
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BASINÇ ALTINDA SIVILAŞTIRILAN ALEVLENEBİLİR KİMYASALLARIN SALIM DAVRANIŞININ STANDART, MODEL VE TEORİK YAKLAŞIMLARLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Öznur YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Öznur YILMAZ
27/04/2023

BASINÇ ALTINDA SIVILAŞTIRILAN ALEVLENEBİLİR KİMYASALLARIN SALIM DAVRANIŞININ STANDART, MODEL ve TEORİK YAKLAŞIMLARLA DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Öznur YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

ÖZET

Proses, kimyasalların sahada kullanılması, depolanması, üretilmesi, elleçlenmesi veya taşınması dahil olmak üzere kimyasal(lar) içeren herhangi bir faaliyet veya bu faaliyetlerin herhangi bir kombinasyonu anlamına gelir. Proseslerin işletilmesi esnasındaki önlem yetersizlikleri ve yapılan hatalar proseslerde yaşanan kazalara sebep olmaktadır. Proses güvenliği kimyasalların veya enerjinin felaket düzeyinde (katastrofik) salımlarının önlenmesi ve etkilerinin azaltılmasına odaklanır. Katastrofik salımların dışında, prosesin işletilmesi esnasında işlemlerin doğası gereği kimyasalların ortama salımı da söz konusudur. Normal işletme şartlarındaki alevlenebilir kimyasalların salımı ile oluşturacağı patlayıcı ortamda bulunan tutuşturma kaynaklarının ATEX (Patlayıcı Atmosfer) kazalarına yol açmaması için, tehlikeli mesafe belirleme çalışmalarının yürülmesi ve bu tehlikeli bölgeler için önlemlerin alınması gerekmektedir. Tehlikeli mesafe belirleme çalışması için birtakım standart yaklaşımları (60079-10-1, CEI 31-35 vb.) ve yazılımlar (PHAST, ALOHA vb.) mevcuttur. Standartlarda sıvı davranışı için eksiklik ve kısıtlamalar söz konusu iken, yazılımlarda modellemelere müdahalede kısıtlamalar söz konusu olabilmektedir. Özellikle basınç altında sıvılaştırılan alevlenebilir kimyasallarda salım sonrası davranış kimyasalın özelliğine bağlı olarak önemli değişim göstermekte ve bu kimyasalın yayıldığı tehlikeli mesafenin büyüklüğünü etkilemektedir. Bu gerçekler standart veya yazılmlardan hesaplanan sonuçlarda şüpheye sebep olabilmektedir. Standartlardaki kısıtlamaların ve yazılımlarda ki kabullerin geçerliliğinin sorgulanması ve tereddütlerin ortadan kaldırılması için kimyasalın fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak enerji, kütle, ısı korunum denklikleri kullanılan bir model geliştirilmiştir. Model sonuçlarının, standartlar ve yazılımlar ile elde edilenler ile karşılaştırılması için alevlenebilir kimyasal olan izopentanın yaygın olarak kullanıldığı jeotermal bir tesis önerilmiş, izopentanın iki farklı boyuttaki açıklıktan yüksek basınç ve sıcaklıkta sıvı fazında salımı senaryoları yaz ve kış şartları için çalışılmıştır. Belirlenen en kötü senaryoya göre standartlardan elde edilen tehlikeli mesafelerin (%2'lik buharlaşma hesabı hariç) diğer metotlara göre daha fazla olduğu, ALOHA yazılımında ise daha az olduğu tespit edilmiştir. PHAST ve geliştirilen model sonuçlarının benzerlik taşıdığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu	:	91219
Anahtar Kelimeler	:	Proses güvenliği, ATEX, 60079-10-1, PHAST, ALOHA
Sayfa Adedi	:	111
Danışman	:	Prof. Dr. Fatma Suna BALCI

ASSESSMENT OF THE RELEASE BEHAVIOUR OF FLAMMABLE CHEMICAL LIQUEFIED UNDER PRESSURE WITH STANDARD, MODEL AND THEORETICAL APPROACHES

(M. Sc. Thesis)

Öznur YILMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2023

ABSTRACT

Process means any activity involving chemical(s), including the use, storage, production, handling, or transport of chemicals on site, or any combination of these activities. Inadequate precautions and fault made during the operation of processes cause accidents in the processes. Process safety focuses on prevention and mitigation of catastrophic releases of chemicals or energy. Apart from catastrophic releases, there are also releases of chemicals into the environment during the operation of process due to the nature of process. In order to prevent ATEX (Atmosphere Explosive) accidents caused by ignition sources in the explosive environment created by the release of flammable chemicals under normal operating conditions, it is necessary to carry out hazardous distance determination studies and take precautions in these hazardous areas. There are numbers of standard approach (60079-10-1, CEI 31–35, etc.) and softwares (PHAST, ALOHA, etc.) for hazardous distance determination. While there are deficiencies and limitations for liquid behaviour in standards, there may be limitations in software for intervention in modelling. Especially for flammable chemicals liquefied under pressure, the post-release behaviour varies significantly depending on the nature of chemical and this affects the size of hazardous distance over which the chemical is emitted. This facts cause doubt in the results calculated from standards or software. In order to investigate the validification of the limitations of standards and assumptions in softwares and eliminating the doubts, a model using energy, mass, and heat conservation equations depending on the physicochemical properties of the chemical has been developed. For the comparation of the model results with the ones obtained with standards and softwares, a geothermal plant where isopentane, a flammable chemical, is widely used, was proposed, and scenarios of isopentane release in liquid phase at high pressure and temperature through two different sized openings were studied for the summer and winter conditions. According to the worst case scenario, it was found that the hazardous distances obtained from standards (except for the 2% evaporation calculation) were higher than the ones obtained from other methods, while it was lower in the ALOHA software. It was observed that the results of PHAST and the developed model are similar.

Science Code : 91219
Key Words : Process safety, ATEX, 60079-10-1, PHAST, ALOHA
Page Number : 111
Supervisor : Prof. Dr. Fatma Suna BALCI

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın ortaya çıkmasında ve her aşamasında desteklerini esirgemeyen, meslek hayatındaki engin tecrübeleri ve yol gösterici fikirleri ile tezimi güçlendiren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Fatma Suna BALCI' ya, bugünlere gelmemde sonsuz emeği olan annem ve babama, ayrıca tez dönemi süresince zamanından çaldığım ve beni sürekli motive ederek yanımda olduğunu hissettiren yol arkadaşım Koray OKURER'e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER 7

2.1. Kaza İstatistikleri 7

2.2. Kimyasalların Sınıflandırılması 8

2.3. Fiziksel Hasara Yol Açan Kazalar 11

2.3.1. Yangın 11

2.3.2. Patlama 13

3. PATLAMADAN KORUNMA YAKLAŞIMINDA KULLANILAN STANDARTLAR 19

3.1. 60079-10-1 Standardı 19

3.1.1. Standart iş akışı, kapsamı ve tanımlar 19

3.1.2. Tehlikeli alan büyüklüğü hesaplamaları 24

3.2. CEI 31-35 Standardı 30

3.2.1. Sıvı hesaplamaları 31

3.3. Yazılımlar 35

Sayfa

3.3.1. ALOHA yazılımı 35

3.3.2. PHAST yazılımı 40

4. METODOLOJİ 45

4.1. Sıvı Salımı Sonrası Davranış Modellemesi 46

4.1.1. Toplam sıvı salım miktarı 49

4.1.2. Flaş buharlaşma miktarı 53

4.1.3. Damlacık oluşumu, buharlaşması ve sıvı yağmuru 56

4.1.4. Salım sonucu havuz oluşumu ve buharlaşma 62

4.2. Buhar Bulutunda Bulunan Toplam Miktar 65

5. KURGUSAL TESİS 67

5.1. Jeotermal Tesis 67

5.2. Kurgusal Tesis 67

5.3. Salım Noktasının Belirlenmesi 70

6. BULGULAR 73

7. TARTIŞMA ve YORUM 83

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 87

KAYNAKLAR 89

EKLER 93

EK-1. Geliştirilen metodolojiye göre hesaplama örneği 94

EK-2. Hesaplama sonuçları görselleri 97

ÖZGEÇMİŞ 111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Kaza tipleri ve yıllara göre kaza sayıları 8

Çizelge 3.1. Salım açıklık değerleri 24

Çizelge 3.2. Bina dışı havalandırma değerleri 28

Çizelge 3.3. Emre amadelik tanımları 29

Çizelge 3.4. Tehlikeli alan sınıflandırması 29

Çizelge 3.5. Salıma müdahale süresi önerileri 31

Çizelge 3.6. Alan karakteristiğine göre havuz derinliği 31

Çizelge 3.7. Sıvının viskozite değerine göre havuz derinliği 32

Çizelge 5.1. İzopentanın fizikokimyasal özellikleri 69

Çizelge 5.2. İzopentan salımı için senaryo şartları (1 m yükseklikte 8 bar, 70 °C işletme şartlarındaki sıvı) 71

Çizelge 6.1. Standart yaklaşımları için kabul kriterleri 74

Çizelge 6.2. 60079-10-1 standardına göre salım miktarları ve tehlike mesafeler 75

Çizelge 6.3. CEI 31-35 standardına göre salım miktarları ve tehlike mesafeler 76

Çizelge 6.4. ALOHA yazılımı kabul verileri 77

Çizelge 6.5. ALOHA yazılımına göre salım miktarları ve tehlike mesafeler 77

Çizelge 6.6. PHAST yazılımı kabul verileri 78

Çizelge 6.7. PHAST yazılımına göre salım miktarları ve tehlike mesafeler 79

Çizelge 6.8. Geliştirilen metodolojiye göre salım miktarları ve tehlikeli mesafeler 80

Çizelge 6.9. Hesaplama yöntemlerine göre tehlikeli mesafeler 81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Yıllara göre (a) kaza sayısı, (b) kazalarda ölüm oranı 7

Şekil 2.2. Faza göre yangın ve patlama tipleri 12

Şekil 3.1. 60079-10-1 standardı iş akışı 20

Şekil 3.2. Alevlenebilir buhar konsantrasyonu- sıcaklık ilişkisi 22

Şekil 3.3. Salım karakteristiği 23

Şekil 3.4. Seyrelme derecesi grafiği 28

Şekil 3.5. Tehlikeli mesafe – Qc (salım karakteristiği) grafiği 30

Şekil 3.6. Dairesel delik kalınlığı (l) - sıvının kaptan çıkışına kadar kat ettiği yol (f) ... 33

Şekil 3.7. ALOHA yazılımı kimyasal bilgi 36

Şekil 3.8. ALOHA yazılımı atmosferik şartlar 36

Şekil 3.9. ALOHA yazılımı salım kaynağı, atmosferik dağılım hesaplama seçenekleri 37

Şekil 3.10. ALOHA yazılımı tank bilgileri 37

Şekil 3.11. ALOHA yazılımı depolama ve sıcaklık bilgileri 38

Şekil 3.12. ALOHA yazılımı sıvının miktarı veya sıvı seviyesi 38

Şekil 3.13. ALOHA yazılımı senaryo seçimi 39

Şekil 3.14. ALOHA yazılımı salım kaynağı bilgileri 39

Şekil 3.15. ALOHA yazılımı sıvının tanktaki salım noktası 40

Şekil 3.16. PHAST yazılımı salım kaynağı ve tipi 41

Şekil 3.17. PHAST yazılımı kimyasal ve senaryo bilgileri 41

Şekil 3.18. PHAST yazılımının sızıntı senaryosunda talep ettiği veriler 42

Şekil 3.19. PHAST yazılımı atmosferik şartlar 42

Şekil 3.20. PHAST yazılımı salım şartları 42

Şekil 3.21. PHAST yazılımı metot seçim görseli 43

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Sıvıların salım sonrası davranış senaryoları 47

Şekil 4.2. Salım davranışı 49

Şekil 4.3. Açık sisteme dahil olan ve uzaklaşan enerjiler..... 50

Şekil 4.4. Salım noktasının görseli 51

Şekil 4.5. Salım sonrası ilk davranış..... 53

Şekil 4.6. Damlacık ve sıvı yağmuru oluşumu görseli 56

Şekil 4.7. Damlacığın ısı-kütle transfer mekanizması 59

Şekil 5.1. İkili çevrim proses akış diyagramı..... 68

Şekil 5.2. İkili çevrim için P-H diyagramı..... 68

Şekil 5.3. Kurgusal tesiste salım noktası görseli..... 70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
γ	Adyabatik politropik indeksi
$\emptyset_b$	Flaş buharlaşma fraksiyonu
σ_s	Yüzey gerilimi
ϑ_a	Havanın kinematik viskozitesi
ϑ_s	Kinematik viskozite
x_i	Sıvıdaki "i" bileşeninin mol fraksiyonu
λ	Buharlaşma entalpisi
μ	Havanın viskozitesi
μ_f	T_f sıcaklığındaki havanın viskozitesi
α	Zemin tabakası termal difüzivite
ϵ	Sıvının emisivitesi
φ_s	Güneşin ufkun üzerindeki derecesi
σ_{SB}	Stefan-Boltzmann sabiti
ρ_a	Havanın yoğunluğu
ρ_f	Flaş buharının yoğunluğu
ρ_g	Gaz/buhar yoğunluğu
ρ_s	Sıvının yoğunluğu
ΔP	Salım açıklığındaki basınç farkı
A	Kesit alanı
A_d	Damlacığın yüzey alanı
A_f	Flaş buharlaşma sonundaki buhatın alanı
A_{p1}	CEI 31-35 standardına göre havuz alanı 1
A_{p2}	CEI 31-35 standardına göre havuz alanı 2
A_p	Havuz alanı
C_d	Tahliye katsayısı

Simgeler	Açıklamalar
C_{ds}	Damlacık çapı için faktör
C_p	Spesifik ısı kapasitesi
C_1	Boyutsuz bulutluluk endeksi
C_{pf}	T_f sıcaklığındaki sepsifik ısı kapasitesi
d_d	Damlacık çapı
D	Nötr havanın hava stabilite sınıfı
D_i	Difüzyon katsayısı
E	Toplam enerji
F	Kuvvet
f(l)	Sıvının bulunduğu kaptan çıkış noktasına kadar aldığı yol
f_{se}	Havalandırma verimliliği faktörü
f_{alan}	Alan faktörü
G	Gibbs serbest enerji
h	Isı transfer katsayısı
h_c	Ani daralmaya bağlı sürtünme kaybı
h_{fs}	Toplam sürtünme kaybı
h_m	Havuz derinliği
h_s	Delikteki sürtünme kaybı
H	Entalpi
k	Kütle transfer katsayısı
k_a	Havanın termal kondüktivitesini
k_{af}	Havanın T_f sıcaklığındaki termal kondüktivitesi
k_A	Havuz genişletme faktörü
k_{dz}	Güvenlik katsayısı faktörü
k_s	Zeminin termal iletkenlik katsayısı
k_t	Zemin tabakası termal iletkenlik katsayısı
k_z	Tehlikeli mesafe düzeltme faktörü
KE	Kinetik enerji
l	Dairesel delik kalınlığı
$\dot{m}$	Birim zamandaki toplam kütle miktarı
$\dot{m}_{flaş}$	Birim zamandaki flaş buharlaşma miktarı

Simgeler	Açıklamalar
$\dot{m}_{damlacıktan\ buharlaşma}$	Birim zamandaki damlacıktan buharlaşma miktarı
$\dot{m}_{havuzdan\ buharlaşma}$	Birim zamandaki havuzdan buharlaşma miktarı
M	Gaz/buhar mol kütlesi
n_R	Sıvı yağmuru fraksiyonu
Nu	Nusselt sayısı
P	Gaz/sıvı basıncı
P_a	Atmosferik basınç
P_{ai}	Atmosferik şarttaki buhar basıncı
P_c	Kritik basınç
PE	Potansiyel enerji
P°_i	Kısmi buhar basıncı
Pr	Prandl sayısı
P_{si}	Doygun buhar basıncı
P_v	Akışkanın buhar basıncı
r	Havuz yarıçapı
r_f	Ani buharlaşma sonu oluşan jetin yarıçapı
R	Evrensel gaz sabiti
Re	Reynold sayısı
S	Salım açıklık kesiti
S_b	Buharın entropisi
S_s	Sıvının entropisi
Sc	Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı
T	Gaz/sıvı/akışkanın mutlak sıcaklığı
T_a	Hava sıcaklığı
T_d	Damlacık sıcaklığı
T_f	Sıvı ile hava sıcaklığı arasındaki aritmetik ortalama sıcaklığı
T_{havuz}	Havuz sıcaklığı
T_{KN}	Kaynama noktası sıcaklığı
t_p	Müdahale süresi
T_{zemin}	Zemin sıcaklığı

Simgeler	Açıklamalar
T_∞	Damlacıktan çok uzaktaki hava sıcaklığı
u	Akışkanın hızı
u_d	Damlacığın hızı
u_w	Havuz yüzeyine etki eden rüzgar hızı
U	İç enerji
V	Hacim
Z	Sıkıştırılabilirik faktörü
Xg	Toprak gözeneklilik katsayısı
W	Kütlesel sıvı salım oranı
W_e	Salınan sıvının buharlaşma oranı
We	Weber sayısı
W_g	Kütlesel gaz salım oranı
W_s	Kütlesel sıvı salım oranı
W_w	Sistemin yaptığı iş
$q_{buharlaşma}$	Buharlaşma nedeni ile ısı kaybı akısı
$q_{güneş}$	Güneşten gelen radyasyon akısı
$q_{kondüksiyon}$	Zeminden kondüksiyon ile ısı transferi akısı
$q_{konveksiyon}$	Havadan konveksiyon ile ısı transferi akısı
$q_{radyasyon}$	Havadan ışınımsal yol ile ısı transferi akısı
Q	Sisteme dahil edilen ısı
Q_b	Salınan sıvının havuzdan buharlaşma hızı
Q_c	Salım karakteristiği
Q_g	Salınan gazın hacimsel akış hızı
Q_s	Salınan sıvının hacimsel akış hızı

Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	Avrupa Birliği
ATEX	Patlayıcı atmosfer
BLEVE	Kaynayan sıvının genleşyen buhar patlaması
CEI	İtalyan elektroteknik komitesi

Kısaltmalar	Açıklamalar
EM-DAT	Uluslararası afetler veri tabanı
LFL	Alt alevlenme limiti
NATECH	Teknolojik kazaları tetikleyen doğal tehlikeler
NE	İhmal edilebilir
NFPA	Ulusal Yangından Yorunma Kurumu
OSHA	ABD İş Sağlığı ve Güvenliği Kurumu
UDM	Birleştirilmiş dağılım modeli
UFL	Üst alevlenme limiti
PSV	Basınç emniyet vanası
PRV	Basınç tahliye vanası
PVAP	Havuzdan buharlaşma

1. GİRİŞ

Günlük ihtiyaçların karşılanması ve yaşam standartlarının artırılması için kullanılan birçok ürünün kaynağı kimyasal maddelerdir. Enerji, ilaç, gıda, temizlik, tekstil gibi kritik önem arz eden sektörlerde kimyasal maddeler başrol oynamaktadır. Kimyasallara olan ihtiyacın artışı hem ürün hem de üretim için hammadde gereksinimi ile kapasite artışlarına neden olmakta ve yeni kimyasal tesislerin açılması gerekliliğini artırmaktadır. Proses, kimyasalların sahada kullanılması, depolanması, üretilmesi, elleçlenmesi veya taşınması dahil olmak üzere son derece tehlikeli (zararlı) kimyasal(lar) içeren herhangi bir faaliyet veya bu faaliyetlerin herhangi bir kombinasyonu anlamına gelir [1]. Proseslerde gerekli olan kimyasalların taşınması, depolanması ve işletilmesinde önlem yetersizlikleri ve yapılan hatalar proseslerde yaşanan kazalara sebep olabilmektedir. Proses güvenliği, kimyasalların veya enerjinin felaket düzeyinde (katastrofik) salımlarının önlenmesi, önlenemediği durumlara hazırlıklı olunması ve etkilerinin azaltılmasına odaklanır [2]. Bir başka tanım ise proses güvenliğini işletmedeki kimyasalların büyük olaylarla sonuçlanabilecek plansız salımlarını önlemek şeklinde ifade eder [3]. Bu tanım kazaların kimyasalların proses hatlarından dışarı çıkması sonucu meydana geleceğini açıkça ortaya koymaktadır.

Kimyasal tesislerde yaşanan proses kazalarının birincil tehlike kaynağı kimyasalın kendisidir. OSHA kimyasalları “herhangi bir madde veya maddelerin karışımı” olarak tanımlamaktadır [4]. Felaket düzeyindeki salımlarda, kimyasal bir kaza sırasında tesise ve yerleşim alanlarına gaz, buhar bulutu, sıvı veya toz halinde yayılabilir ve kimyasalın tehlike grubuna göre kazanın çeşidi farklılık gösterir. Kullanılan maddelerin ve karışımların zararlarını bilmek ve etkilerinden korunmak için kimyasalların sınıflandırılma gerekliliği doğmuştur. Bu doğrultuda ülkemizde 11.12.2013 tarihinde “Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik” yürürlüğe girmiştir. İlgili yönetmelikte kimyasallar sağlığa ilişkin zararlar, çevresel zararlar ve fiziksel zararlar olmak üzere tehlikelerine göre üç grupta sınıflandırılmaktadır. Sağlığa zararlılığı olan kimyasallar genel olarak toksik kimyasallar, çevresel zararlılığı olanlar ise ekotoksik olarak ifade edilebilir. Fiziksel zarar veren kimyasallar ise patlayıcılar, alevlenebilirler, su ile tepkimeye girenler, piroforikler, oksitleyici ve aşındırıcı maddeler olarak ifade edilebilir [5].

En yaygın fiziksel zarara yol açan kazalar yangın ve patlamalardır. Yanma, tutuşturma kaynağı varlığında bir alevlenebilir maddenin bir oksitleyici ile birleştiği ve enerji açığa çıkardığı kimyasal bir reaksiyondur, yangın ise yanma olayının istemeden meydana gelmesi veya yanmanın kontrol dışına çıkmasıdır. Ülkemizde yangın oluşumunu ve olası etkilerini azaltmak için 27.11.2007 tarihinde "Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik" yürürlüğe girmiştir [6]. Kimyasal proseslerde ekipman veya boru hatlarındaki sızıntılar ile alevlenebilir sıvı birikmesi söz konusudur. Kolay alevlenebilir sıvı kimyasal birikintilerinin yüzeyinin tutuşması ile havuz yangını meydana gelir. Jet yangını ise basınçlı bir proses ünitesinden (proses ekipmanı veya boru hattı) sızan alevlenebilir akışkanın yanmasından kaynaklanır ve basınç etkisi ile öne doğru süren bir alev meydana getirir [7].

Patlama iç enerjinin kinetik enerjiye dönüştüğü hızlı ve kuvvetli bir şekilde enerjinin boşalmasıdır. Patlamalar, kabın iç basıncının artmasıyla kabın bağlantı yerlerinin kopması veya kabın kendisinin yırtılması ile fiziksel enerji salımının yanında kimyasalın tehlike özelliğe göre kimyasal enerji salımı ile de sonlanabilir. Fiziksel enerji salımlı patlamalar basınç dalgalarına neden olurken açığa çıkan çok miktarda kimyasalın özelliğine bağlı önemli toksik zararlara da yol açabilir. Kimyasal enerji salımlı patlamalar, basınç dalgalarına ilave olarak yanma olayı ile termal enerji açığa çıkarması ve yanma ürünlerinin olası toksik etkisi ile büyük zararlara yol açacağından proses güvenliğinde önemlidir. Basınç artışı kaynaklı patlamalar kap/ekipman iç basıncının artmasıyla ekipman bütünlüğünün bozulması ile meydana gelir. Eğer kap içerisinde inert kimyasal bulunuyorsa basınç dalgaları ve şarapnel etkisi ile sonuçlanan patlama ile fiziksel enerji salımı ve kap içerisindeki akışkanın şiddetli bir şekilde çevreye yayılmasına neden olur. Patlama sonucu yangının gelişmesi kimyasalın alevlenebilir nitelikte olmasını gerektirir. Gaz depo tankı veya ekipmanlarda gerek sıcaklık artışı gerek dolum hatası vb. ile iç basıncın artmasıyla pinömatik patlamanın oluşumu söz konusudur. Sıvı tank/ekipmanlarda iç basınç artışı, sıvı üzerindeki buhar miktarının ani artışı ile meydana gelir. Atmosferik şartlarda sıvı içeren bir tank ateşe maruz kaldığında, sıvı ısınır ve kaynama noktasına yaklaşınca buharlaşma artarak sıvı üzerinde bulunan buharın basıncı artar. Artan basınç atmosfere salınan buhar miktarını artırırken, kabın çeper ve bağlantı yerleri gibi zayıf noktalara aşırı kuvvet uygular ve tankın mekanik bütünlüğünü bozarak patlamaya yol açabilir. Buharlaşma ile iç basıncın artışı kaynaklı bu olay Kaynayan Sıvı Genleşen Buhar Patlaması (BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) olarak bilinir. Tank içeriği alevlenebilir kimyasal olması ve açığa buharın sıcaklığının kendiliğinden tutuşma noktasına ulaşması veya sahadaki yangın

alevi ile buluşması söz konusu olduğunda patlamaya ek olarak ateş topuda meydana gelebilir. Termal kaçış (Thermal runaway) ise ekzotermik kimyasal reaksiyonun ısı üretme hızı mevcut soğutma hızını aştığı durumda reaktörde oluşan sıcaklık artışının yarattığı basınç artışı ile meydana gelir. Bu olayda termal etkinin yanı sıra reaktiflerin yüksek sıcaklıkta daha tehlikeli kimyasalları üretebilmesi ve patlama ile açığa çıkması açısından da oldukça tehlikelidir. Özellikle sıvı fazı reaksiyonlarda sıcaklığın kontrolden çıkması ani buhar oluşumu ile kazaya gidiş yolunu kolaylaştır. Gerek pinömatik gaz tankı gerek BLEVE gerekse ısı kaçış patlaması kap içindeki basıncın artmasından kaynaklanan fiziksel patlamalar iken, kap içindeki akışkanın alevlenebilir olması durumunda fiziksel patlamayı ortama yayılan tüm kimyasalın hızlı yanma reaksiyonuna katılması takip eder. Atmosferik basınçtaki ortamlarda meydana gelen patlamalar, ortamda bulunan yanıcı kimyasalın aniden tutuşarak yanması ile gerçekleşir. Tüm kimyasalın hızlı yanması ile açığa çıkan yüksek miktarda enerji ani sıcaklık artışı ve basınç genleşmesine yol açar. Bu alevlenebilir kimyasal normal işletme sürecinde işletmenin doğası gereği ortama yayılabileceği gibi basınçlı bir ekipmanın bütünlük kaybından dolayı da büyük miktarda açığa çıkabilir. Atmosferik basınçta yanma ile meydana gelen bu patlamaya örnek olan sınırlandırılamayan buhar/gaz bulutu patlaması (Unconfined Vapor/Gas Cloud Explosion) büyük miktarda yanıcı buhar veya gazın hava ile oluşturduğu bulutun tutuşmasıyla meydana gelir [7-10].

Normal işletme şartlarında ise ATEX (Atmosphere Explosive: Patlayıcı atmosfer) patlaması olarak tanımlanmaktadır. ATEX patlamaların meydana gelmesi için, alevlenebilir maddenin gaz, buhar, sis veya toz formunun hava ile belirli oranda karışımıyla oluşan patlayıcı ortam, bu ortamı tutuşturabilecek ateşleme enerjisine sahip tutuşturma kaynağı gereklidir [11]. Normal işletme şartlarında ortama sızıntılar kimyasal alevlenebilir olmasa bile tehlikeli kimyasalların zararlarına maruz kalmaya yol açtığı için proses güvenliğinde önlemlerin alınmasını gerektirir. Bu kimyasalların yayıldığı, önlemlerin gerektiği bölgeler tehlikeli alan olarak tanımlanabilir. Toksik maruziyet veya patlama/yanma şeklinde kazaların meydana gelmemesi için tehlikeli kimyasalların salımının olmaması gerekir. İşletme gereği salım kaçınılmaz ise tehlikeli kimyasalın yaratacağı tehlikeli alanların belirlenmesi, bölgelerin azaltılmasına yönelik önlemlerin alınması ve kazaları önleyici tedbirlerin alınmasını zorunlu kılar. Toksik özellikli kimyasal salımlarında sağlık ve çevreye etkileri değerlendirilir, toksik etkiyi önlemenin yolu yayılım bölgesinde çalışan bulundurulmaması veya gerekli donanım ile çalışmasını gerektirir. Yanıcı kimyasal söz konusu ise bu tehlikeli bölgelerde patlamanın önlenmesine yönelik önlemlerin alınmasını gerektirir. ATEX patlamasını önlemenin yolu ya

“Patlayıcı ortam” diye bilinen kimyasalın yayılım ortamlarında hava ile oluşturduğu patlayıcı karışımın ortadan kaldırılması ya da yayılım bölgesinde tutuşturucu kaynakların bulunmaması ile yürütülebilir. Patlayıcı ortam oluşabilme olasılığı bulunan işyerleri için ülkemizde 30.04.2013 tarihinde “Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik” yürürlüğe girmiştir. İlgili yönetmelikte patlama riskinin değerlendirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır ve “Patlamadan Korunma Dokümanı” hazırlanması gerekliliği yer almıştır. Bu dokümanda patlayıcı ortam oluşabilme olasılığı bulunan alanlarının sınıflandırılması ve alanların tehlike mesafelerinin belirlenmesi, patlayıcı ortamdan kaynaklı risklerinden korunmak için asgari gereklilikler, ilgili alanlardaki ekipman ve koruyucu sistemler için kriterlerin yer alması gerekmektedir [12].

Yönetmelikte belirtilen tehlikeli alanların büyüklüğünü bulmak ve sınıflandırmak için gaz/buhar ortamları için “60079-10-1: Alanların Sınıflandırılması” standardı ve toz ortamları için “60079-10-2: Tehlikeli Bölgelerin Sınıflandırılması” yaygın bir şekilde kullanılan kılavuzlardır. Gazların tehlikeli bölge hesaplamasında gazların atmosfere çıktıktan sonra yayılımları termodinamik olarak ifade edilebildiği için sızıntı sonrası davranışları kolaylıkla belirlendiğinden standartta belirgin kısıtlamalar yoktur. Ancak sıvının ekipman içerisindeki bulunduğu şartlar (sıcaklığı, basınç, vb.) fiziksel özellikleri (faz değiştirme şartları, buharın yoğunluğu, vb.) salım sonrası davranışlarında çeşitliliklere yol açar. Bu duruma yönelik değerlendirmede standartta birtakım eksiklikler mevcuttur. İlgili standartta salım sonrası ilk davranışta sıvıda faz değişikliği olmadığı kabul edilerek sıvının tamamının önce havuz oluşturduğu sonrasında bir kısmının buharlaştığı şeklinde değerlendirilmiştir. Bununla birlikte salım noktasında belirli bir yüzde ile buharlaşma olabileceğini belirtmiş ve verdiği benzen salımı örneğinde %2 buharlaşma olduğunu endüstriyel yönetmelikten aldığını not etmiştir. Ancak bu fraksiyon değerinin yer aldığı referansları bulmak zaman zaman zor olabilmektedir. Parlama noktasının altında depolanan veya işlenen basınçlı sıvıların salımları sonucu alevlenebilir sisler oluşabileceği vurgulanmış ancak bununla ilgili de hesaplama yöntemlerine yer verilmemiştir. Salım sonrası iki faz oluşabileceğini hatta oluşan buhar bulutunun içinde damlacıkların oluşabileceği ve bunların havuza düşebileceği belirtilmiş olmasına rağmen hesaplama için bir yol sunmamış ve bu iki durum kullanıcıların yorumlanmasına bırakılmıştır [13].

Bir önceki 60079-10-1 standardında referans olarak gösterilen “CEI 31-35: Patlayıcı Ortamlar için Elektrikli Cihazlar, Tehlikeli Alanların Sınıflandırılması için Kılavuz” İtalyan

standardına da zaman zaman başvurulmaktadır. Bu standartta buhar/gaz salımları için verilen denklikler güncel standartla aynı olmakla birlikte sıvı salımları için farklı yaklaşımlar sunulmuştur. Özellikle buhar basınçları yüksek sıvılar için buharlaşma hesaplamaları mevcuttur [14].

Standartlarda kullanılan eşitlikler, kimyasalların momentum, enerji ve kütle taşınım eşitlikleri ile çıkarılmış ve kaba varsayımlar ile sadeleştirilmiş halleridir. Bu sadeleştirmeler tehlikeli alan büyüklüğü hesaplamalarında farklılıklara neden olabilmektedir. Sahada CFD' ye (Computational Fluid Dynamics: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) göre model yapan ya da arka planda amprik veya yarı amprik eşitlikler kullanan yazılımlar da kullanılmaktadır. Bu yazılımlardan sıklıkla kullanılanlardan bazıları ALOHA ve PHAST yazılımlarıdır.

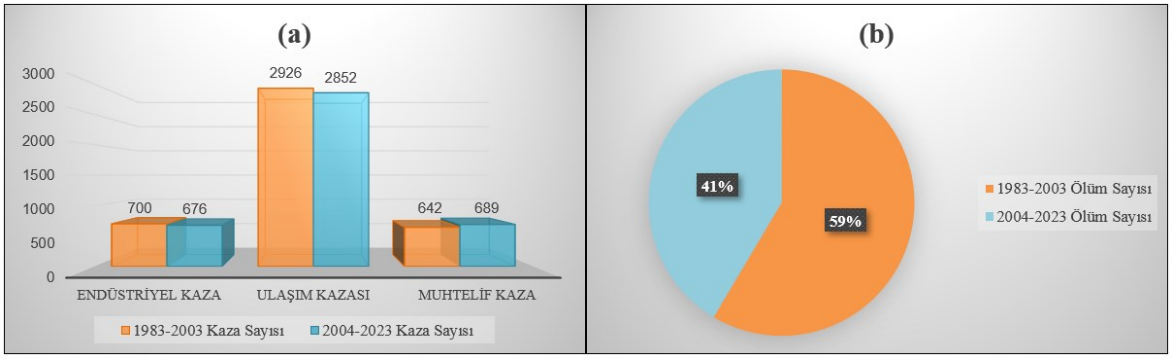
Tehlikeli mesafe belirlemek için kullanılan tüm bu yöntemler ortamdaki buhar/gazın miktarına göre sonuç vermektedir. Dolayısı ile oluşabilecek buhar miktarının sağlıklı belirlenmesi önem taşımaktadır. Ekipman içerisindeki basınç ve sıcaklığın ortam şartlarından farklı olduğu durumlarda, salım sonrası özellikle kaynama noktası düşük sıvıların atmosferik şartlara ulaşılması esnasında salım noktasında ihmal edilemeyecek miktarda buharlaşmanın olması kaçınılmaz bir durumdur. Standartlardaki temel eksiklik ve kaba yaklaşım olması, PHAST ve ALOHA yazılımında arka planda kullanılan amprik yaklaşımların kullanıcı tarafından senaryo şartlarının uygunluğunun doğrulanmaması durumunda sağlıklı sonuçlar elde edilemeyebilir.

Bu amaçla tez çalışmasında sıvıların salım sonrasındaki davranışların kimyasalın fizikokimyasal özelliklerine ve ekipman içerisindeki şartları göz önünde bulundurularak momentum, enerji ve kütle taşınım denklikleri kullanılarak gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilecek bir model oluşturulmuştur. Saha uygulaması olarak jeotermal tesislerde kullanılan yüksek buhar basıncına sahip alevlenebilir bir kimyasal olan izopentan sıvısı kullanılan bir tesis kurgulanmıştır. Tesiste bulunan salım kaynakları değerlendirilmiş ve seçilen salım kaynaklarından sızıntılar 60079-10-1 ve CEI 31-35 standartları, ALOHA ve PHAST yazılımları ve geliştirilen model kullanılarak iki farklı salım noktası açıklığına ve ortam sıcaklığına göre tehlikeli mesafeler belirlenmiş ve tüm sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kaza İstatistikleri

Artan nüfusla birlikte yaşam için gerekli kimyasalların üretiminin artmasının yanı sıra, yaşam standartlarının iyileştirilmesine yönelik ihtiyaçlarının doğması sanayinin gelişmesine yol açmıştır. Gelişen saniye ile kaza sayılarının artması orantılıdır. İnsani yardımlaşma amacı ile kurulmuş olan Acil Durum Veri Tabanı EM-DAT (The International Disasters Database) 1988 yılında Afetlerin Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi tarafından başlatılmıştır. Veri tabanında felaket tipleri doğal olaylar ve teknolojik olaylar ve kompleks olmak üzere üçe ayrılmıştır. Teknolojik olaylar endüstriyel kazalar, ulaşım kazaları ve muhtelif kazalar olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 2.1' de yıllara göre kaza sayılarındaki artış ve bu kazaların yol açtığı ölüm oranları gösterilmiştir [15].



Şekil 2. 1. Yıllara göre (a) kaza sayısı, (b) kazalarda ölüm oranı [15]

Ulaşım kazaları hava, kara, demir ve su yollarında meydana gelen kazaları kapsar iken endüstriyel kazalar adından da anlaşılacağı üzere endüstride meydana gelen kazalardır. Endüstride meydana gelen kazalar ise tiplerine göre aşağıdaki gibi listelenmektedir.

- ❖ Kimyasal sızıntı
- ❖ Patlama
- ❖ Yangın
- ❖ Gaz sızıntısı
- ❖ Yağ sızıntısı
- ❖ Zehirlenme
- ❖ Çökme

❖ Radyasyon

❖ Diğer

Çizelge 2.1'de yer alan EM-DAT verilerine göre endüstriyel kazaların neredeyse hepsi (diğer ve çökme hariç) kimyasalların tehlikesi ile ilişkilidir.

Çizelge 2. 1. Kaza tipleri ve yıllara göre kaza sayıları [15]

Yıllar / Kaza Tipleri	1983-2003 Yılları Arasında Kaza Sayısı	2004-2023 Yılları Arasında Kaza Sayısı
Patlama	362	317
Yangın	118	85
Kimyasal sızıntı	61	16
Zehirlenme	48	16
Gaz sızıntısı	26	28
Diğer	31	81
Radyasyon	5	2
Yağ sızıntısı	2	5
Çökme	46	127

Kazalar ya doğal afet tetikleyici NATECH kazaları (Natural Hazards Triggering Technological Accidents: Teknolojik Kazaları Tetikleyen Doğal Afetler) ya da işletmenin doğasında var olan tehlikelerin yarattığı risklerden dolayı meydana gelmektedir [16]. Proseslerin tasarım aşamasında olası kazalar için göz önünde bulundurulması gereken konuların başında ölçme, izleme, müdahale yöntemleri ve doğal afet tetikleyicileri gelir. Proses işletilirken ölçme ve izleme yöntemleri ile ekipmanlarda meydana gelen sapmalar belirlenebileceği için kazaların önlenmesine yönelik önlemlerin yanında şiddet azaltıcı önlemler de uygulanabilecekken, NATECH kazaları ani ve hızlı geliştiği için bu kaza esnasında yalnızca şiddet azaltıcı önlemler etkili olur.

2.2. Kimyasalların Sınıflandırılması

Kimyasalların kazaya yatkınlık eğimleri, olası etkileri ve kaza şiddetleri aynı olmadığı için saha da alınacak önlemler farklılık içerebilir. Bu sebeple kimyasalların tehlikelerine göre sınıflandırılma ihtiyacı doğmuştur. 20 Ocak 2009 tarihinde EC/1272/2008 sayılı "Kimyasalların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması" AB tüzüğü uygulanmaya başlanmıştır. 11.12.2013 tarihinde ise ülkemizde bu tüzüğe paralel olarak

hazırlanan “Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik” Resmî Gazete’ de yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. Yönetmelikte madde veya karışımların zararlarının niteliğini belirleyen sınıflar aşağıdaki şekilde atanmıştır.

- Sağlığa ilişkin zararlar
- Çevresel zararlar
- Fiziksel zararlar

Her zararlılık sınıfı kendi içinde ayrılır ve bu ayrımda zararının ciddiyetini belirten zararlılık kriterleri vardır. Sağlığa ilişkin zarar sınıfında yer alan kategoriler aşağıdaki gibidir.

- Akut toksisite
- Cilt aşınması/tahrişi
- Ciddi göz hasarı/göz tahrişi
- Solunum veya cilt hassaslaştırıcı
- Eşey hücre mutajenitesi
- Kanserojenite
- Üreme sistemi toksisitesi
- Belirli hedef organ toksisitesi tek maruz kalma
- Belirli hedef organ toksisitesi tekrarlı maruz kalma
- Aspirasyon zararı

Çevresel zarar sınıfında ise sucul ortamlar için zararlı kimyasallar yer alır. Bu sınıf kısa süreli akut ve uzun süreli kronik olmak üzere gruba ayrılabilir. Fiziksel zarar sınıfında yer alan kategoriler ise tanımları ile birlikte aşağıda verilmektedir.

- Patlayıcılar: Yönetmeliğe göre patlayıcı madde çevreye zarar verebilecek sıcaklık, basınç ve hızda gaz üretebilecek, kendiliğinden kimyasal reaksiyona neden olabilecek katı veya sıvı madde ve/veya karışımdır. Gaz oluşumuna neden olmasalar dahi piroteknik maddeler de bu kategori altında yer alır.
- Alevlenir gazlar: 20 °C ve 101,3 kPa basınçta hava ile alevlenebilir karışım oluşturabilecek gaz veya gaz karışımı alevlenir gazlar olarak ifade edilir.

- Aerosoller: Hava ortamında asılı kalabilen küçük sıvı damlacıklarına aerosol denir. (60079-10-1) Aerosol kaplar ise içindeki malzemeyi sıvı tanecikler oluşturacak şekilde püskürtme ekipmanı olan ve tekrar kullanılamayan kapları ifade eder.
- Oksitleyici gazlar: Ortama oksijen vererek malzemelerin yanmasına havaya göre daha fazla katkı sağlayan herhangi gaz veya gaz karışımı oksitleyici gaz olarak ifade edilir.
- Basınç altındaki gazlar: 20 °C ve 200 kPa veya daha fazla bir basınç değerine sahip bir kapta tutulan gaz, basınçla sıvılaştırılmış veya soğutulmuş gazların olarak tanımlanabilir. Bunlara ilave olarak kriyojenik olarak sıvı fazda da depolanması söz konusudur. Kriyojenik tank sıvı fazda çok fazla miktarın depolanmasına olanak sağlar.
- Alevlenir sıvılar: Parlama noktası 60 °C' den düşük olan sıvılara alevlenebilir sıvılar denir.
- Alevlenir katılar: Kolay yanabilen, sürtünme nedeni ile yangına neden olabilen, bir tutuşturucu kaynak ile temasında kısa sürede tutuşan, alevi hızla yayılan katılar alevlenebilir olarak ifade edilir.
- Kendiliğinden tepkimeye giren maddeler ve karışımlar: Oksijen varlığı olmasa bile ekzotermik ayrışmaya maruz kalabilecek termal olarak kararsız katı ve sıvı maddeler veya bu maddelerin karışımlarıdır.
- Piroforik sıvılar/katılar: Çok küçük miktarlarda hava ile temas ettikten 5 dakika sonra tutuşabilen sıvı/katı madde veya bu maddelerin karışımıdır.
- Kendiliğinden ısınan madde ve karışımlar: Piroforik sıvı ve katı maddeler dışında hava ile reaksiyona girerek, ekstra enerji gerektirmeden kendiliğinden ısınabilme potansiyeli olan madde ve karışımlardır.
- Su ile temas ettiğinde alevlenir gazlar çıkaran madde ve karışımlar: Su ile tepkime vererek aniden alevlenebilir madde durumuna geçen veya alevlenebilir gaz çıkartabilen katı veya sıvı madde veya bu maddelerin karışımlarıdır.
- Oksitleyici sıvılar/katılar: Kendiliğinden yanmayan ancak oksijen oluşturarak başka malzemelerin yanmasına katkı sağlayan veya neden olan sıvı madde veya karışımlarına oksitleyici sıvı/katı denir.
- Organik peroksitler: Bivalent-O-O- yapısı içeren, bir ya da iki hidrojen atomunun yerini organik radikallerin aldığı hidrojen peroksit türevleri olarak kabul edilebilecek olan sıvı veya katı organik maddelerdir. Kendiliğinden hızlanan ekzotermik ayrışmaya maruz kalabilen, termal olarak kararsız madde veya karışımlar olarak ifade edilir.
- Metal aşındırıcılar: Kimyasal yollar ile metallere hasar veren veya yok edebilen madde ya da karışımlara metal aşındırıcılar denir [5].

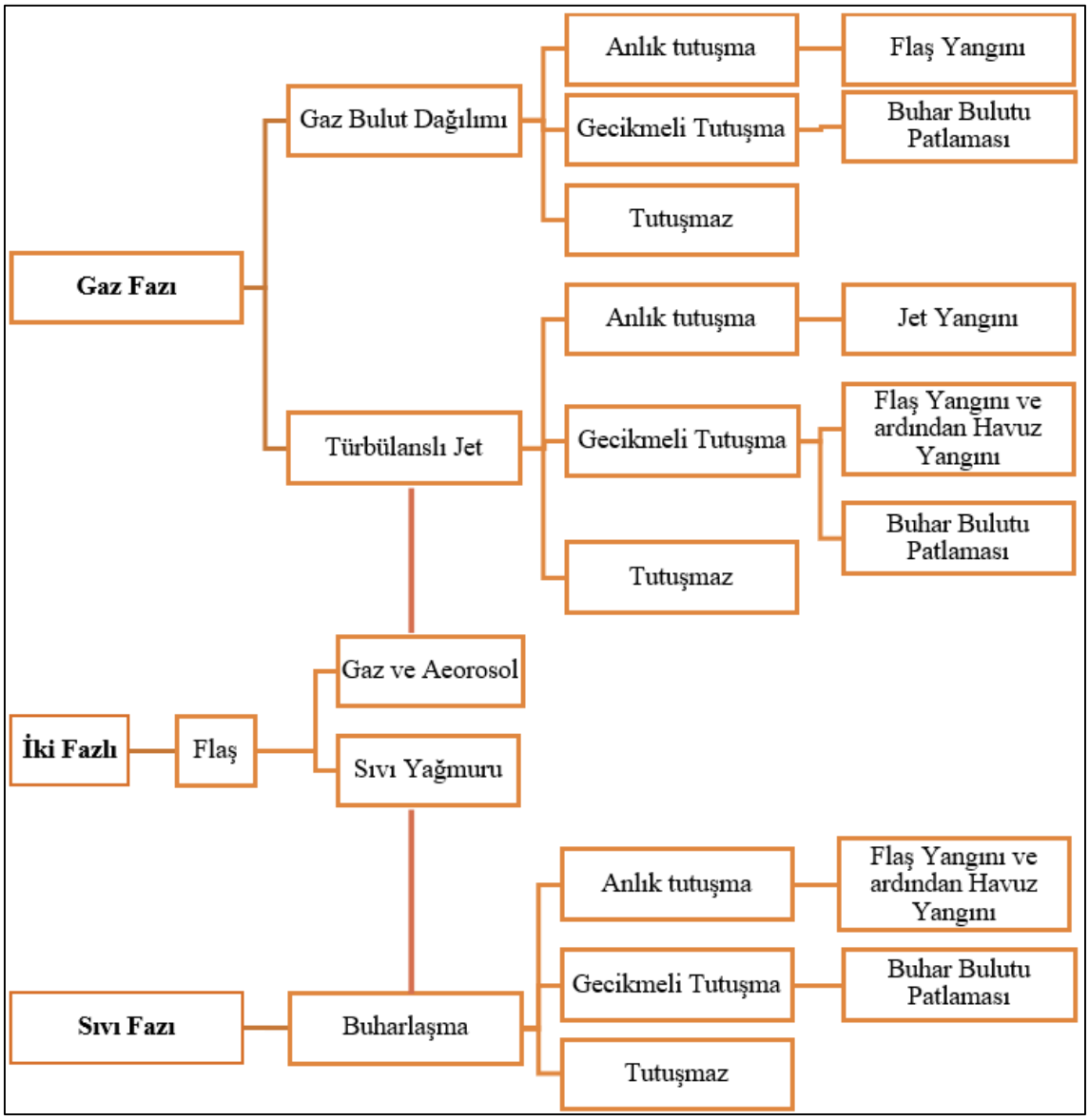
2.3. Fiziksel Hasara Yol Açan Kazalar

Fiziksel zararlılıkları olan kimyasalların neden olduğu en yaygın olan kaza tipi yangın ve patlamadır (Çizelge 2.1).

2.3.1. Yangın

Yanma, tutuşan bir yakıtın hızlı ekzotermik oksidasyonudur. Yanmanın gerçekleşmesi için yakıt, oksitleyici ve tutuşturma kaynağı gereklidir. Yakıt katı, sıvı veya buhar şeklinde olabilir, ancak yanma her zaman buhar veya gaz fazında gerçekleşir; yanmadan önce sıvılar buharlaşır ve katılar buhara ayrışır, sıvı ve katı yüzeyinde oluşan bu buhar yanar. Yanma reaksiyonu ile birlikte enerji açığa çıkar. Açığa çıkan enerjinin bir kısmı reaksiyonu sürdürmek için kullanılır [17]. Yangın yanma olayının kontrol dışı meydana gelmesidir. Bu kontrolsüz olayın oluşmasını önlemek, olası bir yangında can ve mal kaybını en aza indirmek amacı ile yangın olayından önce ve sonra alınacak tedbirleri ve söndürme yaklaşımlarını belirlemek amacı ile ülkemizde 19.12.2007 tarihinde "Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik" yürürlüğe girmiştir. Yönetmelikte yangın tipleri, yangın tiplerine göre söndürme uygulamaları, acil durum ekipleri ve planları, kaçış yolları gibi hayati önem arz eden konular ele alınmıştır [6]. Yangın anında eksik yanma sonucu uzun karbon zincirli kimyasallar yangının yüksek sıcaklığı etkisi ile buhar fazına geçebilir. Soğuyup yoğuşan bu buharlar aşağı doğru yangın alevine düşerek geri parlamaya neden olarak yangın alevini büyüterek yangının şiddetini artırır. Kapalı ortam yangınının sönmesinde yakıt bitmesi kadar yetersiz oksijen de önemli olup, yetersiz oksijen durumunda yangının korlaşması sonrası halen yüksek sıcaklıkta olan yangın alanına ani hava (oksijen) girişi geri tepme (back draft) diye adlandırılan patlamaya yol açar. Yangınlara müdahalelerde bu durumların göz önünde bulundurulması gerekmektedir [18].

Açık ortamda salım sonucunda meydana gelebilecek olaylar salım sonundaki kimyasalın fazına ve tutuşma zamanına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 2.2'de kimyasalın fazına göre meydana gelebilecek olaylar gösterilmiştir [19].



Şekil.2.2. Faza göre yangın ve patlama tipleri [19]

Havuz yangını

Havuz yangını alevlenir bir kimyasalın salımı ile zeminde birikinti oluşturması ve bu birkintinin tutuşmasıyla meydana gelir. Eğer salım kaynağının çevresinde havuzu sınırlandırıcı bir etmen (taşma havuzu, set, vb.) yok ise düz bir alanda sınırlandırılmamış bir havuz oluşturacaktır. Kısıtlanmamış bir havuz, dökülen sıvı miktarının setli bir alanı tamamen doldurmak için yetersiz olması veya setin taşması durumunda da oluşabilir [9]. Havuz yangının tehlikesi birinkintideki kimyasalın miktarı ve kimyasalın kaynama noktasına göre artar. Havuz yangına müdahale genellikle oluşan havuzun yüzeyini kapatacak şekilde köpük ile kaplanması ile oluşur. Havuz yangınında dikkat edilmesi gereken bir diğer

konu söndürme işlemindeki köpük bileşiminde var ise suyun yoğunluğu, havuzdaki kimyasalın yoğunluğundan fazla olması durumunda zemine doğru hareket etmesi ve burada yangın nedeni ile kaynamaya başlayarak yüzeye çıkmasıdır [9,10].

Jet yangını

Jet yangını, bir borudan veya kuyu başı patlaması olayından kaynaklanan yüksek basınçlı bir salımlar gibi basınçlı bir yanıcı gaz, buhar veya atomize sıvı akışının yanma olayıdır. Böyle bir salım meydana geldikten hemen sonra tutuşturulursa, sonuç yoğun bir jet alevi olur. Salım noktasında sürekli olarak basınç etkisi ile akışkanın püskürmesi ile öne doğru uzayan yangın devam eder. Genellikle jet yangını yakın çevreye hasar verir ve çok yıkıcıdır. Bunun nedeni jet yangınının termal radyasyon üretmesinin yanı sıra, alevin ucunun önündeki bölgede önemli ölçüde konvektif ısınmaya neden olması ve sünen alevin yanıcı kimyasallarıda tutuşturmasıdır. Kaçan akışkanın yüksek hızı havayı "jetinin" içine çekmesi daha etkin bir yanma meydana gelmesine neden olur [7].

2.3.2. Patlama

Patlama kap içerisindekinde enerjinin şekil değiştirmesi (iç enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesi) veya yanıcı kimyasalın tümü veya büyük bir bölümünün yanma reaksiyonuna girmesi ile ortaya çıkan enerjinin sıcaklık artışı ve basınç genleşmesi yaratmasıdır. Ani genleşme sonucunda basınç veya şok dalgaları oluşarak patlama gerçekleşir. Patlamalar fiziksel ve kimyasal patlama olarak iki sınıfta değerlendirebilir. Fiziksel bir patlama, mekanik enerjinin aniden açığa çıkması nedeniyle meydana gelir ve kimyasal bir reaksiyon içermez. Basınç artışı yaratan bu enerji değişimi şarapnel etkisi yapar. Kimyasal patlama ise yanma reaksiyonu, hızlı ekzotermik reaksiyon veya ayrışma reaksiyonu gibi bir kimyasal reaksiyon gerektirir [17]. Bununla birlikte kap dışında (atmosferik basınçta) gerçekleşen patlamalarda söz konusudur. Açık alanda patlama olayının olabilmesi için ya kimyasalın kararsız olup hızlıca form değişmesi ya da kimyasalın alevlenebilir özellikte olması gerekmektedir. Bu özelliğe sahip kimyasalın hava ile karışımının neredeyse tamamının yanması sonucu açığa çıkardığı enerji de ani sıcaklık artışı ile basınç ve şok dalgası yaratır. Ekipman/boru içi basınç artışlı fiziksel patlama ve ortam patlama tiplerine örnekler aşağıda verilmiştir [10].

BLEVE

Basınç altında sıvılaştırılmış gaz (LPG tankı vb.) veya atmosferik sıvı depolama işlemlerinde herhangi bir enerji kaynağı (örneğin yangın) ile, tankın çeperinin ısınması ile kap/tank içindeki akışkanın, sıvılaştırılmış gaz ise ısınarak gaz fazına geçmesi, atmosferik şartlarda depolanan sıvı ise artan buharlaşma dolayısıyla kap iç basıncının artışına yol açar. Sıvı depolamada oluşan yüksek buhar (yani yüksek basınç) yeteri kadar tahliye edilemediği durumda tankın zayıf noktalarından mekanik bütünlük bozulur. Bu patlamalar kaynayan sıvı genleşeyen buhar patlaması (BLEVE) olarak adlandırılır. Bu patlamanın meydana gelmesi için kap içindeki kimyasalın alevlenebilir olmasına gerekmez. Fiziksel patlama olarak sınıflandırabileceğimiz gibi içerideki sıvının alevlenebilir olması ve tutuşturma kaynağının (yangın alevi, kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşması) olması durumunda ek olarak patlama anında büyük çapta ateş/yangın topu da (fireball) meydana gelebilir [7, 8, 10].

Termal kaçış (Thermal runaway)

Termal kaçış patlaması genellikle ekzotermik reaksiyonun gerçekleştiği reaktörlerden yeteri kadar ısı uzaklaştırılamadığında meydana gelir. Ekzotermik reaksiyon, reaksiyon süresi boyunca ısı açığa çıkartır ve bu ısının kontrollü bir şekilde ortamdan uzaklaştırılması, reaktör iç sıcaklığının düzenli/sürekli kontrolü gerekir. Isı uzaklaştırmasında hata meydana gelmesi ile reaksiyon karışımının sıcaklığı artar, artan sıcaklık reaksiyon hızını arttırır ve bu daha fazla ısı açığa çıkmasına ve ilave sıcaklık artışının oluşumuna sebep olur [17]. Gaz fazı reaksiyonlarında kap içi basınç sıcaklık ile orantılı bir şekilde artarken, özellikle kaynama noktasına yaklaşan sıvı fazı reaksiyonlarında ani buharlaşmanın yarattığı ani basınç artışı meydana gelir ve mekanik bütünlük kaybına çok hızlı bir şekilde ulaşır. Endotermik reaksiyonun gerçekleştiği reaktörde fazla ısıtma veya dış kaynaklı ısıtma kaynağının reaktöre yaklaştırılması (alev) ile de ısı dengesinin bozulması söz konusudur ve kontrolsüz bir şekide sıcaklık artışına neden olarak termal kaçış meydana gelerek patlama gerçekleşebilir. Reaktör içeriğinin alevlenebilir kimyasal olması durumunda fiziksel patlamayı takip eden kimyasal enerji salımlı patlamada (yangın) meydana gelir. Genellikle ilk önlem olarak artan basıncın tahliye edilmesi için basınç emniyet vanaları kullanılır. Alevlenebilir kimyasal içerik söz konusu olduğunda tahliye sırasında göz önününde bulundurulması gereken en önemli konu basınç emniyet veya tahliye vanasınından (PSV-PRV: Pressure Safety Valve-Pressure Relief Valve) dışarı çıkan kimyasalın tutuşma

kaynağına ulaşmayacak şekilde, güvenli bir bölgeye tahliye edilmesidir. Kimyasalın tahliye borusunda yüksek basınç altında sürüntünmesi ile statik elektrik yüklenebileceği de bilinmelidir. Bu durumlarda yangın ile sonuçlanan patlamalar meydana gelebileceğini ve tasarımlarda bu konuların göz ardı edilmemesi gerektiğini vurgulamak önemlidir. Bununla birlikte tasarımda PSV'nin açma set değerini belirlerken vanaların devreye gireceği basınca kadar adyabatik şartlarda sıcaklığın nereye kadar yükseleceğinin bilinmesi, yüksek sıcaklıkta farklı tehlikeli kimyasalların oluşması veya alevlenebilir kimyasalın tahliyesi sırasında kendi kendine tutuşma sıcaklığına gelmeyeceğinin değerledirilmesi açısından önem kazanmaktadır. Eğer kimyasal alevlenebilir değil ise tahliye vanasının devreye girmesi ile yangın veya patlama oluşmadan boşalabilir ancak bu durumda da kimyasalın toksisitesini değerlendirmek gerekmektedir. Sıvı fazı reaksiyonlar için buhar oluşumu kaynaklı iç basınç artışında ise etkili bir soğutma sistemi ile buharın yoğunlaştırılması sağlanarak kimyasalın iç basıncı düşürülerek tahliye edilmeden basınç düşürülebilir.

Öte yandan patlamalar, havada alevlenebilir kimyasalın yanması gibi bir reaksiyondan da kaynaklanabilir. Bu kimyasal yanma reaksiyonları sınırlandırılmış ortamlarda; binalarda, kısmen açık tanklarda veya açık ortamlarda atmosferik şartlarda meydana gelerek patlamaya neden olabilir [19]. Patlama ortamda bulunan tüm kimyasalın aniden tutuşarak büyük enerji salımına yol açması ile oluşur. Ortam patlamalarının meydana gelmesi için; gaz, buhar, sıvı sisi veya toz halde alevlenebilir kimyasal maddenin hava içerisinde dağılmış alevlenme limitleri içerisinde bulunması gereklidir. Bu karışım oranına sahip alevlenebilir kimyasalların tutuşturma kaynağıyla buluşması ile ani yanmanın yol açtığı patlama gerçekleşir.

Buhar-Gaz bulutu patlaması

Alevlenebilir buhar-gazın açık atmosfere salımında, hava ile karışımı yanıcı bir kimyasal bulut oluşturur. Gecikmeli olarak tutuştuğunda, bulutun patlaması meydana gelir ve alev hızı yüksek hızlara çıkararak aşırı basınç üretir. Eğer patlama sınırlandırılmamış alanda meydana geldi ise UVCE (Sınırlandırılmamış Buhar Bulutu Patlaması) olarak adlandırılır [19]. Bu tür patlamalara diğerlerine göre daha az rastlanır. Çünkü havaya yayılan gaz/buhar rüzgar etkisi ile çoğu zaman alevlenebilir konsantrasyonunun altına düşer. Bu patlama tipi genellikle kaza sonucu yüksek miktarda gaz/buhar salındığında meydana gelir.

Atmosferik patlama (ATEX patlaması)

Normal çalışma şartlarında alevlenebilir kimyasalların ortama salındığı durumlarda meydana gelebilir. İşletme şartlarında olası olan bu salımlara ilave olarak bir kaza sonucu olabilir (bir borunun yarılması veya operatörün taşıdığı kimyasalı düşürmesi), proses gereği veya numune alma gibi rutin üretim ve bakım operasyonunda meydana gelebilir. Kimyasalın fazına, açık ortamda gösterdiği davranışa, tutuşmanın ne zaman oluşacağına göre ATEX, yukarıda anlatılan yangın ve patlama olaylarını ifade eder. Proses gereği salım yapan kaynaklara atmosfere açık kimyasal tanklar, drenajlar, ventler, emniyet vanaları örnek gösterilebilir. Salım beklenmeyen ekipmanlar da salım kaynağı olarak belirlenir ve örnek olarak boru bağlantıları, ekipman contaları verilebilir. Salım sonrası patlama olabilmesi için alevlenebilir kimyasalın hava ile oluşturduğu karışımının konsantrasyonunun parlama aralığında olması gerekir. Patlama olaylarının meydana gelmesi için de ortamda tutuşturma kaynaklarının olması gerekmektedir. Tesis içinde birçok tutuşturma kaynağı olabilir. Bunlar sıcak yüzeyler, sıcak gazlar, açık alevler, mekaniksel olarak meydana gelen kıvılcımlar, elektrikli ekipmanlar, kontrol dışı oluşan elektrik akımları ve katodik korozyon koruması, insan dahil tüm statik elektrik kaynakları, elektromanyetik ve radyo frekans dalgaları, ultrasonik ses dalgaları, iyonize radyasyon, şok dalgaları ve adyabatik sıkışma, ekzotermik kimyasal reaksiyonlar, yıldırım olarak genelleme yapılabilir [20].

- Sıcak yüzeyler: Ortamda bulunan gaz/buhar veya tozlar sıcak yüzeye temas ile tutuşabilir. Makinaların hareketli parçalarının ekseninin doğru olmaması, sıkı koruyucular ile kapatılmamış olması sürtünmeye yol açarak sıcak yüzey oluşmasına neden olabilir. Bir boru hattından geçen sıcak su/buhar yine borunın dış yüzeyinin sıcaklığının artmasına neden olabilir.
- Açık alevler ve sıcak gazlar: Yanma reaksiyonu sonucu meydana gelen alevler patlayıcı ortamlar için etkili tutuşturma kaynaklarından biridir. Sigara alevi, ısınma amaçlı yakılmış ateşlerde tesislerde değerlendirilmesi gereken alevlerdir. Reaksiyon sonucu oluşan sıcak gazlar da ortamda alev olması durumunda ateş halindeki katı partiküllere dönüşebilir.
- Mekanik kıvılcımlar: İnceltme, öğütme gibi operasyonlarda sürtünme, taşlama gibi aşındırma veya parçalama operasyonlarında katı maddeler birbirinden ayrılır ve ayrılma enerjisi ile birlikte ısınabilir. Bu ısınma etkisi ile ortamda bulunan gaz/buhar veya toz

tutuşabilir. Ayrıca makine veya koruyucu donanımlarına giren yabancı metal veya taş gibi maddeler kıvılcım oluşturmaya neden olabilir.

- Elektrikli cihazlar: En çok rastlanan tutuşturma kaynaklarından biri olup, devre kapakları açıldığında, kaçak akım meydana getirdiklerinde veya gevşek bağlantıları nedeni ile kıvılcım oluşturabilirler.
- Katodik korozyon koruması ve kontrolsüz elektrik akımları: Kontrolsüz akımları taşıyan sistem parçaları ayrıldığında, bağlandığında veya köprülendiğinde az da olsa potansiyel farklılıklar olması durumunda elektrik kıvılcımlarının ve/veya arklarının sonucu patlayıcı ortamda bulunan gaz/buhar veya tozlar tutuşabilir.
- Elektromanyetik dalgalar: Radyo frekansa sahip dalgalar (10^4 Hz'den 3E+11 Hz'e kadar), yeterince büyük iletken parçalar üzerinde tutuşturma kaynağı olabilirler. 3E+11 Hz'den 3E+15 Hz aralığındaki dalga boyuna sahip dalgalar patlayıcı ortamlarda veya katı parçacıklar üzerinde absorpiyon yolu ile tutuşturma kaynağı olabilirler.
- İyonlaştırıcı radyasyon: Radyoaktif maddeler ve iyonlaştırıcı radyasyon, enerjiyi absorbe ederek patlayıcı ortamı tutuşturabilirler.
- Ultrasonik ses dalgaları: Ultrasonik ses dalgalarının enerilerinin büyük bir bölümü katı veya sıvı maddelerce absorbe edilir ve bu durumun maddeleri tutuşturacak kadar ısıtabilir.
- Ekzotermik reaksiyonlar: Ekzotermik reaksiyonda açığa çıkan ısı hızı, çevreye verilerek kayıp olan ısı hızından büyük olduğunda ortama salınan yüksek ısı tutuşma kaynağı görevini görebilir.
- Adyabatik sıkışma ve şok dalgaları: Adyabatik sıkışma veya şok dalgaları meydana geldiğinde ortamda yüksek sıcaklıklar oluşabilir ve buda patlayıcı ortamın tutuşmasına neden olabilir.
- Yıldırım: Bir doğa olayı olan yıldırım, patlayıcı ortamda oluştuğunda tutuşturma kaynağı olacaktır. Yıldırım oluşmasa dahi kötü hava şartlarında sistemler ve korucu donanımlarda yüksek gerilim meydana gelebilir ve tutuşturucu kaynağı olabilirler [20].
- Statik elektrik: Statik elektrik, bir maddenin içerisindeki ya da yüzeyindeki elektrik yüklerinin oransızlığından kaynaklanır. En az biri iletken olmayan iki farklı maddenin kayma, sürtünme veya ayrılma gibi nedenlerle birbiriyle temas edip ayrılması ile oluşan elektron sürtme, dokunma veya etki yolu ile transferi meydana gelir. Statik elektrik hacim/huni deşarjı (tank, depo ya da herhangi bir kabın doldurulması anında toz yüzeyindeki deşarj), yayılan saçaklı deşarj (arkasında iletken madde bulunan bir yalıtkan yüzeyinden deşarj), kıvılcım deşarjı (topraklanmamış iletkenlerden deşarj) gibi farklı

şekillerde deşarj olabilir. Kıvılcım (ark) deşarjı iki iletken nesne arasında oluşan deşarj tipidir. Topraklanmayan elektriksel olarak iletken nesneler üzerinde biriken yükün toprağa deşarjlanması her iki nesne iletken olduğu için yük karşılıklı olarak çok çabuk akar. Arkasında iletken madde bulunan yalıtkan yüzeyden deşarjı iç yüzeyi yalıtım malzemesi ile kaplanmış iletken (metal) borudan yüksek hızda sıvı, toz taşınması, iletken (metalik) silo ve konteynerlerin doldurulması, pnömatik taşıma borularında cam ve pleksiglastan yapılmış kontrol pencereleri (topraklama devamlılığın olmaması), yalıtıcı yüzey üzerinde sürekli toz parçacığı darbesi (toz seperatörlerinin siklonlarındaki kaplanmış toz saptırma plakaları) ile meydana gelebilir. Korona deşarjı ise bir sıvının ya da elektriksel olarak yüklü bir iletkeni saran gazın iyonizasyonu tarafından oluşturulan elektriksel bir deşarjdır. Kendiliğinden meydana gelen korona deşarjı doğal olarak eğer elektrik alan şiddetinin limiti sonsuza gitmiyorsa yüksek voltajlı sistemlerde açığa çıkar. Bununla birlikte insan vücudu geniş bir yüzey alanına sahiptir ve statik yükün oluştuğu faaliyetlerde bulunurken veya yükün yakınında bulunması ile birikim söz konusudur. Bu yük havadan ve yalıtkan zeminle temas yoluyla uzaklaştırıldığı gibi iletken olmayan giysilerin vücuttan çıkarılması ile de sağlanabilir. Bu boşalmadaki statik yükü önlemek için antistatik olmayan kıyafetler, ayakkabılar gibi malzemeler kullanılabilir [21].

Ülkemizde çalışanları bu tür patlayıcı ortamların oluşturduğu risklerden korumak amacı ile 30.04.2013 tarihinde "Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik" yürürlüğe girmiştir. İlgili yönetmelik gereği normal işletme şartlarında oluşabilecek patlayıcı ortamların belirlenmesi, belirlenen alanların sınıflandırılması ve tehlikeli mesafelerin belirlenmesi ve bu alanlardaki tutuşturma kaynaklarının ortadan kaldırılarak tutuşturmayı önlemesi, bunun içinde bu alanlarda kullanılacak uygun ekipman seçimlerinin yapılması gerekmektedir. Tehlikeli alan sınıflandırmasında gaz ortamları için genel olarak 60079-10-1 standardı, toz ortamları için ise 60079-10-2 toz ortamları standardı kullanılmaktadır [12].

3. PATLAMADAN KORUNMA YAKLAŞIMINDA KULLANILAN STANDARTLAR

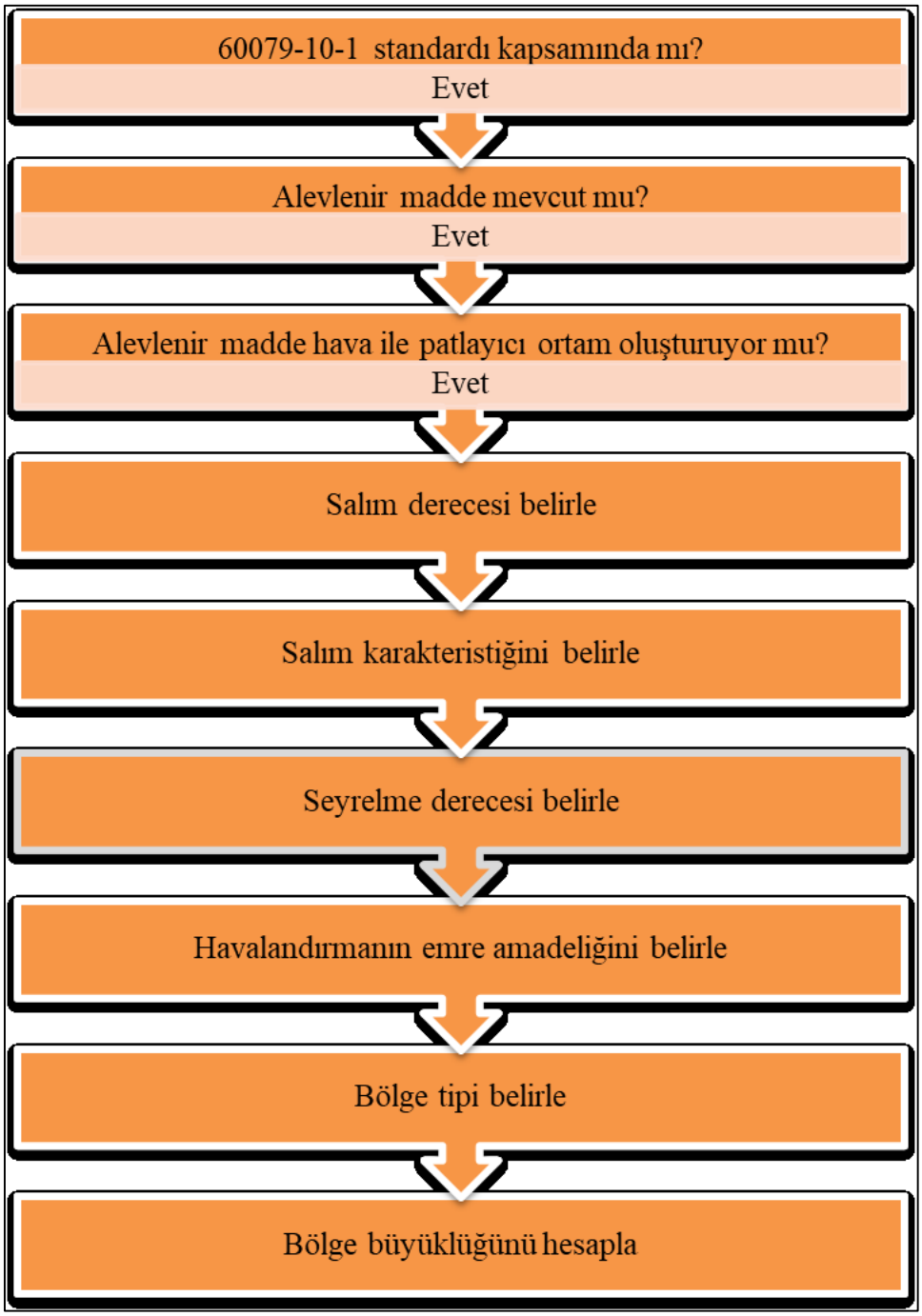
3.1. 60079-10-1 Standardı

Patlama riskinin değerlendirilmesi gerekliliği ilgili yönetmelikte belirtilmiştir. 60079-10-1 standardı patlayıcı akışkan ortamları için temel bir doküman olarak kullanılmaktadır. Riskin değerlendirilmesi amacıyla yanıcı kimyasal maddenin özellikleri, kimyasalın proseste hangi noktalardan işletme sırasında salımı olabileceği, kap dışına çıkan yanıcının dağıldığı alanda hangi kaynaklardan tutuşabileceği belirlenmelidir. İlgili standartta havalandırma kaynaklı seyrelme etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. Tutuşturma kaynaklarının bulunması halinde tutuşma olayının gerçekleşebileceği tehlikeli alanlar (bölge) havalandırmanın da hesaba katılmasıyla değerlendirilir. Değerlendirmeler sonucunda tehlikeli alanlar belirlenir ve sınıflandırmaları yapılır. Sınıflandırma maddenin fiziksel durumu, patlayıcı ortam oluşturma sıklığı ve sürelerine bağlı olarak yapılır. Bölge genişliklerinin belirlenmesi ve bölgeye göre uygun ekipman seçiminin gerçekleştirilmesi ile tehlikeli alanlarda patlama riskinin yok edilmesi veya azaltılması amaçlanmaktadır [13].

3.1.1. Standart iş akışı, kapsamı ve tanımlar

Standart iş akışı

60079-10-1 standardının iş akışı için aşağıda verilen Şekil 3.1 kullanılabilir. İlk olarak yapılan iş standardın kapsamında olup olmadığı kontrol edilir. Eğer cevap evet ise çalışma alanında alevlenebilir kimyasal varlığının olup olmadığı kontrol edilir. Eğer bu sorunun da cevabı evet ise alevlenebilir maddenin salım noktaları ve bu noktadaki alandan salım miktarı belirlenir. Salınan alevlenir maddenin derecesi ve karakteristiği tanımlanır. Salım sonunda maddenin hava ile ne kadar seyreleceği hesaplanır ve bu çıktılara göre tehlikeli bölge sınıflandırması yapılarak ve tehlikeli alan mesafesi hesaplanır.



Şekil 3. 1. 60079-10-1 standardı iş akışı

Kapsam

İlgili standart alevlenebilir akışkanların değerlendirilmesi için önerilmiş olup standardın kapsam dışı bıraktığı aşağıda belirtilen özel durumlar ve uygulanamayacağı bazı durumlar vardır.

- Grizu riskine sahip maden ocakları,
- Patlayıcı üretimi ve işlenmesi,
- Tıbbi amaçlar doğrultusunda hazırlanmış ve kullanılan odalar,
- Mesken binalar,
- Düşük basınçlı yakıt gazının kullanıldığı, tesisatın ilgili gaz yönetmelikleriyle uyumlu olduğu ticari ve endüstriyel uygulamalar,
- Yanıcı tozların veya uçuşan yanıcı parçacıkların varlığı nedeniyle bir tehlike ortaya çıkabileceği ancak hibrid bir karışımın değerlendirilmesinde bazı prensiplerin kullanılabileceği yerler

kapsam dışı bırakılmıştır.

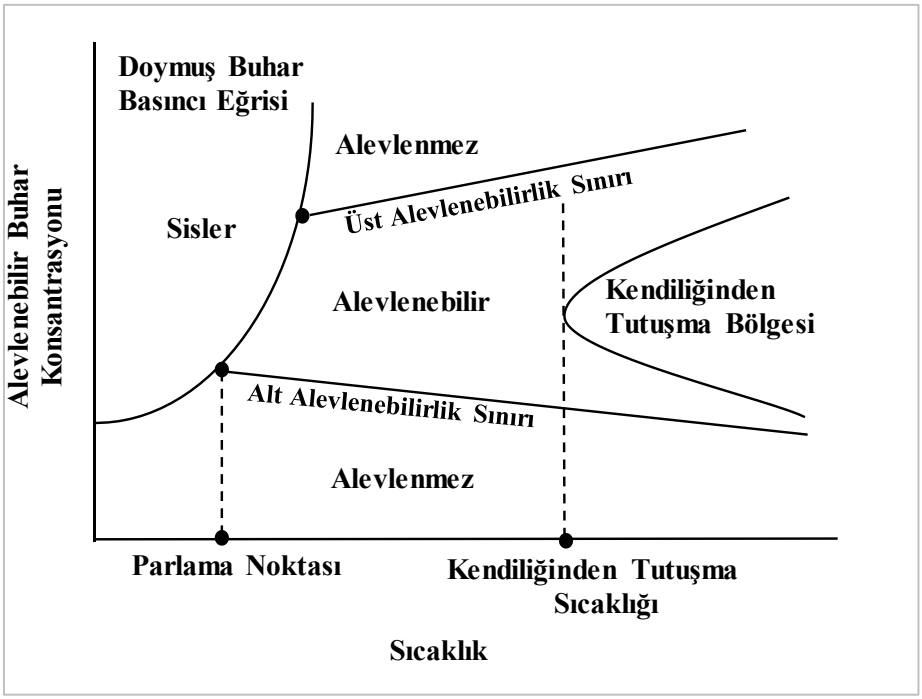
Bu standart alevlenebilir akışkanlar için kullanılabilir olmakla birlikte yalnızca gaz/buhar salımları sonucunda havada karışım haline gelerek tutuşma tehlikesinin oluşabileceği alanlarda uygulanması için hazırlanmıştır. İlgili standartta alevlenebilir sisler, aerosoller ve hibrid karışımlar için hesaplama verilmeyerek standartta verilen sınıflandırma ve ayrıntıların da uygulanamayacağı belirtilmiştir yalnızca bilgilendirme amaçlı alevlenebilir sisler, aerosoller ve hibrid karışımlar için ekler oluşturulmuştur (Ek G ve Ek İ). Alevlenebilir sisler, buharın sıvıya yoğunlaşması veya bir sıvının sıçrama, püskürtme yoluyla dağılmış bir duruma parçalanmasıyla üretilen havada asılı kalan sıvı damlacıklardır. Aerosoller havada asılı halde bulunan 50 mikrondan küçük damlacıklardır. Aerosoller bazı termodinamik şartlarda buhar, gaz veya basınçla sıvılaştırılmış gazların flaş buharlaşması ile meydana gelir. Aerosol veya sis formundaki sıvıların parlama noktası sıcaklığının çok altındaki sıcaklıklarda yanabileceği veya patlayabileceği bilinmektedir. Buhar yanıcılık limitleri ve sıvı parlama noktası sıcaklıkları kavramları aerosollerin veya sislerin yanıcılığını tanımlamak için yeterli değildir [9, 13]. NFPA 68, ince bir hidrokarbon sisinin alt alevlenebilirlik limit (LFL: Low Flammable Limit) değerinin, oda sıcaklığında havadaki yanıcı hidrokarbon gazlarının LFL değerine yaklaşık olarak eşit olduğu önerisini belirtir. Büyüklüğü aerosol boyutunda olan damlacıklar, sis bulutlarının en kolay tutuşabilen kısmıdır. Hibrid karışımlar ise NFPA 68 standardında yanıcı bir toz veya yanıcı sis ile yanıcı gazın karışımı olarak tanımlanır. Hibrid karışımlar buhar, gaz veya tozdan farklı bir şekilde davranış gösterebilirler [22].

60079-10-1 standardında sıvı salımları içinde bazı kısıtlamalar mevcuttur. Parlama noktasından daha düşük bir sıcaklıkta kaptan çıkan sıvı birtakım şartlarda sis bulutu

oluşturabilir. Parlama noktaları yüksek olan sıvılar tehlikesiz kabul edilmekte ancak basınç altında salımlarının meydana gelmesi durumunda alevlenebilir sisler meydana gelebilecği belirtilmektedir.

Alevlenir madde

Alevlenebilirlik yani yanıcılık, kimyasalın kolayca tutuşabilmesi ve yanma kabiliyeti olarak ifade edilir. Kimyasalın yanıcılığı değerlendirilirken parlama noktası, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı ve alevlenebilirlik sınırları dikkate alınır. Parlama noktası, sıvı veya katının, hava ile tutuşabilecek yeterli buhar ürettiği en düşük sıcaklıktır. Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı ise kimyasalın herhangi bir ateşleme kaynağına ihtiyaç duymadan kendiliğinden yanabildiği sıcaklıktır. Alevlenebilirlik sınırları ise ateşleme kaynağının varlığında, ortamda bulunan gazın veya buharın patlamaya neden olabileceği konsantrasyon aralıklarını ifade eder. Alt alevlenebilirlik sınırı (LFL) yangın veya patlama için gerekli olan en düşük konsantrasyon iken; üst alevlenebilirlik sınırı (UFL: Upper Flammable Limit) en yüksek konsantrasyondur. Kimyasallar bu iki sınır arasında yanıcı veya patlayıcıdır. Buhar konsantrasyonu ile sıcaklık arasındaki ilişki Şekil 3.2' de verilmiştir [17].



Şekil 3.2. Alevlenebilir buhar konsantrasyonu – sıcaklık ilişkisi [17]

Salım kaynakları ve salım dereceleri

Proseste bulunan her öğenin salım kaynağı olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Salım kaynaklarının derecelendirilmesi oluşum sıklıklarına ve sürelere bağlı olarak tanımlanır. Alevlenebilir maddenin (i) atmosfere açık kimyasal tanklar proses gereği salım yaptığından sürekli dereceli; (ii) normal çalışmada salımı beklenen drenajlar, ventler, emniyet vanaları birincil dereceli; (iii) normal çalışma sırasında salım beklenmeyen boru bağlantıları, sızdırmaz olarak kabul edilen ekipman contaları gibi kaynaklara ikincil dereceli salım kaynakları olarak ifade edilir.

Salım karakteristiği

60079-10-1 standardına göre salım karakteristiği belirlemek için gaz ve sıvı fazlar için farklı denklemler önerilmiştir. Şekil 3.3' de salım karakteristiklerine göre ayrım yer almıştır.



Şekil 3. 3. Salım karakteristiği

Salım karakteristiğinin belirlenmesinde ki bir diğer etkende salım açıklığıdır. Sürekli ve birincil dereceli normal şartlarda beklenen salım miktarları açıklık kesitleri boyut ve şekilleri ile değişiklik gösterir ve geometrisine göre hesaplama gerektirir. İkincil dereceli salımlar için ise Çizelge 3.1 önerilmiştir.

Çizelge 3.1. Salım açıklık değerleri

Salım Kaynağı Tipi	Salım Kaynağı	Salım açıklığının belirli şartları için verilen değerler S (mm^2)		
		Salım açıklığının genişlemeyeceği	Salım açıklığının genişleyebileceği	Salım açıklığının ciddi arızalanmaya kadar genişleyebileceği
Sızdırmazlık Elemanları (Sabitlenmiş bölümlerdeki)	Sıkıştırılmış fiber contalar veya benzerlerine sahip flanşlar	0,025 ≥ … ≥ 0,25	0,25 ≥ … > 0,25	(İki cıvata arasındaki bölge) × (Conta kalınlığı), genellikle ≥ 1 mm
	Spiral sızdırmazlık elemanları veya benzerlerine sahip flanşlar	0,025	0,25	(İki cıvata arasındaki bölge) × (Conta kalınlığı), genellikle ≥ 0,5 mm
	Halka tipi ek bağlantı parçaları	0,1	0,25	0,5
	50 mm'ye kadar küçük çaplı açıklık bağlantı parçaları	0,025 ≥ … ≥ 0,1	0,25 ≥ … > 0,1	1
Sızdırmazlık Elemanları (Düşük hızlı hareketli bölümler üzerinde bulunan)	Vana gövdesine bağlı çubuk biçimli elemanlar	0,25	2,5	En az 2,5 mm^2 olmak üzere donanım imalatçısının verilerine göre tanımlanmalıdır.
	Basınç tahliye vanaları	0,1 × (Açıklık Kesit Alanı)	Uygulanmaz	Uygulanmaz
Sızdırmazlık Elemanları (Yüksek hızlı hareketli bölümler üzerinde bulunan)	Pompalar ve kompresörler	Uygulanmaz	5 ≥ … ≥ 1	En az 5 mm^2 olmak üzere donanım imalatçısının verilerine ve/ veya proses birim konfigürasyonuna göre tanımlanmalıdır.

3.1.2. Tehlikeli alan büyüklüğü hesaplamaları

Gaz salım oranı hesaplanması

Gaz salım oranı ideal gazın adyabatik genleşmenin politropik indeksi (γ), kimyasalın moleküle ağırlığı (M), spesifik ısı oranı (C_p) ve evrensel gaz sabiti (R) kullanılarak Eş.3.1 ile hesaplanır.

$$\gamma = \frac{M\,C_p}{M\,C_p - R} \tag{3.1}$$

Gazın kritik basıncı (P_c) ise atmosferik basınç (P_a) ve politropik indeks kullanılarak Eş.3.2 ile belirlenir.

$$P_c = P_a \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{3.2}$$

Düşük veya orta basınçta bulunan gazlar için sıkıştırılabilirlik faktörünü bir olarak (Z= 1,00) kullanılması ihtiyatlı bir yaklaşım olduğu belirtilmiştir. Gazın hacimsel hızı (Q_g) ise salım noktasındaki kimyasalın basıncının kritik basınçla ilişkisine göre belirlenen salım oranı (W_g) ve gaz/buhar yoğunluğunun (ρ_g) kullanıldığı Eş.3.3 denklemi ile hesaplanır.

$$Q_g = \frac{W_g}{\rho_g} \tag{3.3}$$

Ses hızında salım: Gazın kap içindeki basıncı kritik basınç değerinden daha yüksek ise gazın salındığındaki hızı sabit alınarak ses hızına eşit olduğu varsayılarak salım oranı (W_g) Eş.3.4 denklemi ile belirlenir.

$$W_g = C_d\,S\,P\sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \tag{3.4}$$

Burada kullanılan ifadeler aşağıdaki gibidir.

C_d	Tahliye katsayısı
S	Salım noktasındaki açıklığın kesiti
p	Kap içindeki basınç
M	Akışkanın mol kütlesi
T	Akışkanın sıcaklığı

Ses altı hızında salım: Kaptaki basıncın kimyasalın kritik basınç değerinden daha az olması durumunda çıkan gazın hızı sabit olmadığı varsayılarak salım oranı (W_g) belirlenmesinde Eş.3.5 denklemi kullanılır.

$$W_g = C_d\, S\, P \sqrt{\frac{M}{ZRT}\,\frac{2\gamma}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{P_a}{P}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]}\left(\frac{P_a}{P}\right)^{(1)/\gamma} \quad (3.5)$$

Sıvı salım oranı hesaplanması

Sıvıların tek fazlı ve iki fazlı olarak salımı gerçekleşebilir. Basınçla sıvılaştırılmış gaz gibi maddeler salım esnasında, salım noktasından önce veya hemen sonra çeşitli termodinamik veya mekaniksel sebepler ile hem gaz fazı hem de sıvı fazı içerebilir. Standartta bu tarz salımlar iki fazlı olarak adlandırılmış ve salımlar da buhar bulutu oluşturan sıvının daha çok kaynayarak damlacık oluşturabileceği ve/veya havuz oluşumuna sebep olabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte tek fazlı salım olarak adlandırılan salım tipinde atmosferik şartların üzerinde kaynama noktasına sahip sıvıların salım noktasının yakında buharlaşabileceği belirtilmiştir. Sıvı salımlarının buhar şartlarının değerlendirilmesi için çoklu değişken olduğu belirtilmiş ancak bir yöntem verilmemiştir. Delikten hemen sonra meydana gelebilecek buharlaşma için standartta verilen örnekte olduğu gibi endüstriyel yönetmeliklerden buharlaşma fraksiyonunun okunabileceği ifade edilmiştir. Delikten buharlaşmayıp tamamının havuz oluşturacağı salımlarda sıvının zemine ulaşana kadar buharlaşmayacağı, salınan maddenin havadan hafif veya ağır olma durumuna bakılmaksızın nötr biçimde yüzme özelliğinin olduğunu ve aniden dökülme ile 1 cm derinlikte havuz oluşturabildiği kabul edilmiştir. Bu şartlar altında hacimsel buharlaşma oranı Eş.3.6' de verilmiştir.

$$Q_g = \frac{18{,}5\times10^{-8}\, u_w^{0,78}\, A_p\, P_v}{M^{0,333}} \times \frac{T_a}{T} \quad (3.6)$$

Burada kullanılan ifadeler aşağıdaki gibidir.

Q_g	Salım noktasından çıkan kimyasalın hacimsel akış hızı
u_w	Havuz yüzeyi üzerindeki rüzgar hızı, m/s
A_p	Havuz yüzey alanı
P_v	T sıcaklığındaki buhar basıncı
M	Akışkan mol kütlesi
T_a	Atmosferik hava sıcaklığı
T	Akışkan sıcaklığı

Salım oranı (W), salımın meydana geldiği açıklıktaki basınç farkından (ΔP= tank/boru içi basınç, P – atmosferik basınç, P_a) etkilenir ve Eş.3.7 ile belirlenir. Belirlenen salım oranı ile salım süresi kullanılarak sıvının kütlesel miktarı belirlenir.

$$W = C_d\, S \sqrt{2\rho\Delta P} = C_d \times S \times \sqrt{[2 \times \rho_s \times (P - P_a)]} \tag{3.7}$$

Dış ortama çıkan miktar hesaplandıktan sonra sıvının buharlaşma oranının (W_e) belirlenmesi gerekir.

$$W_e = \frac{18{,}3 \times 10^{-3} {u_w}^{0{,}78} A_p P_v M^{0{,}667}}{R \times T} \tag{3.8}$$

Eş.3.8’ de yer verilen ifadeler aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

W_e	Sıvı buharlaşma oranı
u_w	Havuz yüzeyi üzerindeki rüzgar hızı
A_p	Havuz yüzey alanı
P_v	T sıcaklığında buhar basıncı
M	Akışkan mol kütlesi
R	Evrensel gaz sabiti
T	Akışkan sıcaklığı

Havalandırma

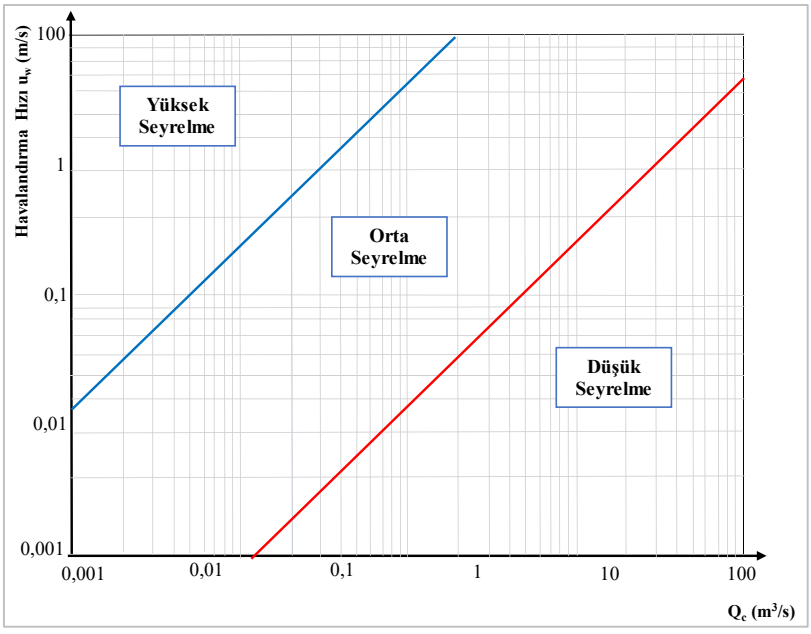
Havalandırma ile ortamda bulunan gaz ve buhar derişimleri ve kalıcılık süresi azaltmasından dolayı bölge sınıflandırmasını değiştirebilir. İki çeşit havalandırma tipi vardır. Bunlar doğal ve cebri havalandırmadır. Açıklıklardan bina içinde giren rüzgâr ya da binadaki sıcaklık değişimleri ile basınç farklarından dolayı doğal havalandırma ortaya çıkmaktadır. Standart bina içlerinde doğal havalandırmanın belirlenmesi için formüller vermiştir. Cebri havalandırma ise genel ve lokal olmak üzere ikiye ayrılır. Gerekli olan hava hareketliliğini sağlamak için fanlar veya tahliye cihazları gibi yapay ekipman kullanılır. Bina dışı olan açık alanlarda ise Çizelge 3.2’ deki havalandırma değerlerini yaklaşım olarak sunmuştur.

Çizelge 3.2. Bina dışı havalandırma değerleri

Yerden Yükseklik / Salım Tipi	Engellenmemiş Alanlar			Engellenmiş Alanlar		
	≤ 2 m	2 m < .. < 5 m	> 5 m	≤ 2 m	2 m < .. < 5 m	> 5 m
Havadan kütlece daha hafif gaz/buhar salımları için belirlenen havalandırma hız değeri	0,5 m/s	1 m/s	2 m/s	0,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s
Havada kütlece daha ağır veya nötr olarak yüzen gaz/buhar salımları için belirlenen havalandırma hız değeri	0,3 m/s	0,6 m/s	1 m/s	0,15 m/s	0,3 m/s	1 m/s
Yerden yükseklik seviyesine bakılmaksızın sıvı havuzlarından buharlaşma hızı için belirlenen havalandırma hız değeri	> 0,25 m/s			> 0,1 m/s		

Belirlenen havalandırma değeri ile hacimsel salım karakteristiği kullanılarak seyrelme derecesi Şekil 3.4' den belirlendikten sonra salım karakteristiği (Q_c) hesaplaması Eş.3.9' da verilmiştir.

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \times LFL} \tag{3.9}$$



Şekil 3.4. Seyrelme derecesi grafiği

Bölge sınıflandırmasında ise seyrelme derecesi kadar havalandırmanın emre amadeliğide etkilidir, Çizelge 3.3' de tanımlarına göre uygun olan seçilir. Emre amadeliği kötü olarak sınıflandırmayan havalandırmaların düşük seyrelme kabul edileceği ve bina içindeki doğal havalandırmanın bina dışındaki rüzgâr ve sıcaklığa bağlı olmasından dolayı iyi kabul edilmemesi gerektiği ilgili standartta belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Emre amadelik tanımları

Emre Amadelik	Tanım
İyi	Sürekli olarak havalandırma yapılır.
Vasat	Normal çalışmada havalandırmanın olması ancak seyrek ve kısa periyotlar olmak koşuluyla kesintiye izin verilir.
Kötü	İyi ve vasat olarak tanımlanamaz ancak uzun periyotlar boyunca da kesinti olması beklenmez.

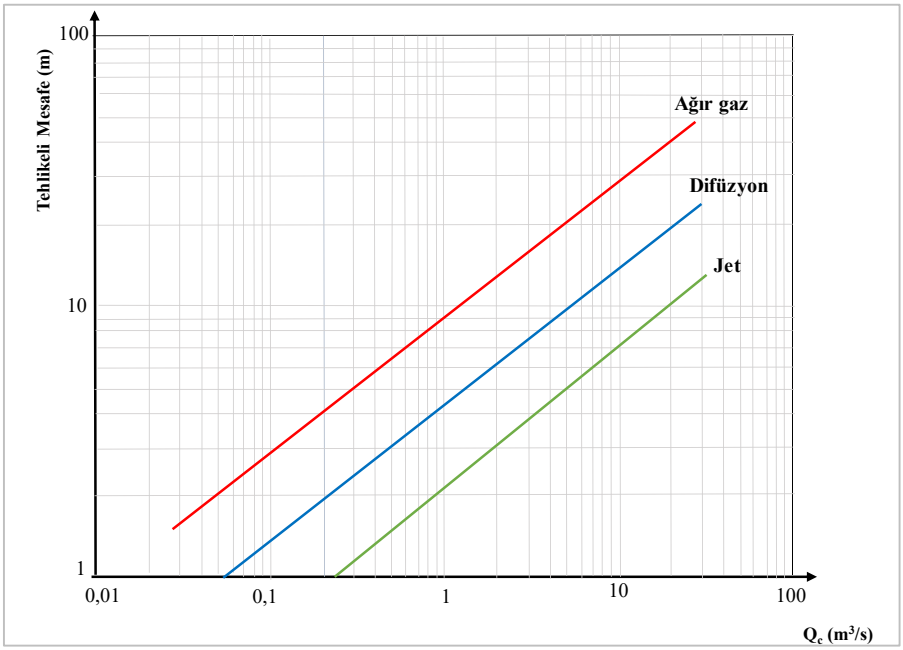
Salım kaynağının derecesi, havalandırma etkisiyle seyrelme miktarı ve emre amadelik bilgisi kullanılarak Çizelge 3.4 yardımı ile bölge sınıflandırması yapılır. Çizelgede tanımlanan NE (Negligible extent) normal şartlar altında ihmal edilebilir bölge olduğu anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.4. Tehlikeli alan sınıflandırması

Salım Derecesi	Havalandırma Etkinliği						
	Yüksek Seyrelme			Orta Seyrelme			Düşük Seyrelme
	Havalandırmanın Emre Amadeliği						
	İyi	Vasat	Kötü	İyi	Vasat	Kötü	İyi, Vasat, Kötü
Sürekli	Tehlikesiz (Bölge 0 NE)	Bölge 2 (Bölge 0 NE)	Bölge 1 (Bölge 0 NE)	Bölge 0	Bölge 0 + Bölge 2	Bölge 0 + Bölge 1	Bölge 0
Birincil	Tehlikesiz (Bölge 1 NE)	Bölge 2 (Bölge 1 NE)	Bölge 2 (Bölge 1 NE)	Bölge 1	Bölge 1 + Bölge 2	Bölge 1 + Bölge 2	Bölge 1 veya Bölge 0
İkincil	Tehlikesiz (Bölge 2 NE)	Tehlikesiz (Bölge 2 NE)	Bölge 2	Bölge 2	Bölge 2	Bölge 2	Bölge 1 ve hatta Bölge 0

Eş.3.9' da verilen salım karakteristiği kullanılarak Çizelge 3.4 yardımı ile belirlenen tehlikeli mesafe kimyasalın molekül ağırlığı ve çıkış hızlarına göre Şekil 3.5' den belirlenir. Şekilde

belirtilen jet; yüksek hızla serbest salımı, difüzyon; düşük hızla ile yayılan salımı veya yakınında bulunan yüzeye çarparak ivmesini kaybeden jet salımı, ağır gaz ise yatay yüzey boyunca yayılabilen ağır gazları ya da buharları ifadeler eder [13].



Şekil 3.5. Tehlikeli mesafe – Q_c (salım karakteristiği) grafiği [13]

Patlayıcı gaz/buhar ortamlarında tehlikeli alan büyüklüğü belirlemek için, salımı gerçekleşen maddenin fazı sıvı olduğunda ani buharlaşma ile oluşabilecek buharın göz önünde bulundurulmaması, havuzun sınırlandırılmış bir bölgede oluşabileceği kabulü, havuzdan gerçekleşecek buharlaşmanın zemin yapısı, eğimi gibi birçok faktöre bağlı değişebileceğini vurgulamış olmasına rağmen, bu olası durumları hesaplamalarına dahil etmemesi tehlikeli alan büyüklüğü hesaplamalarında gerçekten uzak sonuçların elde edilebileceğinin düşünülmesine sebep olmaktadır.

3.2. CEI 31-35 Standardı

CEI 31-35, ülkemizde kullanışan 60079-10-1 standardının eski versiyonunda referans olarak gösterilen bir İtalyan standardıdır. Bu standartta gaz salımlarının yayılması için verilen hesaplamalar 60079-10-1 standardı ile aynıdır. Sıvı salımlarının yayılması için verilen hesaplamalar ise farklılık göstermektedir. Hesaplamalarda elde edilen yayılım hızları ile tehlikeli mesafe hesabı yapılmaktadır.

3.2.1. Sıvı hesaplamaları

Salım gerçekleştiğinde buharlaşmayan sıvıların salım hızı Eş.3.7 verilen denklikten hesaplanır. Buharlaşmayan sıvıların oluşturacağı havuz alanları için mevcut koşullara göre iki farklı metoda göre hesaplama vermiştir [14].

Metot 1

Sıvı salımı gerçekleştiğinde sistemi durdurmak için yapılan müdahaleler dikkate alınarak hesaplama yapılır. Bu metotta sıvı salımı boyunca buharlaşmanın gerçekleşmeyeceği varsayılmış ancak salınan sıvı, kaynama sıcaklığına çok yakın ise veya salım süresi uzun ise dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Sıvının volumetrik akış hızı (Q_s) kullanılarak hesaplanan havuz alanından (A_{p1}) daha küçük bir alan kabul edilmesi gerektiğini ifade edilerek Eş.3.10 verilmiştir.

$$A_{p1} = \frac{Qs \times t_p}{h_m} \tag{3.10}$$

Salım meydana geldikten sonraki yapılması gerek müdahelenin süresi bu metot için önemli bir parametre olup standartda önerilen müdahale süreleri Çizelge 3.5' de, havuz alanının karakteristiği ve sıvının viskozite değeri de havuz derinliği (h_m) için bir parametre olup öneriler Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7' de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Salıma müdahale süresi önerileri

Kriterler	t_p, zaman
Algılama cihazlar ile bağlı otomatik durdurma sistemi mevcut ise	10 s
Salım anında sürekli operatör bulunan alandan manuel kapatma mevcut ise	15 min
Genel gözetim dahilinde olan faaliyetler	90 min
İnsansız gerçekleştirilen faaliyetler	8 h

Çizelge 3.6. Alan karakteristiğine göre havuz derinliği

Alan Karakteristiği		Havuz Derinliği, h_m
Gözenek Yapısı	Gözeneksiz	5×10^{-3}
	Gözenekli	10×10^{-3}

Çizelge 3.7. Sıvının viskozite değerine göre havuz derinliği

Kriterler		Havuz Derinliği, h_m
Viskozite	Düşük viskoziteli	$h_m < 5 \times 10^{-3}$
	Yüksek viskoziteli	$h_m > 5 \times 10^{-3}$

Metot 2

Meydana gelen sıvı salımında herhangi bir insan müdahalesine gerek kalmaksızın sistemin kapattığı dikkate alınarak hesaplamalar yapılır. Sıvının havuzdan spesifik buharlaşma hızı (Q_b) havalandırma verimliliği dikkate alınarak Eş.3.11' e göre belirlenir ve buna göre havuz alanı Eş.3.12 kullanılarak hesaplanır. Havalandırma verimliliği (f_{se}) doğal veya yapay havalandırma kabiliyetini azaltacak engellere göre 1 ila 5 arasında bir değer olarak belirlenir.

$$Q_b = 2 \times 10^{-3} \times \frac{u_w}{f_{se}} \times \frac{M \times P_a}{R \times T} \times \ln\left(\frac{P_a}{P_a - P_v}\right) \quad (3.11)$$

$$A_{\mathrm{p2}} = \frac{W_S}{Q_b} \times k_A \quad (3.12)$$

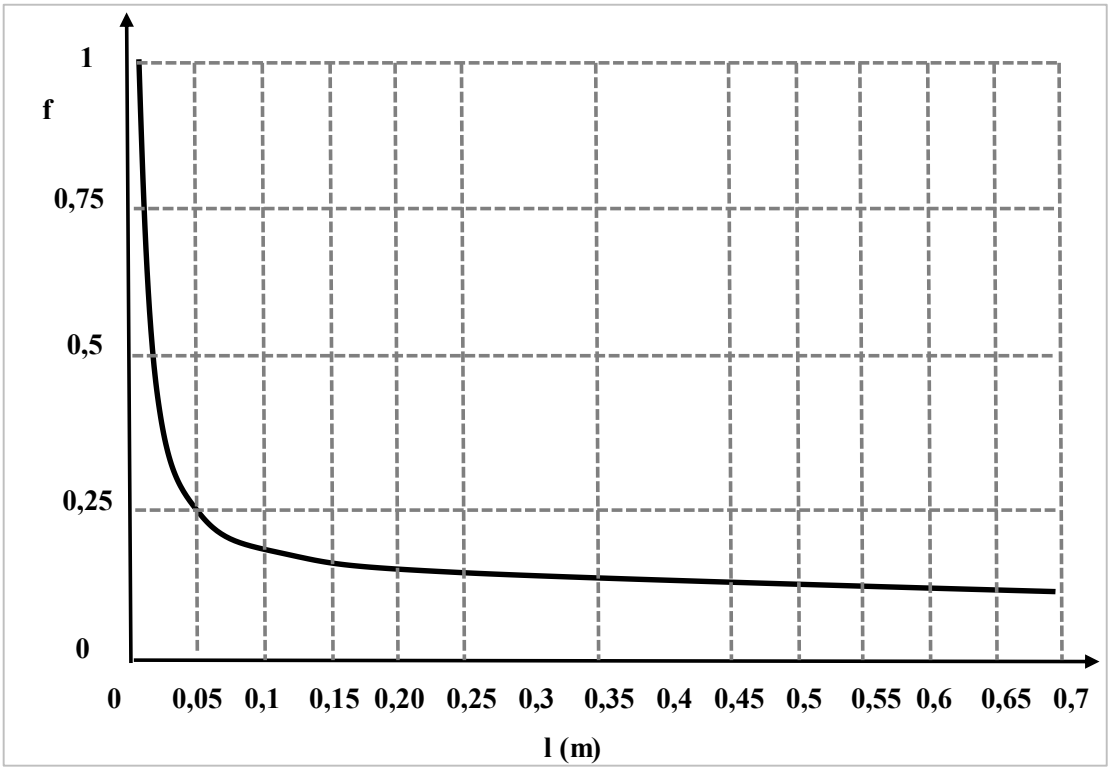
k_A değeri kütlesel sıvı salım oranı ile salınan sıvının havuzdan buharlaşma hızı arasındaki ilişkiye göre aşağıdaki oranlardan biri kullanılır.

- $W_S/Q_b > 1$ m^2 için $k_A = 0{,}7$
- $1 \leq W_S/Q_b < 4$ m^2 için $k_A = 1$
- $W_S/Q_b > 4$ m^2 için $k_A = 1{,}4$ olarak kabul edilir.

Buharlaşan sıvı salımları için havuz alanı hesaplama

Normal kaynama noktası üzerindeki sıcaklıkta bulunan sıvılar, sıkıştırılarak sıvılaştırılmış gazlar veya soğutularak sıvılaştırılmış gazların salımı ile ani (flaş) buharlaşma meydana gelir. Buharlaşma için çevreden aldığı enerjiye ilave olarak kendi iç enerjisinden de çekmesi sıvının soğumasına yol açar. Akışkanın soğuması tam buharlaşmayı önler ve bu nedenle bir miktar sprey ve buhar içeren aerosol üretilir. Soğuk aerosol bulutu yoğun bir gaz gibi davranarak zemine çökme eğilimi göstercektir. Sızıntının büyük olması veya kaynama noktası yüksek olan sıvıların salımı durumunda zemindeki birikinti artacağı için zamanla

buharlaşma artacaktır. Buharlaşmayan sıvı salım hızı düşük ise salım kaynağının altında, yüksek hızlı ise salım noktasından belirli bir mesafe sonra havuz oluşturacaktır. Toplam sıvı buharının kütlesel akış hızı Şekil 3.6 yardımı ile belirlenir.



Şekil 3.6. Dairesel delik kalınlığı (l) - sıvının kaptan çıkışına kadar kat ettiği yol (f)

Buhar ve sıvı salımlarının toplam kütlesel akış hızı (W) Şekil 3.6 kullanılarak elde edilen f değerininde kullanıldığı Eş.3.13' de verilmiştir. Eşitlikte tahliye katsayısı (C_d), açıklık kesiti (S), sıvının yoğunluğu (ρ_s), işletme (P) ve hava basıncıda (P_a) kullanılmıştır.

$$W = C_d \times S \times \sqrt{2 \times \rho_s \times f \times (P - P_a)} \tag{3.13}$$

Salımı gerçekleşen gaz sıvı karışımında bulunan buhar fraksiyonunu ($\emptyset_b$) kaynama noktasına (T_{KN}), ısı kapasitesine (C_p) ve kaynama noktasındaki buharlaşma entalpisine (λ_{KN}) bağlı olarak Eş.3.14 yardımıyla belirlenir.

$$\emptyset_b = \frac{C_p}{\lambda_{KN}} \times (T - T_{KN}) \tag{3.14}$$

Buhar fraksiyonunun 0,5'den büyük olması durumunda sprey fraksiyonunun ($\emptyset_s$) buhar fraksiyonuna eşit olduğu kabul edilerek geri kalan sıvını havuz oluşturduğu düşünülür.

$$W_g = W \times (\emptyset_b + \emptyset_s) \tag{3.15}$$

Belirlenen buhar (W_g) değerinden tehlikeli mesafe (d_z) salım noktasının çıkış hızı dikkate alınarak (10 m/s^2 altında ise düşük hızlı, üzerinde ise yüksek hızlı) hesaplanır. Standartta buharlaşan sıvının salımı, soğutulmamış veya kaynamayan sıvının yüzeyinden buharlaşma veya ısıtılarak kaynayan sıvı yüzeyinden buharlaşmalar her zaman düşük hızda kabul edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Düşük hızlı salımlarda tehlikeli mesafe Eş.3.16 kullanılarak hesaplanabilir.

$$d_z = k_z \times \left(\frac{42300 \times W_g \times f_{se}}{M \times k_{dz} \times LFL_v \times u_w}\right)^{0,55} \tag{3.16}$$

Aksi durumlarda ise yüksek hızlı salımlar için ise aşağıda verilen ifade kullanılabilir.

$$d_z = k_z \times \left(\frac{1650}{k_{dz} \times LFL_v}\right) (P \times 10^{-5})^{0,5} M^{-0,4} A^{0,5} \tag{3.17}$$

Denklemlerde yer alan k_{dz}, LFL' ye uygulanan güvenlik katsayısı faktörüdür ve salım derecelerine göre belirlenir. Sürekli ve birincil salım derecesi için 0,25 ile 0,5 arasında bir değer alırken ikincil salım derecesi için 0,5 ile 0,75 arasında bir değer alır. Hesaplamalar kullanılan LFL verisinin kesinlik durumuna göre tanımlanır. k_z ise tehlikeli mesafe düzeltme faktörüdür ve standartta açık alanlar için 1 kabul edilebileceği belirtilmiştir. u_w rüzgar hızını, f_{se} havalandırma verimliliğini ifade eder.

Bununla birlikte sıvı düşme sırasında tamamen buharlaşabilir veya kısmen düşerek bir havuz oluşturabileceğini ancak sıkıştırma nedeniyle sıvılaştırılmış gaz veya sıvı soğutulmuş gazların buharlaşmasının çok hızlı olabileceği de standartta vurgulamış, bu nedenle havuz genişlemesinin küçük olacağı belirtmiştir. Ancak sıvı miktarın çok olması durumunda oluşacak havuzun salım kaynağı olarak düşünülerek oluşturacağı tehlikeli mesafenin belirlenmesi gerektiği ifade edilmiştir. Soğutulmuş veya basınçla sıvılaştırılmış kimyasal salımlarının oluşturduğu havuzdan buharlaşma için zemin sıcaklığının kaynama noktasından yüksek olduğu durumlar için aşağıda verilen eşitliğin kullanılması önerilmiştir.

$$W_g = \left[A \frac{2\, X_g\, k_t}{\lambda} \left(\frac{1}{\pi\alpha}\right)^{0,5} (T_{zemin} - T_{KN}) 10^3\right] / t^{0,5} \quad (3.18)$$

Burada X_g toprak gözeneklilik katsayısı iken gözeneksiz zemin için (örn. beton) 1 alınması, gözenekli zeminler için ise 3 alınması önerilmektedir. k_t ise zemin tabakası termal iletkenliğini belirtir ve betorname için $1{,}3 \times 10^{-3}$, α ise zemin tabakasının termal difüzivitesini ifade eder ve $2{,}5 \times 10^{-7}$ alınabilir. Standart kaynamayan ve hava ile kaplanmış havuzdan meydana gelecek buharlaşma miktarı için aşağıda yer alan eşitliği önermiştir. Daha önce belirtilen d_z hesaplama denklikleri kullanıbilir.

$$W_g = 2.10^{-3} A \frac{u_w}{f_{se}} r^{-0,11} \frac{M.P_a}{R.T} ln\left(\frac{P_a}{P_a - P_v}\right) \quad (3.19)$$

Eş.319' da yer alan ifadeler için;

- $A_{p1} < A_{p2}$ olduğunda, A = $_{p1}$ olarak kabul edin, W_g'yi hesaplayın ve $W_g \leq W_S$ ise Eş.3.10; $W_g > W_S$ 'den büyükse $W_g = W_S$ olduğu,
- $A_{p1} \geq A_{p2}$ olduğunda, $A = A_{p2}$ ve $W_g = W_S$ oranı varsayılır [14].

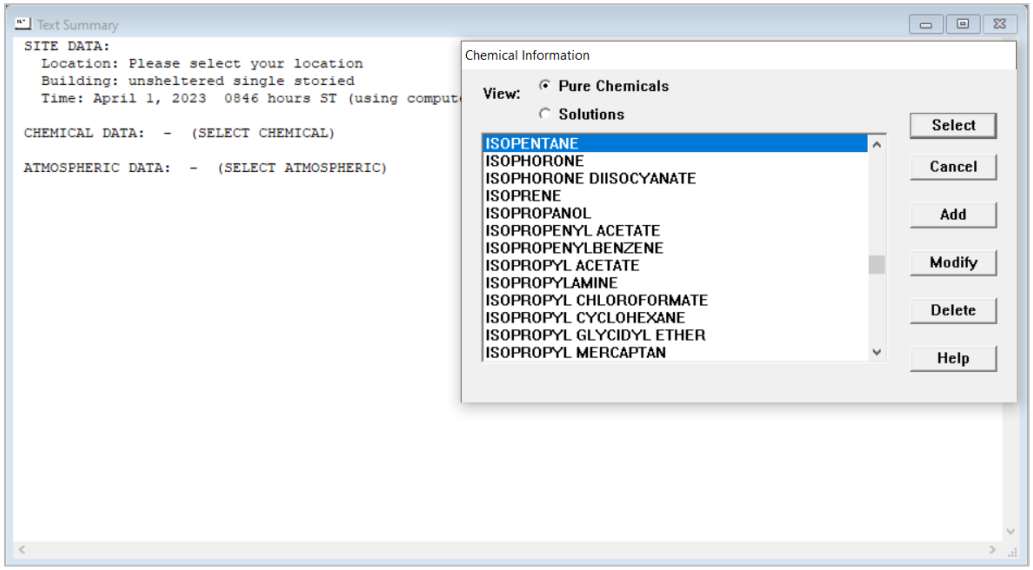
3.3. Yazılımlar

Tehlikeli alanların hesaplamasında kullanılan bir diğer yöntem ise yazılımlardır. Yazılım kullanmanın avantajlarından biri hesaplama süresinin kısa olması ve bir diğeride hesaplama verilerini genellikle görsel olarakta kullanıcıya sağlamasıdır. Aynı zamanda birçok yazılım hesaplama için girilen parametrelerdeki hataları çözüm yapmadan göstermektedir. Tehlikeli mesafenin belirlenmesi için saha çalışmalarında da yazılımlar kullanılmaktadır. Yaygın olarak bilinen ve kullanılanlar ise PHAST ve ALOHA yazılımlarıdır. Bu çalışmada bu yazılımlar kullanarak tehlikeli mesafeler belirlenmiş ve karşılaştırma yapılmıştır.

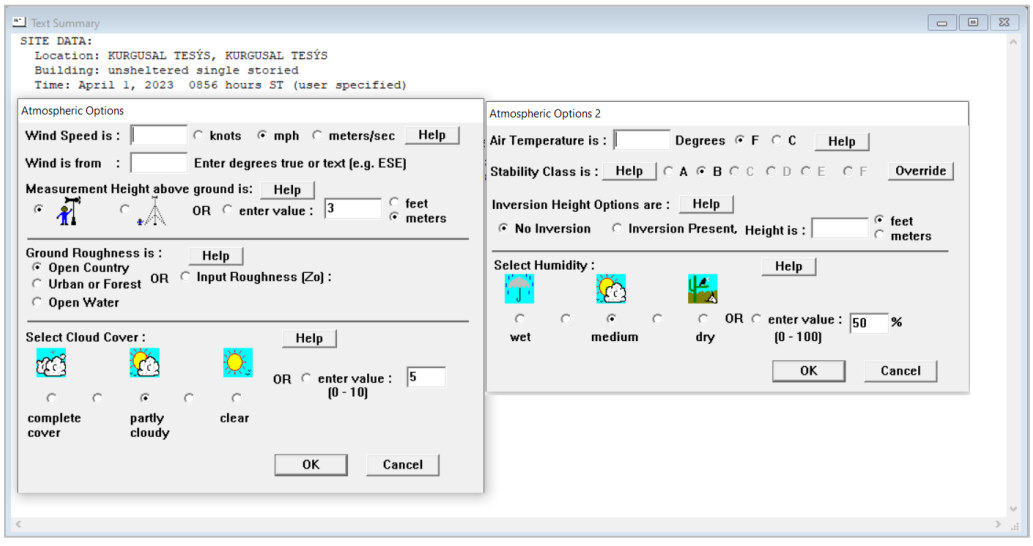
3.3.1. ALOHA yazılımı

Ücretsiz olmasından dolayı tercih edilen ALOHA birçok çalışmanın ön hazırlığı için kullanılan bir sonuç modelleme yazılımıdır. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından güncellenen açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Bu yazılım, hava hareketinin yok denilecek kadar az olduğu kararlı durumlara, rüzgar hızının çok düşük

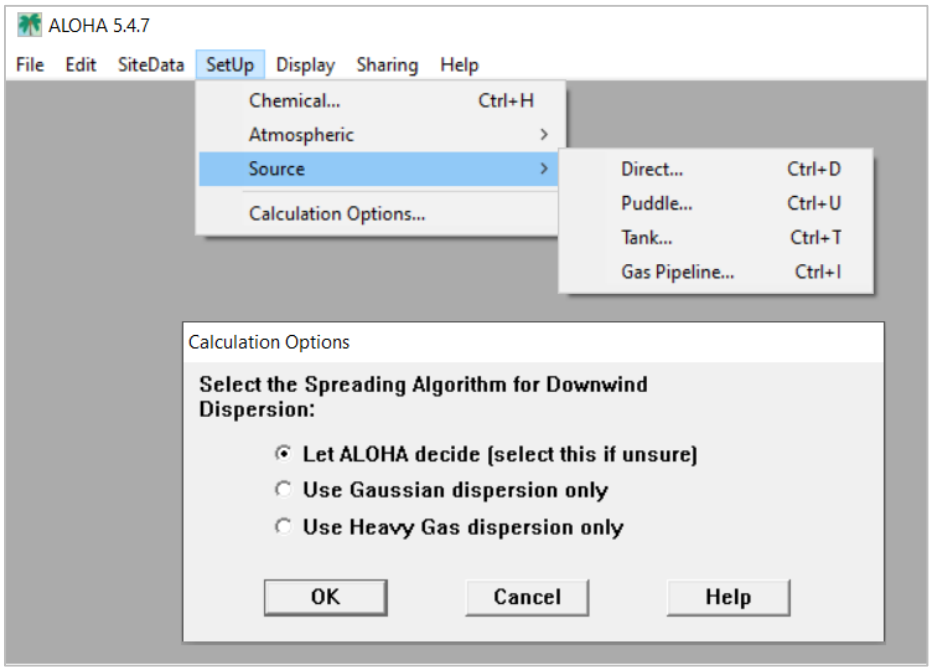
olduğu durumlarda efektif çalışmamakta ve atmosferin verilerin sınırları olması gibi durumlardan dolayı gerçek tehlikeli alan büyüklüğünün belirlenmesinde şüpheli sonuçlar verebileceği için hesaplamalarda nihai karar için kullanılması önerilmemektedir [23]. ALOHA yazılımının arayüzü ve kullanıcıdan talep ettiği veri sayfaları aşağıdaki görsellerde sunulmuştur.



Şekil 3.7. ALOHA yazılımı kimyasal bilgi

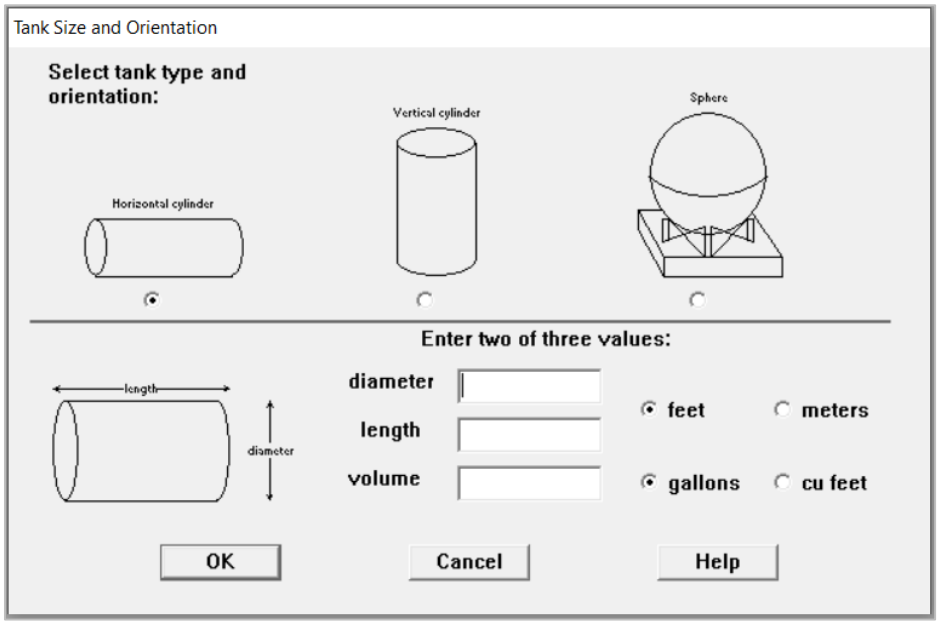


Şekil 3.8. ALOHA yazılımı atmosferik şartlar

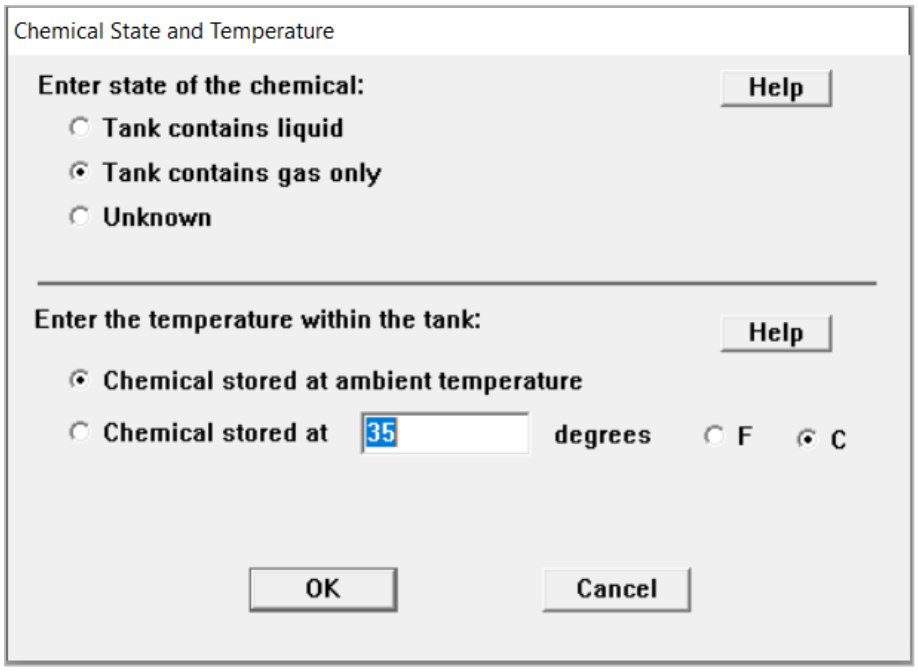


Şekil 3.9. ALOHA yazılımı salım kaynağı, atmosferik dağılım hesaplama seçenekleri

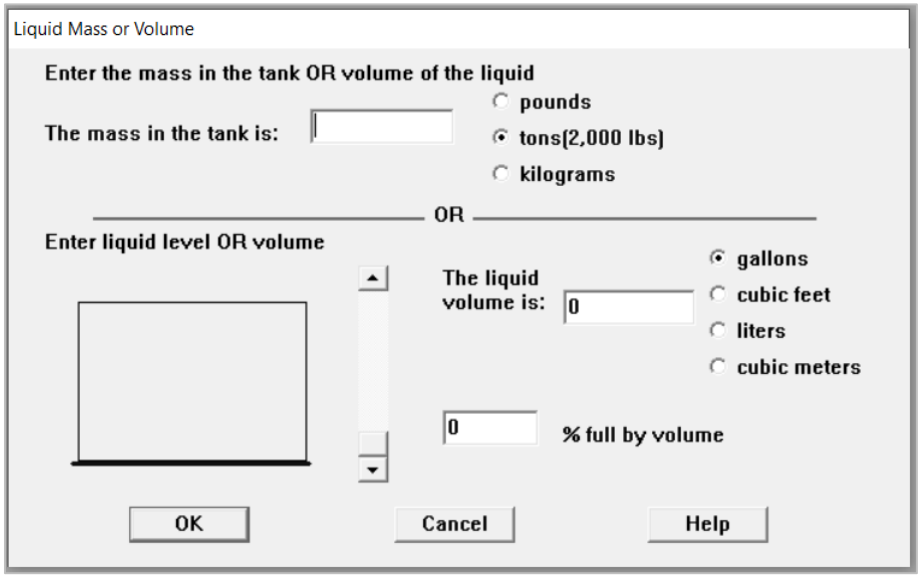
Salım kaynağı seçiminden sonra ilgili kaynak için ekstra bilgiler talep edilmektedir. Bu çalışmada tanktan salım modellendiği için yalnızca bu senaryo için görseller okuyucuya sağlanmıştır.



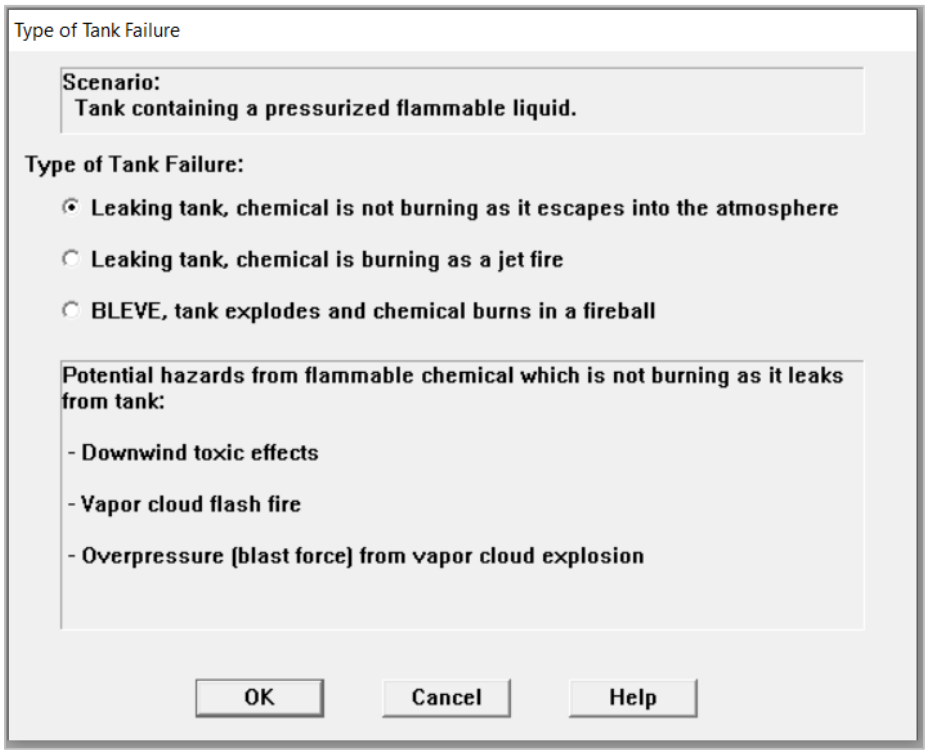
Şekil 3.10. ALOHA yazılımı tank bilgileri



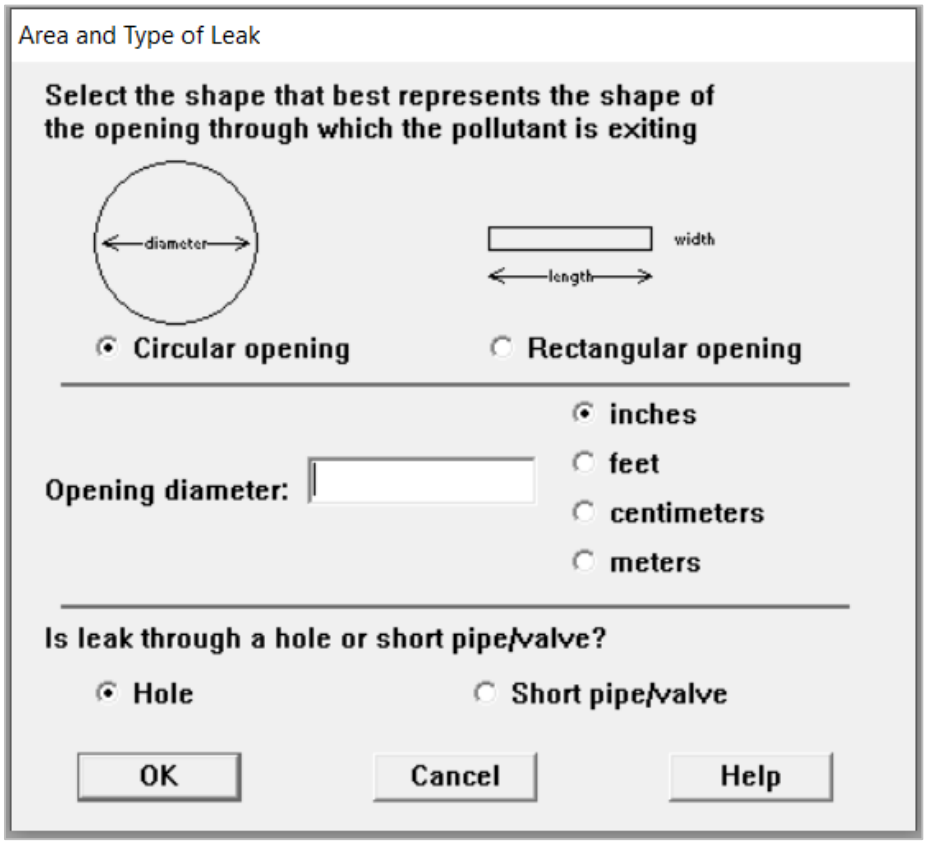
Şekil 3.11. ALOHA yazılımı depolama ve sıcaklık bilgileri



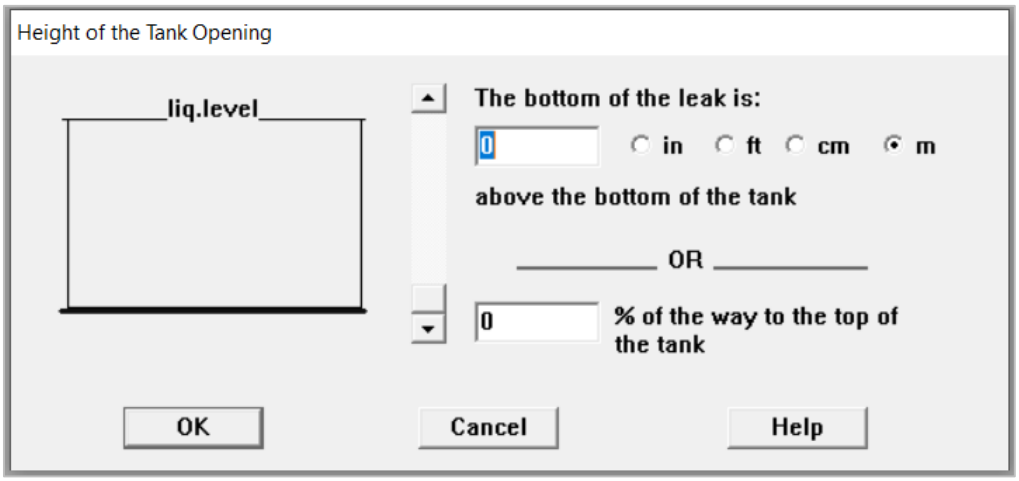
Şekil 3.12. ALOHA yazılımı sıvının miktarı veya sıvı seviyesi



Şekil 3.13. ALOHA yazılımı senaryo seçimi



Şekil 3.14. ALOHA yazılımı salım kaynağı bilgileri



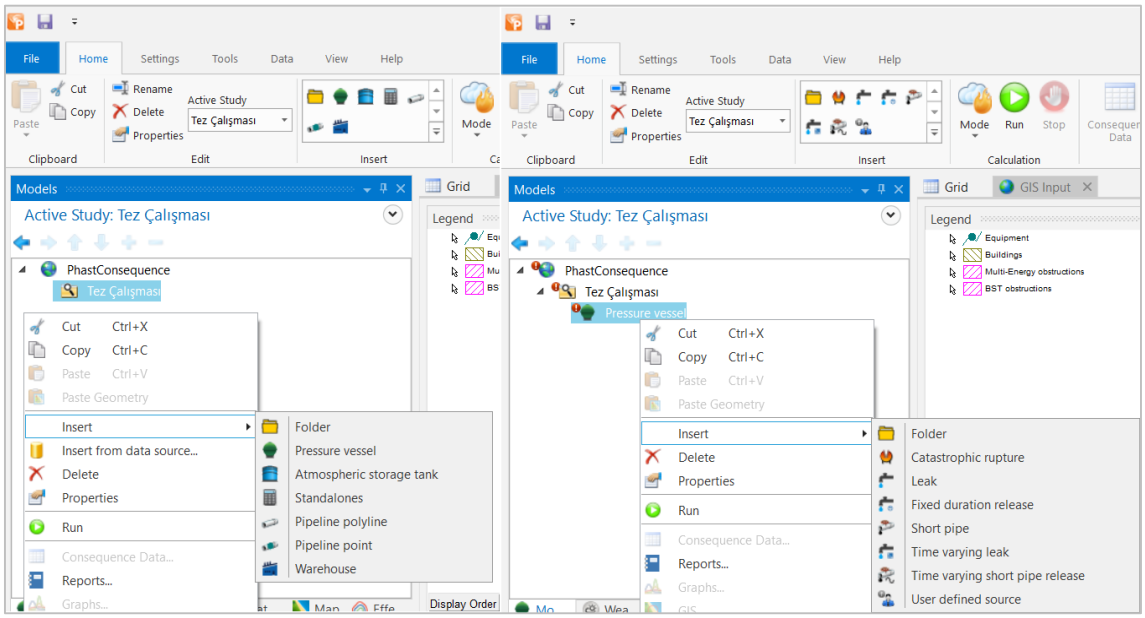
Şekil 3.15. ALOHA yazılımı sıvının tanktaki salım noktası

ALOHA, normal kaynama noktasının üstünde depolanan sıvı salımını değerlendirirken kullandığı modelde (Homogeneous Nonequilibrium Model) salım sonrası sıvının adyabatik buharlaşmaya uğradığını varsayarak sıvının bu flaş buharlaşma esnasında soğuduğunu kabul eder. Eğer sıvı, sıcaklığı normal şartlardaki kaynama noktasına düşmeden önce tamamen buharlaşmamışsa, 2 fazlı karışımın aerosol şeklinde olduğunu varsayar ve yoğun bir gaz şeklinde değerlendirir. ALOHA sıvının yağmuruna ve havuz oluşturmasına izin vermez. Bununla birlikte atmosferik dağılımı için seçilen ağır gaz dağılımı (heavy gas dispersion) hesaplamaları için DEGADIS modelini baz alır. Yazılımın arka planda kullandığı bu modellerde kriterler vardır. Eğer kullanıcı arka planlanda kullanılan bu kriterleri incelemez ise sonuçlarında farklılıklar meydana gelebilir. Örneğin kullanıcı ağır bir gazın tanktan sızıntısını değelendirirken seçtiği (heavy gas dispersion) modeline göre sonuçlar elde edebilir. Ancak ALOHA Richardson sayısı 1'den düşük olduğunda gazın pasif olduğunu düşünerek Gauss dağılım modelini kullanımı önerir [23]. Bunun gibi arka planda yer alan kriterlerin modellemelerden önce kullanıcı tarafından değerlendirilmesi önemlidir.

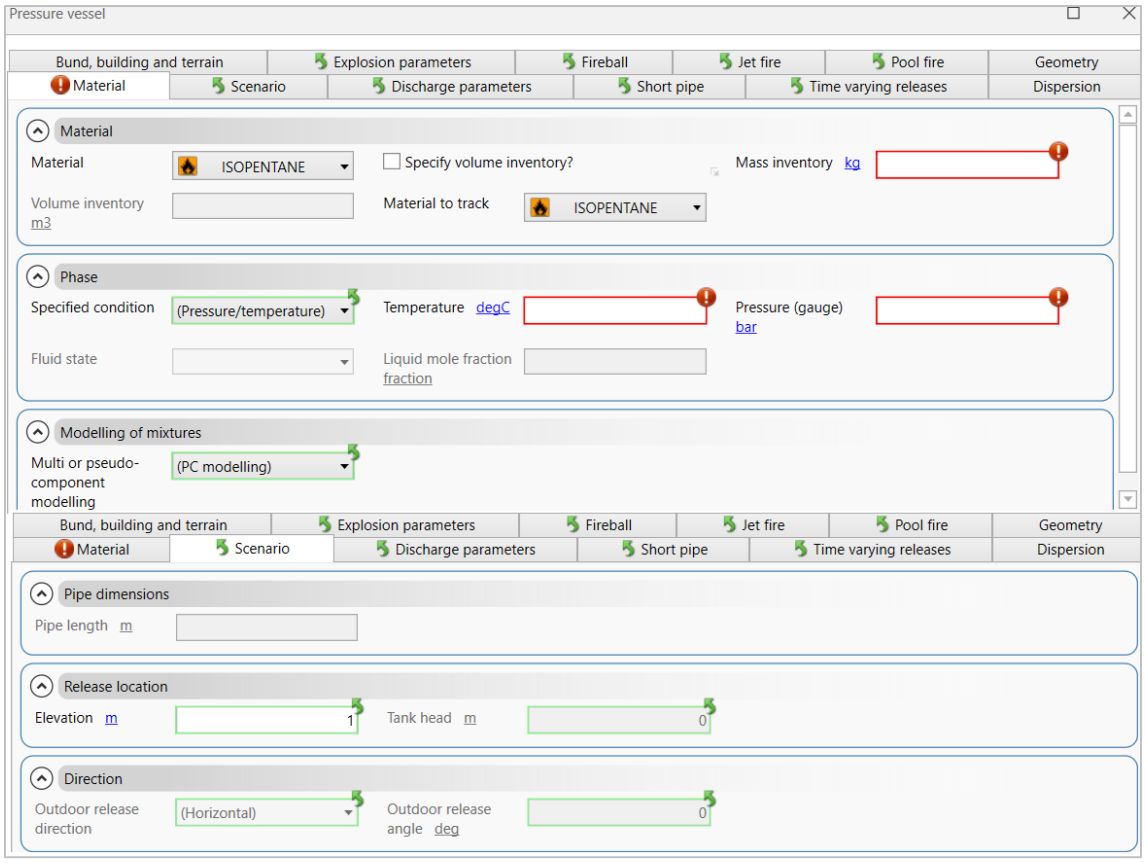
3.3.2. PHAST yazılımı

Yaygın olarak bilinenlerden biri de PHAST yazılımıdır. PHAST, çok çeşitli bütünlük kaybı senaryolarının tahliyesini, dağılımını, yangınlarını, patlamalarını ve toksik etkilerini modellemek için kullanılan DNV firması tarafından oluşturulmuş ücretli bir yazılımdır [24]. Salım, dağılım, yangın ve patlama gibi sonuç modellemesi yapan bu yazılım alınan yanlış kabuller ile ciddi sonuç farklılığı göstermesinden dolayı uzmanlık istemekte ve ücretli

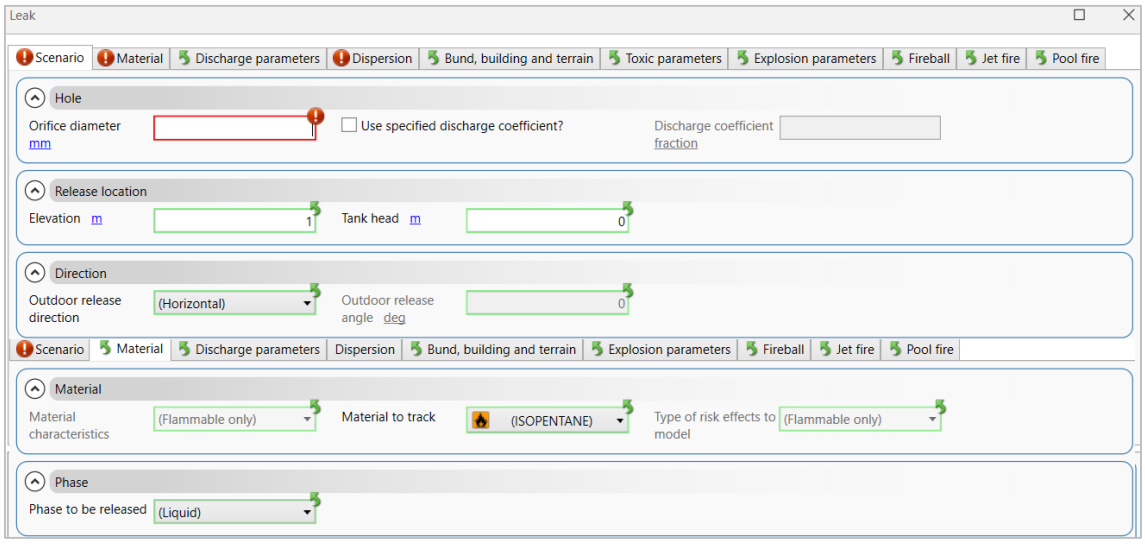
olması da bir dezavantajdır. PHAST yazılımının arayüzü ve kullanıcıdan talep ettiği veri sayfaları aşağıdaki görsellerde sunulmuştur.



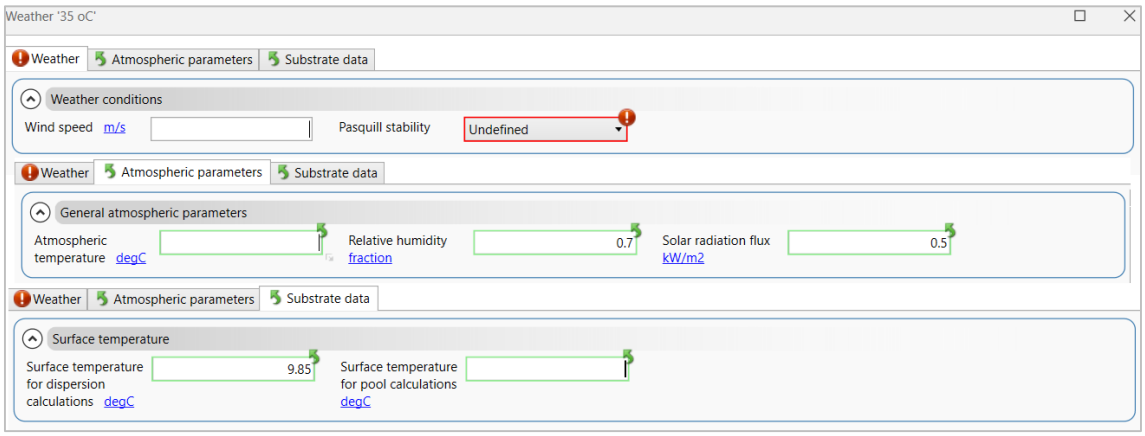
Şekil 3.16. PHAST yazılımı salım kaynağı ve tipi



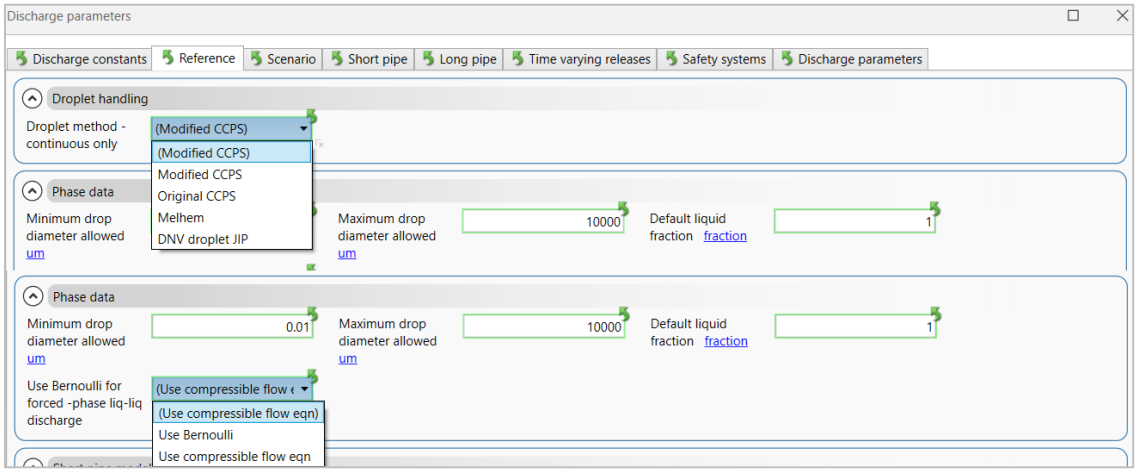
Şekil 3.17. PHAST yazılımı kimyasal ve senaryo bilgileri



Şekil 3.18. PHAST yazılımının sızıntı senaryosunda talep ettiği veriler

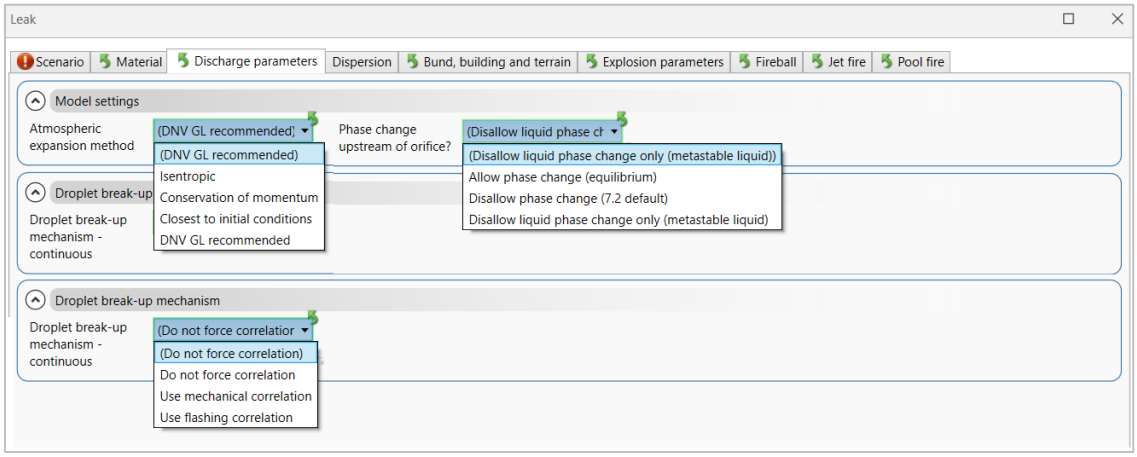


Şekil 3.19. PHAST yazılımı atmosferik şartlar



Şekil 3.20. PHAST yazılımı salım şartları

PHAST yazılımı yukarıda sunulan şekillerdeki gibi birçok veriyi kullanıcının sağlamasını talep etmektedir. Bununla bilirkte kullanıcıdan yapılacak modelleme için Şekil 3.21' de verildiği gibi metot seçmesini de talep etmektedir.



Şekil 3.21. PHAST yazılımı metot seçim görseli

PHAST yazılımı deşarj modeli olarak genleşme sonrası değişkenleri (hız, sıvı oranı, sıcaklık, çap, entalpi, vb.) kütle, enerji ve entropinin korunumu, entalpi için durum denklemlerini uygulayan atmosferik genleşme modelini kullanmaktadır [25]. Sıvı veya iki fazlı salımların sıvı yağmuru, bunların zeminden buharlaşması ve böylelikle bulut süresinin uzaması havuz yangını gibi ek tehlikelere yol açabilir. Bu nedenle PHAST flaş buharlaşan ve ani buharlaşmaya uğramayan sıvı jetleri veya iki fazlı salımlar için ortak endüstri projesi kapsamında geliştirilen damlacık boyutu, dağılımı ve yağmurunu modellerine ekler [26]. Elde ettiği verileri birleştirilmiş dağılım modelinde (Unified dispersion model – UDM) kaynak olarak kullanır. UDM rüzgar yönündeki dağılımı termodinamik denklemler ile çözerek faz dağılımını ve aerosol oluşumunu hesaplayabilir. Bununla birlikte David Webber tarafından geliştirilmiş havuzdan buharlaşma modelini (PVAP) kullanarak zeminde oluşabilecek havuzdan da yayılma ve buharlaşmayı da hesaplayabilir [27].

4. METODOLOJİ

Bölüm 3.1 ve 3.2' de 60079-10-1 ve CEI 31-35 standartları kullanılarak tehlikeli mesafe belirleme hesaplamaları anlatılmış, gaz salımı hesaplamalarındaki yaklaşımının her iki standartta da aynı olduğu, sıvı salımlarında farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Gazlar için kinetik teori tam gelişmiş olduğundan dolayı tehlikeli mesafe hesaplamalarında aynı kabuller alınması durumunda benzer sonuçlara erişilebileceği düşünülmektedir. Sonuçlardaki olası farklılıklar varsayımlara ek olarak havalandırma, salım noktasının çevresindeki engellerden kaynaklanabilir. Ancak sıvıların davranışını açıklayan kinetik teori modellemelerindeki eksiklikler burada yapılan varsayımların tehlikeli mesafeye yönelik hatalar oluşturabileceği kaçınılmaz bir durumdur. 60079-10-1 standardı sıvı salımı sonucu oluşacak havuz için kısıtlama getirmiş hem de havuzun bulunduğu zeminin özelliklerini hesaplamalara dahil etmemiştir. Bu yaklaşım, salım sonrası buharlaşma eğilimi göstermeden havuz oluşturabilecek yüksek kaynama noktasına sahip sıvılar için geçerlidir. Yüksek basınç altında işletilen kimyasalın salım sonrası bir kısmı havuz oluşturmadan önce buharlaşma eğilimi gösterebilir. Özellikle düşük kaynama noktasına sahip kimyasallar atmosferik basınca ulaştığı anda çevre sıcaklığının etkisi ile buharlaşma eğilimine yatkındır.

Kimyasal özellikleri ve işletme şartlarına göre sergileyeceği davranış standartta tam olarak belirtilmeden sıvı salımlarında iki fazlı olabileceği vurgusu yapılmıştır. Hesaplama için bir yöntem verilmemiş olup yorumlama kullanıcıya bırakılmıştır. CEI 31-35 standardı ise basınçla sıvılaştırılmış gazlar için salım gerçekleştikten sonra buharlaşma olabileceğini belirtmiş ve buharlaşma miktarının belirlenmesi için bir yaklışım sunulmuştur. Buharlaşmayarak havuz oluşturacak sıvıların viskozitesini ve havuzun oluşacağı zeminin gözenek yapısını da tehlikeli mesafe hesaplarına dahil etmiştir. Bu hesaplamalar için model yaklaşımlarını kullanan yazılımlarda mevcut olup bu yazılımlar akışkan davranışını modellemektedir. ALOHA ve PHAST yaygın kullanılan sonuç modellemesi yapan yazılımlardır. Yazımlımlarda farklı varsayımlar ile sadeleştirmeler bulunmakta ve bu durum tehlikeli mesafe büyüklüklerinde farklılıklara yol açabilmektedir. Yazılım modellemeleri için yapılan varsayımların kimyasalın özellikleri ve işletme şartlarına uygun olup olmadığı yazılımların kompleks mimarisinden dolayı değerlendirilemeyebilmektedir.

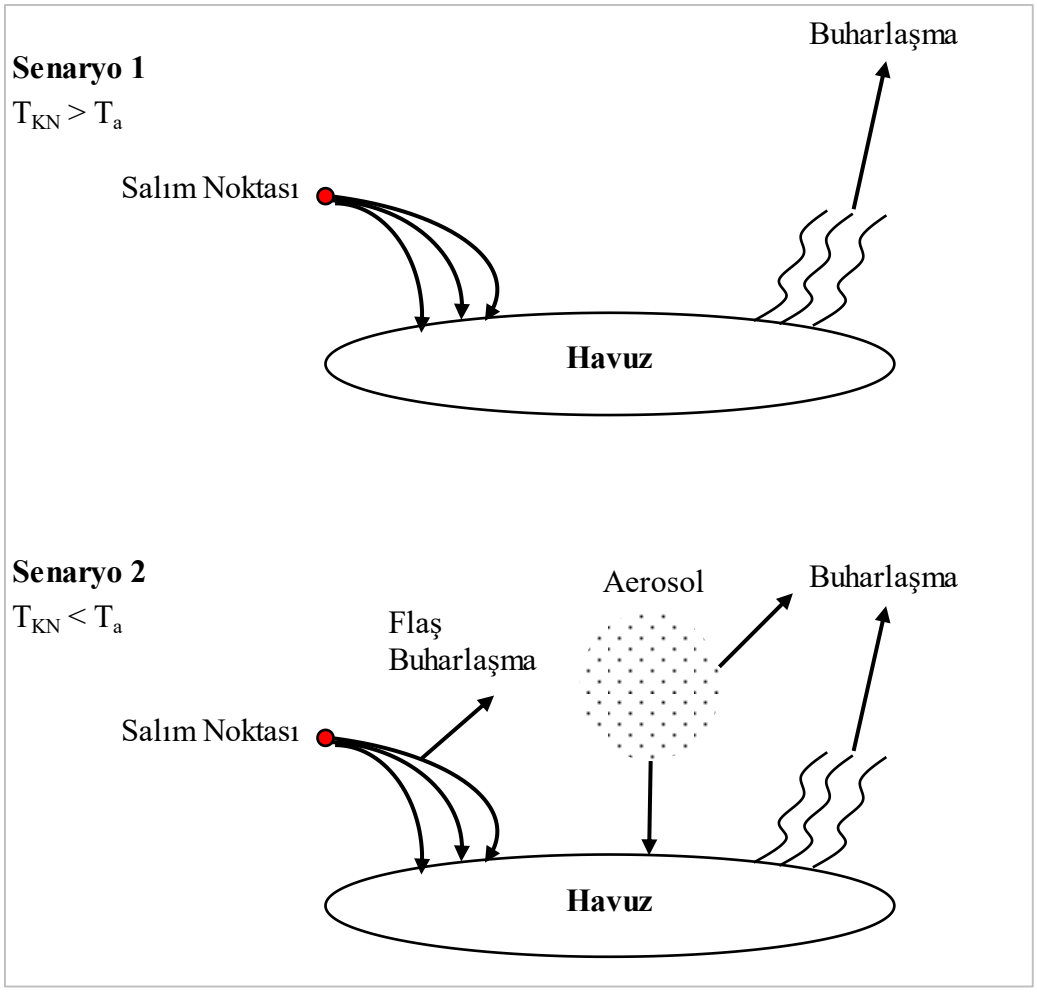
4.1. Sıvı Salımı Sonrası Davranış Modellemesi

Bu çalışmada gerek standartlar gerek yazılımlar kullanılarak elde edilen tehlikeli mesafe büyüklüklerini birbiri ile karşılaştırıldığı gibi salım sonrası akışkan davranışını açıklamak için geliştirilen bir model ile bu sonuçların uyumu incelenmiştir. Sıvının kaynama noktası ile atmosferik sıcaklık arasındaki ilişkiye esas alınarak yapılarak kabuller ile tehlikeli mesafeye esas olan toplam buhar/gaz miktarını belirleyecek bir model geliştirilmiştir.

Kimyasal bir tesiste boru hattına bağlantı noktaları (boru bağlantıları, vana, flanş, vb.), ölçme kontrol sistem bağlantıları, bağlantı contalarda ki delik, numune alma noktaları, ekipman üzerindeki korozyon delikleri vb. birer salım kaynağı olabilir. Salım noktasından sonraki kimyasalın davranış yönü öncelikle deliğin boru/kap üzerindeki konumuna göre olacağı gibi salım noktasındaki hız ve kimyasalın yoğunluğu da bu yönü etkiler. Delik kabın/borunun tavanı/yukarısı konumunda iken kimyasal önce yukarıya doğru hareket ederek hava içerisinde yayılırken, kimyasalın ağır bir gaz/buhar olması durumunda yer çekimine karşı bir iş yapılarak serbest düşmeye ulaşıncaya kadar bu harekete devam eder. Delik kabın/borunun taban konumda iken yerçekimi ile birlikte iş yaparak konumunun zeminine doğru hareket eder, hafif veya yüzer gaz/buhar olması durumunda hava içerisinde dağılır. Deliğin yanal konumda olması durumunda ileriye doğru hareket ederken önündeki engellere bağlı olarak hareket yönü değişebilir ve bu sırada kimyasalın yoğunluğuna göre yerçekimi etkisi de devrede olabilir.

Salım noktasına ulaşan kimyasal sıvı veya sıvılaştırılmış gaz ise salım sonrasında yukarıdaki üç duruma uygun davranırken eş zamanlı olarak bir kısım buharlaşma da gerçekleşebilir. Sıvının salım noktası ve sonrasındaki faz davranışında kimyasalın fizikokimyasal özellikleri çok etkilidir. Bu özellikler arasında kaynama noktası önemli bir parametre olup, salım sonrasındaki fazı ve buharın yoğunluğu da yukarıda anlatıldığı gibi haraket yönünü belirler. Yüksek kaynama noktasına sahip sıvılarda (genellikle hat içerisine düşük basınçta bulunan atmosferik sıcaklığa sahip sıvı salımları için geçerlidir, örneğin; etil alkol; kaynama noktası 78,37 ℃ [28]) salım noktasından yayılım sonrası ani buharlaşma eylemi gerçekleştirmeyeceği aşikardır. Bu durumda sıvının neredeyse tamamı havuz oluşturur ve buharlaşma bu havuzdan gerçekleşir. Şekil 4.1 birinci senaryoda verilen bu durum için standart hesaplamalarında verilen yaklaşım nispeten yeterlidir. Ancak salım hızı yüksek olduğunda aerosol oluşturabileceği bilinmektedir. Düşük ve orta yükseklikteki kaynama

noktasına sahip basınç altında sıvılaştırılmış kimyasalların (örneğin; propan kaynama noktası – 42,1 ℃ [28]) bir kısmı salım noktasından hemen sonra ani buharlaşabileceği gibi diğer kısmı da sıvı fazında kalarak zeminde havuz oluşturabilir. Kimyasalın kaynama noktasına bağlı olarak salımın tamamı da gaz fazına geçebilir. Burada salım noktasının zeminden yükseliği de (yere düşüş zamanı) önemlidir. Bu yükseklik azaldıkça havuzda birikecek miktar artabilir. Olası bir havuz oluşumunda (Şekil 4.1) ikinci senaryoda verildiği gibi havuzdan da ilave bir buharlaşma gerçekleşir [19]. Senaryo seçiminde etkili olan normal kaynama noktası belirlenmesinde basınç 1 atm olarak alınır.

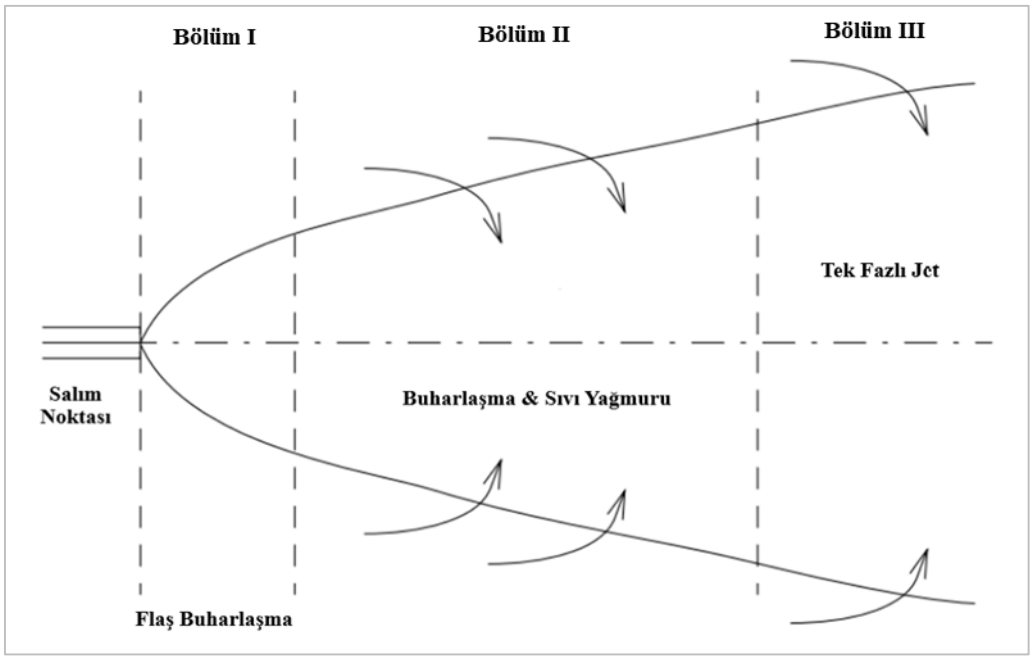


Şekil 4.1. Sıvıların salım sonrası davranış senaryoları [19]

Şekil 4.1' de yer alan T_{KN} ve T_a sırasıyla kaynama noktası ve atmosferik sıcaklığı ifade etmektedir. Akışkanın salım noktasındaki operasyon şartları diğer bir önemli parametredir. Bu durumda davranışı etkileyen parametrelerden biri boru/kap içindeki sıvının basıncı diğeri ise sıvının sıcaklıklığıdır. Salım noktasındaki basınç yüksek ise atmosfere çıkan sıvı daha

uzağa olacak şekilde davranış sergilerken bu ileriye doğru hareket esnasında yoğunluğa ve kaynama noktasına bağlı olarak buharlaşma ve zemine düşme söz konusu olabilir. Operasyon sıcaklığı yüksek olduğunda daha yüksek buharlaşma eğilimi sergilenir. Sıvının atmosfere çıkana kadar geçtiği yol boru/kap et kalınlığı ve bağlantı noktasının kalınlığı/derinliği (l) kadardır. İşletme şartlarına göre delikten atmosfere geçen bu yol üzerinde de buharlaşma söz konusu olabilir. Ancak boru/kap et kalınlığı, bağlantı noktası kalınlığında alacağı mesafe olup çok düşüktür ve akışkan burayı çok hızlı geçtiği için borudan ısı transferine yeterli zaman olmayacağından atmosfere geçişin olduğu bu bölgede buharlaşmanın olmadığı, buharlaşmanın salım noktasının atmosfere ulaştığı an itibari ile başladığını varsaymak çok hata payı getirmeyeceği düşünülmüştür.

Yüksek buhar basıncı ve düşük kaynama noktasına sahip basınç altında sıvılaştırılmış kimyasalın salım davranışı üç bölüme ayrılmış ve Şekil 4.2' de verilmiştir [29]. Kimyasalın üzerindeki basınç etkisi kalkarak atmosferik basınca düştüğü için gaz fazına geçme eğilimi yüksektir. Kaynama noktası çevre sıcaklığına yakın veya düşük olan kimyasallarda buharlaşma eğilime katılan miktar artar. Salım noktasındaki sıcaklık çevre sıcaklığından yüksek ise bu eğilim fazladır. Düşük sıcaklık durumunda ise yere doğru sıvı düşüşü daha belirgindir, çevre ile ısı transferi ile kaynama noktasına ulaşan sıvı havuza düşmeden de buharlaşabilir. Bu faz değiştirme eğilimi yaz aylarında ivmelenirken, kış aylarında kısıtlanır. Salım noktasından hemen sonra gerçekleşen bu ilk faz değiştirme davranışına ani buharlaşma veya flaş buharlaşma denir (Bölüm I). Flaş buharlaşmadan sonra, jet içerisindeki damlacıklar ile hava arasında ısı transferi söz konudur. Kimyasal sıcaklığı hava sıcaklığından yüksek ise soğuyarak sıvı yağmuru formunda zemine düşebilir. Tersi durumunda damla yüklü buhar jeti havayı sürükler ve jet içindeki damlacıklar buharlaşır. Yere düşen damlacıklar yere düşerek havanın sürüklenme hızına göre salım noktasından daha uzakta yeni bir sıvı havuzu oluşturabilir ya da mevcutta oluşan sıvı havuzuna ilave olur (Bölüm II). Bölüm I ve Bölüm II' de buharlaşmayan sıvının zeminde oluşturduğu havuzdan da buharlaşma söz konusudur. Zeminden buharlaşma davranışında kimyasal ve havuz şartları (büyüklüğü, zemin şartları) kadar meteoroljik şartlar da (sıcaklık, rüzgar yönü) etkilir. Pasif bölge olarak tanımlanan yayılım alanında Bölüm I ve Bölüm II ve havuzdan buharlaşmanın tek fazlı bir jet halinde yayıldığı bölgedir (Bölüm III). Bu bölge için atmosferik dağılım modelleri kullanılarak kimyasalın konsantrasyonuna göre yayılımı belirlenir. Bu bölgedeki kimyasalın konsantrasyonunun LFL altında olması söz konusudur.



Şekil 4.2. Salım davranışı [29]

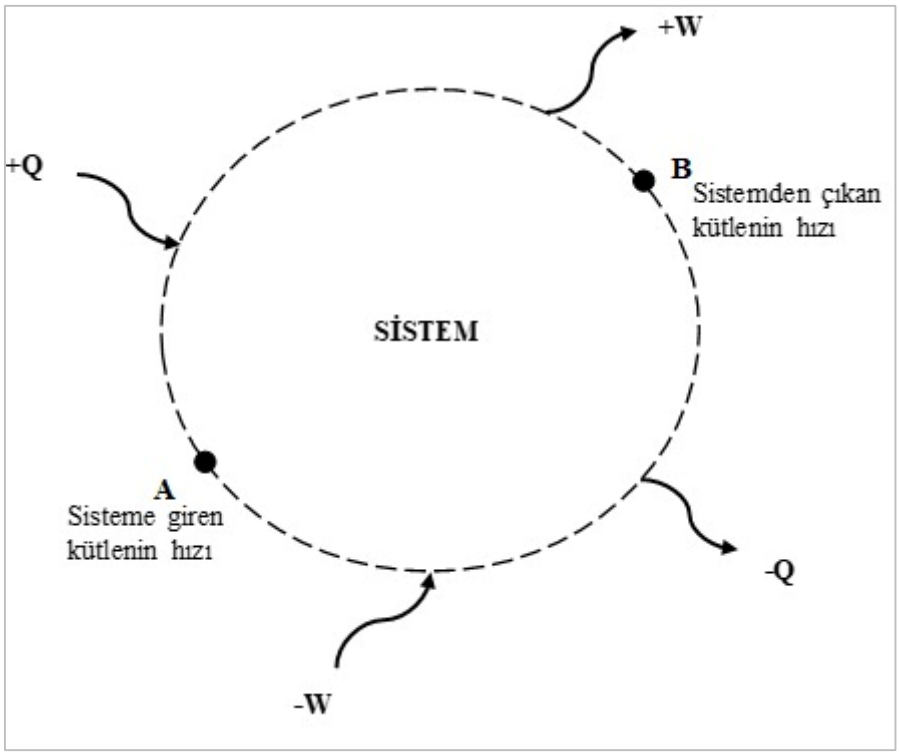
Salım sonrası davranış ve miktarlar termodinamik, ısı ve kütle transferleri yasalarının uygulanması ile yorumlanarak aşağıda sunulmuştur.

4.1.1. Toplam sıvı salım miktarı

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin yok olmayacağı, başka bir hale eşdeğer olarak dönüşeceğini ifade etmektedir. Enerji bir hal fonksiyonudur, sisteme yalnızca iş veya ısı şeklinde dahil olur. Şekil 4.3' de verilen A noktasından giren ve B noktasından çıkan kimyasal için geçerli olan sistemdeki toplam enerji değişimi, sistemin yaptığı iş miktarı kadar azalırken, sisteme dahil olan ısı miktarı kadar artar. Genel enerji eşitliği sisteme dahil olan ve çıkan tüm enerjilerin toplamı şeklinde Eş.4.1'de ifade edilmiştir [30].

$$dE = dQ - dW_w = dU + d(PE) + d(KE) + d(PV) \quad (4.1)$$

Verilen eşitlikte E toplam enerjiyi, Q sisteme dahil edilen ısıyı, W_w sistemin yaptığı şaft işini, U iç enerjiyi, PE potansiyel enerjiyi, KE kinetik enerjiyi, PV' de basınç hacim enerjisini ifade eder (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Açık sisteme dahil olan ve uzaklaşan enerjiler

Sisteminin sahip olduğu enerjilerin toplamı olan entalpinin (H=U+PV) değişimi Eş.4.2 ‘den elde edilir.

$$dH = dU + d(PV) = dU + PdV + VdP \tag{4.2}$$

Eş.4.2, Eş.4.1’de yerleştirildiğinde Eş.4.3 elde edilir.

$$dE = dQ - dW_w = dH + d(PE) + d(KE) \tag{4.3}$$

Tersinir proseslerde “sistem sınırlarındaki entalpi birbirine eşit” olarak kabul edilerek sisteme dahil olan ve sistemden çıkan ısı enerjisi yalnızca PV işini ve iç enerjiyle ilişkililendirilir.

$$dQ = dU + PdV \tag{4.4}$$

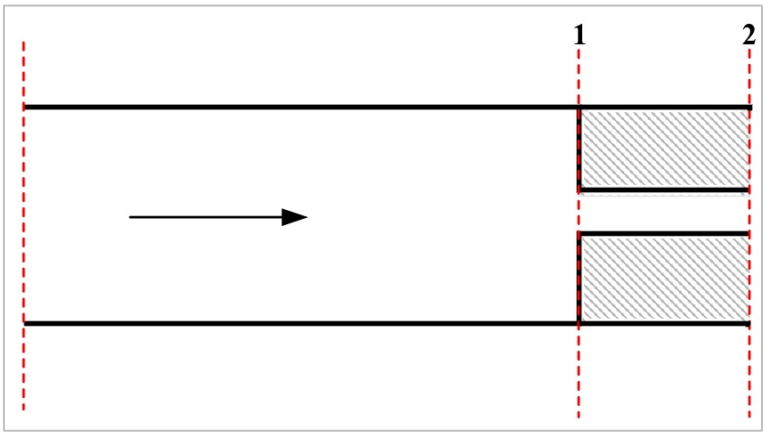
Eşitliklerin birlikte çözümü ile Eş.4.5 elde edilir. Bu denklikte kinetik enerji birim kütle başına hız ifadesinin (u) karesinin yarısı olarak ifade edilirken, potansiyel enerji yerçekimi (g) ile maddenin yüksekliğinin (h) çarpımı olarak ifade eder.

$$dU + PdV - dW = dU + PdV + VdP + d(PE) + d(KE) \quad (4.5)$$

$$dU + PdV - dW = dU + PdV + VdP + gdh + udu \quad (4.6)$$

$$-dW = VdP + gdh + udu \quad (4.7)$$

Şekil 4.4 salım noktasının görselidir. "1" sınırı boru hattından veya ekipmandan salım noktasına girişi, "2" sınırı bağlantı noktasındaki delikten atmosfere çıktığı noktasını ifade eder. Delik boyunca akışkanın alacağı yol (l) ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu varsayımı ile deliğe giriş ve atmosfere çıkış noktalarındaki tüm şartların delik boyunca eşit olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.4. Salım noktasının görseli

Şekil 4.4'de verilen sistem için Eş.4.7'de integral alındığında aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$-W = V(P_2 - P_1) + g(h_2 - h_1) + \frac{(u_2^2 - u_1^2)}{2} + h_{fs} \quad (4.8)$$

Burada h_{fs} sürtünme kayıplarını ifade eder. Birim kütle başına hacim değerini yoğunluk cinsinden yazılıp sınırlar için tarafları ayırıldığında Eş.4.9 elde edilir.

$$\frac{P_1}{\rho} + gh_1 + \frac{u_1^2}{2} - W = \frac{P_2}{\rho} + gh_2 + \frac{u_2^2}{2} + h_{fs} \quad (4.9)$$

Deliğe giriş ve atmofere çıkış sisteminde şaft işi yoktur ve aynı zamanda sistem sınırlarında zemin yüksekliği aynı olmasından dolayı herhangi bir potansiyel enerji değişimi söz konusu değildir. Böylelikle mekanik enerji denkliği aşağıdaki şekle (Bernoulli eşitliği) dönüşür.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + h_{fs} \quad (4.10)$$

Boru hattı içindeki akışkan deliğe temas ettiği anda ani daralma yaşanır ve buna bağlı sürtünme kaybı oluşur. h_{fs} deliğe geçişteki daralma (h_c) ve delikteki sürtünme kayıplarını (h_s) içerir. Salım deliğine giriş ve çıkış boyunca delikten duvara sürtünmeler et/conta kalınlığının çok küçük olmasından dolayı oluşacak sürtünme kayıpları h_c' ye göre ihmal edilebilecek boyuttadır. Salımın giriş noktasının tanımına göre hız (u_1) 0'a eşittir veya $u_2 >> u_1$ varsayımı ile u_1 ihmal edilebilir. "1" sınırındaki alan boru kesit alanı olup A_1 ile ifade edilirken, "2" sınırındaki deliğin kesit alanı A_2 olarak tanımlanmıştır.

$$h_{fs} = h_c\left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)\frac{u_2^2}{2} \quad (4.11)$$

Eş.4.11' de ki alanları ifade eden parantez içi K olarak adlandırılarak Eş.4.10 ile birlikte çözüldüğünde Eş.4.12 elde edilir.

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{u_2^2}{2}(1 + K) \quad (4.12)$$

Eş.4.12' de ki parantez dağıtılıp, K katsayısı boyutsuz tahliye katsayısına (C_d) çevrilip, salım sonucu akışkanın atmosfere çıkış hız eşitliği elde edilir.

$$u_2 = C_d\sqrt{2\frac{P_1 - P_2}{\rho}} \quad (4.13)$$

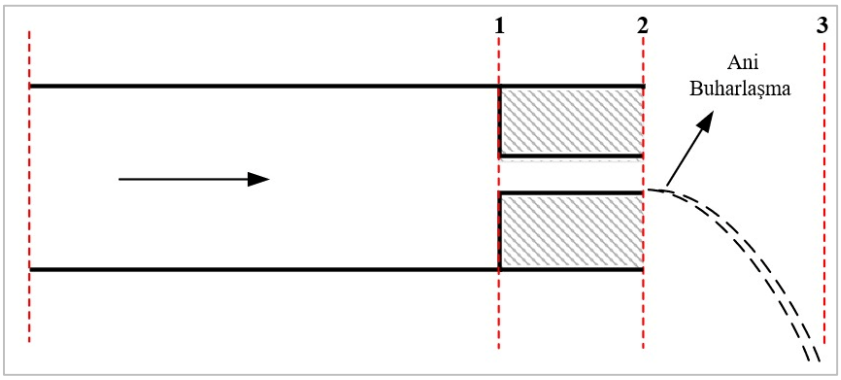
Belirlenen hız ifadesinde çizgisel hız kütlesel akış hızına ($\dot{m}$) geçmek için alan (çıkış noktasının alanını, S_2) ve yoğunluk (işletme şartlarındaki, ρ) ifadeleri kullanılarak elde

edilen Eş.4.14' den salım noktasından çıkan birim zamandaki toplam kütle miktarı hesaplanır.

$$\dot{m} = C_d\, A \sqrt{2(P_1 - P_2)\rho} \tag{4.14}$$

4.1.2. Flaş buharlaşma miktarı

Bölüm I olarak gösterilen bölgede kimyasalın delikten çıktıktan sonraki ilk davranışı Şekil 4.5'de sunulmaktadır. Kimyasalın bir kısmı (buharlaşma fraksiyonu = $\emptyset_b$) ani buharlaşır diğer kısmı ise sıvı olarak zemine düşer.



Şekil 4.5. Salım sonrası ilk davranış

Salım noktasından sonra kimyasal hızlı bir şekilde genleşecektir. Genleşme o kadar hızlı olduğu varsayılır ki, çevre arasında ısı alışverişi için zaman yoktur, dolayısıyla adyabatik genleşme varsayımı geçerlidir. Genleşen sıvı atmosfere karşı iş yapar ve iç enerjinin bir kısmı maddenin PV enerjisini artırmaya gider. Enerjideki artışın $-\int P.dV = (P_{2'} - P_3)dV$ ile verildiği varsayılırsa, atmosferik basınca ilk genişleme, adyabatik tersinir bir süreç olarak ele alınabilir. P_3 atmosferik basınca, $P_{2'}$ ise kap içi basınca karşılık gelmektedir (2' düzlemi deliğin atmosfere çıkmadan hemen önceki son ucudur). Entropi değişimi bu tersinir adyabatik işlemde sıfırdır yani bu ilk aşama izentropiktir. Entropi değişimi buhar fraksiyonu ($\emptyset_b$) cinsinden Eş.4.15' de ifade edilerek bu bölgedeki buharlaşma miktarı Eş.4.16 kullanılarak hesaplanabilir [31].

$$S_{s2'} = (1 - \emptyset_b) \times S_{s3} + \emptyset_b S_{b3} \tag{4.15}$$

$$\emptyset_b = \frac{S_{s2\prime} - S_{s3}}{S_{b3} - S_{s3}} \quad (4.16)$$

Burada $S_{s2'}$, S_{s3} ve S_{b3} sırasıyla 2'. noktasındaki sıvının, 3. noktasındaki sıvının ve entropi değerlerini ifade eder. Buharlaşma ile meydana gelen Gibbs serbest enerji değişimi Eş.4.17' de verilmiştir.

$$\Delta G_{buharlaşma} = \lambda - T_{KN} \times \Delta S_{buharlaşma} \quad (4.17)$$

Bu esnada meydana gelen hal değiştirme olayında iki faz bir arada denge halinde olduğu varsayımı ile Gibbs serbest enerjileri arasındaki fark sıfırdır, $\Delta S_{buharlaşma}$ ise 3 noktasındaki buhar ve sıvının entropi farkına eşittir.

$$\Delta S_{buharlaşma} = S_{b3} - S_{s3} = \frac{\lambda}{T_{KN}} \quad (4.18)$$

Eş.4.18' den elde edilen denklik, Eş.4.17' de yerleştirildiğinde aşağıdaki ilişki elde edilir. Denklikte kullanılan entropi değerleri sınır koşularındaki sıcaklıklarında belirlenir.

$$\emptyset_b = \frac{T_{KN} \times (S_{s2\prime} - S_3)}{\lambda_{KN}} \quad (4.19)$$

Flaş buharlaşma fraksiyonu spesifik ısı kapasitesi ve kaynama noktası ve buharlaşma entalpi ile de belirlenebilir.

$$\emptyset_b = \frac{Cp_{2\prime} \times (T_{KN} - T_{2\prime})}{\lambda_{KN}} \quad (4.20)$$

Birim zamandaki toplam miktarı içerisinden flaş davranışına uğrayan kısım ($m_{flaş}$) buhar fraksiyonundan hesaplanır [27].

$$\dot{m}_{flaş} = \dot{m} \times \emptyset_b \quad (4.21)$$

Flaş miktarının bulunması için geçerli olan bu denklemler kimyasal termodinamik özellikleri ile ilişkili olduğu için hata payının az olması beklenir.

Oluşan buhar fazı içerisinde mekanik kırılma aerosol oluşumuna sebep olur. Bu aerosollerin bir kısmı buhar fazında kalarak tehlikeli bölge oluştururken diğer kısmı sıvı yağmuru oluşturarak zeminde birikintiye ilave olur. Buharın oluşturduğu bu tehlikeli bölgede sıvı damlacıklarının (aerosol) olması muhtemeldir. Flaş buharlaşma miktarı, oluşacak olan sıvı yağmur (n_R) miktarından düşülerek buhar fazında kalan miktarı için denklem düzenlenmesi yapılmalıdır. Flaş buharlaşma bölgesinde yoğunluk (ρ_f), buhar ($\rho_{b,f}$) ve sıvı ($\rho_{s,f}$) yoğunlukları kullanılarak Eş.4.22 ile hesaplanır.

$$\frac{1}{\rho_f} = \frac{(1-\emptyset_b)}{\rho_{s,f}} + \frac{\emptyset_b}{\rho_{b,f}} \tag{4.22}$$

Eş.4.23' de kütlenin korunumu ve Eş.4.24' de momentumun korunumu denklikleri birlikte çözülür.

$$\rho_2 u_2 A = \rho_f u_3 A_f \tag{4.23}$$

$$\rho_2 {u_2}^2 A + F = \rho_f {u_3}^2 A_f \tag{4.24}$$

"(2')" sınırındaki kimyasal, basınçla atmosfere çıktığında, kimyasala, basıncından dolayı bir salım alanında kuvvete (F) uygulanır. Bu kuvvet (Eş. 4.25) Eş.4.24' e yerleştirilerek flaş sonrası lineer hız (u_3) elde edilir.

$$F = P \times A \tag{4.25}$$

$$\rho_2 {u_2}^2 A + A(P_2 - P_3) = \rho_f {u_3}^2 A_f \tag{4.26}$$

$$u_3 = \frac{(P_2-P_3)A}{\dot{m}} + u_2 \tag{4.27}$$

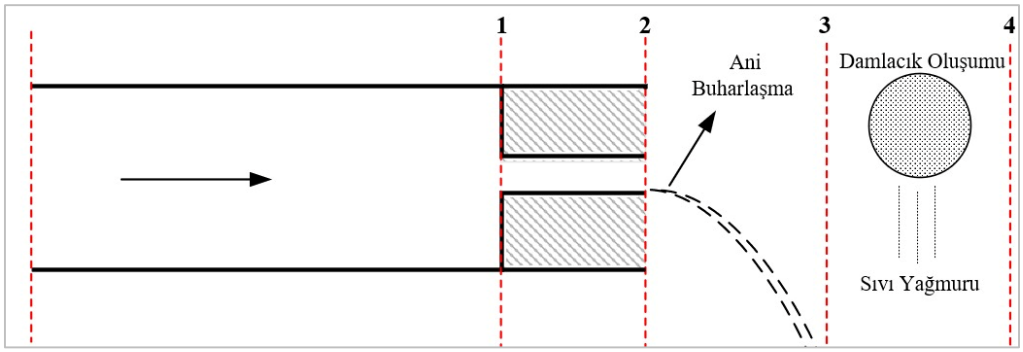
"3" sınırındaki hız ifadesini kütlenin korunumu denkliğine (Eş.4.23) yerleştirilerek flaş buharlaşma ile oluşan buhar bulutunun kesit alanı (A_f) ve jetin yarıçapı (r_f) bulunur [29].

$$A_f = \frac{A\rho_2 u}{u_3 \rho_f} \tag{4.28}$$

$$r_f = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} \tag{4.29}$$

4.1.3. Damlacık oluşumu, buharlaşması ve sıvı yağmuru

Bölüm II'de ve Şekil 4.6' da gösterilen damlacık oluşumu ve sıvı yağmuru olayları bu başlıkta incelenmiştir.



Şekil 4.6. Damlacık ve sıvı yağmuru oluşumu görseli

Damlacık oluşumu

Basınçla salınan, yüksek sıcaklıklara sahip sıvı damlacıkların havuz oluşturma davranışı yerçekimi ivmesi ile hızlanırken, rüzgarın da olası bir kaldırma kuvveti etkisi (buoyancy force) ile sıvının yüzeyinde bir gerilim oluşur. Açık alanda rüzgar yönü çoğunlukla aşağıdan yukarı doğru olmayacağı için bu kaldırma kuvveti ihmal edilebilir boyuttadır. Oluşan bu yüzey gerilmeleri, sıvı damlacıkların aerodinamik parçalanmasına yol açarak daha küçük damlacıklara dönüşmesine neden olur. Aerodinamik parçalanma ile oluşan damlacıkların boyutlarını belirlemek için kullanılan çeşitli yöntemlerden biri Van den Bosch'un geliştiriği bir korelasyona dayanır [29]. Maksimum kararlı damla boyutunu veren yöntemde Weber boyutsuz sayısının (We) Reynold boyutsuz sayısı (Re) ile büyüklük ilişkisine göre belirlenir.

Eğer; $We_f < Re_f^{-0,45} \times 10^6$ ve $T_2 < 1,11 \times T_{KN}$ ise;

$$d_d = 3,78 \times r_f \sqrt{(1 + 3 \times \frac{We_f^{0,5}}{Re_f})} \tag{4.30}$$

Değil ise;

$$d_d = C_{ds} \frac{\sigma_s}{\rho_a u_3^2} \tag{4.31}$$

damlacık çapı (d_d) olarak belirlenir. Eş.4.31' de ifade edilen C_{ds} boyutsuz sayısı 10-20 arasında bir değer olduğu ve 15 değerininde önerildiği literatürde belirtilmektedir. Buradaki ifadeler aşağıdaki gibidir.

$$We_f = \frac{2r_f\, u_3^2\, \rho_{s,f}}{\sigma_s} \tag{4.32}$$

$$Re_f = \frac{2r_f\, u_3}{\vartheta_s} \tag{4.33}$$

r_f	Ani buharlaşma sonu oluşan jetin yarıçapı
u_3	Salınan sıvının ani buharlaşma sonundaki hızı
$\rho_{s,f}$	Ani buharlaşma
σ_s	Yüzey gerilimi
ϑ_s	Kinematik viskozite

Damlacık çapının belirlenmesi için kullanılan korelasyonun kimyasalın kaynama noktasına göre belirlenmesi ve kimyasalın fizikokimyasal özelliklerinin kullanılması hata payını düşürmesi beklenir.

Oluşan damlacık yerçekiminden dolayı önce sıvı yağmuru olarak serbest düşüş yapar (etki eden kuvvet, F= m.g). Damlacığın boyutuna göre damlacık üzerine etki eden kaldırma ve sürtünme kuvveti (drag force) farklılık gösterecektir. Denklemlerde ki akışkana ait yoğunluk özelliği (ρ_s) ve parçacığa ait parçacık çapı da önemli parametre iken havanın kinematik viskozitesi (ϑ_a), ve yoğunluğu (ρ_a) da etkilidir. Bu farklılıklar göz bulundurularak damlacığın hızı aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [32].

$$u_d = \frac{\rho_s\, g}{18\, \vartheta_a \rho_a} d_d^2 \tag{4.34}$$

Sıvı yağmuru

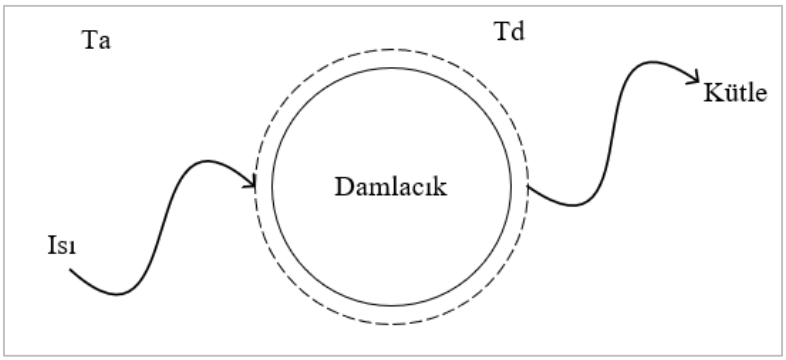
Sıvı yağmur fraksiyonu (n_R) belirlenmesinde Kletz tarafından geliştirilen korelasyon kullanılabilir. Korelasyonda flaş buharlaşma oranı eğer 0,5 değerinden büyükse sıvı yağmuru oluşmayacağı, 0,5 değerinden küçükler için ise Eş.4.35' de verilen oran kullanılacağı belirtilmiştir. Elde edilen sıvı yağmuru fraksiyonu ile havuza damlacıktan dökülen sıvı miktarı Eş.4.36 ile hesaplanır.

$$n_R = 1 - 2\emptyset_b \tag{4.35}$$

$$\dot{m}_{sıvı\ yağmuru} = \dot{m} \times n_R \tag{4.36}$$

Sıvı yağumuru fraksiyonu için birçok korelasyon vardır [32]. Bu çalışmada Kletz korelasyonu kullanıldığı için diğerleri okuyucuya sunulmamıştır. Kullanılan korelasyon hem basit hem de flaş buharlaşma fraksiyonu ile kimyasalın termodinamik özelliklerini kullanması kısmen kaba bir yaklaşımla bile olsa fikir vermesi açısından önemlidir.

Salım noktasından serbest düşme ile oluşan havuz ile aerosolden gelen sıvı sisi ile oluşacak olan havuz alanının zeminde aynı noktaya denk geldiği kabul edilmiştir. Sıvı yağmuru olmayan, geriye kalan damlacıklarda buharlaşma eğilimi gösterir. Damlacıkların buharlaşması, havadan damlacıklara ısı transferi ve damlacık yüzeyinden havaya kütle transferi mekanizmaları ile sağlanır. Bu transferlerde damlacığın parçacık boyutu da önemlidir. Küresel bir damlacık için transfer mekanizması Şekil 4.7 verilmiştir. Transfer olayları damlacık çevresinde oluşan çok ince bir film tabakası üzerinden iki film teorisine göre gerçekleşir (T_a: havanın yığın sıcaklığı, T_d: damlacık sıcaklığı). Film tabakasının çok ince olduğu varsayımı ile filmin yarattığı transfer olayına karşı direnç ihmal edilebilir. Damlacık normal şartlarda zamana bağlı soğuyarak sıcaklık kaybedecektir. Hesaplama esnasında iterasyon ile damlacık sıcaklığı bulunabilir. Bu çalışma için damlacık yüzeyindeki sıcaklık damlacığın yığın sıcaklığına eşit olduğu varsayımı yapılmıştır [32, 33].



Şekil 4.7. Damlacığın ısı-kütle transfer mekanizması

Damlacığın buharlaşması

Sıvı damlacığının havada buharlaşması Stefan akışı olarak bilinen mekanizma ile gerçekleşir. Stefan akışı durumunda damlacık tarafından çevreden ısı emildikçe, sıvının bir kısmı yüzeyden buharlaşarak uzaklaşır.

$$\left\{\begin{matrix} Konveksiyon\ \ ile\ damlacığa \\ aktırılan\ toplam\ enerji\ transferi \end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix} Damlacığın\ buharlaşması\ için \\ gerekli\ olan\ enerji\ transferi \end{matrix}\right\}$$

Damlacığın buharlaşma mekanizmasında aşağıda ayrı ayrı transfer mekanizmaları açıklanan hem ısı hem de kütle transferi etkilidir [34, 35]. Damlacık ile çevre arasındaki sıcaklık farkı ısı transferine yol açar. Bu ısı transferi damlacığı çevreleyen film boyunca meydana gelen kütle transferine (buharlaşmaya) yol açar. Buharlaşan damlacığın kütle oranına eşdeğer olan damlacık kütlesinin değişim oranı damlacığın enerji korunumu denklemi oluşturularak türetilebilir. Damlacığın enerji değişimi, konvektif ısı transferi ve buharlaşma ısısının toplamıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$mCp_d \frac{dT_d}{dt} = Q + \dot{m}_{damlacıktan\ buharlaşma}\lambda \tag{4.37}$$

Burada λ gizli buharlaşma ısısını, Cp_d damlacığın spesifik ısı kapasitesini ifade eder. Isı transferi Eş.4.38 ile açıklanabilir.

$$Q = h\,A_d\,(T_a - T_d) \tag{4.38}$$

Burada,

h	Isı transfer katsayısı
A_d	Damlacığın yüzey alanı
T_a	Ortam (hava) sıcaklığı
T_d	Damlacık sıcaklığı

Isı transfer katsayısının bulunması için boyutsuz olan Nusselt sayısı (konveksiyon ile ısı transferi ile akışkanın içinde kodüksiyonla ısı transferi ilişkisi) Eş.4.39 verilen korelasyondan bulunur [33, 35].

$$Nu = h\frac{d_d}{k_a} = 2 + 0{,}6Re^{1/2}Pr^{1/3} \tag{4.39}$$

Burada k_a havanın termal kondüktivitesini ifade ederken, Prandl sayısı (momentum difüzyon katsayısı ile termal difüzyon katsayısı arasındaki ilişki) $\Pr = \mu\, C_{pa}/k$ ve Reynold sayısı (moleküler akış ile viskos akışla arasındaki ilişki) $Re = d_d u \rho_{hava}/\mu$ tanımlarından bulunur. Damlacığın yüzeyinden kütle transferini ifade eden birim zamandaki buharlaşma için Eş. 4.40 da verilmiştir [35].

$$Q = k_a\, Nu(T_a - T_d) \tag{4.40}$$

Kütle transfer katsayısı ise genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{m}_{damlacıktan\ buharlaşma} = -kA_d\frac{x_i P_{si} - P_{ai}}{RT_d} \tag{4.41}$$

Burada;

k	Kütle transfer katsayısı
P_{ai}	Atmosferik sıcaklıktaki buhar basıncı
P_{si}	Damlacığın yüzey sıcaklığındaki buhar basıncı

Raoult yasası, bir sıvı ile dengede olan bir buhar fazındaki bir bileşenin kısmi basıncının, sıvı fazdaki bileşenin mol fraksiyonu ile doğru orantılı olduğunu belirtir [36].

$$P_{si} = x_i P_i^{\,0} \tag{4.42}$$

Buhar basıncını belirlemek için Clausius-Claypeyron denkliği kullanılır.

$$ln\frac{P_{si}}{P_{ai}} = \frac{\lambda}{R}\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_d}\right) \tag{4.43}$$

Stefan akış için geçerli olan Gavin tarafından serbest düşen damlacıkların buharlaşması için geliştirilen Ranz-Marshall korelasyonu kullanılarak elde edilebilir. Sherwood sayısı (konveksiyon ve moleküler difüzyon ile kütle transferi arasındaki oran), Reynold ve Schmidt (momentum difüzyon katsayısı ile moleküler kütle difüzyon katsayısı arasındaki ilişki) sayıları ile ilişkili korelasyondan belirlenebilir [34, 35].

$$Sh_i = k\frac{d_d}{D_i} = 2 + 0{,}6Re^{1/2}Sc_i^{1/3} \tag{4.44}$$

Burada D_i moleküler difüzyon katsayısını ifade eder. Schmidt sayısı ($Sc_i = \mu/\rho_{hava}D_i$) dinamik viskoziyesi, havanın yoğunluğu ve difüzyon katsayısı ile belirlenir. Yukarıdaki ilişkilerin Eş. 4.41' e yerleştirilmesi ile kütle transferi için Eş.4.45 elde edilir.

$$\dot{m}_{damlacıktan\ buharlaşma} = -\pi d_d \frac{D_i Sh_i}{RT_d}(x_i P_{si} - P_{ai}) \tag{4.45}$$

Buharlaşma ve ısı transfer mekanizmaları Eş.4.37' de içerisine yerleştirilerek düzenlendiğinde damlacığın termal dengesi için aşağıdaki ifade ortaya çıkar [34].

$$mCp_d\frac{dT_d}{dt} = k_a\, Nu\,(T_a - T_d) + \lambda\left(-\frac{D_i Sh_i}{RT_d}(x_i P_{si} - P_{ai})\right) \tag{4.46}$$

Bu denklemden damlacığın yüzey sıcaklığının bulunması iterasyon ile elde edilerek damlacıktan buharlaşma miktarı belirlenir. Bu çözümde küçük damlacıkların ısı transferi mekanizmasının hızlı gerçekleşmesi ile damlacığın yüzey sıcaklığı ile havanın sıcaklığı arasındaki fark kısa sürede ortadan kalkabilir. Buharlaşmanın adyabatik olduğu kabulü yapıldığında damlacığın sıcaklığı kaynama noktasının altına kadar düşebilir.

Bununla birlikte damlacık buharlaşması için sadeleştirilmiş formüllerde vardır [32]. Isı ve kütle transferlerinin sadeleştirilmiş hallerini kullanan Eş.4.47' de "A_d" damlacık alanı, "T_∞"

damlacıktan çok uzaktaki hava sıcaklığı, " T_{KN} " damlacığın kaynama sıcaklığını tanımlamaktadır.

$$\dot{m}_{damlacıktan\ buharlaşma} = \frac{A_d\ h\ (T_\infty - T_{KN})}{\lambda} = \frac{1}{6}\pi\rho_s \frac{d(d_d)^3}{dt} \tag{4.47}$$

Isı transferi katsayısı h ise Eş.4.48 ile belirlenir. Kimyasalın gaz fazındaki termal kondüktivitesi k_{af} ve viskozitesi μ_f ile tanımlanmıştır. Alt simge f, sıvı sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki aritmetik ortalama sıcaklığındaki (T_f) değerleri ifade eder [32].

$$h = \frac{k_{af}}{d_d}\left[2 + 0{,}6\left(\frac{d_d u_d \rho_f}{\mu_f}\right)^{1/2}\left(\frac{\mu_f}{C_{pf}k_{af}}\right)^{1/3}\right] \tag{4.48}$$

Eş.4.48 uygulanması açısından kolay olması ve enerji transferlerini içermesinden kaynaklı farklı çözüm yolu olarak okuyucuya önerilmektedir.

4.1.4. Salım sonucu havuz oluşumu ve buharlaşma

Bölge I ve Bölge II' de sıcaklığı ve yoğunluğu nedeniyle yere doğru hareket eden sıvının zeminde oluşturduğu havuzdan buharlaşma meydana gelir. Salım sonunda havuzda biriken miktarı belirlemek için aşağıdaki eşitlik kullanılır. Ancak bilinmelidir ki havuzda biriken miktar zamana bağlı olarak değişmektedir.

$$\dot{m}_{havuz} = \dot{m} - \dot{m}_{buhar} \tag{4.49}$$

EPA' ya göre sınırlandırılmamış bir havuzun yüksekliği en kötü durum varsayımı 1 cm için havuz alanı hesaplanır [6]. Oluşan birikintiden de hava şartlarına göre buharlaşma olacaktır. Zemin ile kondüksiyon, hava ile konveksiyon, güneş etkisi ile atmosferik radyasyon, buharlaşma etkisi ile havuzdan buharlaşma meydana gelir [37].

$$\dot{m}_{havuz} C_p \frac{dT_p}{dt} = q_{konveksiyon} + q_{kondüksiyon} + q_{güneş} + q_{radyasyon} - q_{buharlaşma} \tag{4.50}$$

Bu denklikteki ifadeler aşağıdaki gibidir.

T_{havuz} Havuz sıcaklığı

$\dot{m}_{havuz}$	Havuz kütlesi
C_p	Sıvının ısı kapasitesi
$q_{konveksiyon}$	Havadan konveksiyon ile ısı transferi
$q_{kondüksiyon}$	Zeminden kondüksiyon ile ısı transferi
$q_{güneş}$	Güneşten gelen radyasyon
$q_{radyasyom}$	Havadan ışınımsal yol ile ısı transferi
$q_{buharlaşma}$	Buharlaşma nedeni ile ısı kaybı

Zeminde biriken ve kaynayan havuzdan meydana gelebilecek buharlaşma için Carslaw and Jaeger tarafından havadan kondüksiyon ile ısı transferi için modifiye edilmiş denklik Eş.4.51' de verilmiştir. Bu eşitlikte k_s zeminin termal kondüktivitesini, A_p havuz alanını, α zeminin termal difüzivitesini ve t'de zamanı ifade eder.

$$q_{kondüksiyon} = \frac{2k_s A_p (T_{zemin} - T_{havuz})}{\sqrt{\pi \alpha t}} \tag{4.51}$$

Zeminden konvektif ısı transferi için Eş.4.52 kullanılmaktadır. Bu eşitlikte h ısı transfer katsayısını, A_p havuz alanını ifade eder.

$$q_{konveksiyon} = h\, A_p (T_a - T_{havuz}) \tag{4.52}$$

Güneşten gelen solar radrasyon ile meydana gelen ısı transferi Raphael tarafından geliştirilen yaklaşım Eş.4.53' de verilmektedir. C_l boyutsuz bulutluluk endeksini ifade eder. Açık günler için 0, diğer günler için 10 olarak alınabilir. φ_s ise güneş yüksekliğini (ufkun üzerindeki derece) ifade eder. Denklem sadece 0,1' den büyük $\sin\varphi_s$ için geçerlidir, $\sin\varphi_s$ < 0,1 olan düşük güneş açılarında, gelen güneş radyasyonunun 0 olarak kabul edilir [37].

$$q_{güneş} = 1111 A_p (1 - 0{,}0071 C_1^2)(\sin \varphi_s - 0{,}1) \tag{4.53}$$

Mutlak sıfırdan farklı sıcaklıklara sahip, iki yüzey arasında radyasyonla ısı transferi ortam gerekmeksizin gerçekleşir [38]. Havadan ışınımsal yol ile ısı transferi değerinin belirlenmesi için Eş.4.54 kullanılmaktadır. Eşitlikte yer alan σ_{SB} Stefan-Boltzmann sabiti (5.6704×10^{-8} W/m2·K), ϵ sıvının emisivitesi, f_{alan} ise alan faktörünü ifade eder. Radyasyon ile meydana

gelen ısı transferi özellikle güneş radyasyonu ile oluşan ısı transferinin yanında çok çok küçük kaldığından dolayı bu metodolojide ihmal edilmiştir [37].

$$q_{radyasyon} = \sigma_{SB} \epsilon A f_{alan} ({T_a}^4 - {T_{havuz}}^4) \quad (4.54)$$

Birikinti yukarıda anlatılan ısı transferleri ile buharlaşma meydana gelerek ısı kaybedecektir. Işınımsal yoldan elde edilecek radyasyon çok çok küçük kalacağı genellikle ihmal edilmekle birlikte özellikle güneş radyasyonu, buharlaşmadan kaynaklı havuzun soğuması ve zeminden gerçekleşecek olan ısı transferi formülleri sonucu en çok etkileyen faktörler olacaktır. Kawamura ve MacKay güneş radyasyonu, buharlaşmalı soğuma ve topraktan ısı transferi formüllerini içeren en doğru havuz buharlaşmayı modellemiştir [32]. Eş.4.53' den havuzdan tüm buharlaşma hesaplanmaktadır.

$$q_{buharlaşma} = Q_{buharlaşma} \times A \quad (4.53)$$

$$Q_{buharlaşma} = k \times P_v^{\circ}(T_p) \frac{M}{RT} \quad (4.54)$$

$$k = 0{,}004786 \times u_w^{0,78} \times (2r)^{-0,11} \times 0{,}8^{-0,67} \quad (4.55)$$

Eşitlikte yer alan ifadeler ise aşağıdaki gibidir.

k	Kütle transfer katsayısı
$P_v^{\circ}(T_p)$	T sıcaklığındaki buhar basıncı
M	Molekül ağırlığı
R	İdeal gaz sabiti
u_w	Rüzgar hızı
r	Havuz yarıçapı

Peress, 1980 yılında Lees tarafından ortaya atılan modelleri geliştirmiş ve basit bir eşitlik elde etmiştir ve bu Eş.4.57' de verilmiştir [39].

$$\dot{m}_{havuz\ buharlaşma} = 2{,}117 \times 10^{-6} \times u^{0,78} M^{2/3} \frac{A P_v^{\circ}(T_p)}{T_p} \quad (4.56)$$

Zamanla birlikte havuzun sıcaklığı değişecek ve toplam buharlaşma miktarı artacağı için havuzun toplam kütlesi azalacaktır. Bu göz önünde bulundurulduğunda sıcaklık-zaman içeren iterasyonun çözülmesi gerekmektedir. İterasyonsuz çözümler için veya yapılan iterasyonlu çözümlerin kontrolü için kullanılabilmektedir.

Toplam buhar bulutunu oluşturan değişik mekanizmalar ile buhar miktarının belirlenmesinde teorik yaklaşımlar ve ampirik denklem yukarıda önerilmiştir.

4.2. Buhar Bulutunda Bulunan Toplam Miktar

Tehlikeli mesafeyi belirlemede kullanılacak olan buhar bulutundaki toplam miktar Bölge I' deki flaş buharlaşma, Bölge II' deki damlacık buharlaşması ve bu iki bölgede oluşan havuzdan buharlaşma miktarların toplamı ile (Eş.4.21, Eş.4.47, Eş.4.53) elde edilir ve bu Eş. 4.57' de verilmiştir.

$$\dot{m}_{toplam\ buhar} = \dot{m}_{flaş} + \dot{m}_{damlacıktan\ buharlaşma} + \dot{m}_{havuz\ buharlaşma}$$
$$= \dot{m} \times \emptyset_b + -\pi d_d \frac{D_i Sh_i}{RT_d} (x_i P_{si} - P_{ai}) + 0{,}004786 \times u_w^{0,78} \times (2r)^{-0,11} \times 0{,}8^{-0,67}) \times P_v^{\circ}(T) \frac{M}{RT} \quad (4.57)$$

Denklem kompleks olmasından dolayı kimyasalın özellikleri, işletme ve hava şartların göz önünde bulundurularak çeşitli sadeleştirmeler yapılabilir. Bununla birlikte denklemdeki toplama ulaşırken birimlerin tutarlılığının kontrol edilmesi önemlidir.

Eş. 4.57' de verilen denklem için aşağıdaki kabuller alınmıştır.

- Salım noktasının çıkışında atmosfere ulaşana kadar faz değişimi olmamıştır.
- Tersinir proseslerde sistem sınırlarındaki entalpi birbirine eşittir.
- Salım noktasında ki sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir.
- Salım sonrasında hemen adyabatik genleşme olduğu kabul edilmiştir.
- Damlacık oluşumu için Van den Bosch korelasyonu (Eş.4.29-30) kullanılmıştır.
- Sıvı yağmuru için Kletz korelasyonu (Eş.4.34) kullanılmıştır.
- Damlacık buharlaşması için Ranz-Marshall korelasyonları (Eş.4.39-44) kullanılmıştır.
- Havuz derinliği 1 cm olarak alınmıştır.
- Işınımsal radyasyon nedeni ile havuzdan buharlaşma ihmal edilmiştir.

- Havuz buharlaşması için Kawamura ve MacKay güneş radyasyonu, buharlaşmalı soğutma ve topraktan ısı transferi formüllerini içeren sadeleştirilmiş denklemi (Eş.4.53) kullanılmıştır.

Elde edilen toplam buhar miktarı ile 60079-10-1 standardında verilen grafik yardımı ile tehlikeli mesafe belirlenmiştir (Şekil 3.5).

5. KURGUSAL TESİS

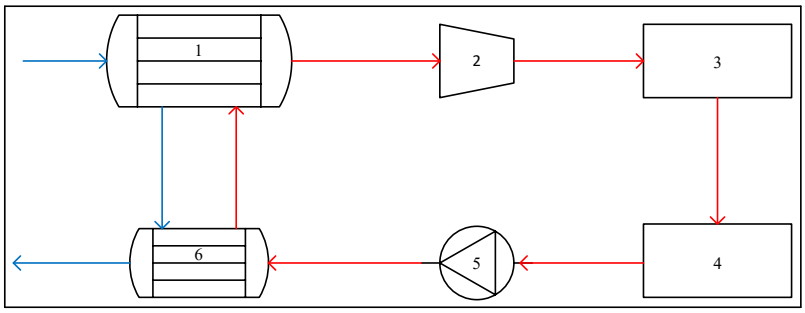
Alevlenir sıvı salımında tehlikeli alan büyüklüğünün hesaplanması için kolay alevlenebilir madde olan izopentan seçilmiştir. İzopentan ülkemizde çoğunlukla jeotermal tesislerde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında kurgusal bir jeotermal tesisinde işletme esnasında izopentan salımı gerçekleşebilecek olası bir nokta seçilmiş ve bu nokta için hesaplama ve değerlendirmeler gerek standartlar gerek yazılım ve gerekse tez kapsamında geliştirilmiş metodoloji bölümünde verilen denklemler kullanılarak yapılmıştır.

5.1. Jeotermal Tesis

Jeotermal enerji, yerkürenin iç ısıdır, yerkürenin derinliklerinde birikmiş olan bu ısı enerjisi jeotermal akışkanlar ile yeryüzüne çıkartılır. Bu ısı enerjisi enerji santrallerinde kullanılır. Dünyada tek flaşlı buhar santralleri, çift flaşlı buhar santralleri, kuru buharlı enerji santralleri, ikili çevrim santralleri gibi farklı proseslere sahip santraller mevcuttur. Çevrim seçimi yeraltı suyunun sıcaklığı, yani içerdiği buhar fraksiyonuna bağlıdır. Su yeraltından basınçlı buhar olarak çıktığı durumlarda kuru buhar enerji santralleri tercih edilebilir. Bu proseste yer altından çıkan buhar doğrudan türbine gönderilir. Yeraltından gelen sıcak su şeklinde gelen enerjinin kullanımında bu su bir tankta toplanır ve buhar kısmı türbine gönderilir. Enerjisi alınarak soğuyan su ise prosesin ön ısıtma işlemlerin de kullanılabilir ve yeniden yer altına gönderilir. Bu proses flaş buharlı sistem olarak adlandırılır. Türkiye'de en yaygın kullanılan jeotermal prosesi ikili çevrimdir. Bu santrallerde genellikle düşük kaynama noktasına sahip organik bir bileşik olan jeotermal akışkanını kaynatmak için sıcak suyun ısısını kullanır. Jeotermal su ve jeotermal akışkanı ayrı kapalı döngülerle sınırlandırılmıştır, bu nedenle havaya emisyonu beklenmez [40].

5.2. Kurgusal Tesis

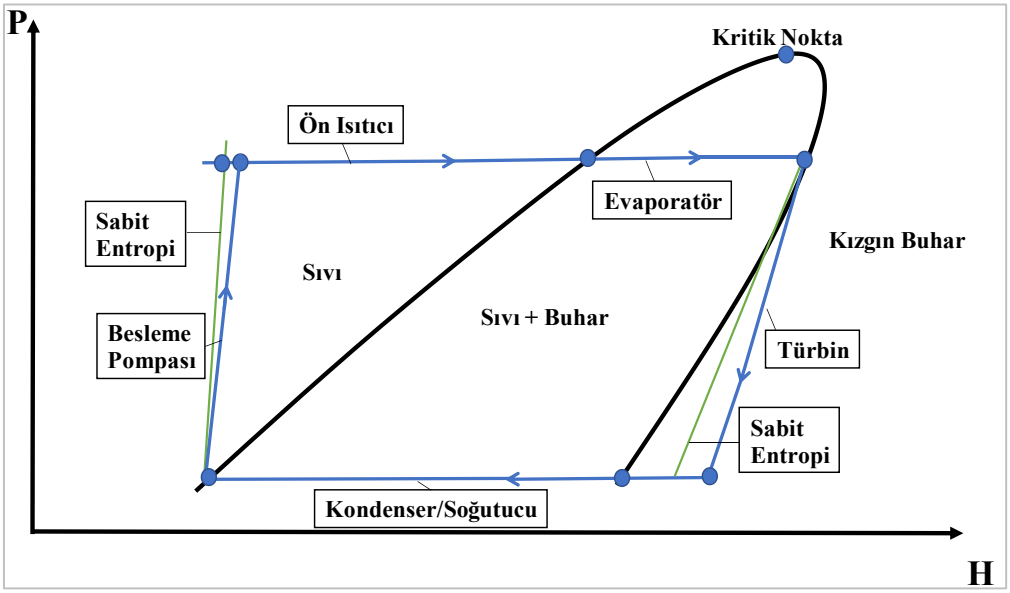
Türkiye'de yaygın kullanımı olan ikili çevrim prosesi bu tez çalışması için seçilmiştir. Şekil 5.1' de ikili çevrim santrali olan kurgusal tesisin proses akış diyagramı verilmiştir.



1	Evaporatör
2	Türbin
3	Soğutucu
4	Ara Depolama Tankı
5	Besleme Pompası
6	Ön Isıtıcı
	Jeotermal Akışkan
	Su

Şekil 5.1. İkili çevrim proses akış diyagramı

Şekil 5.1' de verilen ikili çevrim proses akış diyagramında da görüldüğü üzere proseste bir jeotermal akışkan bir de sıcak su işletilmektedir.



Şekil 5.2. İkili çevrim için P-H diyagramı [40]

Şekil 5.2' de verilen P-H diyagramında mavi eğri ekipmanların giriş ve çıkış işletme şartlarındaki durumu yansıtırken basınç artışı (pompa davranışı) ve genleşme (türbin) sabit entropi ile çalışma durumunda yeşil eğri ile tanımlanmıştır.

Kapalı sistem içinde bulunan jeotermal akışkanı kaynama noktasına getirilmek için ön ısıtıcı gönderilir ve doygun buhar olarak evaporatörden çıkar. Bu faz değiştirme adımın gerçekleşebilmesi için jeotermal akışkana verilen ısı kaynağı yeraltında bulunan sıcak sudur. Yeraltından gelen suyun özelliğine göre seçilen pompalar ile suyun doyma basıncının üzerinde tutularak su evaporatöre ve daha sonra ön ısıtıcıya girerek ısısını jeotermal akışkana

transfer eder. Sistemde kullanılan bu su atmosferle temas etmeden yeraltı rezarvuarlarına pompalanır. Evaporatörden çıkan jeotermal buhar, buhar türbinine girer. Türbinde genleşen akışkan, türbin kanatlarına çarparak şaftı döndürerek kinetik enerjiyi, jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürür. Akışkan buradan soğutucuya gönderilerek sıcaklığı düşürülür ve mevcuttaki sıcaklığını koruduğu ara depolama tankında bekler. Sistem devam ettiği süreçte akışkan besleme pompaları yardımı ile tekrardan ön ısıtıcıya beslenerek kapalı bir döngü oluşturur [40].

Proses kimyasalın gerek gaz gerek sıvı ve gerekse iki faz (sıvı+gaz) şeklinde boru hatlarından, ekipman girişlerinde bağlantı kaynaklarında yer alan salım noktalarından atmosfere salımları söz konusudur. Özellikle 60079-10-1 standardında önerilen hesaplama yöntemlerinde sıvılar veya aerosoller için kısıtlayıcı olduğu görülmektedir. Basınçla sıvılaştırılmış gazlar gibi konular kullanıcının inisiyatifine bırakmıştır. Yazılımlarda ise arka planda kullanılan denklemlerin senaryo şartına uygunluğunun genelde kontrol edilmemesi ve karmaşık yapılarından dolayı bazı salım kaynakların tam geliştirilememesi söz konusudur. Çalışmada hesaplanan standart çözümleri, yazılım sonuçları ve sıvı salımları geliştirilip Bölüm 4' de verilen metodoloji sonuçlarındaki farklılıkları gözlemlemek amacı ile sıvı fazda salım meydana gelebilecek olası bir nokta belirlenerek tehlikeli mesafe hesaplamaları yapılmıştır.

İkili çevrim tesis deniz seviyesinde beton ve gözeneksiz bir zeminde yaklaşık 2000 m^2 alanda izopentan çevrim akışkanı kullanacak şekilde kurgulanmıştır. İzopentanın fizikokimyasal özellikleri Çizelge 5.1' de verilmiştir.

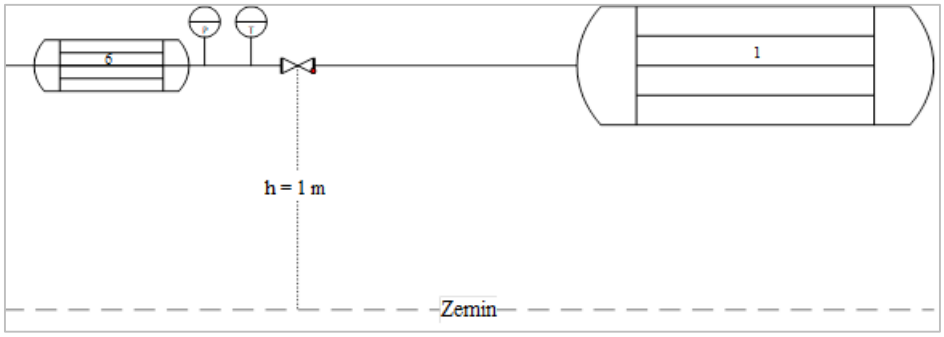
Çizelge 5.1. İzopentanın fizikokimyasal özellikleri [28, 41]

İzopentanın Fizikokimyasal Özellikleri	
Molekül Ağırlığı	72,15 kg/kmol
Kaynama Noktası	27,95 °C
Parlama Noktası	-71 °C
LFL (v)	1,4
UFL (v)	7,6

Kurgulanan tesiste yaz aylarında en yüksek hava sıcaklığı 35 ℃, kış aylarında ise en düşük hava sıcaklığı ise 15 ℃ olduğu kurgulanmıştır. Tesisin bulunduğu bölge için atmosferin kararlılığı nötr (D stabilite sınıfında) ve tesis dışında hava akışını engelleyici bir engel olmadığı düşünülerek tasarlanmıştır. Alanda sürekli operatör bulunmakta ve olası bir arıza/salım durumunda manuel olarak müdahale ederek akışı kesmektedir. Alanın boyutu ve sistemin kompak olmasından dolayı arıza/salım tespiti 15 dakikalık süre içerisinde akış kesilecektir.

5.3. Salım Noktasının Belirlenmesi

Kurgusal tesiste izopentanın sıvı fazında salınabileceği noktalar, Şekil 5.2' deki P-H diyagramında görüldüğü gibi besleme pompalarının bağlantıları veya salmastrası, ön ısıtıcının giriş ve çıkışı ve evaporatöre giriş bağlantı noktalarıdır. Besleme pompasının çıkış sıcaklığı nispeten daha düşük olduğundan dolayı belirlenecek alanın küçük olacağı ön görüldüğü için bu çalışmada ön ısıtıcının çıkışında bulunan vananın bağlantı noktası seçilmiştir. Böylelikle hem basınç hem de yüksek basınç etkileri kolaylıkla gözlenecektir. Şekil 5.3' de salım noktasının görseli verilmiştir.



Şekil 5.3. Kurgusal tesiste salım noktası görseli

Ön ısıtıcı çıkışında basınç ve sıcaklık göstergeleri bulunmaktadır. Basınç 8 bar, sıcaklığın ise 70 ℃ olarak okunmaktadır. Evaporatöre giden bu hat üzerinde bulunan vananın contasında zamanla meydana gelen bir delik oluştuğu ve bu deliğin düzgün, yuvarlak bir hatta sahip olduğu kabul edilmiştir. Salım noktasında bulunan izopentanın proses koşulları ve salım noktasınındaki işletme şartlarına göre senaryolar oluşturulmuş ve Çizelge 5.2' de verilmiştir. En kötü senaryo olarak salımın gün ortasında güneşin 90 derecelik açıda ve havanın nem oranının %50 olduğu, rüzgarın batıdan 1 m/s hızda geldiği anda gerçekleştiği

kabul edilmiştir. İki farklı salım açıklık kesiti senaryosu üzerinde çalışılmıştır (S=$\pi D^2/4$). Seçilen salım noktası için iki farklı açıklık kesitinde hem yazın en yüksek sıcaklığı hem de kışın en düşük sıcaklığı kullanılarak tehlikeli alan büyüklüğü hesaplamaları yapılmıştır.

Çizelge 5.2. İzopentan salımı için senaryo şartları (1 m yükseklikte 8 bar, 70 °C işletme şartlarındaki sıvı)

Senaryo	Meteorolojik Koşullar	Salım Açıklık Kesiti (mm^2)	Ortam Sıcaklığı (°C)
S1	Kış	2,5	15
S2	Yaz	2,5	35
S3	Kış	10	15
S4	Yaz	10	35

6. BULGULAR

Atmosferik patlamaların önlenmesinde en önemli kriterlerden biri işletmenin doğası gereği oluşabilecek patlayıcı ortamların ve büyüklüklerinin tespit edilmesidir. Patlamayı önleme yaklaşımında bu ortamların ortadan kaldırılması veya mesafelerinin küçültülmesinin gerçekleştirilemediği durumlarda tutuşturma kaynaklarının ortamdan uzaklaştırılması gerekir aksi durumda patlama kaçınılmaz olacaktır. Geleneksel tutuşturma kaynaklarına ilave olarak sahada bulunan proses ekipmanları, izleme müdahale sistemleri vb. kaynakların uyumlu seçilmesi patlamayı önlemedeki bir diğer adımdır. Bu sebepten tehlikeli bölgenin doğru tespit edilmesi önemlidir. Tehlikeli mesafenin gerçeğinden küçük belirlenmesi patlamayı önleyemeyeceği gibi gereğinden fazla büyük belirlenmesi de ekonomik açıdan doğru değildir. Tehlikeli mesafelerin belirlenmesi için standart yaklaşımlarının yanı sıra yazılımlar da vardır. Bu alanda kullanılan 60079-10-1 standardına göre yapılan sıvı hesaplamaları varsayılan salım davranışına göre (belirli bir yüzde ile veya tamamının delikten buharlaşması veya havuz oluşturması sonrası buharlaşması vb.) farklı sonuçlar elde edilmektedir. Yazılımlar ise gerek sistem geometrisi gerek topografya gerekse kimyasalın fizikokimyasal özelliklerine müdahaleleri için bazı sınırlamalar içerebilmektedir. Bunların hepsindeki çözüm yaklaşımı kimyasalın serbest kaldıktan sonraki davranışlarındaki parametre etkilerinin kütle, ısı transferi gibi korunum denklemlerinin birtakım varsayımlarla sadeleştirilmiş halleridir. Özellikle sıvı veya basınç altında sıvılaştırılmış gazların davranışlarında kimyasalın fizikokimyasal özelliklerine göre yorumlamak önemli olduğu kadar karmaşıktır. Bu çalışmada salım sonrası basınç altında sıvılaştırılmış gazlar için değişik davranışlara eşlik eden miktarın belirlenmesi için kullanıcı dostu bir model geliştirilmiştir.

Tehlikeli mesafe belirlenmesi için izopentan kullanılan bir jeotermal tesis kurgulanmış (Şekil 5.1) ve belirlenen bir salım noktasında (Şekil 5.3) 60079-10-1, CEI 31-35 standart yaklaşımları, PHAST ve ALOHA yazılımları ve mühendislik yaklaşımı ile tez çalışmasında geliştirilen metedoloji uygulanıp tehlikeli bölgeler yaratabilecek miktarlar ve tehlikeli mesafeler belirlenmiştir. İki farklı açıklık kesiti alanı için kaynama noktasının ortam sıcaklığına yakınlığı veya düşük olması durumundaki davranışlarını değerlendirmek için seçilen ortam (yaz ve kış) sıcaklıklarında, hesaplamalar yapılmıştır. Çözüm yöntemleri ve yazılımlar için çeşitli kabul kriterleri belirlenmiş ve aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6.1. Standart yaklaşımları için kabul kriterleri

Kabul Verileri			60079-10-1	CEI 31-35
Dış ortam şartları	Yaz / kış hava sıcaklığı	T_{hava}, °C	35 / 15	35 / 15
	Rüzgar hızı	u_w, m/s	1	1
	Havalandırma verimliliği katsayısı	f_{SE}	Gerek yok	1
Salım bilgileri	Zeminden yükseklik	h, m	1	1
	Açıklık kesiti	A, mm^2	2,5 / 10	2,5 / 10
	Tahliye katsayısı	C_d	0,75	0,75
	Delik derinliği	l, m	Gerek yok	0,0025
	Güvenlik faktörü	k_{dz}	Gerek yok	0,75
	Düzeltme faktörü	k_z	Gerek yok	1
	Havuz derinliği	h_m	0.01	0.005
Zemin özellikleri	Yaz, kış zemin sıcaklığı	T_{zemin}, °C	Gerek yok	40/10
	Zemin tabakası iletkenlik katsayısı	k_t, W/mK	Gerek yok	0,013
	Zemin tabakası termal difüzivite	α	Gerek yok	2.50E-07
	Toprak gözeneklilik katsayısı	X_g	Gerek yok	1
Havanın özellikleri	Havanın yoğunluğu 35 °C / 15 °C	ρ_a, kg/m^3	1.146 / 1.225	1.146 / 1.225

60079-10-1 standardına göre yapılan izopentanın sıvı salımı hesaplamalarında havuzdan buharlaşma ve değişik oranlarda delikten buharlaşma varsayımlarının değerlendirilmiştir. Standartta atıf yapılan benzen kimyasalı için endüstriyel yönetmelikten alınan değer olan ve sahada sıklıkla başka kimyasallar için kullanılan %2'lik delikten buharlaşması bu çalışmada uygulanmıştır. Bununla birlikte %100 delikten ve havuzdan buharlaşma varsayımları ile 2,5 mm^2 ve 10 mm^2'lik farklı açıklık kesit alanları için kış ve yaz aylarına göre hesaplanan bulgular Çizelge 6.2' de özetlenmiştir.

Çizelge 6.2. 60079-10-1 standardına göre salım miktarları ve tehlike mesafeler

Senaryo	Kabul	Buharlaşma Kabulü	Birim Zamandaki Toplam Salım Miktarı (kg/s)	Salım Karekteristiği	Tehlikeli Mesafe (m)
S1	Kış 2,5 mm^2	Delikten %2	0,052	0,024	1
		Delikten %100	0,052	1,234	10
		Havuzdan	0,052	7,735	25
S2	Yaz 2,5 mm^2	Delikten %2	0,052	0,026	1
		Delikten %100	0,052	1,320	10
		Havuzdan	0,052	8,272	25
S3	Kış 10 mm^2	Delikten %2	0,211	0,098	3
		Delikten %100	0,211	4,939	20
		Havuzdan	0,211	30,942	50
S4	Yaz 10 mm^2	Delikten %2	0,211	0,105	3
		Delikten %100	0,211	5,282	20
		Havuzdan	0,211	33,090	50

Delikten %2'lik buharlaşmanın gerçekleştiği varsayımı ile küçük açıklık kesit alanı için iki mevsim şartında 1 m, büyük açıklık kesit alanı için ise 3 m tehlikeli mesafe bulunmuştur. Havuzdan buharlaşma hesabında, salım sonrasında sıvıda herhangi bir faz değişimi olmadığı kabulü ile elde edilen tehlikeli mesafenin salım sonrası sıvı fazındaki kimyasalın havuz oluşturmadan delikten tamamının buharlaşması senaryosuna göre yüksek olduğu tespit edilmiştir. Açıklık kesitinin 2,5 mm^2 olduğu sıvının tamamının delikten çıktığındaki buharlaşma senaryosunda (S1-S2) belirlenen tehlikeli mesafe 10 m iken, havuzdan buharlaşma senaryosunda yaklaşık 2,5 katı mesafe belirlenmiştir. Açıklık kesitinin 10 mm^2 olduğu sıvının tamamının delikten çıktığındaki buharlaşma senaryosunda (S3-S4) belirlenen tehlikeli mesafe 20 m iken, havuzdan buharlaşma senaryosunda yine yaklaşık 2,5 katı mesafe belirlenmiştir. Açıklık kesitinin artması ile ortantılı olarak ortama sızan kimyasalın birim zamandaki miktarı 4 kat artmıştır. Salım karekteritiği kullanılarak belirlenen tehlikeli mesafelerin açıklık kesitlerinin aynı olduğu senaryolarda yaz ve kış ayları için farklılık göstermediği, kesitin artması ile de tehlikeli mesafelerde yaklaşık 2 kat artış olduğu gözlemlenmiştir. Veriler değerlendirildiğinde salım kesitinin ve buharlaşma kabülünün tehlikeli mesafelerde belirleyici etmenler olduğu belirlenmiştir. Standart hesaplamalarda flaş buharlaşma, damlacık oluşumu, sıvı yağmuru hesaplamalarına yer vermemiştir.

İtalyan standardının önerdiği yaklaşım ile kış ve yaz ayları için farklı salım kesitine göre elde edilen bulgular Çizelge 6.3' de özetlenmiştir.

Çizelge 6.3. CEI 31-35 standardına göre salım miktarları ve tehlike mesafeler

Senaryo	Kabul	Birim Zamandaki Toplam Salım Miktarı (kg/s)	Buharlaşma Kabulü	Birim Zamandaki Salım Miktarı (kg/s)	Tehlikeli Mesafe (m)
S1	Kış 2,5 mm^2	0,051	Flaş	0,015	9
			Havuzdan	0,030	
S2	Yaz 2,5 mm^2	0,051	Flaş	0,018	9
			Havuzdan	0,031	
S3	Kış 10 mm^2	0,205	Flaş	0,062	21
			Havuzdan	0,212	
S4	Yaz 10 mm^2	0,205	Flaş	0,072	22
			Havuzdan	0,219	

Açıklık kesiti düşük olan senaryolar için yaz ve kış aylarındaki flaş buharlaşan birim zamandaki kütle miktarı açıklık kesiti 4 kat artığında aynı oranda artmakta olduğu gözlemlenmiştir. Senaryolarda mevsim koşullarının tehlikeli mesafe hesaplamasında anlamlı bir değişikliğe neden olmadığı, açıklık kesitinin daha etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir. CEI 31-35 standardı uygulamasında işletme ve ortam sıcaklığı dikkatte alınarak standartta verilen grafikten okunan buharlaşma (f) fraksiyonu kullanılarak birim zamandaki salım miktarları belirlenmiştir (Şekil 3.6). Bu fraksiyonun hesaplamaları ciddi ölçüde etkilediği bilinmektedir. Seçilen fraksiyon ile açıklık kesiti 2,5 mm^2 olan senaryolarda 0,051 kg/s birim zamandaki toplam salım miktarı belirlenirken, 10 mm^2 senaryosunda 0,205 kg/s olarak belirlenmiştir. Bu standart çözümünde flaş buharlaşma miktarıda tespit edilmiş ve mevsim şartlarına göre bu miktarın değiştiği görülmüştür. Havuzdan buharlaşma oranının da yine ortam sıcaklığının artması ile az dahi olsa artığı belirlenmiştir. Tehlikeli mesafe belirlemesinde bu küçük farklar etki olmamış olup aynı salım açıklıkları için yaklaşık aynı mesafeler elde edilmiştir. Salım açıklığı 4 kat artığı durumda mesafenin yaklaşık 2 kat büyüdüğü tespit edilmiştir.

Tehlikeli mesafe belirlemede geleneksel stadart yaklaşımlarının yanı sıra yazılımlar da kullanılmıştır. ALOHA yazılımında kullanılan kabuller ve yazılımından elde edilen mesafeler sırasıyla, Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5' de verilmiştir.

Çizelge 6.4. ALOHA yazılımı kabul verileri

Parametre	S1	S2	S3	S4
Salım kesit alanı (mm^2)	2,5	2,5	10	10
Hava sıcaklığı (°C)	15	35	15	35
Rüzgar hızı (m/s)	1	1	1	1
Rüzgar yönü	Batı	Batı	Batı	Batı
Rüzgar ölçüm yüksekliği (m)	10	10	10	10
Zemin engebeliği	0	0	0	0
Bulutluluk oranı	0	0	0	0
Havanın stabilite sınıfı	D	D	D	D
Sıcaklığın yüksekte değişim oranı	0	0	0	0
Nem oranı (%)	50	50	50	50
Salım kaynağı	Tank	Tank	Tank	Tank
Atmosferik dağılım hesaplama seçeneği	Ağır gaz dağılımı	Ağır gaz dağılımı	Ağır gaz dağılımı	Ağır gaz dağılımı
Tank tipi	Dikey	Dikey	Dikey	Dikey
Tankın hacmi (m^3)	196	196	196	196
Kimyasalın depolanma durumu	Tamamı Sıvı	Tamamı Sıvı	Tamamı Sıvı	Tamamı Sıvı
Kimyasalın depolanma sıcaklığı (°C)	70	70	70	70
Tankdaki sıvı seviyesi (% doluluk)	100	100	100	100
Salım noktasının tankta konumu (m)	0	0	0	0

Çizelge 6.5. ALOHA yazılımına göre salım miktarları ve tehlike mesafeler

Senaryo	Kabul	ALOHA	
		Birim Zamandaki Toplam Salım Miktarı (kg/s)	Tehlikeli Mesafe (m)
S1	Kış, 2,5 mm^2	0,028	11
S2	Yaz, 2,5 mm^2	0,028	11
S3	Kış, 10 mm^2	0,113	11
S4	Yaz, 10 mm^2	0,113	18

ALOHA yazılımı sonuçlarında 2,5 ve 10 mm^2 olan açıklık kesitinin açıklık çapına çevrilmesi (yazılım bu veri beklemektedir) ile elde edilen birim zamamdaki toplam salım miktarının diğer yöntemlere göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Buna rağmen açıklık kesitinin 4 kat artığı senaryolarda salım miktarlarıda aynı oranda artmıştır. 2,5 mm^2 senaryolarında ortam

sıcaklıklarından dolayı tehlikeli mesafelerde bir fark olmadığı tespit edilmiştir. 10 mm^2 senaryolarında ise ortam sıcaklıklarındaki farkın tehlikeli mefasafeyi 7 m artırdığı belirlenmiştir. ALOHA yazılımı kısa mesafelerde hata payı olacağını ve bu sebeple sonucu görsel olarak sunamayacağı belirtebilir. Yazılım sonuçları Ek 2' de verilmiştir. ALOHA yazılımın arka planında normal kaynama noktasından yüksek sıcaklıkta depolanan kimyasallar için Bernolloli ve Fauske denklemleri kullanılsa da kullanıcıya flaş, havuzdan buharlaşma gibi bilgileri sunmamakta yalnızca iki fazlı olduğu hakkında bilgi vermektedir.

Çalışmada kullanılan diğer yazılım ise PHAST'tır. Bu yazılım ALOHA yazılımına kıyasla daha çok veri talep eder (Çizelge 6.6).

Çizelge 6.6. PHAST yazılımı kabul verileri

Parametre	S1	S2	S3	S4
Dış Ortam Şartları				
Hava sıcaklığı (°C)	15	35	15	35
Nem oranı (%)	50	50	50	50
Rüzgar hızı (m/s)	1	1	1	1
Havanın stabilite sınıfı	D	D	D	D
Salım Bilgileri				
Salım kaynağı	Tank	Tank	Tank	Tank
Tankın hacmi (m^3)	196	196	196	196
Kimyasalın depolanma sıcaklığı (°C)	70	70	70	70
Kimyasalın depolanma basıncı (bar)	8	8	8	8
Salım fazı	Sıvı	Sıvı	Sıvı	Sıvı
Salım noktası yüksekliği (m)	1	1	1	1
Salım noktasının tankta konumu (m)	0	0	0	0
Deşarj sabiti	0,75	0,75	0,75	0,75
Model Yaklaşımları				
Atmosferik genleşme metodu	İsentropik	İsentropik	İsentropik	İsentropik
Salım noktasında faz değişimi	İzin verme	İzin verme	İzin verme	İzin verme
Damlacık oluşum mekanizması	Flaş korelasyon	Flaş korelasyon	Flaş korelasyon	Flaş korelasyon
Yüzey	Yer / Beton	Yer / Beton	Yer / Beton	Yer / Beton
Havuz derinliği (cm)	1	1	1	1

PHAST yazılımı kullanıcıya daha detaylı sonuçlar sunar. Elde edilen mesafeler Çizelge 6.7' de verilmiştir. Yazılım sonuçları Ek 2' de verilmiştir.

Çizelge 6.7. PHAST yazılımına göre salım miktarları ve tehlike mesafeler

Senaryo	Kabul	Birim Zamandaki Toplam Salım Miktarı (kg/s)	Buharlaşma Kabulü	Birim Zamandaki Salım Miktarı (kg/s)	Tehlikeli Mesafe (m)
S1	Kış 2,5 mm^2	0,058	Flaş	0,015	9
			Havuzdan	0,027	
S2	Yaz 2,5 mm^2	0,058	Flaş	0,015	10
			Havuzdan	0,032	
S3	Kış 10 mm^2	0,235	Flaş	0,064	18
			Havuzdan	0,101	
S4	Yaz 10 mm^2	0,235	Flaş	0,064	20
			Havuzdan	0,126	

PHAST yazılımına girilen verilerden yaptığı hesaplama sonuçlarına göre birim zamandaki salım miktarları küçük ve büyük açıklık kesitlerine göre 0,058 kg/s ve 0,235 kg/s olarak elde edilmiştir. Tüm senarolar için (farklı açıklık kesiti, ortam sıcaklığı) flaş buharlaşma fraksiyonunun değerlerinin aynı (0,273) olduğu tespit edilmiştir. Havuzdan buharlaşmanın ise ortam sıcaklığının düşmesi ile azaldığı tespit edilmiştir. Açıklık kesitinin 2,5 mm^2 olduğu yaz ve kış ayları senaryosunda havuzdan buharlaşma ise 0,027 ve 0,032 kg/s olarak belirlenmiştir. 10 mm^2 olduğu yaz ve kış ayları senaryosunda havuzdan buharlaşma ise 0,101 ve 0,126 kg/s olarak belirlenmiştir. Tüm senaryolarda sıvı yağmuru olduğu ve bunun birim zamandaki miktarının açıklık kesitine göre sırayla 0,042 ve 0,171 kg/s olduğu raporlanmıştır. Toplam buharlaşmadan elde edilen tehlikeli mesafeninin düşük açıklık kesitinde kış şartları için 9, yaz şartları içinse 10 m olduğu belirlenmiştir. Fazla olan açıklık kesitininde ise kış için 18 m, yaz için 20 m olduğu gözlemlenmiştir.

Tez çalışması için geliştirilen modelden elde edilen sonuçlar ise 60079-10-1 standardında yer alan grafik kullanılarak belirlenmiş ve Çizelge 6.8'de verilmiştir. Örnek hesaplama Ek 1' de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Geliştirilen metodolojiye göre salım miktarları ve tehlikeli mesafeler

Senaryo	Kabul	Birim Zamandaki Toplam Salım Miktarı (kg/s)	Buharlaşma Kabulü	Birim Zamandaki Buharlaşma Miktarı (kg/s)	Salım Karakteristiği (m^3/s)	Tehlikeli Mesafe (m)
S1	Kış 2,5 mm^2	0,052	Flaş	0,014	0,863	8
			Damlacıktan Buharlaşma	0		
			Havuzdan	0,020		
S2	Yaz 2,5 mm^2	0,052	Flaş	0,014	1,314	10
			Damlacıktan Buharlaşma	$2,95\times10^{-5}$		
			Havuzdan	0,035		
S3	Kış 10 mm^2	0,211	Flaş	0,058	3,452	18
			Damlacıktan Buharlaşma	0		
			Havuzdan	0,081		
S4	Yaz 10 mm^2	0,211	Flaş	0,058	5,257	20
			Damlacıktan Buharlaşma	$2,95\times10^{-5}$		
			Havuzdan	0,143		

Yapılan hesaplamalarda elde edilen salım çıkış hızı değeri (37,22 m/s) yüksek olduğu için bu çalışmada flaş buharlaşma olacağı göz önüne alınmıştır. Geri kalan sıvının yığın halinde havuz oluşturması ile tehlikeli mesafeler belirlenmiştir. Diğer yöntemlerdeki gibi açıklık kesitine bağlı olarak birim zamandaki salım miktarı ve tehlikeli mesafe miktarları artmıştır. Yaz ve kış ayları senaryolarına bakıldığında açıklık kesitinin az olduğu senaryolarda ortam sıcaklığının etkisiyle 1 m'lik fark yaratırken, açıklık kesitinin 4 kat artması ile 2 m kadar tehlikeli mesafede artış meydana gelmiştir. Tehlikeli mesafeler hesaplanan birim zamandaki buharlaşma miktarının salım karekteristiğine dönüştürülmesi ile 60079-10-1 standardı tehlikeli mesafe grafiğinden okunarak belirlenmiştir. Tehlikeli mesafe buharlaşma miktarına göre belirlenmiştir. Yukarıda ayrı ayrı olarak verilen toplam salım miktarı ve toplam buharlaşma miktarı kullanılarak elde edilen tehlikeli mesafeler Çizelge 6.9' da bütün halinde verilmiştir. En kötü senaryo olarak seçilen açıklık kesitinin büyük olduğu (10 mm^2) yaz ayları şartlarında (S4) toplam mesafeler sırasıyla 60079-10-1 %2 Delikten, 60079-10-1 %100 Delikten, 60079-10-1 Havuzdan, CEI 31-35, ALOHA, PHAST, MODEL varsayımları ile hesaplanmıştır ve sırasıyla tehlikeli mesafeler 3 m, 20 m, 50 m, 22 m, 18 m, 20 m ve 20 m olarak bulunmuştur. Belirlene tehlikeli mesafeler için elde edilen görseller Ek 2' de sunulmuştur.

Çizelge 6.9. Hesaplama yöntemlerine göre tehlikeli mesafeler

Hesaplama Yöntemleri	Tehlikeli Mesafe			
	S1	S2	S3	S4
60079-10-1 %2 Delikten	1	1	3	3
60079-10-1 %100 Delikten	10	10	20	20
60079-10-1 Havuzdan	25	25	50	50
CEI 31-35	9	9	21	22
ALOHA	11	11	11	18
PHAST	9	10	18	20
MODEL	8	10	18	20

7. TARTIŞMA ve YORUM

Endüstride katastropik olayların engellenmesi için çeşitli çalışmalara gereksinim vardır. Felaket düzeyinde kazaların çoğunlukla patlamalardan kaynaklandığı bilinmektedir. Normal işletme şartlarındaki alevlenebilir kimyasal salımlardan kaynaklanan ATEX patlamalarının önüne geçilmesi için alevlenebilir maddelerin salımlarının yayılımını belirlemek ve bu alanlardaki tutuşturma kaynaklarını uzaklaştırmak gerekmektedir. Salımların neden olduğu tehlikeli mesafenin belirlemesinde standartlar ve yazılımlar uzmanlar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Akışkanın salımı, salım noktasından gaz veya sıvı fazında olabilir. Sıvı fazındaki salımlar için 60079-10-1 standardında flaş buharlaşma için yaklaşım verilmemesi ya da kaba yaklaşım kullanılması, havuzdan buharlaşma için kaynama noktası düşük olan kimyasallar için açıklanmaması bir eksikliktir. Bu yaklaşımı veren İtalyan standardı ise güncel olarak referanslardan kaldırıldığı bilinmektedir. Yazılımlar uzmanlık gerektirdiği gibi salımın olduğu ekipman türü seçiminde kısıtlamalar içerir. Bu tür eksiklikler/kısıtlamalar tehlikeli mesafe hesaplamalarında hataları getirebilir ve olası tehlikeli mesafenin küçük belirlenmesi patlamalara kolaylıkla yol açabilirken, büyük belirlenmesi gereksiz ekonomik kayıplara yol açar. Sıvı veya basınçla sıvılaştırılmış gaz salımları için tehlikeli mesafe buharlaşma miktarına göre belirlenir. Kimyasalın buharlaşma eğiliminde salım noktası özellikleri kadar kimyasalın fizikokimyasal özellikleri de etkilidir. Bu sebep ile tez çalışmasında toplam buhar miktarını kimyasalın özelliklerini değerlendirilerek belirlenebileceği bir model geliştirilmiştir. Model yaklaşımının tehlikeli mesafenin konumu ve büyüklüğünü gerçeğe en yakın şekilde belirlenmesi amaçlanmış, bunlar üzerinde etkili olacabilecek parametrelere uygun seçilen kimyasal için değişik senaryolar için hesaplamalar yapılarak modelin uygunluğunu standart ve yazılım sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Modelde özellikle kimyasalın fizikokimyasal özellikleri, salım noktası lokasyonu, işletme ve hava şartları önemli parametrelerdir.

Bu çalışmada, etkili parametrelerin değerlendirilmesi için kaynama noktası hava sıcaklığına yakın (düşük kaynama noktasına sahip) olan bir kimyasal olan izopentanın (kaynama noktası 28 °C) en çok kullanıldığı sektörlerden biri olan jeotermal tesis kurgulanmıştır. Kurgusal tesisten sıvı salım noktası (vana bağlantısındaki conta) seçilmiş ve bu nokta için iki farklı açıklık kesitine göre her iki standart, yazılım ve mühendislik yaklaşımıyla tez kapsamında geliştirilen metodoloji kullanılarak gaz/buhar fazındaki yayılım miktarları hesaplanmış ve

etkili oldukları (LFL sınırına kadar) tehlikeli mesafeler belirlenmiştir. Sonuçların birbirileri ile tutarlılığı ve farklılık gösterilenlerin gerekçeleri aşağıda tartışılmıştır.

Toplam salım miktarı 60079-10-1 standardı ile geliştirilen modelde aynı iken İtalyan standardında küçük farkla daha az olduğu görülmüştür. Bu farklılık İtalyan standardında salım noktası derinliğinin (l) hesaba katılmasından kaynaklanmaktadır. Bu değer tehlikeli mesafe belirlemede önemli bir etken olduğu için kullanıcılar tarafından seçim yapılırken dikkatli davranılmalıdır. PHAST ve ALOHA yazılımlarında salım noktası geometrileri boru bağlantı olarak seçme olanağı vermediği gibi boru seçiminde kopma senaryosu ile ilerleyebilmektedir ve bu da farklılıklara neden olabilmektedir. Salım noktası lokasyonuna göre yazılımlar arka planda potansiyel enerjiye karşılık gelen bir basınç değeri kullanarak ($\rho g \Delta h$) işletme basıncında ayarlama yaptığı için değişik sonuçlar elde edilmesine neden olabilmektedir. İki yazılımda da hesaplamalara bir tank boyutu belirlenerek tankın tabanından salım senaryosu çalışılmıştır. Belirlenen toplam salım miktarı PHAST yazılımında küçük farkla yüksek olarak hesaplamış, ALOHA yazılımından ise neredeyse sahada kullanılan yöntemlerin yarısı kadar olduğu tespit edilmiştir. ALOHA' daki bu durum seçilen tank senaryosu ve yazılımın kullanıcıdan yalnızca tank için sıcaklık ve faz değerlerini talep etmesidir. Bu çalışmada kullanılan senaryonun tamamen yazılımlara aktarılamaması (özellikle salım noktasının ekipman/borudaki lokasyonun ve geometrisinin sahadaki gerçek durumda birebir eşleştirilememesi) sonuçlarda gerçek tehlikeli mesafeye göre sapma yaratabileceği zaten beklenmekteydi. PHAST yazılımı ALOHA yazılımına göre daha detaylı modelleme yapmasından ve ALOHA yazılımı kap içi basınç değerini arka planda kendi hesaplayarak bu değere göre salım miktarını belirlemesinden kaynaklı iki yazılım sonucu arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Geliştirilen modelden elde edilen değerin 60079-10-1 standardı ile aynı bulunmasının sebebi standardında toplam salım miktarının hesabını termodinamik yaklaşımına göre yapmasıdır.

Salımdan sonraki davranış (flaş buharlaşma, havuza düşme) kimyasalın fizikokimyasal özelliklerine bağlı olduğu için işletme şartlarından çok etkilenir. 60079-10-1 standardından %100 delikten buharlaşma varsayımı ile bulunan tehlikeli mesafe diğer yöntemlere yakın çıkmıştır. Yalnızca %2'lik buharlaşma varsayımıyla yapıldığında elde edilen mesafe diğer tüm yöntemlere göre yaklaşık beşte biri kadar daha az çıkmıştır, standartta sıvı kimyasal olan benzen için önerilen bu değer kaynama noktası atmosferik sıcaklığa yakın olan basınç altında sıvılaştırılmış gazlar için kesinlikle geçerli olması beklenilmez. ALOHA yazılımı ise

bu detay bilgiyi vermezken, PHAST ve geliştirilen modelde flaş buharlaşma oranı hem malzemenin kaynama noktası hem de yüksek işletme sıcaklığından dolayı beklenildiği gibi yaklaşık %27 çıkmıştır. Flaş buharlaşma oranını kimyasalın fizikokimyasal özelliklerini göre belirlenen İtalyan standardında ise daha yüksek çıkmıştır. Havanın etkisi ile sürüklenen aerosollerde de buharlaşma eğilimi 60079-10-1 standardı ve ALOHA yazılımında dikkatte alınmazken, İtalyan standardı flaş buharlaşma oranında sıvı yağmuru olacağını kabul etmiştir. PHAST yazılımı ve geliştirlen modelde sıvı yağmurundan kaynaklanan buharlaşma miktarı çok düşük olduğu için bu çalışma kapsamında tehlikeli mesafeye havuzdan buharlaşma kısmında dahil edilmiştir. 60079-10-1 standardı ve ALOHA yazılımı zemin şartlarını dikkate almazken diğer yöntemlerde havuzun sınırlılığı ve zemin yapısı hesaplamalarda değerlendirilmektedir. 60079-10-1 standardında ki yalnızca havuzdan buharlaşmaya göre yapılan hesaplamanın diğer tüm yöntemlerden çok daha fazla olmasının nedeni hem zemin yapısı hem de özellikle basınçla sıvılaştırılmış gazların havuza inene kadar buharlaşmasının hesaba katmamasıdır.

60079-10-1 standardında özellikle basınçla sıvılaştırılmış gazlar için yöntem sunmaması, bir varsayımda buharlaşma fraksiyonunu neredeyse yok saymasından dolayı güvenlik açısından çok riskli olacak şekilde gerçek durumdan çok küçük tehlikeli mesafe ya da yalnızca havuzdan buharlaşma senaryosu ile yüksek maliyete neden olabilek şekilde çok büyük çıkmasından dolayı saha uygulamalarında bu durumların göz önünde bulundurulması gerekir. Saha uygulamalarında en azından kimyasalın özelliklerine göre flaş buharlaşmanın hesaplanması ve daha sonra standart yöntemlerinin kullanılması gerçeğe daha yakın sonuçlar verecektir.

Düşük salım açıklığında tüm yöntemlerde ortam sıcaklıklarının tehlikeli mesafelerinde çok az farklılıklara yol açmasına rağmen salım alanının artması ile az da olsa artış gözlemlenmesinden dolayı güvenli tarafta kalmak için en kötü senaryo olarak yaz şartları kullanılmalıdır. Salım noktasındaki açıklığın kimyasalın çözücü/korozif etkisi ile büyüme hızı da değerlendirilerek daha güvenli tarafta kalacak tehlikeli mesafe seçilebilir.

Çalışmada zemin yüksekliği 1 m gibi küçük mesafede seçildiğinden flaş, damlacık ve havuzdan buharlaşmalarından oluşan buhar bulutları birbiri ile çakışmaktadır. Zemin yüksekliğin fazla olması durumunda her bir buharlaşma mekanizmadan ayrı yükseklikte

farklı buhar bulutları oluşacaktır. Dolayısı ile tehlikeli mesafe büyüklüğü daha fazla ve farklı konumlarda olacaktır. Lokasyonun etkisinin saha uygulamalarında değerlendirilmelidir.

Gerek flaş buharlaşma gerek damlacık buharlaşması gerekse havuzdan buharlaşma ile oluşan buhar bulutu havanın etkisi ile ileri taşınabilir ve/veya dağılabilir. ALOHA ve PHAST yazılımı atmosferik dağılım modellerini kullanılırken standartlar ve geliştirilen modelde atmosferik dağılım mekanizmalarına yer verilmemiş ve bu da toplam belirlenen tehlikeli mesafelere etkileyeceği için riskin büyüklüğünün değerlendirilmesi ile tehlikeli mesafenin daha güvenli bölgeye çekilmesi uygun olabilir.

Özetle en kötü senaryo için belirlenen tehlikeli mesafelerde PHAST yazılımından elde edilen sonuçlar atmosferik dağılım mekanizmasını dahil etmeden geliştirilen model sonuçlarıyla neredeyse aynıdır. PHAST yazılımın ücretli olması, uzmanlık gerektirmesi hemde sınırlı geometri seçimi sunması dezavantajlarına alternatif olarak bu tez çalışması kapsamında geliştirilen modelin kullanıcı dostu olması, kullanılması için gereken kimyasallara dair verilerin literatürden kolaylıkla elde edilebilmesi sayesinde hızlı ve gerçekçi sonuç vermesi saha uygulamalarında kolaylık sağlayacaktır. Modelin teorik yaklaşımı hem basınç altında sıvılaştırılmış gazlar hem de sıvı fazındaki tüm salımlar için uygulanabilmesi kullanım yelpazesini genişletmektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada genel bir yaklaşımla sıvıların salım sonrası davranışı için atmosferik patlamalarının önlenmesi için gerekli olan tehlikeli mesafesiyi belirlemeye yönelik bir model geliştirilmiştir. Kaynama noktası ortam sıcaklığına yakın basınç altında sıvılaştırılmış izopentan için yapılan uygulama ile modelin geçerliliği standart ve yazılımlarla karşılaştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında 1 m yükseklikten salım olacağı kabul edilip toplam buharlaşma miktarına göre mesafe belirlenmiştir. Daha yüksek salım noktalarında farklı mekanizmalardan oluşan buhar bulutları birbiri ile örtüşme bölgeleri azalacağı için ayrı tehlikeli mesafe okumaların yapılması ve bunların haritalandırılması önerilir.

Temel amaç özellikle basınç altında sıvılaştırılmış gazların farklı davranışlarını uygulayıcıya aktarmak ve yapılan hesaplamalarda farklı bir bakış açısı kazandırarak gerek standart gerek yazılımlarda elde edilen bulguların gerçekliğinin sorgulanması için yol göstermekdir. Olası bir patlama sonucunda gerek insan hayatı gerekse ekipmanların zarar görmesi açısından kritik önem arz eden bu tehlikeli mesafe hesaplamalarındaki sonuçların doğruluğu hayati önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra elde edilen veriler kaza durumunda acil durum planına sağlıklı veri girdisi olarak da kullanılabilmektedir.

Modelin ileri ki çalışmalar için atmosferik dağılım mekanizmalarının dahil edilmesi ve senaryoların bir deney düzeneği haline getirilerek sonuçların gerçek bulgular ile doğrulması ve ancak bu şekilde hayata geçirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration. (2000). Process safety management. *OSHA*. Washington, 1-6.

2. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. (2016). *Introduction to process safety for undergraduates and engineers,* New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 1-3.

3. International Association of Oil & Gas Producers. (2020). Process safety Fundamentals. *IOGP*. London, 5.

4. U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration. (2016). Hazard Classification Guidance for Manufacturers, Importers, and Employers. *OSHA*. Washington, 6.

5. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik Resmî Gazete Tarihi:11.12.2013 ve Resmî Gazete Sayısı: 28848,* Resmî Gazete, 11 Aralık 2013.

6. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, *Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik Resmî Gazete Tarihi:19.12.2007 ve Resmî Gazete Sayısı: 26735,* Resmî Gazete, 19 Aralık 2007.

7. Nolan, D. P. (2019). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities*. (4. Baskı). Cambridge: Gulf Professional Publishing, 97-104.

8. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. (1994). *Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVEs*. New York: American Institute of Chemical Engineers, 68-159.

9. Crowl, D. A. (2003). *Understanding explosions*. New York: American Institute of Chemical Engineers, 64-105.

10. Assael, M. J., Kakosimos, K. E. (2010). *Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis*. Florida: CRC Press, 75-210.

11. Pape, R., Mniszewski, K. R., Longinow, A. (2010). Explosion phenomena and effects of explosions on structures. I: Phenomena and effects. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 15(2), 135-140.

12. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, *Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik Resmî Gazete Tarihi: 30.04.2013 Resmî Gazete Sayısı: 28633*, Resmî Gazete, 30 Nisan 2013.

13. International Electrotechnical Commission. (2021). IEC 60079-10-1 (Explosive Atmospheres-Part 10-1: Classification of Areas-Explosive Gas Atmospheres). *IEC*, Geneva, 1, 90.

14. Comitato Elettrotecnico Italiano. (2011). CEI 31-35: Electrical apparatus for explosive atmospheres: guide for classification of hazardous areas.*CEI*. Milan.

15. İnternet: The International Disasters Database, URL: https://public.emdat.be/ Son Erişim Tarihi: 01/04/2023.

16. Campedel, M. (2008). Analysis of major industrial accidents triggered by natural events reported in the principal available chemical accident databases. JRC. Luxembourg, 3-5.

17. Crowl, D. A., Louvar, J. F. (2001). *Chemical process safety: fundamentals with applications*. (2. Baskı). New Jersey: Prentice Hall PTR, 227-230.

18. National Fire Protection Association Technical Committee on Fire Investigations. (2004). NFPA 921, Guide for fire and explosion investigations. *NFPA.* Massachusetts, 16-21.

19. Center for Chemical Process Safety. (2000). *CCPS guidelines for chemical process quantitative risk analysis.* (2. Baskı). New York: American Institute of Chemical Engineers, 59-204.

20. European Committee for Standardization. (2011). 1127–1. Explosives atmospheres—Explosion prevention and protection—Part, 1. *CEN.* Brussel, 5-30.

21. National Fire Protection Association Technical Committee on Fire Investigations. (2014). NFPA 77, Recommended Practice on Static Electricity. *NFPA.* Massachusetts, 7.

22. National Fire Protection Association Technical Committee on Fire Investigations. (1986). NFPA 68, Guide for venting of deflagrations. *NFPA.* Massachusetts, 5-7.

23. Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty, D., Reynolds, M. (2013). ALOHA® (Areal locations of Hazardous Atmospheres). NOAA. Washington, 3-30.

24. İnternet: DNV, Consequence Analysis, URL: https://www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis-phast.html, Son Erişim Tarihi: 14/12/2022.

25. Witlox, H. W. M., Fernandez, M., Stene, J. (2015). Atmospheric expansion modelling–literature review, model refinement and validation. DNV. London, 6-38.

26. Witlox, H. W. M., Harper, M., Stene, J. (2014). Theory & Validation Droplet Size. DNV. London, 1-13.

27. Witlox, H. W. M., Holt, A. (2017). Unified Dispersion Model–Technical Reference Manual. Consequence Modeling Documentation, DNV. London, 1-8.

28. Green, D. W., Perry, R. H. (Editörler). (2019). *Perry's chemical engineers' handbook*. (8. Baskı). Kansas: McGraw-Hill.

29. Van den Bosch, C. J. H., Weterings, R. A. P. M. (Editörler). (2005). *Methods for the calculation of physical effects: Due to releases of hazardous materials (liquids and gases), 'Yellow Book'*. (2. Baskı). The Hague: Committee for the Prevention of Disasters.

30. Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., Swihart, M. T. (2018). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. (8. Baskı) New York: McGraw-Hill. 26-42.

31. The World Bank. (1988). Techniques for Assessing Industrial Hazards. Washington: The World Bank. 39-61.

32. Benintendi, R. (Editör). (2021). *Process safety calculations*. Cambridge: Elsevier, 191-301.

33. Bergman, T. L., Bergman, T. L., Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. (6. Baskı). John Wiley & Sons. 434-456.

34. Grosshans, H. (2012). 2012 MVK160 Heat and Mass Transport Evaporation of a droplet. Lund, 1-8.

35. Gavin, P. M. (1996). Program DROP: A computer program for prediction of evaporation from freely falling multicomponent drops. *SNL.* New Mexico, 9-15.

36. Atkins, P., Paula, D. J. (2006). *Physical chemistry*, (9. Baskı). New York: W.H. Freeman and Company, 164-167.

37. Center for Chemical Process Safety. (1996). *Guidelines for use of vapor cloud dispersion models*. (2. Baskı). New York: American Institute of Chemical Engineers, 39-49.

38. Bird, R. B. (2002). *Transport phenomena*. (2. Baskı). New York: John Wiley & Sons., 487.

39. Cameron, I. T., & Raman, R. (2005). *Process systems risk management*. (1. Baskı). San Diego: Elsevier, 208-212.

40. DiPippo, R. (2012). *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact*. (4. Baskı). Massachusetts: Elsevier, 194-207.

41. Yaws, C. L., (2009). *The Yaws Handbook Of Thermodynamic And Physical Properties of Chemical Compounds*. McGraw-Hill.

42. İnternet: National Institute of Standards and Technology, URL: https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/ Son Erişim Tarihi: 01/04/2023.

EKLER

EK-1. Geliştirilen metodolojiye göre hesaplama örneği

Senaryo 2 için;

(P_1 = 800000 Pa, P_2=Pa=101325 Pa, T_1 = 70 °C, T_a= 35 °C, A =2,5×10^{-6} mm^2)

Toplam sıvı salım miktarı

Kabuller

C_d 0,75

Eş.4.4 kullanılarak toplam salım miktarı hesaplanacaktır. Bunun için gerekli olan sıvının yoğunluğu Perry's kitabının Tablo 2-32' de verilen sabitler kullanılarak aşağıdaki Eş.1.1 denklem ile elde edilir [28].

$$\rho = C1/C2^{[1 + (1-T/C3)^{C4}]} \quad (1.1)$$

8 bar, 70 °C için ρ = 567,15 kg/m^3 hesaplanmıştır ve ana denkliğe yerleştirilerek $\dot{m}$ 0,052 kg/s ve Eş.4.13 kullanılarak sıvının çıkış hızı 37,227 m/s olarak hesaplanmıştır.

$$\dot{m} = C_d\, A \sqrt{2(P_1 - P_2)\rho} = 0{,}75\times 2{,}5\times10^{-6} \sqrt{2(80000 - 101325) \times 567{,}15} \quad (1.2)$$

Flaş buharlaşma miktarı

Eş.4.19 kullanılarak flaş buharlaşma fraksiyonu elde edilir. Bu denklik atmosfere çıkış noktası ile atmosfer şartlarındaki entropi değeri NIST veri tabanından çekilmiştir [42]. Gizli ısı ise Perry's kitabının Tablo 2-150' de verilen sabitler kullanılarak hesaplanmıştır [28].

$$\emptyset_b = \frac{T_{KN}\times(S_{s2'} - S_{KN})}{\lambda} = \frac{301\times(0{,}3112-0)}{337{,}899} = 0{,}276 \quad (1.3)$$

$$\dot{m_{flaş}} = \dot{m} \times \emptyset_b = 0{,}052 \times 0{,}276 = 0{,}014\ kg/s \quad (1.4)$$

EK-1. (devam) Geliştirilen metodolojiye göre hesaplama örneği

Damlacık Oluşumu

Flaş buharlaşma sonrasında sıvı ve gazın atmosferik şartlardaki yoğunlukları kullanılarak flaş buharlaşma bölgesindeki yoğunluk Eş.4.22 kullanılarak bulundu. Bu değer ile flaş buharlaşma bölgesindeki sıvının hızı hesaplanarak (Eş.4.27) flaş buharlaştırmanın oluşturduğu jetin yarıçapı belirlendi. Bu değer Van den Bosch (Eş.4.30-31) korelasyonunda kullanılarak d_d belirlenmiştir.

Korelasyonda $We_f < Re_f^{-0,45} \times 10^6$ ve $T_2 < 1{,}11 \times T_{KN}$ şartı sağlanamadığı için d_d belirlenmesinde $C_{ds}\frac{\sigma_s}{\rho_a u_3^2}$ eşitliği kullanılmıştır. Bu denklikte kullanılan yüzey gerilimi ve Reynold sayısı için kullanılacak olan viskozite değeri aşağıdaki eşitlikten Yaws el kitabındaki değerler kullanılarak ve dinamik viskoziteden kinematik viskoziteye geçişi sağlanarak elde edilmiş, havanın yoğunluğu ise 1.7 ile belirlenmiştir [41].

$$\sigma_s = a \times (1 - \mathrm{T/Tc})^n \quad (1.5)$$

1 atm, 35 °C için σ_s= 0,013 N/s olarak hesaplanmıştır.

$$log_{10}^{\mu} = A + B/T + C \times T + D \times T^2 \quad (1.6)$$

1 atm, 35 °C için ϑ_s= 8,09*10^{-7} m^2/s olarak bulunmuştur.

$$\rho_a = \frac{M \times Pa}{R \times Ta} \quad (1.7)$$

1 atm, 35 °C için ρ_a= 1,146 kg/m^3 olarak bulunmuştur.

C_{ds} boyutsuz sayısı literatürde önerildiği gibi 15 alınarak damlacığın çapı 3.54574×10^{-5} mm, damlacığın hızı ise 0,021 m/s olarak hesaplanmıştır.

EK-1. (devam) Geliştirilen metodolojiye göre hesaplama örneği

Damlacık Buharlaşması

T_s normal şartlar altındaki kaynama noktası (28 °C), T_∞ ise havanın sıcaklığı (35 °C) olarak kabul edilip aritmetrik ortalama olan T_f sıcaklığındaki yoğunluk Eş.1.1, viskozite Eş.1.6 eşitliklerinden hesaplanırken, C_{pf} için Perry's kitabından Tablo 2-153' den alınan veriler ile

Eş.1.8 eşitliği çözülmüş, k_{af} için Yaws el kitabından alınan veriler Eş.1.9 eşitliğinde kullanılarak belirlenmiştir [41].

$$Cp = C_1 + C_2T + C_3T^2 + C_4T^4 \quad (1.8)$$

$$k_{af} = A + BT + CT^2 \quad (1.9)$$

T_f = 304,5 K için; ρ_f =609,696 kg/m^3, μ_f = 4,977×10^{-4} m^2/s, C_{pf}= 2332,935 J/(kg.K), k_{af} = 1,51×10^{-2} W/mK olarak hesaplanmış ve $m_{damlacıktan\ buharlaşma}$ 2,958×10^{-5} kg/s olarak elde edilmiştir.

Havuzdan Buharlaşma

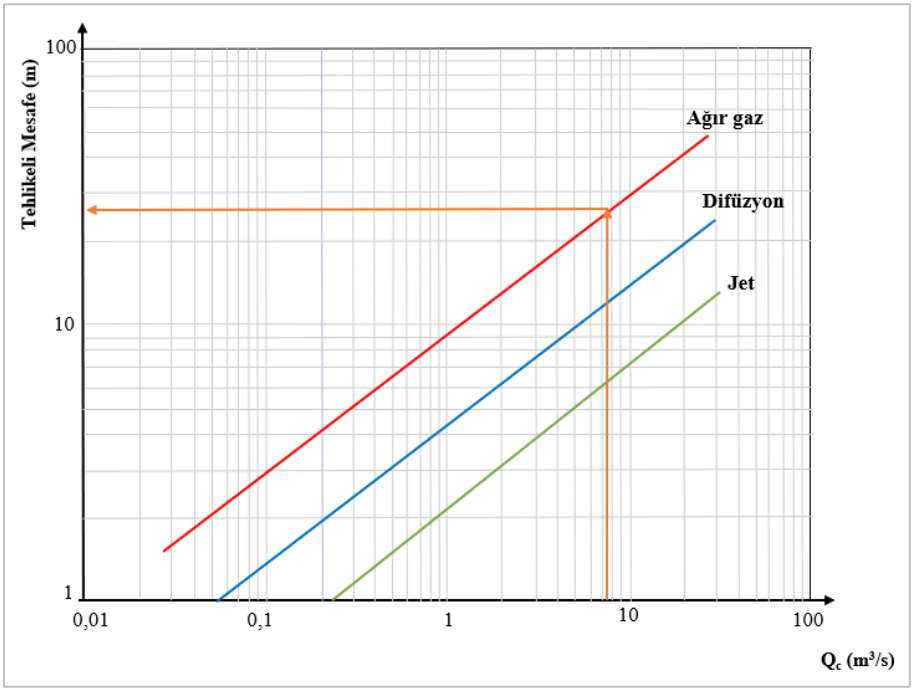
15 dakikanın sonunda havuzdan toplam buharlaşma için Eş.4.53 kullanılmıştır. Salımın tamamlanıp havuz oluşturan sıvının 1 cm yüksekliğinde havuz oluşturduğu hesaplanmış ve havuzun yüzey alanının 5.48 m^2 olduğu belirlenmiştir. 35 °C için izopentanın buhar basıncı Perry's kitabının Tablo 2-8' inde yer alan verilerle aşağıdaki denklemden belirlenmiştir.

$$\ln P = C_1 + C_2T + C_3 \ln T + C_4T^{C_5} \quad (1.10)$$

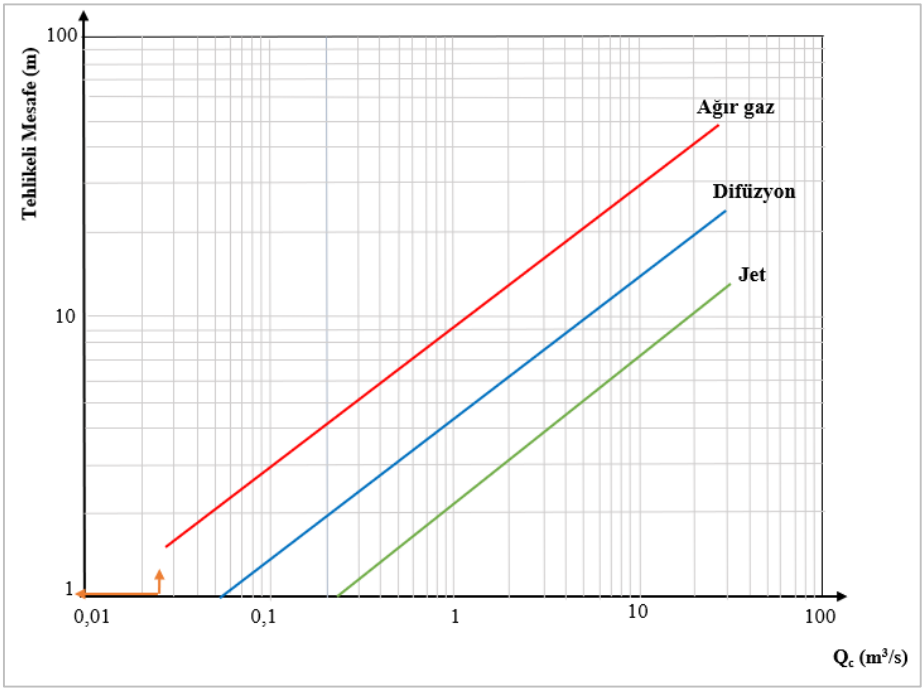
$$Q_{buharlaşma} = 0{,}004786 \times 1^{0{,}78} \times (5{,}48)^{-0{,}11} \times 0{,}8^{-0{,}67} \times 56025{,}238 \times \frac{72{,}15}{8314 \times 308} \quad (1.11)$$

Bu değerin alan ile çarpım ifadesi sonucu havuzdan toplam buharlaşma miktarı 0,040 kg/s olarak belirlenmiştir.

EK-2. Hesaplama Sonuçları Görselleri

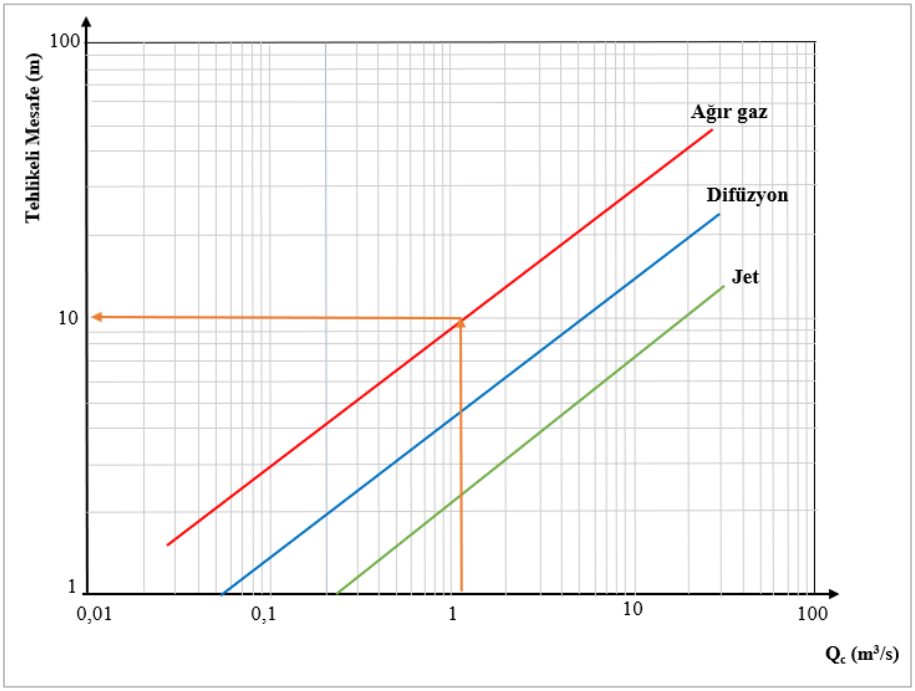


Şekil 2.1. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 1- havuzdan %100 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

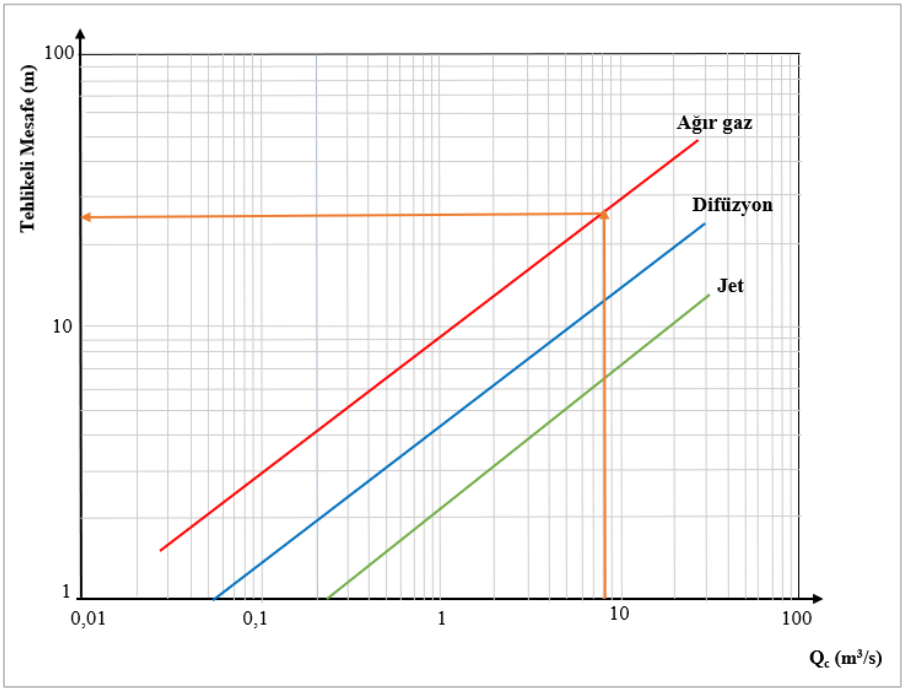


Şekil 2.2. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 1- delikten %2 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

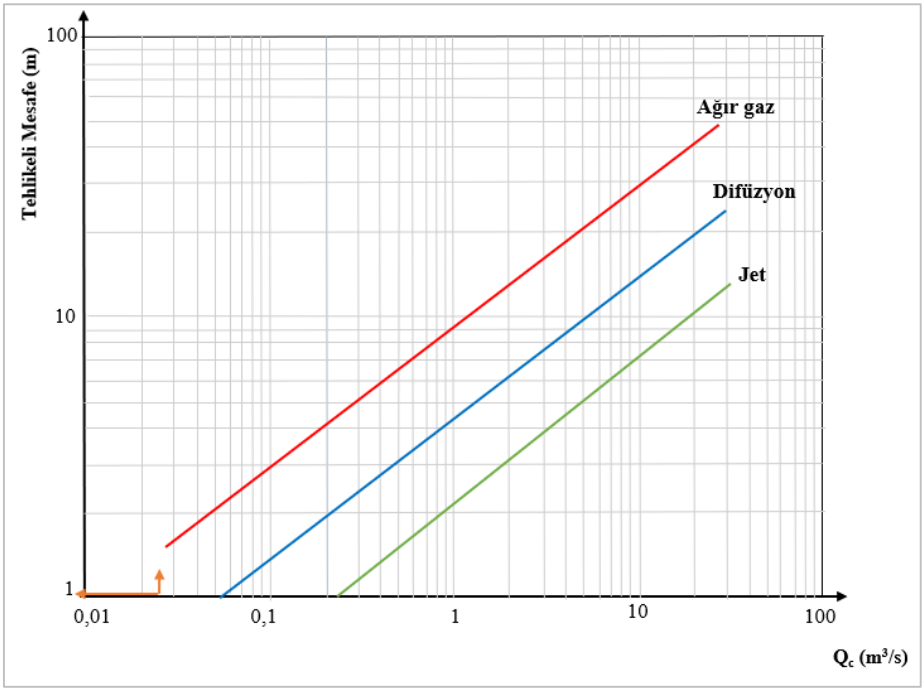


Şekil 2.3. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 1- delikten %100 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

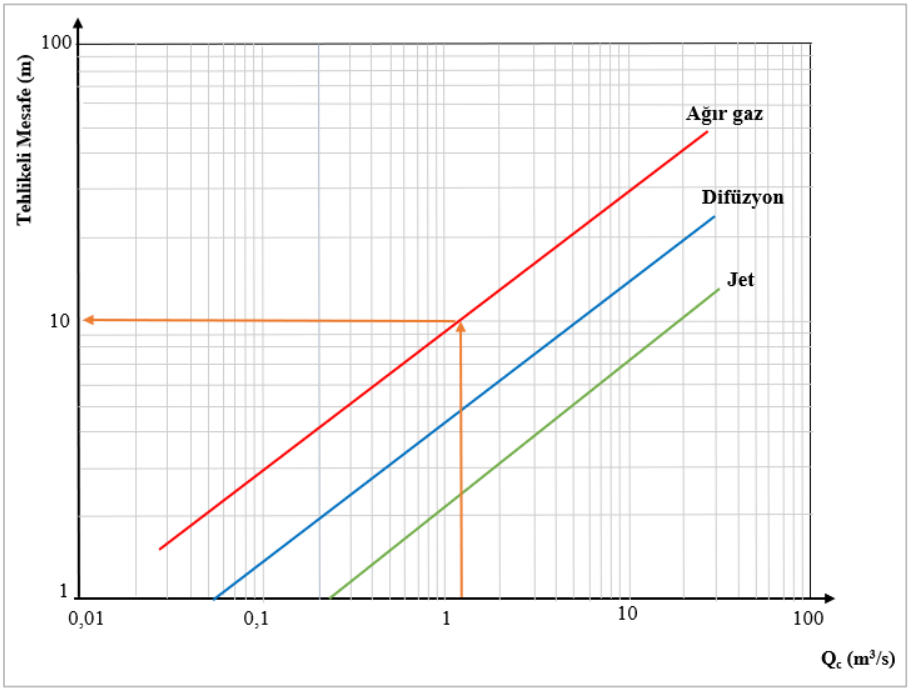


Şekil 2.4. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 2- havuzdan %100 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

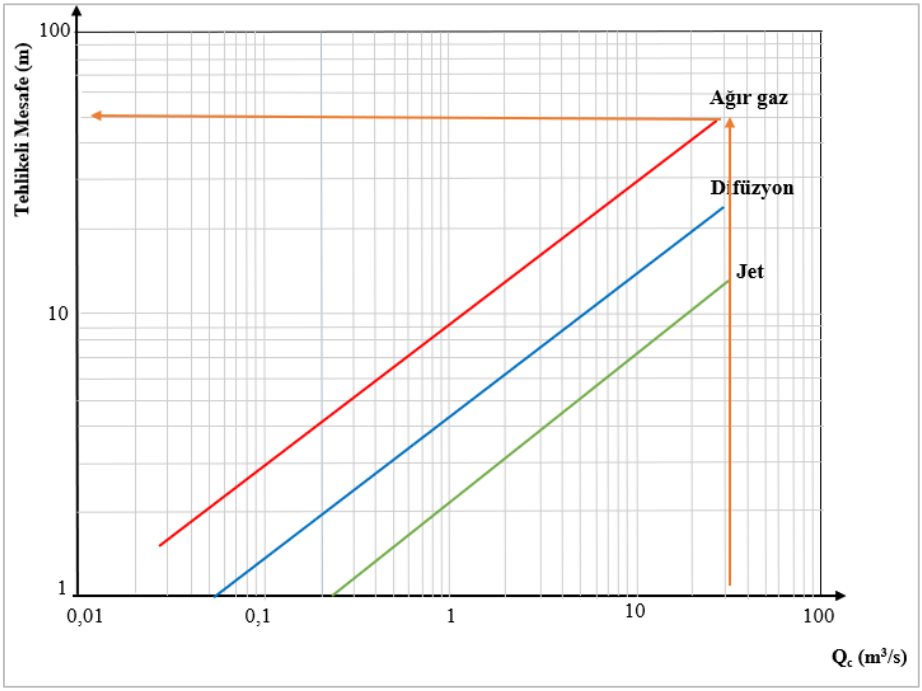


Şekil 2.5. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 2- delikten %2 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

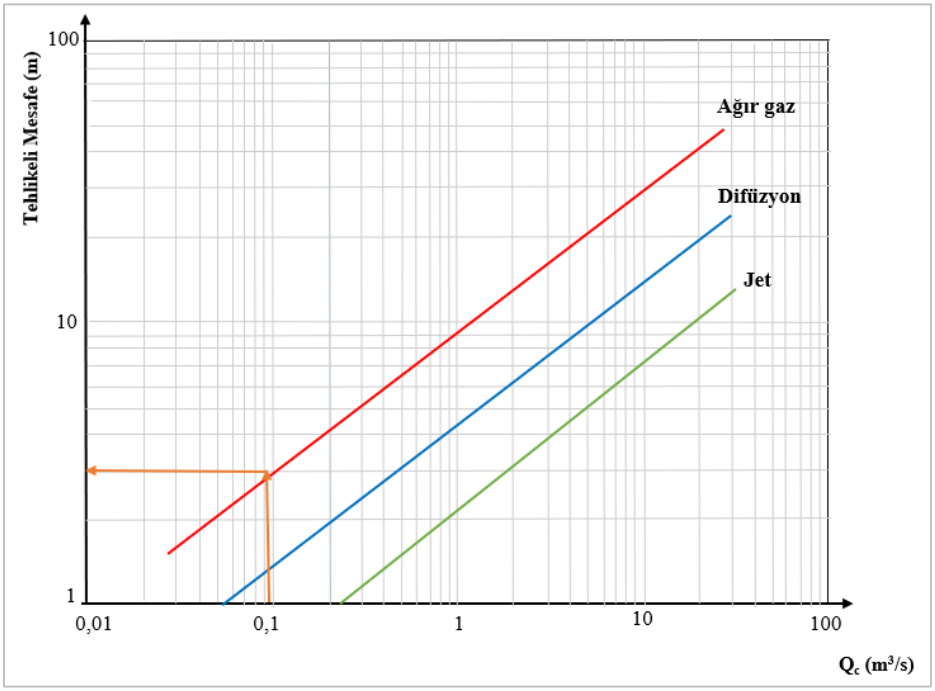


Şekil 2.6. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 2- delikten %100 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

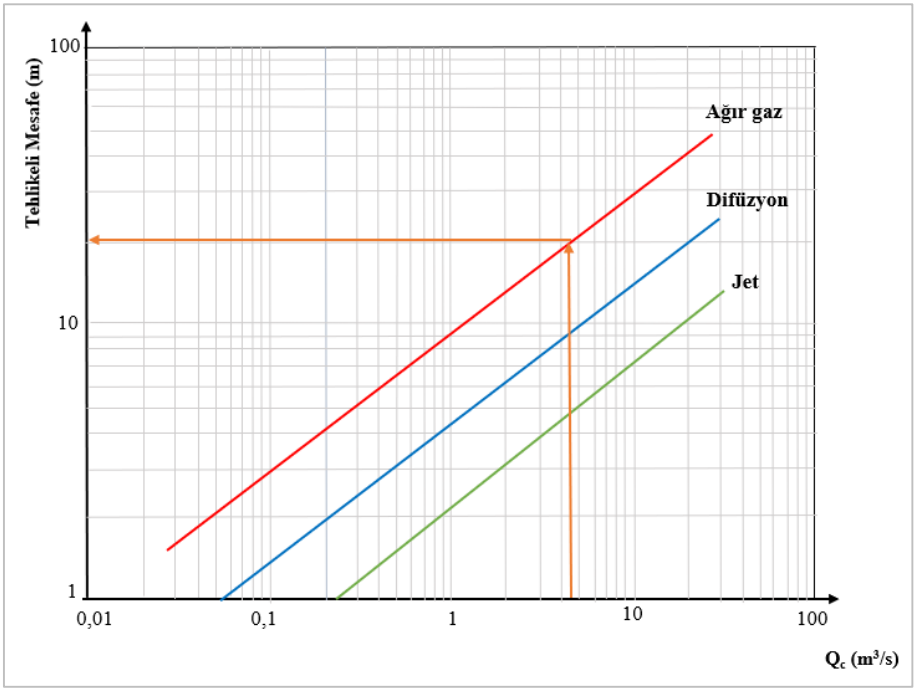


Şekil 2.7. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 3- havuzdan %100 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

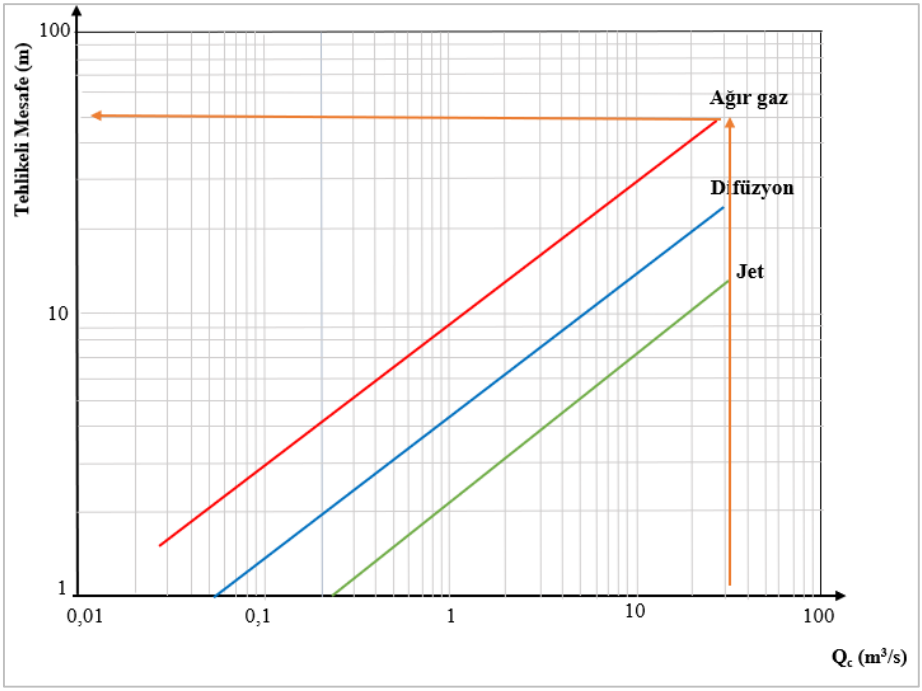


Şekil 2.8. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 3- delikten %2 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

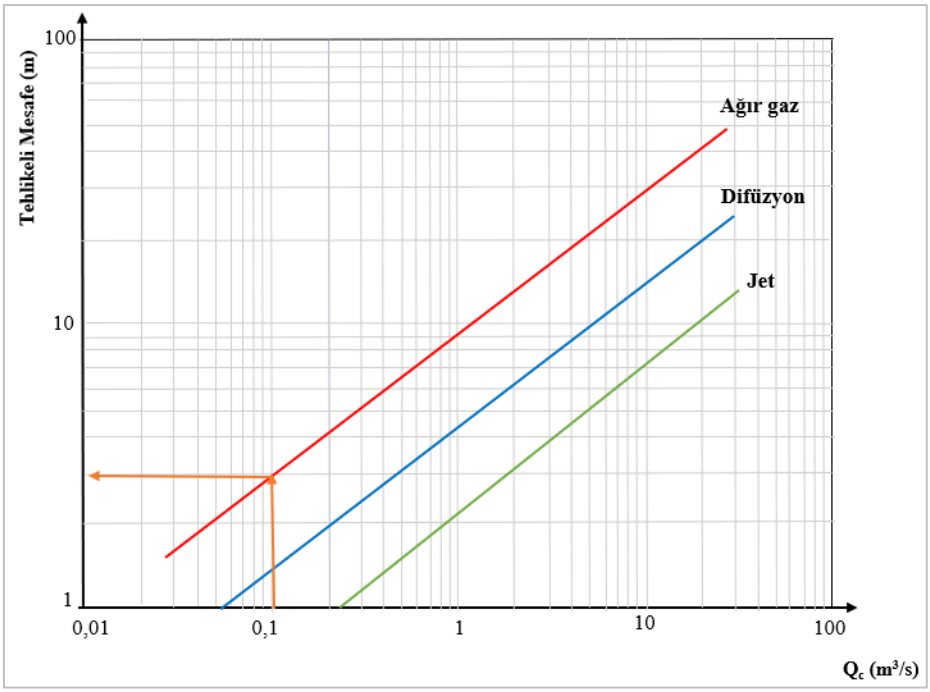


Şekil 2.9. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 3- delikten %100 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

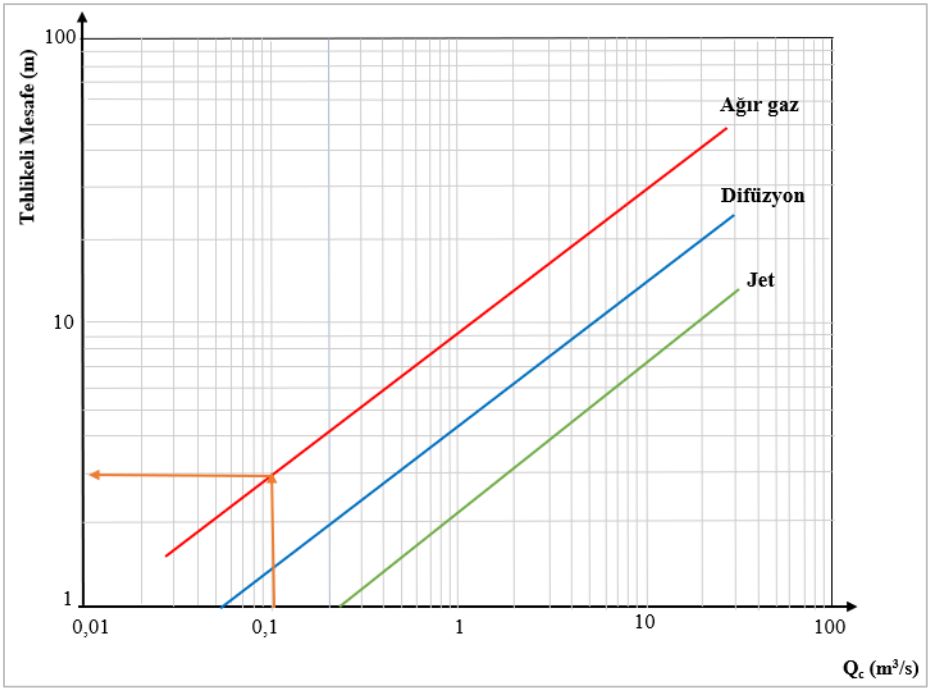


Şekil 2.10. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 4- havuzdan %100 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

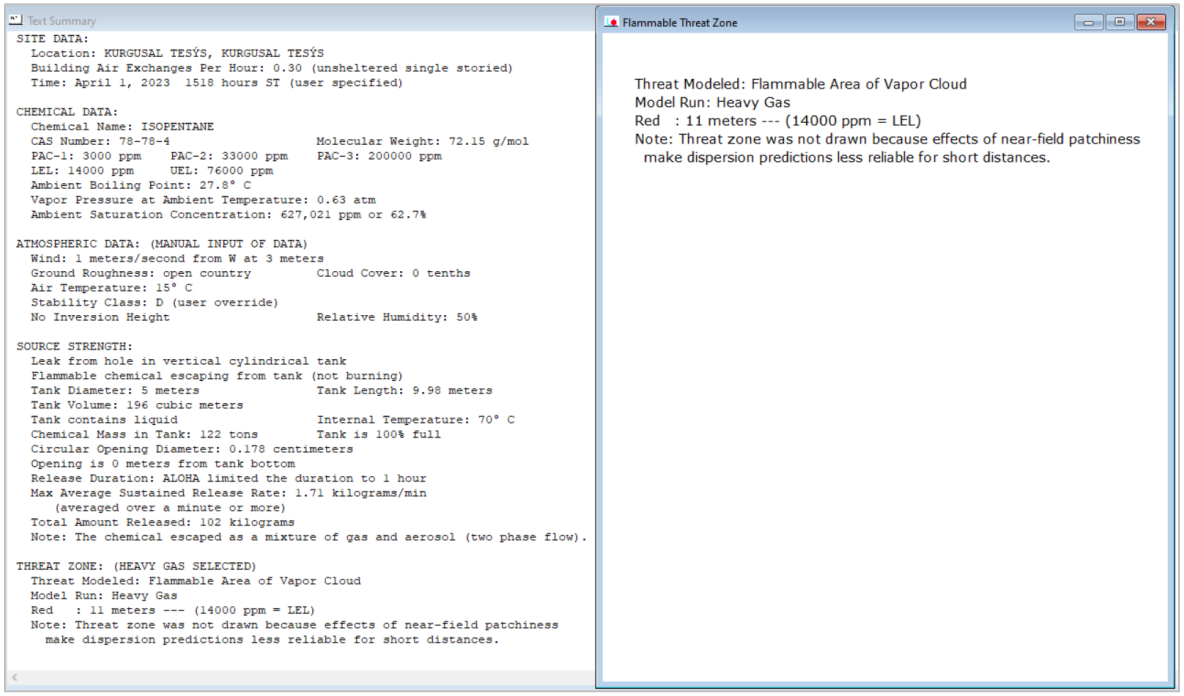


Şekil 2.11. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 4- delikten %2 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

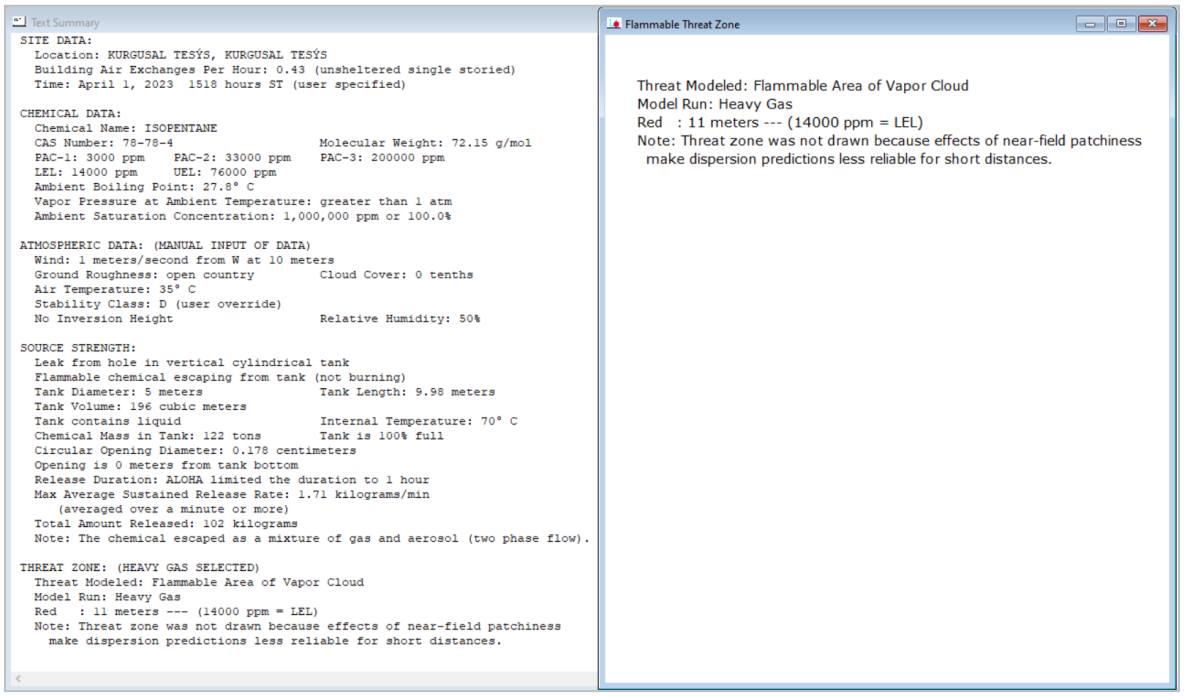


Şekil 2.12. 60079-10-1 standart yaklaşımı ile senaryo 4- delikten %100 buharlaşma tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

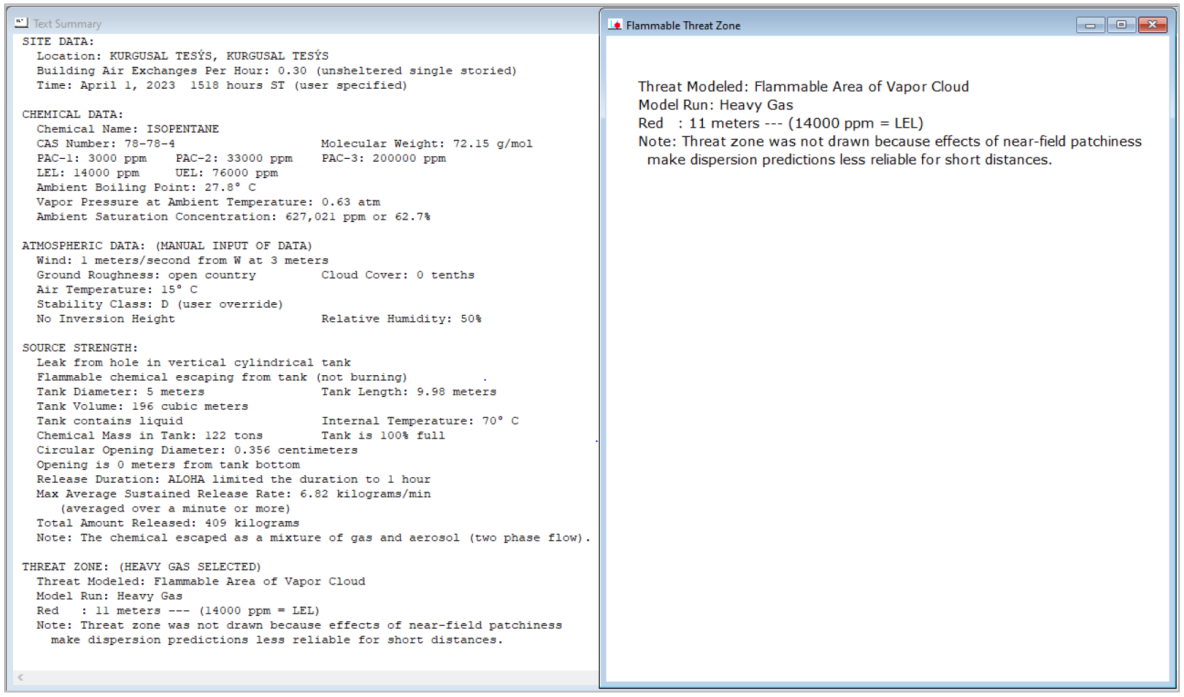


Şekil 2.13. ALOHA yazılımı senaryo 1 tehlikeli mesafe grafiği

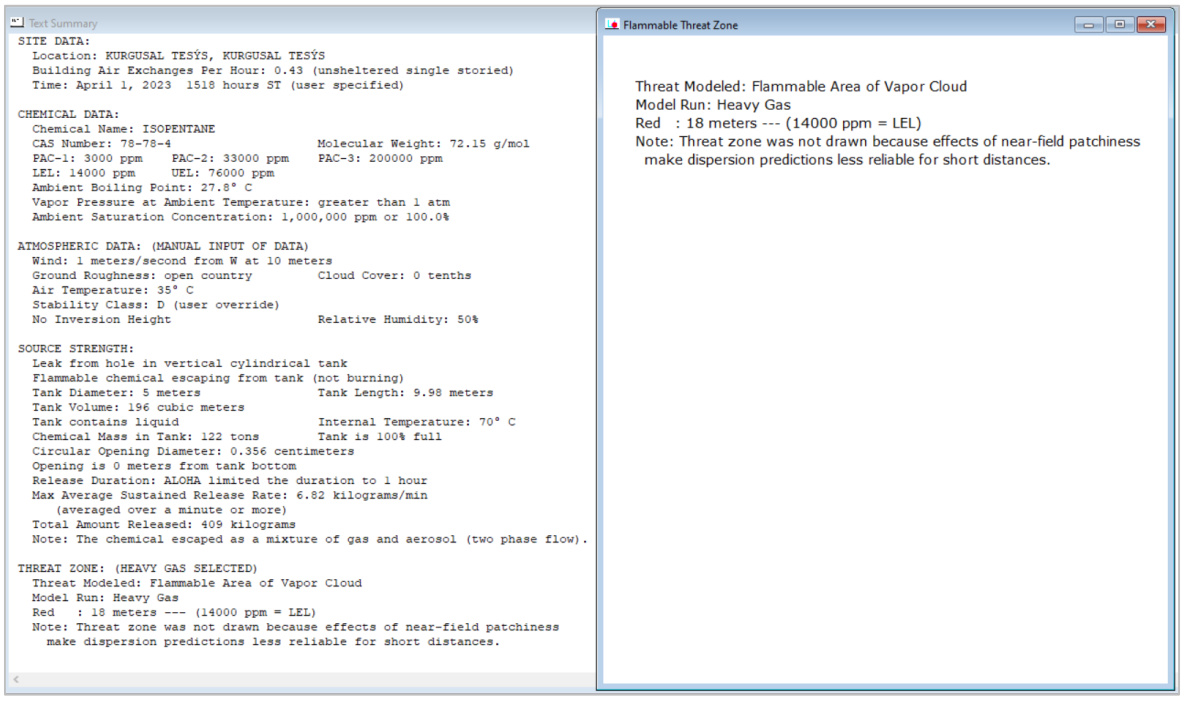


Şekil 2.14. ALOHA yazılımı senaryo 2 tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

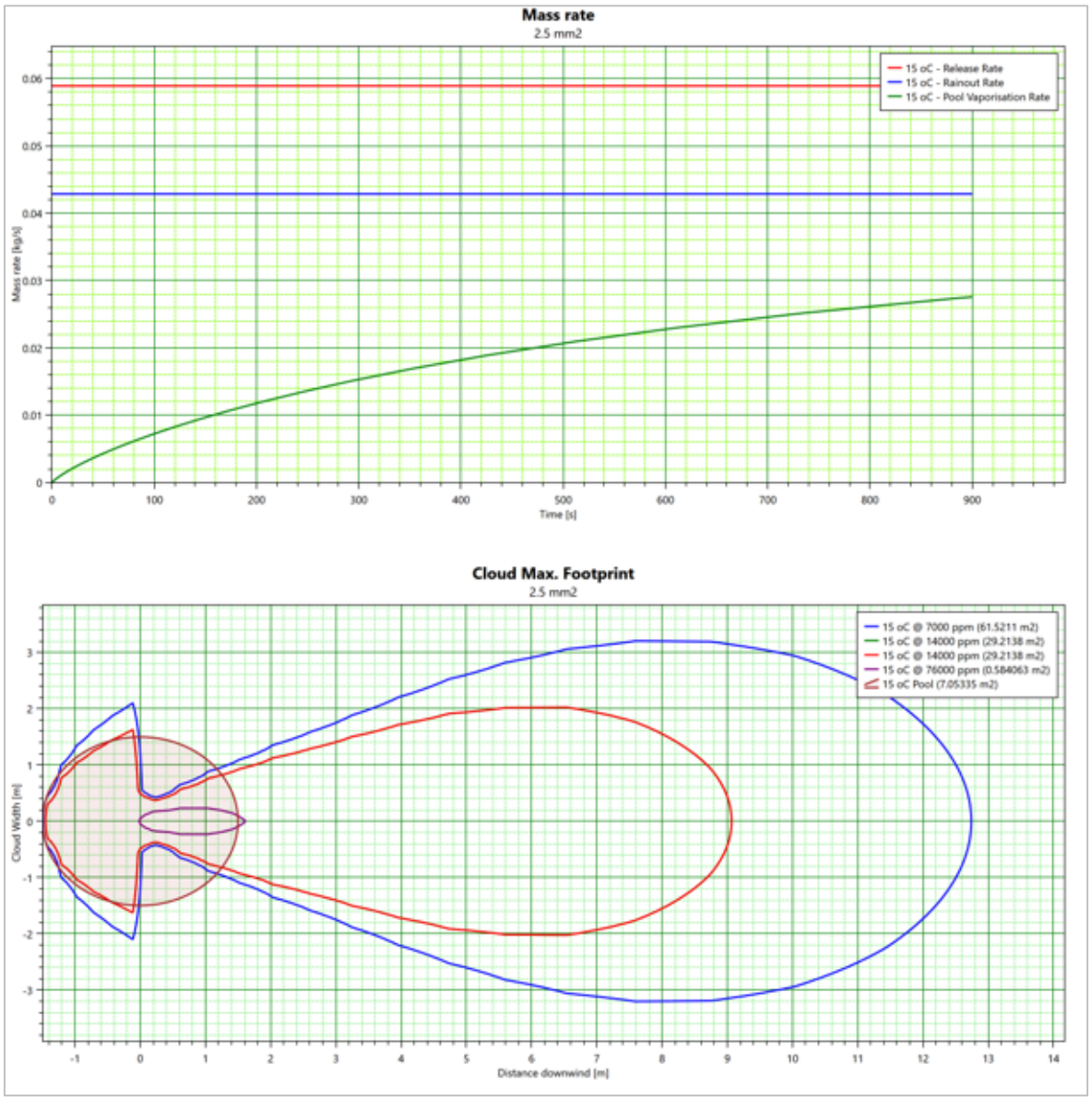


Şekil 2.15. ALOHA yazılımı senaryo 3 tehlikeli mesafe grafiği



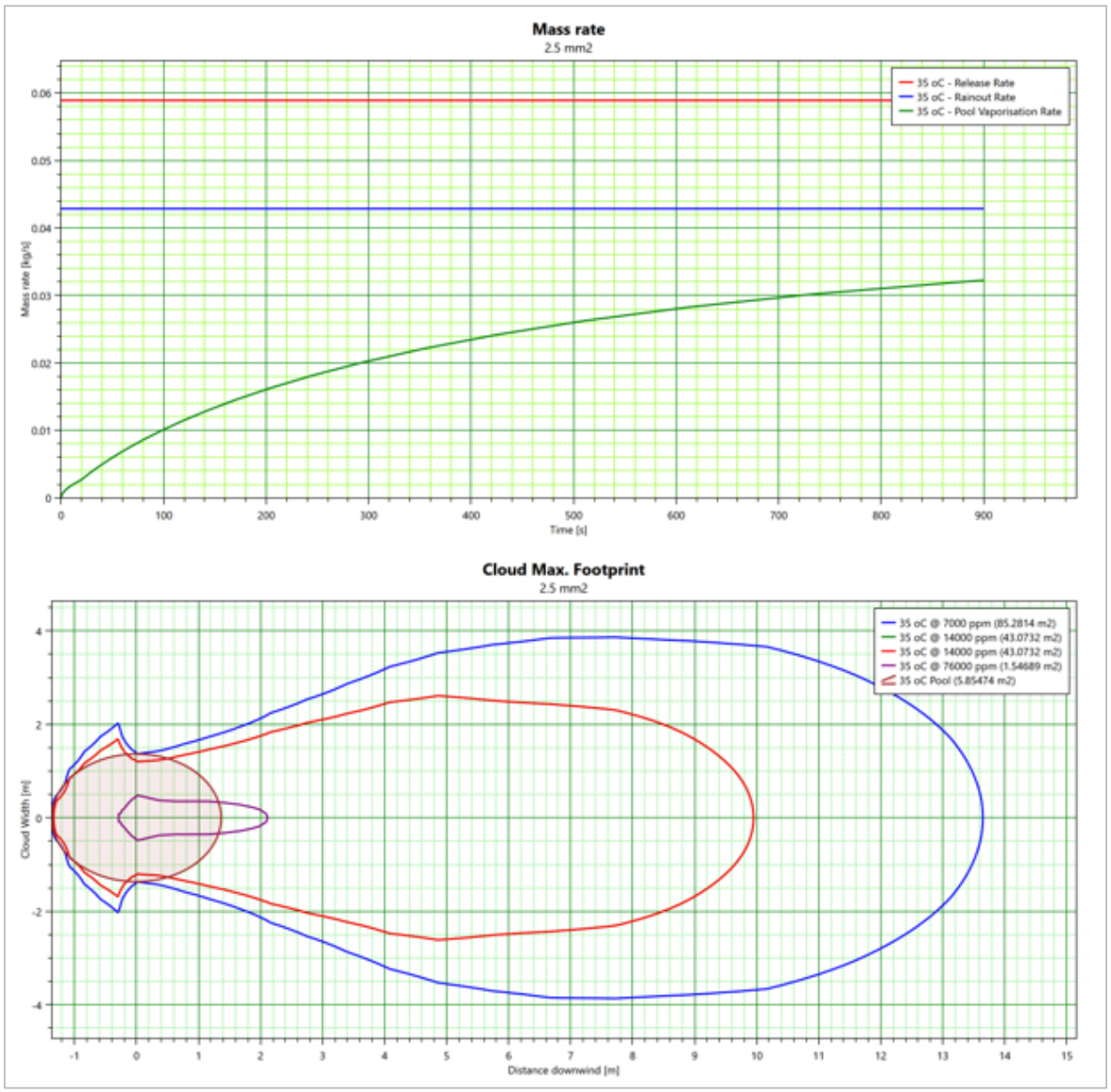
Şekil 2.16. ALOHA yazılımı senaryo 4 tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri



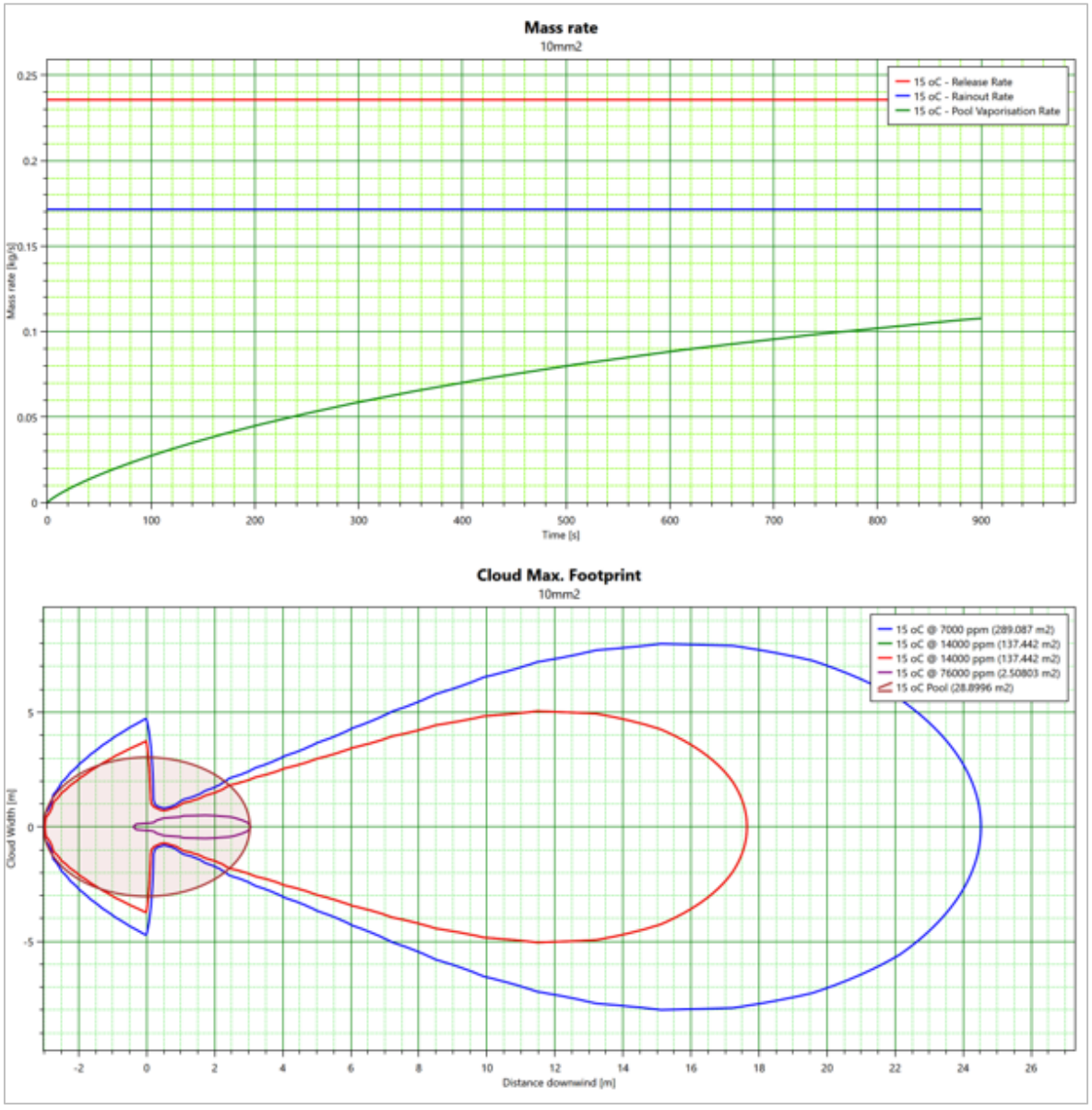
Şekil 2.17. PHAST yazılımı senaryo 1 tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri



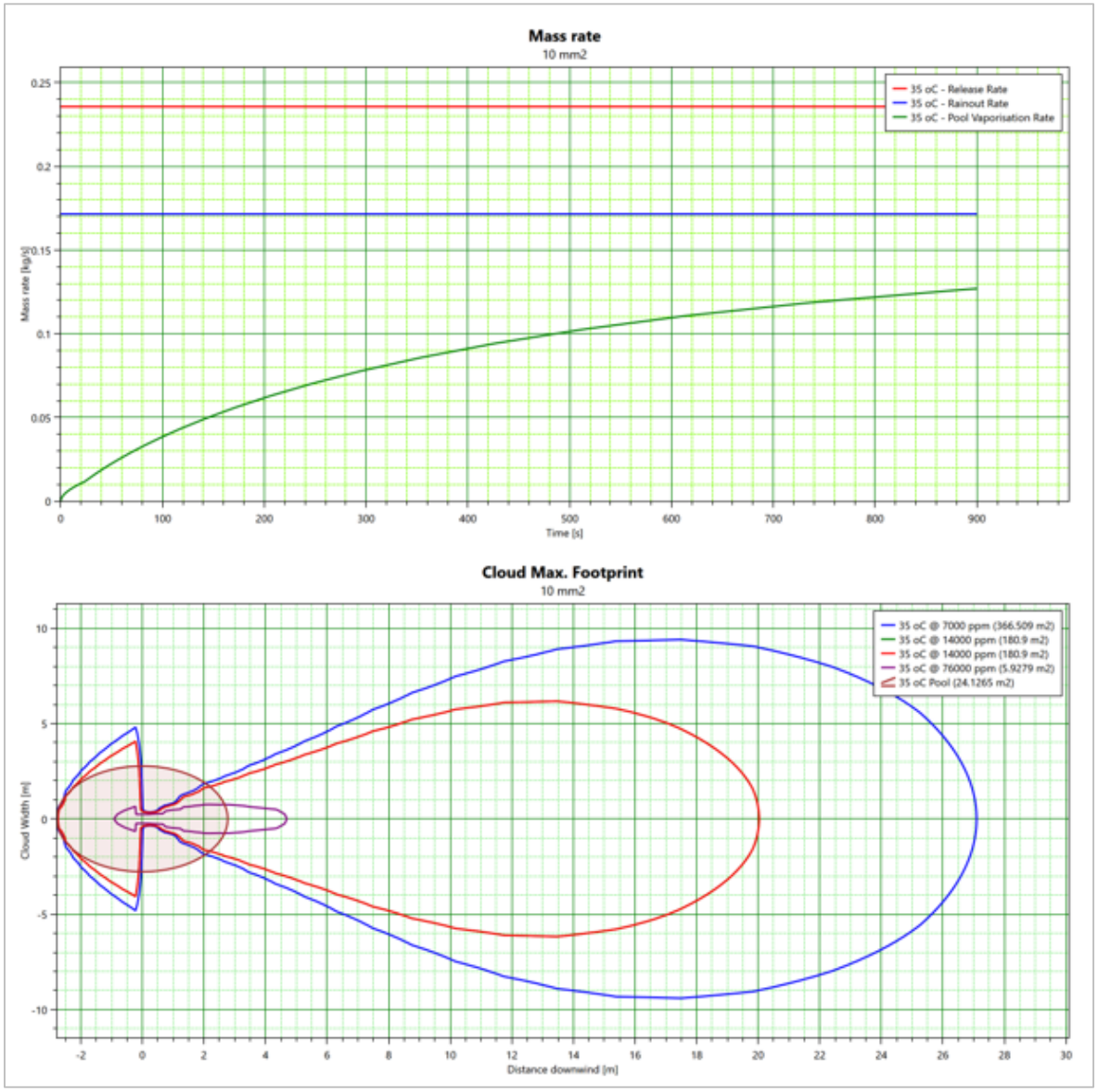
Şekil 2.18. PHAST yazılımı senaryo 2 tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri



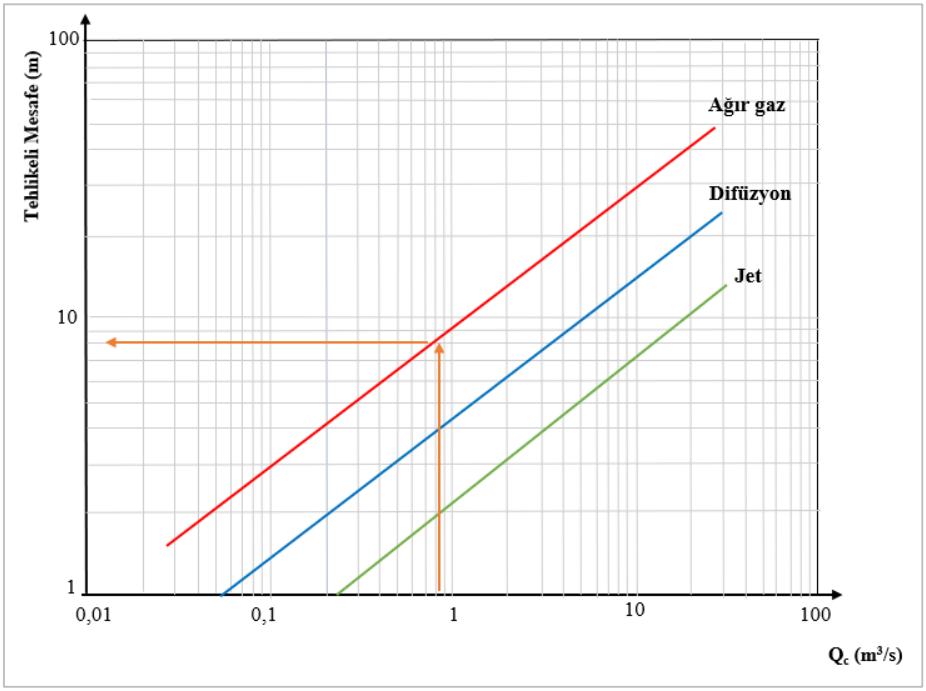
Şekil 2.19. PHAST yazılımı senaryo 3 tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

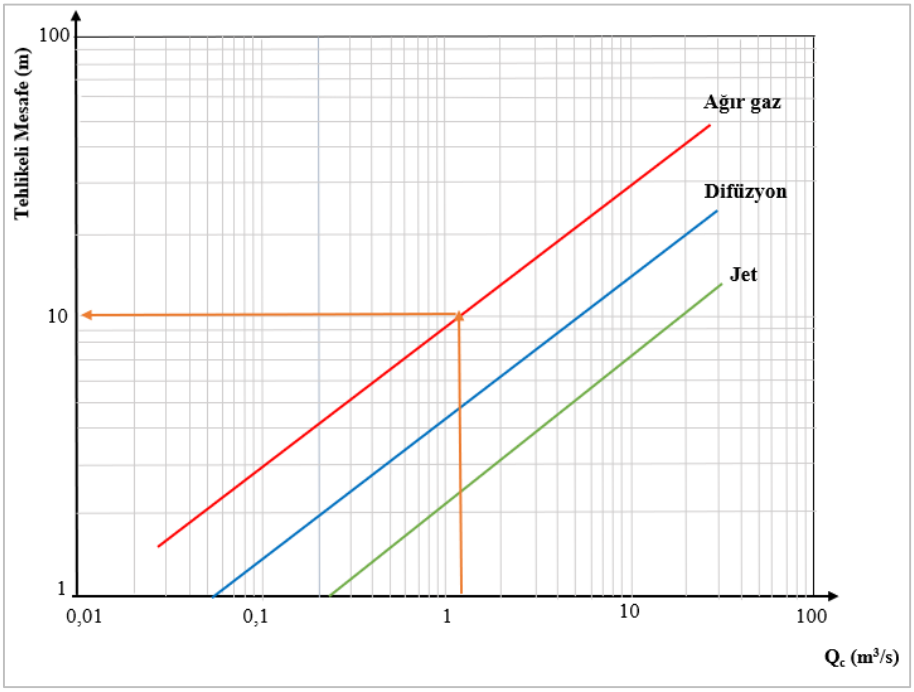


Şekil 2.20. PHAST yazılımı senaryo 4 tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri

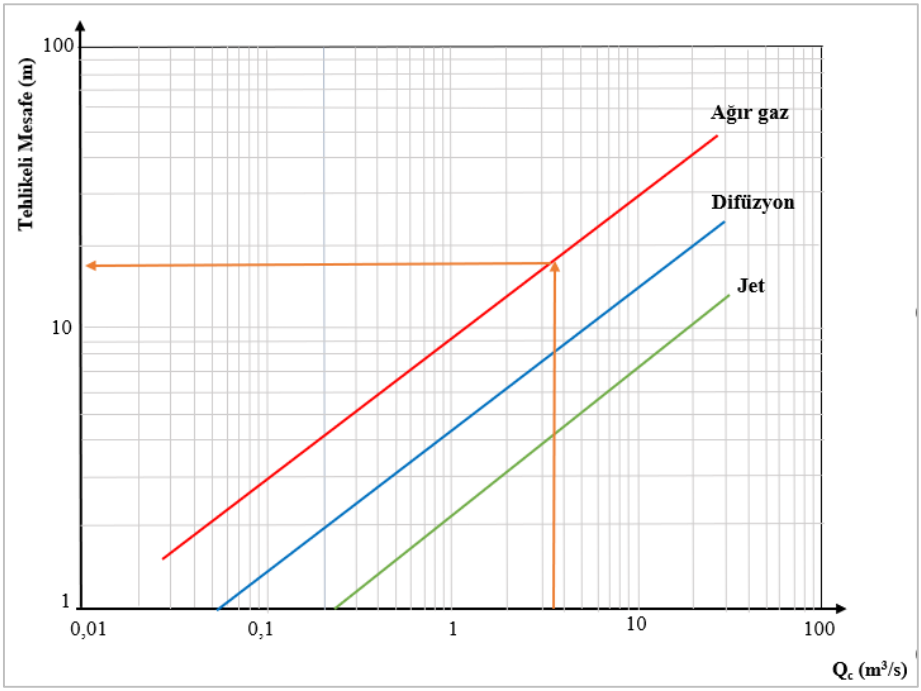


Şekil 2.21. Geliştirilen model senaryo 1 tehlikeli mesafe grafiği

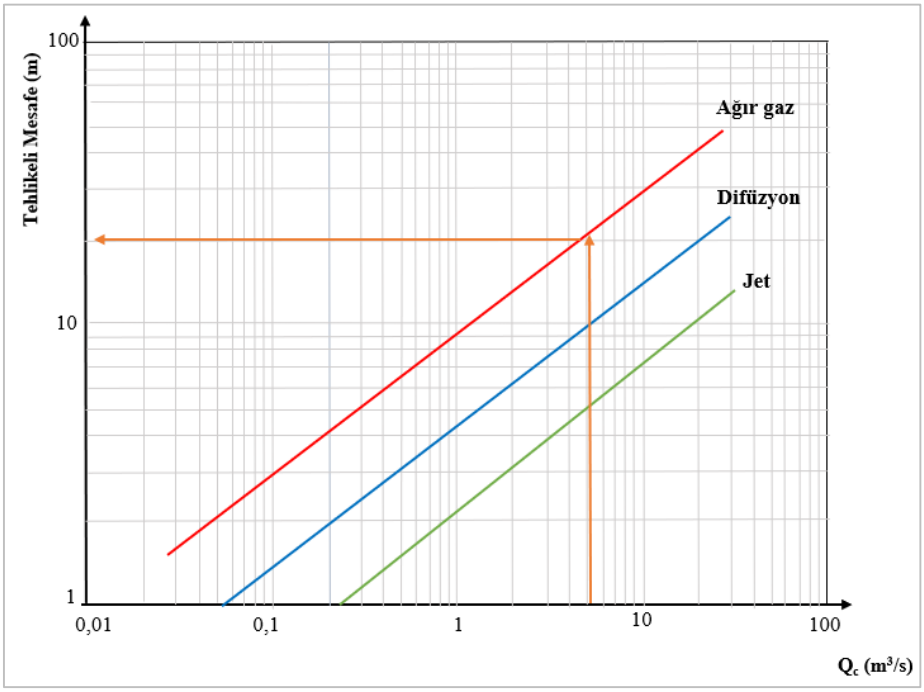


Şekil 2.22. Geliştirilen model senaryo 2 tehlikeli mesafe grafiği

EK-2. (devam) Hesaplama Sonuçları Görselleri



Şekil 2.23. Geliştirilen model senaryo 3 tehlikeli mesafe grafiği



Şekil 2.24. Geliştirilen model senaryo 4 tehlikeli mesafe grafiği



Gazili olmak ayrıcalıktır