ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: Ανάλυσης, Σχεδιασμού κι Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Σημειώσεις Μαθήματος

ΖΙΩΜΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Καθηγητής ΕΜΠ

ΚΡΟΚΙΔΑ ΜΑΓΔΑΛΗΝΗ

Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2014

Περιεχόμενα

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ 1

1. ΡΟΗ 6

1.1. Εισαγωγή 6

1.2. Ροή αερίου 6

1.3. Ροή υγρού 9

1.4. Ροή αερίου συμπιεσμένου σε υγρή μορφή (υγροποιημένου αερίου) 10

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ 17

2.1. Ροή αερίου 17

2.1.1 Ροή αερίου από δεξαμενή 17

2.1.2 Ροή αερίου από σωλήνα 18

2.2. Ροή υγρού 20

2.2.1 Ροή από δεξαμενή 20

2.2.2 Ροή υγρού από σωλήνα 23

2.3. Ροή υγροποιημένου αερίου (αερίου συμπιεσμένου σε υγρή μορφή) 26

2.3.1 Ροή σε μορφή ατμού 26

2.3.2 Ροή σε μορφή υγρού 27

2.3.3 Ροή σε μορφή υγρού-ατμού ως μίγμα έξω από τη δεξαμενή 28

2.3.4 Ροή σε μορφή μίγματος υγρού-ατμού έξω από σωλήνα 30

2.3.4.1 Άτριβη ροή 33

2.3.4.2 Ροή με τριβή 35

3. ΤΥΡΒΩΔΕΣ FREE JET 42

3.1. Περίληψη 42

3.2. Εισαγωγή **42**

3.3. Μερικές χαρακτηριστικές μεταβλητές για τυρβώδες free jet **50**

3.3.1 Μέγεθος των σταθερών κατανομής b_1 και b_2 52

3.4. Καθορισμός των χαρακτηριστικών μεταβλητών **53**

3.5. Περιεχόμενο του jet **57**

3.6. Εύρος εγκυρότητας του μοντέλου **58**

3.6.1 Εξισορρόπηση της θερμοκρασίας 58

3.6.2 Επίδραση της βαρύτητας 60

3.6.3 Συγκρουόμενο free jet 62

3.7. Παράδειγμα **62**

4. ΕΞΑΤΜΙΣΗ **69**

4.1. Εξάτμιση ύστερα από απελευθέρωση πεπιεμένου υγροποιημένου αερίου **69**

4.2. Αρχική εξάτμιση από απελευθέρωση υγροποιημένου αερίου **69**

4.3. Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου στο έδαφος **72**

4.3.1 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου σε μη διαπερατό έδαφος 72

4.3.2 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου σε διαπερατό έδαφος 73

4.3.2.1 Εξάτμιση σε στεγνό υπέδαφος 74

4.3.2.2 Εξάτμιση σε υγρό υπέδαφος 74

4.3.2.3 Εξάτμιση σε αμμοχάλικο 76

4.3.3 Εξάτμιση λόγω διασποράς στο έδαφος 77

4.3.3.1 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώθηκε στιγμιαία 78

4.3.3.2 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώθηκε με συνεχή τρόπο 81

4.3.4 Εξάτμιση από λίμνη με καθορισμένα όρια 82

4.4. Εξάτμιση υγροποιημένων αερίων στο νερό **83**

4.4.1 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου σε ανοιχτή λίμνη νερού 84

4.4.1.1 Εξάτμιση σε ανοιχτή λίμνη νερού 84
4.4.1.2 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώθηκε στιγμιαία 84
4.4.1.3 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώθηκε με συνεχή τρόπο 86
4.4.2 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου σε επιφάνεια νερού καθορισμένων ορίων 87
4.4.2.1 Εξάτμιση υγρού που απελευθερώθηκε στιγμιαία 90
4.4.2.2 Εξάτμιση υγρού που απελευθερώθηκε με συνεχή τρόπο 91
4.4.3 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώνεται στο νερό και είναι βαρύτερο από αυτό 93

4.5. Εξάτμιση υγρών που δεν είναι σε ζέση 95
4.5.1 Υπολογισμός της εξάτμισης 95
4.5.2 Ψύξη του εξατμιζόμενου υγρού 96

5. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ 104

5.1. Αποτύπωση υφιστάμενης κατάστασης 104
5.1.1 Τι είναι βιομηχανικό ατύχημα μεγάλης έκτασης; 104
5.1.2 Παραδείγματα ΒΑΜΕ 105
5.1.3 Κοινοτικό και εθνικό θεσμικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση ΒΑΜΕ και την πληροφόρηση του κοινού 107
5.1.3.1 Κοινοτικό θεσμικό πλαίσιο 107
5.1.3.2 Οδηγία SEVESO I (82/501/ΕΟΚ) 107
5.1.3.3 Οδηγία SEVESO II (96/82/ΕΚ) 110
5.1.3.4 Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο 121
5.1.4 Μελέτη Ασφαλείας 126
5.1.5 Οριακές τιμές επιπτώσεων και ζώνες ασφαλείας 128
5.1.5.1 Οριακές τιμές επιπτώσεων 128
5.1.5.2 Επιπτώσεις από τοξικές ουσίες 130
5.1.5.3 Επιπτώσεις από θερμική ακτινοβολία 131
5.1.5.4 Επιπτώσεις από ωστικό κύμα 132
5.1.5.5 Ζώνες προστασίας 133
5.1.6 Σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης ΒΑΜΕ στην Ελλάδα 134
5.1.7 Θεσμοθετημένες αποστάσεις βιομηχανικών εγκαταστάσεων από οικισμούς

136

5.2. Επισκόπηση μεθοδολογιών εκτίμησης επικινδυνότητας 137

5.2.1 Η ντετερμινιστική μεθοδολογία 138

5.2.2 Η πιθανολογική μεθοδολογία 140

5.2.3 Υβριδικές μέθοδοι 143

5.2.3.1 Ημι-ποσοτικές μεθοδολογίες 143

5.2.3.2 Μεθοδολογίες γενικών αποστάσεων ασφαλείας 144

1. Ροή

1.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την περίπτωση όπου η διάρρηξη συμβαίνει σε δεξαμενή αποθήκευσης ή σε σωλήνα μεταφοράς και θα δώσουμε διάφορους τρόπους υπολογισμού του ρυθμού ροής του υλικού που είναι αποθηκευμένο (ή που μεταφέρεται, όταν αναφερόμαστε στην περίπτωση του σωλήνα).

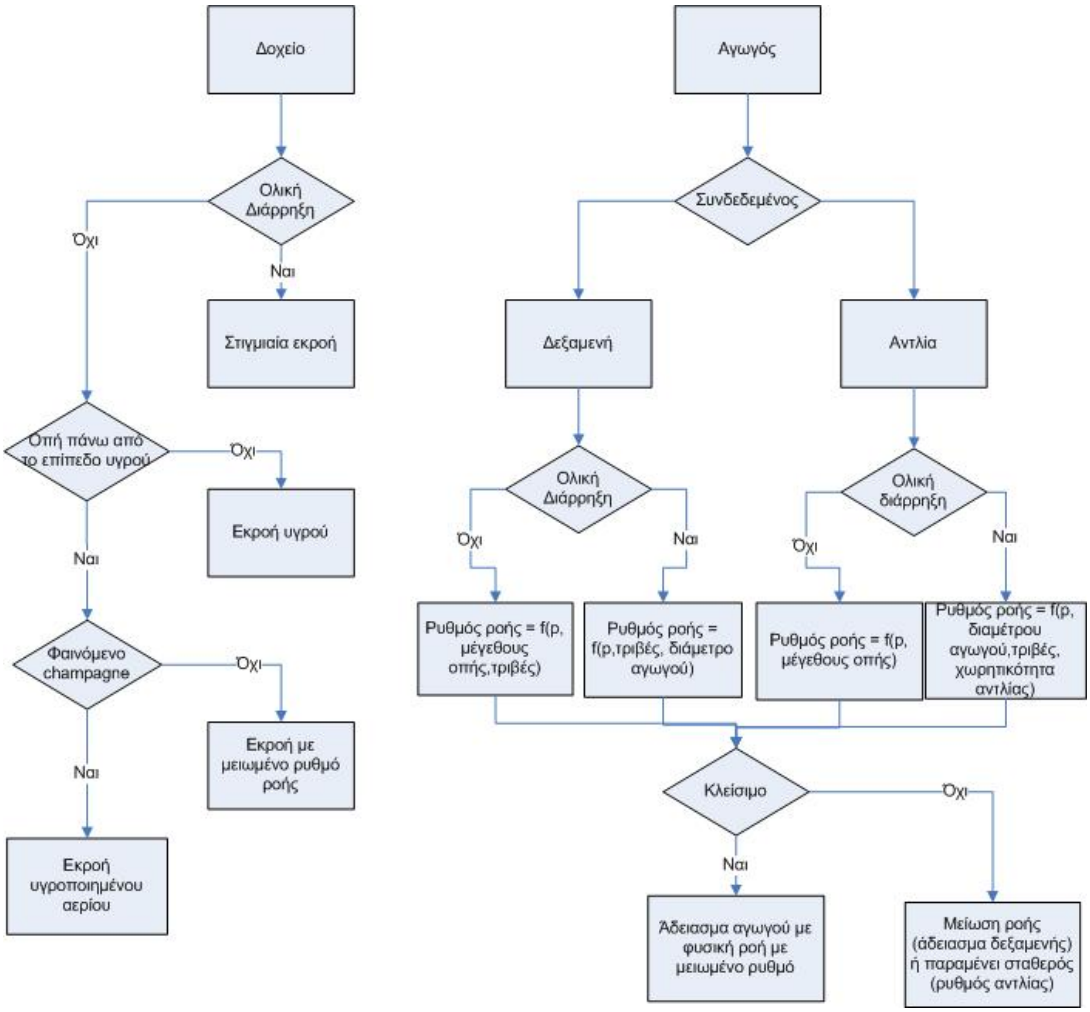
Είναι απαραίτητο να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ των υγρών και αερίων υλικών, καθώς και των υλικών που είναι σε αέρια μορφή υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας, αλλά είναι σε υγρή μορφή όταν βρίσκονται υπό πίεση (αυτά τα υλικά στη συνέχεια θα αναφέρονται ως υγροποιημένα υλικά).

Επίσης υπάρχει και διαχωρισμός μεταξύ της ροής που συμβαίνει κατά τη διάρρηξη μίας δεξαμενής αποθήκευσης, από τη ροή που έχουμε όταν σπάει ένας σωλήνας μεταφοράς.

Για να γνωρίζουμε ποιο είδος ροής θα λάβει χώρα σε δεδομένες συνθήκες υπάρχουν σχετικά διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά βοηθούν στο καθορισμό της διαδικασίας υπολογισμού της ροής που θα χρησιμοποιηθεί. (Οι περισσότερες μέθοδοι που παρουσιάζονται στη συνέχεια καθορίζουν το ποσό της ροής ως συνάρτηση του χρόνου).

1.2. Ροή αερίου

Στο *σχήμα 1* παρουσιάζεται η πορεία καθορισμού του είδους ροής για εκροή από δεξαμενή αποθήκευσης ή από σωλήνα μεταφοράς.



Σχήμα 1: Διάγραμμα εκροής αερίου

Οι εξηγήσεις που χρειάζονται για την κατανόηση του διαγράμματος αυτού δίνονται παρακάτω:

1. ΔΕΞΑΜΕΝΗ — Βασική προϋπόθεση είναι η δεξαμενή αποθήκευσης πριν από τη διάρρηξη να είναι γεμισμένη είτε με αέριο είτε με υγρό πάνω από το οποίο υπάρχουν ατμοί σε κορεσμό.

2. ΣΩΛΗΝΑΣ — Όλες οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί αναφέρονται σε σωλήνες χωρίς γωνίες, κλίσεις, ενώσεις ή διακλαδώσεις. Στην αντίθετη περίπτωση, τυχόν αποκλίσεις από τον ευθύ σωλήνα μπορούν να ληφθούν υπόψη στους

	υπολογισμούς, με την εισαγωγή είτε ενός ισοδύναμου σε μήκος ευθύ σωλήνα, είτε ενός επιπλέον συντελεστή τριβής.
3. ΟΛΙΚΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ	Η υπόθεση αυτή καλύπτει την απότομη εμφάνιση ενός μεγάλου ρήγματος το οποίο έχει σαν συνέπεια την απελευθέρωση όλου του περιεχομένου της δεξαμενής πάνω από το σημείο διάρρηξης, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.
4. ΟΛΙΚΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΣΩΛΗΝΑ	Η υπόθεση αυτή καλύπτει την απότομη εμφάνιση ενός ρήγματος τέτοιου μήκους, έτσι ώστε η περιοχή της διάρρηξης να είναι σχεδόν ίση με τη διατομή του σωλήνα.
5. ΜΙΚΡΟ ΑΝΟΙΓΜΑ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ	Αν ένα μικρό άνοιγμα εμφανιστεί στη δεξαμενή ο ρυθμός της ημισυνεχούς εκροής που θα λάβει χώρα εξαρτάται από την πίεση που επικρατούσε πριν από τη διάρρηξη (πίεση αποθήκευσης), καθώς και από το μέγεθος του ανοίγματος.
6. ΜΙΚΡΟ ΑΝΟΙΓΜΑ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ	Στην περίπτωση που έχουμε διαρροή από ένα μικρό άνοιγμα σε σωλήνα που συνδέεται με δεξαμενή, ο ρυθμός της ροής θα εξαρτάται από το μέγεθος του ανοίγματος καθώς και από την πίεση που επικρατούσε στην περιοχή του άνοιγματος πριν από τη διάρρηξη. Η πίεση αυτή εξαρτάται κυρίως από την πίεση αποθήκευσης στη δεξαμενή στο σημείο ένωσης με το σωλήνα. Επίσης εξαρτάται από τη τριβή ανάμεσα στο αέριο και το σωλήνα. Επομένως η πίεση αυτή είναι πολύ μικρότερη από την πίεση αποθήκευσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση σωλήνων μεγάλου μήκους.
7. ΣΩΛΗΝΑΣ - ΑΝΤΛΙΑ	Στην περίπτωση διαρροής από άνοιγμα σε σωλήνα που είναι συνδεδεμένος με μια αντλία, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Στη περίπτωση αυτή οι ιδιότητες της αντλίας είναι

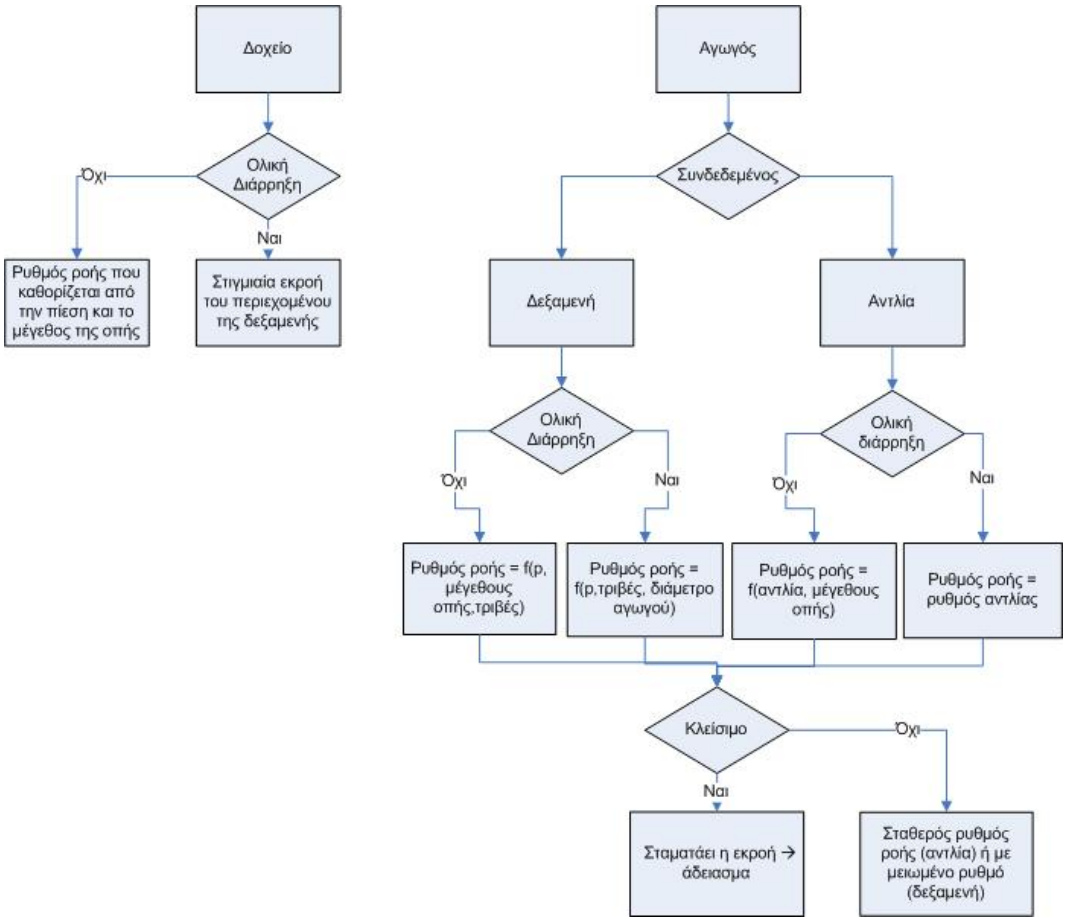
σημαντικές. Ο ρυθμός ροής αποτελεί συνάρτηση της πίεσης της αντλίας. Υποθέτουμε ότι η χωρητικότητα της αντλίας ελάχιστα επηρεάζεται από την ύπαρξη ενός μικρού ανοίγματος.

8. ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΗ	Όταν το άνοιγμα στη δεξαμενή αποθήκευσης βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του υγρού, τότε θα έχουμε εκροή υγρού. Αν το άνοιγμα βρίσκεται αρχικά πάνω από τη στάθμη του υγρού, αλλά λόγω της εκτόνωσης του υγρού καταλήγει να βρεθεί κάτω από αυτή, τότε θα έχουμε ροή σε δύο φάσεις (υγρή και αέρια). Τέλος, αν το άνοιγμα βρίσκεται πολύ πιο ψηλά από το επίπεδο του υγρού, τότε θα έχουμε απελευθέρωση ατμού. Ο ατμός αυτός που οφείλεται στην αδιαβατική ζέση σιγά — σιγά θα υποβληθεί σε μείωση στη θερμοκρασία. Ως άμεση συνέπεια θα έχουμε τη μείωση της πίεσης του ατμού και ταυτόχρονα τη μείωση του ρυθμού ροής, ο οποίος εξαρτάται από την πίεση αυτή.

1.3. Ροή υγρού

Η διαδικασία καθορισμού του είδους ροής για εκροή υγρού από μια δεξαμενή αποθήκευσης ή από ένα σωλήνα μεταφοράς φαίνεται στο *σχήμα 2*.

Οι εξηγήσεις που χρειάζονται για την κατανόηση του διαγράμματος αυτού είναι όμοιες με αυτές που δίνονται για την ροή του αερίου.

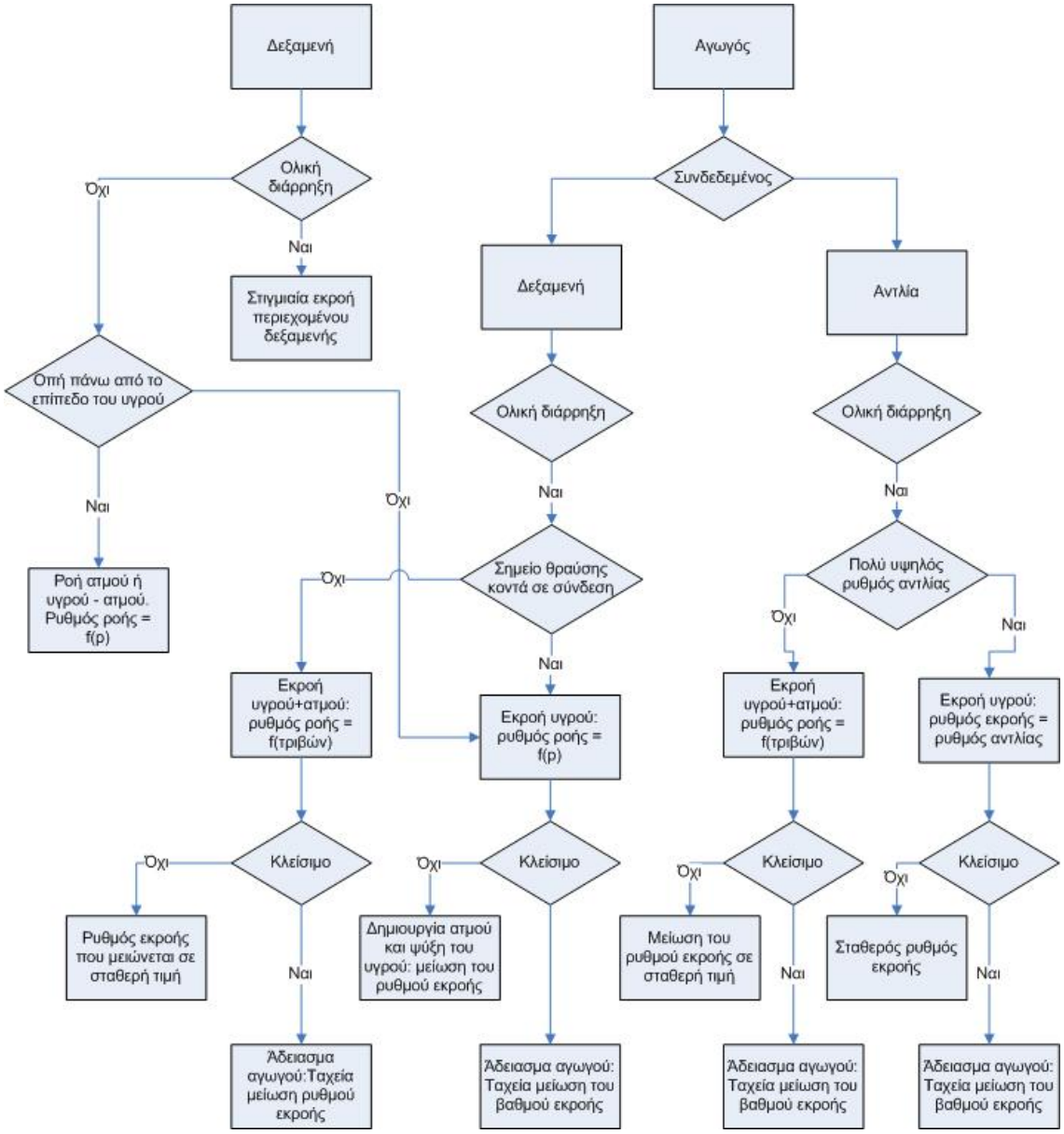


Σχήμα 2: Διάγραμμα εκροής υγρού

1.4. Ροή αερίου συμπιεσμένου σε υγρή μορφή (υγροποιημένου αερίου)

Το *σχήμα 3* αναφέρται στο διάγραμμα εκροής συμπιεσμένου αερίου από δεξαμενή αποθήκευσης ή από σωλήνα μεταφοράς.

Παρακάτω παρατίθενται κάποιες εξηγήσεις για την κατανόηση του διαγράμματος αυτού:



Σχήμα 3: Διάγραμμα εκροής υγροποιημένου αερίου

1. ΔΕΞΑΜΕΝΗ — Θεωρείται ότι αρχικά, πριν από τη διάρρηξη η δεξαμενή είναι σφραγισμένη και ότι η εσωτερική πίεση είναι ισοδύναμη με την πίεση κορεσμού του περιεχομένου αερίου στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Η υδροστατική πίεση έχει χαμηλή τιμή και θεωρείται αμελητέα.

2. ΣΩΛΗΝΑΣ — Θεωρείται σωλήνας ευθύς, χωρίς ενώσεις και

διακλαδώσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, η διαδικασία αντικατάστασης του μήκους με το ισοδύναμο μήκος σωλήνα είναι ίδια όπως στην περίπτωση υγρών κι αερίων.

3. ΟΛΙΚΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ	Στην περίπτωση αυτή κάνουμε την υπόθεση ότι έχουμε τη ξαφνική εμφάνιση ενός μεγάλου ρήγματος, έτσι ώστε όλο το περιεχόμενο της δεξαμενής εκρέει σε μικρό χρονικό διάστημα. Το υγρό στην περίπτωση αυτή κι υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες θα αλλάξει αδιαβατικά, σε μίγμα υγρού και αερίου. Αυτό θα συμβεί μόνο μετά από εκτόνωση πολλαπλάσια του αρχικού όγκου. Μόνο σε αυτή τη περίπτωση θα έχουμε ένα τελικό μίγμα με αέρα. Η δεξαμενή ενδεχομένως να καταστραφεί τελείως εάν αποδυναμωθούν τα τοιχώματά της λόγω υπερθέρμανσης. Η τελευταία περίπτωση συνδέεται με τα BLEVE[1].
4. ΟΛΙΚΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΣΩΛΗΝΑ	Η υπόθεση αυτή καλύπτει την απότομη εμφάνιση ενός ρήγματος τέτοιου μήκους, έτσι ώστε η περιοχή της διάρρηξης να είναι σχεδόν ίση με τη διατομή του σωλήνα. Σε αυτό το είδος ανοίγματος το υγρό εξατμίζεται μερικώς, έτσι ώστε ένα μίγμα δύο φάσεων

[1] B.L.E.V.E. (Boiling Liquid Expanding Vapors Explosion) ή έκρηξη διαστελλόμενων ατμών ζέοντος υγρού είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει στις κλειστές δεξαμενές (σφαίρες, δοχεία, βαγόνια, βυτιοφόρα οχήματα) που περιέχουν συνήθως υγραέρια (LPG) και βρίσκονται υπό την επίδραση πυρκαγιάς. Συνήθως μετά τα 10 έως 30 πρώτα λεπτά επαφής με τις φλόγες, αναπτύσσεται μεγάλη εσωτερική πίεση από τους ατμούς του εξατμιζόμενου υγρού, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη βίαιη διάρρηξη της δεξαμενής, σε σημείο πάνω από τη στάθμη του υγροποιημένου αερίου. Το μέγεθος της εκρήξεως, εξαρτάται κυρίως από την ήδη εξατμισμένη ποσότητα υγρού την στιγμή της θραύσης του δοχείου καθώς και από το βάρος των θραυσμάτων του. Αμέσως μετά την έκρηξη, όλη η ποσότητα του υγροποιημένου αερίου εξατμίζεται, έρχεται σε επαφή με τον αέρα, σχηματίζει εύφλεκτο μίγμα ατμών - αέρα και αναφλέγεται ως πύρινη σφαίρα.

εκρέει από τον σωλήνα. Κατά την διάρκεια της αδιαβατικής ζέσης (βρασμού), η ενέργεια λαμβάνεται από το ίδιο το υλικό. Επιπλέον, η κινητική ενέργεια πρέπει να παραχθεί από τη ροή με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του υλικού να μειώνεται.

5. ΜΙΚΡΟ ΑΝΟΙΓΜΑ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

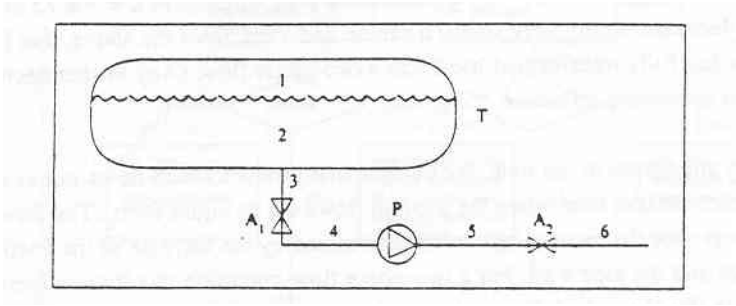
Αν ένα μικρό άνοιγμα εμφανιστεί στη δεξαμενή, το περιεχόμενο της δεξαμενής δεν διαφεύγει στιγμιαία. Ο ρυθμός της συνεχούς εκροής εξαρτάται από τη διαφορά της πίεσης ανάμεσα στη πίεση αποθήκευσης του δοχείου και την ατμοσφαιρική πίεση. Επίσης εξαρτάται και από το μέγεθος και την τοποθεσία της οπής.

Όταν το άνοιγμα βρίσκεται πάνω από το επίπεδο του υγρού, τότε θα έχουμε ροή αερίου, αλλά ταυτόχρονα το υγρό θα αρχίσει να βράζει. Στην περίπτωση αρκετά μεγάλης αύξησης όγκου, ο ατμός θα περιέχει και υδροσταγονίδια (φαινόμενο σαμπάνιας). Η πίεση του μίγματος υγρού αερίου που διαφεύγει είναι ίση με την πίεση κορεσμού του υγρού, σε θερμοκρασία που σταδιακά μειώνεται λόγω της παροχής ενέργειας για την εξάτμιση. Στην περίπτωση που το άνοιγμα βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του υγρού, εφόσον στο επίπεδο του υγρού, το υλικό πο διαφεύγει θα έχει την ίδια σύσταση όπως και μέσα στη δεξαμενή, κι επομένως θα μένει υγρό. Για να αντισταθμιστεί όμως αυτό, σιγά-σιγά το υγρό θα αρχίζει να εξατμίζεται κι ατμός θα καλύψει τον άδειο όγκο μέσα στη δεξαμενή. Θεωρείται ότι η διαδικασία της εξάτμισης θα λαμβάνει χώρα στο επίπεδο του υγρού και ότι οι φυσαλίδες που θα είναι πιθανόν να υπάρχουν μέσα στο υγρό, θα ανυψωθούν γρήγορα στην επιφάνεια και δεν θα μεταφερθούν μαζί με το υγρό έξω από τη δεξαμενή μέσω του ανοίγματος.

6. ΜΙΚΡΟ ΑΝΟΙΓΜΑ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ	Στην περίπτωση που έχουμε ένα μικρό άνοιγμα στο σωλήνα τότε το υλικό που απελευθερώνεται θα έχει υγρή μορφή. Έστω ότι το άνοιγμα στο σωλήνα βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το σημείο ένωσης με την δεξαμενή αποθήκευσης. Στο μικρό χρονικό διάστημα που απαιτείται για να εκρεύσει το υγρό από ένα μικρό τμήμα του σωλήνα, η θερμοδυναμική ισορροπία δεν έχει προλάβει να επιτευχθεί. Στην περίπτωση αυτή το υγρό που διαφεύγει θα περιέχει μικρότερο κλάσμα μάζας ατμού από το υπολογιζόμενο, και –σε ακραία περίπτωση- θα αποτελεί αποκλειστικά υπέρθερμο υγρό. Για δεδομένες διαστάσεις οπής η ροή θα αποτελεί μίγμα δύο φάσεων. Η ροή από ένα σωλήνα απείρου μήκους, μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα θα καθορίζεται ολοένα και πιο ισχυρά από την αύξηση της τριβής μεταξύ του υλικού και των τοιχωμάτων του σωλήνα. Για τη διφασική ροή η τριβή αυτή αυξάνεται εξαιτίας της διεπιφάνειας βρασμού, (στάθμη που το υγρό μετατρέπεται σε ατμό), που κινείται προς το εσωτερικό του σωλήνα.
7. ΣΩΛΗΝΑΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΣ ΜΕ ΑΝΤΛΙΑ	Ένας σωλήνας είναι πιθανόν να συνδέεται κατευθείαν με τη δεξαμενή, μπορεί όμως να είναι συνδεδεμένος και με αντλία. Οι αντλίες κυρίως χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις σωλήνων για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Διαφασική ροή δεν μπορεί να εμφανιστεί, όταν η χωρητικότητα της αντλίας είναι υψηλότερη από την τιμή της ροής των δύο φάσεων. Στην περίπτωση αυτή το υγρό ατμοποιείται μετά την εκροή , οπότε απαιτούνται μεγάλες. ταχύτητες λειτουργίας της αντλίας (πχ για το προπάνιο >10 m/s). Για την περίπτωση μιας μέσης τιμής χωρητικότητας,

η ροή του υγρού θα μειώνεται με το χρόνο, λόγω της τριβής που εμφανίζεται (αυξανόμενη επιφάνεια επαφής σωλήνα και μίγματος), έως ότου η ροή να γίνει ίση με τη χωρητικότητα της αντλίας. Όταν έχουμε ροή προς τα κάτω ο ρυθμός εκροής θα καθορίζεται για λίγο από τη ροή, εφόσον ο ρυθμός της αντλίας είναι μικρότερος από αυτόν της διφασικής ροής.

Ο τρόπος με τον οποίο καθορίζεται ο τύπος εκροής σε σύστημα για αποθήκευση ή μεταφορά υγροποιημένου αερίου από το μέγεθος και την τοποθεσία της ζημίας, εξηγείται πιο εύκολα με τη βοήθεια του *σχήματος 4*. το σύστημα αποτελείται από δεξαμενή αποθήκευσης (T), η οποία συνδέεται σε σωλήνα μέσω μίας βαλβίδας (A_1) και μίας αντλίας (P). Μία δεύτερη βαλβίδα A_2 υπάρχει μετά την αντλία στην ίδια σωλήνωση.



Σχήμα 4: Σύστημα αποθήκευσης και μεταφοράς με τα αντίστοιχα σημεία διάρρηξης

Σημείο Διάρρηξης 1	Ολική καταστροφή	Φυσική έκρηξη
	Μικρό άνοιγμα	Φαινόμενο champagne ή (για πολύ μικρά ανοίγματα) εκροή ατμού
Σημείο Διάρρηξης 2	Ολική καταστροφή	Φυσική έκρηξη
	Μικρό άνοιγμα	Εκροή υγρού

Σημείο Διάρρηξης 3	Ολική καταστροφή	Εκροή δύο φάσεων (L> 75 mm) ή εκροή υγρού (L< 75 mm)
	Μικρό άνοιγμα	Εκροή υγρού
Σημείο Διάρρηξης 4	Ολική καταστροφή	Εκροή δύο φάσεων η βαλβίδα δουλεύει: το αντίστοιχο τμήμα του σωλήνα αδειάζει η βαλβίδα δεν δουλεύει:. Ο ρυθμός εκροής μειώνεται σε σταθερή τιμή
	Μικρό άνοιγμα	Εκροή υγρού
Σημείο Διάρρηξης 5	Ολική καταστροφή	Εκροή δύο φάσεων. Ο ρυθμός εκροής μειώνεται σε σταθερή τιμή - η αντλία σταματάει: το αντίστοιχο τμήμα του σωλήνα αδειάζει
	Μικρό άνοιγμα	Εκροή υγρού
Σημείο Διάρρηξης 6	Ολική καταστροφή	Εκροή δύο φάσεων η βαλβίδα δουλεύει: το αντίστοιχο τμήμα του σωλήνα αδειάζει η βαλβίδα δεν δουλεύει: ο ρυθμός εκροής μειώνεται μέχρι να φτάσει τον ρυθμό λειτουργίας της αντλίας.
	Μικρό άνοιγμα	Εκροή υγρού

2. Μέθοδοι υπολογισμού

2.1. Ροή αερίου

2.1.1 Ροή αερίου από δεξαμενή

Η αρχικός ρυθμός ροής αερίου που απελευθερώνεται μέσω ενός ανοίγματος έξω από το δοχείο, δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_u = C_D A_u \psi_0 \left[p_0 \rho_0 \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{1/2} \qquad (1)$$

όπου:

p_0 = πίεση στο δοχείο {Pa}

ρ_0 = πυκνότητα αερίου {Pa}

$\gamma = C_p/C_v$ {_}

A_u = εμβαδόν διατομής του ανοίγματος εκροής

Ο C_D αποτελεί έναν συντελεστή που εκφράζει τη μορφή της επιφάνειας διατομής του ανοίγματος του σωλήνα και παίρνει τιμές από 0 έως 1 (0 για επιφάνεια μεγάλης τραχύτητας και 1 για λεία επιφάνεια διατομής).

Η τιμή του ψ_0 δίνεται από:

$$1)\quad \frac{p_0}{p_\alpha} < \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} : \psi_0 = \left\{ \frac{2}{\gamma-1} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left(\frac{p_\alpha}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p_\alpha}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{1/2} \qquad (2\alpha)$$

(υποκρίσιμη ροή)

$$2)\quad \frac{p_0}{p_\alpha} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} : \psi_0 = 1 \qquad (2b)$$

(κρίσιμη ή υπερκρίσιμη ροή)

Στις παραπάνω σχέσεις p_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Για τα περισσότερα αέρια η τιμή του γ κυμαίνεται από 1,1 έως 1,4 κι ο ρυθμός εκροής είναι σχεδόν κρίσιμος όταν $p_0 \geq 1.9p_\alpha$. Η πίεση p συσχετίζεται με την πυκνότητα του αερίου ρ. Για τα ιδανικά αέρια η πυκνότητα δίνεται:

$$\rho_g = \frac{Mp}{RT} \qquad (3)$$

ενώ για κορεσμένους ατμούς εφαρμόζεται η εξής ικανοποιητική προσέγγιση:

$$\rho = \frac{Mp_v}{RT}\left[1 - K_3\left(\frac{Mp_v}{RT}\right)^{K_4}\right]^{-1} \tag{4}$$

όπου K_3 = [0.01 - 0.03] και K_4 = [0.7 - 0.9].

Στην περίπτωση που ο όγκος του αερίου μέσα στο δοχείο παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της εκροής, ο ρυθμός σταδιακά θα μειώνεται, αφού η μάζα, κι επομένως κι η πίεση στο δοχείο επίσης μειώνεται. Θεωρείται ότι η μεταβολή της κατάστασης λαμβάνει χώρα αδιαβατικά. Εξάγεται έτσι το συμπέρασμα ότι, συγκρίνοντας με τη σχέση (1) θα πρέπει να την πολλαπλασιάσουμε με ένα συντελεστή εξαρτώμενο του χρόνου που δίνεται από:

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{m}_u}{\dot{m}_{r(t=0)}} = \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)t_r\right]^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \tag{5}$$

όπου

$$t_r = C_D \cdot A_u \cdot (p_0\rho_0)^{1/2} m_0^{-1}\beta \cdot t \tag{6α}$$

και

$$\beta = \left[\gamma\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\right]^{1/2} \tag{6β}$$

Η σχέση εφαρμόζεται χωρίς το συντελεστή Ψ_0 εφόσον ο ρυθμός εκροής είναι κρίσιμος. Η χρονική διάρκεια της κρίσιμης ροής μπορεί να εκτιμηθεί υπολογίζοντας τη πίεση p ως εξής:

$$p = p_0\left[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)t_r\right]^{-\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \tag{7}$$

2.1.2 Ροή αερίου από σωλήνα

Ο ρυθμός ροής αερίου που εκρέει από σπασμένο σωλήνα είναι:

$$\dot{m} = A_1(p_0\rho_0\gamma)^{1/2}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \tag{8}$$

όπου A_1 είναι το εμβαδόν διατομής του σωλήνα.

Η σχέση αυτή αναφέρεται σε κρίσιμη εκροή (για μη κρίσιμη εκροή θα πρέπει να συμπεριληφθεί ο παράγοντας ψ_0, ο οποίος είναι μικρότερος από 1). Η ροή

στον σωλήνα δεν είναι σταθερή εξαιτίας του γεγονότος ότι το επίπεδο αποσυμπίεσης (δηλαδή το σημείο όπου αρχίζει η αποσυμπίεση) μετακινείται προς τα μέσα με την ταχύτητα του ήχου. Η τριβή δεν έχει θεωρηθεί αλλά παρόλα αυτά παίζει ρόλο σε σωλήνες μεγάλου μήκους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός ροής είναι κατά $\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$ μικρότερος από αυτόν της εκροής από δεξαμενή μέσω κυκλικής οπής ίδιας διαμέτρου με αυτής της οπής του σωλήνα. Η τιμή αυτού του παράγοντα είναι $e^{-1/2}$ όταν γ=1, και μειώνεται αργά για αυξανόμενες τιμές του γ:

γ	Παράγοντας
1.0	0.607
1.1	0.599
1.2	0.592
1.3	0.585
1.4	0.579

Η οριακή τιμή του παράγοντα (=0.607) αντιστοιχεί στον παράγοντα του ρυθμού εκροής για κυκλική οπή δεξαμενής.

Ο ρυθμός εκροής από σωλήνα που βρίσκεται σε δεξαμενή δύσκολα θα αλλάξει από τη στιγμή που το κύμα αποσυμπίεσης έχει φτάσει στο σημείο σύνδεσης του σωλήνα με τη δεξαμενή. Για το λόγο αυτό ο ρυθμός εκροής από σωλήνα μικρού μήκους που συνδέεται με δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί ίδιος με αυτόν κυκλικής οπής ίδιας διαμέτρου σε δεξαμενή. Υπολογίζοντας τον ρυθμό εκροής από οπή μικρότερης διαμέτρου από τη διάμετρο σωλήνα, ο σωλήνας μπορεί να θεωρηθεί στους υπολογισμούςδιαμήκης δεξαμενή. σε αυτήν την περίπτωση εφαρμόζεται η σχέση (1).

Για σωληνώσεις μεγάλου μήκους η επίδραση της τριβής θα πρεπει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς, οπότε λαμβάνεται η εξής σχέση:

$$\dot{m} = A_1 G_r G_0 \tag{9}$$

στην οποία η αρχική ροή μάζας G_0 δίνεται από:

$$G_0 = (p_0 \rho_0 \gamma)^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \tag{10}$$

κι η σχετική ροή μάζας G_r μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση του χρόνου t ή (αφού επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση) του μήκους σωλήνα l, με τη βοήθεια

$$G_r = \alpha^{1/2}\left[\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)+\alpha^{1/2}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)\right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \tag{11}$$

των παρακάτω τύπων:

όπου το α προκύπτει από τον μειωμένο παράγοντα τριβής f_r, που ορίζεται ως:

$$f_r = \frac{\left[\ln\alpha + \alpha^{-1} - 1\right]}{\left[\gamma+1\right]} \tag{12}$$

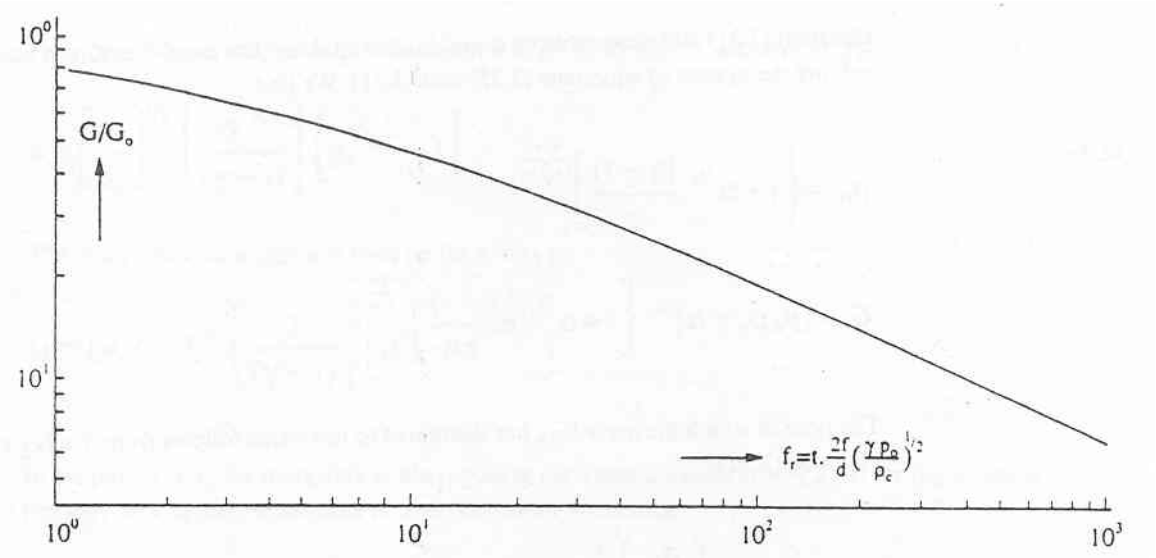
και ο παράγοντας τριβής συνδέεται με το μήκος σωλήνα l μέσω της σχέσης

$$f_r = \frac{2fl}{d} \tag{13}$$

ή σαν συνάρτηση του χρόνου ροής t:

$$f_r = \left(\frac{2fl}{d}\right)\left(\frac{p_0\gamma}{\rho}\right)^{1/2} t \tag{14}$$

Στο *σχήμα 5* που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του G_r συναρτήσει του f_r (ουσιαστικά ανεξάρτητο του γ).



Σχήμα 5: Σχετική ροή μάζας κατά την εκροή αερίου από σωλήνα, ως συνάρτηση του παράγοντα τριβής f_r

2.2. Ροή υγρού

2.2.1 Ροή από δεξαμενή

Η ταχύτητα με την οποία ρέει το υγρό από το άνοιγμα δίνεται από την εξίσωση Bernoulli:

$$p_0 - p_\alpha = \frac{1}{2}\rho_l\left(u^2 - u_0^2\right) \tag{15}$$

όπου:

p_0 = πίεση πριν την εμφάνιση του ανοίγματος	{Pa}
p_α= ατμοσφαιρική πίεση	{Pa}
ρ_ρ = πυκνότητα υγρού	{kg m^{-3}}
u = ταχύτητα της ροής του υγρού	{m s^{-1}}
u_0 = ταχύτητα του υγρού πριν την εμφάνιση του ανοίγματος	{m s^{-1}}

Η αρχική πίεση υπολογίζεται από:

$$p_0 = \rho_l \cdot g \cdot h + p_h \qquad (16)$$

όπου:

p_h = πίεση στη δεξαμενή, στην επιφάνεια του υγρού	{Pa}
h= υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης του υγρού και του ανοίγματος εκροής	{m}
g = συντελεστής βαρύτητας	{m s^{-1}}

Η ταχύτητα ροής συνεπάγεται από τις (15) και (16) (όπου ο όρος της ταχύτητας u_0 έχει απομακρυνθεί ως αμελητέος):

$$u = \left[2\left(p_h - p_\alpha\right)\rho_l^{-1} + 2gh\right]^{1/2} \qquad (17)$$

Ο ρυθμός εκροής μπορεί να υπολογιστεί από αυτή την ταχύτητα (δηλαδή η ροή μάζας ανά μονάδα χρόνου) πολλαπλασιάζοντάς την με την πυκνότητα του υγρού και την ενεργή επιφάνεια εκροής (effective outflow area). Η επιφάνεια αυτή είναι το παράγωγο της εγκάρσιας επιφάνειας του ανοίγματος A_u και της τιμής του συντελεστή C_D. Αυτός ο συντελεστής, με τον οποίο εισέρχονται στους υπολογισμούς η εγκάρσια συστολή του υγρού στο σημείο του ανοίγματος κι η ενδεχόμενη τριβή με την άκρη του ανοίγματος έχει τιμή 0.61 για μια αιχμηρή άκρη.

Η τιμή της ροής στο άνοιγμα δίνεται τότε:

$$\dot{m}_u = C_D \cdot A_u \cdot \rho_\rho \left[2\left(p_h - p_\alpha\right) \cdot \rho_\rho^{-1} + 2gh\right]^{1/2} \qquad (18)$$

Η πίεση επιφανείας του υγρού είναι μεγαλύτερη ή ίση της πίεσης κορεσμού του υγρού. Για υλικά τα οποία βρίσκονται σε υγρή μορφή σε ατμοσφαιρική πίεση ($p_v \leq p_\alpha$) και μπορούν να αποθηκευτούν σε αυτή την πίεση θεωρείται

ότι, κατά τη διάρκεια της εκροής, θα διατηρηθεί αυτή η ατμοσφαιρική πίεση πάνω από το υγρό (ως συνέπεια της εισχώρησης του αέρα δια μέσου της τρύπας ή επειδή η δεξαμενή είναι κλεισμένη από την επονομαζόμενη επιπλεόμενη σκεπή –floating roof). Με αυτή την προϋπόθεση η τιμή ροής δίνεται:

$$\dot{m}_u = C_D \cdot A_u \cdot \rho_l \cdot (2gh)^{1/2} \qquad (19)$$

Κατά τη διάρκεια της ροής το ύψος h αλλάζει με τρόπο που εξαρτάται από το σχήμα και τη θέση της δεξαμενής.

Για τα υγρά που αποθηκεύονται (σε κλειστές δεξαμενές) στην πίεση κορεσμού τους $p_v (p_v \geq p_\alpha)$ η στάθμη του υγρού θα πέσει κατά τη διάρκεια της ροής. Η πίεση πάνω από το υγρό μπορεί να παραμείνει σταθερή κατά τη διάρκεια της εξάτμισης ενός μέρους του υγρού. Θεωρείται λοιπόν ότι η εξάτμιση θα είναι αδιαβατική. Εξαιτίας αυτού η θερμοκρασία στη δεξαμενή θα πέσει κι άρα κι η πίεση κορεσμού του ατμού. Για το βήμα προς βήμα υπολογισμό του ρυθμού εκροής πρέπει να είναι γνωστά τα παρακάτω:

α. Η μεταβολή του αρχικού ύψους της στάθμης σε σχέση με το βαθμό (ποσοστό) πλήρωσης της δεξαμενής. Αυτό καθορίζεται από το σχήμα και τη θέση της δεξαμενής (κάθετη ή οριζόντια)

β. Η μεταβολή της πίεσης κορεσμού p_v κι η αντίστοιχη θερμοκρασία σε σχέση με τη μάζα του υγρού που έχει απελευθερωθεί. Αυτή η μάζα και η θερμοκρασία καθορίζουν το κλάσμα μάζας υγρού - ατμού (x) στη δεξαμενή. Η σχέση που υπάρχει μεταξύ T και x είναι:

$$x = \frac{x_0 \cdot T}{T_0} + \left(\frac{c_v \cdot T}{h_v}\right) \ln\left(\frac{T_0}{T}\right) \qquad (20)$$

όπου

x_0 = κλάσμα μάζας σε συνθήκες αποθήκευσης	{_}
c_v= ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο	{J kg^{-1} K^{-1}}
h_v = θερμότητα εξάτμισης	{J kg^{-1}}

Ο υπολογισμός με απλά βήματα μπορεί να γίνει ως εξής:

1. Ξεκινάμε με αρχικές συνθήκες (x_0, T_0, διαστάσεις της δεξαμενής, αρχικό ύψος h_o, μέγεθος ανοίγματος). Υπολογίζουμε τιμή ροής $\dot{m}_u$ κάνοντας χρήση τη σχέση (19).

2. Επιλέγουμε θερμοκρασία T που είναι κοντά στη T_0 (πχ 1K).Υπολογίζουμε x, p_v, h_v στο χρονικό διάστημα Δt.
3. Κάνουμε τώρα χρήση της θερμοκρασίας T, όπως κάναμε με την T_0, με αρχικές παραμέτρους τις υπολογιζόμενες x, p_v και h_v.
4. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα από 1 έως 3 για θερμοκρασίες που γίνονται προοδευτικά πιο χαμηλές.

2.2.2 Ροή υγρού από σωλήνα

Η ροή μέσω ανοίγματος σε σωλήνα μπορεί, κάτω από ορισμένες συνθήκες, να θεωρηθεί ως ροή από δεξαμενή με την οποία βρίσκεται συνδεδεμένος ο σωλήνας. Όταν δεν υπάρχουν αντλίες και ο σωλήνας είναι μικρού μήκους, η τιμή της ροής μπορεί να υπολογιστεί άμεσα με τις σχέσεις που δίνονται στην παράγραφο 2.2.1. Η τιμή του ρυθμού είναι ανάλογη του μεγέθους του ανοίγματος αλλά η μέγιστη τιμή της (η οποία συμβαίνει όταν λαμβάνει χώρα ολική καταστροφή του σωλήνα) εξαρτάται από τη διάμετρο d του σωλήνα. Σε σωλήνες μεγάλου μήκους, παρόλα αυτά, η τριβή του υγρού που ρέει μπορεί να προκαλέσει αντίσταση και να καθορίσει το ρυθμό ροής (δηλαδή να τον μειώσει). Επίσης κάμψεις και διασταυρώσεις στον σωλήνα επιφέρουν επιπλέον μείωση του ρυθμού ροής.

Η πτώση της πίεσης κατά τη διάρκεια σταθερής ροής μέσα σε σωλήνα κυκλικής διατομής δίνεται:

$$\Delta p = \frac{2fl}{d} \cdot \rho_l \cdot u^2 \qquad (21)$$

Στη σχέση (21) ως f ορίζεται ο παράγων τριβής, ο λεγόμενος Fanning, ο οποίος καθορίζεται από το $\frac{1}{2}\rho u^2$ λόγο μεταξύ και της τριβής πάνω στον τοίχο. Ο παράγων τριβής f καθορίζεται από τη σχετική σκληρότητα του τοιχώματος(λόγος μεταξύ της τραχύτητας ε τοίχου και διαμέτρου σωλήνα d) και τον αριθμό Reynolds, $R_e = udn^{-1}$, όπου n είναι το κινηματικό ιξώδες. Για σωλήνα με ανώμαλη επιφάνεια ισχύει η ακόλουθη προσέγγιση:

$$f = \left[4\log\left(\frac{3.715d}{\varepsilon}\right)\right]^{-2} \qquad (22)$$

Για σωλήνα μήκους l που συνδέεται με δεξαμενή αποθήκευσης, η ταχύτητα

ροής προκύπτει από (15) και (21) όταν η στάθμη του υγρού h βρίσκεται ψηλότερα από το άνοιγμα.

$$u = \left[2\left(p_h - p_\alpha\right)\rho_l^{-1} + 2gh\right]^{1/2}\left[1 + \frac{4fl}{d}\right]^{-1/2} \tag{23}$$

Η τιμή της ροής ακολουθεί από τα προηγούμενα:

$$\dot{m}_u = A_l \cdot \rho_l \cdot u \tag{24}$$

όπου A_l είναι η επιφάνεια διατομής του σωλήνα. Η τριβή παίζει σημαντικό ρόλο για σωλήνες στους οποίους $\frac{fl}{d} > 0.25$. Για ένα σωλήνα από ατσάλι με ανώμαλη επιφάνεια και διάμετρο ίση με d=0.1, θα ισχύει αυτό για f=410^{-3} όταν l>6m.

Οι αντλίες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των υγρών μέσα σε σωλήνες μεγάλου μήκους. Ο ρύθμος ροής τότε καθορίζεται από τις ιδιότητες της αντλίας, δηλαδή εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο η αντλία αντιδρά στην κατά τη κατεύθυνση της ροής μεταβολή της πίεσης.

Αν η αντλία λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε ανεξάρτητα της πίεσης ο ρυθμός εκροής παραμένει σταθερός, μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό ροής που εκρέει από τονσωλήνα μέσω του ανοίγματος. Αυτό το ποσοστό εξαρτάται από το λόγο μεταξύ του μεγέθους του ανοίγματος και της διατομής του σωλήνα, καθώς και από τη θέση του ανοίγματος και την πίεση στο τέλος του σωλήνα. Όταν η πίεση αυτή είναι μετά βίας μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής το υγρό που ελευθερώνεται από το άνοιγμα σε απόσταση l' από την αντλία μπορεί προσεγγιστικά να δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\dot{m}_u}{\dot{m}_{st}} = \left\{1 + \left(\frac{A_l}{C_D A_g}\right)\left[\frac{d}{4f\left(l - l'\right)}\right]^{1/2}\right\}^{-1} \tag{25}$$

όπου

$\dot{m}_u$ = ρυθμός εκροής από το άνοιγμα

$\dot{m}_{st}$ = σταθερή ροή μέσα στο σωλήνα

l = μήκος σωλήνα

l' = μεταβαλλόμενο μήκος

Για ολοκληρωτική καταστροφή σωλήνα είναι φυσικά $\dot{m}_u = \dot{m}_{st}$.

Σε περίπτωση ανοίγματος που βρίσκεται πριν την αντλία και πάλι θα διαρεύσει ένα μεγάλο ποσό ροής.

Οι σχέσεις που αναφέρθηκαν ισχύουν για ροές που είναι μόνιμες ή κατά προσέγγιση μόνιμες. Στην περίπτωση εκροής από δεξαμενή αμέσως επιτυγχάνονται συνθήκες μόνιμης ροής. Αντίθετα στην περίπτωση εκροής από σωλήνα μεγάλου μήκους η μόνιμη ροή μπορεί να συμβεί μετά από ένα σημαντικό χρονικό διάστημα επειδή σε έναν τέτοιο σωλήνα θα πρέπει να εδραιωθεί μία νέα βαθμίδα πίεσης. Η εκδοχή αυτή είναι αρκετά σημαντική σε περίπτωση καταστροφής σωλήνα. Τη στιγμή που σπάει ο σωλήνας η πίεση στο σημείο αυτό πέφτει. Το γεγονός αυτό συνδέεται με δύο κύματα αποσυμπίεσης που κινούνται αντίστοιχα προς τη κατεύθυνση της αντλίας και προς την αντίθετη κατεύθυνση με την ταχύτητα ήχου c_0. Η αποσυμπίεση του υγρού οδηγεί στην εκτόνωσή τους, η οποία προσωρινά οδηγεί σε νέα προσαύξηση στο ρυθμό ροής. Αυτή η αύξηση μπορεί να καθοριστεί λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων συνέχειας κι ορμής (συμπεριλαμβάνοντας τους χρονικά εξαρτώμενους όρους). Μέχρι τώρα δεν έχει βρεθεί λύση κι η σχέση που εφαρμόζεται προκύπτει από ένα προσεγγιστικό μοντέλο.

Η μειωμένη ροή μάζας καθορίζεται από τη σχέση:

$$G_r = \frac{G}{\rho_l c_0} \tag{26}$$

που δίνεται ως συνάρτηση της μειωμένης πίεσης p_r και της μειωμένης παραμέτρου τριβής f_r. Αυτά ορίζονται παρακάτω:

$$p_r = \left(\frac{p_0 - p_\alpha}{\rho c_0^2} \right) \tag{27}$$

$$f_r = 2f \frac{(l_2 - l_0)}{d} + \frac{1}{2}\left[1 - \left(\frac{c_D A_u}{2A_l} \right)^2 \right] \tag{28}$$

Μετά από χρόνο

$$t = \frac{d}{2fc_0} \left\{ \left[f_r - \frac{1}{2}\left(\frac{c_D A_u}{2A_l} \right)^2 \right] \right\} \tag{29}$$

η μειωμένη ροή μάζας έχει πέσει σε:

$$G_r = 2p_r \left[(1 + 4p_r f_r)^{1/2} + 1 \right]^{-1} \tag{30}$$

Ο ρυθμός ροής που παρέχεται από τις δύο πλευρές (δύο κύματα αποσυμπίεσης) θα είναι:

$$\dot{m}_u = 2A_l \cdot G = 2A_l r_l c_0 G_r \tag{31}$$

Η μέγιστη τιμή της επιφάνειας εκροής $C_D A_g$ είναι, για τμήμα σωλήνα, ίση με τη μέση τιμή της διατομής του σωλήνα A_l. Για την περίπτωση της ολικής καταστροφής του σωλήνα ο λόγος $2A_l/C_D A_g$ πρέπει να είναι μονάδα. Ο δεύτερος όρος στη σχέση (28) θα είναι τότε ίσος με μηδέν.

Στις παραπάνω σχέσεις η τελική βαθμίδα πίεσης δεν έχει συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς. Για παράδειγμα για την αρχική πίεση p_0 μπορεί να ληφθεί μια μέση τιμή πίεσης. Για την περίπτωση σωλήνα με κλίση ο ρυθμός εκροής μετά από κάποιο χρόνο μπορεί αρχικά να καθοριστεί από τη διαφορά της υδροστατικής πίεσης όπως στη περίπτωση εκροής μάζας από δεξαμενή. Για σωλήνα μήκους l με υψομετρική διαφορά h και γωνία κλίσης α είναι:

$$\sin\alpha = \frac{h}{l} \tag{32}$$

Η ταχύτητα ροής δίνεται από:

$$\frac{2fl}{d}\rho_l u^2 = \rho_l g h \tag{33}$$

από την οποία ο ρυθμός εκροής καθορίζεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_u = A_l \rho_l \left(\frac{gd\sin\alpha}{2f}\right)^{1/2} \tag{34}$$

2.3. Ροή υγροποιημένου αερίου (αερίου συμπιεσμένου σε υγρή μορφή)

2.3.1 Ροή σε μορφή ατμού

Αυτός ο τύπος ροής εμφανίζεται στην περίπτωση πολύ μικρού ανοίγματος το οποίο βρίσκεται πολύ πιο ψηλά από τη στάθμη του υγρού έτσι ώστε να μη προσεγγίζεται από το ζέον υγρό. Η μέθοδος υπολογισμού δίνεται στην παράγραφο 2.1. Παρόλα αυτά δεν είναι απίθανο το υγρό να βράσει στην περιοχή του ανοίγματος, αφού γενικώς μπορούμε να υποθέσουμε ότι η δεξαμενή είναι γεμάτη με μίγμα από υγρού-ατμού (φαινόμενο σαμπάνιας – champagne effect). Η μέθοδος υπολογισμού αυτού του τύπου δίνεται στην παράγραφο 2.3.3.

2.3.2 Ροή σε μορφή υγρού

Η τιμή της ροής στην περίπτωση εκροής υγρού μπορεί να υπολογιστεί ακολουθώντας τη μέθοδο της παραγράφου 2.2. Για την περίπτωση εκροής από δεξαμενή ή από ολοκληρωτικά κατεστραμμένο σωλήνα στον οποίο το σημείο διάρρηξης βρίσκεται κοντά στην ένωση σωλήνα - δεξαμενής μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος υπολογισμού αδιαβατικής διαδικασίας (2.2.1) χρησιμοποιώντας έναν ρυθμό ροής που μειώνεται με το χρόνο, καθώς ο ρυθμός ροής καθορίζεται κατά κύριο λόγο από πίεση κορεσμού (η οποία μειώνεται). Η παραπάνω μέθοδος ισχύει επίσης για ροή από άνοιγμα σε σωλήνα, αλλά σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμός ροής κατά κανόνα είναι αρκετά μικρότερος κι η εξάρτησή του από το χρόνο καθοριζεται από το λόγο του ρυθμού εκροής προς τα περιεχόμενα της δεξαμενής και θεωρείται πρακτικά αμελητέα. Για την περίπτωση που ο σωλήνας συνδέεται με αντλία, η πίεση μπροστά από το άνοιγμα θα είναι κατά κανόνα πολύ υψηλότερη από την πίεση κορεσμού. Για μικρό άνοιγμα η πίεση μπορεί να θεωρηθεί ίση με την πίεση που υπάρχει στη συγκεκριμένη θέση κατά τη διάρκεια της ροής μεταφερόμενου υλικού. Για μεγάλων διαστάσεων άνοιγμα θα πρέπει να υπολογιστεί το πόσο πολύ η πίεση πέφτει εξαιτίας της παρουσίας του ανοίγματος. Για άνοιγμα πολύ μεγάλων διαστάσεων η επιφάνεια είναι ίδιου μεγέθους με εμβαδόν ίδιας έκτασης με αυτό της ολικής διάρρηξης σωλήνα, ο ρυθμός ροής θα είναι ίδιος με τον ρυθμό ροής της αντλίας, με την προϋπόθεση ο ρυθμός ροής της αντλίας να είναι μεγαλύτερος από αυτόν της διφασικής ροής. Ο ρυθμός ροής της αντλίας καθορίζεται από τις ιδιότητές της. Ακολουθούν ορισμένες ακραίες περιπτώσεις:

Η λειτουργία της αντλίας δεν επηρεάζεται από την πίεση μετά την αντλία. Η τιμή της ροής σε αυτή την περίπτωση θα παραμείνει σταθερή.

Μια πτώση πίεσης μετά την αντλία επιφέρει αύξηση στον ρυθμό ροής της αντλίας σε μια μέγιστη τιμή. Αυτή η τιμή θα πρέπει να θεωρηθεί ίση με τον ρυθμό εκροής. (Αυτή η μέγιστη τιμή ρυθμού εκροής θα επιτευχθεί μόνο αφού το κύμα αποσυμπίεσης έχει διέλθει από την απόσταση αντλίας-ανοίγματος. Η πορεία μεταβολής (δηλαδή αποκλίσεων) του ρυθμού εκροής στο "μεταξύ" χρόνικό διάστημα είναι ακόμη ένα "λευκό σημείο").

2.3.3 Ροή σε μορφή υγρού-ατμού ως μίγμα έξω από τη δεξαμενή

Για αυτό τον τύπο εκροής ("σαμπάνιας" – “champagne”) οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν με την εξής σειρά:

Υπολογισμός του ρυθμού εκροής του ατμού για τον ατμό που υπήρχε πάνω από το υγρό και του χρόνου στον οποίο ο ατμός θα αποβληθεί από το ζέον μίγμα.

Υπολογισμός του ρυθμού εκροής του διφασικού μίγματος συναρτήσει του χρόνου.

Συγκεκριμένα:

1. Για τον πρώτο υπολογισμό χρησιμοποιούνται οι σχέσεις της παραγράφου 2.11. Αν η δεξαμενή όγκου V_0 είναι μερικώς πληρωμένη με κλάσμα όγκου Φ, η μάζα του ατμού πάνω από το υγρό είναι:

$$m_{vapour} = V_0 \frac{(1-\Phi)}{v_g} \tag{35}$$

όπου v_g είναι ο ειδικός όγκος εκροής του ατμού. Όταν διαιρούμε τη m_{vapour} με τον ρυθμό εκροής $\dot{m}$ βρίσκουμε το χρόνο στον οποίο εκρέει ο ατμός προτού να φτάσει το υγρό στο άνοιγμα.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού ροής του διφασικού μίγματος συναρτήσει του χρόνου, καθορίζουμε πρώτα την αρχική θερμοκρασία, δηλαδή τη θερμοκρασία στην οποία έχει φτάσει το μίγμα λόγω της αδιαβατικής ζέσης τη στιγμή όπου εκτονώθηκε ο προηγουμένως παριστάμενος ατμός. Μεταξύ αυτής της θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας αποθήκευσης T_∞ βρίσκουμε την ακόλουθη σχέση:

$$T_\infty = T_0 + \frac{v_{l_0}}{\frac{h_v}{c_v} v_{g_0} - v_{l_0}} \cdot \left(\frac{1}{\Phi} - 1 \right) \tag{36}$$

όπου

h_v = θερμότητα εξάτμισης	$\{Jkg^{-1}\}$
C_v= ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο	$\{Jkg^{-1}K^{-1}\}$
v_{l0} = ειδικός όγκος του υγρού υπό θερμοκρασία T_0	$\{m^3kg^{-1}\}$
v_{g0} =ειδικός όγκος του κορεσμένου ατμού υπό θερμοκρασία T_0	$\{m^3kg^{-1}\}$

Για μερικές από τις θερμοκρασίες T_0 που είναι χαμηλότερες της θερμοκρασίας αποθήκευσης (T_∞) ο υπολογισμός γίνεται με τη βοήθεια της σχέσης (36), οπότε στη συνέχεια θα πρέπει να προσδιοριστεί (πχ γραφικά) για ποια τιμή T_0 θα είναι T_∞ η θερμοκρασία αποθήκευσης (με φ βαθμό πλήρωσης στη δεξαμενή). Αυτή η τιμή T_0 για τους περαιτέρω υπολογισμούς λαμβάνεται ως αρχική θερμοκρασία.

Για να υπολογίσουμε το ρυθμό εκροής συναρτήσει του χρόνου μπορούν να γίνουν βήμα προς βήμα οι εξής υπολογισμοί για μια διαδοχική σειρά θερμοκρασιών $T = T_0 - n\Delta T$.

Υπολογισμός του κλάσματος μάζας ατμού x σύμφωνα με:

$$x = x_0 + \frac{c_v}{h_v} T \ln\left(\frac{T_0}{T}\right) \tag{37}$$

όπου x_0 είναι το κλάσμα μάζας ατμού στο χρόνο που αρχίζει η εκροή και h_v η θερμότητα εξάτμισης σε θερμοκρασία . Το $\frac{1}{2}(T_0 + T)$ x_0 δίνεται από:

$$x_0 = \frac{v_{l_0}}{v_{g_0} - v_{l_0}}\left(\frac{1}{\Phi} - 1\right) \tag{38}$$

Ο μέσος ειδικός όγκος του μίγματος σύμφωνα με:

$$v_m = x\left(v_g - v_l\right) + v_l \tag{39}$$

όπου

v_l = ειδικός όγκος του υγρού σε θερμοκρασία T $\{m^3kg^{-1}\}$

v_g =ειδικός όγκος του κορεσμένου ατμού σε θερμοκρασία T $\{m^3kg^{-1}\}$

Ο ρυθμός εκροής $\dot{m}$ από:

$$\dot{m} = C_D A_u \left[2\frac{(p_v - p_\alpha)}{v_m}\right]^{1/2} \tag{40}$$

όπου A_u η μέση τιμή της διατομής του ανοίγματος, p_v η πίεση κορεσμένων ατμών και p_α η ατμοσφαιρική πίεση.

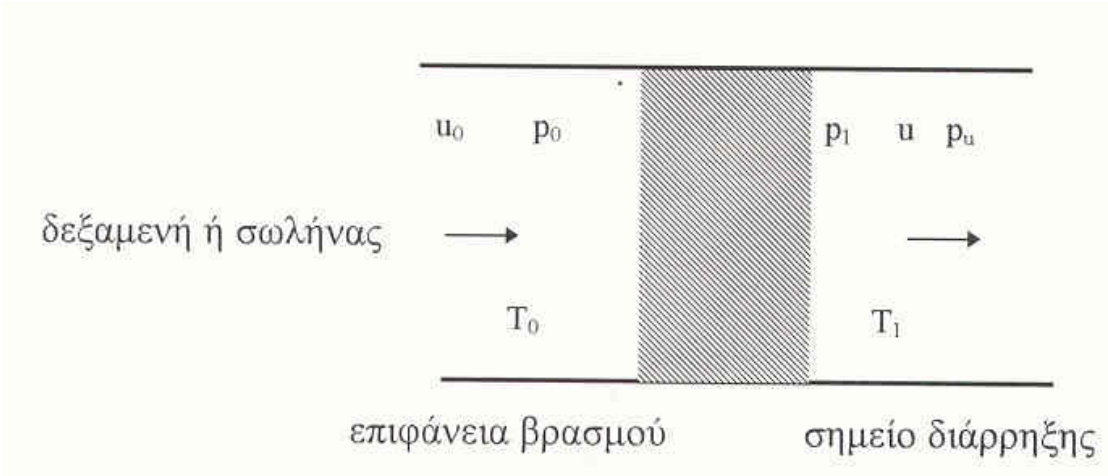
Η απελευθερούμενη ποσότητα m σύμφωνα με:

$$m = V_0\left(v_{m_0}^{-1} - v_m^{-1}\right) \tag{41}$$

όπου V_0 ο όγκος της δεξαμενής και $V_{m_0} = v_{l_0}\Phi^{-1}$.

2.3.4 Ροή σε μορφή μίγματος υγρού-ατμού έξω από σωλήνα

Η μεθοδολογία δίνεται στη παράγραφο αυτή για τον υπολογισμό του ρυθμού εκροής συμπιεσμένου αερίου που μεταφέρεται μέσω σωλήνα και το οποίο εξέρχεται, μετά από διάρρηξη στο σωλήνα, σε κατάσταση βρασμού. Θεωρείται ότι ο βρασμός εμφανίζεται σε μία ζώνη με περιορισμένο μήκος (την ονομαζόμενη "ζώνη βρασμού") και ότι το σχηματιζόμενο μίγμα υγρού - ατμού εκρέει από το άνοιγμα του σωλήνα υπό επίδραση τριβής με τα τοιχώματα του σωλήνα (*σχήμα 6*).



Σχήμα 6 Μοντέλο για τη διφασική ροή από σωλήνα

Από τη στιγμή που η πίεση στο σωλήνα κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του υγρού είναι γενικά μεγαλύτερη της.πίεσης κορεσμού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υγρό μετά τη διάρρηξη θα εκτονωθεί αμέσως μέχρι να φτάσει η πίεση του την πίεση κορεσμού. Ο ρυθμός της ροής με την οποία, μέσω της εκτόνωσης, το υγρό ρέει στη ζώνη βρασμού καθορίζεται καταρχήν με την ταχύτητα με την οποία στο υγρό το κύμα εκτόνωσης διέρχεταιαπό το σωλήνα. Αυτή η ταχύτητα λαμβάνεται ίση με την ταχύτητα ήχου c_o.

Η τιμή της ροής με την εκτίναξη δίνεται:

Η ταχύτητα που αποκτά το υγρό σε αυτή την κατάσταση είναι:

$$u_0 = \frac{\dot{m}_0 v_l}{A} = (p_0 - p_v)\frac{v_l}{c_0} \qquad (43)$$

Σε μετέπειτα στάδιο αυτή η ταχύτητα μειώνεται επειδή η πίεση p_0 πέφτει λόγω της αύξησης της απόστασης που απαιτείται να διανύσει το υγρό προς το

σημείο διάρρηξης, εφόσον η πορεία του αναχαιτίζεται από την τριβή των τοιχωμάτων του σωλήνα. Τελικά, η ταχύτητα γίνεται ίση με την ταχύτητα μεταφοράς του υγρού στο σωλήνα που προκύπτει, για παράδειγμα, από αντλία.

Στη διεπιφάνεια βρασμού το υγρό θα εξατμίζεται μερικώς, με την αέρια και την υγρή φάση να μπορούν να έχουν διαφορετικές ταχύτητες. Σύμφωνα με τον Cruver και τον Moulton, ο λόγος μεταξύ αυτών των φάσεων παίρνει τέτοια τιμή ώστε η κινητική ενέργεια του υγρού να γίνει μέγιστη. Η ταχύτητα "μέσης κινητικής ενέργειας" u_{kl} καθορίζεται από τη μεταβολή της ενθαλπίας λόγω της εξάτμισης του κλάσματος μάζας x:

$$u_{ke}^2 - u_0^2 = x \cdot u_g^2 + (1-x)u_l^2 - u_0^2 = -2\Delta h \qquad (44)$$

όπου h είναι η ειδική ενθαλπία.

Η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται σε μόνιμες συνθήκες, στις οποίες η διεπιφάνεια βρασμού δεν αλλάζει θέση. Σε περίπτωση διάρρηξης σωλήνα (ανάλογα με το μήκος της σωλήνωσης) αυτή η κατάσταση λαμβάνει χώρα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Λόγω της εκροής του μίγματος υγρού-ατμού η διεπιφάνεια βρασμού κινείται μέσα στο σωλήνα μέχρι τη θέση που ο σωλήνας ενώνεται με τη δεξαμενή τροφοδοσίας. Μέσα στη δεξαμενή η εισερχόμενη ροή βρίσκει μία πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια διασποράς και σε αυτήν την κατάσταση επιτυγχάνεται μία σχεδόν μόνιμη κατάσταση με u_0=0.

Η ροή μάζας (ρυθμός εκροής ανά μονάδα επιφανείας σωλήνα μέσης διατομής) μπορεί να υπολογιστεί από:

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \frac{u_{ke}}{v_{ke}} \qquad (45)$$

όπου A είναι η επιφάνεια από την οποία συμβαίνει η υπερχείλιση (στην περίπτωση διάρρηξης σωλήνα: διπλάσια της διατομής του σωλήνα) και v_{ke} ο ειδικός όγκος για "μέση κινητική ενέργεια". Η v_{ke} επιτυγχάνεται μεγιστοποιόντας την κινητική ενέργεια κατά τη διάρκεια της ροής και δίνεται συναρτήσει των ειδικών όγκων των δύο φάσεων και του κλάσματος μάζας x της αέριας φάσης:

$$v_{ke} = \left[(1-x) v_l^{2/3} + x v_g^{2/3} \right]^{\frac{3}{2}} \qquad (46)$$

Το κλάσμα μάζας φάσεων x μπορεί να υπολογιστεί από την αρχική θερμοκρασία T_0 και τη θερμοκρασία T_1, τη θερμότητα εξάτμισης h_v και την ειδική θερμοχωρητικότητα c_v από τη σχέση:

$$x = \left(\frac{c_v T_1}{h_v}\right) \ln\left(\frac{T_0}{T_1}\right) \tag{47}$$

Από τις εξισώσεις (44) μέχρι (47) έπεται ότι η εκρεόμενη μάζα σε μόνιμη ροή κατά τη διάρρηξη σωλήνα δίνεται από:

$$G = \left[2c_v \frac{(T_0 - T_1)^2}{(T_0 + T_1)}\right]^{1/2} v_{ke}^{-1} \tag{48}$$

όπου η παράμετρος V_{ke} είναι συνάρτηση των T_0 και T_1.

Η αρχική θερμοκρασία T_0 τις περισσότερες φορές μπορεί να λαμβάνεται ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η τελική θερμοκρασία T_1 δεν πρέπει να λαμβάνεται τυχαία για το λόγο ότι πρέπει, εκτός από την εξίσωση ενθαλπίας (σχέση 44), να ικανοποιούνται κι οι εξισώσεις μάζας και ορμής. Για να έχει νόημα η απαίτηση αυτή πρέπει να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ ροής με ή χωρίς τριβή. Στις παραγράφους 2.3.4.1. και 2.3.4.2. αυτό το θέμα αναλύεται με περισσότερες λεπτομέρειες.

Κατά τη διάρκεια της μετακίνησης της επιφάνειας βρασμού από το σημείο διάρρηξης προς το σημείο σύνδεσης δεν μπορεί να εφαρμοστεί η σχέση (44).

$$(u_{ke} - u_k)^2 - (u_{st} - u_k)^2 = -2\Delta h \tag{49}$$

Η ροή τότε μπορεί να θεωρηθεί ως μόνιμη στο σύστημα συντεταγμένων της επιφάνειας βρασμού που κινείται με ταχύτητα $-u_k$, ώστε να μπορούμε να γράψουμε:

Η ταχύτητα της επιφάνειας βρασμού καθορίζεται από τους ειδικούς όγκους των φάσεων, τη μέση τιμή της ταχύτητας εκροής u_{ke} και τη ταχύτητα u_{st} με την οποία κινείται το υγρό πριν το σημείο διάρρηξης.

Η σχέση θα είναι:

$$-u_k = \frac{\left(u_{ke} - u_{st} v_{ke} v_{l_0}^{-1}\right)}{W} \tag{50}$$

όπου το W είναι συνάρτηση των ειδικών όγκων όπως φαίνεται στην παρακάτω

σχέση:

$$W = \frac{v_{ke}}{v_{l_0}} - \frac{v_{ke}}{v_l} + \left(\frac{v_m}{v_l} - 1\right)\left(\frac{v_{ke}}{v_g}\right)^{1/3} \tag{51}$$

ενώ τα u_k και u_{ke} μπορούν να ληφθούν από (49) και (50), έτσι ώστε μία από αυτές τις μεταβλητές να δίνεται ως συνάρτηση των v_g, v_l, v_{ke} και u_{st}. Για μικρές και σταθερές ταχύτητες μεταφοράς η u_{st} μπορεί να αγνοηθεί οπότε ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$u_{ke} - u_k W \tag{52}$$

$$-u_k = \left[\frac{-2\Delta h}{\left(W^2 + 2W\right)}\right]^{1/2} \tag{53}$$

$$G = \left[2c_v \frac{\left(T_0 - T_1\right)^2}{\left(T_0 + T_1\right)}\right]^{1/2} \left[1 + \frac{2}{W}\right]^{-1} V_{ke}^{-1} \tag{54}$$

Αυτές οι σχέσεις ((52) μέχρι (54)) ισχύουν για την αρχική φάση εκροής από σωλήνες μεγάλου μήκους στους οποίους η μόνιμη συνθήκη ροήςισχύει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

2.3.4.1 Άτριβη ροή

Για την περίπτωση άτριβης ροής (εκροή μέσω σωλήνα μικρού μήκους ή σωλήνα μεγάλου μήκους στην αρχική φάση) για την κρίσιμη ροή επάγεται από την εξίσωση συνέχειας και εξίσωση ορμής η ακόλουθη προϋπόθεση:

$$G = G_{kr} = \left[-\left(\frac{v_m}{v_{ke}}\right)\left(\frac{dp}{dv_{ke}}\right)\right]^{1/2} \tag{55}$$

στην οποία ο μέσος ειδικός όγκος του μίγματος v_m κι ο μέσος ειδικός όγκος κινητικής ενέργειας v_{ke} δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις (39) και (46) και όπου p_v είναι η πίεση κορεσμού στη θερμοκρασία T_1. Η γραφική παράσταση του G_e = G ακολουθεί την εξίσωση ενθαλπίας (σχέση 48) ή, στην αρχική φάση, αποτελεί συνάρτήση του T_1 (σχέση 54), και δίνει συνάρτηση που παρουσιάζει μέγιστο για G_{kr} = G, μειώνεται όπως μειώνεται η T_1, όπως ορίζει η σχέση (55), και τέμνεται με την παραπάνω συνάρτηση κοντά στο μέγιστο. Το σημείο τομής δίνει T_1 και G.

Η σχέση (55) αναφέρεται μόνο σε μόνιμες συνθήκες ροής όπου οι χρονικά

εξαρτώμενοι όροι των εξισώσεων συνέχειας κι ορμής είναι ίσοι με μηδέν. Θεωρείται, παρόλα αυτά, ότι μέσα σε έναν στοιχειώδη όγκο του σωλήνα η μάζα κι η ορμή του διφασικού μίγματος δύσκολα μεταβάλλεται με το χρόνο (εκτός από την περιοχή της διεπιφάνειας βρασμού). Η εξάρτηση του χρόνου οφείλεται στη μετατόπιση της διεπιφάνειας βρασμού με το χρόνο, όπου η ταχύτητα u_k δίνεται από τη σχέση (50) ή, για παράδειγμα, μικρές τιμές της u_{st} μέσω των σχέσεων (51) και (53). Το περισσότερο χρονικό διάστημα η μόνιμη ροή είναι μικρότερη από την εκροή λόγω διάρρηξης του σωλήνα. Η επιφάνεια βρασμού μετακινείται προς τη μέσα μεριά του σωλήνα. Η τριβή μεταξύ του μίγματος που εκρέει και του τοιχώματος του σωλήνα αυξάνεται με το χρόνο και συνεπώς ο ρυθμός ροής μειώνεται.

Ο καθορισμός του ρυθμού εκροής στην περίπτωση που η τριβή δεν παίζει κανένα ρόλο μπορεί να γίνει ως εξής:

Επιλέγεται μια θερμοκρασία T_1 που είναι μερικούς βαθμούς (ΔΤ) κάτω από τη θερμοκρασία αποθήκευσης T_0 και καθορίζονται οι c_v και h_v (καθώς αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται κατά κάποιο τρόπο από τη θερμοκρασία, λαμβάνεται κατά προτίμηση η μέση τιμή για το διάστημα ΔΤ), p_l, v_l και v_g (από T_1) (σύμφωνα με εμπειρικές σχέσεις).

Με βάση αυτά υπολογίζεται στη συνέχεια το κλάσμα x (σχέση 47),κι από αυτό τα v_{ke} (σχέση 46) και "G" σε συμφωνία με την εξίσωση ενθαλπίας (σχέση 48).

Προσεγγιζεται η σχέση (55):

$$G_{kr}(T_1) = \left\{ \frac{\left[p_v(T+\Delta T) - p_v(T-\Delta T)\right]}{\left[v_{ke}(T-\Delta T) - v_{ke}(T+\Delta T)\right]} \frac{v_m(T)}{v_{ke}(T)} \right\}^{1/2} \qquad (56)$$

στην οποία το ΔΤ αναφέρεται σε μία μικρή διαφορά θερμοκρασίας (για παράδειγμα 1K) Επαναλαμβάνεται το βήμα 1 και μέρος του βήματος 2 για τον υπολογισμό των παραμέτρων v_m, v_{ke} και p_v για T- ΔΤ και για T+ΔΤ. Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η τιμή G_{kr}.

Στην περίπτωση όπου G_{kr} (εξίσωση ορμής) > G_e (εξίσωση ενθαλπίας), επιλέγοεται T_1 μερικούς βαθμούς χαμηλότερα και επαναλβάνονται τα βήματα 1, 2 και 3.

Εφαρμογή του βήματος 4 όσες φορές χρειάζεται έως ότου $G_e = G_{kr}$.

Όταν ο σωλήνας είναι συνδεδεμένος με μία σφραγισμένη δεξαμενή, ο όγκος του εκρέοντος υγρού στη δεξαμενή θα αντικατασταθεί από ατμό ο οποίος - για κάθε ρυθμό εκροής στην αρχική φάση - θα βρίσκεται υπό μορφή σταγονιδίων. Θεωρείται ότι η εξάτμιση γίνεται αδιαβατικά: έτσι το υγρό στη δεξαμενή βαθμιαία κρυώνει και, κατά συνέπεια, η πίεση ατμού όπως κι ο ρυθμός εκροής μειώνεται.

Με βάση το ότι η εντροπία παραμένει σταθερή και ότι το άθροισμα της ενθαλπίας και της κινητικής ενέργειας μπορούν να αφαιρεθούν, βγαίνει ως συμπέρασμα ότι όταν η θερμοκρασία του μίγματος στη δεξαμενή έχει πέσει από T_∞ σε T_0 (μετρώντας από την αρχή της εκροής), η εκροής μάζας μπορεί να δοθεί ως:

$$G = \frac{1}{v_{ke}} \left\{ 2c_v \left[\frac{(T_\infty - T_1)^2}{(T_\infty + T_1)} - \frac{(T_\infty - T_0)^2}{(T_\infty + T_1)} \right] \right\}^{1/2} \tag{57}$$

όπου εξασφαλίζεται ότι η θερμοκρασία T_1 λαμβάνει τέτοια τιμή ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη κρίσιμης ροής (σχέση 55).

Το κλάσμα μάζας του ατμού στο μίγμα πριν την εκροή είναι:

$$x_0 = \left(\frac{c_v T_0}{h_{v_0}} \right) \ln \left(\frac{T_\infty}{T_0} \right) \tag{58}$$

και μετά την εκροή:

$$x_1 = \left(\frac{c_v T_1}{h_{v_1}} \right) \ln \left(\frac{T_\infty}{T_1} \right) \tag{59}$$

2.3.4.2 Ροή με τριβή

Για την εκροή διφασικού μίγματος από σωλήνα πεπερασμένου μήκους η τριβή του τοιχώματος του σωλήνα θα πρέπει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς. Για αυτόν το λόγο πρέπει να θεωρήσουμε τα ακόλουθα:

1. Μέρος του υγρού θα μετατραπεί σε ατμό στη διεπιφάνεια βρασμού. Η θερμοκρασία στην οποία το μίγμα θα φτάσει σε αυτήν την κατάσταση σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα του υλικού που ρέει σύμφωνα με τη σχέση (40) η οποία επάγεται από την εξίσωση ενθαλπίας (44).
2. Το μίγμα που ρέει από την επιφάνεια βρασμού προς το σημείο διάρρηξης βαθμιαία αλλάζει τη θερμοκρασία και τη σύσταση του. Στο σημείο διάρρηξης όπου επιτυγχάνεται θερμοκρασία T_u η σχέση (55)

εφαρμόζεται και πάλι, οπότε:

$$G = \left[-\left(\frac{v_m}{v_{el}} \right) dp_v \left(dv_{ke} \right) \right]_{T_1}^{1/2} \tag{60}$$

Η παραγώγιση όλων των παραπάνω σχέσεων γίνεται ως εξής:

Από την εξίσωση ορμής και την εξίσωση συνέχειας επάγεται ότι η ροή μάζας μέσα από το σωλήνα δίνεται:

$$G = \left[\ln\left(\frac{v_{ke}(T_1)}{v_{ke}(T_u)} \right) + \frac{2fl}{d} \right] \left[\int_{p_v(T_u)}^{p_v(T_1)} \left(\frac{v_m}{v_{ke}^2} \right) dp_v \right]^{1/2} \tag{61}$$

όπου

d = διάμετρος του σωλήνα	{m}
l = μήκος σωλήνα	{m}
f = παράγοντας τριβής Fanning	{_}
p_v = πίεση κορεσμού του μίγματος	{Pa}
v = ειδικός όγκος του μίγματος	$\{m^3kg^{-1}\}$

Οι δείκτες k και u χρησιμοποιούνται για την επιφάνεια βρασμού και για το σημείο διάρρηξης αντίστοιχα. Οι δείκτες m και ke αναφέρονται στη μέθοδο υπολογισμού του μέσου ειδικού όγκου (σύμφωνα με ομογενείς ή μη ομογενείς τύπους ροών).

Η σχέση (53) μπορεί να εκφραστεί επίσης ως:

$$\frac{2fl}{d} = -\frac{1}{G^2} \int_{p_v(T_u)}^{p_v(T_1)} \left(\frac{v_m}{v_{ke}^2} \right) dp_v - \ln\left[\frac{v_{ke}(T_1)}{v_{ke}(T_u)} \right] \tag{62}$$

Μπορεί να θεωρηθεί ότι η πίεση στο σημείο διάρρηξης $p_v(T_u)$ λαμβάνει τέτοια τιμή ώστε ο ρυθμός ροής να λάβει τη μέγιστη τιμή. Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί επίσης να θεωρηθεί ότι για μια δεδομέν ρυθμό ροής το λεγόμενο μειωμένο μήκος σωλήνα μπορεί να μεγιστοποιείται συναρτήσει του $p_v(T_u)$. Διαφοροποίηση του 2fL/d (με σταθερό G) ως προς $p_v(T_u)$ οδηγεί στην εξίσωση (60).

Σε συγκεκριμένη αρχική θερμοκρασία T_o και θεωρούμενη τιμή T_1, η οποία επιτυγχάνεται στη διεπιφάνεια βρασμού, αντιστοιχεί συγκεκριμένη τιμή της μαζικής πυκνότητας του ρέοντος υλικού (σύμφωνα με τη σχέση 48). Αυτή η τιμή τίθεται ίση με την τιμή της μαζικής πυκνότητας του υλικού σε κρίσιμη ροή σε T_u, $G_{kr}(T_u)$. Εφόσον το $G_{kr}(T_u)$ αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας T_u, η T_u καθορίζεται ανεξάρτητα από αυτό.

Πρακτικά η διαδικασία ακολουθείται ως εξής:

3. Υπολογίζουμε, ξεκινώντας από μία αρχική θερμοκρασία T_0, διαδοχικά για τις θερμοκρασίες $T_1=T_0$, $T_0-\Delta T$, $T_0-2\Delta T$, τις τιμές των c_v και h_v (και τα δύο για μέση θερμοκρασία ίση με $1/2\cdot(T_0+T_1)$), p_v, v_g, v_1 (τάση ατμών και ειδικοί όγκοι ατμού και υγρού), x (κλάσμα μάζας ατμού, από τη σχέση (47)), v_m και v_{ke} (μέσοι ειδικοί όγκοι από τις σχέσεις (39) και(46)).
4. Υπολογίζουμε τη μαζική πυκνότητα της ροής G_e συναρτήσει της θερμοκρασίας T_1 (σχέσεις 48 και 54) και της κρίσιμης μαζικής πυκνότητα της ροής, G_{kr} (σχέση 56).
5. Σχεδιαζουμε τα διαγράμματα G_e και G_{kr} συναρτήσει T_1.
6. Καθορίζουμε από το διάγραμμα τη θερμοκρασία T_u στο σημείο εκροής, η οποία αντιστοιχεί στην θερμοκρασία T_1 στη διεπιφάνεια βρασμού ως εξής:

$$G_{kr}(T_u) = G(T_1) = G \tag{63}$$

7. Υπόλογίζουμε τα αντίστοιχα p_v, v_m και v_{ke} για το σημείο διάρρηξης.
8. Υπολογίζουμε το 2fL/d με ολοκλήρωση τη σχέσης (62).

Συχνά συμβαίνει σε μία μεγάλη θερμοκρασιακή περιοχή η (v_m/v^2_{ke})να είναι ανάλογη ως προς μία δύναμη της πίεσης p. Σε αυτές τις περιπτώσεις η σχέση (54) μπορεί να προσεγγιστεί από την:

$$\frac{2fl}{d} = -G^{-2}\frac{(p_2W_2 - p_1W_1)}{\left[\dfrac{1+\ln\left(W_2/W_1\right)}{\ln\left(p_2/p_1\right)}\right]} - \ln\left[\frac{v_{ke2}}{v_{ke1}}\right] \tag{64}$$

όπου W= (v_m/v^2_{ke}) και οι δείκτες 1 και 2 συνδέονται, αντίστοιχα, με τις θερμοκρασίες T_1 και T_u.

Η μέθοδος που περιγράφηκε προηγουμένως, η οποία δίνει το ρυθμό εκροής λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση λόγω τριβής, μέσω του παράγοντα f_r = 2fl/d, και επίσης απαιτεί τον υπολογισμό των θερμοκρασίων T_1 και T_u, του κλάσματος μάζας ατμού x και των ταχυτήτων του μίγματος "u" και της επιφάνειας βρασμού “u_k”, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και δεν συνίσταται για πρακτική εφαρμογή. Κατά συνέπεια εφαρμόζεται καλύτερα με χρήση

υπολογιστή. Η μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω ισχύει για μόνιμη ροή διαμέσω σωλήνα μεγάλου μήκους, στον οποίο η διεπιφάνεια ζέσης μετατοπίζεται από το σημείο διάρρηξης προς το σημείο ένωσης με τη δεξαμενή αποθήκευσης. Για τον υπολογισμό των φαινομένων που ενδεχομένως να επακολουθήσουν είναι σημαντικό, παρόλα αυτά, να είναι γνωστή για την αρχική φάση:

1. η διαδρομή του ρυθμούτης εκροής συναρτήσει του χρόνου
2. η μάζα του απελευθερώμενου υλικού συναρτήσει του χρόνου.

Για την αρχική φάση το G_e θα πρέπει να υπολογιστεί όχι από τη σχέση (48) αλλά από τη σχέση (54), στην οποία η τελική ταχύτητα της διεπιφάνειας βρασμού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Για την εκροή δύο φάσεων στην περίπτωση θραύσης σωλήνα που συνδέεται με αντλία (κατάσταση Νο 13 του σχήματος κατηγοριοποίησης), ο ρυθμός εκροής συναρτήσει του χρόνου μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εισαχθεί μία τελική τιμή της u_{st} στη σχέση (50) υπολογισμένη από το ρυθμό ροής της αντλίας (χωρητικότητα). Η πίεση σε σωλήνα όπου έχει επιτευχθεί μόνιμη ροή γενικά θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την πίεση κορεσμού. Αυτό συνεπάγεται με αύξηση της ταχύτητας του υγρού. Υπολογισμοί έχουν δείξει ότι αυτή η ταχύτητα είναι γενικά πολύ μικρότερη από αυτή της διφασικής ροής: συνεπώς οι διορθώσεις που μπορούν να γίνουν είναι στο μέγιστο 1% και μπορούν, επομένως να αγνοηθούν. Όταν ένας σωλήνας στον οποίο υπάρχει ροή δύο φάσεων στην περιοχή της σύνδεσης (σε αντλία ή δεξαμενή) είναι κλειστός η εκροή θα συνεχιστεί μέχρι η πίεση σε οποιοδήποτε σημείο του σωλήνα να έχει μειωθεί1.0 bar. Η εισροή θα σταματήσει τη στιγμή που κλείνει ο σωλήνας: πίσω από το μίγμα που ρέει κατά τη διεύθυνση του σημείου διάρρηξης η πίεση πέφτει και προκαλλώντας επιπλέον εξάτμιση. Θεωρείται ότι αυτή η εξάτμιση λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια βρασμού και ότι αυτή η διεπιφάνεια μετακινείται προς το σημείο διάρρηξης με ταχύτητα που είναι ίση (κατά απόλυτη τιμή) με την ταχύτητα με την οποία η επιφάνεια βρασμού αρχικά διένυε το διάστημα από το σημείο διάρρηξης προς το σωλήνα. Ο ρυθμός της ροής θα μειωθεί μονάχα αφού η επιφάνεια βρασμού έχει φτάσει το σημείο διάρρηξης: ο χρόνος που έχει περάσει στο μεταξύ διάστημα είναι περίπου

ίσος με το χρόνο που χρειάστηκε η επιφάνεια βρασμού για να καλύψει την απόσταση μεταξύ του σημείου διάρρηξης και του σημείου συνένωσης. Είναι δύσκολο να υπολογίσουμε την περαιτέρω (ελαττούμενη) πορεία του ρυθμού ροής. Είναι, παρόλα αυτά, δυνατό να εκτιμήσουμε τουλάχιστον τον χρόνο που απαιτείται για το άδειασμα τμήματος αγωγού μήκους l.

Για αυτό το σκοπό θεωρείται ότι ρυθμός ροής, μετά το κλείσιμο δεν θα είναι μεγαλύτερος από ρυθμό ροής σε σωλήνα απείρου μήκους, στον οποίο η διεπιφάνεια βρασμού μπορεί να συνεχιστεί χωρις περιορισμούς. Μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση l_2 που πρέπει να διανύσει η διεπιφάνεια βρασμού προκειμένου να απελευθερώσει τόση ποσότητα ώστε η μάζα της να ισούται με την αρχική μάζα του υγρού που υπάρχει στον σωλήνα μήκους l_1 (μείον την μαζα μετά την εξάτμιση), καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για αυτή την απελευθέρωση.

Οι υπολογισμοί γίνονται όπως περιγράφεται ακολούθως:

1. Υπολογίζουμε τη μάζα που απελευθερώνεται ως συνάρτηση του 2fl/d (σχέση (64)).
2. Υπολογίζουμε τη μάζα του υγρού που βρισκόταν στον σωλήνα μήκους l_1 ($Al_1v_1^{-1} = Al_1\rho_l$) και τη μάζα αυτού μετά την εξάτμιση ($Al_1v_g^{-1} = Al_1\rho_g$).
3. Καθορίζουμε τη τιμή του $2fl_2/d$ (ή 2ft/d) , όπου η απελευθερούμενη μάζα ισούται με αυτό.

Συμφωνα με τη μέθοδο υπολογισμού, η μαζική πυκνότητα της ροής καθορίζεται ως συνάρτηση του παράγοντα μείωσης λόγω τριβών f_r=2fl/d, ο οποίος, με τη σειρά του, υπολογίζεται ως συνάρτηση των θερμοκρασιών $T_1=T_0-\Delta T$, $T_0-2\Delta T$, κλπ. Οι σχέσεις (m/A)*(2f/d) και t*2f/d, μπορούν να υπολογιστούν ως συναρτήσεις του 2fl/d, όπου οι διαδοχικές τιμές που επιλέγονται καθορίζονται από τις προαναφερθείσες θερμοκρασίες.

Σύμβολα

A	επιφάνεια διατομής	$\{m^2\}$
C_D	συντελεστής έκφρασης της μορφής της επιφάνειας διατομής του ανοίγματος του σωλήνα	{_}
c	ταχύτητα ήχου	$\{ms^{-1}\}$
C_v	ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο	$\{Jkg^{-1}K^{-1}\}$
d	διάμετρος του σημείου διάρρηξης	{m}
f	συντελεστής τριβής Fanning	{_}
G	μάζα εκροής	$\{kgs^{-1}m^{-2}\}$
g	επιτάχυνση της βαρύτητας	$\{ms^{-2}\}$
h	υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης του υγρού και του σημείου διάρρηξης	{m}
h	ειδική ενθαλπία	$\{Jkg^{-1}\}$
h_v	ειδική θερμότητα εξάτμισης	$\{Jkg^{-1}\}$
K	σταθερά	{_}
l	μήκος του σωλήνα	{m}
M	μοριακό βάρος	$\{kgkmol^{-1}\}$
m	μάζα εκροής	{kg}
$\dot{m}$	ρυθμός εκροής μάζας	$\{kgs^{-1}\}$
p	πίεση	{Pa}
R	ειδική σταθερά των αερίων	{J/kmolK}
s	ειδική εντροπία	$\{Jkg^{-1}K^{-1}\}$
T	θερμοκρασία	{K}
t	χρόνος	{s}
u	ταχύτητα	$\{ms^{-1}\}$
V	όγκος (δεξαμενής)	$\{m^3\}$
v	ειδικός όγκος	$\{m^3kg^{-1}\}$
W	συνάρτηση ειδικών όγκων	{_}
w	συνάρτηση ειδικών όγκων	{_}
X	κλάσμα της διατομής του σωλήνα από όπου εκρέει το αέριο	{_}
x	κλάσμα μάζας ατμού του μίγματος δύο φάσεων	{_}
x	οριζόντια συντεταγμένη σημείου	{m}
α	συνάρτηση των f_r και γ	{_}
β	συνάρτηση του γ	{_}
γ	λόγος μεταξύ ειδικών θερμοτήτων σταθερής πίεσης προς σταθερή όγκο	{_}
ε	τραχύτητα του τοιχώματος του σωλήνα	{m}

ζ	συντελεστής αντίστασης του σωλήνα	{_}
κ	συμπιεστότητα	{Pa}
ξ	λόγος x/t	{ms^{-1}}
ρ	πυκνότητα	{kg m^{-3}}
η	κινηματικό ιξώδες	{m^2s^{-1}}
Φ	κλάσμα όγκου	{_}
Ψ	συντελεστής εκροής	{_}

Δείκτες

a	της ατμόσφαιρας, ατμοσφαιρικό
g	Αέριο, στην επιφάνεια του εδάφους
h	σε ύψος h από το άνοιγμα
ke	μέση κινητική ενέργεια
k	διεπιφάνεια βρασμού
m	μέση (ομογενής ροή)
l	υγρού
r	μειωμένο (σε αδιάστατη τιμή)
st	μόνιμης κατάστασης
u	εκροής, ανοίγματος εκροής
0	σταθερή ή αρχική κατάσταση

3. Τυρβώδες free jet

3.1. Περίληψη

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τη δημιουργία τυρβώδους free jet, όπου το free jet περιγράφεται με τη βοήθεια ενός αριθμού χαρακτηριστικών μεταβλητών και σχέσεων.

Καταρχήν ορίζεται ένας αριθμός συνθηκών που κρίνονται απαραίτητες για τη δημιουργία free jet, από τις οποίες εξάγεται ένας αριθμός σχέσεων με χρήση του ισοζυγίου μάζας.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν μερικά ειδικά προβλήματα, όπως η εξισορρόπηση της θερμοκρασίας, η επίδραση της βαρύτητας και οι πιθανές επιπτώσεις ενός συγκρουόμενου free jet.

Τελικά η αναπτυχθείσα μέθοδος υπολογισμού εξηγείται μέ τη βοήθεια ενός παραδείγματος.

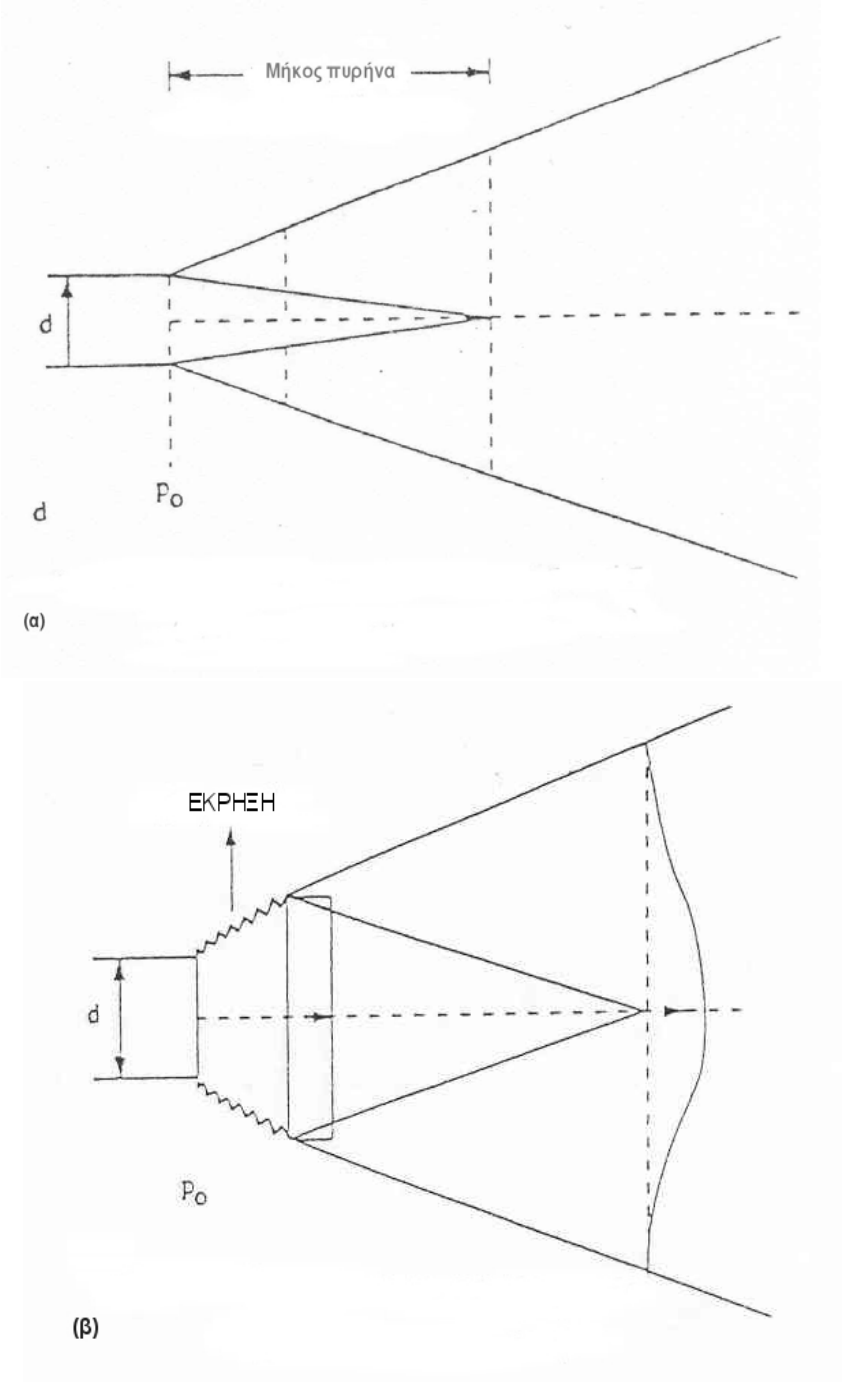
3.2. Εισαγωγή

Όταν αέριο εκρέει με μεγάλη ταχύτητα από άνοιγμα είναι πιθανό να σχηματιστεί free jet, ανάλογα με το εάν ισχύει ένας αριθμός προϋποθέσεων που θα περιγράφουν με περισσότερη λεπτομέρεια σε αυτό το κεφάλαιο. Το *σχήμα 7α* δείχνει ένα τυρβώδες free jet, με πίεση p_0 στο τέλος του ανοίγματος εκροής ίση της ατμοσφαιρική.

Αυτή είναι η περίπτωση ενός (υπό) κρίσιμου free jet. Στο *σχήμα 7β* παρουσιάζεται ένα υπερκρίσιμο free jet, το οποίο συμβαίνει όταν η πίεση p_0 είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Σε αυτήν την περίπτωση η εκτόνωση λαμβάνει χώρα έξω από το σημείο διάρρηξης από p_0 σε p_α, και στη συνέχεια σχηματίζεται το υπο-κρίσιμο jet. Το *σχήμα 8* δίνει έναν αριθμό από διαφορετικές καταστάσεις που μπορούν να επηρεάσουν το σχήμα του free jet. Έτσι γίνεται διάκριση μεταξύ κάθετης και οριζόντιας ροής, παρουσία ή απουσία ανέμου. Επίσης εμφανής είναι η διαφορροποίηση της συμπεριφοράς ενός ουδέτερου, ενός ελαφρού κι ενός αρκετά βαριού free jet.

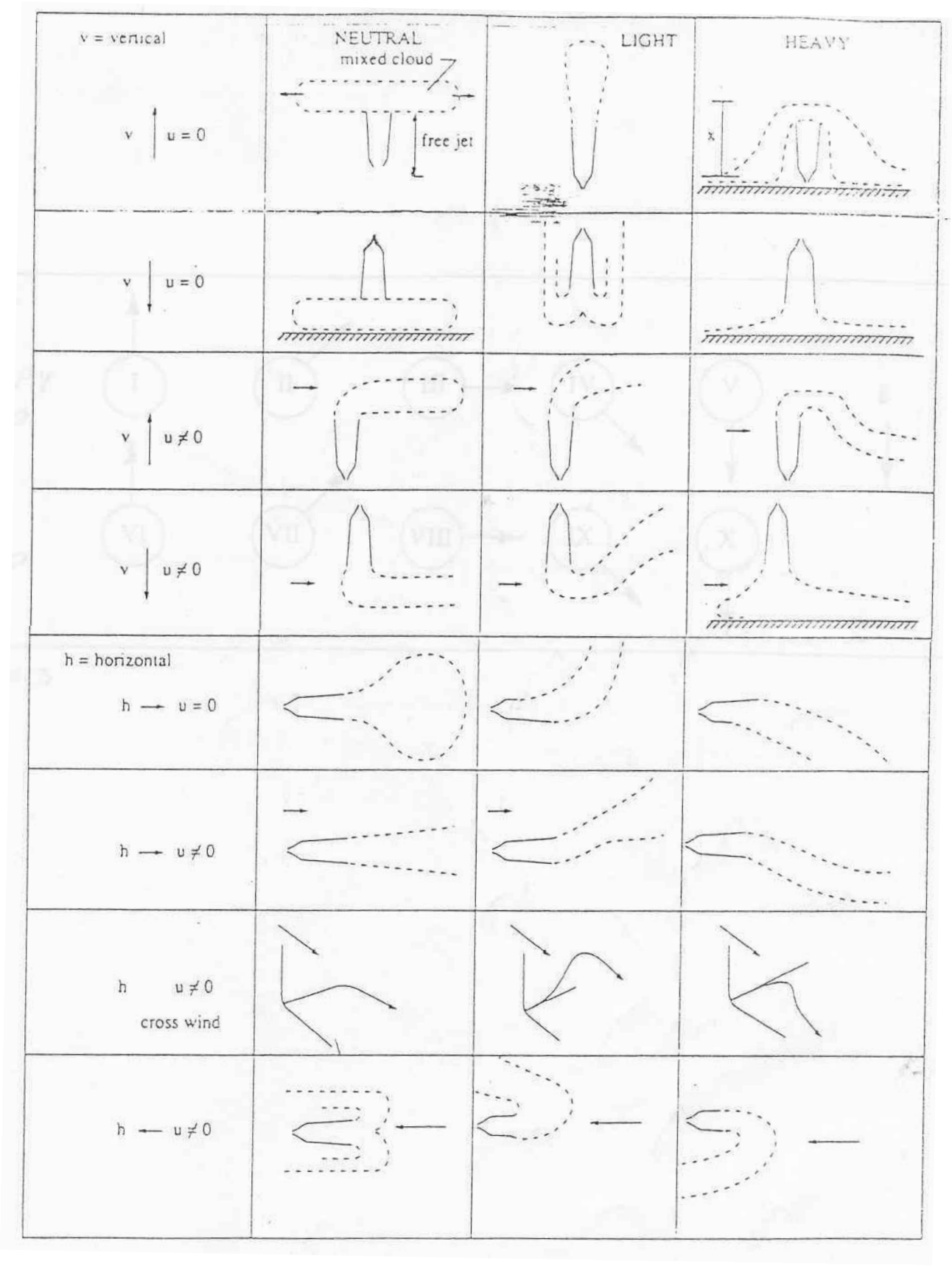
Ένα ουδέτερο jet είναι ένα jet ειδικής μάζας αντίστοιχης με αυτή του αέρα. Το εκρεόμενο αέριο διαλύεται στον ατμοσφαιρικό αέρα και μπορεί να εμφανιστεί

ένα σύννεφο μίγματος. Μπορεί να έχει τόσο εκρηκτικές όσο και τοξικές ιδιότητες. Στην περίπτωση ουδέτερου free jet η ταχύτητα θα είναι, σε κάποια χρονική στιγμή, αμελητέα ως προς την ταχύτητα του ανέμου. Από αυτό το σημείο του χρόνου και μετά θα υφίσταται μίγμα αερίου / αέρα του οποίου η περαιτέρω διασπορά εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες και τις ιδιότητες του μίγματος στη δεδομένη θέση. Εάν το εκρεομένο αέριο είναι βαρύτερο ή ελαφρύτερο του αέρα, η βαρύτητα παίζει σημαντικό ρόλο. Προτού να αναλύσουμε περισσότερο αυτή την περίπτωση, θα διευκρινίσουμε, με βάση το διάγραμμα κατηγοριοποίησης του *σχήματος 3*, τις συνθήκες εγκυρότητας του



Σχήμα 7: Τυρβώδες free jet (α) Υποκρίσιμο/κρίσιμο (β) Υπερκρίσιμο

μοντέλου που παρουσίαζεται στο παρόν κεφάλαιο.



Σχήμα 8: Πιθανά μοντέλα free jet

Σημείο 1

Αφετηρία αποτελεί ένα άνοιγμα εκροής, αποτέλεσμα του οποίου είναι η δημιουργία ημί-συνεχούς ροής. Μετά την περίοδο έναρξης του φαινομένου η δύναμη εκροής της πηγής μπορεί να είναι μεταβλητή ή σταθερή με το χρόνο. Αυτό το μοντέλο περιγράφει μόνο την τελευταία (μόνιμη) κατάσταση.

Σημείο 2

Όσον αφορρά την περιοχή δημιουργίας του free jet, θα πρέπει να γίνει διάκριση με βάση την έκταση αναρρόφησης του αέρα και την παρουσία εμποδίων κατά τη πορεία του jet. Η περιοχή περιγράφεται ως ελεύθερη κυρίως με βάση το εάν ο αέρας μπορεί να αναρροφηθεί από όλες τις πλευρές και δεν υπάρχουν εμπόδια (συμπεριλαμβανομένου και του εδάφους) κατά τη πορεία του jet. Το μοντέλο που παρατίθεται εδώ περιγράφει μόνο το σχηματισμό του free jet σε ελεύθερη περιοχή. Στην παράγραφο 4.3 θα δοθεί μια ποιοτική προσέγγιση για συγκρουόμενο free jet.

Σημείο 3:

Το σχήμα του free jet καθορίζεται κατά κύριο λόγο από το σχήμα του ανοίγματος. Όταν υπάρχει στρογγυλό άνοιγμα ο αέρας αναρροφάται ανεμπόδιστα από όλες τις πλευρές, με αποτέλεσμα η ταχύτητα κατά Gauss και η κατανομή των συγκεντρώσεων να είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις κατά μήκος της διατομής του jet. Στη περίπτωση που το άνοιγμα δεν είναι στρογγυλό, θα υπάρχουν αποκλίσεις από τις παραπάνω κατανομές. Θεωρείται ότι το μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ είναι έγκυρο για λόγο μήκους προς πλάτος μικρότερο από 2 προς 3. Πρέπει να τονιστεί ότι ένα επίπεδο jet αναρροφά λιγότερη ποσότητα αέρα, πράγμα που σημαίνει ότι το μήκος του πυρήνα του jet (*σχήμα 7*) γίνεται σημαντικά μακρύτερο, έτσι ώστε οι συγκεντρώσεις να είναι υψηλές σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από το άνοιγμα και για μία μεγάλη ποικιλί; πλάτους του jet. Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι ένας αριθμός ανοιγμάτων σε σειρά μπορούν να σχηματίσουν από κοινού ένα επίπεδο jet, αρκεί η μεταξύ τους απόσταση να είναι αρκετά μικρή.

Σημείο 4:

Ο σχηματισμός τυρβώδους free jet καθορίζεται από το μέγεθος του αριθμού του Reynolds στο σημείο διάρρηξης. Η μετάβαση από στρωτή ροή του free jet

σε τυρβώδη γίνεται για $Re=2.5x10^4$. Για υψηλότερες τιμές το jet θεωρείται τυρβώδες. Η μέθοδος υπολογισμού που παρουσιάζεται εδώ εφαρμόζεται μόνο για τυρβώδες free jet.

Για jet στρωτής ροής υπάρχει ένα διαφορετικό μοντέλο που δεν θα συζητηθεί εδώ. Στη περίπτωση στρωτής ροής jet, αναρροφάται λιγότερος αέρας, οπότε σε μεγάλες απόστασεις από το σημείο διάρρηξης μπορούν να παρουσιαστούν υψηλότερες συγκεντρώσεις στον πυρήνα της ροής. Η στρωτή μορφή jet αναμένεται να συμβεί στη φάση «ανοίγματος» και «κλεισίματος» της πηγής (πχ το άνοιγμα και το κλείσιμο μιας βαλβίδας ασφαλείας).

Σημείο 5:

Ανάλογα με τη πίεση στο τέλος του ανοιγματος εκροής, μπορεί να πραγματοποιηθεί κρίσιμη ή υποκρίσιμη ροή(βλ επίσης *σχήμα 7*). Το μοντέλο που περιγράφεται εδώ βασικά αφορά μόνο κρίσιμη ή υπο-κρίσιμη ροή.

Σημείο 6:

Στη περίπτωση υπερκρίσιμης ροής θα πρέπει να γίνει διαχωρισμός ανάλογα με το τύπο του ανοίγματος πχ απότομο άνοιγμα ή ακροφύσιο Laval. Για την πρώτη περίπτωση – το απότομο άνοιγμα - χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της κρίσιμης/υποκρίσιμης εκροής. Η αύξηση της ορμής του jet ως αποτέλεσμα της μετέπειτα εκτόνωσης του αερίου δεν συζητείται εδώ. Η παράγραφος 2 εμβάθυνει σε αυτό με περισσότερες λεπτομέρειες. Το ακροφύσιο Laval παραβλέπεται αφού αποτελεί πηγή που προέκυψε τυχαία.

Σημείο 7:

Το μοντέλο που παρουσιάζεται δεν λαμβάνει υπόψη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του απελευθερώμενου αερίου και του ατμοσφαιρικού αέρα.

Σημείο 8:

Αν υπάρχει διαφορά στη θερμοκρασία μεταξύ του απελευθερώμενου αερίου και του ατμοσφαιρικού αέρα, θεωρείται ότι συμβαίνει μια μια γρήγορη εξισορρόπηση της θερμοκρασίας. Αυτό το σημείο συζητείται περισσότερο στην παράγραφο 4.1. Αν αντίθετα δεν λαμβάνει χώρα γρήγορη εξισσορόπηση θερμοκρασίας το μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

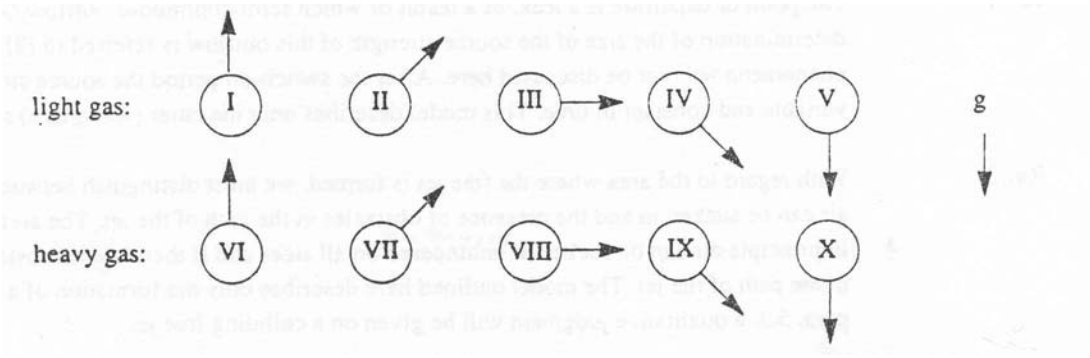
Σημείο 9:

Η πυκνότητα του ελεύθερου jet μπορεί να αποκλίνει από αυτή του

ατμοσφαιρικού αέρα, εξαιτίας του γεγονότος, για παράδειγμα, ότι το αέριο που διαφεύγει έχει διαφορετική πυκνότητα ή εξαιτίας του ότι η θερμοκρασία του jet διαφέρει αρκετά από αυτή του αέρα της ατμόσφαιρας. Σε αυτή τη περίπτωση η βαρύτητα επηρεάζει την ανάπτυξη του jet. Το μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον η βαρύτητα δεν επηρεάζει τη δημιουργία του free jet.

Σημείο 10:

Όταν η βαρύτητα παίζει ρόλο, η κατεύθυνση του jet είναι σημαντική. Οι διάφορες πιθανότητες παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 9: Πιθανές κατευθύνσεις του jet

Στη περίπτωση οριζόντιου free jet (III και VIII) το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του περιεχομένου του jet, με τον όρο ότι πρόκειται για «απαισιόδοξο» σενάριο, ανεξάρτητα της πυκνότητας του αερίου. Σε αυτή τη περίπτωση λίγα μπορούν να ειπωθούν για το σχήμα του jet.

Στη περίπτωση μη οριζόντιου free jet (με κλίση ή κάθετου) η επίδραση της βαρύτητας είναι σημαντική.

Σημειο 11:

Εαν το jet έχει κλίση, η επίδραση της βαρύτητας καθορίζει τα όρια χρήσης του μοντέλου. Η επίδραση είναι θετική αν, λόγω της διαφοράς στην πυκνότητα μεταξύ του jet και του περιβάλλοντος, λάβει χώρα μία αύξηση της ορμής στην αρχική διεύθυνση του jet. Σε αυτές τις περιπτώσεις (II και IX) το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό τις προϋποθέσεις που ίσχυαν και για το οριζόντιο jet, π.χ. συντηρητικό υπολογισμό του περιεχομένου του jet, ενώ τίποτα δεν μπορεί να ειπωθεί για το σχήμα του. Έαν η επίδραση της βαρύτητας είναι αρνητική, δηλαδή η ορμή στην αρχική διεύθυνση του jet

μειώνεται λόγω της διαφοράς της πυκνότητας ανάμεσα στο jet και το περιβάλλον (IV και VII), το μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς επιπλοκές. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει ένα ξεκάθαρο κριτήριο.

Σημείο 12:

Όμοια και για κάθετο free jet, η επίδραση της βαρύτητας καθορίζει εάν το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή όχι.

Σημείο 13:

Με θετική επίδραση της βαρύτητας (I και X) υπάρχουν δύο πιθανότητες. Η χρήση του μοντέλου δίνει ένα μη ικανοποιητικό αποτέλεσμα όσον αφορά τόσο τα περιεχόμενα του jet όσο και τις θέσεις όπου επιτυγχάνονται διάφορες συγκεντρώσεις. Ως εναλλακτική λύση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο στο οποίο ενσωματώνεται η επίδραση της βαρύτητας και της οποιας ταχύτητας ανέμου.

Σημείο 14:

Με αρνητική επίδραση της βαρύτητας (V και VI), η σχέση x_c/x_t καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να προχωρήσει η ανάλυση. Εδώ το x_c είναι η απόσταση μέχρι το σημείο διάρρηξης (μετρούμενο πάνω στον άξονα του jet) στο οποίο η ταχύτητα, υπό την επίδραση της διαφοράς πυκνότητας, θα είναι μηδενική, ενώ το x_t αντιπροσωπεύει την απόσταση που υπολογίζεται μέχρι το σημείο διάρρηξης με το μοντέλο του ελεύθερου jet που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, στο οποίο επιτυγχάνεται σημαντική συγκέντρωση. Αν ο λόγος, είναι μικρότερος του 1,5 το μοντέλο δεν χρησιμοποιείται και πρέπει αναμένεται η ύπαρξη διασποράς.

Σημείο 15:

Εάν ο λόγος x_c/x_t είναι μεγαλύτερος από 1,5 υπάρχουν ξανά δύο πιθανότητες. Καταρχήν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του free jet, και πρέπει να τονιστεί ότι τα πραγματικά περιεχόμενα του free jet θα είναι μεγαλύτερα από τα υπολογιζόμενα. Επίσης οι αποστάσεις, στις οποίες επιτυγχάνονται οι διάφορες σημαντικές συγκεντρώσεις θα είναι στην πραγματικότητα μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίζονται με το μοντέλο.

Σημείο 16:

Σε ήπιες καιρικές συνθήκες το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς

επιπλέον επιπλοκές.

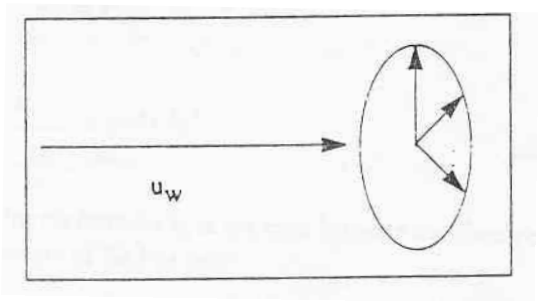
Σημείο 17:

Εάν υπάρχει άνεμος, είναι σημαντικό το εάν έστω και μία συνιστώσα της ταχύτητας εκροής κατευθύνεται αντίθετα ως προς την ταχύτητα του ανέμου. Σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο.

Σημείο 18:

Αν καμία συνιστώσα της ταχύτητας εκρόης δεν είναι ενάντια στην ταχύτητα του ανέμου, διακρίνονται οι ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

Η ταχύτητα του ανέμου είναι παράλληλη με την ταχύτητα εκροής, δηλαδή περίπτωση οριζόντιου free jet. Σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συντηρητικός υπολογισμός για το περιεχόμενο του jet



Σχήμα 10: Γωνία ταχύτητας ανέμου – διεύθυνσης του jet

Η κατεύθυνση του jet και του ανέμου σχηματίζουν γωνία. Αυτό μπορεί να συμβεί σε οριζόντιο, κάθετο και κεκλιμένο jet.

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις που δεν αναφέρθηκαν στο σημείο 18, δεν μπορεί να δοθεί καθαρό κριτήριο χρηστικότητα του μοντέλου. Μπορούμε όμως να πούμε ότι το κριτήριο σε αυτές τις περιπτώσεις είναι λιγότερο σημαντικό από ότι στις περιπτώσεις όπου η κατεύθυνση του jet σχηματίζει γωνία με την κατεύθυνση του ανέμου.

Σημείο 19:

Αν η κατεύθυνση του jet και του ανέμου σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία, η σχέση u_t/u_w είναι ο καθοριστικός παράγων για τη χρηστικότητα του μοντέλου.

Σημείο 20:

Με το λόγο u_t/u_w μικρότερο της μονάδας υπάρχουν δύο πιθανότητες:

Χρήση του μοντέλου στο οποίο περιλαμβάνεται η επίδραση της βαρύτητας και της ταχύτητας του ανέμου.

Συνδυασμένη χρήση του μοντέλου free jet και του μοντέλου διασποράς.

Σημείο 21:

Με το λόγο u_t/u_w μεγαλύτερο της μονάδας υπάρχουν επίσης δύο πιθανότητες:

Χρήση του υπολογιστικού μοντέλου

Χρήση του μοντέλου του free jet, όπως παρουσιάστηκε εδώ, έχοντας γνώση ότι τα αποτελέσματα που δίνει είναι μη ικανοποιητικά.

3.3. Μερικές χαρακτηριστικές μεταβλητές για τυρβώδες free jet

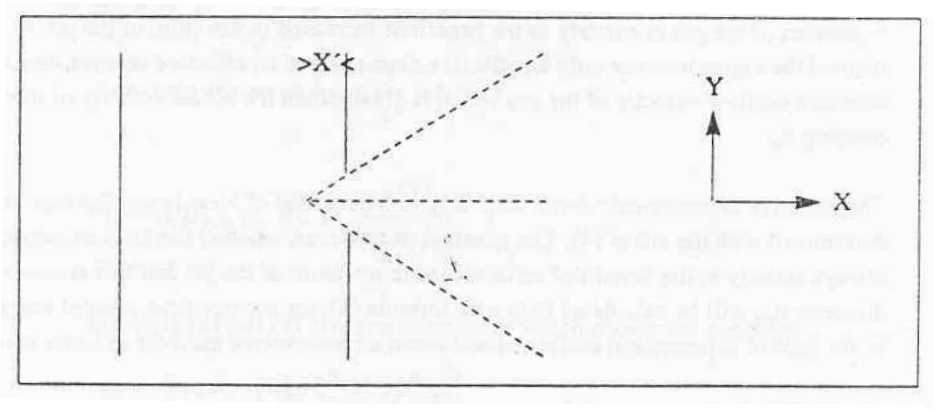
Για την περιγραφή του ελεύθερου jet απαιτούνται οι παρακάτω μεταβλητές και σχέσεις:

Ο λόγος μεταξύ του κλάσματος όγκου του αερίου στον άξονα του jet και αυτού στο σημείο διάρρηξης, j_m/j_0.

Ο λόγος μεταξύ της ταχύτητας στον άξονα του jet και αυτής στο σημείο διάρρηξης, u_m/u_0.

Η κατανομή των συγκεντρώσεων και της ταχύτητας σε κάθετο ως προς τον άξονα του jet επίπεδο.

Η φαινόμενη αρχή x' του jet. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η αρχή δεν αντιστοιχεί ακριβώς στο άνοιγμα εκροής.



Σχήμα 11: Φαινομενική και πραγματική αρχή του jet

Φαίνεται ότι τόσο η κατανομή της συγκέντρωσης όσο κι η κατανομή της ταχύτητα σε κάθετο ως προς τον άξονα του jet επίπεδο μπορεί να προσεγγιστεί πολύ καλά με χρήση εκθετικής κατανομής:

$$\frac{j_{x,y}}{j_m} = e^{-b_2 b_3^2} \qquad (1)$$

$$\frac{u_{x,y}}{u_m} = e^{-b_1 b_3^2} \qquad (2)$$

Σε αυτή τη σχέση b_3 είναι ο λόγος μεταξύ της απόστασης προς τον άξονα του jet και της απόστασης προς τη φαινόμενη αρχή του free jet:

$$b_3 = \frac{y}{x+x'} = \frac{y}{x''}$$

Τα b_1 και b_2 αποτελούν τις επονομαζόμενες σταθερές κατανομής, και λαμβάνουν ειδική τιμή για κάθε αέριο. Το μέγεθος των b_1 και b_2 φαίνεται να εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα $\rho_{g,a}$ του αερίου σε σχέση με τον αέρα. Οι Ricou και Spalding απέδειξαν ότι ο λόγος μεταξύ της ροής μάζας $\dot{m}$ μέσα από κάθετο στον άξονα του jet επίπεδο και της ροής μάζας $\dot{m}_0$ μέσα από το άνοιγμα εκροής αποτελούν συνάρτηση της μειωμένης απόστασης x/d_0 και της σχετικής πυκνότητας του αερίου $\rho'_{g,0}$ στο σημείο διάρρηξης σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντα αέρα. Αυτή η σχέση δίνει την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{m}{m_0} = 0.32 \frac{x}{d_0} \left[\frac{1}{\rho'_{g,0}} \right]^{1/2} \qquad (3)$$

Η σχετική πυκνότητα του αερίου στο σημείο διάρρηξης μπορεί να αποκλίνει από τη σχετική πυκνότητα του αερίου στο jet. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η πίεση του αερίου στο σημείο της διάρρηξης διαφέρει από την ατμοσφαιρική πίεση (υπερκρίσιμη ροή) ή στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του διαρρεόμενου αερίου διαφέρει από αυτή του ατμοσφαιρικού αέρα. Στη τελευταία περίπτωση θα θεωρηθεί ότι η εξισορρόπηση της θερμοκρασίας συμβαίνει τόσο γρήγορα ώστε η θερμοκρασία του αερίου στο jet να μπορεί να θεωρηθεί ίδια με αυτή του περιβάλλοντος αέρα. Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της αποκλίνουσας πυκνότητας στο σημείο διάρρηξης εισάγουμε μια ισοδύναμη διάμετρο d_{eq} και μια ισοδύναμη σχετική πυκνότητα του αερίου στο σημείο διάρρηξης $\rho_{0,eq}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μάζα εκροής παραμένει σταθερή στο σημείο διάρρηξης, έχουμε:

$$d_{eq} = d_0 \sqrt{\frac{\rho'_{g,0}}{\rho'_{0,eq}}} \qquad (4)$$

Κατά συνέπεια η σχέση (3) γίνεται:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} = 0.32 \frac{x}{d_{eq}} \left[\frac{1}{\rho'_{0,eq}} \right]^{1/2} \tag{5}$$

Για την υπερκρίσιμη ροή οι Hess, Leuckel και Stoeckel δίνουν μια μέθοδο υπολογισμού στην οποία η μετέπειτα εκτόνωση του αερίου είναι καθολικά προς όφελος της αυξανόμενης ορμής του jet. Στη μέθοδο υπολογισμού, εκτός της λειτουργικής διαμέτρου και της λειτουργικής πυκνότητας, εισάγουν και τη λειτουργική ταχύτητα εκροής του αερίου, η οποία είναι μεγαλύτερη από την πραγματική ταχύτητα u_0 του αερίου στο άνοιγμα εκροής.

Η λειτουργική διάμετρος που υπολογίζεται από τη μέθοδο του Hess είναι μικρότερη της διαμέτρου που υπολογίζεται από την (4). Το ερώτημα είναι, παρόλα αυτά, εάν η μετέπειτα εκτόνωση του αερίου πάντα δρα προς όφελος της αυξανόμενης ορμής του jet. Για αυτόν τον λόγο η λειτουργική διάμετρος d_{eq} θα υπολογίζεται από τη σχέση (4), για υπερκρίσιμη, κρίσιμη και υπο-κρίσιμη εκροή. Σε περίπτωση υπερκρίσιμης εκροής ενδεχομένως να παρέχει συντηρητικά αποτελέσματα.

3.3.1 Μέγεθος των σταθερών κατανομής b_1 και b_2

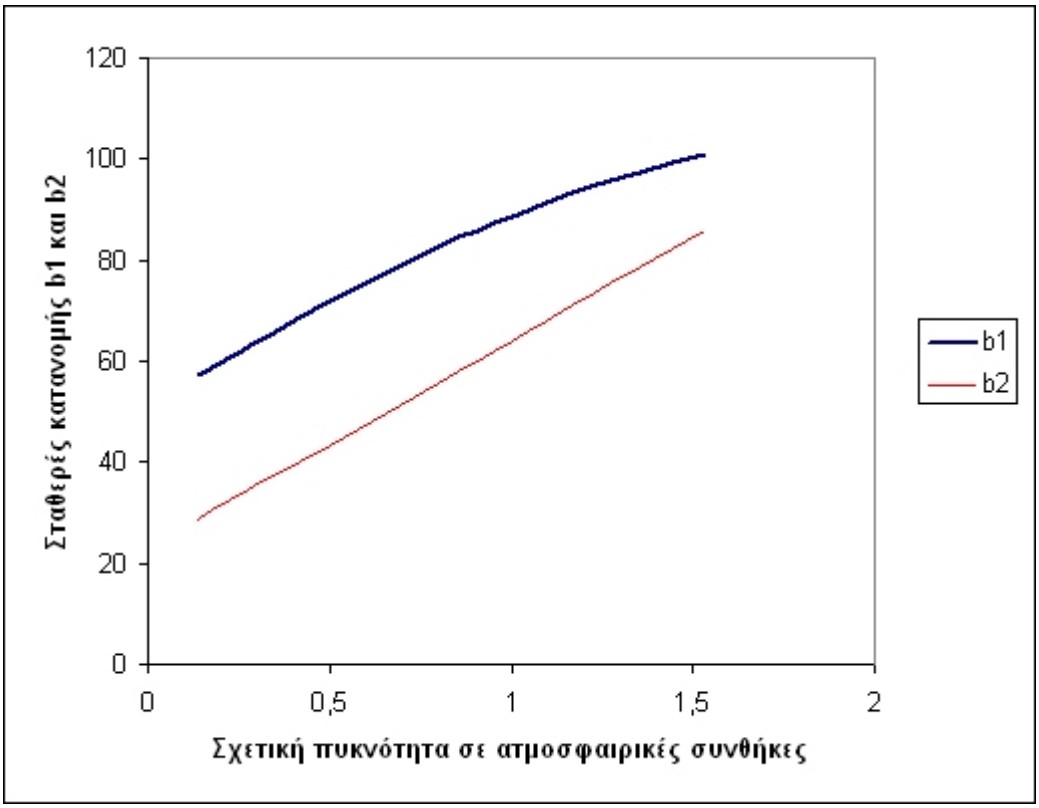
Με την παραδοχή ότι συμβαίνει γρήγορη εξισορρόπηση της θερμοκρασίας όταν υπάρχει διαφορά στη θερμοκρασία μεταξύ του εκρεόμενου αερίου και του ατμοσφαιρικού αέρα, η σχετική πυκνότητα του αερίου στο σημείο (x,y) θα τίθεται ίση με τη σχετική πυκνότητα του αερίου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, δηλαδή $\rho'_{g,(x,y)} = \rho'_{g,a}$.

Αν το μέγεθος των b_1 και b_2 σχεδιαστεί ως συνάρτηση του $\rho'_{g,a}$, οι ακόλουθες σχέσεις είναι οι κατάλληλες (*σχήμα 12*):

$$b_1 = 50.5 + 48.2\rho'_{g,a} - 9.95\left(\rho'_{g,a}\right)^2 \tag{6}$$

$$b_2 = 23 + 41\rho'_{g,a} \tag{7}$$

Αυτοί οι τύποι βασίζονται σε μικρό αριθμό μετρήσεων στις όπου η σχετικη πυκνότητα αλλάζει από 0,14 έως 1,53. Για τιμές σχετικής πυκνότητας κάτω του 0,14 και άνω του 1,53 ο υπολογισμός με προεκβολή θεωρείται πολύ



γενικός. Εφόσον προς το παρόν δεν υπάρχουν περισσότερες διαθέσιμες πληροφορίες ο υπολογισμός των σταθερών κατανομής βασίζεται στους τύπους (6) και (7).

3.4. Καθορισμός των χαρακτηριστικών μεταβλητών

Για την ροή μάζας $\dot{m}_0$ διαμέσου του ανοίγματος διάρρηξης έχουμε:

$$\dot{m}_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 \rho_{g,0} u_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 \rho_\alpha \rho'_{g,0} u_0 = \frac{\pi}{4} d_{eq}^2 \rho_\alpha \rho'_{0,eq} u_0 \qquad (8)$$

Το κλάσμα όγκου του αερίου στο άνοιγμα εκροής λαμβάνεται ίσο με τη μονάδα. Η ίδια ποσότητα αερίου καθώς εκρέει από το άνοιγμα διέρχεται από κάθε κάθετη ως προς τον άξονα του jet επίπεδο.

$$\dot{m}_0 = \int_0^\infty j_{x,y} u_{x,y} \rho_\alpha \rho'_{g,\alpha} 2\pi y dy = 2\pi \rho_\alpha \rho'_{g,\alpha} \int_0^\infty j_m e^{-b_2 b_3^2} u_m e^{-b_2 b_3^2} y dy$$

Μετά την αντικατάσταση του $b_3 = y/x''$ έχουμε:

$$\dot{m}_0 = \pi \rho'_{g,\alpha} \rho_\alpha u_m j_m \frac{x''^2}{b_1 + b_2} \qquad (9)$$

Εξισώνοντας τις (8), (9) παράγεται μία σχέση συσχέτισης u_m και u_0.

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{b_1 + b_2}{4} \left[\frac{d_{eq}}{x''} \right]^2 \frac{1}{j_m} \frac{\rho'_{0,eq}}{\rho'_{g,\alpha}} \qquad (10)$$

Στην ισότητα αυτή, ο άγνωστος είναι το κλάσμα όγκου στον άξονα j_m του jet. Για τον καθορισμό της παραμέτρου αυτής υπολογίζεται η συνολική ροή μάζας του jet. Οπότε έχουμε:

$$\dot{m}_0 = \int_0^\infty u_{x,y}\rho_{mix,x,y} 2\pi y dy \tag{11}$$

Για την πυκνότητα του μίγματος μπορούμε να έχουμε:

$$\rho_{mix,x,y} = j_{x,y}\rho_{g(x,y)} + (1-j_{x,y})\rho_\alpha \left\{ j\left(\rho_{g,\alpha} - 1\right) + 1 \right\}$$

Αυτό δίνει:

$$\dot{m} = \int_0^\infty u_m e^{-b_1 b_3^2} \rho_\alpha \left\{ \int j_m e^{-b_2 b_3^2} \left(\rho'_{g,\alpha} - 1\right) + 1 \right\} 2\pi y dy$$

Μετά από αντικατάσταση του $b_3 = y/x''$ ακολουθεί η λύση:

$$\dot{m} = \pi u_m \rho_\alpha \frac{x''^2}{b_1} + \pi u_m \rho_\alpha j_m \left(\rho'_{g,\alpha} - 1\right) \frac{x''^2}{b_1 + b_2} \tag{12}$$

Για τη σχέση μεταξύ $\dot{m}$ και $\dot{m}_0$ έχουμε τα ακόλουθα:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} = \frac{(12)}{(9)} = \frac{b_1 + b_2}{b_1} \frac{1}{j_m} \frac{1}{\rho'_{g,\alpha}} + \frac{\rho'_{g,\alpha} - 1}{\rho'_{g,\alpha}} \tag{13}$$

Εάν η εξίσωση (13) εξισωθεί με την εξίσωση (5), μπορεί να βρεθεί μία έκφραση για το j_m.

$$j_m = \frac{\dfrac{b_1 + b_2}{b_1}}{0.32 \dfrac{x}{d_{eq}} \dfrac{\rho'_{g,\alpha}}{\sqrt{\rho'_{0,eq}}} + 1 - \rho'_{g,\alpha}} \tag{14}$$

Εάν είναι γνωστές οι σταθερές κατανομής b_1 και b_2 το κλάσμα όγκου στον άξονα του jet μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει της μειωμένης απόστασης x/d_{eq} από την εκροή.

Επιπλέον, με τη βοήθεια της (14), μπορεί να παραχθεί μία έκφραση για τη μέγιστη απόσταση που ενδεχομένως να αποτελέσει προϊόν ενδιαφέροντος σε κάποιες περιπτώσεις:

$$x_t = \left[\frac{\dfrac{b_1 + b_2}{b_1}}{j_t} + \rho'_{g,\alpha} - 1 \right] \frac{d_{eq}\sqrt{\rho'_{0,eq}}}{0.32\rho'_{g,\alpha}} \tag{15}$$

Σε περίπτωση εκρηκτικού μίγματος η απόσταση κατά μήκους του άξονα του

jet στην οποία η συγκέντρωση θα ισούται με το μικρότερο όριο έκρηξης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (15). Για μία τοξική ένωση, για παράδειγμα, το x_t μπορεί να είναι η απόσταση στην οποία η συγκέντρωση ισούται με το Όριο Έκθεσης του Πληθυσμού (**P**ollution **E**xposure **L**imit).

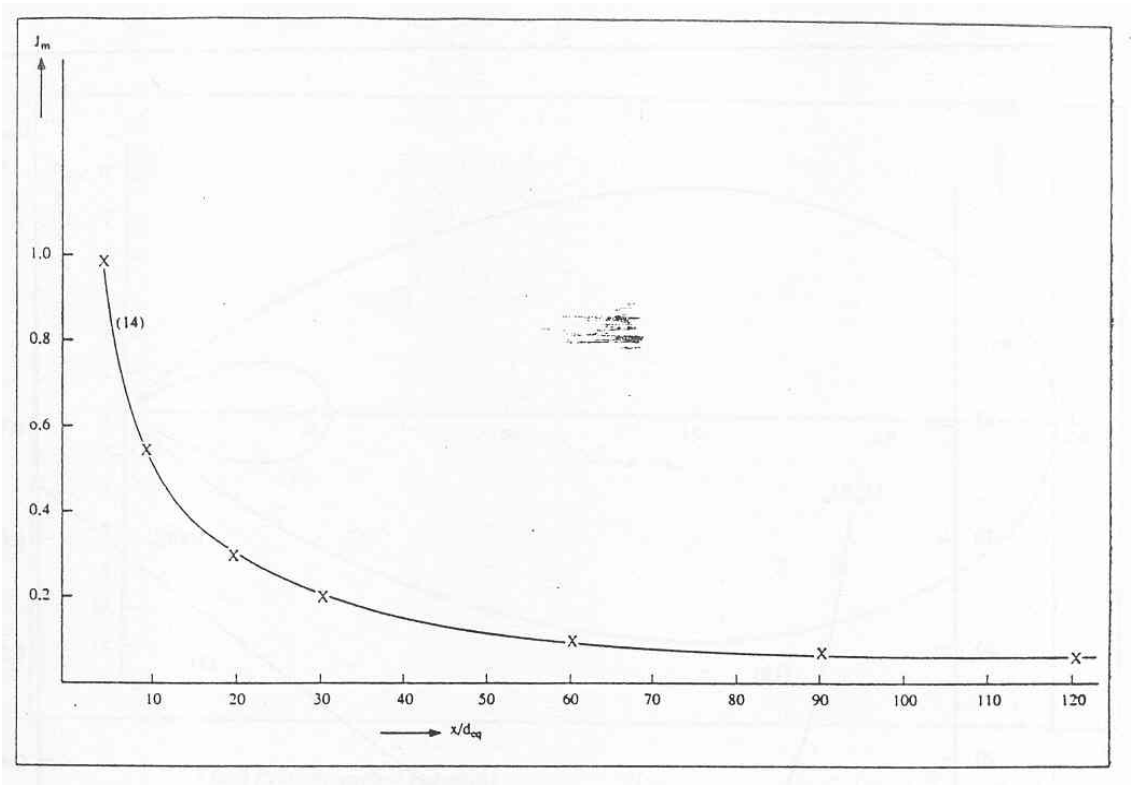
Ας πάρουμε ως παράδειγμα το φυσικό αέριο του Slochteren. Είναι:

$\rho'_{g,\alpha}$=0,6405 (υποθέτωντας ότι $\rho'_{g,0}= \rho'_{g,eq}= \rho'_{g,\alpha}$ κι επίσης ότι $d_{eq}=d_0$)

b_1=77.3 και b_2=49.3

Για το κλάσμα όγκου στον άξονα του jet έχουμε:

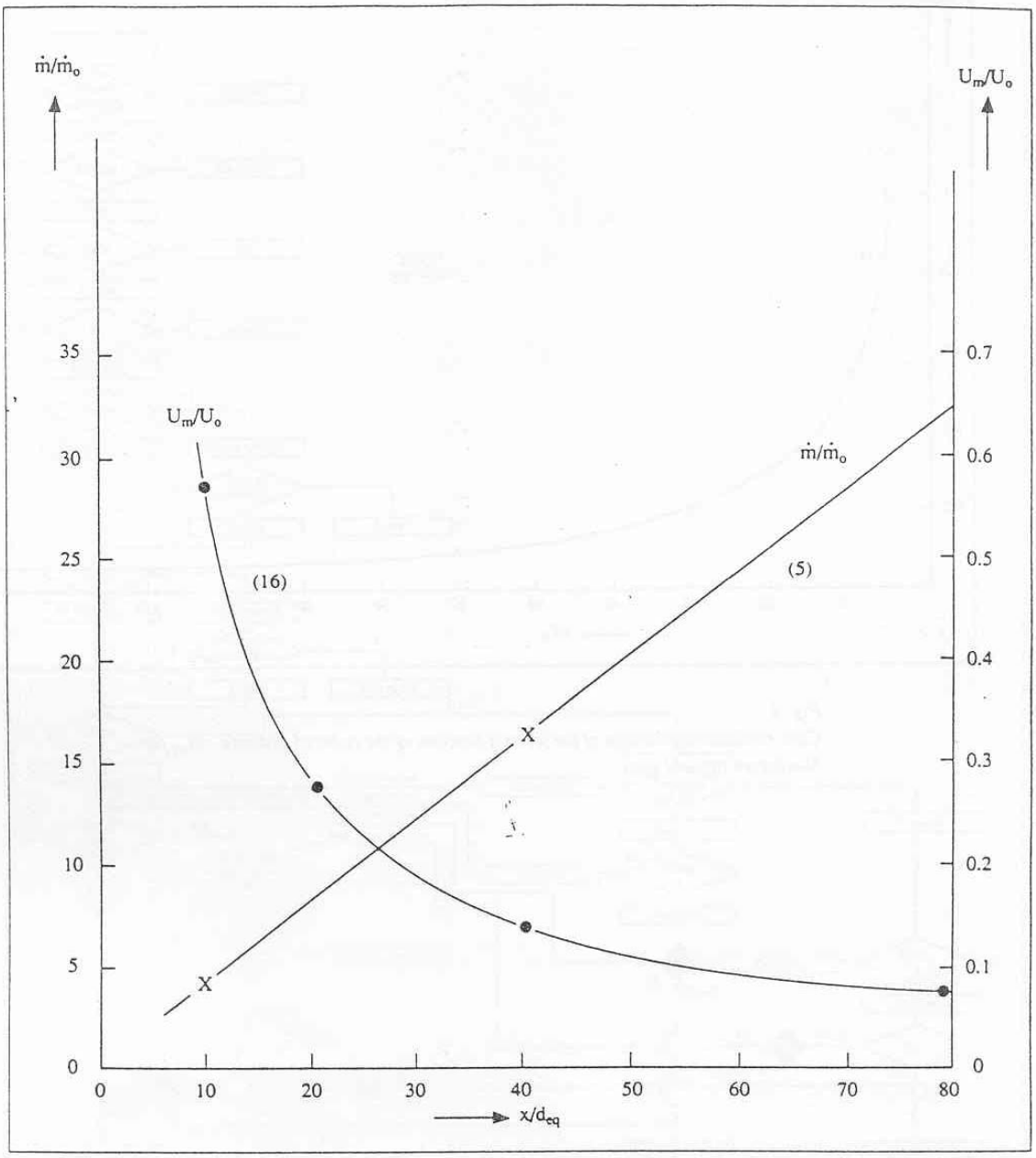
$j_m = \dfrac{1.64}{0.26\dfrac{x}{d_{eq}} + 0.36}$, όπου $(x/d_{eq})>(d/d_0)$, αφού το j_m είναι 1.



Σχήμα 13: Συγκέντρωση στον άξονα του jet συναρτήσει της μειωμένης απόστασης x/d_{eq} για το φυσικό αέριο του Slochteren

Στο *σχήμα 13* το j_m είναι σχεδιασμένο ως συνάρτηση του x/d_{eq}, ενώ το *σχήμα 14* περιέχει τις γραφικές παραστάσεις των $\dot{m}/\dot{m}_0$ και u_m/u_0 συναρτήσει του x/d_{eq} για το αέριο του Slochteren.

Και από τα δύο διαγράμματα είναι εμφανές ότι υπάρχει μία ταχύτατη μείωση



Σχήμα 14: Οι λόγοι $\dot{m}/\dot{m}_0$ και u_m/u_0 συναρτήσει της μειωμένης απόστασης x/d_{eq} για το φυσικό αέριο του Slochteren

του j_m και του u_m καθώς αυξάνεται το x/d_{eq}.

Η καμπύλη για την κατανομή της ταχύτητας κατά μήκος του άξονα του jet καθορίζεται αντικαθιστώντας την σχέση (14) στην ισότητα (10).

Αυτό δίνει:

$$\frac{u_m}{u_0} = \left[\frac{d_{eq}}{x''}\right]^2 \frac{b_1}{4}\left(0.32\frac{x}{d_{eq}}\frac{\rho'_{g,\alpha}}{\sqrt{\rho'_{0,eq}}} + 1 - \rho'_{g,\alpha}\right)\frac{\rho'_{0,eq}}{\rho'_{g,\alpha}} \qquad (16)$$

3.5. Περιεχόμενο του jet

Για την κατανομή της συγκέντρωσης σε επιφάνεια κάθετη ως προς τον άξονα του jet ισχύει ότι:

$$\frac{j_{x,y}}{j_m} = e^{-b_2 b_3^2}$$

και για τη συγκέντρωση στον άξονα του jet

$$j_m = \frac{\frac{b_1 + b_2}{b_1}}{0.32 \frac{x}{d_{eq}} \frac{\rho'_{g,\alpha}}{\sqrt{\rho'_{0,eq}}} + 1 - \rho'_{g,\alpha}} \cdot j_0$$

Σε σημείο (x,y) το κλάσμα όγκου είναι:

$$j_{x,y} = j_m e^{-b_2\left(\frac{y}{x}\right)^2} = \frac{\frac{b_1 + b_2}{b_1}}{0.32 \frac{x}{d_{eq}} \frac{\rho'_{g,\alpha}}{\sqrt{\rho'_{0,eq}}} + 1 - \rho'_{g,\alpha}} \cdot e^{-b_2\left(\frac{y}{x}\right)^2} \tag{17}$$

Για την ποσότητα του αερίου σε συγκεκριμένο εύρος σύνθεσης θα είναι:

$$V_g = \iint j_{x,y} 2\pi y dy dx = \iint \frac{\frac{b_1 + b_2}{b_1}}{0.32 \frac{x}{d_{eq}} \frac{\rho'_{g,\alpha}}{\sqrt{\rho'_{0,eq}}} + 1 - \rho'_{g,\alpha}} \cdot e^{-b_2\left(\frac{y}{x}\right)^2} 2\pi y dy dx'' \tag{18}$$

με τα ακόλουθα όρια ολοκλήρωσης:

y=0 έως $y = \sqrt{\frac{x''^2}{b_2} \ln\left[\frac{\frac{b_1 + b_2}{b_1}}{0.32 \frac{x''}{d_{eq}} \frac{\rho'_{g,\alpha}}{\sqrt{\rho'_{0,eq}}} + 1 - \rho'_{g,\alpha}} \cdot \frac{j_0}{j_t}\right]}$

x''=0 έως $x'' = \frac{\frac{b_1 + b_2}{b_1} \frac{j_0}{j_t} + \rho'_{g,\alpha} - 1}{0.32 \frac{\rho'_{g,\alpha}}{\sqrt{\rho'_{0,eq}}}} \cdot d_{eq}$

Καθορισμός του όγκου του αερίου μεταξύ των ορίων j=1 και $j=j_t$ δίνει τον ακόλουθο τύπο μετά από επίλυση του παραπάνω ολοκληρώματος:

$$V_g = \frac{\pi}{3b_2} \frac{d_{eq}^3 \left(\rho'_{0,eq}\right)^{\frac{3}{2}}}{(0.32)^3 \left(\rho'_{g,\alpha}\right)^3} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}\left[\frac{b_1 + b_2}{b_1}\right]^3 \left[\frac{1}{j_t^2} - 1\right] - 3\left(1 - \rho'_{g,\alpha}\right)\left[\frac{b_1 + b_2}{b_1}\right]^2 \left[\frac{1}{j_t} - 1\right] + \\ +3\left(1 - \rho'_{g,\alpha}\right)^2 \frac{b_1 + b_2}{b_1} \ln\frac{1}{j_t} + \left(1 - \rho'_{g,\alpha}\right)^3 \left(j_t - 1\right) \end{array} \right\} \tag{19}$$

Με τη βοήθεια της εξίσωσης (19) μπορεί να καθοριστεί η ποσότητα του αερίου που εμπίπτει στα εκρηκτικά όρια.

Σημείωση:

Στη μέχρι τώρα εξαγωγή των σχέσεων το $\sqrt{\rho'_{0,eq}} \cdot d_{eq}$ μπορεί να αντικατασταθεί από το $d_0\sqrt{\rho'_{g,0}}$.

3.6. Εύρος εγκυρότητας του μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή το μοντέλο που παρουσιάστηκε εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό ορισμένες συνθήκες, όπως ίδια θερμοκρασία εκρεόμενου αερίου και περιβάλλοντος αέρα και κάθετη / μη κάθετη ροή υπό ειδικές προϋποθέσεις.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την εξίσορρόπηση της θερμοκρασίας που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ροής όταν οι θερμοκρασίες είναι διαφορετικές, την επίδραση της βαρύτητας και τις συνέπειες του συγκρουόμενου free jet.

3.6.1 Εξισορρόπηση της θερμοκρασίας

Στη μέθοδο υπολογισμού θεωρείται ότι η διαφορά στη θερμοκρασία μεταξύ του αερίου που εκρέει και του ατμοσφαιρικού αέρα ελαττώνεται γρήγορα. Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια να καθοριστεί η έκταση στην οποία αυτή η υπόθεση είναι ρεαλιστική. Θεωρώντας το κλάσμα όγκου j για το αέριο έχουμε:

$$j_{x,y}\rho_g(x,y)c_{p,g}\left(T_{mix}-T_0\right)=\left(1-j_{x,y}\right)\rho_{\alpha(x,y)}c_{p,\alpha}\left(T_\alpha-T_{mix}\right) \tag{20}$$

με $\rho_{g(x,y)}=(p_\alpha M_g)/(RT_{mix})$ και $\rho_{\alpha(x,y)}=(p_\alpha M_\alpha)/(RT_{mix})$. Με $M'_g=M_g/M_\alpha$ και $c'_g=c_{p,g}/c_{p,\alpha}$, παράγεται ο τύπος:

$$T_{mix}=\frac{j_{x,y}M'_g c'_g T_0+\left(1-j_{x,y}\right)T_\alpha}{j_{x,y}M'_g c'_g-1-j_{x,y}} \tag{21}$$

Από αυτό είναι φανερό ότι τα όρια εξισορρόπησης της θερμοκρασίας εξαρτώνται από το λόγο των μοριακών όγκων και των ειδικών θερμοτήτων. Η εξισορρόπηση αυτή πραγματοποιείται πιο γρήγορα όταν τα M'_g και c'_g ελαττώνονται, όπως φαίνεται στην επόμενη εξίσωση. Από την (21) έχουμε:

$$T_{mix}-T_\alpha=\left(T_0-T_\alpha\right)\frac{j_{x,y}}{j_{x,y}+\dfrac{1-j_{x,y}}{M'_g c_g}} \tag{22}$$

από την εξίσωση (21) προκύπτει το πόσο γρήγορα πραγματοποιείται η εξισορρόπηση της θερμοκρασίας. Αυτό γίνεται δυνατό αντικαθιστώντας τη θερμοκρασία του μίγματος και υπολογίζοντας στη συνέχεια το κατάλληλο κλάσμα όγκου j. Η θερμοκρασία του εκρέοντος αερίου μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της σχέσης:

$$T = T_r \frac{p_r}{p_\alpha}^{-\frac{k-1}{k}}$$

Στην περίπτωση της υποκρίσιμης ροής η θερμοκρασία που υπολογίζεται με αυτό τον τρόπο αντιστοιχεί στην πραγματική θερμοκρασία. Στην υπερκρίσιμη ροή πραγματοποιείται περαιτέρω εξίσορρόπηση θερμοκρασίας μέσω της αλληλεπίδρασης με τα κύματα κρούσης που εγείρονται. Εφόσον δεν είναι γνωστό πόσο καλή μπορεί να είναι η εξισορρόπηση της θερμοκρασίας με αυτόν τον τρόπο, προτείνεται να λαμβάνεται ως βάση η προαναφερθείσα μέθοδος υπολογισμού της θερμοκρασία του αερίου μετά την εκτόνωση. Για τον καθορισμό της θερμοκρασίας του μίγματος, η θερμοκρασία του αερίου παίρνει τιμές -50 μέχρι +100°C. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Μεθάνιο		Προπάνιο	Βουτάνιο	
	T=223 K	T=373 K	T=373 K	T=373 K	
T_{mix}					
T_a± 10%	0.57	0.40	0.10	0.06	$j_{x,y}$
T_a ± 5%	0.32	0.21	0.04	0.02	$j_{x,y}$
T_a ± 1%	0.07	0.04	0.01	-	$j_{x,y}$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (14) μπορούμε να καθορίσουμε την απόσταση στην οποία η θερμοκρασία του μίγματος θεωρείται ότι έχει συγκεκριμένη τιμή (με τη θεώρηση ότι $\rho'_{0,eq}=\rho'_{g,a}$).

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	Μεθάνιο		Προπάνιο	Βουτάνιο	
	223 K	373 K	373 K	373 K	
T_{mix}					
T_a± 10%	10	15	48	75	x/d_{eq}
T_a ± 5%	19	29	120	220	x/d_{eq}
T_a ± 1%	90	160	470	-	x/d_{eq}

Κι από τους δύο πίνακες εξάγεται το συμπέρασμα ότι η υπόθεση της γρήγορης εξίσορρόπησης της θερμοκρασίας δεν είναι απόλυτα ρεαλιστική.

Κατά τη διάρκεια της εκροής βουτανίου θερμοκρασίας 100°C η θερμοκρασία του μίγματος αποκλίνει περίπου 5% από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος τη χρονική στιγμή όπου η συγκέντρωση είναι στο χαμηλότερο εκρηκτικό όριο. Επίσης υπάρχει το πρόβλημα ότι το θερμό αέριο που σε σταθερές συνθήκες είναι βαρύτερο του αέρα μπορεί να γίνει ελαφρύτερο αρχικά, με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί επιπλέον ανύψωση.

Η ανάμιξη με τον αέρα και η μείωση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση ενός σύννεφου αερίου που θα είναι βαρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα και θα καθιζάνει. Ένα όμοιο φαινόμενο λαμβάνει χώρα κατά την εκροή κρύου μεθάνιου. Σε αυτή την περίπτωση το σύννεφο αερίου που σχηματίζεται είναι βαρύτερο του αέρα και δεν εμφανίζεται παρά σε ένα μετέπειτα στάδιο. Με βάση τα παραπάνω, καταλήγουμε στο ότι κάθε περίπτωση εκροής στην οποία πραγματοποιείται εξισορρόπηση της θερμοκρασίας θα πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά, προτού να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο που παρουσιάστηκε εδώ.

3.6.2 Επίδραση της βαρύτητας

Ένας παράγων που μέχρι τώρα δεν έχει συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς είναι η βαρύτητα. Η βαρύτητα μπορεί να επηρεάσει το σχηματισμό του τυρβώδους free jet τόσο θετικά όσο και αρνητικά. Αν η πυκνότητα του εκρεόμενου αερίου είναι περίπου ίδια με αυτή του περιβάλλοντος αέρα καμία διόρθωση δεν χρειάζεται να γίνει για την επίδραση της βαρύτητας. Εάν, όμως, ασχολούμαστε με αέριο διαφορετικής πυκνότητας από αυτή του αέρα, η βαρύτητα πρέπει να λήφθεί υπόψη. Ανάλογα με τη κατεύθυνση της εκροής, η

βαρύτητα μπορεί να υποβοηθήσει ή να παρεμποδίσει.

Όταν υπάρχει παρεμποδιστική επίδραση της βαρύτητας, για παράδειγμα όταν ένα βαρύ αέριο ρέει κάθετα και προς τα πάνω, το free jet χάνει την ορμή του και σε μια δεδομένη στιγμή μένει ακίνητο, σχηματίζοντας ένα σχετικά σταθερό σύννεφο. Ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες, το σύννεφο αερίου διασκορπίζεται. Στην περίπτωση που η ροή πηγαίνει κάθετα προς τα πάνω το ύψος σχηματισμού του συννέφου μπορεί να υπολογιστεί από:

$$x_c = \frac{\varepsilon Fr^{\frac{1}{2}} 2\dot{m}_0}{\sqrt{\pi \rho_{0eq} l_0}} \tag{23}$$

όπου $$Fr = \frac{u_0^2}{\left[1 - \frac{\rho_\alpha}{\rho_{u,eq}}\right] g d_{eq}} \tag{24}$$

$$\varepsilon = 1.7 \left[\frac{\rho_{0,eq}}{\rho_\alpha}\right]^{\frac{1}{4}} \tag{25}$$

Όταν γίνεται ο υπολογισμός το $\rho_{0,\ eq}$ της πυκνότητας του αερίου θα πρέπει να λαμβάνεται μετά την εκτόνωση (σε όσα προηγήθησαν αυτό δεν ήταν σημαντικό, αφού το $d_{eq}\sqrt{\rho'_{0,eq}}$ μπορούσε να αντικατασταθεί από το $d_0\sqrt{\rho'_{g,0}}$.

Στον υπολογισμό της απόστασης x_t προς το σημείο διάρρηξης στο οποίο επιτυγχάνεται το χαμηλότερο, αλλά σημαντικό, κλάσμα j_t, με την παρούσα μέθοδο βρίσκεται μία πολύ μικρή απόσταση για αέρια που είναι βαρύτερα του αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μίξη με τον περιβάλλοντα αέρα παρεμποδίζεται σχετικά σε περίπτωση free jet βαρέος αερίου που ρέει κάθετα προς τα πάνω και σημαίνει ότι δεν είναι εφικτή η άμεση σύγκριση του x_c και του x_t. Αν, όμως, υπολογίζεται ότι για ένα εκρηκτικό αέριο υπολογιστεί x_t ($=x_{LEL}$)>x_c, τότε το σύννεφο που σχηματίζεται σίγουρα θα είναι εκρηκτικό. Από υπολογισμούς σε ηλεκτρονικό υπολογιστή εξάγεται το συμπέρασμα ότι ένα προσωρινό κριτήριο για το εάν ή όχι το σχηματιζόμενο σύννεφο είναι εκρηκτικό, είναι το ακόλουθο: x_c>1.5x_{LEL} → μη εκρηκτικό.

Αν η βαρύτητα υποβοηθά, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση υδρογόνου που ρέει κάθετα προς τα πάνω, η μίξη με τον περιβάλλοντα αέρα επιταχύνεται που σημαίνει ότι ακόμη και σε μικρότερη απόσταση από το σημείο διάρρηξης επιτυγχάνεται συγκέντρωση μικρότερη του κλάσματος j_t που μετράμε. Καθώς

η ακριβής περιγραφή αυτού του φαινομένου είναι εκτός του σκοπού αυτής της εργασίας, μόνο το μοντέλο που παρουσιάστηκε εδώ θα χρησιμοποιηθεί και πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμιση που παρέχεται με αυτόν τον τρόπο είναι συντηρητική.

Για να δοθεί μια ιδέα της ακρίβειας του μοντέλου υπολογισμού, χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα υπολογιστή για τον υπολογισμό της ποσότητας του αερίου που υπάρχει στο καύσιμο μέρος του free jet όταν η επίδραση της βαρύτητας λαμβάνεται υπόψη. Για free jet που κινείται κάθετα προς τα πάνω, στην περίπτωση αερίου με μοριακή μάζα 50 kg $kmol^{-1}$, υπάρχει περίπου 18% περισσότερο αέριο στο σύννεφο από αυτό που υπολογίζεται με τη μέθοδο που παρουσιάζεται εδώ. Για M=40 kg $kmol^{-1}$ η απόκλιση είναι 14% και για M=30 είναι μόνο 2%. Για μοριακή μάζα 20 ο υπολογισμός μέσω υπολογιστή δίνει 30% λιγότερο αέριο στην εκρηκτική περιοχή από αυτό που υπολογίζεται με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε εδώ.

3.6.3 Συγκρουόμενο free jet

Εάν ένα free jet διαχωριστεί μετά από τη σύγκρουση του με ένα εμπόδιο, η ποσότητα του αέρα που αναρροφάται μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, έχοντας ως αποτέλεσμα το jet να αραιωθεί αρκετά.

Εάν το jet δεν διαχωρίστεί μετά τη σύγκρουση ο αέρας που αναρροφάται θα μειωθεί εξαιτίας του γεγονότος ότι το jet χάνει μέρος της ορμής του στην αλληλεπίδραση. Σε αυτήν την περίπτωση πραγματοποιείται, επομένως, πιο αργή μίξη. Από αυτό γίνεται ξεκάθαρο ότι το εάν το ελεύθερο jet θα διαχωριζεται ή όχι κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης ή όχι, είναι αρκετά σημαντικό. Μερικοί παράμετροι που παίζουν ρόλο σε αυτό είναι οι διαστάσεις του εμποδίου, το γεωμετρικό σχήμα και η απόσταση από το σημείο διάρρηξης. Μέχρι τώρα, δεν υπάρχουν γενικά κριτήρια για τον καθορισμό της κατάστασης που θα εμφανιστεί και κάθε κατάσταση θα πρέπει να εξεταζεται ξεχωριστά.

3.7. Παράδειγμα

Έστω δεξαμενή αποθήκευσης προπανίου με όγκο 10 m^3. Μέσα στη δεξαμενή αποθηκεύεται υγρό προπάνιο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η πίεση της

αέριας φάσης είναι γύρω στα 8 bar. Υποθέτουμε ότι δημιουργείται μία τρύπα κυκλικού σχήματος με διάμετρο 10 cm στην άερια φάση στο τοίχωμα της δεξαμενής και μέσα από την τρύπα πραγματοποιείται κάθετη εκροή.

Προτού να υπολογίσουμε την εκροή, θα πρέπει να διαπιστώσουμε εάν έχουμε υπερβεί τον κρίσιμο όρο πίεσης. Σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$\frac{p_r}{p_\alpha} = 8 > \left[\frac{\kappa - 1}{2}\right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1.73$$

Άρα πρόκειται για υπερκρίσιμη εκροή. Για την ποσότητα που εκρέει ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\dot{m} = C_D \frac{\pi}{4} d_0^2 \left\{ \kappa \left[\frac{2}{\kappa + 1}\right]^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \right\}^{\frac{1}{2}} \frac{P_r}{\sqrt{\frac{8314}{M_g} T_r}}$$

Υποθέτοντας C_D = 0.6, βρίσκουμε $\dot{m}_0 = 10.3 kgs^{-1}$.

Για την ταχύτητα στο άνοιγμα εκροής είναι:

$$u_0 = \frac{\dot{m}_0}{C_D \frac{\pi}{4} d_0^2 \rho_{g,0}}$$

$$\rho_{g,eq} = \rho_{\gamma,\rho} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{1-k}} = \rho_{g,r} 0.62 = 9.1 kgm^{-3}$$

Για την u_0 προκύπτει u_0=240ms^{-1}.

Ο αριθμός Reynolds είναι: $Re = \frac{\rho_{g,0} u_0 \sqrt{C_D} d_0}{\mu} = 2{,}1 \cdot 10^7 >> 2{,}5 \cdot 10^4$

Για το ιξώδες του προπανίου λαμβάνεται η τιμή 80*10^{-7} Pas.

Για την ισοδύναμη διάμετρο έχουμε:

$$d_{eq} = \sqrt{C_D} d_0 \sqrt{\frac{\rho'_{g,0}}{\rho_{0,eq}}} = \sqrt{C_D} d_0 \sqrt{\frac{\rho_{g,0}}{\rho_{0,eq}}}$$

Εάν για τον υπολογισμό της $\rho_{0,eq}$ επιλέχθεί η πυκνότητα του αερίου μετά την εκτόνωση στην ατμοσφαιρική πίεση θα είναι:

$$\frac{1}{\rho_{0,eq}} = \frac{1}{\rho_{g,r}} \left[\frac{p_r}{p_\alpha}\right]^{\frac{1}{k}} = \frac{1}{14.7} \cdot 6.30$$

$$\rho_{0,eq} = 2.33 \, {}^{kg}\!/_{m^3}$$

Η διάμετρος d_{eq} θα γίνει τότε 0,15 m.

Με βάση τα όσα υπολογίστηκαν, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση στον άξονα του jet και σε ένα σημείο τροχιάς (x,y) καθώς και τον όγκο του αερίου που εμπίπτει μέσα στα εκρηκτικά όρια.

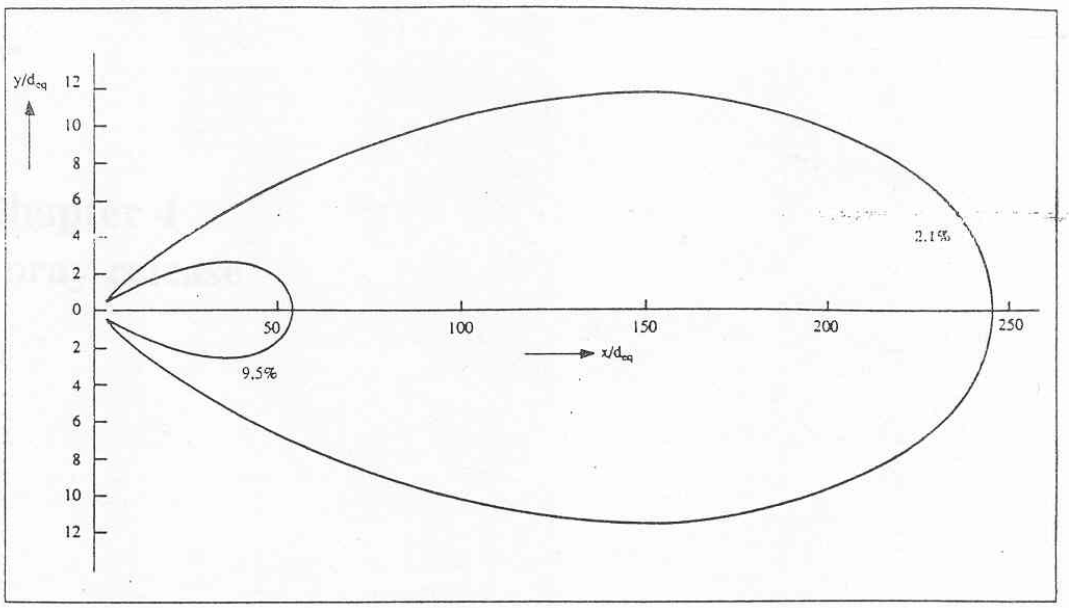
Για τη συγκέντρωση στον άξονα του jet έχουμε:

$$j_m = \frac{\dfrac{b_1 + b_2}{b_1}}{0.32 \dfrac{x}{d_{eq}} \dfrac{\rho'_{g,\alpha}}{\sqrt{\rho'_{0,eq}}} + 1 - \rho'_{g,\alpha}} = \frac{1.84}{0.36 \dfrac{x}{d_{eq}} \cdot 0.5}$$

Αντικαθιστώντας, το ανώτατο και το κατώτατο όριο έκρηξης για το προπάνιο είναι για x/d_{eq}=245 και 55 αντίστοιχα.

Το χαμηλότερο όριο έκρηξης επομένως εμφανίζεται γύρω στα 35m από το σημείο διάρρηξης. Για τη συγκέντρωση σε κάθετη επιφάνεια στον άξονα του jet έχουμε:

$$\frac{j_{x,y}}{j_m} = e^{-b_2\left(\frac{y}{x}\right)^2} = e^{-84.5\left[\frac{\frac{y}{d_{eq}}}{\frac{x}{d_{eq}}}\right]^2}$$



Σχήμα 15: Εκροή προπανίου (αέριας φάσης)

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις, μπορεί να εξαχθεί το προφίλ της συγκέντρωσης του προπανίου στο free jet. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στο *σχήμα 15*. Υπάρχουν δύο γραμμές ίσης συγκέντρωσης: το χαμηλό και το υψηλό όριο έκρηξης. Για τον όγκο του αερίου στην εκρηκτική περιοχή χρησιμοποιείται η σχέση (19). Αυτή δίνει όγκο αερίου γύρω στα 6.6m^3. Θεωρώντας μια μέση τιμή σύστασης 3.1%, αυτό αντιστοιχεί σε ολικό όγκο 215m^3.

Αυτή η μέση σύνθεση παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Συγκέντρωση	V_g αερίου (m^3)	V_g/V_{tot}
2,1-2,25%	0,86	0,130
2,25-2,50	1,11	0,168
2,50-2,75	0,83	0,125
2,75-3,0	0,64	0,096
3,0-3,5	0,90	0,136
3,5-4,0	0,59	0,089
4,0-4,5	0,41	0,062
4,5-5,0	0,30	0,045
5,0-6,0	0,40	0,060
6,0-7,0	0,25	0,037
7,0-8,0	0,16	0,025
8,0-9,5	0,16	0,024
	$V_{ολική}$=6,61m^3	

Η μέση τιμή της σύστασης προκύπτει από τη σχέση $\bar{j}_i = \frac{\sum_i V_i}{\sum_i \frac{V_i}{j_i}} = 3.1\%$

Σε αυτό το παράδειγμα δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση βαρύτητας. Εφόσον το προπάνιο είναι βαρύτερο από τον αέρα κι η εξεταζόμενη περίπτωση αναφέρεται σε ροή κάθετη προς τα πάνω, η επίδραση της βαρύτητας δεν είναι αγνοήσιμη. Αφού η διόρθωση για την επίδραση της βαρύτητας είναι εκτός του σκοπού αυτής της εργασίας, μόνο το ύψος x_c μπορεί να υπολογιστεί.

Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$x_c = \frac{\varepsilon Fr^{\frac{1}{2}} 2\dot{m}_0}{\left(\pi \rho_{0,eq} I_0\right)^2}$$

Εδώ και πάλι η πυκνότητα $\rho_{0,eq}$ αναφέρεται στην πυκνότητα του αερίου μετά την εκτόνωση σε πίεση μίας ατμόσφαιρας.

$$\varepsilon = 1.7\left[\frac{\rho_{0,eq}}{\rho_\alpha}\right]^{\frac{1}{4}} = 1.97$$

$$Fr = \frac{u_0^2}{\left(1 - \frac{\rho_\alpha}{\rho_{0,eq}}\right) g d_{eq}} = 8.8 \cdot 10^4$$

$$I_0 = \dot{m}_0 u_0 = 2472N$$

Άρα το ύψος του σύννεφου θα είναι γύρω στα 90m.

Το κατώτερο εκρηκτικό όριο για το προπάνιο έχει ήδη επιτευχθεί σε απόσταση 35 m από το άνοιγμα εκροής, οπότε είναι $x_c/x_t \geq 1.5$.

Το σύννεφο δεν είναι εκρηκτικό. Η επίλυση του παραδείγματος βασίζεται στο ότι η εκροή πραγματοποιείται με ήπιες καιρικές συνθήκες. Εάν υπάρχει άνεμος, η χρηστικότητα της μεθόδου υπολογισμού καθορίζεται από την ταχύτητα της εκροής και το λόγο u_t/u_w (βλέπε *εισαγωγή*).

Σύμβολα

b_1	σταθερά για την κατανομή της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στον άξονα του jet	{_}
b_2	σταθερά για την κατανομή της συγκέντρωσης σε επίπεδο κάθετο στον άξονα του jet	{_}
b_3	σχέση ανάμεσα στην απόσταση του άξονα του jet και της απόστασης της φαινομενικής πηγής	{_}
c'_g	σχέση ανάμεσα στην ειδική θερμοχωρήτικότητα του αερίου και του περιβάλλοντα αέρα	{_}
C_D	συντελεστής που αναφέρεται στη μορφή του κοψίματος της διατομής	{_}
$c_{p.a}$	ειδική θερμότητα του αέρα	{J/kg K}
$c_{p.g}$	ειδική θερμότητα του αερίου	{J/kg K}
d_{eq}	ισοδύναμη διάμετρος	{m}
d_0	διάμετρος του ανοίγματος εκροής	{m}
Fr	αριθμός Froude	{_}
g	επιτάχυνση της βαρύτητας	{m/s^2}
I_0	ορμή της ροής μέσα από το άνοιγμα εκροής	{N}
j_m	κλάσμα όγκου του αερίου στον άξονα του jet	{_}
j_t	κλάσμα όγκου στο άκρο	{_}
j_0	κλάσμα όγκου στο σημείο διάρρηξης	{_}
j_{xy}	κλάσμα όγκου στο σημείο (x,y)	{_}
$\dot{m}$	ρυθμός ροής μάζας	{kg/s}
M_α	μοριακό βάρος αέρα	{kg/kmol}
M_g	μοριακό βάρος αερίου	{kg/kmol}
M'_g	σχετικό μοριακό βάρος του αερίου ως προς τον αέρα της ατμόσφαιρας	{_}
M_{mix}	μοριακό βάρος μίγματος	{kg/kmol}
m_0	ρυθμός ροής μάζας στο σημείο διάρρηξης	{kg/sec}
p_a	ατμοσφαιρική πίεση	{Pa}
p_r	πίεση στη δεξαμενή αποθήκευσης	{Pa=N/m^2}
p_0	Πίεση αερίου στο τέλος του σημείου διάρρηξης	{Pa}
Re	αριθμός Reynolds	{_}
T_α	θερμοκρασία αέρα	{K}
T_{mix}	θερμοκρασία μίγματος	{K}
T_r	θερμοκρασία στη δεξαμενή αποθήκευσης	{K}
T_0	θερμοκρασία στο σημείο διάρρηξης μετά την εκτόνωση	{K}

u_m	ταχύτητα στον άξονα του jet	{m/s)
u_t	ταχύτητα στο άκρο	{m/s)
u_0	ταχύτητα εκροής στο σημείο διάρρηξης	{m/s)
u_w	ταχύτητα του αέρα	{m/s)
$u_{x,y}$	ταχύτητα στην αξόνική διεύθυνση στο σημείο (x,y) του jet	{m/s)
V_g	όγκος του αερίου	{m^3}
x	απόσταση κατά μήκος του άξονα του jet προς το άνοιγμα διάρρηξης	{m}
x'	αρχή του jet (φαινομενικά)	{m}
x''	x+x'	{m}
x_c	Απόσταση σύννεφου κατά μήκος του jet	{m}
x_{LEL}	απόσταση κατά μήκος του άξονα του jet από το σημείο διαρροής έως το σημείο όπου η συγκέντρωση γίνεται ίση με το κατώτερο εκρηκτικό όριο	{m}
x_t	απόσταση άκρου	{m}
y	απόσταση κάθετη στον άξονα του jet	{m}

Ελληνικά σύμβολα

ε	σταθερά, ορίζεται από τη σχέση (25)	{_}
κ	σταθερά του Poisson	{_}
μ	δυναμικό ιξώδες του αερίου μετά το σημείο διάρρηξης	{Pa s}
ρ_α	πυκνότητα περιβάλλοντος αέρα	{kg/m^3}
$\rho_{a(x,y)}$	πυκνότητα περιβάλλοντος αέρα στο σημείο (x,y) του jet	{kg/m^3}
$\rho'_{g,a}$	σχετική πυκνότητα του αερίου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες ως προς την πυκνότητα του αέρα	{_}
$\rho_{g,a}$	πυκνότητα του αερίου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες	{kg/m^3}
$\rho_{g,r}$	πυκνότητα του αερίου στη δεξαμενή	{kg/m^3}
$\rho'_{g,0}$	σχετική πυκνότητα του αερίου στο άνοιγμα εκροής ως προς την πυκνότητα του αέρα	{_}
$\rho_{g,0}$	πυκνότητα του αερίου στο άνοιγμα εκροής	{kg/m^3}
$\rho_{g(x,y)}$	σχετική πυκνότητα του αερίου στο σημείο (x,y) ως προς την πυκνότητα του αέρα	{_}
$\rho_{g(x,y)}$	πυκνότητα του αερίου στο σημείο (x,y)	{kg/m^3}
$\rho_{mix(x,y)}$	πυκνότητα του μείγματος αερίου/αέρα στο σημείο (x,y) του jet	{kg/m^3}
$\rho_{0,eq}$	ισοδύναμη πυκνότητα του αερίου στο άνοιγμα εκροής	{kg/m^3}

4. Εξάτμιση

4.1. Εξάτμιση ύστερα από απελευθέρωση πεπιεμένου υγροποιημένου αερίου

Τα υγροποιημένα αέρια πρακτικά αποθηκεύονται ή μεταφέρονται υπό συνθήκες υψηλής πίεσης. Για τον υπολογισμό της εξάτμισης ενός τέτοιου υγρού, στην περίπτωση που έχει απελευθερωθεί, είναι απαραίτητο να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ της εξάτμισης που οφείλεται στην πτώση της πίεσης και της εξάτμισης που είναι αποτέλεσμα της παροχής θερμότητας από το περιβάλλον.

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθεί η εξάτμιση που οφείλεται στην πτώση της πίεσης, ενώ στις επόμενες δύο παραγράφους θα αναλυθεί η εξάτμιση που προκαλείται από την παροχή θερμότητας από το περιβάλλον (όπως από το νερό ή το έδαφος).

4.2. Αρχική εξάτμιση από απελευθέρωση υγροποιημένου αερίου

Οποτεδήποτε το σημείο βρασμού ενός υγροποιημένου αερίου που βρίσκεται υπό πίεση είναι χαμηλότερο από τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, το υγρό υπερθερμαίνεται. Η πίεση κατά την αποθήκευσή του είναι ίση με την πίεση ισορροπίας αντιστοιχεί στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.

Υποθέτουμε ότι το υγροποιημένο αέριο που έχει αποθηκευτεί υπό πίεση απελευθερώνεται εξαιτίας κάποιας συγκεκριμένης κατάστασης. Αναμένεται ότι η πίεση ισορροπίας θα πέσει γρήγορα μέχρι να εξισωθεί με την πίεση της ατμόσφαιρας. Αυτό σημαίνει ότι η εκτόνωση του υγρού που λαμβάνει χώρα μπορεί να θεωρηθεί ως αδιαβατική. Εξαιτίας της πτώσης της πίεσης ένα ποσοστό του υγρού θα εξατμισθεί. Η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση δίνεται από το ίδιο υγρό.

Αυτού του είδους η εξάτμιση ονομάζεται αρχική εξάτμιση (flash-evaporation) του υγροποιημένου αερίου που έχει απελευθερωθεί. Το αρχικό ποσό εξάτμισης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$h_v \cdot dW_{vl} = c_{vl} \cdot W_{vl} \cdot dT \qquad (1)$$

όπου τα μεγέθη h_v και c_{vl} λαμβάνονται ως σταθερά.

Η σχέση αυτή δεν ισχύει για θερμοκρασίες που πλησιάζουν την κρίσιμη θερμοκρασία. Στις περισσότερες περιπτώσεις, παρόλα αυτά η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι κατά πολύ μικρότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία των περισσότερων υγροποιημένων αερίων που εξετάζονται.

Από τη σχέση (1) παίρνουμε τελικά τη σχέση που μας δίνει το αρχικό ποσό εξάτμισης:

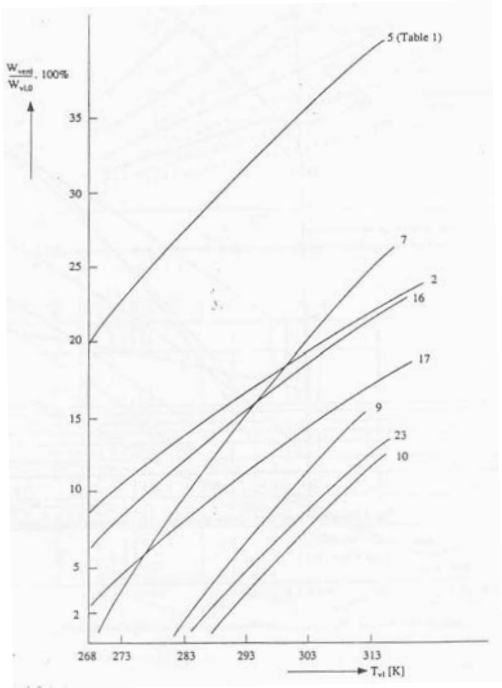
$$W_{verd} = W_{vl,0} \exp\left[\frac{c_{vl}}{h_v}\left(T_k - T_{vl}\right)\right] \tag{2}$$

όπου:

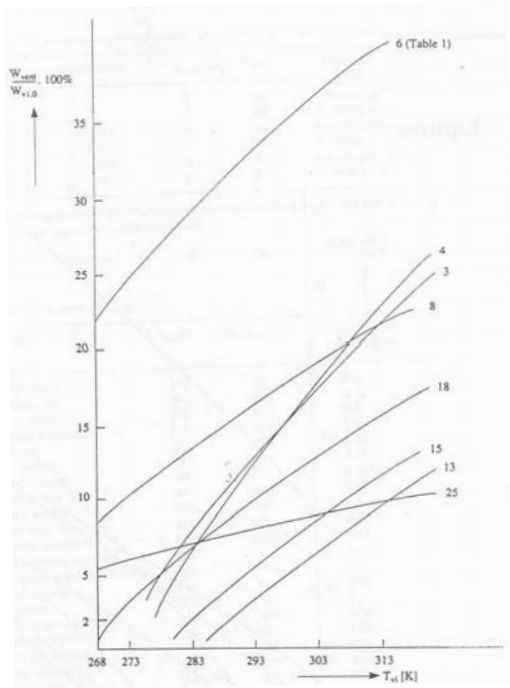
T_b = θερμοκρασία βρασμού

T_{vl} = θερμοκρασία αποθήκευσης

W_{verd} = αρχικά εξατμιζόμενη ποσότητα του υγροποιημένου αερίου



Σχήμα 16: Υπολογιζόμενη αρχική εξάτμιση κατά την αδιαβατική εκτόνωση



Σχήμα 17: Υπολογιζόμενη αρχική εξάτμιση κατά την αδιαβατική εκτόνωση υγροποιημένων αερίων

Στα *σχήματα 16* και *17* η σχετική αρχική εξάτμιση των υγροποιημένων αερίων του *πίνακα 4-1* δίνεται συναρτήσει των θερμοκρασιών των αποθηκευμένων υγρών.

Μετά από την εκτόνωση του απελευθερώμενου συμπιεσμένου υγροποιημένου αερίου η θερμοκρασία του υγρού γίνεται ίση με τη θερμοκρασία βρασμού. Η εξάτμιση αυτού του τύπου αερίων είναι επομένως όμοια με αυτή αερίων που υγροποιούνται μέσω της ψύξης.

Πίνακας 4-1: Τα πιο γνωστά αέρια που βρίσκονται υπό πίεση ή ψύξη σε υγρή φάση

Name	T_k[K]	c_{vl} [x10^3 J/kg K] (at T Kelvin)	h_v [x10^5 J/kg] (at boiling temperature)
1 - Acetaldehyde	293	1.383 (300)	5.7
2 - Ammonia	240	4.609 (270)	13.7
3 - Butadiene	269	2.347 (300)	4.2
4 - Butane	273	2.514 (300)	3.9
5 - Propane	231	2.640 (260)	4.3
6 - Propylene	226	2.560 (260)	4.4
7 - Butylene (x -)	267	2.410 (285)	3.9
8 - Chlorine	239	0.950 (295)	2.9
9 - Dymethylamine	280	3.100 (295)	5.9
10 - Ethylchloride	285	1.760 (295)	3.8
11 - Ethane	184	2.490 (203)	4.9
12 - Ethylene	170	2.790 (194)	4.9
13 - Ethylene - oxide	284	1.990 (295)	5.8
14 - Methane	112	3.770 (139)	5.1
15 - Methylbromide	277	0.838 (295)	2.5
16 - Methylchloride	249	1.580 (268)	4.2
17 - Vinylchloride	259	1.300 (283)	3.7
18 - Sulphur dioxide	263	1.373 (283)	4.0
19 - Hydrochromic acid	204	0.490 (293)	2.1
20 - Hydrochloric acid	188	0.800 (293)	4.3
21 - Hydrofluoric acid	293	3.017 (290)	3.4
22 - Formaldehyde	253	3.352 (293)	7.8
23 - Phosgene	281	1.048 —	2.5
24 - Carbon monoxide	83	1.420 (115)	2.2
25 - Hydrogen sulphide	213	0.545 —	5.4
26 - Acetylene	189	2.690 (233)	6.3

4.3. Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου στο έδαφος

Για τον υπολογισμό της εξάτμισης υγροποιημένου αερίου κατά την απελευθέρωσή του στο έδαφος, θα πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ διαπερατού και μη διαπερατού υπεδάφους.

Στην πραγματικότητα πολύ συχνά δεν υπάρχουν φράγματα γύρω από τις δεξαμενές αποθήκευσης αερίων που βρίσκονται σε υγροποιημένη μορφή λόγω συμπίεσης. Αυτό σημαίνει ότι για τον καθορισμό του ποσού της εξάτμισης των συμπυκνωμένων αερίων που έχουν απελευθερωθεί, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διασπορά του υποεξέταση υγρού.

Εφόσον υπολογιστεί το ποσό του εξατμιζόμενου αέρα ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας, στη συνέχεια υπολογίζεται το ποσό της εξάτμισης της λίμνης που έχει σχηματιστεί.

Στη συνέχεια και τα δύο αυτά τα θέματα θα εξετασθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

4.3.1 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου σε μη διαπερατό έδαφος

Όταν σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ένα υγροποιημένο αέριο έρχεται σε επαφή με το έδαφος, λαμβάνει χώρα άμεση μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ψυχρού υγρού και του σχετικά θερμού εδάφους. Η μονοδιάστατη ροή θερμότητας καθορίζεται μέσω της εξίσωσης Fourier για την ψύξη ημι-απείρου στερεού. Το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας δίνεται από τη σχέση·

$$q_s = \frac{\lambda_s \left(T_s - T_k\right)}{\left(\pi \alpha_s t\right)^{1/2}} = e h_v t^{-1/2} \qquad (3)$$

από την οποία τελικά υπολογίζουμε το ποσό ροής μάζας που εξατμίζεται λόγω της ανταλλαγής θερμότητας με το έδαφος ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Έτσι έχουμε τη σχέση:

$$\dot{m}''_s = e t^{-1/2} \qquad (4)$$

όπου $$e = \frac{\lambda_s \left(T_s - T_k\right)}{h_v \left(\pi \alpha_s\right)^{1/2}} \qquad (5)$$

Εάν η απαιτούμενη θερμότητα για την εξάτμιση ενός υγροποιημένου αερίου υπό ψύξη θεωρηθεί ίση με τη ροή θερμότητας από το έδαφος το οποίο βρίσκεται σε επαφή με αυτό, ο ρυθμός εξάτμισης σε μη διαπερατό έδαφος μπορεί να υπολογιστεί από την (3). Οι σταθερές των υλικών που απαιτούνται παρέχονται στον *πίνακα 4-2*. Πολύ σημαντική είναι η επιλογή της θερμοκρασίας εδάφους T_s, καθώς μπορεί να προκαλέσσει σημαντικές μεταβολές που οφείλονται στα επίπεδα της ακτινοβολίας που εισέρχεται ή εκπέμπεται.

Πίνακας 4-1: Σταθερές διαφόρων στερεών υλικών

Έδαφος	λ_s[W/m K]	a_s[m^2/sec] x 10^{-7}
Μέσο έδαφος (8% νερό)	0,9	4,3
Άμμος (ξηρό	0,3	2,3
Αμμώδες (ξηρό)	0,3	2
Άσφαλτος (8% νερό)	0,6	3,3
Ξύλο	0,2	4,5
Αμμοχάλικο	2,5	11
Ανθρακούχος χάλυβας	45	127

Στη σχέση (3) δεν έχει ληφθεί υπόψη η ηλιακή ακτινοβολία. Μία μέση τιμή για την ηλιακή ακτινοβολία είναι γύρω στα 400 w/m^2. Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην εξάτμιση των περισσότερων υγροποιημένων αερίων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Από τη σχέση (3) παρατηρούμε ότι η ροή θερμότητας για την εξάτμιση του υγρού μειώνεται έντονα με το χρόνο.

4.3.2 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου σε διαπερατό έδαφος

Κατά τον υπολογισμό της εξάτμισης υγροποιημένου αερίου σε διαπερατό πορώδες έδαφος θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την επίδραση που έχει η διείσδυση του υγρού στο έδαφος, όσο και η ψύξη του υγρού λόγω επαφής με το νερό που ίσως υπάρχει στα τριχοειδή.

Με βάση αυτές τις υποθέσεις έχουμε δύο περιπτώσεις που πρέπει να μελετήσουμε:

- Στεγνό υπέδαφος (ποσοστό υγρασίας περίπου μηδενικό, x_w=0)

- Υγρό υπέδαφος (το ποσοστό υγρασίας στο υπέδαφος είναι μεγαλύτερο από 8%)
- Χαλίκι

4.3.2.1 Εξάτμιση σε στεγνό υπέδαφος

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάτμισης του υγρού που έρχεται σε επαφή (απελευθερώνεται) σε στεγνό, πορώδες υπέδαφος, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\dot{m}''_s = et^{-1/2}$$

όπου ο συντελεστής e δίνεται από τη σχέση:

$$e = \frac{8\lambda_s (T_s - T_k)}{h_v (\pi\alpha_s)^{1/2}}$$

Υπάρχουν πολύ λίγα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση αυτή. Το βασικότερο πείραμα που έχει γίνει είναι η εξάτμιση LNG σε στεγνή άμμο.

4.3.2.2 Εξάτμιση σε υγρό υπέδαφος

Πειράματα έχουν δείξει ότι όταν έχουμε παρουσία υγρασίας στο υπέδαφος μεγαλύτερη από 8%, τότε το νερό στο υπέδαφος παγώνει. Έτσι το ατμοποιημένο νερό δεν μπορεί να διαπεράσει τα τριχοειδή.

Για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας από το υπέδαφος ισχύει η σχέση:

$$q_s = \frac{CR\lambda_s (T_s - T_k)}{(\pi\alpha_s t)^{1/2}} \qquad (6)$$

Και, κατά αντιστοιχία με το ρυθμό εξάτμισης, δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}''_s = et^{-1/2}$$

όπου $e = \frac{CR\lambda_s (T_s - T_k)}{h_v (\pi\alpha_s)^{1/2}}$

Στην περίπτωση αυτή οι σταθερές λ_s και CR δεν έχουν σταθερή τιμή που δίνεται από πίνακες (όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις) αλλά υπολογίζονται με τη βοήθεια των παρακάτω σχέσεων:

$$CR = 1 + 1.4x_w - 3x_w^2$$

$$\lambda_s = \left(\beta_1^{10} \log x_w + \beta_2\right) 10^{\beta_3}$$

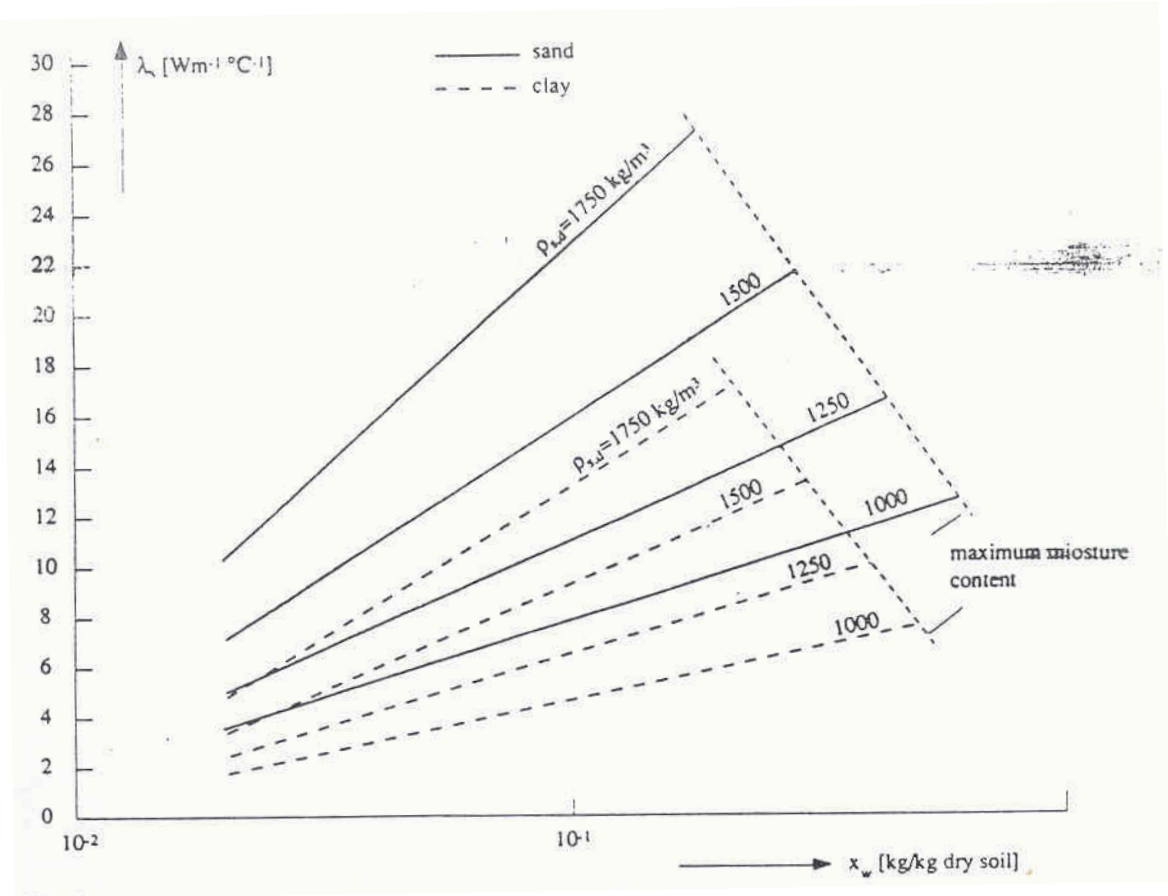
όπου: β_1=0.14-0.05j_k

β_2=0.33-0.12j_k

$\beta_3=6\ 10^{-4}\rho_{s,d}$

Ο διορθωτικός όρος CR στη σχέση (6) αναφέρεται στην επίδραση του νερού που έχει παγώσει στο υπέδαφος και αποτελεί εμπειρική σχέση που εφαρμόζεται για το LNG. Η επίδραση της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων λαμβάνεται υπόψη χωρίζοντας το υπέδαφος σε άμμο (με διάμετρο από 0,02 mm έως 2 mm) και χώμα (διάμετρος <0,002 mm), ενώ σωματίδια μεγαλύτερα από 2 mm δεν λαμβάνονται υπόψη.

Για το μέγεθος j_k, που εκφράζει την ποσότητα του χώματος στο έδαφος,

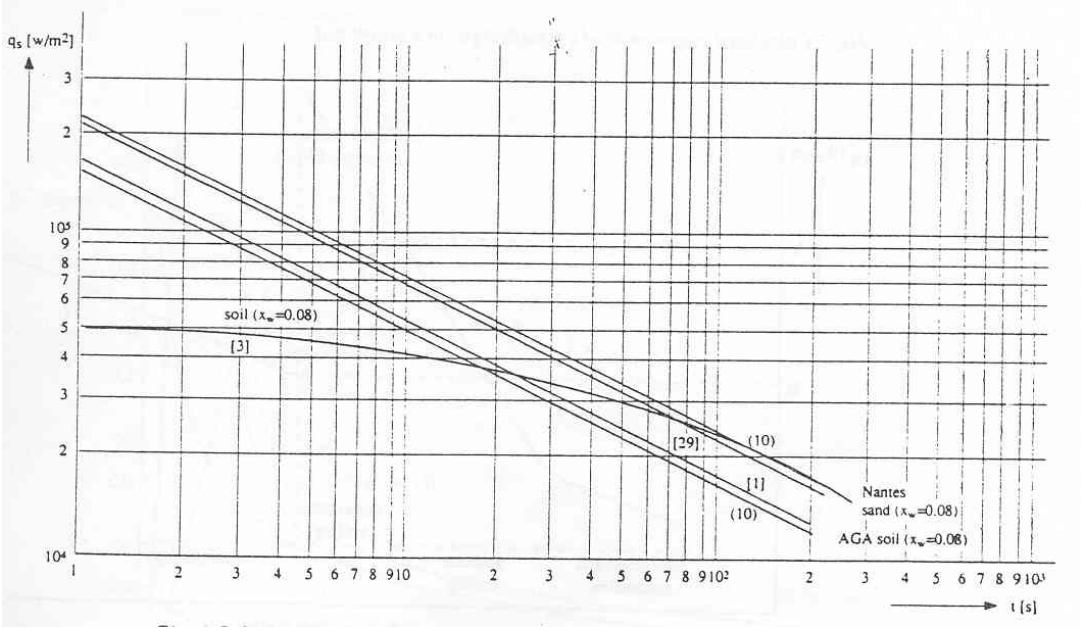


Σχήμα 18: Επίδραση του νερού στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε εδάφη με άμμο και χώμα

υπάρχουν δύο τυπικές τιμές. Έτσι για άμμο έχουμε j_k =0 ενώ για χώμα έχουμε j_k =1. Στο *σχήμα 18* παρουσιάζεται ο συντελεστής αγωγής για την άμμο και το χώμα συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας.

Τέλος, στο *σχήμα 19*, δίνονται πειραματικά προδιορισμένες τιμές ροής θερμότητας εξατμιζόμενου LNG. Γίνεται συσχέτιση εξατμιζόμενου LNG σε άμμο της Nantes (x_w = 28%) κι σε έδαφος AGA (υγρασία 8%). Με τη βοήθεια

της (6) υπολογίζεται η ροή θερμότητας, όπου για τις αντίστοιχες πυκνότητες άμμου κι εδάφους επιλέχθηκε η τιμή 1500 kg/m^3. Τα αποτελέσματα δείχνουν



Σχήμα 19: Υπολογιζόμενη και πειραματικά καθοριζόμενη εξάτμιση LNG σε διαπερατό μέσο

καλή συμφωνία μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Το παράδειγμα δείχνει ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί όντως να αγνοηθεί, όπως γίνεται πρακτικά.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάτμισης από την (6) σε μεγάλες χρονικές περιόδους θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συνεισφορά της διάχυσης του ατμού είναι επίσης σημαντική.

4.3.2.3 Εξάτμιση σε αμμοχάλικο

Στην περίπτωση της πιο χαλαρής διαστρωμάτωσης που είναι δυνατόν να υπάρξει, ο αριθμός των χαλικιών σε ένα επίπεδο ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$n' = \frac{\delta_{gr}}{8r_{st}^3} = 0.13\frac{\delta_{gr}}{r_{st}^3} \qquad (7)$$

Ο αριθμός αυτός των χαλικιών μπορεί να συγκριθεί με το πλήθος χαλικιών που βρίσκονται σε ένα κύβο και είναι ίσο με $n' = 0.17\frac{\delta_{gr}}{r_{st}^3}$.

Η επιφάνεια των χαλικιών σε αυτό το στρώμα ανά μονάδα επιφάνειας του υπεδάφους είναι ίση με:

$$A_{st} = n'4\pi r_{st}^2 = 1.57\frac{\delta_{gr}}{r_{st}} \qquad (8)$$

Εάν τα χαλίκια θεωρηθούν ημιάπειρα υλικά με εμβαδόν επιφανείας $n'4\pi r_{st}^2$ τότε, όπως και στην (3), όταν διαβραχεί ολόκληρο το επίπεδο, ο ρυθμός εξάτμισης ανά μονάδα επιφανείας θα είναι:

$$\dot{m}''_{gr} = \frac{4\pi r_{st}^2 + n'\lambda_{gr}\left(T_s - T_k\right)}{h_v\left(\pi\alpha_s t\right)^{1/2}} \tag{9}$$

Με αντικατάσταση του n' (σχέση (7)) στη σχέση (9) καταλήγουμε στην τελική σχέση που μας δίνει το ρυθμό εξάτμισης και η οποία είναι:

$$\dot{m}''_{gr} = \frac{0.89\delta_{gr}\lambda_{gr}\left(T_s - T_k\right)}{r_{st}h_v\left(\alpha_s t\right)^{1/2}} \tag{10}$$

Το ολικό ποσό της θερμότητας που παρέχεται από n' χαλίκια με βάση την (9) δίνεται από τη σχέση:

$$Q'_{st} = n'\frac{4}{3}\pi r_{st}^3\rho_s c_s\left(T_s - T_k\right) = 0.52\delta_{gr}\rho_s C_s\left(T_s - T_k\right) \tag{11}$$

Από τις σχέσεις (9) και (11) μπορούμε να δούμε ότι σε χρόνο $t = 0.085\frac{r_{st}^2}{\alpha_s}$ το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται είναι ίσο με το 100% του ολικού θερμικού περιεχομένου n' χαλικιών.

4.3.3 Εξάτμιση λόγω διασποράς στο έδαφος

Στην περίπτωση που δεν παρέχονται φράγματα (φυσικά ή τεχνητά) γύρω από τη δεξαμενή αποθήκευσης του υγρού, στην εξάτμιση του υγροποιημένου αερίου το οποίο έχει απελευθερωθεί, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κι η διασπορά του περιεχόμενου υγρού.

Η εξάτμιση σε συνάρτηση με το χρόνο, υπολογίζεται αφού έχει ήδη υπολογιστεί το ποσό της διασποράς.

Για τον υπολογισμό της διασποράς πρέπει να γίνουν οι ακόλουθες υποθέσεις:

Η διασπορά λαμβάνει χώρα ομοκεντρικά γύρω από το σημείο απελευθέρωσης σε μη διαπερατό οριζόντιο έδαφος. Επιπλέον η στοιχειώδης λίμνη που σχηματίζεται θεωρείται στοιχειώδες τμήμα (φέτα) κυλίνδρου.

Εξαιτίας της τραχύτητας του εδάφους (λόγω τριβής δηλαδή) η διασπορά του υγρού θα σταματήσει όταν η λίμνη που σχηματίζεται φτάσει σε ένα συγκεκριμένο πάχος. Η τιμή αυτή του ελάχιστου πάχους της λίμνης, εξαρτάται από το είδος του εδάφους.

Η δύναμη που απαιτείται για τη διασπορά σχηματίζεται λόγω της διαφοράς

της υδροστατικής πίεσης μεταξύ του υγρού και του περιβάλλοντος.

Ένα σημαντικό σημείο στη διαδικασία της εξάτμισης είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης του υπό ψύξη υγροποιημένου αερίου: στιγμιαίος ή συνεχής. Οι δύο αυτοί τύποι της ροής θα μελετηθούν με περισσότερες λεπτομέρειες στις παραγράφους που ακολουθούν.

4.3.3.1 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώθηκε στιγμιαία

Η διασπορά ενός υγροποιημένου αερίου που προέρχεται από στιγμιαία απελευθέρωση, σε οριζόντιο μη διαπερατό έδαφος μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

$$\frac{dr_{pool}}{dt} = \left[C''g\left(\delta_{vl,0} - \delta_{vl}\right)\right]^{1/2} \tag{12}$$

Η σχέση (12) έχει βασιστεί στην αρχή διατήρησης της ενέργειας (κινητικής και δυναμικής). Υποθέτουμε ότι η λίμνη που υφίσταται τη διασπορά δεν συναντά κανένα αξιοσημείωτο εμπόδιο στο έδαφος κατά τη διάρκεια της διασποράς.

Ο εμπειρικός συντελεστής C" εισέρχεται εξαιτίας του γεγονότος ότι η ταχύτητα του μετώπου διασποράς της λίμνης δεν αφορά το σύνολο του υγρού. Η πειραματική τιμή του συντελεστή C", έχει βρεθεί ίση με 1,08, γεγονός που συμφωνεί με τη θεωρία.

Ο όγκος της λίμνης διασποράς προσεγγιστικά δίνεται από τη σχέση:

$$V_{vl(t)} = V_{vl,0} = \pi r_{pool}^2 \cdot \delta_{vl} \tag{13}$$

στην οποία η διαδικασία της εξάτμισης δεν έχει ληφθεί υπόψη.

Εξαλείφοντας το μέγεθος δ_{vl} από τις σχέσεις (12), (13) προκύπτει η σχέση:

$$r_{pool}^2 = \left(C''g\delta_{vl,0}\right)t^2 + r_{pool,0}^2 \tag{14}$$

Παρατηρούμε ότι η διασπορά της λίμνης παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση με τον χρόνο. Η εξάρτηση αυτή έχει επιβεβαιωθεί κι απο πειράματα μικρής κλίμακας.

Το εξατμιζόμενο ποσό του υγροποιημένου αερίου σε χρόνο t μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$m_{vl} = \int_0^t \dot{m}\pi r_{pool}^2 d\tau \tag{15}$$

Από την (15) τελικά βρίσκουμε ότι το ποσό που εξατμίζεται είναι ίσο με:

$$m_{vl} = \frac{16}{15} e\pi C''g\delta_{vl,0} t^{5/2} + 2e\pi r_{pool,0}^2 t^{1/2} \tag{16}$$

ενώ για το ποσό εξάτμισης λόγω διασποράς της λίμνης ισχύει η σχέση:

$$\dot{m}'_{pool} = \frac{8}{3} e\pi C'' g\delta_{vl,0} t^{3/2} + 2e\pi r_{pool,0}^2 t^{-1/2} \tag{17}$$

Η λίμνη θα συνεχίζει να διαστέλλεται (η διασπορά θα συνεχίζεται) έως ότου να φτάσει το ελάχιστο όριο πάχους.

Ο χρόνος που απαιτείται για αυτό συμβολίζεται με t_e, και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το ισοζύγιο μάζας.

$m_{vl}(t_e) + \rho_{vl}\pi r_{pool}^2 \delta_{vl,min} = \rho_{vl} V_{vl,0}$ ή τελικά:

$$C''\pi g\delta_{vl,0}\delta_{vl,min} t_e^2 + \frac{16}{15}\frac{C''\pi eg}{\rho_{vl}}\delta_{vl,0} t_e^{5/2} + \frac{2e}{\rho_{vl}}\pi r_{pool,0}^2 t_e^{1/2} = V_{Vl,0} - \pi r_{pool,0}^2 \delta_{vl,min} \tag{18}$$

Ο χρόνος t_e υπολογίζεται από τη σχέση (18). Η σχέση αυτή αποτελεί ένα πολυώνυμο, με πολλές ρίζες, εκ των οποίων η μικρότερη θετική αποτελεί την κατάλληλη τιμή για το t_e.

Θεωρούμε ότι από τη στιγμή που η λίμνη φτάσει το ελάχιστο όριο πάχους, το πάχος θα παραμένει σταθερό. Αυτό σημαίνει ότι μετά το χρόνο t_e η λίμνη θα αρχίσει να συρρικνώνεται.

Η ακτίνα της λίμνης που συρρικνώνεται μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση, που στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας:

$$\frac{d}{dt}\left(\pi r_{pool}^2 \delta_{vl,min}\right) = -\frac{\dot{m}'_{pool}}{\rho_{vl}} \tag{19}$$

Για την εξάτμιση που έχουμε από τη λίμνη που συρρικνώνεται έχουμε:

$\dot{m}'_{pool} = e^* \pi r_{pool}^2 t^{-1/2}$, για $t \geq t_e$ (20)

Με αντικατάσταση της (20) στην (19) καταλήγουμε στη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d}{dt}\left(\pi r_{pool}^2 \delta_{vl,min}\right) = -\frac{e^* \pi r_{pool}^2}{\rho_{vl} t^{1/2}} \tag{21}$$

Από τις αρχικές συνθήκες έχουμε $r_{pool}(t=te)=r_{pool,e}$.

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης που έχουμε στη σχέση (21) μας δίνει τελικά την ακτίνα της λίμνης:

$$r_{pool}^2 = r_{pool,e}^2 \exp\left[-\frac{2e^*}{\rho_{vl}\delta_{vl,min}}\left(t^{1/2} - t_e^{1/2}\right)\right] \tag{22}$$

Τέλος το ποσό της εξάτμισης από τη λίμνη δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}'_{pool} = e^* t^{-1/2} r_{pool,e}^2 \exp\left[-\frac{2e^*}{\rho_{vl}\delta_{vl,min}}\left(t^{1/2} - t_e^{1/2}\right)\right] \quad (23)$$

Οι σχέσεις (22) και (23) ισχύουν για χρόνο $t \geq t_e$.

Σαν συνέπεια της διασποράς, η εξάτμιση από τη λίμνη αυξάνεται σε συνάρτηση με το χρόνο, εφόσον:

Η επιφάνεια της λίμνης αυξάνεται

Το υγρό έρχεται σταδιακά σε επαφή με το έδαφος το οποίο δεν έχει ακόμα ψυχθεί.

Η εξάτμιση από τη λίμνη φτάνει μια μέγιστη τιμή. Στη συνέχεια, και αφού η διασπορά της λίμνης έχει φτάσει στο ελάχιστο πάχος, η εξάτμιση του υγρού συνεχίζεται από τη λίμνη που συρρικνώνεται. Σαν συνέπεια της ψύξης του εδάφους και της συρρίκνωσης της λίμνης, ο ρυθμός της εξάτμισης από τη λίμνη μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

Τελικά το ποσό που εξατμίζεται σε δεδομένο χρόνο t δίνεται από τη σχέση:

$$m_{vl} = \pi r_{pool,e}^2 \rho_{vl}\delta_{vl,min}\left[1 - \exp\left\{-\frac{2e^*}{\rho_{vl}\delta_{vl,min}}\left(t^{1/2} - t_e^{1/2}\right)\right\}\right] \quad (24)$$

Από τη σχέση (24) παρατηρούμε ότι το υγρό έχει εξατμιστεί ολικά σε χρόνο $t = \infty$, Είναι πολύ χρήσιμο να καθοριστεί ο χρόνος στον οποίο θα έχει εξατμιστεί το 95% της ποσότητας του υγρού που υπήρχε σε χρόνο t_e. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται ίσος με

$$t = \left(\frac{3\rho_{vl}\delta_{vl,min}}{2e^*} + t_e^{1/2}\right)^2 \quad (25)$$

Στην εξαγωγή της (25) έχει ληφθεί υπόψη μοναχά η εξάτμιση που οφείλεται στην απορροφούμενη από το έδαφος θερμότητα, αν και σε δεδομένη χρονική στιγμή η συνεισφορά της διασποράς στην ολική εξάτμιση μπορεί να είναι σημαντική. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν στοιχεία στη βιβλιογραφία που να επιτρέπουν τη συσχέτιση της τραχύτητας του εδάφους (για την οποία έχουμε συγκεκριμένες τιμές για διάφορα είδη εδάφους) με το ελάχιστο όριο πάχους ($\delta_{vl,min}$). Για αυτό το λόγο, για πολύ λείες επιφάνειες προτείνεται $\delta_{vl,min}$ = 5mm.

Η τιμή αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι και μερικά εκατοστά (cm) για λιγότερο

λείες κι επίπεδες επιφάνειες.

4.3.3.2 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώθηκε με συνεχή τρόπο

Για τον υπολογισμό της διασποράς ενός υγροποιημένου αερίου που προέρχεται από μια συνεχή απελευθέρωση σε οριζόντιο και μη διαπερατό έδαφος, χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση:

$$r_{pool}^2 \cdot \frac{dr_{pool}^2}{dt} = \frac{2}{\pi} gC''V_i t^2 \quad , \text{για } t \le t_s \tag{26}$$

Η σχέση αυτή προκύπτει από την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ορμής, απλοποιημένη στους δύο βασικούς όρους της, δηλαδή την μεταβολή της μάζας και τη διαφορά της υδροστατικής πίεσης ανάμεσα στο υγρό και την περιβάλλουσα περιοχή. Όπως και στην περίπτωση της στιγμιαίας απελευθέρωσης, ο συντελεστής C'' λαμβάνει την προτεινόμενη τιμή C'' =1,08. Επιπλέον θεωρούμε ότι η ροή του υγρού V_i είναι σταθερή καθόλη τη διάρκεια της ροής (για όλο το χρόνο t_s), το οποίο ισχύει σύμφωνα με την κλασική διαδικασία υπολογισμού, η οποία βασίζεται στην ισορροπία ανάμεσα στη βαρυτική δύναμη και τη δύναμη αδρανείας.

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης της σχέσης (26) είναι:

$$r_{pool}(t) = \left[\frac{4C''gV_i}{3\pi}\right]^{1/4} \cdot t^{3/4} \tag{27}$$

Η σχέση (27) ισχύει για χρόνους $t < t_s$, και δίνει την ακτίνα της λίμνης σε χρόνο t.

Όταν σταματήσει η ροή του υγρού, τότε η διασπορά της λίμνης συνεχίζεται όπως και στην περίπτωση της στιγμιαίας απελευθέρωσης.

Για την περίπτωση που ο χρόνος που αναφερόμαστε t είναι μεγαλύτερος ή ίσος του χρόνου της ροής t_s (δηλαδή για $t \ge t_s$) έχουμε:

$$r_{pool}^2(t) = \frac{1}{16} r_{pool,s}^2 \left\{ 21\left(\frac{t}{t_s}\right)^2 - 18\frac{t}{t_s} + 13 \right\} \tag{28}$$

όπου η ακτίνα $r_{pool,s}$ υπολογίζεται από τη σχέση (27) αν $t = t_s$.

Η εξατμιζόμενη ποσότητα του υγρού υπολογίζεται από τον τύπο:

$$m_{vl}(t) = \int_0^t \dot{m}' s\pi r_{pool}^2(\tau) d\tau$$

Τελικά για το ποσό της εξάτμισης έχουμε για τις δύο περιπτώσεις, τις παρακάτω τελικές σχέσεις:

$t < t_s$ $$m_{vl}(t) = e\left(\frac{3\pi}{16}C''gV_i\right)^{1/2} \cdot t^2 \tag{29}$$

$t > t_s$ $$m_{vl}(t) = e\pi r_{pool,s}^2 t_s^{1/2}\left[\frac{t}{t_s}\right]^2 B_{\frac{t_s}{t}}\left(\frac{5}{2},\frac{1}{2}\right) + e\pi r_{pool,s}^2 t_s^{1/2}\left[\frac{t}{t_s}-1\right]^{\frac{1}{2}}\left\{2\frac{t}{t_s}+\frac{7}{5}\left[\frac{t}{t_s}-1\right]^2\right\} \tag{30}$$

όπου η συνάρτηση B έχει τη μορφή:

$$B_x\left(\frac{5}{2},\frac{1}{2}\right) = \int_0^x y^{3/2}(1-y)^{-1/2}dy \quad \text{, για } 0 \le x \le 1$$

ενώ για x=1: $B_1\left(\frac{5}{2},\frac{1}{2}\right) = \frac{3}{8}\pi$

Και για τις δύο περιπτώσεις ο ρυθμός εξάτμισης δίνεται από τις σχέσεις:

$t < t_s$ $$m'_{pool}(t) = e\left(\frac{3\pi^3}{4}C''g\dot{V}_i\right)^{1/2} \cdot t \tag{31}$$

$t > t_s$ $$m'_{pool}(t) = 2e\pi r_{pool,s}^2 t_s^{-\frac{1}{2}}\left[\frac{t}{t_s}\right]B_{\frac{t_s}{t}}\left(\frac{5}{2},\frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2}e\pi r_{pool,s}^2 \frac{t_s^{\frac{1}{2}}}{t}\left[\frac{t}{t_s}-1\right]^{\frac{1}{2}}\left\{7\left[\frac{t}{t_s}\right]^2 - \frac{t}{t_s}+2\right\} \tag{32}$$

Όπως και στη στιγμιαία εκροή, η διασπορά της λίμνης θα συνεχιστεί μέχρι να φτάσει στο ελάχιστο πάχος. Σε όλες τις παραπάνω σχέσεις έχει ληφθεί υπόψη μονάχα η εξάτμιση που οφείλεται στην απορροφούμενη από το υπέδαφος θερμότητα. Είναι όμως πιθανό σε δεδομένη στιγμή, η επίδραση της διάχυσης του ατμού να είναι σημαντική όσον αφορά τον υπολογισμό της εξάτμισης. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να είμαστε προσεκτικοί πριν κάνουμε οποιαδήποτε προσέγγιση.

4.3.4 Εξάτμιση από λίμνη με καθορισμένα όρια

Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν φυσικά φράγματα γύρω από τις δεξαμενές αποθήκευσης υγροποιημένων αερίων, με απώτερο σκοπό να παρεμποδίσουν την εξάπλωση πιθανής απελευθέρωσης του υγρού. Προφανώς η ύπαρξή τους έχει επιπτώσεις στην εξάτμιση του απελευθερώμενου υγρού.

Για τον υπολογισμό της εξάτμισης του υγρού που περιορίζεται από ένα όριο (εξωτερικό τοίχωμα) χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m}'_{pool} = \dot{m}''_s A_b = eA_b t^{-\frac{1}{2}} \tag{33}$$

Στη σχέση (33) έχουμε υπόθεσει ότι η απελευθέρωση είναι στιγμιαία και ότι ο

χρόνος που απαιτείται για το σχηματισμό της περιοριζόμενης λίμνης είναι αμελητέος σε σχέση με τον χρόνο εξάτμισης.

Ετσι το ποσό του εξατμιζόμενου υγρού σε χρόνο t δίνεται από τη σχέση:

$$m_{vl} = 2eA_b t^{\frac{1}{2}} \qquad (34)$$

όπου A_b είναι το εμβαδόν της επιφάνειας που ορίζουν τα φράγματα.

Ο παράγοντας e εξαρτάται κι εδώ από το υπέδαφος που βρίσκεται σε επαφή με το υγρό.

Τέλος θα πρέπει να σημειώσουμε ότι, όσον αφορά την εξάτμιση, η ημι-συνεχής εκροή μέσα σε καθορισμένη περιοχή, μπορεί να θεωρηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις στιγμιαία.

4.4. Εξάτμιση υγροποιημένων αερίων στο νερό

Σε αντίθεση με την περίπτωση εξάτμισης υγροποιημένων αερίων στο έδαφος, η εξάτμισή των υγρών αυτών στο νερό καθορίζεται από τη ροή θερμότητας με συναγωγή. Ως αποτέλεσμα της θερμότητας που απάγεται από το νερό είναι δυνατός ο σχηματισμός πάγου.

Εάν η εξάτμιση λαμβάνει χώρα σε ανοικτή λίμνη νερού τότε το φαινόμενο μπορεί να παραληφθεί (δεν μπορεί να σχηματιστεί στρώμα πάγου σε ανοιχτή λίμνη, δηλαδή ο σχηματισμός του δεν μεταβάλλει απαραίτητα τη διαδικασία εξάτμισης). Σε λίμνη νερού καθορισμένων ορίων, όμως, το ενδεχόμενο η ψύξη να οδηγήσει σε σχηματισμό στρώματος πάγου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς κάτι τέτοιο θα μειώσει δραματικά την παροχή θερμότητας από το νερό, επηρρεάζοντας σημαντικά τη διαδικασία εξάτμισης.

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω επιβάλλεται να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ της ροής υγροποιημένου αερίου σε ανοικτή λίμνη νερού και σε λίμνη νερού καθορισμένων ορίων. Επιπλέον για τον καθορισμό της εξάτμισης απελευθερούμενου αερίου υπό πίεση, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τη διασπορά του περιεχόμενου υγροποιημένου αερου. Η στιγμιαία εξάτμιση του υγροποιημένου αερίου μπορεί να υπολογιστεί αν ο ρυθμός διασποράς είναι γνωστός.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού διασποράς γίνονται οι παραπάνω υποθέσεις:

Η διασπορά λαμβάνει χώρα ομόκεντρα με κέντρο το σημείο εκροής. Η λίμνη

θεωρείται ως στοιχειώδες τμήμα (φέτα) κυλίνδρου.

Εξαιτίας της επιφανειακής τριβής η διασπορά θα σταματήσει σε ένα βάθος το οποίο αντιστοιχεί σε καθορισμένο πάχος στρώματος. Το ελάχιστο πάχος εξαρτάται από το είδος του υπό εξέταση υγρού.

Η επιπλέον δύναμη που απαιτείται για τη διασπορά, παρέχεται από τη διαφορά στην υδροστατική πίεση μεταξύ του υγρού και του περιβάλλοντος.

Μεταξύ του νερού και του υγροποιημένου αερίου, στην περίπτωση ανοιχτής λίμνης νερού, ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή.

Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο θα πρέπει κι εδώ να γίνει ένας διαχωρισμός όσον αφορά τον ρυθμό απελευθέρωσης του υγροποιημένου αερίου (συνεχής ή στιγμιαίος).

4.4.1 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου σε ανοιχτή λίμνη νερού

Όταν ένα υγροποιημένο αέριο εκρέει σε ανοικτή λίμνη νερού, η εξάτμισή του καθορίζεται κυρίως από τη συναγωγή θερμότητας.

Παρόλο που η δημιουργία πάγου είναι πιθανή, δεν υπάρχει πιθανότητα δημιουργίας στοιχειώδους στρώματος πάγου. Κατά συνέπεια, η επίδραση πάγου στη ροή θερμότητας από το νερό δεν χρειάζεται να μελετηθεί.

Αρχικά υπολογίζεται η εξάτμιση του υγρού, ενώ στη συνέχεια μελετάται η εξάτμιση υγρού με στιγμιαία ή συνεχή απελευθέρωση.

4.4.1.1 Εξάτμιση σε ανοιχτή λίμνη νερού

Ακριβώς μετά την εκροή του υγροποιημένου αερίου στο νερό, ξεκινάει μια διαδικασία βρασμού, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του νερού και του απελευθερούμενου υγρού.

4.4.1.2 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώθηκε στιγμιαία

Η διασπορά υγρού που προήλθε από στιγμιαία απελευθέρωση υγροποιημένου αερίου σε ανοικτή επιφάνεια νερού μπορεί να καθοριστεί από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\pi p_{vl} g \Delta_w \delta_{vl}^2 r_{pool} = -\pi \frac{1}{C''} \rho_{vl} \delta_{vl} r_{pool}^2 \frac{dr_{pool}^2}{dt^2} \qquad (35)$$

όπου $\Delta_w = \frac{\rho_w - \rho_{vl}}{\rho_w}$

Η σχέση αυτή προκύπτει από την συνθήκη ισορροπίας μεταξύ της δύναμης της βαρύτητας (αριστερό μέλος) και της δύναμης αδράνειας (δεξί μέλος). Η σταθερά C'', αποτελεί διορθωτικό παράγοντα, αφού η δύναμη αδράνειας ενεργεί μόνο σε ένα τμήμα της ολικής μάζας. Η τιμή C'' =2 μας δίνει μια καλή συμφωνία με τους ρυθμούς εξάπλωσης του LNG σε νερό που έχουν βρεθεί πειραματικά.

Από τη σχέση (35) προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$r_{pool}^2 \cdot \frac{d^2 r_{pool}}{dt^2} = -C''\delta_{vl} g \Delta_w \tag{36}$$

Ο όγκος του υγρού που εξαπλώνεται προσεγγίζεται ως εξής:

$$V_{vl,0} = \pi r_{pool}^2 \delta_{vl} \tag{37}$$

Με ατνικατάσταση του ύψους δ_{vl} από την (37) στην (36) δίνει μετά από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της λίμνης:

$$r_{pool}^2 = \left[\frac{4C''g\Delta_w V_{vl,0}}{\pi}\right]^{\frac{1}{2}} t + r_{pool,0}^2 \tag{38}$$

Η εξατμιζόμενη ποσότητα του υγρού σε χρόνο t υπολογίζεται από τη σχέση:

$$m_{vl} = \dot{m}''\left(\pi C'' g \Delta_w V_{vl,0}\right)^{1/2} t^2 + \dot{m}''\pi r_{pool,0}^2 t \tag{39}$$

όπου οι τιμές του $\dot{m}''$ δίνονται στον *πίνακα 4 -3*.

Πίνακας 4-2: Ρυθμοί εξάτμισης υγρών που βρίσκονται σε ζέση σε επιφάνεια νερού

Liquid	T_W[K]	T_{vl}[K]	q_1[W/m^2]	q_2[W/m^2]	$\dot{m}''$ [kg/m^{2}s]
1 - Propane	293	230.9	31.6*10^4	2.5*10^4	0.094
2 - Butane	293	272.5	29.8*10^4	2.6*10^4	(0.36) 0.019
3 - Butadiene	293	268.6	33.5*10^4	2.5*10^4	(0.32) ≥ 0.021
4 - Butylene	293	266.7	36.8*10^4	2.8*10^4	(0.66) ≥ 0.022
5 - Propylene	293	225.3	33.2*10^4	2.4*10^4	0.086
6 - Iso butylene	293	276.6	31.5*10^4	2.9*10^4	(0.29) 0.013
7 - Ethane	293	184.4	36.4*10^4	2.8*10^4	0.071
8 - Ethylene	293	169.3	36.6*10^4	2.6*10^4	0.063
9 - Ethylene oxide	293	283.6	49.1*10^4	3.2*10^4	(0.64) 0.004
10 - Ammonia	293	239.6	78.4*10^4	5.8*10^4	0.20
11 - Chlorine	(heavier than water)				

Για την εξάτμιση του υγροποιημένου αερίου λόγω διασποράς της λίμνης έχουμε:

$$\dot{m}''_{pool} = 2\dot{m}''\left(\pi C''g\Delta_w V_{vl,0}\right)^{1/2} t + \dot{m}'' r_{pool,0}^2 \tag{40}$$

Εαν δεν ληφθεί υπόψη η επίδραση που θα έχει ο σχηματισμός ενός στρώματος ελαχίστου πάχους, τότε ο χρόνος κατά τον οποίο όλη η λίμνη θα έχει εξατμισθεί, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$t_e = \left[\frac{\rho_{vl}^2 V_{vl,0}}{C''g\Delta_w \dot{m}''^2}\right]^{1/4} \tag{41}$$

Η αντίστοιχη μέγιστη ακτίνα της λίμνης υγρού προκύπτει αντικαθιστώντας τον τελικό χρόνο t_e στη σχέση (38), οπότε προκύπτει:

$$r_{pool,\max} = \left[\frac{16C''g\Delta_w \rho_{vl}^2 V_{vl,0}^3}{\pi^3 \dot{m}''^2}\right]^{1/8} \tag{42}$$

Στην εξαγωγή των παραπάνω τύπων δεν έχει ληφθεί υπόψη η μείωση της εξάτμισης λόγω μικρής ποσότητας υγρού που πιθανώς να έχει διαπεράσει το νερό κατά τη διάρκεια της ροής.

4.4.1.3 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώθηκε με συνεχή τρόπο

Ακολουθώντας τους ίδιους συλλογισμούς με την περίπτωση της στιγμιαίας απελευθέρωσης, για την περίπτωση της συνεχούς απελευθέρωσης έχουμε τη διαφορική εξίσωση:

$$-\frac{\pi\rho_{vl}}{C''g} r_{pool}^3 \frac{d^2 r_{pool}}{dt^2} = \begin{cases} r_{vl}V_i t & \text{, για } t \le t_s \\ r_{vl}V_i t_s & \text{, για } t > t_s \end{cases} \tag{43}$$

(t_s η χρονική διάρκεια της συνεχούς εκροής)

Στην περίπτωση αυτή ξεκινάμε με ένα σταθερό ρυθμό εκροής $\dot{V}_i$ ενώ γίνεται διαχωρισμόςανάλογα με τον ολικό χρόνο ροή t_s. Και σε αυτή την περίπτωση εισάγεται ο διορθωτικός παράγοντας C'' = 2, για να διορθώσει το γεγονός ότι η δύναμη αδράνειας που εμφανίζεται, εφαρμόζεται σε ένα μόνο μέρος της ολικής μάζας.

Με λύση της διαφορικής εξίσωσης (43) βρίσκουμε ότι η ακτίνα της λίμνης για χρόνο t, όπου $t < t_s$ δίνεται από τη σχέση:

$$r_{pool}(t) = \left[\frac{4C''g\Delta_w \dot{V}_i}{3\pi}\right]^{\frac{1}{4}} t^{\frac{3}{4}} \tag{44}$$

Αντίστοιχα για $t > t_s$ υπολογίζεται:

$$r_{pool}(t) = r_{pool,s}\left[\frac{3t}{2t_s} - \frac{1}{2}\right]^{1/2} \tag{45}$$

Ο υπολογισμός της αρχικής ακτίνας σε αυτή τη περίπτωση γίνεται θέτοντας $t=t_s$ στη σχέση (44)

Η ολική ποσότητα του εξατμιζόμενου υγρού λόγω διασποράς της λίμνης για

$$m_{vl} = \frac{2\pi}{5}\dot{m}''\left[\frac{4C''g\Delta_w\dot{V}_i}{3\pi}\right]^{\frac{1}{2}} t^{\frac{5}{2}} \tag{46}$$

$t \le t_s$ θα είναι:

ενώ για $t > t_s$ είναι:

Ο χρόνος t_e κατά τον οποίο εξατμίζεται όλη η ποσότητα της λίμνης, μπορεί να υπολογιστεί αν υποθέσουμε ότι η εξατμιζόμενη ποσότητα του υγρού (που δίνεται από τη σχέση (47)) είναι ίση με την ολική ποσότητα του υγρού που

$$m_{vl} = \frac{1}{20}\dot{m}''\pi r_{pool,s}^2 t_s\left\{15\left[\frac{t}{t_s}\right]^2 - 10\frac{t}{t_s} + 3\right\} \tag{47}$$

εκρέει ($=\dot{V}_i t_s \rho_{vl}$) (και πάλι δεν έχει ληφθεί υπόψη το στρώμα ελαχίστου πάχους).

Από την εξίσωση που υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσεγγιστεί ο τελικός χρόνος t_e με επαναληπτική μέθοδο. Στη συνέχεια και με αντικατάσταση του t_e στη σχέση (44), μπορούμε να βρούμε την τιμή της μέγιστης ακτίνας της λίμνης. Και σε αυτή την περίπτωση το μικρό ποσό του υγρού που ίσως κατά τη διαρροή διαπερνά την επιφάνεια του νερού και βρίσκεται κάτω από αυτό, θεωρείται αμελητέο.

4.4.2 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου σε επιφάνεια νερού καθορισμένων ορίων

Σε αντίθεση με την απελευθέρωση υγροποιημένου αερίου σε ανοιχτή λίμνη νερού, κατά την απελευθέρωση του ίδιου υλικού σε επιφάνεια νερού με καθορισμένα όρια έχουμε έντονο σχηματισμό πάγου. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι το μέγεθος του πάγου που σχηματίζεται είναι ισοδύναμο με ένα στερεό στρώμα πάγου. Ο σχηματισμός του πάγου έχει άμεσες συνέπειες στην διεργασία της εξάτμισης υγρών που απελευθερώνεται.

Μετά από στιγμιαία ή συνεχή εκροή υγροποιημένου αερίου σε καθορισμένη επιφάνεια νερού, το υγρό θα διασπαρθεί μέχρι να καλυφθεί όλη η επιφάνεια από αυτό. Η εξάτμιση του υγρού κατά τη διάρκεια της διασποράς έχει υπολογιστεί στις προηγούμενες παραγράφους. Στις επόμενες παραγράφους στους υπολογισμούς που θα κάνουμε θεωρείται ότι η καθορισμένη επιφάνεια έχει σχήμα κυκλικό και ότι η εξάτμιση λαμβάνει χώρα στο κέντρο της επιφάνειας.

Εφόσον όλη η επιφάνεια του νερού έχει καλυφθεί από το υγρό που έχει απελευθερωθεί, σε λίγα δευτερόλεπτα σχηματίζεται ένα επίπεδο στρώμα πάγου. Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του στρώματος πάγου, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του υγρού και του πάγου μειώνεται. Έτσι έχουμε μια ροή θερμότητας το ποσό της οποίας δίνεται από τη σχέση:

$$q_i = \frac{\lambda_e \Delta T_s}{\delta_e} = \left(\rho_w h_w + \frac{1}{2}\rho_{vl} c_e \Delta T_e\right)\frac{d\delta_e}{dt} \tag{44}$$

με αρχική συνθήκη $\delta_e(t=0)=0$.

Από τη σχέση (44) και με βάση τις αρχικές συνθήκες μπορεί να υπολογιστεί το

$$\delta_e = \left[\frac{4\lambda_e \Delta T_e t}{2\rho_w h_w + \rho_{vl} c_e \Delta T_e}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{45}$$

πάχος του πάγου δ_e. Λύνοντας τη διαφορική εξίσωση είναι:

Η ροή θερμότητας λόγω της ψύξης του νερού και του πάγου μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη ροή εξάτμισης του υγρού που βρίσκεται στην επιφάνεια του πάγου, οπότε ο ρυθμός εξάτμισης $\dot{m}_i''$ του υγρού στον πάγο να δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_i'' = \left[\frac{(2\rho_w h_w + \rho_{vl} c_e \Delta T_e)\lambda_e \Delta T_e}{4h_v^2 t}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{46}$$

Για τους παραπάνω υπολογισμούς υποθέσαμε ότι το στρώμα πάγου ήδη υπάρχει. Στη πραγματικότητα αν η επιφάνεια του νερού είναι ικανοποιητικά ήρεμη, τότε το στρώμα του πάγου θα σχηματιστεί ύστερα από την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος.

Πειράματα έχουν δείξει ότι χρειάζονται 2 με 3 δευτερόλεπτα χρόνος, για να σχηματιστεί στερεό στρώμα πάγου, αφού όλη η επιφάνεια του νερού έχει καλυφθεί από πετρέλαιο (LPG). Για υγρό αιθάνιο ο χρόνος που δίνεται είναι

10 δευτερόλεπτα, ενώ για LNG 20 δευτερόλεπτα.

Για το λόγο αυτό στην περίπτωση αυτή της εξάτμισης, θα πρέπει να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ του χρόνου πριν και μετά τον σχηματισμό του στρώματος του πάγου.

Έτσι για την πρώτη περίοδο, δηλαδή για το χρονικό διάστημα πριν τον σχηματισμό του πάγου, ο ρυθμός της εξάτμισης μεταβάλλεται γραμμικά με τον χρόνο και δίνεται από τη σχέση:

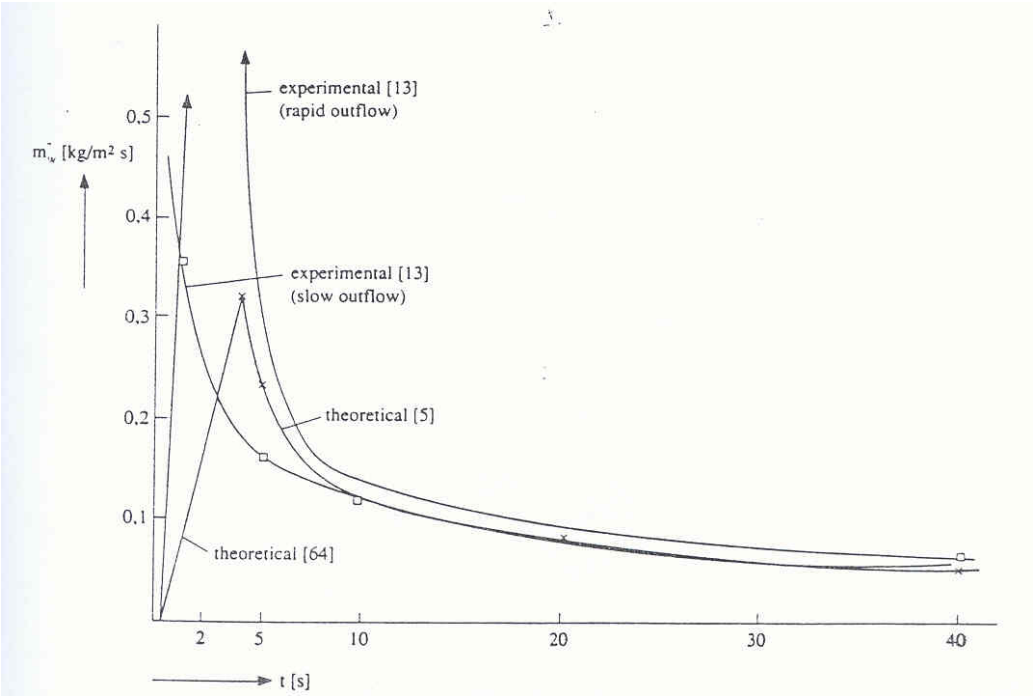
$$\dot{m}_w = Mt\,,\ 0 \le t \le \tau_e + 1 \tag{47}$$

Ενώ για τη δεύτερη περίοδο είναι:

$$\dot{m}''_w = \frac{M(\tau_e + 1)}{(t - \tau_e)^{1/2}}\ ,\ t \ge \tau_e + 1 \tag{48}$$

Τόσο στη σχέση (47) όσο και στη (48) ο παράγοντας M υπολογίζεται από τη παράσταση:

$$M = \left[\frac{(2\rho_w h_w + \rho_{vl} c_e \Delta T_e)\lambda_e \Delta T_e}{4h_v^2(\tau_e + 1)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{49}$$

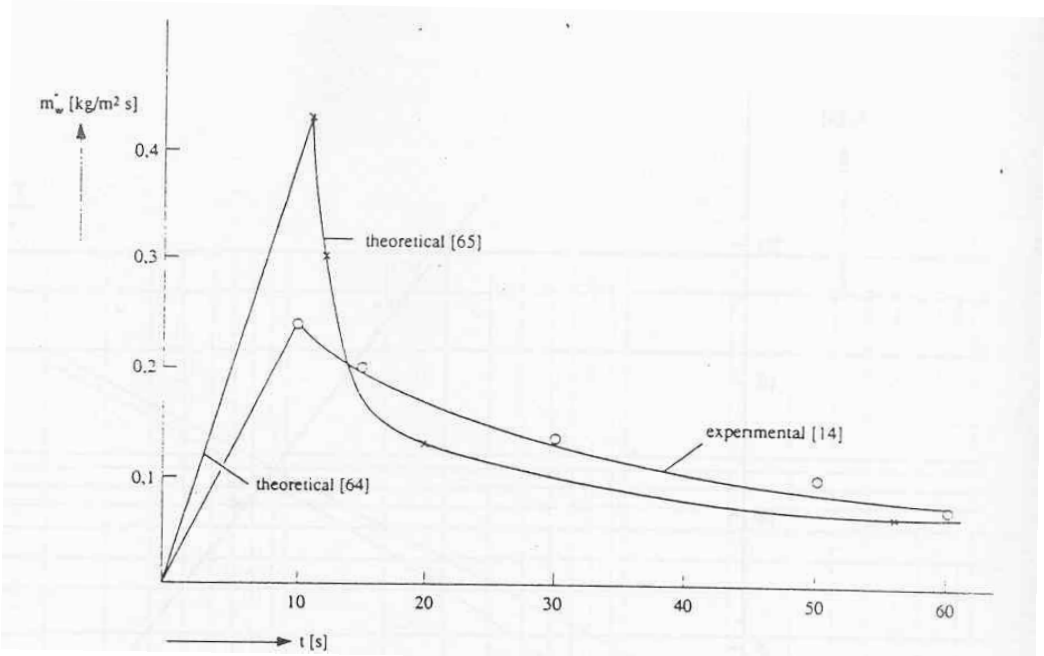


Σχήμα 20:Εξάτμιση LPG σε επιφάνεια νερού που βρίσκεται εντός ορίων

Από τα *σχήματα 20* και *21*, που αναφέρονται σε υγρό αιθάνιο και υγρό προπάνιο, φαίνεται ότι, φαίνεται ότι οι θεωρητικά υπολογιζόμενοι ρυθμοί

εξάτμισης (μετά τη δημιουργία στερεού στρώματος πάγου) βρίσκονται σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

Επίσης, τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι πριν από το σχηματισμό του στρώματος του πάγου η εξάτμιση εξαρτάται ισχυρά από τον τρόπο της εξάπλωσης του υγρού πάνω από την επιφάνεια του νερού. Σε περίπτωση γρήγορης διαποράς του υγρού λαμβάνει χώρα μια έντονη



Σχήμα 21: Εξάτμιση αιθανίου σε επιφάνεια νερού που βρίσκεται εντός ορίων

διαδικασία βρασμού, με αποτέλεσμα υψηλό ρυθμό εξάτμισης.

4.4.2.1 Εξάτμιση υγρού που απελευθερώθηκε στιγμιαία

Αμέσως μετά την εκροή το υγροποιημένο αέριο εξαπλώνεται πάνω στην επιφάνεια του νερού συγκεκριμένων ορίων (επιφάνεια εμβαδού A_b). Ο χρόνος στον οποίο ολόκληρη η επιφάνεια του νερού θα έχει πλήρως καλυφθεί από το υγρό, μπορεί να καθοριστεί με τη βοήθεια της σχέσης (38), ως εξής:

$$t_0 = \left(4\pi C'' g \Delta_w V_{vl,0}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(A_b - \pi r_{pool,0}^2\right) \tag{50}$$

Η ολική ποσότητα του υγρού που εξατμίστηκε πριν καλυφθεί η επιφάνεια του νερού από αυτό δίνεται με αντικατάσταση στη σχέση (39) από όπου προκύπτει:

$$m_{vl,0} = m_{vl}(t_0) = \dot{m}''\left(\pi C'' g \Delta_w V_{vl,0}\right)^{\frac{1}{2}} t_0^2 + \dot{m}'' \pi r_{pool,0}^2 t_0 \tag{51}$$

Από τον χρόνο t_0 και μετά αρχίζει το στάδιο το οποίο ονομάζεται “non spreading", δηλαδή το στάδιο στο οποίο δεν έχουμε διασπορά (η διασπορά έχει ολοκληρωθεί). Στους υπολογισμούς που ακολουθούν θεωρούμε ότι η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση του υγρού, παράγεται από τον πάγο και στη συνέχεια από το νερό. Αυτό σημαίνει ότι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ορίου και του υγρού είναι αμελητέα.

Από την αρχή της διατήρησης της μάζας μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο t_e κατά τον οποίο όλο το υγρό έχει εξατμιστεί. Έτσι από τη σχέση:

$$W_{vl,0} - m_{vl,0} = \int_{t_0}^{t} A_b \dot{m}''_w \, dt$$

λαμβάνονται οι σχέσεις (μετά από την επίλυση των ολοκληρωμάτων):

$$t_e = \left[\frac{2\left(W_{vl,0} - m_{vl,0}\right)}{A_b M} \right]^{\frac{1}{2}} + t_0 \tag{52}$$

για $t_0 \le t_e \le t_0 + \tau_e + 1$ και

$$t_e = \left[\frac{2\left(W_{vl,0} - m_{vl,0}\right) + A_b M\left(\tau_e + 1\right)\left(3 - \tau_e\right)}{4 A_b M\left(\tau_e + 1\right)} \right]^2 + t_0 + t_e \tag{53}$$

για $t_e \ge t_0 + \tau_e + 1$, αντίστοιχα

Για τη χρονική περίοδο όπου η επιφάνεια του νερού είναι καλυμμένη με υγρό, ο ρυθμός εξάτμισης είναι:

$$\dot{m}'_{pool} = A_b \dot{m}''_w \tag{54}$$

4.4.2.2 Εξάτμιση υγρού που απελευθερώθηκε με συνεχή τρόπο

Αμέσως μετά από την εκροή το υγροποιημένο αέριο θα εξαπλωθεί πάνω στην καθορισμένη επιφάνεια του νερού. Η χρονική στιγμή t_0 κατά την οποία η επιφάνεια του νερού θα είναι πλήρως καλυμμένη από το υγρό δίνεται από τη σχέση:

$$t_0 = \left[\frac{4}{3} \pi C'' g \Delta_w V_i'' \right]^{-\frac{1}{3}} A_b^{2/3} \tag{55}$$

για τη χρονική περίοδο $0 \le t_0 \le t_s$, ενώ για τη χρονική περίοδο $t_0 > t_s$ ο χρόνος t_0 καθορίζεται από την παρακάτω εξίσωση (με χρήση της μεθόδου δοκιμής-σφάλμα):

$$A_b = \pi r_{pool}^2 \left(t_0\right) \tag{56}$$

όπου η ακτίνα της λίμνης $r_{pool}(t_0)$ δίνεται από τη σχέση (45).

Η ολική ποσότητα του υγρού το οποίο εξατμίστηκε προτού να καλυφθεί η επιφάνεια του νερού, δίνεται από την ακόλουθη σχέση για $t_0 < t_s$:

$$m_{vl,0} = \frac{2}{3}\pi m''\left[\frac{3}{4}C''g\Delta_w \dot{V}_i\right]^{\frac{1}{2}} t_0^{\frac{5}{2}} \tag{57}$$

ενώ, αντίστοιχα, για $t_0 \geq t_s$ είναι:

$$m_{vl,0} = \frac{1}{20}\dot{m}''r_{pool,s}^2 t_s\left\{15\left[\frac{t_0}{t_s}\right]^2 - 10\frac{t_0}{t_s} + 3\right\} \tag{58}$$

Στην περίπτωση αυτή η τιμή $r_{pool,s}$ είναι η τιμή της ακτίνας της λίμνης, τη στιγμή που σταματάει η συνεχής εκροή. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (44) για $t = t_s$.

Ο υπολογισμός του χρόνου t_e όπου όλο το υγρό έχει εξατμιστεί είναι όμοιος με την περίπτωση στιγμιαίας απελευθέρωσης. Πρέπει να σημειώσουμε ότι ισχύει $t_e > t_s$, οπότε το ισοζύγιο μάζας για $t_0 \leq t_e \leq t_0+\tau_e+1$ δίνει:

$$t_e = \left[2\frac{\left(W_{vl,0} - m_{vl,0}\right)}{A_b M}\right]^{\frac{1}{2}} + t_0 \tag{59}$$

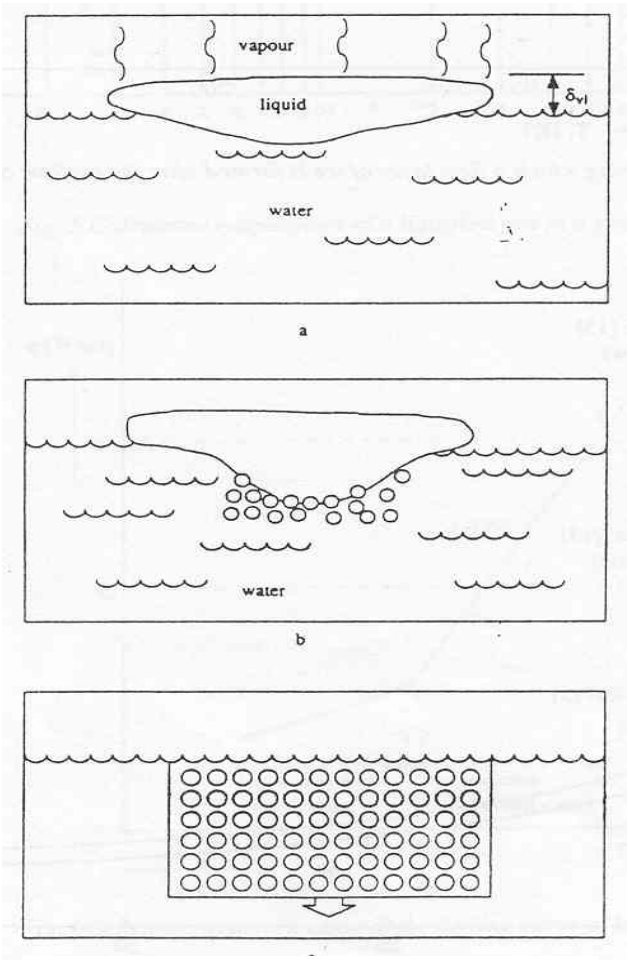
και αντίστοιχα για $t_e \geq t_0+\tau_e+1$:

$$t_e = \left[\frac{2\left(W_{vl,0} - m_{vl,0}\right) + A_b M\left(\tau_e + 1\right)\left(3 - \tau_e\right)}{4A_b M\left(\tau_e + 1\right)}\right]^2 + t_0 + \tau_e \tag{60}$$

όπου $W_{vl,0} = \rho_{vl}\dot{V}_i t_s$ (61)

Για την περίοδο όπου η επιφάνεια του νερού είναι πλήρως καλυμμένη με υγρό εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση για τον ρυθμό εξάτμισης, όπου το $\dot{m}''$ καθορίζεται από τις (47) και (48):

$$\dot{m}''_{pool} = A_b\,\dot{m}''_w$$



Σχήμα 22: Σχηματική απεικόνιση της εξάτμισης υγροποιημένων αερίων στο νερό

4.4.3 Εξάτμιση υγροποιημένου αερίου που απελευθερώνεται στο νερό και είναι βαρύτερο από αυτό

Πρέπει να ξεκαθαρίσουμε ότι η εξάτμιση υγρών που είναι βαρύτερα από ότι το νερό με σημείο βρασμού χαμηλότερο από του νερού, διαφέρει κατά πολύ από την εξάτμιση υγρών τα οποία παρουσίαζαν διασπορά στο νερό. Για το λόγο αυτό η εξάτμιση υγρών που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία θα μελετηθεί εκτενέστερα στην παράγραφο αυτή. Στην εξαγωγή αυτού του μοντέλου (*σχήμα 22*), αρχικά θεωρείται ότι το υγρό μέσα στο νερό διαχωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό ισοδύναμων σταγόνων, και ότι στη συνέχεια αυτές οι σταγόνες ανεξάρτητα η μια από την άλλη μετακινούνται προς τον πυθμένα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα υγρού βαρύτερου από το νερό είναι το χλώριο (Cl).

Η ακτίνα των σταγονιδίων υγρού που σχηματίζονται υπολογίζεται από τη σχέση:

$$r_d = 1.87\left[\frac{\gamma}{g(\rho_{vl} - \rho_w)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{62}$$

(για χλώριο r_d = 4.33 mm) ενώ η ταχύτητα των σταγονιδίων είναι ίση με:

$$\dot{u} = 2.07\left[\frac{g\gamma}{\rho_w}\left(\frac{\rho_{vl}}{\rho_w} - 1\right)\right]^{1/4} \tag{63}$$

(για χλώριο u=0.23m/s).

Το πλήθος των σχηματισμένων σταγόνων υγρού υπολογίζεται με βάση το ισοζύγιο μάζας ως εξής:

$$n = \frac{3W_{vl,0}}{4\rho_{vl}\pi r_d^3} \tag{64}$$

(για χλώριο n = 1897 $W_{vl,0}$).

Για το ρυθμό εξάτμισης μίας σταγόνας, δίνεται η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$\dot{m}''_j = \rho_w u\left(1.2Re^{-\frac{3}{5}}Pr^{-\frac{2}{3}}\right)\ln(1+B) \tag{65}$$

όπου $Re = \frac{2ur_d}{\rho_w}, Pr = \frac{\gamma_w}{\alpha_w}$

και $B = \frac{c_w(T_w - T_{vl})}{h_v}$ (για χλώριο $\dot{m}''_j = 0.46 kg/m^2 s$).

Η ταχύτητα της εξάτμισης για όλο το υγρό μπορεί να επαναγραφτεί ως εξής:

$$\dot{m}'_j = 4\pi r_d^2 \dot{m}''_j n \tag{66}$$

(για το χλώριο $\dot{m}'_j = 0.2W_{vl,0}$).

Η εξάτμιση μειώνεται συναρτήσει του χρόνου. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να υπολογιστεί μία μέση εξάτμιση. Ο χρόνος εξάτμισης μίας κινούμενης σταγόνας υγρού ισούται με:

$$t_j = \frac{r_d \cdot \rho_{vl}}{\dot{m}''_j} \tag{67}$$

Για το χλώριο η τιμή αυτή είναι t_j = 14.7 s.

Ο μέσος ρυθμός εξάτμισης του υγρού που απελευθερώνεται στο νερό υπολογίζεται μέσω της:

$$\bar{m}'_j = \frac{W_{vl,0}}{t_j} \tag{68}$$

Με βάση δεδομένα από υπολογισμούς, μία ποσότητα χλωρίου που απελευθερώνεται στο νερό θα έχει εξατμιστεί πλήρως σε χρόνο 15 sec. Θεωρητικά, ο εν λόγω χρόνος εξάτμισης είναι ανεξάρτητος της αρχικής ποσότητας απελευθερούμενου υγρού.

4.5. Εξάτμιση υγρών που δεν είναι σε ζέση

Όταν αποθηκευμένα υγρά, με σημείο βρασμού υψηλότερο από τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, απελευθερώνονται και διασπείρονται σε ένα μέσο παρατηρείται εξάτμιση λόγω της διάχυσης του ατμού. Η διάχυση αυτή οφείλεται στην διαφορά πίεσης του ατμού στην επιφάνεια του υγρού με την πίεση που επικρατεί στην περιβάλλουσα περιοχή. Επίσης κατά την απελευθέρωση υγρού με σημείο βρασμού χαμηλότερο από τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, μπορούμε να παρατηρήσουμε εξάτμιση μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η εξάτμιση είναι αποτέλεσμα αρχικά της διάχυσης των ατμών, αλλά κι εξαιτίας της αγωγής θερμότητας από το μέσο, η οποία μειώνεται με τον χρόνο με αποτέλεσμα τελικά το υγρό να σταματήσει να βράζει.

Η εξάτμιση υγρών που δεν βρίσκονται σε ζέση κυρίως εξαρτάται από την παρουσία του αέρα πάνω από τη λίμνη του υγρού. Έτσι στην παρακάτω παράγραφο αναφερόμαστε στην περίπτωση όπου έχουμε την παρουσία ανέμου πάνω από την επιφάνεια του απελευθερούμενου υγρού.

4.5.1 Υπολογισμός της εξάτμισης

Για τον υπολογισμό της εξάτμισης των υγρών που ανήκουν στην προαναφερθείσα κατηγορία χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες έχουν εξαχθεί από πειραματικά αποτελέσματα.

Ο μαζικός ρυθμός εξάτμισης δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}''_{nk} = \frac{kM_{vl}}{RT_{nk}} P_t \left(p_w - p_\infty\right) + \frac{p_w}{p_t} \dot{m}''_{nk} \tag{69}$$

Στν σχέση (59) ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει τη μεταφορά μάζας λόγω της διαφοράς πίεσης κι ο δεύτερος όρος τη ροή λόγω παράσυρσης. Η σχέση αυτή

για μικρές ποσότητες μεταφοράς μάζας λαμβάνει τη τελική μορφή:

$$\dot{m}''_{nk} = -\frac{k \cdot M_{vl}}{R \cdot T_{nk}}\left(P_w - P_\infty\right) \tag{70}$$

Οι ιδιότητες του αέρα που πνέει πάνω από το υγρό περιλαμβάνονται στον συντελεστή μεταφοράς k του υλικού. Υπάρχουν διάφορες σχέσεις υπολογισμού για τον συντελεστή αυτό, οι οποίες δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Για τον υπολογισμό του p_w μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος του Clayperon.

Για υψηλές τιμές μεταφοράς μάζας, ο συντελεστής μεταφοράς δεν εξαρτάται πλέον από τη ροή κι η σχέση (70) γίνεται:

$$\dot{m}''_{nk} = \frac{k \cdot M_{vl} \cdot P_t}{R \cdot T_{nk}} \cdot \ln\left[1 + \frac{P_w - P_\infty}{P_t - P_w}\right] \tag{71}$$

Για μικρές μεταφορές υλικού, οι οποίες αντιστοιχούν σε χαμηλές τάσεις ατμών P_w, ο όρος του λογαρίθμου μπορεί να αναπτυχθεί σε σειρά, και η (71) να καταλήξει στην (70). Αυτό σημαίνει, συνεπώς, ότι η σχέση (71) είναι εφαρμόσιμη τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές τιμές μεταφοράς μάζας.

Θα πρέπει να αναφερθεί επίσης, ότι για την εξαγωγή των παραπάνω τύπων έχει γίνει η υπόθεση ότι η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία και η τάση ατμών του εξατμιζόμενου υγρού εξαρτώνται απόκλειστικά από τη θέση σε κάθετο ως προς την επιφάνεια του υγρού επίπεδο, ενώ οι υπόλοιπες κατευθύνσεις θεωρούνται σταθερές. Συνήθως η ταχύτητα των ανέμων που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς είναι της τάξης των 2 m/s.

Με βάση την τιμή της πίεσης P_w προτείνεται: για $P_w < 2\ 10^4$ Pa, ο ρυθμός εξάτμισης να υπολογίζεται από τη σχέση (70), ενώ σε αντίθετη περίπτωση από τη σχέση (71).

4.5.2 Ψύξη του εξατμιζόμενου υγρού

Η εξάτμιση ενός υγρού απαιτεί θερμότητα (δηλ παροχή ενέργειας). Στις περισσότερες περιπτώσεις η θερμότητα αυτή παρέχεται από το περιβάλλον.

Στις περιπτώσεις όπου η θερμότητα είναι ανεπαρκής, το υγρό λαμβάνει την απαιτούμενη θερμότητα από τον εαυτό του, με αποτέλεσμα να ψύχεται. Για τις περιπτώσεις αυτές το ισοζύγιο θερμότητα δίνει:

$$q_{vl} = q_{con} + q_s + q_{afk} + q_{in} \tag{72}$$

Η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση είναι:

Η εξίσωση αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου ικανοποιείται η

$$q_{vl} = \dot{m}''_{nk} h_v \tag{73}$$

προϋπόθεση ουδέτερης ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Η μεταφορά θερμότητας λόγω της συναγωγής μεταξύ του αέρα που πνέει πάνω από τη λίμνη και της

$$q_{con} = \alpha_{con}\left(T_\alpha - T_{nk}\right) \tag{74}$$

λίμνης εξατμιζόμενου υγρού δίνεται από την εξής εξίσωση:

για την οποία έχουμε:

$$\frac{\alpha_{con} d_{pool}}{\lambda_\alpha} = Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{0.33} \quad \text{, για } 2\ 10^4 < Re < 7\ 10^5. \tag{75}$$

Η συνεισφορά της θερμικής αγωγής από το υπέδαφος στο εξατμιζόμενο υγρό μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την μεταφορά θερμότητας με ημι-άπειρο μέσο. Άρα χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$q_s = \frac{\lambda_s\left(T_s - T_{nk}\right)}{\left(\pi \alpha_s t\right)^{\frac{1}{2}}} \tag{76}$$

Η καθαρά εισέρχομενη ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_{in} = \left(1 - \varepsilon_z\right) q_z + \varepsilon_\alpha \sigma T_\alpha^4 - \varepsilon_p \sigma T_{nk}^4 \tag{77}$$

όπου για τους συντελεστές ε_z, ε_α, ε_p θέτουμε τις τιμές 0,11, 0,75 και 0,95 αντίστοιχα. Η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Προτείνονται οι παρακάτω τυπικές τιμές:

Ουδέτερη ατμοσφαιρική σταθερότητα: $q_z = 0$

Ατμοσφαιρική αστάθεια: $q_z = 4\ W/m^2$

Ατμοσφαιρική ευστάθεια: $q_z = 0$

Στη σχέση (77) ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την ροή θερμότητας από το περιβάλλον προς τη λίμνη, ενώ ο τρίτος όρος αφορά τη ροή θερμότητας που ακτινοβολείται από τη λίμνη προς το περιβάλλον.

Τελικά, η ψύξη της λίμνης υγρού μπορεί να υπολογιστεί από την εξής

παράσταση:

$$q_{afk} = -\delta_{vl}\rho_{vl}c_{vl}\frac{dT_{nk}}{dt} \tag{78}$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (73) έως (78) στην (72) οδηγούμαστε σε μια πολύπλοκη εξίσωση, η λύση της οποίας γίνεται με μαθηματικές διαδικασίες οι οποίες δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.

Σύμβολα

A_b	εμβαδόν της επιφάνειας εντός συγκεκριμένων ορίων	$\{m^2\}$
A_{st}	εμβαδόν της επιφάνειας η πλήθους χαλικιών	$\{m^2\}$
a_a	θερμοκρασιακός συντελεστής του αέρα	$\{m^2s^{-1}\}$
a_s	θερμοκρασιακός συντελεστής του εδάφους	$\{m^2s^{-1}\}$
a_v	θερμοκρασιακός συντελεστής του εξατμιζόμενου υγρού	$\{m^2s^{-1}\}$
a_w	θερμοκρασιακός συντελεστής του νερού	$\{m^2s^{-1}\}$
B	σταθερά που ορίζεται στη σχέση (65)	{_}
b	σταθερά του υλικού στην εξίσωση Clayperon	{Pa}
C’’	σταθερά για τη διασπορά του υγρού (για το έδαφος ίση με 1,08) (για το νερό ίση με 2,00)	{_}
CR	διορθωτικός συντελεστής για τη ψύξη του υγρού στο υπέδαφος	{_}
c_e	ειδική θερμότητα πάγου	$\{Jkg^{-1}K^{-1}\}$
c_s	ειδική θερμότητα εδάφους	$\{Jkg^{-1}K^{-1}\}$
c_{vl}	ειδική θερμότητα του υγρού	$\{Jkg^{-1}K^{-1}\}$
c_w	ειδική θερμότητα νερού	$\{Jkg^{-1}K^{-1}\}$
d_{pool}	διάμετρος της λίμνης υγρού	{m}
e	συντελεστής στον τύπο της ταχύτητας της εξάτμισης	$\{kgm^{-2}s^{-1/2}\}$
e*	συντελεστής στον τύπο της ταχύτητα της εξάτμισης για τη χρονική στιγμή που έχει επιτευχθεί το ελάχιστο πάχος της λίμνης	$\{kgm^{-2}s^{-1/2}\}$
f	τριβή της διαβρεχόμενης επιφάνειας	{_}
g	επιτάχυνση της βαρύτητας	$\{m\ s^{-2}\}$
h_v	θερμότητα εξάτμισης του υγρού	$\{J\ kg^{-1}\}$
h_w	θερμότητα εξάχνωσης νερού	$\{J\ kg^{-1}\}$
j_k	κλάσμα όγκου του χώματος στο έδαφος	{_}
k	συντελεστής μεταφοράς του υλικού	$\{m\ s^{-1}\}$
k’	συντελεστής μεταφοράς του υλικού για υψηλές τιμές	$\{m\ s^{-1}\}$

	μεταφοράς μάζας	
$L_{pool,b}$	μήκος της λίμνης καθορισμένων ορίων	{m}
M_{α}	μοριακό βάρος του αέρα	{kg kmol^{-1}}
M_{vl}	μοριακό βάρος του εξατμιζόμενου υγρού	{kg kmol^{-1}}
m_{vl}	εξατμιζόμενη ποσότητα υγρού	{kg}
$m_{vl,0}$	εξατμιζόμενη ποσότητα υγρού έως την στιγμή της πλήρους κάλυψης της υδατικής επιφάνειας	{kg}
$\dot{m}'_i$	ρυθμός εξάτμισης του υγρού στο νερό	{kg s^{-1}}
$\bar{m}'_i$	μέσος ρυθμός εξάτμισης του υγρού στο νερό	{kg s^{-1}}
$\dot{m}'_{pool}$	ρυθμός εξάτμισης της λίμνης υγρού	{kg s^{-1}}
$\dot{m}''$	ρυθμός εξάτμισης του υγρού σε ανοιχτή λίμνη νερού	{kg m^{-2} s^{-1}}
$\dot{m}''_{ar}$	ρυθμός εξάτμισης του υγρού στο αμμοχάλικο	{kg m^{-2} s^{-1}}
$\dot{m}''_i$	ρυθμός εξάτμισης του υγρού στον πάγο	{kg m^{-2} s^{-1}}
$\dot{m}''_i$	ρυθμός εξάτμισης μίας σταγόνας υγρού	{kg m^{-2} s^{-1}}
$\dot{m}''_{nk}$	ρυθμός εξάτμισης υγρού που δεν βρίσκεται σε ζέση	{kg m^{-2} s^{-1}}
$\dot{m}''_s$	ρυθμός εξάτμισης που παράγεται από την θερμική αγωγή από το υπόστρωμα	{kg m^{-2} s^{-1}}
$\dot{m}''_w$	Ρυθμός εξάτμισης του υγρού σε λίμνη νερού καθορισμένων ορίων	{kg m^{-2} s^{-1}}
Nu	αριθμός Nusselt	{_}
n	πλήθος σταγόνων	{_}
n’	πλήθος πετρών ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους	{m^{-2}}
Pr	αριθμός Prandtl	{_}
P_t	ολική ατμοσφαιρική πίεση	{Pa}
P_w	μερική πίεση ατμών στη στάθμη του υγρού	{Pa}
P	μερική πίεση ατμών στο περιβάλλον	
Q'_{st}	θερμότητα που απορροφάται από τα χαλίκια	{J m^{-2}}
q_{afk}	ροή θερμότητας που απαιτείται για τη ψύξη του υγρού	{W m^{-2}}
q_{con}	ροή θερμότητας προς το υγρό λόγω συναγωγής	{W m^{-2}}
q_i	ροή θερμότητας του πάγου προς το υγρό	{W m^{-2}}
q_{in}	ροή θερμότητας που ακτινοβολείται προς το υγρό	{W m^{-2}}
q_s	ροή θερμότητας, λόγω συναγωγής από το έδαφος	{W m^{-2}}

	προς το υγρό	
q_{vl}	ροή θερμότητας για την εξάτμιση του υγρού	{W m^{-2}}
q_w	ροή θερμότητας λόγω συναγωγής στο νερό	{W m^{-2}}
q_z	ροή θερμότητας που παράγεται από την ηλιακή ακτινοβολία	{W m^{-2}}
q_1	μέγιστη ροή θερμότητας	{W m^{-2}}
q_2	ελάχιστη ροή θερμότητας	{W m^{-2}}
R	σταθερά των αερίων	{$Jkmol^{-1}K^{-1}$}
Re	αριθμός Reynolds	{_}
r_d	ακτίνα σταγόνας υγρού	{m}
r_{pool}	ακτίνα λίμνης υγρού	{m}
$r_{pool,b}$	ακτίνα λίμνης καθορισμένων όρια	{m}
$r_{pool,e}$	ακτίνα λίμνης υγρού στο στρώμα ελαχίστου πάχους	{m}
$r_{pool,max}$	μέγιστη ακτίνα λίμνης υγρού	{m}
$r_{pool,0}$	αρχική ακτίνα λίμνης υγρού	{m}
$r_{pool,s}$	ακτίνα λίμνης υγρού κατά τον τερματισμό της εκροής	{m}
r_{st}	ακτίνα χαλικιού	{m}
s	παράμετρος που εξαρτάται από το προφίλ του ανέμου στο επίπεδο του εδάφους	{_}
T	θερμοκρασία	{K}
T_a	θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (θερμοκρασία της ροής αέρα)	{K}
T_c	κρίσιμη θερμοκρασία	{K}
T_k	σημείο ζέσεως του υγρού	{K}
T_{nk}	θερμοκρασία υγρού που δεν βρίσκεται σε ζέση	{K}
T_s	θερμοκρασία του εδάφους	{K}
ΔT_e	διαφορά θερμοκρασίας πάγου-υγρού	{K}
ΔT_1	διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υγρού και του νερού κατά τη μέγιστη ροή θερμότητας	{K}
ΔT_2	διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υγρού και του νερού κατά την ελάχιστη ροή θερμότητας	{K}

t	χρόνος	{s}
t_e	χρόνος στον οποίο η διαχεόμενη λίμνη έχει φτάσει στο ελάχιστο πάχος	{s}
t_j	χρόνος στον οποίο έχει εξατμιστεί μία σταγόνα υγρού	{s}
t_0	χρόνος στον οποίο η λίμνη νερού καθορισμένων ορίων έχει καλυφθεί πλήρως από το υγρό	{s}
t_s	χρόνος εκροής για συνεχή ροή	{s}
u	ταχύτητα μίας σταγόνας υγρού πάνω στο νερό	$\{ms^{-1}\}$
$u_{w,10}$	ταχύτητα του ανέμου 10m πάνω από το επίπεδο του εδάφους	$\{ms^{-1}\}$
V_{vl}	όγκος υγρού	$\{m^3\}$
$V_{vl,0}$	αρχικός όγκος υγρού	$\{m^3\}$
$\dot{V}_i$	σταθερός ρυθμός εκροής υγρού	$\{m^3\}$
W_{vl}	βάρος υγρού	{kg}
$W_{vl,0}$	αρχικό βάρος υγρού	{kg}
W_{verd}	αρχική εξατμιζόμενη ποσότητα υγροποιημένου αερίου	{kg}
x	οριζόντια συντεταγμένη του χώρου	{m}
x_w	ποσοστό υγρασίας στο έδαφος	{_}
z	κάθετη συντεταγμένη του χώρου	{m}
z_1	ύψος αναφοράς της ταχύτητας του ανέμου	{m}
α	συντελεστής διαστολής του νερού	$\{K^{-1}\}$
α_{con}	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για εξαναγκασμένη συναγωγή	$\{Wm^{-2}K^{-1}\}$
γ	επιφανειακή τάση	$\{Nm^{-1}\}$
Δ_w	διαφορά σχετικής πυκνότητας μεταξύ υγρού και νερού	{_}
δ_{dr}	πάχος αμμοχάλικου	{m}
δ_e	πάχος πάγου	{m}
δ_t	πάχος τοιχώματος για δεξαμενή LNG	{m}
δ_{vl}	πάχος στρώματος του υγρού	{m}
$\delta_{vl,min}$	ελάχιστο πάχος στρώματος του υγρού	{m}
ε_a	συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας από τα	{_}

	τοιχώματα προς τη λίμνη υγρού	
ε_p	συντελεστής εκπομπής από την επιφάνεια του υγρού	{_}
v_v	κινηματικό ιξώδες του εξατμισμένου υγρού	$\{m^2s^{-1}\}$
v_{vl}	κινηματικό ιξώδες του υγρού	$\{m^2s^{-1}\}$
v_w	κινηματικό ιξώδες του νερού	$\{m^2s^{-1}\}$
λ_a	συντελεστής αγωγής αέρα	$\{W\ m^{-1}K^{-1}\}$
λ_e	συντελεστής αγωγής πάγου	$\{W\ m^{-1}K^{-1}\}$
λ_s	συντελεστής αγωγής υπεδάφους	$\{W\ m^{-1}K^{-1}\}$
λ_{vl}	συντελεστής αγωγής υγρού	$\{W\ m^{-1}K^{-1}\}$
λ_w	συντελεστής αγωγής νερού	$\{W\ m^{-1}K^{-1}\}$
ρ_s	πυκνότητα εδάφους	$\{kg\ m^{-3}\}$
$\rho_{s,d}$	πυκνότητα ξηρού εδάφους	$\{kg\ m^{-3}\}$
ρ_{vap}	πυκνότητα εξατμιζόμενου υγρού στον αέρα της ατμόσφαιρας	$\{kg\ m^{-3}\}$
$\rho_{v,f}$	πυκνότητα εξατμιζόμενου υγρού για μέση θερμοκρασία υγρού και νερού	$\{kg\ m^{-3}\}$
$\rho_{v,s}$	πυκνότητα εξατμιζόμενου υγρού στη θερμοκρασία κορεσμού	$\{kg\ m^{-3}\}$
ρ_{vl}	πυκνότητα υγρού	$\{kg\ m^{-3}\}$
ρ_w	πυκνότητα νερού	$\{kg\ m^{-3}\}$
σ	Σταθερά Stefan Boltzmann	$\{Wm^{-2}K^{-4}\}$
τ_e	χρόνος σχηματισμού στερεού στρώματος πάγου	{s}

5. Βιομηχανικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης

5.1. Αποτύπωση υφιστάμενης κατάστασης

5.1.1 Τι είναι βιομηχανικό ατύχημα μεγάλης έκτασης;

Η βιομηχανική δραστηριότητα, από τα πρώτα κιόλας χρόνια, συνοδεύτηκε από ατυχήματα μικρής ή μεγάλης έκτασης με ανθρώπινα θύματα και σημαντικές βλάβες για το περιβάλλον. Από τη δεκαετία του 1970 και μετά, μεγάλα ατυχήματα αυτού του είδους εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα και προκαλούν το έντονο ενδιαφέρον της κοινής γνώμης και του επιστημονικού κόσμου. Έτσι, ξεκινούν προσπάθειες προς την κατεύθυνση της πρόληψης των βιομηχανικών ατυχημάτων, με θετικά αποτελέσματα. Εισάγονται νέες μέθοδοι παραγωγής, ασφαλέστερα συστήματα επεξεργασίας και αποθήκευσης υλικών και κυρίως, ρυθμίζεται το νομοθετικό πλαίσιο σε Ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο με κύριους φορείς τις Κοινοτικές Οδηγίες Seveso I και II.

Σήμερα, ένα Βιομηχανικό Ατύχημα Μεγάλης Έκτασης (ΒΑΜΕ) ορίζεται ως «ένα γεγονός όπως η διάχυση, η πυρκαγιά ή η έκρηξη που έχει το χαρακτηριστικό της μεγάλης έκτασης και προκύπτει από ανεξέλεγκτες εξελίξεις κατά τη λειτουργία, μιας εγκατάστασης, που να προκαλεί σοβαρό κίνδυνο άμεσο ή έμμεσο, για τον άνθρωπο, στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό της εγκατάστασης ή / και για το περιβάλλον και σχετίζεται με την χρήση μίας ή περισσοτέρων επικίνδυνων ουσιών, οι οποίες είναι συγκεκριμένες και ορίζονται στην Κοινοτική Οδηγία SEVESO II».

Τα Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης συνίστανται σε ξαφνική διαρροή χημικών ουσιών που στη περίπτωση που είναι πτητικές συνοδεύονται από εξάτμιση και διασπορά. Οι διαρροές αυτές οφείλονται σε δυσλειτουργίες, όπως η αύξηση της πίεσης, της θερμοκρασίας ή αποκλίσεις από τις κανονικές διαδικασίες λόγω λαθών, παραλείψεων ή και δολιοφθορά. Μπορεί ακόμη να οφείλονται και σε φυσικά αίτια όπως σεισμοί, πλημμύρες ή υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος. Τα αίτια θα μπορούσαμε να τα εντάξουμε σε δυο κατηγορίες:

- Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις διαρροές εύφλεκτων ουσιών, την

ανάμειξή τους ενδεχομένως με άλλες ουσίες ή τον αέρα και τη δημιουργία εκρηκτικού μίγματος υπό μορφή νέφους, που αν δεν αυτοεκραγεί, εκρήγνυται μετά από την επαφή του με κάποια εστία ανάφλεξης, που καταλήγει σε φωτιά ή έκρηξη ή και τα δύο μαζί με επιπτώσεις όχι μόνο στο χώρο του εργοστασίου αλλά και στη γύρω περιοχή.

- Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις διαρροές τοξικών μάλλον παρά εύφλεκτων ουσιών, οι οποίες όμως μπορούν να προκαλέσουν καταστροφές σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις σε ακτίνα πολλών χιλιομέτρων.

Και στις δυο κατηγορίες ατυχημάτων οι μετεωρολογικές συνθήκες (ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, θερμοκρασία, υγρασία, ύπαρξη θερμοκρασιακής αναστροφής) κατά τη στιγμή που συμβαίνει το ατύχημα, παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου. Άλλοι παράγοντες που εμπλέκονται είναι η τοπογραφία της περιοχής, η χωροταξία, η πληθυσμιακή πυκνότητα, η απόσταση από κατοικημένες περιοχές κ.λ.π.

5.1.2 Παραδείγματα ΒΑΜΕ

Στην συνέχεια αναφέρονται τα μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα που έχουν καταγραφεί ιστορικά ανά τον κόσμο (Πίνακας 1) και στην Ελλάδα (Πίνακας 2):

Πίνακας 1: Μεγάλα Βιομηχανικά Ατυχήματα ανά τον Κόσμο

Χημική Ουσία	**Επιπτώσεις**		**Τόπος και Χρόνος**	**Αιτία**
	Θάνατοι	**Τραυματίες**		
Μεθάνιο	136	77	Cleveland, ΗΠΑ, 1944	Πυρκαγιά
Διμεθυλαιθέρα	245	3.800	Ludvighafen, Γερμανία,	Έκρηξη
Φωσγένιο	10	-	Poza Rica, Μεξικό, 1950	Διαφυγή
Κηροζίνη	32	16	Bitburg, Γερμανία, 1954	Έκρηξη
LPG	650	2.500	Feyzin, Γαλλία, 1966	Πυρκαγιά
Πετρελαιοειδή	2	85	Pernis, Ολλανδία, 1968	Έκρηξη
Προπυλένιο	-	230	East St. Louis, Illinois,	Έκρηξη
Κυκλοεξάνιο	28	89	Flixborough,	Έκρηξη
Προπυλένιο	14	107	Beek, Ολλανδία, 1975	Έκρηξη
Διοξίνη	-	187	Seveso, Ιταλία, 1976	Διαφυγή
Αμμωνία	30	25	Cartagena, Κολομβία,	Διαφυγή
Ισοκυανιούχο	>2.000	>200.000	Bhopal, Ινδία, 1984	Διαφυγή
Μεθάνιο	52	-	Santa Cruz, Μεξικό,	Πυρκαγιά
LPG	650	2500	Mexico City, Μεξικό,	Πυρκαγιά
Αιθυλένιο &	23	130	Houston, ΗΠΑ, 1987	Έκρηξη
Πετρέλαιο	167	-	Πλατφόρμα Piper Alpha	Έκρηξη

Πίνακας 2: Μεγάλα Βιομηχανικά Ατυχήματα στην Ελλάδα

Χρονολογία	Ατύχημα – Περιγραφή
24/02/1986	Πυρκαγιά σε εγκαταστάσεις πετρελαιοειδών στη **Jet Oil** στη Θεσσαλονίκη.
06/07/1989	Πυρκαγιά σε **Motor Ship**, σε προβλήτα των ΕΛΔΑ.
16/01/1992	Ανάφλεξη σε μονάδα φυτοφαρμάκων στα **Λιπάσματα Δραπετσώνας** με έκλυση ντιμεθοέϊτ και μεθυλοπαραθείου.
01/09/1992	Ανάφλεξη και πυρκαγιά στην **ΠΕΤΡΟΛΑ.** Η ανάφλεξη συνέβη σε αέριο μίγμα ελαφριάς νάφθας-προπανίου-βουτανίου. 13 νεκροί και 15 τραυματίες.

5.1.3 Κοινοτικό και εθνικό θεσμικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση ΒΑΜΕ και την πληροφόρηση του κοινού

5.1.3.1 Κοινοτικό θεσμικό πλαίσιο

Ο καθορισμός μέτρων και περιορισμών για την αντιμετώπιση των κινδύνων από Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης όπως πυρκαγιές, εκρήξεις, διαρροές τοξικών και επικίνδυνων αερίων και άλλα, σε ορισμένες βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και η υποχρέωση ενημέρωσης του κοινού για τους κινδύνους αυτούς, διέπονται από τις διατάξεις της Κοινοτικής Νομοθεσίας «περί μεγάλης εκτάσεως ατυχημάτων ορισμένων βιομηχανικών δραστηριοτήτων» γνωστότερες ως Οδηγίες Seveso I και Seveso II, με τις οποίες έχουν συμμορφωθεί ή βρίσκονται υπό συμμόρφωση όλα τα Κράτη – Μέλη της Κοινότητας, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα.

5.1.3.2 Οδηγία SEVESO I (82/501/ΕΟΚ)

Η πρώτη οδηγία Seveso εκδόθηκε με αφορμή το ατύχημα στην ομώνυμη πόλη της Β. Ιταλίας το 1976 αλλά και άλλα παρόμοια που συνέβησαν στη δεκαετία

του 1970. Είναι επισήμως γνωστή ως Οδηγία για την Αντιμετώπιση Βιομηχανικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης και τέθηκε σε ισχύ στις 8/1/1984, καθορίζοντας ένα σύστημα αναγνώρισης των βιομηχανικών δραστηριοτήτων που μπορούν να προκαλέσουν τέτοιου είδους ατυχήματα. Οι βασικές αρχές της Οδηγίας είναι οι εξής:

- Οι βιομήχανοι πρέπει να παίρνουν όλα τα αναγκαία μέτρα για την αποφυγή Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης και τον περιορισμό των επιπτώσεών τους.
- Οι βιομήχανοι πρέπει να πληροφορούν τις Αρμόδιες Αρχές σχετικά με τους κινδύνους που απορρέουν από τις δραστηριότητές τους και για τα μέτρα που έχουν πάρει.
- Τα Κράτη – Μέλη πρέπει να φροντίζουν ώστε οι πολίτες που μπορεί να εκτεθούν σε κίνδυνο να πληροφορούνται σχετικά με τα μέτρα ασφαλείας.
- Τα μεγάλα ατυχήματα πρέπει να καταγράφονται και να διερευνώνται, ενώ τα Κράτη – Μέλη πρέπει να έχουν πρόσβαση στην ανάλυση αυτών των ατυχημάτων.

Πιο αναλυτικά, τα σημαντικότερα σημεία της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ) περιλαμβάνουν τα εξής:

Στο **άρθρο 1** της Οδηγίας, δίνονται οι ορισμοί σχετικών όρων όπως *βιομηχανική δραστηριότητα, βιομήχανος, ατύχημα μεγάλης έκτασης και επικίνδυνες ουσίες*. Επίσης, γίνεται αναφορά στα τέσσερα Παραρτήματα της Οδηγίας, τα οποία προσδιορίζουν τύπους παραγωγικών, λειτουργικών και αποθηκευτικών διαδικασιών που αναφέρονται στους κανονισμούς, καθώς και τους τύπους των προβλεπόμενων κινδύνων.

Τα **άρθρα 3 & 4**, καθορίζουν το πεδίο εφαρμογής της Οδηγίας, τους τομείς που εξαιρούνται και απαιτούν από τα Κράτη – Μέλη να διαβεβαιώσουν ότι οι βιομήχανοι αναγνωρίζουν τους υπαρκτούς Κινδύνους Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης και υιοθετούν όλα τα απαραίτητα μέτρα προστασίας, συμπεριλαμβανομένων αυτών της πληροφόρησης, της εκπαίδευσης και του εξοπλισμού του προσωπικού.

Στο **άρθρο 5**, τονίζεται η υποχρέωση των βιομηχάνων να παρέχουν στις Αρμόδιες Αρχές κοινοποίηση η οποία περιέχει λεπτομερείς και εκσυγχρονισμένες πληροφορίες σε θέματα ασφάλειας, πρόληψης και άλλων

συναφών.

Στο **άρθρο 7**, αναφέρεται ότι τα Κράτη – Μέλη πρέπει να καθορίσουν τις Αρμόδιες Αρχές που θα έχουν την ευθύνη της συλλογής των κοινοποιήσεων, της εξέτασης των παρεχομένων πληροφοριών, της οργάνωσης επιθεωρήσεων ή άλλων συναφών μέτρων ελέγχου και της πιστοποίησης κατάρτισης των εκτός των βιομηχανικών εγκαταστάσεων (ειδικών) σχεδίων αντιμετώπισης.

Στη συνέχεια, στο **άρθρο 8**, διευκρινίζεται ότι τα Κράτη – Μέλη καθίστανται υπεύθυνα να διαβεβαιώσουν ότι άτομα τα οποία μπορεί να προσβληθούν στην περίπτωση Ατυχήματος Μεγάλης Έκτασης είναι ενημερωμένα για τα μέτρα ασφάλειας και σωστής συμπεριφοράς που πρέπει να υιοθετηθούν κατά το συμβάν. Το άρθρο 8 της Οδηγίας έχει ιδιαίτερη σημασία και σχετίζεται άμεσα με το έργο καθώς αναφέρεται στο θέμα της ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης του κοινού για την αντιμετώπιση ΒΑΜΕ. Αποτελεί μία καινοτομία για το νομοθετικό πλαίσιο σε θέματα ασφάλειας, διότι για πρώτη φορά σε ολόκληρη την Ευρώπη λαμβάνεται υπόψιν η ασφάλεια των ανθρώπων που βρίσκονται εκτός των επικίνδυνων βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Μέχρι την ισχύ της Οδηγίας, μόνο το προσωπικό των επικίνδυνων βιομηχανικών δραστηριοτήτων είχε δικαίωμα στην πληροφόρηση και σε καμία Ευρωπαϊκή χώρα αυτό το δικαίωμα δεν ίσχυε για τους περιοίκους και γενικότερα το κοινό.

Το **άρθρο 10**, απαιτεί από τα Κράτη - Μέλη να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός των Αρμόδιων Αρχών μέσω του βιομηχάνου, με λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης που λαμβάνουν χώρα. Οι Αρμόδιες Αρχές με τη σειρά τους πρέπει να είναι σε θέση να διαβεβαιώσουν ότι έχουν ληφθεί όλα τα απαραίτητα μέτρα καθώς επίσης ότι έχει επιτευχθεί εκτενής ανάλυση των αιτιών του ατυχήματος, οποτεδήποτε αυτό ζητηθεί.

Σύμφωνα με το **άρθρο 11**, τα Κράτη – Μέλη έχουν την νομική υποχρέωση να αναφέρουν το όποιο Ατύχημα Μεγάλης Έκτασης έχει συμβεί στην Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στο **άρθρο 12**, αναφέρεται η υποχρέωση της Επιτροπής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη στοιχειοθέτηση ενός πρωτόκολλου, το οποίο να περιέχει μια

περίληψη των Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης που έχουν λάβει χώρα στα όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στην περίληψη αυτή πρέπει να περιλαμβάνεται η ανάλυση των αιτιών που οδήγησαν στην εκδήλωση του ατυχήματος καθώς και τα μέτρα που έχουν σε κάθε περίπτωση ληφθεί, έτσι ώστε να δοθεί η δυνατότητα στα Κράτη – Μέλη να χρησιμοποιήσουν τα στοιχεία – πληροφορίες κατά την ανάπτυξη της πολιτικής πρόληψης των Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης.

Το **άρθρο 15**, αναφέρεται στη σύσταση μιας Επιτροπής παρακολούθησης της Οδηγίας, η σύνθεση της οποίας θα αποτελείται από αντιπροσώπους των Κρατών – Μελών και ως πρόεδρος ορίζεται ένας αντιπρόσωπος της Επιτροπής της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στο **άρθρο 18**, τα Κράτη – Μέλη και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναμένεται να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικές με τις εμπειρίες που έχουν αποκομίσει σε θέματα που αφορούν την πρόληψη των Ατυχημάτων Μεγάλη Έκτασης και τον περιορισμό των συνεπειών αυτών, τόσο στην υγεία όσο και στο περιβάλλον.

Μετά τα σοβαρά ατυχήματα στο εργοστάσιο της Union Carbide στο Bhopal της Ινδίας και στο San Juan του Μεξικού το 1984, αλλά και σε Ευρωπαϊκό έδαφος στις εγκαταστάσεις της Sandoz στην Ελβετία το 1985, που είχε ως αποτέλεσμα τη μόλυνση του ποταμού Ρήνου, η Οδηγία Seveso I τροποποιήθηκε δύο φορές, με τις Οδηγίες 87/216/ΕΟΚ στις 19 Μαρτίου 1987 και 88/610/ΕΟΚ στις 24 Νοεμβρίου 1988. Με τις τροποποιήσεις αυτές:

- Μειώθηκαν ορισμένες κρίσιμες ποσότητες επικίνδυνων ουσιών, με αποτέλεσμα να υπαχθούν στις διατάξεις της Οδηγίας περισσότερες επικίνδυνες βιομηχανικές δραστηριότητες.
- Ορίστηκαν διαδικασίες ενημέρωσης του κοινού που κατοικεί κοντά σε επικίνδυνες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, για τους κινδύνους που ενυπάρχουν και τους πιθανούς τρόπους αντίδρασης σε περίπτωση ατυχήματος.

5.1.3.3 Οδηγία SEVESO II (96/82/ΕΚ)

Με την πάροδο του χρόνου διαπιστώθηκε η ανάγκη διεύρυνσης της Οδηγίας Seveso I, έτσι ώστε να καλύπτεται ακόμα μεγαλύτερο πεδίο κινδύνων. Κατά

την διάρκεια των ετών 1982 έως 1996, πάνω από 130 σημαντικά ατυχήματα έλαβαν χώρα σε κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, γεγονός που έφερε στην επιφάνεια την ανάγκη βελτίωσης της αποτελεσματικότητας του υπάρχοντος νομοθετικού πλαισίου σε θέματα πρόληψης Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης.

Έτσι, στις 9/12/1996 το Συμβούλιο των Υπουργών της Ευρωπαϊκής Ένωσης εισήγαγε στην Ευρωπαϊκή νομοθεσία την νέα Οδηγία Seveso II (96/82/ΕΚ), περί του ελέγχου Κινδύνου Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης σε μονάδες και διεργασίες που περικλείουν επικίνδυνες ουσίες. Η Οδηγία Seveso II ακολουθεί τις βασικές αρχές της Seveso I και παράλληλα ενσωματώνει κάποιες σημαντικές θεσμικές αλλαγές που συνοψίζονται ως εξής:

- Η Οδηγία 82/501/ΕΟΚ αναφέρεται σε προστασία από κινδύνους που προέρχονται από ορισμένες βιομηχανικές δραστηριότητες. Με την Οδηγία 96/82/ΕΚ εξετάζονται εκτός από βιομηχανικές εγκαταστάσεις, χώροι που περιέχουν με την οιανδήποτε έννοια επικίνδυνες ουσίες πάνω από μία ορισμένη κρίσιμη ποσότητα.
- Η Οδηγία 96/82/ΕΚ εισαγάγει για πρώτη φορά στο πεδίο εφαρμογής τους χώρους διάθεσης τοξικών και επικίνδυνων αποβλήτων και την αποθήκευση εκρηκτικών ουσιών.
- Τα Κράτη – Μέλη μεριμνούν ώστε η Αρμόδια Αρχή, βασιζόμενη στις πληροφορίες που παρέχει ο ασκών την εκμετάλλευση, να προσδιορίζει τις γειτονικές μονάδες, που μολονότι δεν υπάγονται στις διατάξεις της Οδηγίας, είναι πιθανόν να προκαλέσουν σε περίπτωση ατυχήματος δυσμενείς επιπτώσεις και κινδύνους (φαινόμενο domino).
- Η Οδηγία 96/82/ΕΚ παρέχει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή της πολιτικής πρόληψης ατυχημάτων, αλλά και τον τρόπο σύνταξης της έκθεσης ασφαλείας από τον ασκούντα την εκμετάλλευση.
- Αναφέρεται για πρώτη φορά στη νέα Οδηγία η απαίτηση προς τα Κράτη – Μέλη να λαμβάνουν υπόψη την **πολιτική χρήσεων γης**, προκειμένου να προληφθούν μεγάλα ατυχήματα και να περιοριστούν οι συνέπειές τους.
- Επίσης, αναφέρονται για πρώτη φορά κριτήρια χαρακτηρισμού ατυχήματος ως Μεγάλο Ατύχημα (Παράρτημα 6 της Οδηγίας), που αφορούν την

κοινοποίηση των συμβάντων στις Αρμόδιες Αρχές κάθε Κράτους – Μέλους και στη συνέχεια, στην Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.

Πιο συγκεκριμένα, τα 26 άρθρα της Οδηγίας Seveso II (96/82/ΕΚ) αναφέρουν τα εξής:

Τα **άρθρα 1 & 2**, περιγράφουν τους αντικειμενικούς σκοπούς της Οδηγίας και καθορίζουν το πεδίο εφαρμογής της. Η εφαρμογή αναφέρεται σε κάθε βιομηχανική δραστηριότητα, στην οποία λαμβάνουν χώρα επικίνδυνες ουσίες σε ποσότητες ίσες ή ανώτερες από τα καθορισμένα από το Παράρτημα Ι όρια. Όσον αφορά τις μικρότερες βιομηχανικές δραστηριότητες, οι σχετικές ποσότητες παρουσιάζονται στην στήλη 2 του Μέρους 1 και 2 του Παραρτήματος Ι, ενώ αντίστοιχα για τις μεγαλύτερες παρουσιάζονται στην στήλη 3 του Μέρους 1 και 2 του Παραρτήματος Ι.

Στο **άρθρο 3**, δίνονται οι ορισμοί των βασικών όρων που χρησιμοποιούνται στην Οδηγία:

- «*μονάδα*», η υπό έλεγχο ασκούντος την εκμετάλλευση συνολική ζώνη στην οποία υπάρχουν επικίνδυνες ουσίες, σε μία ή περισσότερες εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των κοινών ή συναφών υποδομών ή δραστηριοτήτων.
- «*εγκατάσταση*», ένα τεχνικό υποσύνολο μιας μονάδας όπου γίνεται παραγωγή, χρησιμοποίηση, χειρισμός ή αποθήκευση επικίνδυνων ουσιών. Περιλαμβάνεται όλος ο εξοπλισμός, οι κατασκευές, οι αγωγοί, οι μηχανές, τα εργαλεία, οι ιδιωτικές σιδηροδρομικές διακλαδώσεις και οι αποβάθρες φορτοεκφόρτωσης που εξυπηρετούν την εγκατάσταση, οι προβλήτες, οι αποθήκες ή παρόμοιες κατασκευές, πλωτές ή μη, αναγκαίες για τη λειτουργία της.
- «*ασκών την εκμετάλλευση*», κάθε φυσικό ή νομικό πρόσωπο που εκμεταλλεύεται ή κατέχει τη μονάδα ή την εγκατάσταση, ή, αν προβλέπεται από την εθνική νομοθεσία, στο οποίο εκχωρήθηκε αποφασιστική οικονομική εξουσία επί της τεχνικής της λειτουργίας.
- «*επικίνδυνες ουσίες*», οι ουσίες μείγματα ή παρασκευάσματα του Παραρτήματος Ι μέρος 1, ή τα οποία πληρούν τα καθοριζόμενα στο Παράρτημα Ι μέρος 2 κριτήρια, υπό μορφή πρώτης ύλης, προϊόντων,

παραπροϊόντων, καταλοίπων ή ενδιάμεσων προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που ευλόγως αναμένεται να προκύψουν σε περίπτωση ατυχήματος.

- «*μεγάλο ατύχημα*», συμβάν, όπως μεγάλη διαρροή, πυρκαγιά ή έκρηξη που προκύπτει από ανεξέλεγκτες εξελίξεις κατά τη λειτουργία οιασδήποτε μονάδας καλυπτόμενης από την παρούσα οδηγία, το οποίο προκαλεί μεγάλους κινδύνους, άμεσους ή απώτερους, για την ανθρώπινη υγεία, εντός ή εκτός της μονάδας, η/και για το περιβάλλον, και σχετίζεται με μία ή περισσότερες επικίνδυνες ουσίες.
- «*κίνδυνος*», η εγγενής ιδιότητα μιας επικίνδυνης ουσίας ή φυσικής κατάστασης που ενδέχεται να βλάψει την ανθρώπινη υγεία ή/και το περιβάλλον.
- «*επικινδυνότητα*», η πιθανότητα μιας συγκεκριμένης επίπτωσης εντός δεδομένης χρονικής περιόδου ή υπό συγκεκριμένες συνθήκες.
- «*αποθήκευση*», η παρουσία μιας ποσότητας επικίνδυνων ουσιών με σκοπό την εναποθήκευση, την παράδοση προς ασφαλή φύλαξη ή την αποθεματοποίηση.

Στο **άρθρο 4**, περιγράφονται οι δραστηριότητες που εξαιρούνται από την Οδηγία Seveso II. Αυτές είναι:

- οι στρατιωτικές μονάδες, εγκαταστάσεις ή αποθήκες.
- οι κίνδυνοι από ιοντίζουσα ακτινοβολία.
- η οδική, σιδηροδρομική, εσωτερική πλωτή, θαλάσσια ή αεροπορική μεταφορά και ενδιάμεση προσωρινή αποθήκευση επικίνδυνων ουσιών, συμπεριλαμβανομένης της φόρτωσης, εκφόρτωσης και μεταφόρτωσης από και προς άλλο μεταφορικό μέσο στις αποβάθρες, προβλήτες και σιδηροδρομικούς σταθμούς διαλογής, εκτός των μονάδων που καλύπτονται από την Οδηγία.
- η μεταφορά επικίνδυνων ουσιών μέσω αγωγών, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών άντλησης, εκτός των μονάδων που καλύπτονται από την Οδηγία.
- οι εργασίες των βιομηχανιών εξόρυξης που ασχολούνται με την ανίχνευση και την εκμετάλλευση μεταλλευμάτων σε ορυχεία και λατομεία, και μέσω

γεωτρήσεων.

- οι χώροι υγειονομικής ταφής αποβλήτων.

Το **άρθρο 5**, επαναλαμβάνει τις προδιαγραφές του άρθρου 3 της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ) και προσθέτει ότι σε περίπτωση μικτής ιδιοκτησίας της βιομηχανικής δραστηριότητας, οι ιδιοκτήτες υποχρεούνται να συνεργαστούν προκειμένου να επιτευχθεί συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας Seveso II.

Το **άρθρο 6**, εισαγάγει την έννοια της Πολιτικής Πρόληψης από Ατύχημα Μεγάλης Έκτασης για όλες τις βιομηχανικές δραστηριότητες όπου οι επικίνδυνες ουσίες παρουσιάζονται σε ποσότητες μεγαλύτερες από αυτές που ορίζονται στην στήλη 2 του Μέρους 1 και 2 του Παραρτήματος Ι. Η Πολιτική Προστασίας από Ατύχημα Μεγάλης Έκτασης αποτελεί ένα διαχειριστικό εργαλείο που διαβεβαιώνει ότι οι βιομήχανοι ξεκινούν την διαδικασία της εξέτασης ενός Ατυχήματος Μεγάλης Έκτασης και παράλληλα εισαγάγουν το κατάλληλο σύστημα διαχείρισης.

Οι ασκούντες την εκμετάλλευση των βιομηχανικών εγκαταστάσεων που το συγκεκριμένο άρθρο καλύπτει, είναι υποχρεωμένοι να κοινοποιήσουν στις Αρμόδιες Αρχές την ύπαρξή τους, δίνοντας ορισμένες βασικές πληροφορίες όπως όνομα, διεύθυνση, επικίνδυνες ουσίες κ.α. Αυτό συμβαίνει για να δοθεί στις Αρμόδιες Αρχές η δυνατότητα της αποτελεσματικής διαχείρισης των επιθεωρήσεων, της αναγνώρισης πιθανών επιπτώσεων του φαινομένου “domino”, καθώς και της αποτελεσματικής παρακολούθησης της εφαρμογής της Οδηγίας.

Το **άρθρο 7**, εκσυγχρονίζει τις προδιαγραφές του άρθρου 4 της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ), συσχετίζοντάς το με τις απαιτήσεις της νεοεισαχθείσας έννοιας που είναι η Πολιτική Πρόληψης από Ατύχημα Μεγάλης Έκτασης.

Το **άρθρο 8**, καλύπτει τις επιπτώσεις του πολλαπλασιαστικού φαινομένου

(“domino effect”). Οι Αρμόδιες Αρχές έχουν την υποχρέωση να προσδιορίσουν βιομηχανικές δραστηριότητες ή γκρουπ βιομηχανικών δραστηριοτήτων που αυξάνουν την πιθανότητα πρόκλησης Ατυχήματος Μεγάλης Έκτασης, εξαιτίας της θέσης τους και της μεταξύ τους απόστασης. Η δράση των Αρμόδιων Αρχών πρέπει να βασίζεται στις πληροφορίες που προμηθεύονται από τους ασκούντες την εκμετάλλευση. Οι διατάξεις του άρθρου 9 πρέπει να εφαρμόζονται σε όλες τις προσδιορισμένες βιομηχανικές δραστηριότητες και οι οποίες παράλληλα πρέπει να ανταλλάσσουν μεταξύ τους τις απαραίτητες πληροφορίες, έτσι ώστε να μπορούν να συμμορφωθούν με τις διατάξεις της Οδηγίας.

Το άρθρο αυτό καταργεί το όριο των 500 μέτρων που είχε ορισθεί από τις διατάξεις της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ) και ισχύει πλέον και για βιομηχανικές δραστηριότητες που βρίσκονται σε απόσταση ακόμα και μεγαλύτερη των 500 μέτρων. Κριτήρια εναρμόνισης που αφορούν τις επιπτώσεις του φαινομένου “domino” είναι δυνατόν να καθορίζονται, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Το **άρθρο 9**, περιέχει τον πυρήνα των προδιαγραφών, απαραίτητων για την σύνταξη της Μελέτης Ασφάλειας, που προηγουμένως περιέχονται στο άρθρο 5 της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ). Περιγράφονται οι σαφείς στόχοι της Μελέτης καθώς και ο σύνδεσμος μεταξύ της Μελέτης Ασφάλειας και του διαχειριστικού συστήματος που αναπτύσσεται από τον ασκούντα την εκμετάλλευση. Οι προδιαγραφές εφαρμόζονται για όλες τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις στις οποίες οι επικίνδυνες ουσίες παρουσιάζονται σε ποσότητες μεγαλύτερες από αυτές που ορίζονται στην στήλη 3 του Μέρους 1 και 2 του Παραρτήματος Ι.

Το περιεχόμενο των τεχνικών θεμάτων της έκθεσης ασφάλειας, παραμένει ως έχει στην Οδηγία Seveso I (82/501/ΕΟΚ), με την σημαντική πρόσθεση ορισμένων διαχειριστικών και οργανωτικών παραγόντων, λεπτομερής αναφορά των οποίων γίνεται στο Παράρτημα 2.

Στα πλαίσια του διαχειριστικού απολογισμού, ενθαρρύνεται από τις προδιαγραφές η πραγματοποίηση ελέγχων ασφάλειας καθώς και περιοδικών ανασκοπήσεων της Έκθεσης Ασφάλειας, το λιγότερο κάθε 5 χρόνια. Επίσης λαμβάνει υπόψη της, ότι ορισμένες πληροφορίες τυχαίνει να είναι κοινές για έναν αριθμό βιομηχανικών δραστηριοτήτων που ανήκουν στον ίδιο βιομήχανο ή ακόμη ότι μπορεί να έχουν προετοιμαστεί στα πλαίσια των απαιτήσεων κάποιας άλλης νομοθεσίας. Κριτήρια εναρμόνισης που αφορούν τις Μελέτες Ασφάλειας είναι δυνατόν να καθορίζονται, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Το **άρθρο 10**, απαιτεί από τους βιομηχάνους να επανεξετάζουν τα συστήματα διαχείρισης, ειδικότερα αυτά που έχουν σχέση με την Πολιτική Προστασία από Ατύχημα Μεγάλης Έκτασης και με την Μελέτη Ασφάλειας, σε περίπτωση μετατροπών μιας μονάδας, εγκατάστασης ή αποθήκης Οι προδιαγραφές είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες που προηγουμένως περιέχονταν στο άρθρο 6 της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ), τροποποιημένες έτσι ώστε να λάβουν υπ' όψιν όλες τις αλλαγές που προκύπτουν από την νέα Οδηγία Seveso II (96/82/ΕΚ).

Το **άρθρο 11**, περιέχει τις προϋποθέσεις σχετικά με την κατάρτιση Σχεδίου Εκτάκτου Ανάγκης, οι οποίες προηγουμένως περιέχονται στο άρθρο 5 της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ), εκσυγχρονισμένες πλέον και διαχωρισμένες από τις προϋποθέσεις της κατάρτισης Μελέτης Ασφάλειας. Το άρθρο αυτό περιέχει τους ξεκάθαρους στόχους των Σχεδίων και λεπτομέρειες στο Παράρτημα 3, για το περιεχόμενο των σχετικών Σχεδίων περί "εσωτερικής" καθώς και "εξωτερικής" ανταπόκρισης. Η ευθύνη της κατάρτισης των "εσωτερικών" σχεδίων παραμένει στον ασκούντα την εκμετάλλευση, ενώ η ευθύνη κατάρτισης των "ειδικών" σχεδίων υπάγεται στην Αρμόδια Αρχή που το Κράτος – Μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει καθορίσει. Το καθήκον του ασκούντα την εκμετάλλευση να προμηθεύει τις Αρμόδιες Αρχές με πληροφορίες επαρκείς για την κατάρτιση εξωτερικού Σχεδίου Εκτάκτου Ανάγκης, αναφέρεται στις απαιτήσεις της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ).

Το **άρθρο 12**, περιέχει τις διατάξεις που σχετίζονται με την χωροθέτηση καθώς και με τον σχεδιασμό χρήσεων γης. Η προσέγγιση αυτού του άρθρου επικεντρώνεται σε ουσιώδη στοιχεία για την δημιουργία μιας Ευρωπαϊκής πολιτικής σε θέματα χωροθέτησης και χρήσεων γης και ειδικότερα υπογραμμίζεται η απαίτηση από τα Κράτη – Μέλη να αναπτύξουν ιδιαίτερη πολιτική σ΄ αυτούς τους τομείς, όπου να λαμβάνει χώρα η ανταλλαγή πληροφορίας από τις σχετικές με τα θέματα αρχές, καθώς και η πιθανότητα του εναρμονισμού τους με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

Μέσω αυτού του άρθρου αναγνωρίζεται ότι οι κίνδυνοι ενός ατυχήματος μεγάλης έκτασης, αποτελούν μόνο ένα στοιχείο του συνόλου της διαδικασίας ελέγχου του σχεδιασμού χρήσεων γης. Περαιτέρω αναγνωρίζεται η μακροπρόθεσμη φύση των πολιτικών σχεδιασμού χρήσεων γης, ειδικότερα για να επιτευχθεί ο σκοπός του διαχωρισμού των κινδύνων ενός ατυχήματος μεγάλης έκτασης, στις κατοικημένες περιοχές, τις περιοχές δημόσιας ιδιοκτησίας, και τις περιοχές φυσικού περιβάλλοντος. Κριτήρια εναρμόνισης που αφορούν την πολιτική σχεδιασμού των χρήσεων γης είναι δυνατόν να καθορίζονται, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Το **άρθρο 13**, διατηρεί την απαίτηση της παροχής πληροφοριών απλής φύσης των ατόμων που είναι δυνατόν να δεχθούν τις επιπτώσεις ενός ατυχήματος μεγάλης έκτασης, που περιλαμβάνονται στο άρθρο 8 της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ).

Η πολιτική της ελεύθερης πρόσβασης στην πληροφορία, που ξεκίνησε με την Οδηγία (90/313/ΕΚ), συνεχίζεται με την σύνταξη της Μελέτης Ασφάλειας βάση του άρθρου 9 της νέας Οδηγίας Seveso II (96/82/ΕΚ), η οποία αποτελεί δημόσιο έγγραφο, καθώς και με την συμμετοχή του κοινού σε διαδικασίες και συζητήσεις που σχετίζονται ειδικότερα με θέματα χωροθέτησης και σχεδιασμού χρήσεων γης καθώς και γενικότερα με θέματα πολιτικών ελέγχου ατυχημάτων μεγάλης έκτασης των Αρμοδίων Αρχών.

Η υποχρέωση της παροχής πληροφοριών σε γειτονικά κράτη καλύπτεται από την υπάρχουσα Οδηγία Seveso I (82/501/ΕΟΚ) και επεκτείνεται με τη

ανταλλαγή των κριτηρίων που αφορούν τις αποφάσεις των Αρμοδίων Αρχών. Η εμπιστευτικότητα των πληροφοριών διασφαλίζεται, όπου κριθεί απαραίτητο, σύμφωνα με τις βασικές αρχές της Οδηγίας (90/313/ΕΚ).

Τα **άρθρα 14 & 15**, εξασφαλίζουν τις εκθέσεις - αναφορές των Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης. Συγκεκριμένα το άρθρο 14 σχετίζεται με την έκθεση του ασκούντος την εκμετάλλευση στις Αρμόδιες Αρχές και το άρθρο 15 με την έκθεση των Αρμοδίων Αρχών στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Η εξέταση των Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης που έχουν αναφερθεί στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ), έδειξαν ότι υπήρχαν στο σύστημα ατέλειες που εστιάζονται στην έλλειψη εναρμονισμένων κριτηρίων και στα μεγάλα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούσαν μέχρι την σύνταξη των εκθέσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο αυτές ελλείψεις η νέα Οδηγία Seveso II (96/82/ΕΚ), μέσω αυτών των άρθρων υιοθετεί έναν μηχανισμό ανάπτυξης κριτηρίων και καθιερώνει για τις εκθέσεις το σύστημα των δύο σταδίων, εξασφαλίζοντας έτσι την γρήγορη διαθεσιμότητα των βασικών πληροφοριών. Επιπροσθέτως, αναπτύσσει διατάξεις σχετικές με την σύνταξη από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ερωτηματολογίου για την μετάδοση των απαραίτητων πληροφοριών.

Τα άρθρα **16, 17 & 18**, αναφέρονται στις ευθύνες και τα καθήκοντα των Αρμοδίων Αρχών. Μελέτη των σχετικών διατάξεων της υπάρχουσας Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ), έδειξε ότι ένας κύριος εναρμονιστικός παράγοντας της νομοθεσίας που σχετίζεται με τον έλεγχο των Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης, είναι η πρακτική εφαρμογή αυτού, η οποία διεξάγεται από τις Αρμόδιες Αρχές, μέσω των επιθεωρήσεών τους στο σύνολο των βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

Το **άρθρο 18** έχει σχεδιαστεί προκειμένου να βελτιώσει την διαχείριση των διαδικασιών επιθεώρησης που διεξάγεται από τις Αρμόδιες Αρχές και για την παροχή επαρκών πληροφοριών που να διασφαλίζουν την πρακτική εφαρμογή της. Κριτήρια εναρμόνισης που αφορούν προγράμματα και διαδικασίες επιθεώρησης είναι δυνατόν να καθορίζονται, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Τα **άρθρα 19 και 20**, αναφέρονται στην διαθεσιμότητα πληροφοριών σε θέματα σχετικά με τα Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης και ειδικότερα στο καθήκον της Ευρωπαϊκής Επιτροπής να διασφαλίσει την ελεύθερη πρόσβαση στην πληροφορία. Η πιο σημαντική δράση της Επιτροπής σε αυτήν την κατεύθυνση είναι η δημιουργία και λειτουργία του Κοινοτικού Κέντρου Εγγράφων Βιομηχανικών Κινδύνων (Community Documentation Centre on Industrial Risk "CDCIR"), καθώς και η δημιουργία και λειτουργία του Συστήματος Εκθέσεων Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (Major Accident Reporting System "MARS")

Τα **άρθρα 21 και 22**, περιέχουν διατάξεις σχετικές με την προσαρμογή των Παραρτημάτων στην τεχνική εξέλιξη καθώς και στην ανάπτυξη εναρμονισμένων κοινοτικών προδιαγραφών.

Τα άρθρα **23, 24, 25 και 26**, αναφέρονται στη θέση εφαρμογής της νέας Οδηγίας Seveso II (96/82/ΕΚ) και στην ανάκληση της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ) ως τροποποιημένης.

Το **Παράρτημα Ι**, καθορίζει την εφαρμογή των σχετικών άρθρων της Οδηγίας και καλύπτει όλες τις σχετικές βιομηχανικές δραστηριότητες. Δεν υπάρχει καμία διαφοροποίηση μεταξύ αποθήκευσης και χρήσης επικίνδυνων ουσιών. Αυτό συμβαίνει, διότι η εφαρμογή της Οδηγίας βασίζεται στο ότι το ενδεχόμενο δημιουργίας ενός Ατυχήματος Μεγάλης Έκτασης παραμένει το ίδιο για τις ίδιες ποσότητες επικίνδυνων ουσιών, ανεξαρτήτως του χώρου.

Το ***Μέρος 1 του Παραρτήματος Ι***, περιέχει κατάλογο με ονόματα ουσιών, με προσδιορισμένες ποσότητες προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις των άρθρων 6, 7 και 9. Ο αριθμός των ουσιών που περιλαμβάνονται στον κατάλογο του Μέρους 1 έχει μειωθεί σημαντικά σε σχέση με αυτές που περιλαμβάνονται στο αντίστοιχο Μέρος 1 των Παραρτημάτων ΙΙ και ΙΙΙ της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ).

Το ***Μέρος 2 του Παραρτήματος Ι***, περιέχει μία ομάδα κατηγοριών επικίνδυνων ουσιών, όμοιας μορφής με την ανάλογη στο Μέρος 2 του Παραρτήματος ΙΙ της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ).

Το **Παράρτημα ΙΙ**, περιλαμβάνει πληροφορίες και προδιαγραφές οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπ΄ όψη κατά την σύνταξη της Μελέτης Ασφάλειας,

όπως αυτή απαιτείται σύμφωνα με το άρθρο 9 της Οδηγίας.

Το **Παράρτημα ΙΙΙ**, περιλαμβάνει βασικές αρχές που αναφέρονται στο άρθρο 7 της Οδηγίας καθώς και πληροφορίες που αναφέρονται στο άρθρο 9 πάνω στα Συστήματα Διαχείρισης και Οργάνωσης των Βιομηχανικών Δραστηριοτήτων στα πλαίσια πρόληψης των Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης.

Το **Παράρτημα ΙV**, περιλαμβάνει πληροφορίες και προδιαγραφές οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπ΄ όψη κατά την σύνταξη τόσο των "εσωτερικών" όσο και των "ειδικών" Σχεδίων Έκτακτης Ανάγκης, όπως αυτά απαιτούνται σύμφωνα με το άρθρο 11 της Οδηγίας.

Το **Παράρτημα V**, αναφέρεται στις πληροφορίες που πρέπει να διατίθενται στο κοινό βάση του άρθρου 13(1) της Οδηγίας κατ' αντιστοιχία με το Παράρτημα VII της Οδηγίας Seveso I (82/501/ΕΟΚ).

Τέλος το **Παράρτημα VI**, αναφέρει τα κριτήρια, βάση των οποίων απαιτείται να λάβει χώρα η κοινοποίηση ενός Ατυχήματος Μεγάλης Έκτασης από τις Αρμόδιες Αρχές στην Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως αυτή ορίζεται σύμφωνα με το άρθρο 15(1) της Οδηγίας.

Υπό το πρίσμα πρόσφατων βιομηχανικών ατυχημάτων αλλά και μελετών που πραγματοποίησε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή με αντικείμενο τις καρκινογόνες και επικίνδυνες για το περιβάλλον ουσίες, έγινε φανερό ότι η Οδηγία Seveso II έπρεπε να τροποποιηθεί, ώστε να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογής της. Πράγματι, η διαρροή κυανίου που ρύπανε το Δούναβη μετά το ατύχημα της Baia Mare στη Ρουμανία τον Ιανουάριο του 2000, το ατύχημα με τα πυροτεχνήματα στην πόλη Enschede της Ολλανδίας τον Μάιο του 2000 και η έκρηξη σε εργοστάσιο λιπασμάτων στην Τουλούζη τον Σεπτέμβριο του 2001, απέδειξαν ότι διεργασίες που δεν αναφέρονταν στην Οδηγία Seveso II, όπως εργασίες αποθήκευσης και επεξεργασίας στο πλαίσιο της εξορυκτικής δραστηριότητας, η αποθήκευση πυροτεχνικών ουσιών ή η αποθήκευση λιπασμάτων με βάση το νιτρικό αμμώνιο, ενδέχεται να έχουν σοβαρές συνέπειες.

Επίσης, οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από την Επιτροπή σε στενή συνεργασία με τα Κράτη – Μέλη, υποστήριξαν ότι θα έπρεπε να διευρυνθεί ο κατάλογος των καρκινογόνων ουσιών με τις δέουσες οριακές ποσότητες και

να μειωθούν σημαντικά οι οριακές ποσότητες που καθορίζονται για τις επικίνδυνες για το περιβάλλον ουσίες στην οδηγία 96/82/ΕΚ. Με βάση λοιπόν τα καινούργια αυτά δεδομένα, η Οδηγία Seveso II τροποποιήθηκε, με την Οδηγία 2003/105/ΕΚ που ψηφίστηκε στις 16/12/2003. Με την τροποποίηση αυτή:

- Μειώνονται ορισμένες κρίσιμες ποσότητες επικίνδυνων για το υδάτινο περιβάλλον ουσιών, όπως αυτές αναφέρονται στο Μερος 2 του Παραρτήματος 1, προστίθενται νέες ουσίες στον κατάλογο με τις καρκινογόνες ουσίες στο Μέρος 1 του Παραρτήματος Ι και αλλάζουν τα χαρακτηριστικά ταξινόμησης για τα λιπάσματα και ειδικότερα το νιτρικό αμμώνιο και τις εκρηκτικές ύλες, με αποτέλεσμα να υπαχθούν στις διατάξεις της Οδηγίας περισσότερες επικίνδυνες βιομηχανικές δραστηριότητες.
- Χαράσσονται κατευθυντήριες γραμμές για τον καθορισμό βάσης δεδομένων η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της συμβατότητας μεταξύ των εγκαταστάσεων οι οποίες καλύπτονται από την οδηγία 96/82/ΕΚ και των περιοχών που περιγράφονται στο άρθρο 12 παράγραφος 1 της ίδιας οδηγίας, ώστε να διευκολυνθεί ο προγραμματισμός της χρήσης γης.

Να σημειωθεί τέλος ότι η Οδηγία Seveso II (96/82/ΕΚ) μαζί με την τροποποίηση της, Οδηγία 2003/105/ΕΚ, αποτελούν την ισχύουσα Κοινοτική Νομοθεσία σε θέματα πρόληψης και αντιμετώπισης Βιομηχανικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (ΒΑΜΕ).

5.1.3.4 Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο

Η Ελλάδα ως Κράτος – Μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης συμμόρφωσε την εθνική της νομοθεσία με τις Κοινοτικές Οδηγίες Seveso I και II, με τις αντίστοιχες Υπουργικές Αποφάσεις 18187/272 (3/3/1988) και 5697/590 (16/3/2000). Πρόσφατα ενσωματώθηκε στην εθνική νομοθεσία και η 2003/105/ΕΚ με την Υπουργική Απόφαση 12044/613 (19/3/2007) η οποία αντικαθιστά πλήρως τις προηγούμενές της, σύμφωνα με τις διατάξεις της Οδηγίας Seveso II 96/82/ΕΚ, όπως τροποποιήθηκε από την 2003/105/ΕΚ. Συνοπτικά προβλέπονται τα εξής:

Τα **άρθρα 1 & 2**, περιγράφουν τους αντικειμενικούς σκοπούς της Απόφασης και καθορίζουν το πεδίο εφαρμογής της, σύμφωνα με τις διατάξεις των

άρθρων 1 και 2 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ όπως τροποποιήθηκε από την 2003/105/ΕΚ και με την επιφύλαξη της κείμενης νομοθεσίας για την ασφάλεια και υγεία των εργαζομένων.

Στο **άρθρο 3**, δίνονται οι ορισμοί των βασικών όρων που χρησιμοποιούνται. Στους 8 ορισμούς της Οδηγίας 96/82/ΕΚ προστίθεται αυτός της «αδειοδοτούσας αρχής» και «αρμόδια Υπηρεσία του ΥΠΕΧΩΔΕ», που είναι οι «Διευθύνσεις Ανάπτυξης των Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων και οι αντίστοιχες κατά περίπτωση Υπηρεσίες του ΥΠΑΝ» και η «Υπηρεσία Περιβάλλοντος της Γενικής Διεύθυνσης Περιβάλλοντος του ΥΠΕΧΩΔΕ», αντιστοίχως.

Στο **άρθρο 4**, περιγράφονται οι δραστηριότητες που εξαιρούνται από την Απόφαση, βάσει της Οδηγίας 96/82/ΕΚ (άρθρο 4).

Το **άρθρο 5**, αναφέρει τις γενικές υποχρεώσεις του ασκούντος την εκμετάλλευση, σχετικά με την λήψη μέτρων για την αποφυγή ΒΑΜΕ και την προστασία του περιβάλλοντος σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία, την παροχή πληροφόρησης προς την Αδειοδοτούσα Αρχή σχετικά με την επαρκή εκπαίδευση του προσωπικού, καθώς και την υποβολή κοινοποίησης, πολιτικής πρόληψης ατυχημάτων, μελέτης ασφαλείας και σχεδίων εκτάκτου ανάγκης, σύμφωνα με τα άρθρα 6, 7, 8 και 9 της Απόφασης.

Το **άρθρο 6**, αναφέρεται στο περιεχόμενο της κοινοποίησης του ασκούντος την εκμετάλλευση προς την Αδειοδοτούσα Αρχή, η οποία περιλαμβάνει λεπτομέρειες σχετικές με την επιχείρηση, για τις επικίνδυνες ουσίες που υπάρχουν και στοιχεία για την παραγωγική διαδικασία, το άμεσο περιβάλλον της εγκατάστασης (γειτονικές εγκαταστάσεις, περιγραφή χρήσεων γης της ευρύτερης περιοχής) και της πιθανότητας εκδήλωσης φαινομένου domino λόγω της εγγύτητας με άλλες επικίνδυνες εγκαταστάσεις, σύμφωνα με τις προβλέψεις του άρθρου 6 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ. Η Αδειοδοτούσα Αρχή με την σειρά της, αποστέλλει την κοινοποίηση στα Υπουργεία Ανάπτυξης, ΠΕΧΩΔΕ, Υγείας και Κοινωνικής Αλληλεγγύης, Απασχόλησης και Κοινωνικής Προστασίας και Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, στη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, στην Τοπική Πυροσβεστική Υπηρεσία και στο Γενικό Χημείο του Κράτους.

Το **άρθρο 7**, αναφέρεται στην έκθεση πολιτικής πρόληψης μεγάλων

ατυχημάτων που υποβάλλει ο ασκών την εκμετάλλευση προς την Αδειοδοτούσα Αρχή μαζί με την κοινοποίηση ή την εκάστοτε τροποποίησή της και σε κάθε περίπτωση ανά πενταετία, που θα πρέπει να αποβλέπει σε υψηλό επίπεδο προστασίας του ανθρώπου και του περιβάλλοντος με τα κατάλληλα μέσα, δομές και συστήματα διαχείρισης. Η Αδειοδοτούσα Αρχή αποστέλλει την έκθεση στις συναρμόδιες αρχές, όπως αυτές προσδιορίζονται στο άρθρο 6. Το άρθρο αυτό δεν εφαρμόζεται για τις εγκαταστάσεις που υπάγονται στο επόμενο άρθρο.

Το **άρθρο 8**, περιέχει τον πυρήνα των προδιαγραφών, απαραίτητων για την σύνταξη της Μελέτης Ασφάλειας από τον ασκούντα την εκμετάλλευση, σύμφωνα με το άρθρο 9 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ. Επίσης, περιγράφονται με λεπτομέρεια οι διαδικασίες αξιολόγησης της μελέτης από τις Αρμόδιες Υπηρεσίες, η διαδικασία καταχώρησης της μελέτης από την Αδειοδοτούσα Αρχή, καθώς και η διαδικασία περιοδικής επανεξέτασης κάθε 5 χρόνια.

Το **άρθρο 9**, περιέχει τις προϋποθέσεις σχετικά με την κατάρτιση Σχεδίων Εκτάκτου Ανάγκης, όπως περιγράφονται στο άρθρο 11 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ, εκσυγχρονισμένες πλέον και διαχωρισμένες από τις προϋποθέσεις της κατάρτισης Μελέτης Ασφάλειας. Το άρθρο αυτό περιέχει τους ξεκάθαρους στόχους των Σχεδίων και λεπτομέρειες, στο Παράρτημα 4, για το περιεχόμενο των σχετικών Σχεδίων περί «εσωτερικής» καθώς και «εξωτερικής» ανταπόκρισης. Η ευθύνη της κατάρτισης των «εσωτερικών» σχεδίων παραμένει στον ασκούντα την εκμετάλλευση, ενώ η ευθύνη κατάρτισης των «εξωτερικών» σχεδίων ή «Σχεδίων Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (ΣΑΤΑΜΕ)», υπάγεται στην Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας της οικείας Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης, σε συνεργασία με τις Υπηρεσίες της οικείας Νομαρχιακής αυτοδιοίκησης και αν κρίνεται σκόπιμο και της περιφέρειας και άλλα εμπλεκόμενα Υπουργεία και φορείς (Τοπική Πυροσβεστική Υπηρεσία). Υποβάλλεται στην Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας προς έγκριση, επανεξέταση, δοκιμή και ενδεχομένως αναθεώρηση και εκσυγχρονισμό κάθε 3 χρόνια.

Το **άρθρο 10**, καλύπτει τις επιπτώσεις του πολλαπλασιαστικού φαινομένου (“domino effect”), σύμφωνα με το άρθρο 8 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ.

Το **άρθρο 11**, απαιτεί από τους ασκούντες την εκμετάλλευση να επανεξετάζουν τα συστήματα διαχείρισης, ειδικότερα αυτά που έχουν σχέση με την Πολιτική Προστασίας από Ατύχημα Μεγάλης Έκτασης και με την Μελέτη Ασφαλείας, σε περίπτωση μετατροπών μιας μονάδας, εγκατάστασης ή αποθήκης, σύμφωνα με το άρθρο 10 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ.

Το **άρθρο 12**, περιέχει τις διατάξεις που σχετίζονται με την χωροθέτηση καθώς και με τον σχεδιασμό χρήσεων γης, σύμφωνα με το άρθρο 12 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ. Οι αρμόδιες αρχές πρέπει να μεριμνούν ώστε οι στόχοι της πρόληψης μεγάλων ατυχημάτων και του περιορισμού των συνεπειών τους να λαμβάνονται υπόψη στόχοι α) κατά τη κατάρτιση των σχεδίων χρήσεων γης μέσα από τις κείμενες διαδικασίες σχεδιασμού του χώρου, και β) κατά τη διαδικασία έγκρισης περιβαλλοντικών όρων, σύμφωνα με τις κείμενες διατάξεις. Για την υλοποίηση αυτών των στόχων ελέγχεται:

α) η ίδρυση νέων εγκαταστάσεων

β) οι μετατροπές στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις που αναφέρονται στο άρθρο 11

γ) τα νέα έργα και οι γενικότερες δραστηριότητες (έργα διευθέτησης του χώρου, χώρων όπου συχνάζει το κοινό, άξονες μεταφοράς, ζώνες κατοικίας κ.λ.π.) που λόγω της θέσης και της γειτνίασης τους με αυτές τις εγκαταστάσεις, ενδέχεται να αυξήσουν τον κίνδυνο μεγάλου ατυχήματος ή να επιδεινώσουν τις συνέπειές του. Ειδικότερα οι ως άνω αρμόδιες για το σχεδιασμό του χώρου αρχές, λαμβάνουν υπόψη την ανάγκη να διατηρούνται μακροπρόθεσμα οι κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ των μονάδων που καλύπτονται από τη παρούσα απόφαση και των ζωνών κατοικίας, των κτιρίων και των ζωνών δημόσιας χρήσης, του κύριου οδικού δικτύου μεταφορών, στο μέτρο του δυνατού, των χώρων αναψυχής και των ζωνών που παρουσιάζουν ιδιαίτερο φυσικό ενδιαφέρον ή είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες και στην περίπτωση υφιστάμενων μονάδων, την ανάγκη για συμπληρωματικά τεχνικά μέσα, σύμφωνα με το άρθρο 5, ώστε να μην αυξάνονται οι κίνδυνοι για το κοινό.

Το **άρθρο 13**, περιέχει πληροφορίες για τα μέτρα ασφαλείας και για την ενημέρωση του κοινού, βάσει των διατάξεων του άρθρου 13 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ.

Το **άρθρο 14**, σχετίζεται με τα μέτρα και τις δράσεις που λαμβάνονται σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος. Αναλύονται τα μέτρα Πολιτικής Προστασίας που λαμβάνει η Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας της οικείας Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης, σε συνεργασία με όλους τους συναρμόδιους φορείς (Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, Πυροσβεστική Υπηρεσία, Υπουργεία), για την καταστολή του ατυχήματος, τον περιορισμό των επιπτώσεών του και την αποφυγή επανάληψής του. Επίσης, το άρθρο αναφέρει ότι ο ασκών την εκμετάλλευση υποχρεούται σε μια τέτοια περίπτωση να ενημερώσει γραπτώς την Αδειοδοτούσα Αρχή εντός ενός μηνός για τα αίτια του ατυχήματος, τις επιπτώσεις και τα μέτρα αντιμετώπισης που λήφθηκαν.

Το **άρθρο 15**, σχετίζεται με την έκθεση Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης των Αρμοδίων Αρχών και συγκεκριμένα του ΥΠΕΧΩΔΕ, στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή, βάσει του άρθρου 15 της Οδηγίας 96/82/ΕΚ και περιγράφει τις προδιαγραφές που θα πρέπει να τηρεί μια τέτοια έκθεση.

Το **άρθρο 16**, αναφέρει λεπτομέρειες σχετικά με τις επιθεωρήσεις της Αδειοδοτούσας Αρχής, προκειμένου να διαπιστωθεί αν τηρούνται τα προβλεπόμενα μέτρα για την πρόληψη ατυχημάτων, σύμφωνα και με την μελέτη ασφαλείας που υποβάλλει ο ασκών την εκμετάλλευση σύμφωνα με το άρθρο 8 της Απόφασης.

Το **άρθρο 17**, αναφέρεται στην ευρωπαϊκή εκπροσώπηση της χώρας και στην διακοινοτική ανταλλαγή πληροφοριών και εμπειριών σε θέματα πρόληψης ΒΑΜΕ. Ορίζεται το ΥΠΕΧΩΔΕ ως φορέας εκπροσώπησης της Ελλάδας στην Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.

Το **άρθρο 18**, προβλέπει την εμπιστευτικότητα στη διάδοση ορισμένων καίριων πληροφοριών που αφορούν τη δημόσια ασφάλεια, τις διεθνείς σχέσεις και την εθνική άμυνα, το εμπορικό ή βιομηχανικό απόρρητο κ.α.

Το **άρθρο 19**, αναφέρεται στις κυρώσεις που επιβάλλει η Αδειοδοτούσα Αρχή εάν τα μέτρα που έλαβε ο ασκών την εκμετάλλευση είναι ανεπαρκή, ή εάν υπάρχει καθυστέρηση στην υποβολή των απαραίτητων κοινοποιήσεων, μελετών ασφαλείας και άλλων στοιχείων.

Τέλος, τα **Παραρτήματα I-VI** της Απόφασης, έχουν συνταχθεί στα πρότυπα των αντίστοιχων παραρτημάτων της Κοινοτικής Οδηγίας 96/82/ΕΚ.

5.1.4 Μελέτη Ασφαλείας

Η απαίτηση για υποβολή της «Μελέτης Ασφαλείας» από τον ασκούντα την εκμετάλλευση των εγκαταστάσεων που υπάγονται στην οδηγία SEVESO II (πιο συγκεκριμένα που υπάγονται στο άρθρο 8 της οδηγίας) αποτελεί ένα από τα κυριότερα μέτρα του βασικού στόχου της οδηγίας Seveso II που είναι η πρόληψη των κινδύνων που μπορεί να οδηγήσουν σε ατυχήματα μεγάλης έκτασης στα οποία εμπλέκονται επικίνδυνες ουσίες και στον περιορισμό των συνεπειών τους για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Αποτελεί το εργαλείο, που μετά την αξιολόγηση και καταχώρησή της και τις διαδικασίες αδειοδότησης μιας εγκατάστασης, χρησιμοποιείται για την ενημέρωση και πληροφόρηση του κοινού και την κατάρτιση των εξωτερικών σχεδίων έκτακτης ανάγκης.

Τα στοιχεία και οι πληροφορίες που πρέπει να περιέχονται στην μελέτη ασφαλείας είναι:

1. Πληροφορίες σχετικά με το σύστημα διαχείρισης και οργάνωσης της εγκατάστασης για την πρόληψη των μεγάλων ατυχημάτων
2. Παρουσίαση του περιβάλλοντος της εγκατάστασης στην οποία συμπεριλαμβάνονται η γεωγραφική θέση της μονάδας, τα μετεωρολογικά, γεωλογικά και υδρογραφικά στοιχεία, ο προσδιορισμός των εγκαταστάσεων και άλλων δραστηριοτήτων της εγκατάστασης που ενδέχεται να εγκλείουν κίνδυνο μεγάλου ατυχήματος και η περιγραφή των περιοχών όπου μπορεί να συμβεί μεγάλο ατύχημα.
3. Περιγραφή της εγκατάστασης και συγκεκριμένα α. των κυριότερων δραστηριοτήτων και παραγομένων προϊόντων, των μερών της εγκατάστασης που έχουν σημασία από την άποψη της ασφαλείας, των πηγών κινδύνων μεγάλου ατυχήματος και των συνθηκών υπό τις οποίες θα μπορούσε να επισυμβεί το εν λόγω μεγάλο ατύχημα, συνοδευόμενη από περιγραφή των ληφθέντων προληπτικών μέτρων, β. των διαδικασιών παραγωγής ιδίως δε των μεθόδων λειτουργίας, γ. των επικίνδυνων ουσιών (ταυτότητας, ποσοτήτων, φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, επικινδυνότητας).
4. Αναγνώριση και ανάλυση των κινδύνων ατυχήματος και προληπτικά

μέσα: α. Λεπτομερής περιγραφή των σεναρίων για τα πιθανά μεγάλα ατυχήματα και των πιθανοτήτων τους ή των συνθηκών υπό τις οποίες μπορούν να συμβούν, μαζί με περιληπτική έκθεση των συμβάντων που μπορούν να συντελέσουν στην πρόκληση καθενός είτε πρόκειται για ενδογενή είτε για εξωγενή ως προς την εγκατάσταση αίτια. β. Εκτίμηση της έκτασης των συνεπειών των επισημασμένων μεγάλων ατυχημάτων. γ. Περιγραφή των τεχνικών παραμέτρων και του εξοπλισμού που έχει εγκατασταθεί για την ασφάλεια των εγκαταστάσεων.

5. Μέτρα προστασίας και επέμβασης για τον περιορισμό των συνεπειών ενός ατυχήματος: α. Περιγραφή του εξοπλισμού του εγκαταστημένου επιτόπου για τον περιορισμό των συνεπειών των τυχόν μεγάλων ατυχημάτων. β. Οργάνωση του συναγερμού και της επέμβασης. γ. Περιγραφή των κινητοποιήσιμων εσωτερικών και εξωτερικών μέσων. δ. Συγκεφαλαιωτική παρουσίαση των ανωτέρω στοιχείων Α, Β και Γ, αναγκαία για να συγκροτηθεί το εσωτερικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης που προβλέπεται στο άρθρο 11.

Η μελέτη ασφαλείας, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, περιλαμβάνει ανάλυση σεναρίων πιθανών μεγάλων ατυχημάτων της εγκατάστασης, για τα οποία έχει γίνει εκτίμηση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και το περιβάλλον των παρακείμενων περιοχών με τη χρήση κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων. Οι επιπτώσεις προκύπτουν από έκθεση σε τοξικές ουσίες, θερμική ακτινοβολία και υπερπίεση. Η πληρότητα των σεναρίων ατυχημάτων καθώς και η αναγκαιότητα για τον έλεγχο προσθέτων σεναρίων ατυχημάτων αξιολογείται από το ΥΠΑΝ στις πρώτες φάσεις της διαδικασίας αξιολόγησης της μελέτης.

Οι φορείς που εμπλέκονται στην διαδικασία αξιολόγησης είναι τα υπουργεία Ανάπτυξης, ΠΕΧΩΔΕ, Υγείας και Κοινωνικής Αλληλεγγύης, Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Απασχόλησης και Κοινωνικής Προστασίας, η τοπική Πυροσβεστική Υπηρεσία και το Γενικό Χημείο του Κράτους. Η διαδικασία αξιολόγησης, καταχώρησης και επανεξέτασης της μελέτης περιγράφεται στο άρθρο 8 της ΚΥΑ 12044/613/2007.

5.1.5 Οριακές τιμές επιπτώσεων και ζώνες ασφαλείας

5.1.5.1 Οριακές τιμές επιπτώσεων

Ως οριακές τιμές επιπτώσεων από τη δράση επικίνδυνων παραγόντων στο περιβάλλον ορίζονται τα επίπεδα επιβάρυνσης πέρα από τα οποία παρατηρούνται συγκεκριμένες βλάβες στα άτομα τα οποία εκτίθενται. Στην περίπτωση των βιομηχανικών ατυχημάτων ως επικίνδυνος παράγοντας θεωρείται η παρουσία τοξικών ουσιών στον αέρα, η θερμική ακτινοβολία και η υπερπίεση λόγω ωστικού κύματος. Δηλαδή, η υγεία των εργαζομένων στην εγκατάσταση ή / και του κοινού που βρίσκεται κοντά στο χώρο του ατυχήματος είναι δυνατόν να κινδυνεύσει από εγκαύματα λόγω έκθεσης σε θερμική ακτινοβολία, από τραυματισμούς που οφείλονται στο ωστικό κύμα και στα πρωτογενή και δευτερογενή θραύσματα λόγω εκρήξεων και από δηλητηρίαση ή χημικά εγκαύματα λόγω έκθεσης σε τοξικές ουσίες (εισπνοή, επαφή με το δέρμα, κατάποση τροφής).

Οι ως άνω οριακές τιμές προσδιορίζονται με βάση τη λαμβανόμενη δόση, η οποία υπολογίζεται από την ένταση του φαινομένου της έκθεσης στον επικίνδυνο παράγοντα και το χρόνο έκθεσης. Η έκθεση μπορεί να είναι χρόνια και αυτό συμβαίνει με όσους διαβιούν ή εργάζονται σε επιβαρημένο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα και περιστασιακή έκθεση όταν έχει περιορισμένη διάρκεια. Στην περίπτωση βιομηχανικού ατυχήματος, η έκθεση σε επικίνδυνους παράγοντες είναι περιστασιακή και ενδεικτικά αναφέρεται η έκθεση σε τοξική ουσία στον αέρα η οποία διαρκεί όσο και η διέλευση του τοξικού νέφους από την περιοχή στην οποία στέκεται ή κινείται ένα άτομο.

Κατά τη διαδικασία υπολογισμού των οριακών τιμών επιπτώσεων της χρόνιας έκθεσης, ο χρόνος έκθεσης θεωρείται σταθερός καθώς επίσης και η ένταση του επικίνδυνου παράγοντα (μέση τιμή) και ως δείκτης επιβάρυνσης λαμβάνεται η συγκέντρωση της ουσίας. Στην περίπτωση όμως της περιστασιακής έκθεσης, τόσο η ένταση του φυσικού φαινομένου όσο και ο χρόνος έκθεσης δεν είναι σταθερά και απαιτείται ο υπολογισμός της λαμβανόμενης δόσης με τη χρήση μαθηματικών τύπων. Ως εκ τούτου η λαμβανόμενη δόση, ήτοι η έκθεση σε κάποιο επικίνδυνο παράγοντα για καθορισμένο χρονικό διάστημα, αποτελεί κρίσιμο μέγεθος στη διαδικασία

εκτίμησης επιπτώσεων. Επισημαίνεται ότι οι οριακές τιμές επιπτώσεων που προτείνονται από διεθνείς οργανισμούς είναι συνδεδεμένες πάντα με έκθεση στον επικίνδυνο παράγοντα για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια.

Η εκτίμηση των επιπτώσεων από κάποια επιβάρυνση γίνεται είτε με τη μέθοδο της ατομικής διακινδύνευσης είτε με τη μέθοδο της ομαδικής διακινδύνευσης. Η ατομική διακινδύνευση εκφράζει το ποσοστό ατόμων ενός πληθυσμού το οποίο αναμένεται να παρουσιάσει κάποια βλάβη ή εξ ίσου την πιθανότητα ένα άτομο να υποστεί μια βλάβη για ένα δεδομένο επίπεδο δόσης. Συνήθως η ατομική διακινδύνευση εκφράζεται με οριακές τιμές που αντιστοιχούν στο γεγονός να συμβεί μια βλάβη στο 50% ή στο 1% ενός πληθυσμού ατόμων και τα αναγκαία στοιχεία για τον προσδιορισμό της αποκτώνται συνήθως από πειράματα με ζωικά είδη. Επισημαίνεται ότι στους σχετικούς δείκτες για την έκθεση σε τοξική ουσία αναφέρεται μόνο η συγκέντρωση αλλά πρέπει να θεωρείται δεδομένο ότι η διάρκεια της έκθεσης είναι σταθερή (συνήθως 30 min).

Η ομαδική διακινδύνευση εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί μια συγκεκριμένη επιβάρυνση σε αριθμό ατόμων ενός δεδομένου πληθυσμού από την εκδήλωση ενός συγκεκριμένου κινδύνου. Ο υπολογισμός της ομαδικής διακινδύνευσης εισάγει στους υπολογισμούς και τη πιθανότητα να συμβεί μια επιβάρυνση, οπότε είναι δυνατόν να αξιολογηθούν με πλέον ρεαλιστικό τρόπο τα ιδιαίτερα επικίνδυνα ατυχήματα, τα οποία έχουν όμως πολύ μικρή πιθανότητα να συμβούν ή τα μικρής επικινδυνότητας ατυχήματα, τα οποία όμως αναμένεται να συμβαίνουν με σχετικά μεγάλη πιθανότητα. Η μεθοδολογία αυτή απαιτεί την ύπαρξη εκτεταμένων βάσεων δεδομένων, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση των επί μέρους πιθανοτήτων από την αλυσίδα των συμβάντων μεταξύ του αρχικού ατυχήματος και της διασποράς στον περιβάλλοντα χώρο, γεγονός που την καθιστά δύσκολα εφαρμόσιμη στη χώρα μας.

Η εκτίμηση των επιπτώσεων σε ένα πληθυσμό ατόμων από ένα επικίνδυνο παράγοντα, στην Ελλάδα γίνεται με τη μέθοδο της ατομικής διακινδύνευσης και τη χρήση μίας “συνάρτησης δόσης - απόκρισης”. Η καταπόνηση στον οργανισμό ενός ατόμου συνδέεται με τη λαμβανόμενη δόση με τη λεγόμενη

συνάρτηση δόσης - απόκρισης η οποία στην συνέχεια αντιστοιχίζεται στο ποσοστό του απειλούμενου πληθυσμού από την εξεταζόμενη επίπτωση ή την πιθανότητα ένα άτομο να υποστεί τη συγκεκριμένη επίπτωση (Μνημόνιο συνάντησης εργασίας ΕΜΠ, 1998).

5.1.5.2 Επιπτώσεις από τοξικές ουσίες

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων από την παρουσία τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται συνήθως οριακές τιμές, οι οποίες εκφράζουν τη συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία εκτίθεται ένας πληθυσμός (συνήθως για 30 min) στην οποία αντιστοιχούν συγκεκριμένες επιδράσεις. Κατά κανόνα χρησιμοποιούνται τα παρακάτω όρια:

LOC (Level of Concern): Ορίζεται ως η συγκέντρωση στον αέρα μιας εξαιρετικά τοξικής ουσίας, πάνω από την οποία είναι δυνατόν να υπάρξουν βλάβες στην υγεία ενός ατόμου, για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα έκθεσης (συνήθως 30 min.). Το LOC προσδιορίζεται έμμεσα και συνήθως υπολογίζεται από το όριο IDLH (1/10).

IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health): Ορίζεται ως η μέγιστη συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία μπορεί να εκτεθεί ένας υγιής εργαζόμενος για 30 min και να διαφύγει χωρίς να υποστεί μη-ανατάξιμες βλάβες στην υγεία του ή τραυματισμούς που εμποδίζουν τη διαφυγή του (κυρίως ερεθισμούς ματιών ή πνευμόνων). Τα όρια IDLH αναφέρονται αποκλειστικά στις βλάβες που επέρχονται με την εισπνοή τοξικής ουσίας και αφορούν σε βλάβες σοβαρές και συγχρόνως μη-ανατάξιμες.

LC50 (Lethal Concentration 50): Ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία πεθαίνει το 50% των ανθρώπων, με εισπνοή της ουσίας αυτής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης (συνήθως 30 min).

LC1 (Lethal Concentration 1): Ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία είναι πιθανόν να συμβεί θάνατος στο 1% του πληθυσμού, με εισπνοή της ουσίας αυτής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης (30 min).

Οι οριακές τιμές επιπτώσεων τοξικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στην ελληνική πρακτική παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

5.1.5.3 Επιπτώσεις από θερμική ακτινοβολία

Οι επιπτώσεις της θερμικής ακτινοβολίας στον άνθρωπο είναι συνάρτηση της λαμβανόμενης δόσης θερμικής ακτινοβολίας, η οποία υπολογίζεται από την ένταση θερμικής ακτινοβολίας και από το χρόνο έκθεσης και εκφράζεται σε μονάδες TDU (1 TDU=1 $(KW/m^2)^{4/3}$ s). Η δόση υπολογίζεται για ακίνητο ή κινούμενο παρατηρητή και στην τελευταία περίπτωση η ένταση μεταβάλλεται με την απόσταση. Για τον υπολογισμό των επιπτώσεων συνήθως χρησιμοποιείται μία σχέση συνάρτησης δόσης-απόκρισης, η οποία συσχετίζεται με ένα ποσοστό το οποίο εκφράζει το ποσοστό του απειλούμενου πληθυσμού από μια επίπτωση ή την πιθανότητα ένα άτομο να υποστεί τη συγκεκριμένη επίπτωση. Οι επιπτώσεις που εξετάζονται στην ελληνική πρακτική είναι εγκαύματα α', β' και γ' βαθμού.

Οι οριακές τιμές που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 (Μνημόνιο συνάντησης εργασίας ΕΜΠ, 1998).

Πίνακας 3. Όρια Επιπτώσεων Θερμικής Ακτινοβολίας

Επιβάρυνση	**Δόση (TDU)**	**Ένταση ακτινοβολίας (KW/m2)**
Εγκαύματα γ' βαθμού σε ποσοστό πάνω από 50 %	1500	$q = 241/t^{3/4}$*
Εγκαύματα γ' βαθμού στο 1% του πληθυσμού	450	$q = 97.7/t^{3/4}$*
Εγκαύματα α' βαθμού σε σημαντικό μέρος πληθυσμού	170	$q = 47.1/t^{3/4}$*

* Για φαινόμενο "bleve" ο χρόνος έκθεσης ακίνητου παρατηρητή λαμβάνεται ίσος με τη διάρκεια του φαινομένου, ενώ για "pool fire" ίσος με 40 sec οπότε η ένταση ακτινοβολίας για ακίνητο παρατηρητή είναι 15 KW/m2, 6 KW/m^2 και 3 KW/m^2 για δόσεις 1500, 450 και 170 TDU αντίστοιχα. Ο τύπος ισχύει για ακίνητο παρατηρητή.

5.1.5.4 Επιπτώσεις από ωστικό κύμα

Οι επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό εξαιτίας ωστικού κύματος από έκρηξη εκρηκτικών αερίων, είναι οι ακόλουθες:

- *Αμεσες επιδράσεις*: στις άμεσες επιδράσεις της έκρηξης περιλαμβάνονται ο τραυματισμός των πνευμόνων και η διάρρηξη του ακουστικού τύμπανου.
- *Επιδράσεις λόγω μετατόπισης*: λόγω του ωστικού κύματος ένα άτομο μπορεί να εκτιναχθεί σε σχετικά μεγάλη απόσταση και να τραυματιστεί σοβαρά κατά την πτώση του ή από πρόσκρουση σε διάφορα αντικείμενα.
- *Επιδράσεις από θραύσματα*: κατά τη διάρκεια έκρηξης διάφορα αντικείμενα, όπως κομμάτια μετάλλων, γυαλιού, σκυροδέματος, εκτινάσσονται σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις. Τα θραύσματα αυτά μπορεί να τραυματίσουν ή ακόμη και να θανατώσουν ένα άτομο. Για τη μελέτη των επιδράσεων από θραύσματα υπάρχουν δύο κατηγορίες θραυσμάτων: εκείνα που είναι αιχμηρά (fragments), όπως τα κομμάτια γυαλιού και εκείνα που δεν είναι (debris), όπως τα κομμάτια από σκυρόδεμα.
- *Επιδράσεις από καταρρεύσεις*: ένα κτίριο είναι δυνατόν να καταρρεύσει από μια έκρηξη κατά πολύ ασθενέστερη από εκείνη που απαιτείται για να υπάρξουν άμεσες επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Τα άτομα που βρίσκονται μέσα στο κτίριο υπό κατάρρευση μπορεί να τραυματιστούν σοβαρά ή ακόμα και πεθάνουν.

Ένα από τα κύρια αποτελέσματα μιας έκρηξης είναι το ωστικό κύμα το οποίο προκαλείται από την απότομη αύξηση της πίεσης και κινείται από το κέντρο της έκρηξης με μια δεδομένη ταχύτητα.

Οι οριακές τιμές επιπτώσεων από υπερπίεση που χρησιμοποιούνται στην ελληνική πρακτική παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 (Μνημόνιο συνάντησης εργασίας ΕΜΠ, 1998).

Πίνακας 4. Οριακές Τιμές Υπερπίεσης

Είδος επιβάρυνσης*	**Υπερπίεση(mbar)**
Σοβαρές και μη επισκευάσιμες ζημιές στο φέροντα οργανισμό και τους τοίχους κτιρίων	350
Ζημιές στο φέροντα οργανισμό και σε εξωτερικούς ή εσωτερικούς τοίχους	140
Ζημιές σε πόρτες και παράθυρα, ελαφρές ρηγματώσεις σε	50

τοίχους	

* Θεωρείται ότι οι έμμεσες επιπτώσεις στον πληθυσμό (πχ λόγω πτώσης τοίχων) είναι σημαντικότερες από τις άμεσες.

5.1.5.5 Ζώνες προστασίας

Η διαχείριση βιομηχανικών ατυχημάτων απαιτεί την υιοθέτηση ειδικών ζωνών γύρω από τη θέση του ατυχήματος ανάλογα με την ένταση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και απαιτεί επίσης τον καθορισμό των αντίστοιχων ορίων για τον προσδιορισμό των ζωνών αυτών. Στις ΗΠΑ συνήθως προσδιορίζεται μια κυκλική περιοχή, έξω από τα όρια της οποίας ο πληθυσμός θα πρέπει να θεωρείται ασφαλής, ενώ στο εσωτερικό της προσδιορίζονται επί μέρους ζώνες οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες προστατευτικές δράσεις (διάσωση, εκκένωση, παραμονή σε κλειστούς χώρους) καθώς και μια μικρή ζώνη όπου μπορεί να κινείται μόνο αριθμός ατόμων που ασχολείται με την αντιμετώπιση του ατυχήματος. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό οι ζώνες που προσδιορίζονται είναι οι ακόλουθες:

- Θερμή περιοχή (hot area): μικρή περιοχή γύρω από το χώρο του ατυχήματος όπου κινούνται μόνο οι ομάδες αντιμετώπισης του ατυχήματος.
- Απαγορευμένη περιοχή (restricted area): περιοχή όπου εκδηλώνονται οι δράσεις προστασίας του πληθυσμού.
- Ασφαλής περιοχή (safe area): στην περιοχή αυτή δεν απαιτείται καμία δράση προστασίας.

Επίσης, η μεθοδολογία που ακολουθείται από την Ολλανδική Πυροσβεστική Ακαδημία διακρίνει τις ακόλουθες ζώνες :

- Ζώνη πιθανών θανάτων (lethal zone): στη ζώνη αυτή συμβαίνουν σοβαροί τραυματισμοί και θάνατοι σε σημαντικό ποσοστό.
- Ζώνη σοβαρών τραυματισμών (injurious zone): για τα περισσότερα άτομα της ζώνης αυτής αναμένονται μη-ανατάξιμες βλάβες στην υγεία τους και πιθανοί θάνατοι σε μικρό ποσοστό του πληθυσμού. Στη ζώνη αυτή γίνονται συστηματικές ενέργειες διάσωσης από τα σωστικά συνεργεία.
- Ζώνη μικρών τραυματισμών (unsafe zone): δεν αναμένονται θάνατοι ενώ σε σχετικά μικρό αριθμό ατόμων αναμένονται βλάβες στην υγεία τους. Η

διάσωση γίνεται κύρια με ίδια μέσα από τον πληθυσμό και σε λίγες περιπτώσεις από τα σωστικά συνεργεία.

- Ασφαλής ζώνη (safe zone): στη ζώνη αυτή δεν απαιτούνται μέτρα προστασίας.

Στην Ελλάδα έχουν υιοθετηθεί οι παρακάτω ζώνες προστασίας, βασισμένες στις ανωτέρω μεθοδολογίες (Μνημόνιο συνάντησης εργασίας ΕΜΠ, 1998):

- ***Ζώνη Ι - Προστασία Δυνάμεων Καταστολής***: αντιστοιχεί στη Ζώνη πιθανών θανάτων της Ολλανδικής Πυροσβεστικής Ακαδημίας.
- ***Ζώνη ΙΙ - Προστασία Πληθυσμού - Σοβαρές Επιπτώσεις***: αντιστοιχεί στη Ζώνη σοβαρών τραυματισμών της Ολλανδικής Πυροσβεστικής Ακαδημίας.
- ***Ζώνη ΙΙΙ - Προστασία Πληθυσμού - Μέτριες Επιπτώσεις***: αντιστοιχεί στη Ζώνη μικρών τραυματισμών της Ολλανδικής Πυροσβεστικής Ακαδημίας.

Οι οριακές τιμές που αντιστοιχούν στις ανωτέρω ζώνες προστασίας συνοψίζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Αντιστοίχηση Οριακών Τιμών και Ζωνών Προστασίας

Ζώνες Προστασίας	**Τοξικές ουσίες* Συγκέντρωση (mg/m3)**	**Θερμική Ακτινοβολία** Δόση (TDU)**	**Ωστικό Κύμα Υπερπίεση (mbar)**
Ζώνη Ι Προστασίας Δυνάμεων Καταστολής	LC50	1500	350
Ζώνη ΙΙ Προστασίας Πληθυσμού Σοβαρές Επιπτώσεις	LC1	450	140
Ζώνη ΙΙΙ Προστασίας Πληθυσμού Μέτριες Επιπτώσεις	IDLH	170	50

* Ως μέγιστος χρόνος έκθεσης ακίνητου παρατηρητή θεωρείται t=30min.

** Για φαινόμενο “bleve” ο χρόνος έκθεσης ακίνητου παρατηρητή λαμβάνεται ίσος με τη διάρκεια του φαινομένου, ενώ για “pool fire” ίσος με 40 sec, οπότε η ένταση ακτινοβολίας για ακίνητο παρατηρητή είναι 6 KW/m2 για τη Ζώνη ΙΙ και 3 KW/m^2 για τη Ζώνη ΙΙΙ.

5.1.6 Σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης ΒΑΜΕ στην Ελλάδα

Βάσει της απαίτησης της ΚΥΑ12044/613/2007 η Υπηρεσία Πολιτικής

Προστασίας της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης που υπάγεται η εξεταζόμενη SEVESO II εγκατάσταση, στο πλαίσιο εφαρμογής του Γενικού Σχεδίου Πολιτικής Προστασίας «ΞΕΝΟΚΡΑΤΗΣ», μεριμνά για την κατάρτιση και εφαρμογή εξωτερικού σχεδίου έκτακτης ανάγκης, που ονομάζεται Ειδικό Σχέδιο Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (Ειδικό ΣΑΤΑΜΕ), σύμφωνα με την καταχωρημένη μελέτη ασφαλείας και συνεκτιμώντας το ενδεχόμενο πολλαπλασιαστικών φαινομένων (φαινόμενο domino). Ο ασκών την εκμετάλλευση παρέχει στην Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας όλες τις αναγκαίες πληροφορίες ώστε να τη διευκολύνει στην κατάρτιση του εν λόγω σχεδίου.

Το Ειδικό ΣΑΤΑΜΕ καταρτίζεται σε συνεργασία με τις Υπηρεσίες της οικείας Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης και αν κρίνεται σκόπιμο και της Περιφέρειας, με άλλα κατά περίπτωση αρμόδια Υπουργεία, οργανισμούς και φορείς καθώς και με εκπρόσωπο της τοπικής Πυροσβεστικής Υπηρεσίας και αφού προηγηθεί διαβούλευση με το προσωπικό που εργάζεται μέσα στην μονάδα, συμπεριλαμβανομένου του σχετικού εργαζόμενου προσωπικού υπεργολαβίας. Για την κατάρτιση ή επικαιροποίηση των ΣΑΤΑΜΕ, η ως άνω Υπηρεσία το δημοσιοποιεί με κάθε πρόσφορο μέσο προκειμένου το κοινό να διατυπώσει τη γνώμη του.

Η Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης είναι επίσης υπεύθυνη για τη διενέργεια ασκήσεων ετοιμότητας σε συνεργασία με τον ασκούντα την εκμετάλλευση και τους συναρμόδιους φορείς, καθώς και για την εφαρμογή και την εκπαίδευση βάσει του Ειδικού ΣΑΤΑΜΕ.

Το Ειδικό ΣΑΤΑΜΕ υποβάλλεται στην Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας προς έγκριση, επανεξέταση, δοκιμή και ενδεχομένως αναθεώρηση και εκσυγχρονισμό κάθε τρία (3) χρόνια και σε κάθε περίπτωση οποτεδήποτε συμβεί σημαντική αλλαγή στη λειτουργία της εγκατάστασης ή όπως ορίζουν οι σχετικές οδηγίες της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας. Η επανεξέταση αυτή λαμβάνει υπόψη τις μετατροπές στη σχετική εγκατάσταση, στις οικείες υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, τις νέες τεχνικές γνώσεις και τις γνώσεις όσον αφορά στην αντιμετώπιση μεγάλων ατυχημάτων. Στην χώρα μας μέχρι στιγμής έχουν καταρτιστεί 105 Ειδικά ΣΑΤΑΜΕ.

Επιπλέον, στα πλαίσια του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης ΒΑΜΕ έχουν υλοποιηθεί και τα ακόλουθα έργα:

- Γενικά ΣΑΤΑΜΕ για τις περιοχές του Θριασίου Πεδίου, της περιοχής Πειραιά – ΟΛΠ - Περάματος και της Θεσσαλονίκης. Τα σχέδια αυτά δημιουργήθηκαν με σκοπό την καθοδήγηση των Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων της χώρας για τη σύνταξη των Ειδικών ΣΑΤΑΜΕ των SEVESO II εγκαταστάσεων της αρμοδιότητάς τους.
- Επιχειρησιακό Κέντρο Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης.
- Συστήματα Διαχείρισης Ασφάλειας σε Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις Διακίνησης Φυτοπροστατευτικών Προϊόντων
- Διαχείριση Επικινδυνότητας σε Χώρους Αποθήκευσης Επικίνδυνων Ουσιών σε Αεροδρόμια, Λιμάνια και Σιδηροδρομικούς Σταθμούς.

5.1.7 Θεσμοθετημένες αποστάσεις βιομηχανικών εγκαταστάσεων από οικισμούς

Η υφιστάμενη χρήση γης μιας περιοχής αποτελεί σημαντική παράμετρο για το εάν επιτρέπεται η εγκατάσταση μιας νέας βιομηχανικής μονάδας στην εν λόγω περιοχή κατά την διαδικασία αδειοδότησης (άρθρο 7 του Ν.2516/97).

Η χρήση γης σε μία συγκεκριμένη περιοχή της Ελλάδος καθορίζεται από τα εξής στοιχεία:

- Μέσα στα πλαίσια δήμων για τους οποίους υπάρχει Γενικό Πολεοδομικό Σχέδιο (ΓΠΣ), η χρήση γης καθορίζεται από αυτό το ΓΠΣ. Μέσα στα πλαίσια του ΓΠΣ περιγράφεται και η ύπαρξη στη συγκεκριμένη περιοχή, Βιομηχανικών Περιοχών. Η χρήση γης στα πλαίσια των Βιομηχανικών Περιοχών ορίζεται από το Π.Δ.3/ 6.3.1987 (ΦΕΚ 166Δ΄) και τον Ν.2545/1997.
- Εκτός των ορίων των Γενικών Πολεοδομικών Σχεδίων, η χρήση γης διέπεται από συγκεκριμένους κανόνες οι οποίοι προσδιορίζονται στα Π.Δ. της 31.5.85 (ΦΕΚ Δ΄270), της 3.5.85 (ΦΕΚ Δ΄181), της 13.3.81 (ΦΕΚ Δ΄138) και της 16.5.89 (ΦΕΚ Δ΄293). Στα διατάγματα αυτά ορίζεται η ελάχιστη απόσταση από οικισμούς διαφορετικών πληθυσμιακών πυκνοτήτων, στην

οποία μπορούν να εγκατασταθούν δραστηριότητες διαφορετικού βαθμού όχλησης. Έτσι, γύρω από πόλεις και οικισμούς με πληθυσμό μεγαλύτερο των 2000 κατοίκων βάσει της τελευταίας εκάστοτε απογραφής και σε ζώνη που εκτείνεται σε πλάτος 700 μέτρα, για πόλεις και οικισμούς με πληθυσμό από 2001 μέχρι και 10000 κατοίκους και 1000 μέτρα για πόλεις με πληθυσμό άνω των 10000 κατοίκων, απαγορεύεται η ανέγερση νέων βιομηχανικών εγκαταστάσεων μέσης ή υψηλής όχλησης. Για τους οικισμούς οι οποίοι έχουν πληθυσμό μέχρι 2000 κατοίκους, απαγορεύεται η ανέγερση βιομηχανικών και βιοτεχνικών εγκαταστάσεων μέσης και υψηλής όχλησης εντός των εγκεκριμένων ορίων των οικισμών και εντός ζώνης που εκτείνεται περιμετρικά του οικισμού και σε απόσταση 500μ. από τα όρια του οικισμού, όπως αυτά ισχύουν. Το πλάτος της ζώνης αυτής μειώνεται μέχρι τα 200 μ. σε όλη την περίμετρο του οικισμού ή σε τμήμα αυτής, για τους στάσιμους οικισμούς, όπου ο όρος στάσιμος οικισμός, προσδιορίζεται στο Π.Δ. της 3.5.85 (ΦΕΚ Δ΄181).

Οι παραπάνω προκαθορισμένες αποστάσεις ισχύουν υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν άλλες δεσμευτικές αποφάσεις για την περιοχή, οι οποίες να προσδιορίζουν συγκεκριμένους περιορισμούς λόγω ειδικών συνθηκών π.χ. περιοχές προστασίας υδροβιότοπων, αρχαιολογικοί χώροι, δασικές εκτάσεις ή φυσικού κάλλους, γη υψηλής παραγωγικότητας ή για εγκαταστάσεις που δεν ενέχουν μεγάλη επικινδυνότητα (πρόκληση ΒΑΜΕ). Επιπλέον, οι ανωτέρω αποστάσεις αντιστοιχούν στον βαθμό όχλησης μιας εγκατάστασης ο οποίος κυρίως συνδέεται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της λειτουργίας της εν λόγω εγκατάστασης και όχι με την επικινδυνότητά της. Επομένως, δεν επαρκούν για τον χωροταξικό σχεδιασμό γύρω από μία Seveso II εγκατάσταση.

5.2. Επισκόπηση μεθοδολογιών εκτίμησης επικινδυνότητας

Οι μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας έχουν αναπτυχθεί για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι υπάρχουσες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για το Σχεδιασμό Χρήσεων Γης στην παρακείμενη περιοχή επικίνδυνων εγκαταστάσεων μπορούν να θεωρηθούν ως τμήμα των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση επικινδυνότητας των βιομηχανικών

εγκαταστάσεων, αν και σε ορισμένα παραδείγματα αποτελούν ξεχωριστές μεθοδολογίες.

Οι μεθοδολογίες εκτίμησης επικινδυνότητας συνήθως συνίστανται από τα ακόλουθα τέσσερα είδη αναλύσεων σε διάφορους συνδυασμούς:

1. Ποιοτική Ανάλυση
2. Ποσοτική Ανάλυση
3. Ντετερμινιστική Ανάλυση (το επίπεδο ασφάλειας ορίζεται ως διακριτή τιμή).
4. Πιθανολογική Ανάλυση (το επίπεδο ασφάλειας ορίζεται ως συνάρτηση πιθανότητας).

Αναφορικά με τον τρόπο που χρησιμοποιείται η πιθανότητα να συμβεί κάποιο ατύχημα, μπορούμε να ξεχωρίσουμε δύο κύριες κατηγορίες μεθοδολογιών: η πρώτη εστιάζει στην εκτίμηση των επιπτώσεων ενός, συχνά προκαθορισμένου, αριθμού "εφικτών" σεναρίων που οδηγούν σε ατύχημα και ονομάζεται "βάσει επιπτώσεων" ή ντετερμινιστική μεθοδολογία (consequence based), ενώ η δεύτερη δεν εστιάζει μόνο στις επιπτώσεις αλλά και στην πιθανότητα να συμβεί κάποιο πιθανό σενάριο ατυχήματος και λέγεται "βάσει επικινδυνότητας" ή πιθανολογική μεθοδολογία (risk based). Για μία δεδομένη εγκατάσταση, η πρώτη μεθοδολογία υποδεικνύει την περιοχή εντός της οποίας θα συμβούν θάνατοι και σοβαροί τραυματισμοί εξαιτίας των σεναρίων ατυχημάτων που εξετάζονται, ενώ η δεύτερη μεθοδολογία υποδεικνύει την περιοχή εντός της οποίας υπάρχει πιθανότητα ενός συγκεκριμένου επιπέδου τραυματισμών ή θανάτων που προκύπτει από την ανάλυση μεγάλου αριθμού πιθανών σεναρίων ατυχημάτων (LUP Guidelines 2006).

Εκτός από τις ανωτέρω κατηγορίες, χρησιμοποιούνται και άλλες μεθοδολογίες που στην ουσία είναι συνδυασμός των δύο κύριων κατηγοριών ή έχουν προκύψει από αυτές.

Στην συνέχεια αναλύονται οι κυριότερες μεθοδολογίες.

5.2.1 Η ντετερμινιστική μεθοδολογία

Η ντετερμινιστική μεθοδολογία βασίζεται στην εκτίμηση των επιπτώσεων "εφικτών" σεναρίων ατυχημάτων, χωρίς να απαιτείται αναλυτικός

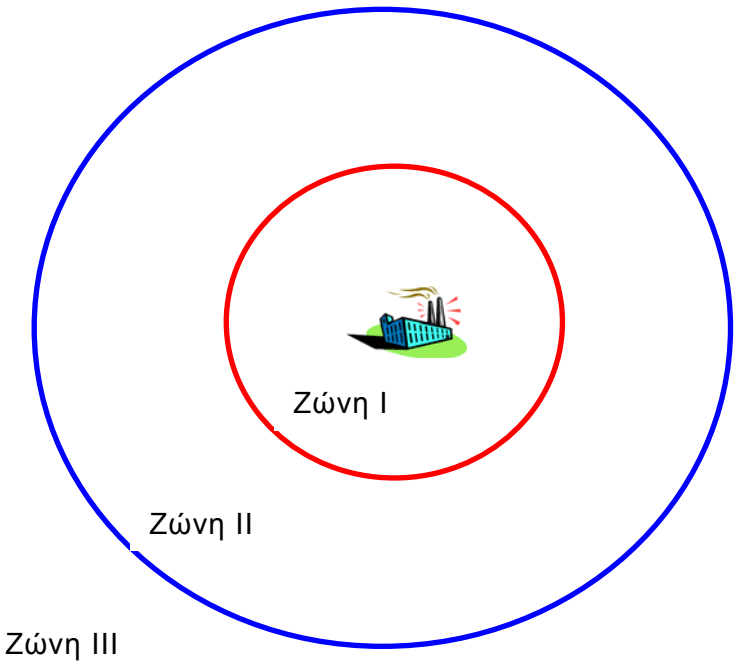
υπολογισμός της πιθανότητας πραγματοποίησης των εν λόγω σεναρίων. Με αυτό τον τρόπο παρακάμπτονται οι υπολογισμοί των συχνοτήτων εμφάνισης πιθανών ατυχημάτων και οι σχετικές αβεβαιότητες.

Η βασική ιδέα πίσω από αυτές τις προσεγγίσεις είναι η ύπαρξη ενός ή περισσοτέρων "χειρότερου(-ων) σεναρίου(-ων)", τα οποία προσδιορίζονται από γνώμες ειδικών, ιστορικά δεδομένα και ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με τους κινδύνους που ενέχει μία εγκατάσταση. Αν έχουν ληφθεί επαρκή μέτρα ώστε να προστατεύεται ο πληθυσμός που παρευρίσκεται κοντά στην βιομηχανική μονάδα από το χειρότερο σενάριο ατυχήματος, τότε ο πληθυσμός θα προστατεύεται επαρκώς και για τα λιγότερο σοβαρά ατυχήματα. Επομένως, η μέθοδος αυτή αξιολογεί μόνο το βαθμό των επιπτώσεων των ατυχημάτων, και όχι την πιθανότητα πραγματοποίησής τους, η οποία λαμβάνεται εμμέσως υπόψη.

Τα προ-επιλεγμένα "σενάρια αναφοράς" μπορούν να επιλεγούν με διάφορους τρόπους, είτε μέσω ποσοτικής ή μη-ποσοτικής εκτίμησης της πιθανότητας πραγματοποίησης ενός σεναρίου, είτε απλά μέσω των κρίσεων ειδικών. Στη συνέχεια, τα πιο "εφικτά" από τα σενάρια αναφοράς, προσδιορίζονται και χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό χρήσεων γης στην παρακείμενη περιοχή των επικίνδυνων εγκαταστάσεων. Κάποια σενάρια που προκαλούν σημαντικά αρνητικές επιπτώσεις μπορεί να μη ληφθούν υπόψη για το σχεδιασμό χρήσεων γης, αν έχουν εξαιρετικά μικρή πιθανότητα εμφάνισης, αλλά πιθανόν να εξεταστούν στα σχέδια έκτακτης ανάγκης.

Οι επιπτώσεις ενός ατυχήματος εξετάζονται μέσω του υπολογισμού των αποστάσεων στις οποίες τα φυσικά και / ή τα σχετικά με την ανθρώπινη υγεία μεγέθη που περιγράφουν τις επιπτώσεις (π.χ. συγκέντρωση τοξικών ουσιών) φθάνουν, για μία δεδομένη περίοδο έκθεσης, σε οριακές τιμές έκθεσης που αντιστοιχούν στην εμφάνιση ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων (π.χ. μη-αντιστρέψιμες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ή θάνατος). Οι καιρικές συνθήκες για την μοντελοποίηση των επιπτώσεων μπορεί να αποτελούν μέρος του "χειρότερου σεναρίου" ή ένα μέσο όρο των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Έτσι, ορίζονται οι ζώνες για τις οποίες έχουν εφαρμογή οι περιορισμοί του σχεδιασμού χρήσεων γης (*σχήμα 23*).

Η μεθοδολογία αυτή αντιστοιχεί στην ντετερμινιστική αρχή ότι το επίπεδο ασφάλειας και επομένως οι ανεπιθύμητες συνέπειες ορίζονται ως διακριτές τιμές. Οι περιορισμοί στο σχεδιασμό είναι ενιαίοι για όλη την περιοχή εντός της υπολογισμένης απόστασης ασφαλείας (LUP Guidelines 2006).



Σχήμα 23: Οι περιοριστικές ζώνες σχεδιασμού χρήσεων γης σύμφωνα με την ντετερμινιστική μεθοδολογία. Οι ζώνες αντιστοιχούν σε προκαθορισμένες οριακές τιμές έκθεσης

5.2.2 Η πιθανολογική μεθοδολογία

Η δεύτερη κύρια κατηγορία μεθοδολογιών που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό χρήσεων γης είναι η πιθανολογική ή "βάσει επιπτώσεων" μεθοδολογία. Βασίζεται στον υπολογισμό της σοβαρότητας των επιπτώσεων των εξεταζόμενων ατυχημάτων και στην εκτίμηση της πιθανότητας της εμφάνισής τους. Για την εκτίμηση της πιθανότητας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, από απλή επιλογή σεναρίων και συχνοτήτων εμφάνισης εναρκτήριων γεγονότων από σχετικές βάσεις δεδομένων μέχρι την εφαρμογή σύνθετων εργαλείων.

Σε γενικές γραμμές, οι πιθανολογικές μεθοδολογίες προσδιορίζουν την επικινδυνότητα ως συνδυασμό των επιπτώσεων από ένα σύνολο πιθανών ατυχημάτων και την πιθανότητα των εν λόγω ατυχημάτων. Ο βαθμός

ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων μπορεί να διαφέρει.

Μία πιθανολογική προσέγγιση αποτελείται συνήθως από πέντε φάσεις:

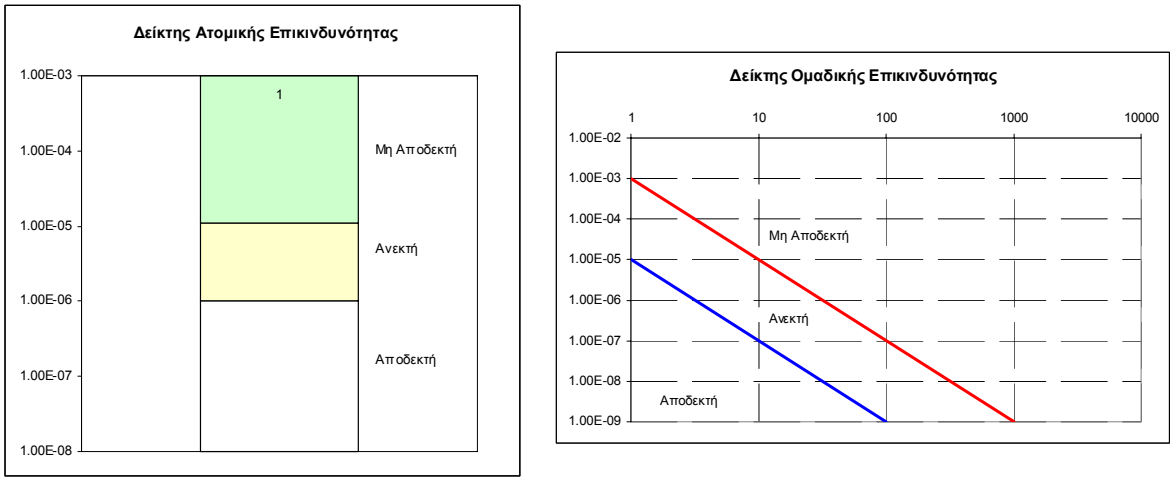
1. Αναγνώριση των πηγών κινδύνων που ενέχει η εγκατάσταση (ένα συνήθως ντετερμινιστικό βήμα που περιλαμβάνει την επιλογή ρεαλιστικών σεναρίων).
2. Εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης των ενδεχόμενων ατυχημάτων.
3. Εκτίμηση του μεγέθους των επιπτώσεων των ατυχημάτων και της πιθανότητάς τους.
4. Ενσωμάτωση σε γενικούς δείκτες επικινδυνότητας των δεικτών τόσο της ατομικής όσο και της ομαδικής διακινδύνευσης (individual και societal risk).
5. Σύγκριση των υπολογισμένων δεικτών επικινδυνότητας με τα κριτήρια αποδοχής.

Δύο μέτρα της επικινδυνότητας μπορούν να υπολογιστούν η ατομική και η ομαδική διακινδύνευση. Η ατομική διακινδύνευση συνήθως παρουσιάζεται με καμπύλες ισο-επικινδυνότητας, ενώ καμπύλες Συχνότητας – Αριθμού τραυματισμών (F-N) συνήθως χρησιμοποιούνται για την παρουσίαση της ομαδικής διακινδύνευσης.

Για τον υπολογισμό της ατομικής και ομαδικής διακινδύνευσης δεν χρειάζεται μόνο η εκτίμηση των επιπτώσεων (που γίνεται εφαρμόζοντας παρόμοια μοντέλα και εργαλεία όπως και στις ντετερμινιστικές προσεγγίσεις), αλλά και η εκτίμηση της πιθανότητας να συμβούν τα ατυχήματα που εξετάζονται. Η πιθανότητα κάποιων παραμέτρων που επίσης ορίζουν ένα πιθανό σενάριο ατυχήματος, όπως οι καιρικές συνθήκες, κατεύθυνση ανέμου κλπ, συνυπολογίζονται στους δείκτες επικινδυνότητας. Η ατομική διακινδύνευση εφαρμόζεται για την προστασία κάθε ανθρώπου από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις επικίνδυνες ουσίες μιας εγκατάστασης και δεν εξαρτάται από τον πληθυσμό των ανθρώπων γύρω από αυτήν, ή τον αριθμό των θυμάτων από ενδεχόμενα ατυχήματα. Εκφράζει ένα δεδομένο επίπεδο επικινδυνότητας, πάνω από το οποίο κανένας δεν πρέπει να εκτίθεται.

Το κριτήριο της ομαδικής διακινδύνευσης προσθέτει μία άλλη διάσταση στην εκτίμηση της επικινδυνότητας λαμβάνοντας υπόψη και το πλήθος των ατόμων

που εκτίθενται στα διάφορα επίπεδα ατομικής διακινδύνευσης. Για τους υπολογισμούς συνυπολογίζονται όχι μόνο η πυκνότητα του πληθυσμού γύρω από την εξεταζόμενη εγκατάσταση, αλλά και η διακύμανση του πληθυσμού κατά την διάρκεια της ημέρας, καθώς και η δυνατότητα εφαρμογής μέτρων εκτάκτου ανάγκης (διαχωρισμός μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών χώρων). Συνήθως η εφαρμογή του κριτηρίου της ομαδικής διακινδύνευσης είναι συμπληρωματική της χρήσης του κριτηρίου της ατομικής διακινδύνευσης. Η φιλοσοφία πίσω από την εφαρμογή του είναι το γεγονός ότι ακόμα και αν δεν υπάρχει ασυμβατότητα με το κριτήριο της ατομικής διακινδύνευσης, αν μία περιοχή με μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα βρίσκεται πολύ κοντά στις "αποστάσεις ασφαλείας" μιας εγκατάστασης, είναι πιθανό ένα ατύχημα να προκαλέσει μεγάλο αριθμό θυμάτων.



Σχήμα 24: Τα κριτήρια ατομικής κι ομαδικής διακινδύνευσης

Συνήθως κατά την εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας, ορίζονται τρεις περιοχές (*σχήμα 24*): μία αποδεκτού ρίσκου περιοχή, μία μη-αποδεκτού και μία που η επικινδυνότητα θεωρείται ανεκτή, ωστόσο επιβάλλεται η μείωσή της. Η τρίτη περιοχή ονομάζεται ALARA από τα αρχικά της φράσης: As Low As Reasonably Achievable (τόσο χαμηλά όσο είναι λογικά εφικτό) (LUP Guidelines 2006).

5.2.3 Υβριδικές μέθοδοι

5.2.3.1 Ημι-ποσοτικές μεθοδολογίες

Οι ημι-ποσοτικές μεθοδολογίες μπορούν να θεωρηθούν ως ειδική υποκατηγορία των πιθανολογικών ή των ντετερμινιστικών μεθόδων. Σε αυτές τις μεθοδολογίες συνδυάζονται ποσοτικά στοιχεία ανάλυσης με ποιοτικά.

Σε γενικές γραμμές, ο βαθμός επικινδυνότητας από την λειτουργία μίας μονάδας, που υπάγεται στην οδηγία SEVESO και βρίσκεται κοντά σε κατοικημένη ή άλλη ευαίσθητη περιοχή, εξαρτάται από:

- τα σχετικά σενάρια ατυχήματος,
- τις συχνότητες εμφάνισής τους,
- την κινητική κάθε σεναρίου (πόσο γρήγορα αναπτύσσονται τα επικίνδυνα φαινόμενα και πόσο εύκολο είναι για τις μονάδες καταστολής να δράσουν),
- την ένταση των επικίνδυνων φαινομένων,
- την ευπάθεια της περιοχής, και
- τον πληθυσμό που έχει επηρεαστεί.

Κάθε μία παράμετρος από τις ανωτέρω μπορεί να υπολογιστεί είτε ποσοτικά (δηλαδή υπολογίζοντας την ακριβή τιμή της παραμέτρου με ή χωρίς το σχετικό μέτρο αβεβαιότητας), είτε ημι-ποσοτικά (δηλαδή υπολογίζοντας διάστημα αντί συγκεκριμένης τιμής), ή ποιοτικά (δίνοντας περιγραφή του μεγέθους της παραμέτρου.). Στις ημι-ποσοτικές μεθοδολογίες άλλες παράμετροι υπολογίζονται ποσοτικά και άλλες ποιοτικά. Τα αποδεκτά όρια υπολογίζονται αναλύοντας το επίπεδο κάθε παραμέτρου και εφαρμόζοντας συγκεκριμένους συνδυαστικούς κανόνες. Για παράδειγμα, αν η συχνότητα εμφάνισης ενός σεναρίου είναι υψηλή και η ένταση των επικίνδυνων φαινομένων ξεπερνά τις οριακές τιμές έκθεσης, τότε πιθανόν να εφαρμοστούν περιορισμοί στις χρήσεις γης, ώστε μα μειωθεί ο πληθυσμός που θα επηρεαστεί από τις αρνητικές επιπτώσεις. Επιπλέον, περιορισμοί μπορούν να εφαρμοστούν, για να διατηρηθεί η ευπάθεια της περιοχής σε χαμηλά επίπεδα (οπότε και δεν θα επιτραπεί η ανέγερση σχολείων ή νοσοκομείων στην περιοχή) (LUP Guidelines 2006).

5.2.3.2 Μεθοδολογίες γενικών αποστάσεων ασφαλείας

Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν πίνακες με καθορισμένες αποστάσεις ασφαλείας μπορούν να θεωρηθούν ως μία απλοποιημένη μορφή των ντετερμινιστικών μεθοδολογιών. Οι αποστάσεις ασφαλείας έχουν προκύψει από μία γενική εκτίμηση των επιπτώσεων βάσει επιλεγμένων σεναρίων, ή στην πιο απλή μορφή τους ενδέχεται να έχουν προκύψει από την κρίση ειδικών, έχοντας συνυπολογίσει ιστορικά δεδομένα ή έχοντας εμπειρία από την λειτουργία παρόμοιων μονάδων. Αποτελούν μία "συντηρητική" εκτίμηση των αναγκαίων αποστάσεων ασφαλείας. Η υπολογιζόμενη απόσταση εξαρτάται κυρίως από το είδος της βιομηχανικής δραστηριότητας ή από την ποσότητα και το είδος των επικίνδυνων χημικών που αποθηκεύονται ή υφίστανται επεξεργασία στην εγκατάσταση. Ο σχεδιασμός, τα μέτρα ασφαλείας και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης δεν λαμβάνονται υπόψη.

Οι εν λόγω πίνακες είναι αρκετά χρήσιμοι για τυποποιημένες εγκαταστάσεις, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια μιας μελέτης. Ωστόσο, επειδή είναι συντηρητικές εκτίμησης, όποτε είναι δυνατό, θα πρέπει να προτιμούνται πιο λεπτομερείς αναλύσεις (LUP Guidelines 2006).