε οικόπεδα βιομηχανιών, ξενοδοχείων κλπ., οι οποίοι είναι εξαιρετικά επιβαρυντικοί για την λειτουργία της μονάδας, είτε να απαιτούν υψηλό κόστος για την υπόγεια εγκατάστασή τους, είτε και απαγορευτικοί για την εγκατάσταση λόγω αποστάσεων.

Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι μια δεξαμενή ονομαστικού όγκου 10 m³ πρέπει να απέχει 15 m από τα γύρω κτίρια, ακόμη και αν τα κτίρια είναι κατασκευασμένα από άκαυστα υλικά,

οπότε δεν πρόκειται σε καμία περίπτωση να αναπτυχθούν σε αυτά πυροθερμικά φορτία τα οποία θα απειλήσουν την δεξαμενή.

Προτείνεται

— να αναθεωρηθούν οι ελληνικοί κανονισμοί και μάλιστα

— να ενοποιηθούν,

καθ' ότι δεν υπάρχει αιτιολογημένος λόγος ύπαρξης δύο ξεχωριστών κανονισμών (για βιομηχανικές και μη εγκαταστάσεις).

11. Υπολογιστικό μοντέλο

11.1 Γενικά

Θα διαμορφωθεί ένα απλό μοντέλο υπολογισμού των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας των δεξαμενών υγραερίου από πυροθερμικά φορτία βασισμένο σε ισοζύγιο ενέργειας και στην μετάδοση θερμότητας. Το μοντέλο θα εφαρμοσθεί σε μια επιλεγμένη περίπτωση και το αποτέλεσμα της εφαρμογής θα συγκριθεί με την επίλυση της επιλεγμένης μεθόδου, που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 8.

Συγκεκριμένα, στο μοντέλο υπολογισμού θα εκφραστούν οι προσαγόμενες και απαγόμενες θερμορροές στην δεξαμενή υγραερίου. Ορισμένες από αυτές εξαρτώνται από τις διαστάσεις του πλάτους του πυροθερμικού φορτίου και από την απόστασή του από την δεξαμενή.

11.2 Ισοζύγιο ενέργειας

Η δεξαμενή δέχεται

— θερμορροή $\dot{Q}_{\text{ακτ}}$ από την ακτινοβολία από το μέτωπο της πυρκαγιάς πλάτους b και

— θερμορροή $\dot{Q}_{\eta\lambda}$ από την ηλιακή ακτινοβολία.

Η δεξαμενή αποβάλλει

— θερμορροή $\dot{Q}_{\text{ιδ}}$ με την δική της ακτινοβολία προς το περιβάλλον

— θερμορροή $\dot{Q}_{\text{συν}}$ με συναγωγή προς το περιβάλλον

— θερμορροή $\dot{Q}_{\text{αποβ}}$ με την αποβολή αέριας φάσης από την ενεργοποιημένη ασφαλιστική βαλβίδα.

Η θερμορροή $\dot{Q}_{\text{αποβ}}$ δεν είναι συνεχής, καθώς η ασφαλιστική βαλβίδα ενεργοποιείται κατά διαστήματα.

Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, σε συμφωνία με τις παραδοχές του γερμανικού κανονισμού TRBS 3146, οι θερμορροές

- $\dot{Q}_{\eta\lambda}$ από την ηλιακή ακτινοβολία,
 - $\dot{Q}_{\iota\delta}$ από την ακτινοβολία της δεξαμενής προς το περιβάλλον και
 - $\dot{Q}_{\sigma\nu\nu}$ με συναγωγή προς το περιβάλλον
- μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες

11.3 Μετάδοση θερμότητας

11.3.1 Αγωγή

Μετάδοση θερμότητας με αγωγή στο εξεταζόμενο φαινόμενο έχουμε στο τοίχωμα της δεξαμενής υγραερίου.

Η θερμοροή \dot{Q} η οποία διαπερνά την επιφάνεια εμβαδού A ενός τοιχώματος πάχους s λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς των θερμοκρασιών ϑ_{w1} και ϑ_{w2} στις δύο πλευρές του υπολογίζεται με τον νόμο του Fourier

$$\dot{Q} = \frac{k}{s} A (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2}) \quad [W] \quad (4)$$

όπου

k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του τοιχώματος [W/mK]

Ο χάλυβας κατασκευής δεξαμενών υγραερίου έχει σημαντική τιμή, τάξης μεγέθους

$$k = 50 \text{ W/mK} [10]$$

και το πάχος τοιχώματος s , έχει σχετικά μικρή τιμή, της τάξης των 10 mm, οπότε διαπιστώνουμε ότι η αντίσταση στην μετάδοση θερμότητας ουσιαστικά είναι αμελητέα.

11.3.2 Συναγωγή

Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και μάλιστα φυσική έχουμε γύρω από την δεξαμενή υγραερίου, η οποία θα αποβάλλει θερμότητα προς το περιβάλλον. Η αποβαλλόμενη ενέργεια από την δεξαμενή δίνεται από εξίσωση του Newton

$$\dot{Q} = hA(\vartheta_w - \vartheta_\infty) \quad (5)$$

όπου

h ο συντελεστής συναγωγής [W/m²K]

ϑ_w η θερμοκρασία του τοιχώματος [°C]

ϑ_∞ η θερμοκρασία του αέρα [°C]

Ο συντελεστής φυσικής συναγωγής γύρω από την δεξαμενή υπολογίζεται με την εξίσωση των Churchill και Chu, την οποία προτείνουν ο VDI Heat Atlas [10] αλλά και ο Holman [30]

$$Nu = \frac{hd}{k} = \left[0,60 + 0,387 \cdot (Ra \cdot f_5(Pr))^{1/6} \right]^2 \quad (6)$$

με

$$f_5(\text{Pr}) = \left[1 + \left(\frac{0,559}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (6\alpha)$$

όπου ως χαρακτηριστικό μήκος χρησιμοποιείται η διάμετρος d του κυλίνδρου οπότε

$$\text{Ra} = \text{GrPr} = \frac{gd^3\beta(\vartheta_w - \vartheta_\infty)}{\nu^2} \text{Pr} \quad (7)$$

όπου

k	ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα	[W/mK]
ν	το κινηματικό ιξώδες του αέρα	[m ² /s]
β	ο συντελεστής θερμικής κατ' όγκο διαστολής του αέρα	[m ² /s]
Pr	ο αριθμός Pr του αέρα	[—]

Για να εκτιμήσουμε το μέγεθος του συντελεστή φυσικής συναγωγής h θα την υπολογίσουμε για μια περίπτωση αντιπροσωπευτική για το αντικείμενο της εργασίας. Τα υπολογισθεί η τιμή για

— διάμετρο του κυλίνδρου	$d = 1,5 \text{ m}$
— θερμοκρασία του τοιχώματος	$\vartheta_w = 250^\circ\text{C}$
— θερμοκρασία του αέρα	$\vartheta_\infty = 50^\circ\text{C}$

Από τους πίνακες τιμών των φυσικών ιδιοτήτων [9] λαμβάνουμε για $\vartheta_m = (250+50)/2 = 150^\circ\text{C}$:

$k = 0,035 \text{ W/mK}$,

$\nu = 29,2 \cdot 10^{-6}$,

$\text{Pr} = 0,7$.

Για $\vartheta_\infty = 50^\circ\text{C}$: $\beta = 3,1 \cdot 10^{-3}/\text{K}$

Βρίσκουμε τον αριθμό Rayleigh και τον αριθμό Grashof με χαρακτηριστικό μήκος την διάμετρο d

$$\text{Ra} = \text{GrPr} = \frac{gd^3\beta(\vartheta_w - \vartheta_\infty)}{\nu^2} \text{Pr} = \frac{9,81 \cdot 1,5^3 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot (250 - 50)}{29,2^2 \cdot 10^{-12}} \cdot 0,7 = 2,4 \cdot 10^{10}$$

$$f_5(\text{Pr}) = \left[1 + \left(\frac{0,559}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} = \left[1 + \left(\frac{0,559}{0,7} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} = 0,325$$

$$\text{Nu} = \left[0,60 + 0,387 \cdot (\text{Ra} \cdot f_5(\text{Pr}))^{1/6} \right]^2 = \left[0,60 + 0,387 \cdot (2,4 \cdot 10^{10} \cdot 0,325)^{1/6} \right]^2 = 280$$

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{d} = \frac{280 \cdot 0,035}{1,5} = 6,63 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Η υπολογισμένη τιμή είναι εξαιρετικά μικρή. Αυτό οφείλεται στο ότι η κίνηση του αέρα γύρω από την δεξαμενή καθορίζεται όχι από μόνο την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δεξαμενής και αέρα, αλλά κυρίως από την εν γένει κίνηση του αέρα στο περιβάλλον της

δεξαμενής (άνεμος). Να σημειωθεί ότι ο Κανονισμός Θερμομόνωσης των Κτιρίων όριζε για τον συντελεστή συναγωγής εξωτερικά των κτιρίων τιμή $h=23 \text{ W/m}^2\text{K}$. [32]
 Λόγω της μικρής τιμής του συντελεστή φυσικής συναγωγής h θα συνεχίσουμε την επίλυση θεωρώντας την συναγωγή αμελητέα.

11.3.3 Ακτινοβολία

11.3.3.1 Γενικά

Η μετάδοση θερμότητας με θερμική ακτινοβολία προς την δεξαμενή υγραερίου έχουμε κυρίως από τα καιόμενα αντικείμενα (πυρκαγιά). Η δεξαμενή υγραερίου μπορεί να δέχεται ακόμη ηλιακή θερμική ακτινοβολία. Αντίστοιχα η δεξαμενή υγραερίου εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

11.3.3.2 Εκπομπή

Η εκπεμπόμενη ενέργεια από ένα μέλαν σώμα [9] δίνεται από τον νόμο των Stefan-Boltzmann, ο οποίος ορίζει ότι αυτή είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του ακτινοβολούντος σώματος

$$E_s = \sigma_s T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (8)$$

όπου σ_s η σταθερά των Stefan-Boltzmann με τιμή

$$\sigma_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

Λόγω της μικρής τιμής της σταθεράς σ_s στις πρακτικές εφαρμογές ο νόμος των Stefan-Boltzmann χρησιμοποιείται με την μορφή

$$E_s = C_s \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (9)$$

όπου η σταθερά C_s του μέλανος σώματος έχει τιμή

$$C_s = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

Ο νόμος των Stefan-Boltzmann εφαρμόζεται με μια τροποποίηση και στις περιπτώσεις ακτινοβολίας πραγματικών μη μελάνων σωμάτων

$$E = \epsilon \sigma_s T^4 = \epsilon E_s \quad (10)$$

ή

$$E = \epsilon C_s \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (11)$$

Το μέγεθος ϵ είναι ο συντελεστής ή ικανότητα εκπομπής, ο οποίος έχει πάντοτε τιμή μικρότερη της μονάδας, $\epsilon < 1$. Ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από την φύση, την θερμοκρασία και την κατάσταση της εκπέμπουσας επιφάνειας.

11.3.3.3 Απορρόφηση

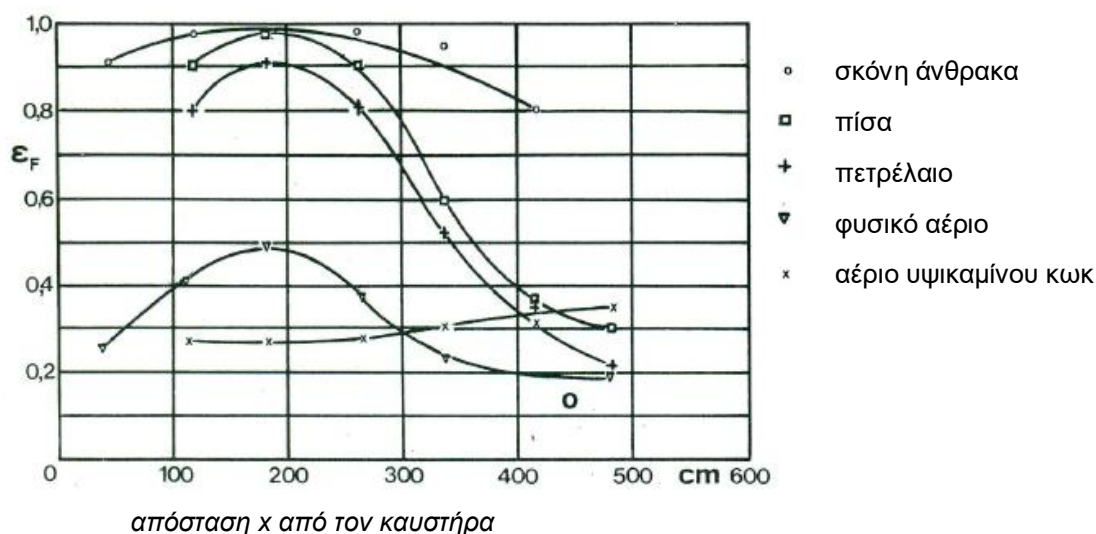
Ο συντελεστής εκπομπής, σύμφωνα με τον νόμο του Kirchhof, είναι, για την ίδια θερμοκρασία, ίσος με τον συντελεστή απορρόφησης A :

$$\varepsilon = A \quad (12)$$

11.3.3.4 Συντελεστές εκπομπής

Ο συντελεστής εκπομπής ε και αντίστοιχα ο συντελεστής απορρόφησης A του χάλυβα για την θεωρούμενη περιοχή θερμοκρασιών του τοιχώματος της δεξαμενής (250 - 280°C) έχουν υψηλή τιμή. Η τιμή αυτή θα ληφθεί στην συνέχεια $\varepsilon = 0,8$ [10].

Ο συντελεστής εκπομπής της φλόγας εξαρτάται από το είδος του καίόμενου υλικού. Μας είναι εμπειρικά γνωστό ότι τα αέρια καύσιμα (μεθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο) έχουν σχεδόν άχρωμη έως γαλάζια φλόγα και χαμηλή θερμική ακτινοβολία, ενώ αντιθέτως το πετρέλαιο (Diesel) έχει έντονη κόκκινη φλόγα και υψηλή θερμική ακτινοβολία. Στην εικόνα 11.1 δίνονται μετρήσεις των συντελεστών εκπομπής ορισμένων καυσίμων. Από την εικόνα μπορεί να εκτιμηθεί ότι η φλόγα πετρελαίου έχει μια μέση τιμή της τάξης $\varepsilon = 0,85$.



Εικόνα 11.1 Συντελεστής εκπομπής ορισμένων φλογών [28]

Η μελέτη του Gas-Wärme-Institut [25] διαπίστωσε ότι μόνο λίγα υλικά, π.χ. το πεντάνιο, έχουν μεγαλύτερη ένταση φλόγας από το καύσιμο Diesel, ενώ οι πυρκαγιές π.χ. από πλαστικό, ξύλο, άχυρα λόγω της μικρότερής τους έντασης φλόγας καλύπτονται επίσης κατά τον υπολογισμό των αποστάσεων για καύσιμο Diesel.

11.3.3.5 Θερμοκρασία της φλόγας

Η (μέση) θερμοκρασία της φλόγας μετρήθηκε σε διάφορες εφαρμογές [8] να έχει τιμές περίπου από 1050 K έως 1450 K.

Η μελέτη του Gas-Wärme-Institut [25] θεωρεί εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία 100 kW/m², η οποία αντιστοιχεί με βάση την εξίσωση

$$E = \varepsilon C_s \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

για $\varepsilon = 0,85$ σε θερμοκρασία $T = 1200$ K,

11.3.3.6 Συντελεστής θέασης

Η εξίσωση υπολογισμού της θερμορροής Q_{12} , η οποία ανταλλάσσεται με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών F_1 και F_2 , με συντελεστές εκπομπής ε_1 και ε_2 , στην περίπτωση μας μεταξύ του πυροθερμικού φορτίου και της δεξαμενής, γράφεται [29]

$$\dot{Q}_{12} = \varphi_{12}\varepsilon_1\varepsilon_2 C_s F_1 \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \varphi_{21}\varepsilon_1\varepsilon_2 C_s F_2 \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \quad (13)$$

ή

$$\dot{Q}_{12} = \varphi_{12}\varepsilon_1\varepsilon_2 C_s F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (14)$$

όπου φ_{12} και φ_{21} οι συντελεστές θέασης

Εάν ληφθούν υπόψη και οι αμοιβαίες ανακλάσεις, τότε η εξίσωση υπολογισμού της θερμορροής γίνεται

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\varphi_{12}\varepsilon_1\varepsilon_2 C_s F_1}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)\varphi_{12}\varphi_{21}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (15)$$

η οποία μεταπίπτει στην εξ. (12.24), όταν είναι

$$(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)\varphi_{12}\varphi_{21} \ll 1.$$

Το πρόβλημα υπολογισμού της θερμορροής ανάγεται στον προσδιορισμό των συντελεστών θέασης. Ο συντελεστής θέασης φ_{12} ορίζει το εκπεμπόμενο κλάσμα της θερμορροής από την επιφάνεια F_1 , το οποίο φθάνει στην επιφάνεια F_2 , ενώ αντίστοιχα ο συντελεστής θέασης φ_{21} ορίζει το εκπεμπόμενο κλάσμα της θερμορροής από την επιφάνεια F_2 , το οποίο φθάνει στην επιφάνεια F_1 .

Ο συντελεστής θέασης είναι συνάρτηση των γεωμετρικών σχέσεων μεταξύ των δύο επιφανειών, οι οποίες ανταλλάσσουν ενέργεια με ακτινοβολία. Άρα, εξαρτάται από την απόσταση, τις μορφές και τις σχετικές θέσεις των επιφανειών.

Γενικά ο συντελεστής θέασης είναι το μέτρο του πόσο μεγάλη φαίνεται η μια επιφάνεια από την άλλη, κάτι στο οποίο οφείλεται και η ονομασία του.

11.3.3.7 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία φθάνει στην Γη εξαρτάται από την εποχή του χρόνου και από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων. Στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας η συνολική ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας για την μέση απόσταση Ηλίου – Γης είναι περίπου 1395 W/m^2 [30]. Η ακτινοβολία αυτή δεν φθάνει όλη στην επιφάνεια της Γης εξ αιτίας της απορρόφησης από το διοξείδιο του άνθρακα και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας, καθώς και από την ύπαρξη στην ατμόσφαιρα σκόνης και άλλων ρύπων. Το μέγιστο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας φθάνει στην επιφάνεια της Γης, όταν οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν κάθετα στην Γη, οπότε αφενός έχουμε μεγαλύτερο συντελεστή θέασης και αφετέρου λόγω της μικρότερης διαδρομής των ακτίνων μέσα στην ατμόσφαιρα είναι μικρότερη η απορρόφηση.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα θεωρήσουμε ως ασφαλή τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m^2 .

11.4 Παραδοχές

Οι παραδοχές του μοντέλου υπολογισμού είναι οι εξής:

- συντελεστής απορρόφησης του περιβλήματος της δεξαμενής $A = \varepsilon = 0,8$.
- πυκνότητα θερμορροής του πυροθερμικού φορτίου $q = 100 \text{ kW/m}^2$.
- Η δεξαμενή δέχεται θερμορροή $\dot{Q}_{\text{ακτ}}$ από την ακτινοβολία από το μέτωπο της πυρκαγιάς πλάτους b .
- Η δεξαμενή αποβάλλει θερμορροή $\dot{Q}_{\text{αποβ}}$ με την αποβολή αέριας φάσης από την ενεργοποιημένη ασφαλιστική βαλβίδα.
- Οι θερμορροές
 - $\dot{Q}_{\text{ηλ}}$ από την ηλιακή ακτινοβολία,
 - $\dot{Q}_{\text{ιδ}}$ από την ακτινοβολία της δεξαμενής προς το περιβάλλον και
 - $\dot{Q}_{\text{συν}}$ με συναγωγή προς το περιβάλλον

θα θεωρηθούν αμελητέες σε συμφωνία με τις παραδοχές του γερμανικού κανονισμού TRBS 3146, ο οποίος επιλέχθηκε ως βάση για την επίτευξη του στόχου μας.

Στο απλό υπολογιστικό παράδειγμα θα ληφθεί πλάτος πυροθερμικού φορτίου $b = 10 \text{ m}$. Στην περίπτωση μας θα θεωρήσουμε ότι η δεξαμενή έχει **ίσο πλάτος και ύψος** με το πυροθερμικό φορτίο. Ακόμη, θα θεωρήσουμε ότι η δεξαμενή έχει φθάσει στο **χαμηλότερο** ποσοστό πλήρωσης 25%, καθώς έχει απορριφθεί σημαντική ποσότητα υγραερίου λόγω ενεργοποίησης της ασφαλιστικής βαλβίδας εξαιτίας πυρκαγιάς.

11.5 Εξεταζόμενο παράδειγμα εφαρμογής

Με βάση τις παραδοχές της προηγούμενης παραγράφου θεωρούμε δεξαμενή

— μήκους $l = 10 \text{ m}$

— διαμέτρου $d = 2,5 \text{ m}$.

Ίδιες διαστάσεις επιλέγονται για το πυροθερμικό φορτίο.

Η απόσταση μεταξύ δεξαμενής και πυροθερμικού φορτίου λαμβάνεται $A = 10,2 \text{ m}$, ίση με εκείνη του πίνακα 6.6 για πυροθερμικό φορτίο πλάτους $b=10 \text{ m}$.

Διαστασιολόγηση της βαλβίδας ασφαλείας

Η πίεση ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό [8] είναι $p = 17,5 \text{ bar}$. Σ' αυτήν την θερμοκρασία αντιστοιχεί θερμοκρασία ισορροπίας $54 \text{ }^\circ\text{C}$.

Άρα έχουμε

Πίεση ρύθμισης της βαλβίδας ασφαλείας: $p = 17,5 \text{ bar}$

Ενθαλπία εξάτμισης του προπανίου στους $54 \text{ }^\circ\text{C}$: $r = 280 \text{ kJ/kg}$

Από το διάγραμμα της εικόνας 7.1 προκύπτει στους 280°C (εκτιμώμενη θερμοκρασία τοιχώματος της δεξαμενής)

$$\frac{\dot{m}r}{A} = 11$$

$$A = l \cdot d = 10 \cdot 2,5 = 25 \text{ m}^2,$$

Προκύπτει η απαγόμενη μέσω της βαλβίδας ασφαλείας ποσότητα

$$\dot{m} = 11 \cdot A / r = 11 \cdot 25 / 280$$

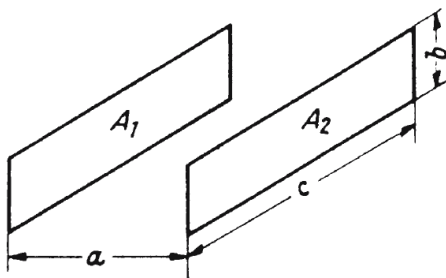
$$= 0,982 \text{ σε kg/s ή } = 3536 \text{ σε kg/h.}$$

Γνωρίζουμε ότι η βαλβίδα ασφαλείας απόρριψης δεν είναι διαρκώς ενεργοποιημένη και δεν απορρίπτει υγραέριο συνεχώς. Ενεργοποιείται για σύντομο χρονικό διάστημα ώστε να ανακουφισθεί (μειωθεί) η πίεση του υγραερίου μέσα στην δεξαμενή.

Θερμορροή από το πυροθερμικό φορτίο

Ο συντελεστής θέασης φ_{12} υπολογίζεται για τις παραδοχές των διαστάσεων.

Από τον VDI-Wärmeatlas [29] λαμβάνεται:



Εικόνα 11.2 Παράλληλα, ίσα, αντικριστά ορθογώνια

Είναι

$$c=10 \text{ m } (c \equiv I),$$

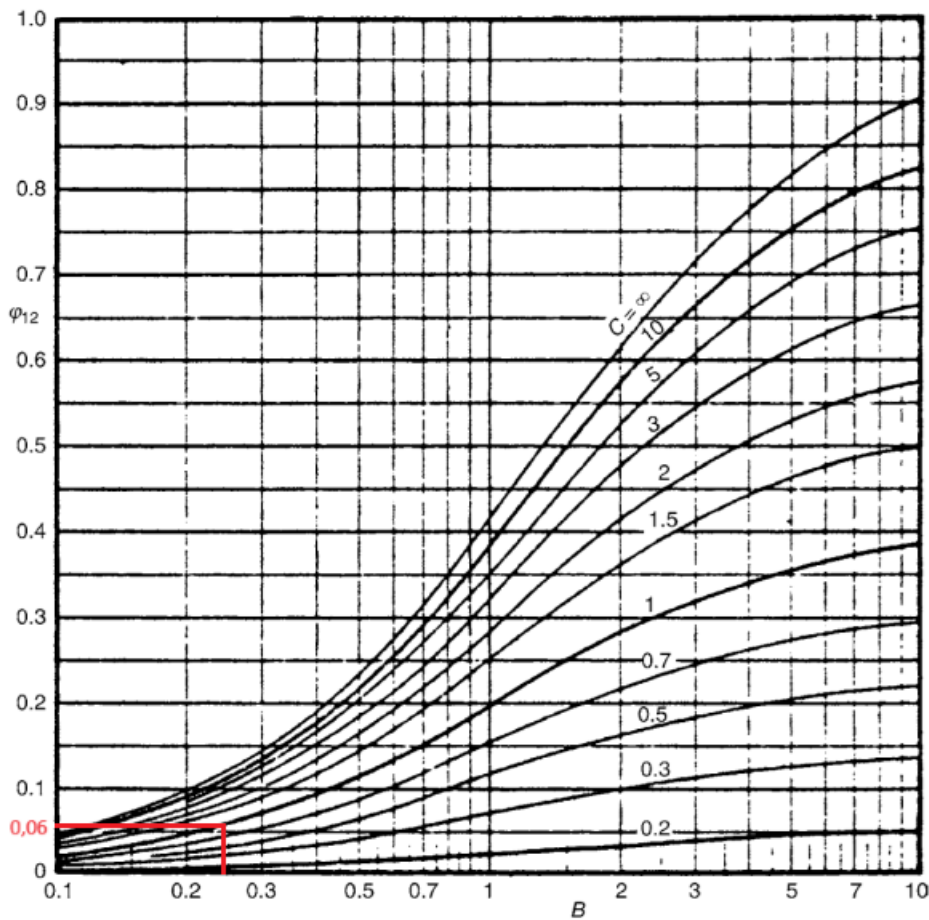
$$b=2,5 \text{ m } (b \equiv d),$$

$$a=10,2 \text{ m}$$

Ορίζονται

$$B = \frac{b}{a} = \frac{2,5}{10,2} = 0,245$$

$$C = \frac{c}{a} = \frac{10}{10,2} = 0,98$$



Εικόνα 11.3 Συντελεστής θέασης φ_{12} για παράλληλα, ίσα, αντικριστά ορθογώνια

Από την εικόνα 11.3 λαμβάνεται για $B=0,245$ και $C=0,98$ συντελεστής θέασης $\varphi_{12} = 0,06$. Η θερμότητα $\dot{Q}_{\text{ακτ}}$ η οποία απορροφάται από την δεξαμενή υγραερίου υπολογίζεται για $\varphi_{12} = 0,06$ και συντελεστή απορρόφησης $\varepsilon=0,80$

$$\dot{Q}_{\text{ακτ}} = \varphi_{12} \varepsilon_1 C_s A \cdot \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 = 0,06 \cdot 25 \cdot 100 = 150 \text{ kW}$$

Συναγωγή: Η αποβαλλόμενη θερμότητα από την δεξαμενή με φυσική συναγωγή $\dot{Q}_{\text{συν}}$ θεωρήθηκε αμελητέα.

Ηλιακή ακτινοβολία: Η απορροφούμενη θερμορροή από ηλιακή ακτινοβολία από την δεξαμενή $\dot{Q}_{\eta\lambda}$ θεωρήθηκε αμελητέα.

Αποβολή θερμορροής με ακτινοβολία: Η αποβαλλόμενη θερμορροή από την δεξαμενή με την δική της ακτινοβολία προς το περιβάλλον \dot{Q}_{δ} θεωρήθηκε αμελητέα.

Αποβολή θερμότητας κατά την ενεργοποίηση της ασφαλιστικής βαλβίδας

Επειδή η ασφαλιστική βαλβίδα δεν είναι συνεχώς ενεργοποιημένη, οπότε δεν έχουμε συνεχή αποβολή θερμορροή με την απόρριψη, θα υπολογίσουμε την αποβαλλόμενη ενέργεια μέσω της ασφαλιστικής βαλβίδας για ένα χρονικό διάστημα και θα την συγκρίνουμε με την αντίστοιχη απορροφούμενη θερμότητα από την ακτινοβολία του πυροθερμικού φορτίου.

Ο όγκος V της δεξαμενής υγραερίου εκτιμάται

$$V = \frac{\pi d^2 l}{4} = \frac{\pi \cdot 2,5^2 \cdot 10}{4} = 49 \text{ m}^3$$

Για βαθμό πλήρωσης 25%, ο διαθέσιμος όγκος V_a για την αέρια φάση υπολογίζεται

$$V_a = 0,25 \cdot 49 = 12,25 \text{ m}^3$$

Οι αντίστοιχες μάζες υγραερίου (το οποίο θεωρείται προπάνιο) στις θερμοκρασίες των 50°C (πίεση σχεδιασμού) και 54°C (πίεση απόκρισης της ασφαλιστικής βαλβίδας) θα υπολογισθούν μέσω των αντίστοιχων πυκνοτήτων.

Οι πυκνότητες υπολογίζονται μέσω του νόμου των αερίων

$$\rho V = \frac{m}{M} \eta R T \Rightarrow \rho = \frac{\rho M}{\eta R T} \quad (16)$$

Στους 50°C

$$\rho = \frac{\rho M}{\eta R T} = \frac{(16 + 1) \cdot 44}{8314 \cdot (50 + 273)} = 27,8 \text{ kg/m}^3$$

Στους 54°C

$$\rho = \frac{\rho M}{\eta R T} = \frac{(17,5 + 1) \cdot 44}{8314 \cdot (54 + 273)} = 29,9 \text{ kg/m}^3$$

Η αποβαλλόμενη μάζα κατά την ενεργοποίηση της βαλβίδας υπολογίζεται ως η διαφορά των μαζών της αέριας φάσης στις δύο καταστάσεις

Στους 50°C

$$m = V_{\alpha} \rho = 36,8 \cdot 27,8 = 1023 \text{ kg}$$

Στους 54°C

$$m = V_{\alpha} \rho = 36,8 \cdot 29,9 = 1100,3 \text{ kg}$$

Η αποβαλλόμενη μάζα, σχεδόν ακαριαία, κατά την ενεργοποίηση της ασφαλιστικής βαλβίδας υπολογίζεται

$$\Delta m = 1100,3 - 1023 = 77,3 \text{ kg}$$

Η αντίστοιχη αποβαλλόμενη ενέργεια $Q_{\text{αποβ}}$ υπολογίζεται

$$Q_{\text{αποβ}} = \Delta m \cdot r = 77,3 \cdot 280 = 21644 \text{ kJ}$$

Αυτή η θερμότητα Q αποδίδεται από την θερμορροή $\dot{Q}_{\text{ακτ}}$ από το πυροθερμικό φορτίο σε χρόνο t

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}_{\text{ακτ}}} = \frac{21644}{150} = 145 \text{ s}$$

Άρα στο χρονικό διάστημα των 145s η ασφαλιστική βαλβίδα θα ενεργοποιηθεί 1 φορά και θα αποδώσει θερμότητα

$$Q_{\text{αποβ}} = 21644 \text{ kJ}$$

Κατά το χρονικό διάστημα των 145s η δεξαμενή υγραερίου απορροφά αντίστοιχα θερμότητα $Q_{\text{απορ}}$

$$Q_{\text{απορ}} = \dot{Q}_{\text{ακτ}} \cdot t = 150 \cdot 145 = 21750 \text{ kJ}$$

Διαπιστώνουμε ότι οι δύο ποσότητες θερμότητας $Q_{\text{αποβ}}$ και $Q_{\text{απορ}}$ είναι ουσιαστικά ίσες, δηλαδή το σύστημα είναι σε ισορροπία και άρα η απόσταση μεταξύ της δεξαμενής και του πυροθερμικού φορτίου εκτιμάται ως ασφαλής.

Επισημαίνεται ότι από το παράδειγμα προκύπτει ότι υπολογίσθηκε ένα χρονικό διάστημα 145s (όχι αμελητέο για την εκτίμηση κινδύνου) μεταξύ δύο ενεργοποιήσεων της ασφαλιστικής βαλβίδας, δηλαδή ότι η ασφαλιστική βαλβίδα δεν παραμένει μονίμως ανοικτή.

Αν η ασφαλιστική βαλβίδα παραμένει μονίμως ανοικτή, αυτό σημαίνει ότι το απορροφούμενο από την δεξαμενή πυροθερμικό φορτίο είναι υψηλότερο από το φορτίο το οποίο μπορεί να αντιμετωπίσει η δεξαμενή (κυρίως μέσω της ενεργοποίησης της ασφαλιστικής βαλβίδας), με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία της δεξαμενής και σταδιακά να οδηγηθεί σε αστοχία.

11.6 Συγκρίσεις με την επίλυση της επιλεγμένης μεθόδου

Το αποτέλεσμα των υπολογισμών του παραδείγματος, βάσει των παρακάτω παραδοχών:

- της θεώρησης ως αμελητέων των θερμορροών
 - $\dot{Q}_{\eta\lambda}$ από την ηλιακή ακτινοβολία,
 - $\dot{Q}_{\iota\delta}$ από την ακτινοβολία της δεξαμενής προς το περιβάλλον και
 - $\dot{Q}_{\sigma\upsilon\nu}$ με συναγωγή προς το περιβάλλον
 - της θεώρησης δεδομένων διαστάσεων της δεξαμενής και του πυροθερμικού φορτίου
 - της θεώρησης δεδομένου βαθμού πλήρωσης της δεξαμενής
- έδειξε ότι για απόσταση μεταξύ της δεξαμενής και του πυροθερμικού φορτίου λαμβανόμενη από τον πίνακα 5, τον οποίο προτείνουμε να υιοθετηθεί από τον ελληνικό τεχνικό κανονισμό για τις αποστάσεις ασφαλείας των δεξαμενών, **το σύστημα είναι σε ισορροπία**, άρα
- δεν θα συνεχίσει να αυξάνει η θερμοκρασία της δεξαμενής και άρα
 - η απόσταση αυτή εκτιμάται ως **ασφαλής**.

Σε πρώτη ανάγνωση, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο Τεχνικός Κανονισμός TRBS 3146 βασίζεται σε ορισμένες αντίστοιχες παραδοχές, η χρήση του μοντέλου υπολογισμού εμφανίζεται ως αποτελεσματική για τον προσδιορισμό των αποστάσεων ασφαλείας των δεξαμενών και του πυροθερμικού φορτίου.

Επειδή όμως πρόκειται για θέματα ασφάλειας ζωής και περιουσίας, ο προσδιορισμός των αποστάσεων ασφαλείας των δεξαμενών και του πυροθερμικού φορτίου δεν θα πρέπει να βασιστεί στην χρήση ενός τόσο απλουστευμένου μοντέλου υπολογισμού.

Υπενθυμίζεται ότι οι πρόνοιες του Τεχνικού Κανονισμού TRBS 3146 επιβεβαιώθηκαν πειραματικά από το Gas-Wärme-Institut.

Βιβλιογραφία

- [1] Οδηγία 2014/68/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 15ης Μαΐου 2014 για την εναρμόνιση των νομοθεσιών των κρατών μελών σχετικά με τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού υπό πίεση στην αγορά
ΚΥΑ Αριθμ. οικ. 74124/ΔΤΒΝ 1431 (ΦΕΚ 2278 Β/2016) "Προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας προς την Οδηγία 2014/68/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 15ης Μαΐου 2014 για την εναρμόνιση των νομοθεσιών των κρατών μελών σχετικά με τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού υπό πίεση στην αγορά (αναδιατύπωση)
- [2] Οδηγία 2010/35/ΕΕ σχετικά με τον μεταφερόμενο εξοπλισμό υπό πίεση
- [3] Οδηγία 2009/105/ΕΕ σχετικά με τα απλά δοχεία πίεσης
- [4] EN 13445 (σειρά), δοχεία υπό πίεση μη εκτεθειμένα σε φλόγα

- [5] EN 12953 (σειρά), Αεριαυλωτοί λέβητες
- [6] EN 12952 (σειρά), Υδραυλωτοί λέβητες και βοηθητικός εξοπλισμός
- [7] Κ. Γ. Πασπαλάς: Υπολογισμός δοχείων υπό πίεση εκτιθεμένων ή μη σε φλόγα, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2014
- [8] Τεχνικός Κανονισμός εγκαταστάσεων υγραερίου στα κτίρια (πλην Βιομηχανιών-βιοτεχνιών) (ΦΕΚ 1257 Β'/2.9.2003)
- [9] EN 437, Test gases - Test pressures – Appliance categories
- [10] VDI Heat Atlas, 2nd edition, Springer, 2010
- [11] ΕΛΟΤ EN 12542, Εξοπλισμός υγραερίου (LPG) και παρελκόμενα - Στατικές συγκολλητές χαλύβδινες κυλινδρικές δεξαμενές, παραγόμενες σε σειρά για την αποθήκευση υγραερίου με όγκο όχι μεγαλύτερο από 13 m³ - Σχεδιασμός και κατασκευή
- [12] Καθορισμός τεχνικών προδιαγραφών διαμόρφωσης, σχεδίασης, κατασκευής, ασφαλούς λειτουργίας και πυροπροστασίας εγκαταστάσεων αποθήκευσης, εμφιάλωσης, διακίνησης και διανομής υγραερίου καθώς και εγκαταστάσεων για τη χρήση αυτού σε βιομηχανικές, βιοτεχνικές και επαγγελματικές δραστηριότητες (ΦΕΚ 477 Β'/1.7.1993)
- [13] J. Mischner, T. Juch, K. Kurth: Flüssiggas-Anlagen, Verlag für Bauwesen, 1999
- [14] EN 10028-3, Flat products made of steels for pressure purposes Part 3: Weldable fine grain steels, normalized
- [15] Κ. Γ. Πασπαλάς: Η ευρωπαϊκή τυποποίηση των χαλύβων και χυτοσιδήρων, Έκδοση ΣΜΗΒΕ/ΣΙΔΕΝΟΡ, 2009
- [16] AD 2000-Merkblätter, Beuth Verlag
- [17] EN 10029, Hot-rolled steel plates 3 mm thick or above - Tolerances on dimensions and shape
- [18] HSE (Health and Safety Executive) UK: Safe use of liquefied petroleum gas (LPG) at small commercial and industrial bulk installations
- [19] Arrêté du 30 juillet 1979 relatif aux règles techniques et de sécurité applicables aux stockages fixes d'hydrocarbures liquéfiés non soumis à la législation des installations classées ou des immeubles recevant du public. Version consolidée au 04 avril 2019
- [20] Decreto del Presidente della Repubblica 10 giugno 2004, n. 200
Regolamento recante modifiche al decreto del Presidente della Repubblica 29 luglio 1982, n. 577, concernenti l'attività di formazione e studio affidata al Corpo nazionale dei vigili del fuoco, la composizione del Comitato tecnico-scientifico ed il certificato di prevenzione incendi. (GU n. 184 del 07-08-2004)
- [21] NFPA 58, Liquefied Petroleum Gas Code, 2017 edition
- [22] WLPGA Good Industry Practice Guide for Bulk LPG Installations, 2020
- [23] DVFG-TRF 2021, Technische Regel für Flüssiggas
- [24] TRBS 3146/TRGS 726, Ortsfeste Druckanlagen für Gase (GMBI. Nr. 28/29, April 2014) neugefasst im September 2016 (Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) / Gefahrstoffe (TRBS/TRGS)) (Bundesministerium für Arbeit und Soziales)
- [25] Gas-Wärme-Institut, Bericht Nr. 8112 vom 9.4.1990, „Brandlast/Strahlungsversuche zur Ermittlung von Mindestabständen von Druckbehältern für Flüssiggas nach DIN 51622 zu möglichen Brandherden“.

- [26] Κανονισμός (ΕΕ) 305/2011 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 9^{ης} Μαρτίου 2011 «για τη θέσπιση εναρμονισμένων όρων εμπορίας προϊόντων του τομέα των δομικών κατασκευών και για την κατάργηση της οδηγίας 89/106/ΕΟΚ του Συμβουλίου».
- [27] ΕΛΟΤ EN 13501-1, Ταξινόμηση πυραντίστασης δομικών προϊόντων και κτιριακών στοιχείων – Ταξινόμηση με τη χρήση δεδομένων από δοκιμές φωτιάς
- [28] Günther R.: Verbrennung und Feuerungen, Springer 1974
- [29] VDI-Wärmeatlas, Springer, 11. Aufl. 2013
- [30] Holman, J. Ph.: Heat Transfer, 10. ed., McGraw-Hill, 2010
- [31] Κ. Γ. Πασπαλάς: Εγκαταστάσεις υγραερίων, Έκδοση ΣΜΗΒΕ, 2009
- [32] Κανονισμός Θερμομόνωσης των Κτιρίων, ΦΕΚ 362 Δ/4.7.1279