



## Risk analysis in a chemical storage facility: Effect of independent protection layers

Oğuzcan Taşdemir<sup>1</sup>, Saliha Çetinyokuş<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Environmental and Technical Research of Accidents, Gazi University, 06560, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

### Highlights:

- Process safety analysis
- Process safety risk assessment
- Independent protection layers and effectiveness

### Keywords:

- Risk analysis
- Event tree analysis
- Layers of protection analysis
- Consequence analysis
- 1,3-Butadiene

### Article Info:

Research Article

Received: 18.05.2022

Accepted: 16.03.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1118503

### Correspondence:

Author: Saliha Çetinyokuş

e-mail:

salihakilicarslan@gazi.edu.tr

phone: +90 312 582 3502

### Graphical/Tabular Abstract

Within the scope of the process safety management system, process hazard analysis studies are carried out in order to protect human, environment and facility investments in facilities where hazardous chemicals are handled or stored. The safeguards and independent protection layers (IPL) evaluated in the process hazard analysis studies are expected to reduce the probability and/or severity of accident scenarios (Table A).

Types of impact and level of concern	Impact Distances		
	Before Hazard Analysis	After Hazard Analysis	
	Meter	Meter	
Overpressure	Fatal (0.7 bar)	39.87	21.94
	Major Exposure (0.2 bar)	87.12	47.81
	Minor Exposure (0.07 bar)	199.34	109.94
Thermal Radiation	Fatal (2 kW/m <sup>2</sup> )	27	27
	Major Exposure (5 kW/m <sup>2</sup> )	41	41
	Minor Exposure (10 kW/m <sup>2</sup> )	65	65
Toxic Exposure	Fatal (22000 ppm)	66	66
	Major Exposure (5300 ppm)	159	159
	Minor Exposure (670 ppm)	546	546

Table A. Potential impact distances for specific scenario

### Purpose:

This study was aimed to evaluate the effect of the presence of protection layers on the frequency and severity of undesired events in a sample facility where 1,3-Butadiene chemical was stored.

### Theory and Methods:

Event tree analysis (ETA) was performed for a specified initiating event (critical event). In the event tree analysis, frequency values were determined by using the ignition probability calculation module for potential flash fire, jet fire, explosion and toxic release accident scenarios. In order to determine the severity of accident scenarios, overpressure, thermal radiation and toxic exposure values were calculated within the scope of impact analysis. Correlations and software were used in the impact analysis. It was observed as a result of calculations that the frequencies of thermal radiation, explosion and toxic release scenarios decreased due to the direct effect of the barrier and independent protection layers on the event frequency.

### Results:

Since the detection time efficiency of the protection layers in the evaluated process was low and the amount of chemicals released into the atmosphere did not change, there was no change in the impact distances of the accident scenarios, except for the explosion effects.

### Conclusion:

It has been determined that the effects of protection layers and safety instrumented functions in the processes should not only be evaluated on the frequency of the undesired event, but also the effects of accident scenarios.



## Kimyasal depolama tesisinde risk analizi: Bağımsız koruma katmanlarının etkisi

Oğuzcan Taşdemir<sup>1</sup>, Saliha Çetinyokuş<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Ana Bilim Dalı, 06560, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Proses tehlike analizi
- Proses güvenliği risk değerlendirmesi
- Bağımsız koruma katmanları ve etkinliği

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 18.05.2022

Kabul: 16.03.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1118503

### Anahtar Kelimeler:

Risk analizi  
olay ağacı analizi  
koruma katmanları analizi  
sonuç analizi  
1,3- bütadien

### ÖZ

Proses güvenliği yönetim sistemi kapsamında tehlikeli kimyasalların elleçlendiği veya depolandığı tesislerde insan, çevre ve tesis yatırımlarının korunması amacı ile proses tehlike analizi çalışmaları gerçekleştirilir. Proses tehlike analizi çalışmalarında değerlendirilen bariyerler ve bağımsız koruma katmanlarının kaza senaryolarının meydana gelme olasılığı ve/veya şiddetini azaltması beklenir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, 1,3-bütadien kimyasalının depolandığı örnek bir tesiste koruma katmanlarının varlığının istenmeyen olay frekansı ve şiddetine olan etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle, belirlenmiş bir başlatıcı olay (Kritik Olay) için olay ağacı analizi (ETA) yapılmıştır. Olay ağacı analizinde, potansiyel flaş (parlama) yangını, jet yangını, patlama ve toksik yayılım kaza senaryoları için tutuşma olasılığı hesaplama modülü kullanılarak frekans değerleri belirlenmiştir. Kaza senaryolarının şiddetinin tespiti için etki analizi kapsamında aşırı basınç, termal radyasyon ve toksik maruziyet değerleri hesaplanmıştır. Etki analizlerinde korelasyonlar ve yazılım kullanılmıştır. Bariyer ve bağımsız koruma katmanlarının olay frekansına doğrudan etkisi sebebi ile termal radyasyona, aşırı basınç ve toksik maruziyete ait frekansların düştüğü, hesaplamalar sonucunda gözlemlenmiştir. Değerlendirilen prosesdeki koruma katmanlarına ait tespit süresi etkinliğinin düşük olması ve atmosfere salınan kimyasal miktarının değişmemesi sebepleri ile kaza senaryolarına ait etki mesafelerinde patlama etkileri dışında bir değişim olmamıştır. Sonuç olarak, proseslerdeki koruma katmanları ve güvenlik enstrümanlı fonksiyonların yalnızca istenmeyen olay frekansına olan etkisinin değil, kaza senaryolarına olan etkilerinin de değerlendirilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

## Risk analysis in a chemical storage facility: Effect of independent protection layers

### H I G H L I G H T S

- Process safety analysis
- Process safety risk assessment
- Independent protection layers and effectiveness

### Article Info

Research Article

Received: 18.05.2022

Accepted: 16.03.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1118503

### Keywords:

Risk analysis  
event tree analysis  
layers of protection analysis  
consequence analysis  
1,3-butadiene

### ABSTRACT

Within the scope of the process safety management system, process hazard analysis studies are carried out in order to protect human, environment and facility investments in facilities where hazardous chemicals are handled or stored. The safeguards and independent protection layers (IPL) evaluated in the process hazard analysis studies are expected to reduce the probability and/or severity of accident scenarios. Within the scope of the study, it was aimed to evaluate the effect of the presence of protection layers on the frequency and severity of undesired events in a sample facility where 1,3-Butadiene chemical was stored. First, event tree analysis (ETA) was performed for a specified initiating event (critical event). In the event tree analysis, frequency values were determined by using the ignition probability calculation module for potential flash fire, jet fire, explosion and toxic release accident scenarios. In order to determine the severity of accident scenarios, overpressure, thermal radiation and toxic exposure values were calculated within the scope of impact analysis. Correlations and software were used in the impact analysis. It was observed as a result of calculations that the frequencies of thermal radiation, explosion and toxic release decreased due to the direct effect of the barrier and independent protection layers on the event frequency. Since the detection time efficiency of the protection layers in the evaluated process was low and the amount of chemicals released into the atmosphere did not change, there was no change in the impact distances of the accident scenarios, except for the explosion effects. As a result, it has been determined that the effects of protection layers and safety instrumented functions in the processes should not only be evaluated on the frequency of the undesired event, but also the effects of accident scenarios.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : oguzcan.tasdemir2@gazi.edu.tr, \*salihakilicarslan@gazi.edu.tr /

Tel: +90 312 582 3502

## 1. Giriş (Introduction)

Endüstriyel kazaların şiddeti çeşitli faktörlere dayanır ve kimyasal envanter bu faktörlerin başında yer alır [1]. Artan ürün talebini karşılamak üzere hızla gelişen proses endüstrisi ile birlikte tesislerde elleçlenen ve depolanan kimyasal miktarları da artış göstermektedir. Çevre, sağlık ve güvenlik (EHS) programının uygulanmaya başlandığı 1978 yılından 2017 yılına kadar OECD ülkelerinde, yaklaşık 10 kat değer artışı gerçekleştiren kimya endüstrisinin 2060 yılına kadar %132 büyüyerek 21,748 milyar \$ değerine ulaşacağı tahmin edilmektedir [2]. Türkiye’de kimya sektörü üretim endeksinin 2009-2020 yılları arasında artış gösterdiği ve bu artışın özellikle kauçuk ve plastik ürünlerin imalatı sektörlerinde olduğu görülmektedir [3]. Bu sebeple kimyasal tesislerin büyüme ölçütüne bağlı olarak büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve potansiyel etkilerinin hafifletilmesi için yürütülen proses güvenliği çalışmalarının önemi giderek artmaktadır. Geçmiş yıllarda alevlenir kimyasalların depolandığı tesislerde, yangın veya patlama ile sonuçlanan büyük kazalar meydana gelmiştir. Depolama tesislerinde proses güvenliğinin sağlanması için çeşitli standartlar, kılavuzlar ve mesleki örgütler tarafından yayınlanmış el kitapları bulunmaktadır. Tauseef vd.[4] tarafından yürütülen çalışmada, yangın ve patlama ile sonuçlanmış kazalarda tanklar arasındaki ayırma mesafelerinin ne kadar olduğu, standartlara göre olması gereken mesafeler ve kaza sonrasında gerekli düzenlemelerin sağlanıp sağlanmadığının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda alevlenir sıvıları içeren depolama tesislerinde meydana gelmiş 28 adet kaza incelenmiştir. Çalışma sonucunda NFPA 30 standardı tarafından sağlanan mesafelerin yetersiz kaldığı belirlenmiş ve güvenli mesafeden 0,5-0,25 kat daha fazla mesafe önerilmiştir. 1960-2003 yılları arasında meydana gelmiş 242 adet tank kazasının incelendiği başka bir çalışmada, rafineri ve kimyasal tesislerde meydana gelen kaza sayısının 147 olduğu görülmüştür. Kazaların potansiyel sonuçları, yangın, patlama veya toksik yayılım meydana getiren kaza sayısının 219 olduğunu, yalnızca bütünlük kaybının meydana geldiği kaza sayısının ise 18 olduğunu göstermiştir. Tesislerde, iyi mühendislik uygulamaları ve proses güvenliği yönetim sistemi ile kazaların önlenebileceği belirtilmiştir [5]. Depolama tesislerinde proses güvenliğine yönelik farklı risk analizi ve değerlendirme metodolojilerinin kullanıldığı çalışmalar literatürde görülmektedir. Luo vd.[6] tarafından küresel gaz depolama tanklarına yönelik balık kılıcı diyagramı (Fishbone Diagram) ve risk matrisi kullanılarak kapsamlı bir risk değerlendirme metodu uygulanmıştır. Balık kılıcı diyagramı ile küresel gaz depolama tanklarında sızıntı meydana getirebilecek tüm senaryolar belirlenmiş, ardından üç farklı deneyimli çalışanların bu senaryolara ait risklerin büyüklüklerini tanımlaması sağlanmıştır. Deneyimli çalışanların kararlarına ait çıktılar analitik hiyerarşi prosesi (AHP) kullanılarak bulanık mantık (fuzzy logic) yaklaşımı için girdi oluşturmuştur. Sonuç olarak kapsamlı risk değerlendirme metodlarının depolama tanklarında risk seviyesinin belirlenmesinde kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Alevlenir kimyasalların depolandığı tesislerde potansiyel tehlikeler arasında gaz salınımı ve buhar bulutu patlaması bulunur. NFPA 58 ve GB 50160 standartlarında, depolama tankları arasında sağlanması gereken minimum mesafeler ile ilgili çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Wang vd.[7] tarafından yürütülen çalışma ile standartlarda yer alan verilerin CFD (Computational Fluid Dynamics) kullanılarak gaz dağılımı ve buhar bulutu patlaması modelleri oluşturulmuştur. Sayısal modelleme için FLACS (Flame Accelerator Simulator) kullanılmıştır. Depolama tanklarındaki ayırma mesafesinin, buhar bulutunun boyutu ve alevlenir kimyasal kompozisyonunu doğrudan etkilediği görülmüştür. Buhar bulutu patlamalarında ise ayırma mesafesi arttıkça yanma süresinin arttığı ve oluşabilecek aşırı basınç seviyesinin azaldığı değerlendirilmiştir. Toksik kimyasalların kontrolsüz salınımı kimyasal üreten tesislerdeki istenmeyen olayların başında gelir.

Cheraghi vd.[8] tarafından bir rafineride, potansiyel toksik kimyasal salınım senaryolarına ait tehlikeli mesafelerin belirlenebilmesi için DOW CEI (Chemical Exposure Index) kullanılmıştır. Bu kapsamda 381 adet salınım senaryosu belirlenmiş, proses parametreleri ve CEI denklemleri kullanılarak tehlikeli mesafeler hesaplanmıştır. Rafinerideki en kötü senaryoya göre tehlikeli mesafenin 10 km olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, CEI metodunun hızlı hesaplama sağlayabilmesi, detaylı proses bilgisine ihtiyaç duyulmaması gibi avantajlarının yanı sıra proses parametrelerini hassas şekilde ele almaması, kimyasal envanterin ve konsantrasyonun etkisinin değerlendirilmemesi olarak dezavantajları sıralanmıştır. Tesislerde bir ekipman veya boru hattında yangın ve patlama ile sonuçlanan olaylar, domino etkisine dönüşerek olay şiddetinin artması ile daha ciddi kazalara sebep olabilmektedir. Antonioni vd.[9] tarafından yapılan çalışmada, tehlikeli kimyasalların elleçlendiği ve depolandığı tesislerdeki risk değerlendirme çalışmalarında domino etkisi dikkate alınmıştır. Geniş bir alana yayılmış sanayi bölgesinde domino etkisine bağlı riskler kantitatif bir metod ile değerlendirilmiştir. Domino etkisi ile sonuçlanması beklenen olay olasılıklarının hesaplanması için ekipmanların hasar olasılığı modelleri kullanılmıştır. Sonuç olarak kantitatif risk analizlerinin (QRA) kompleks tesislerdeki domino etkisi ile meydana gelebilecek senaryolara ait etki alanlarının belirlenmesinde kullanılabilecek en önemli araçlardan birisi olduğu belirtilmiştir.

1,3-bütadien, kauçuk ve lateks türevi elastomerlerin üretiminde kullanılan oldukça önemli bir kimyasaldır. Atmosferik şartlar altında buhar fazında olan 1,3-bütadien, buhar basıncının altında tutularak sıvılaştırılmış gaz olarak taşınmakta ve depolanmaktadır. Polimerizasyon ve alevlenme tehlikelerine sahip olması sebebi ile tesislerde güvenli şekilde elleçlenmesi ve depolanması gerekmektedir. Sakizadeh [10] tarafından ABD’nin doğu bölgesinde 1,3-bütadien ihtiva eden ortamlarda kısa ve uzun süreli kanser riski değerlendirilmiştir. TBATS ve Prophet yöntemleri kullanılarak zamana bağlı 1,3-bütadien salınım değerleri araştırılmıştır. 1,3-bütadien’in orman yangınları, trafik emisyonları ve endüstriyel aktiviteler sonucunda atmosfere salınabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmaya göre bölgede yaşayan çocukların %42’sinin kabul edilebilir kimyasal emisyonu maruz kaldığı ve %6,84’ünün yüksek seviyede riskli konsantrasyona maruz kaldığı bildirilmiştir.

Bu çalışmada, hammadde olarak alevlenir ve toksik özelliklere sahip 1,3-bütadien kimyasalını depolayan örnek bir tesiste risk analizi amaçlanmıştır. Tesiste daha öncesinde örnek bir senaryo için HAZOP çalışması gerçekleştirilmiş ve risk seviyesi belirlenip potansiyel öneriler ortaya konulmuştur. Ardından LOPA çalışması gerçekleştirilmiş ve sağlanan bariyerlerin/bağımsız koruma katmanlarının etkinliği ölçümlenmiş ve sonuç değerlendirilmiştir. “ $1,27 \times 10^{-4}$ /yıl frekans değeri  $2,48 \times 10^{-7}$ /yıl frekans değerine düştü ancak HAZOP-LOPA yapılmasına rağmen bu frekans azalışı gerçekten anlamlı mı?” sorusunun cevabı bu makale çalışmasında aranmıştır. HAZOP ve LOPA analizleri ile güvenlik enstrümanlı sistem, gaz algılama ve temel proses kontrol sistemine ait iyileştirmeler yapıldığı ve bunların yatırım planına dahil edildiği belirlenmiştir. Yürütülen çalışmada, söz konusu HAZOP-LOPA çalışması sonuçları girdi olarak kullanılarak planlanan yatırımların, yangın, patlama ve toksik yayılım senaryolarının meydana gelme frekansı ve şiddetine olan etkilerinin belirlenmesi için etki analizi çalışması yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metod (Material and Method)

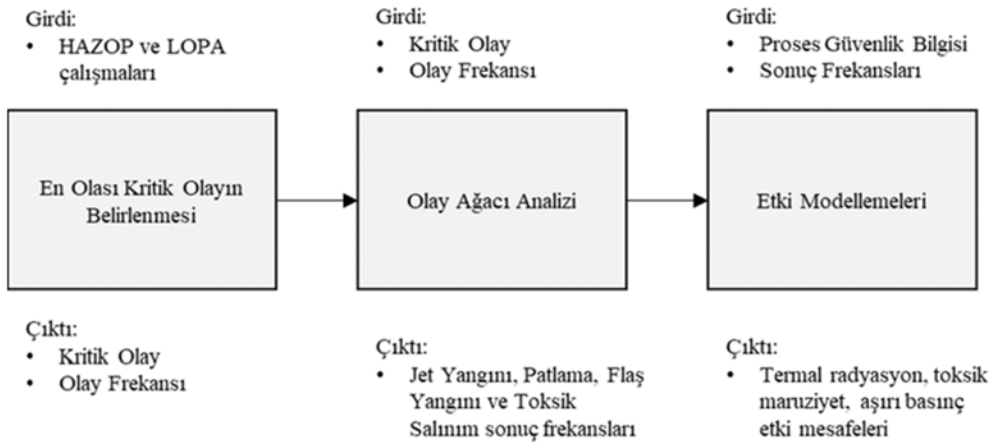
Örnek 1,3-bütadien depolama tesisinde, depolanan kimyasal yer altı boru hatları ile üretim alanına transfer edilmektedir. Kimyasal ve depolamada kullanılan ekipman verileri, ilgili P&ID ile meteorolojik

veriler temin edilmiştir. Ardından, temel proses kontrol sistemi (BPCS) arızası sebebi ile DN100 hat üzerinden gaz fazda 1,3-bütadien salınımı kritik olayı için Olay Ağacı Analizi (ETA) gerçekleştirilmiş ve muhtemel kaza senaryolarına ait frekanslar tespit edilmiştir. Belirlenen her bir kaza senaryosunun etkileri için sonuç analizleri yürütülmüştür. Sonuç analizlerinde korelasyonlar ve ALOHA yazılımından yararlanılmıştır. Analiz sonucunda, koruma katmanlarının yeterliliği ve etkinliğini belirleyen parametreler (algılama süresi, müdahale süresi, eşik değeri vb.) değerlendirilmiştir. Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik'te bir tesiste büyük endüstriyel kazanın meydana gelme frekansının sınır değeri  $1,00 \times 10^{-4}$ /yıl veya bundan daha küçük bir değer olarak belirtilmektedir [11]. Tesisler, sıkı güvenlik politikaları, insan, çevre ve tesis varlıklarını korumaya yönelik çalışmalar ile büyük endüstriyel kaza frekans değerini bu sınır

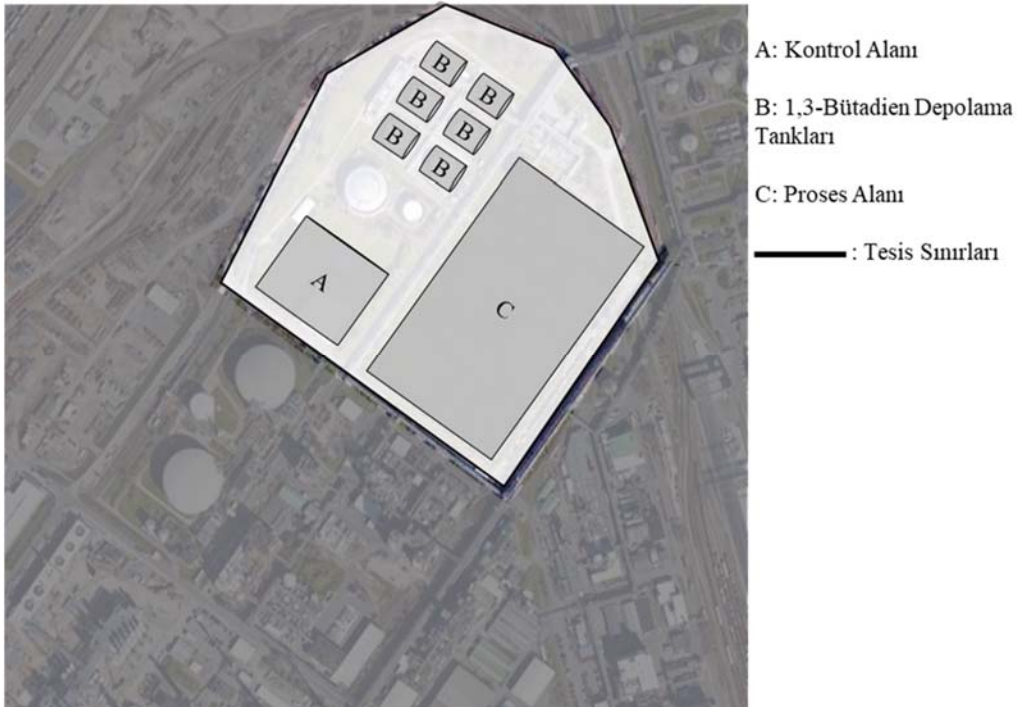
değerin altında seçebilmektedir. Dolayısı ile kuruluşların kendi politikalarını oluşturarak yönetmelikte belirtilen sınır değerinin altında bir frekans değeri almasının önünde herhangi bir engel veya teknik açıdan problem bulunmamaktadır. Çalışmanın gerçekleştirildiği örnek tesiste, tesis politikalarına göre ölümlü kaza olasılığı için sınır frekans değeri  $1,30 \times 10^{-7}$ /yıl olarak uygulamaktadır. Tesiste gerçekleştirilen çalışmalara ait akış diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur.

### 2.1. Kimyasal, Ekipman Verileri ve Kritik Olayın belirlenmesi (Chemical, Equipment Information and Critical Event Identification)

1,3-bütadien tesisinde depolama alanına ait yerleşim planı Şekil 2'de verilmiştir. Depolama tanklarında (B) bulunan 1,3-bütadien'in dolum ve prosese aktarımı, kontrol alanında (A) uzaktan kontrollü



Şekil 1. Gerçekleştirilen çalışmalara ait akış diyagramı (Flow chart of the study performed)



Şekil 2. Yerleşim planı (Plant layout)

sağlanmaktadır. Proses alanında (C) ise kimyasal, boru hatları ile transfer edilmekte ve üretimde hammadde olarak kullanılmaktadır.

Risk analizi çalışmalarında, potansiyel senaryoya ait özellikler, kimyasal bilgisi ve çevresel/meteorolojik koşullar ihtiyaç duyulan bilgilerin başında gelir. Bu sebeple öncelikle 1,3-bütadien kimyasalını depolayan tesis ve veri tabanlarından alınan bilgiler ile kimyasal envanter oluşturulmuştur (Tablo 1).

Atmosferik şartlar altında gaz fazında bulunan 1,3-bütadien'in tutuşma enerjisi oldukça düşüktür. Geniş bir skaladaki alt-üst patlama limiti aralığı, potansiyel sızıntı senaryoları sonucunda kimyasalın kolayca tutuşabileceğini göstermektedir. Toksik özellikler değerlendirildiğinde, ölümcül konsantrasyonların yüksek doz gerektirmesi, kanserojen ve mutajenik etkilerin ön planda olması sebepleri ile akut etkiler yerine uzun süreli maruziyetlerin etkili olduğu görülmektedir. 1,3- bütadien kimyasalının depolandığı ve işlendiği tesiste 22 m<sup>3</sup> hacme sahip basınçlı tanklar yer almaktadır. Depolama tanklarına ait özellikler Tablo 2' de verilmiştir. Paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş yatay silindirik tanklarda depolama işlemi 3 bar basınçta; dolun operasyonları 5 bar basınçta gerçekleştirilmektedir. Tesis işletme dokümanı gereğince tanklarda maksimum %80 doluluk ve 20-25°C işletme sıcaklığı sağlanmaktadır.

Mevcut depolama tanklarında basınç, sıcaklık ve seviye parametreleri yalnızca temel proses kontrol sistemi ile kontrol edilmektedir. Gerçekleştirilen kantitatif analizler sonucunda koruma katmanlarının prosese entegre edilmesi planlanmıştır. SIL(Safety Integrity Level – Emniyet Bütünlük Derecesi) seviyeli bağımsız ve güvenilirliği ispat edilmiş seviye kontrol döngüsü, mekanik sviç ve dayk alanı çevresinde konumlandırılmış 4 adet gaz sensörü sisteme dâhil edilmiştir. Gaz sensörlerinin tedarikçisi ve bağımsız 3. taraf aracılığı ile gerçekleştirilen çalışma, “ISA-TR84.00.07-2018, Guidance on the Evaluation of Fire, Combustible Gas, and Toxic Gas System

Effectiveness” standardı kapsamında yürütülmüştür [12]. Gaz sensörlerinin etkinliği, konumlandırılması ve müdahale süresine olan etkisi başlı başına harici bir çalışma konusudur. Bu makale çalışmasında, gerçekleştirilen analize ait çıktılar doğrudan kullanılmıştır. Mevcut durumda toplam tespit ve müdahale süresinin 60 dakika, gerçekleştirilen öneriler sonrasında ise 10 dakika olacağı varsayılmıştır. Belirlenen tespit ve müdahale süreleri, somut ve tesise özgü parametrelerdir. 1. Veri (60 dakika) operatör tespit ve müdahaleleri değerlendirilerek oluşturulmuştur (HRA-operatör ve operasyonel güvenilirlik analizi kapsamındaki çalışma). Bunun için farklı dönemlerde habersiz tatbikatlar ile sızıntı senaryoları gerçekleştirilmiş, sahte sinyaller üretilmiş ve operatör müdahaleleri beklenmiştir. Alanda herhangi bir tespit sistemi mevcut değildir ve yalnızca operatörün ilgili sızıntıyı saha kontrollerinde fark etmesi beklenmektedir. 2. Veri ise (10 dakika) ilgili sensör marka, model, güvenilirlik verileri ve en kötü koşullara ait CFD analizleri ile elde edilmiştir. Depolama tanklarına ait mevcut durumdaki ve planlanan yatırım sonrası ekipman ve enstrümanları gösterir P&ID diyagramları Şekil 3 ve Şekil 4 içerisinde verilmiştir.

Depolama tanklarında 1,3-bütadien'in tanker ile dolununu sağlamak amacı ile 2 adet santrifüj pompa kullanılmaktadır. Sıvı fazda besleme depolama tankının alt girişinden sağlanmakta ve tank üzerinden çıkan hat dengeleme amacı ile tankere geri dönmektedir. Mevcut sistemde (sol) yalnızca temel proses kontrol sistemi ile sağlanan seviye kontrolü bulunmaktadır. Planlı yatırımlar (sağ) ile temel proses kontrol sistemine ek güvenlik enstrümanlı sistem, interlok ve gaz algılama sistemi eklenmesi planlanmaktadır. Etki analizi çalışması ile tesis verilerine göre değerlendirilmesi planlanan kritik olaya ait bilgiler Tablo 3' de belirtilmektedir.

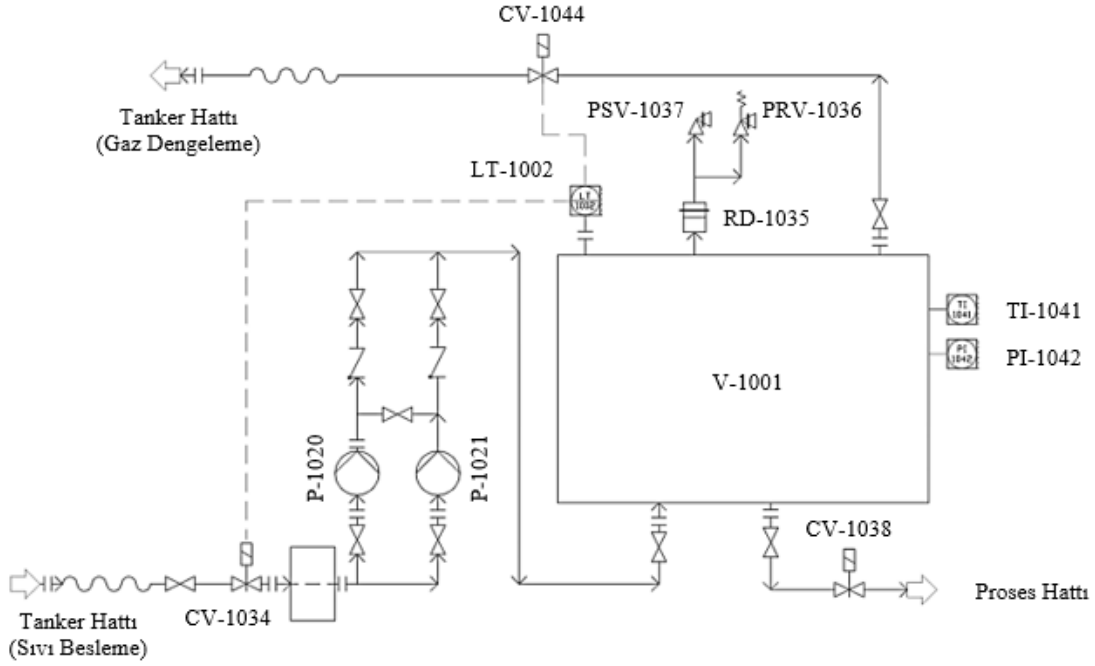
Yatırımlar sonrası sızıntı süresinin 60 dakikadan 10 dakikaya düşeceği varsayılmıştır. İlgili bariyerler ile kritik olay frekansı  $2.48 \times 10^{-7}$  ye düşürülmüştür.

**Tablo 1.** 1,3-bütadien Kimyasalına Ait Bilgiler (1,3 Butadiene chemical information)

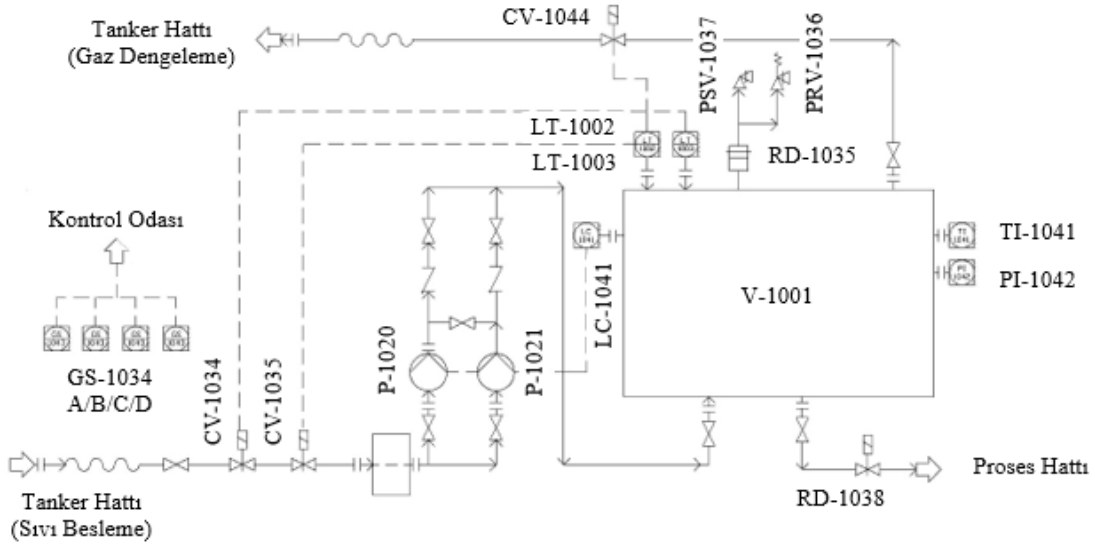
Genel Bilgiler ve Kimyasal Bilgileri		Toksosite Verileri		Alevlenirlik Verileri	
Kimyasal Adı	1,3-bütadien	Akut Toksite	Mevcut Değil	Alevlenir Bileşen Yüzdesi	100%
ID Kodu (CAS, UN, İç Kod)	106-99-0	Kanserojen	Evet (H350 - Kat. 1)	Minimum Tutuşma Enerjisi	0,13 mJ
Depolanan Maksimum Miktar	24 m <sup>3</sup>	Mutajenik	Evet (H340 - Kat. 1)	Parlama Noktası	-85°C
Fiziksel Hal (Depolama)	Sıvı	Üreme toksik	Mevcut Değil	LEL	1,4% (31 g/m <sup>3</sup> )
Depolama Tipi	Basınç Altında	%100 Ölümcül	LD50 Yutma 5480 mg/kg	UEL	16,3% (365 g/m <sup>3</sup> )
Erime Noktası	-108,9°C	%50 Ölümcül	LC50 Solunum 285 mg/l (4 Konsantrasyon h)	Tutuşma Sıcaklığı	415°C
Kaynama Noktası	-4,5°C	ERPG-1	10 ppm	Yanma Enerjisi	10700 kcal/kg
Sıvı Yoğunluğu	650 kg/m <sup>3</sup>	ERPG-2	500 ppm	Maksimum Patlama Basıncı	7,9 Bar
Molekül Ağırlığı	54,09 g/mol	ERPG-3	5000 ppm	Patlayıcı Grubu	IIB

**Tablo 2.** 1,3-bütadien Depolama Tankları Ekipman Bilgisi (Equipment information for 1,3 Butadiene storage tank)

Kimyasal	#	1,3-bütadien
Tank Tipi	#	Yatay Silindirik
Tank Malzemesi	#	Paslanmaz Çelik
Tank Çapı	cm	220
Tank Yüksekliği	cm	600
Deşarj Flanş Çapı	cm	DN50
Maksimum Dolun Oranı	%	80
İşletme Sıcaklığı	° C	20-25
İşletme Basıncı	barG	3



Şekil 3. Mevcut depolama tankı P&amp;ID diyagramı (P&amp;ID diagram of current storage tank)



Şekil 4. Yatırım sonrası depolama tankı P&amp;ID diyagramı (P&amp;ID diagram of storage tank after planned investments)

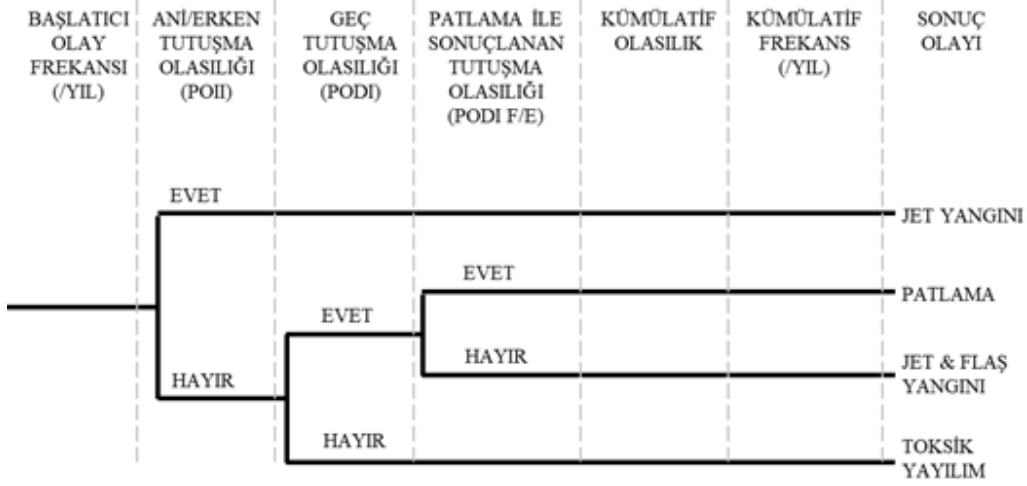
Tablo 3. Etki analizi gerçekleştirilecek kritik olay bilgileri (Critical event information for consequence analysis)

Kritik Olay	Proses Şartları	Sızıntı Çapı (mm)	Sızıntı Süresi (dk)	Bariyer Sonrası Hesaplanan Olay Frekansı (/yıl)
BPCS arızası sebebi ile DN100 hat üzerinden gaz fazda 1,3- bütadien salınımı	Tehlike Analizi Öncesi	100	60	$1,27 \times 10^{-4}$
	Tehlike Analizi Sonrası	100	10	$2,48 \times 10^{-7}$

## 2.2. Olay Ağacı Analizi (Event Tree Analysis)

Etki analizi çalışmasında kullanılacak Tablo 3 içerisinde belirtilen kritik olaya ait potansiyel sonuçların belirlenebilmesi ve kaza senaryolarının oluşturulması amacı ile olay ağacı oluşturulmuştur (Şekil 5).

Şekil 5'de belirtildiği üzere 1,3- bütadien salınımı sonrası jet yangını, patlama veya toksik yayılım meydana gelme olasılıkları bulunmaktadır. Yangın ile sonuçlanan senaryolar açığa çıkan ısı enerjisi, patlama ile sonuçlanan senaryolar aşırı basınç etkisi ve toksik yayılım ile sonuçlanan senaryolar ise maruziyet miktarı ile ölçülmektedir.



Şekil 5. 1,3- bütadien salınımına ait olay ağacı (Event tree of 1,3 Butadiene release scenario)

Tutuşma olasılık hesaplamaları CCPS(Center for Chemical Process Safety – AIChE) tarafından sağlanan modül ile belirlenmiştir [13]. Şekil 5’deki Olay Ağacı Analizinde kullanılan olasılıklar modülde aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

- Ani/erken Tutuşma Olasılığı (Probability of Immediate Ignition – POII),
- Gecikmeli Tutuşma Olasılığı (Probability of Delayed Ignition – PODI),
- Gecikmeli Tutuşma Sonucu Patlama Olasılığı (Probability of Explosion Given Delayed Ignition – POEGDI)

Bütünlük kaybı sonucunda kimyasalın erken/geç tutuşma veya tutuşmama olasılığı bir dizi parametreye bağlı olarak değişmektedir. Proses sıcaklığı, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, proses basıncı, minimum tutuşma enerjisi, sızıntının meydana geldiği ortam, sızıntı süresi, potansiyel tutuşturucu kaynakların yoğunluğu, proses alanındaki tutuşturucu kaynak kontrolleri, havalandırma ve gaz algılama sistemleri, insan faktörü ve diğer etkileri hafifletici bariyerler bu parametreler arasında yer almaktadır. Kullanılan modül içerisinde belirtilen faktörlerin hesaplamaya dâhil edilmesi ile 3 farklı seviyede analiz gerçekleştirilebilmektedir. Analize ait seviye arttıkça ihtiyaç duyulan parametreler de artış göstermektedir. Hesaplamalarda Tablo 1 ve Tablo 3’de sunulan veriler kullanılarak 3. seviyede analiz gerçekleştirilmiştir. Proses basıncı, proses sıcaklığı, sızıntı süresi, sızıntı çapı ve sızıntının kapalı alan/açık alanda olması gibi sızıntı koşulları ile tutuşturucu kaynağı seçimleri yapılarak modüle veriler tanımlanmış ve Şekil 5’ te yer alan ilgili erken/gecikmeli tutuşma olasılığı değerleri (POII, PODI, POEGDI) belirlenmiştir. Ardından, belirtilen olay ağacı ile birlikte potansiyel sonuçların meydana gelme olasılıkları hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, jet yangını frekansı, başlatıcı olay frekansı ile ani tutuşma olasılığı (POII) değerinin çarpımı ile elde edilmiştir. Toksik yayılım frekansı ise başlatıcı olay frekansının (1-POII)x(1-PODI) değeri ile çarpımından hesaplanmıştır.

### 2.3. Etki Analizleri (Impact Analysis)

Kontrolsüz şekilde 1,3-bütadien kimyasalının depolama alanına salınacak miktarının hesaplanması için International Electrotechnical Commission, 2020 standardı içerisinde yer alan “Kritik Basınç” denklemi Eş.1 ve “Sonik Gaz Kütlesi Boşalma Hızı” denklemi Eş. 2 kullanılmıştır [14]. Eş. 2, izentropik genişleme (akış entropisinin sabit kaldığı durum) kabulü ve bir boşalma/deşarj sabiti katsayısı kullanımı

ile mekanik enerji denkleğinden elde edilen ifadedir. İlgili koşullar altında 1,3-bütadien sınırlı bir alandan daha düşük basınçlı bir ortama aktığı için engellenmiş akış söz konusudur. Hesaplamalarda kullanılan değerler bu standart içerisinde yer alan bilgiler ve vana özelliklerine göre belirlenmiştir. Basınç rahatlatma (Relief) vana çıkışıdeşarj sabiti ( $C_a$ )deşarj geometrisine göre 0,5-0,99 değerleri arasında değişmektedir. Düzgün geometriye sahip vana çıkışı içindeşarj sabiti ( $C_d$ ) değeri 0,99 alınmıştır. Standartta sızıntı çapının ( $S$ ), basınç tahliye vanalarında orifiz alanının %10’unun alınması gerektiği belirtilmektedir, ancak kimyasal özellikleri ve geçmiş bakım verileri göz önünde bulundurularak sızıntı çapı ( $S$ ) için %100 açıklık değeri hesaplamalarda kullanılmıştır. Sıkıştırılabilirlik faktörü ( $Z$ ) değerinin belirlenmesinde sıcaklık ve basınç etkilidir. 50 bar değerinin altındaki basınçlarda ilgili değer 1 alınması gerektiği standartta belirtilmektedir. Çalışmada 50 bar değerinden daha düşük basınçta salınımın gerçekleşmesi sebebi ile sıkıştırılabilirlik faktörü ( $Z$ ) değeri 1 alınmıştır.

$$p_c = p_a \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (1)$$

$$W_g = C_d S p \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (2)$$

Patlama şiddetinin belirlenmesinde ise TNT Eşdeğer Modeli kullanılmıştır. Laboratuvar ve saha testleri çeşitli modeller üzerinden değerlendirilmiş ve TNT Eşdeğer Modeli bu kapsamda seçilmiştir. TNT eşdeğer metodu yeterince test verisi içerdiğinden yaygın olarak kullanılır, ancak yöntemin kısıtları vardır. Patlama merkezine yakın mesafelerde olması gerekenden daha şiddetli, uzak mesafelerde daha düşük etkiler verir. Yöntem, yakıt reaktivitesini göz önünde bulundurmaz, pozitif faz süresini temel alır. Buhar bulutunun yayıldığı bölgedeki sınırlılık, sıkışıklık geometrisi ve dispersiyon parametrelerini ise dikkate almaz. Boşalan kimyasal kütlesinin geç tutuşması sonucunda meydana gelen patlamanın basınç etkisi, hedef mesafeye patlamanın erişme süresi, hedef mesafedeki patlama basıncının kalıcı olacağı süre ve patlama impulsu(itmesi) hesaplanmıştır. TNT Eşdeğer hesaplamaları için “TNT Eşdeğer Kütle” denklemi Eş. 3 ve “ölçekli menzil” denklemi Eş.4 kullanılır [15]. TNT eşdeğer kütlesinin ( $W$ ) hesaplanması için ampirik patlama katsayısı ( $\eta$ ), kimyasala ait molekül kütlesi ( $M$ ), yanma enerjisi ( $E_c$ ) ve TNT’ye ait tutuşma enerjisi (4,52 MJ/kg) ( $E_{TNT}$ ) bilinmelidir. Hesaplanan TNT eşdeğer kütlenin potansiyel alıcı mesafelerdeki aşırı basınç etkisinin hesaplanması için ise ölçekli mesafe ( $Z$ ), etki

mesafesi ( $R_a$ ) ve TNT eşdeğer kütlesi ( $W$ ) kullanılır. Ölçekli mesafe hesaplanırken  $a$ ,  $b$  ve  $c$  sabitlerine bağlı fonksiyon ( $\phi$ ) dikkate alınır. Ampirik patlama katsayısının belirlenmesi için Tablo 17.65 “TNT Eşdeğer Modelleri İçin Patlama Verimi” kullanılmıştır [1]. Farklı metotlara göre kullanılacak katsayı değerlerinin belirtildiği tabloda, “FMRC” metodu seçilmiştir. FMRC metodu kapsamında kimyasalların özelliklerine göre patlama verimi değeri belirlenmektedir. Yüksek reaktif özellik gösteren 1,3- bütadien kimyasalı için ampirik patlama katsayısı ( $\eta$ ) değeri 0,15 olarak alınmıştır.

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{TNT}} \quad (3)$$

$$Z = \frac{R_a}{W^{1/3}} \quad (4)$$

$$\log_{10} \phi = \sum_{i=0}^n c_i (a + b \log_{10} Z)^i$$

Patlama basıncının oluşturacağı potansiyel etkilerin değerlendirilmesinde ise belirli eşik değerler seçilmiş ve Tablo 4’de belirtilmiştir.

**Tablo 4.** Patlama basıncının insan hayatı ve yapılar üzerindeki eşik değerleri  
(Threshold values of overpressure on human life and structures) [16]

Basınç psi	Bar	Hasar
1	0,07	Minör yaralanma, yapının kısmen yıkılması, kullanılmaz hale gelmesi
2,9	0,2	Majör yaralanma/organ kaybı, yapı duvarlarının ve çatılarının kısmen çökmesi
10	0,7	Ölüm meydana gelmesi, Yapının tamamının yıkılması

Jet yangını ve toksik gaz bulutunun etki mesafelerinin belirlenmesi için “Areal Locations of Hazardous Atmospheres” (ALOHA) yazılımı kullanılmıştır. ALOHA yazılımı Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA) iş birliği ile geliştirilmiştir ve birincil amacı potansiyel döküntü senaryoları sonrası acil durum müdahalesi gerçekleştirecek personel için durum tahminlerini sağlamaktır. Bunun yanı sıra yazılım, toksik kimyasal buharları kaynaklı maruziyet, kimyasal yangınlardan kaynaklanan termal radyasyon etkileri ve buhar bulutu patlamalarından (VCE) kaynaklanan aşırı basınç etkileri ile ilişkili insan sağlığını tehdit edebilecek tehlikelerin modellenmesinde kullanılabilir [17].

Jet yangınlarının modellenmesinde nokta kaynak modeli veya katı alev modeli kullanılır [17]. ALOHA jet yangını modellemeleri, Shell tarafından geliştirilen katı alev modeline dayanır [18]. Termal radyasyonun hesaplanmasında “Alev Salım Gücü (E)” denklemi Eş. 5 kullanılmaktadır. Deşarj edilen kimyasala ait kütleli akış hızı ( $Q$ ), tutuşma enerjisi ( $\Delta h_c$ ) ve alev yüzey alanı ( $A$ ) ve alev yüzeyinden yayılan ısının oranı ( $f_{rad}$ ) hesaplamada gereklidir. Isı oranının ( $F_{rad}$ ) hesaplanması için “Alev Yüzeyinden Yayılan Isı” denklemi Eş.6 uygulanmaktadır. Hesaplama doğrulama faktörü ( $C_{MW}$ ) ve gaz hızı ( $u_j$ ) da yer alır. Doğrulama faktörü değeri için molekül kütlelerine bağlı değişkenlik gösteren yaklaşım kullanılır [19]. Bu yaklaşıma göre kimyasal molekül kütlelerinin 21’den küçük veya eşit olması durumunda değer 1 alınır, 21 ile 60 arasında olması durumunda molekül kütlelerinin karekökü 21’e bölünür, son olarak 60’dan büyük

olması durumunda ise 1,69 alınır. Gaz hızının ( $u_j$ ) hesaplanmasında “Genişleyen Gaz Jeti” denklemi Eş.7 kullanılır. Hesaplama mach sayısı ( $M_j$ ), spesifik ısı kapasitesi ( $\gamma_g$ ), evrensel gaz sabiti ( $R_c$ ), sıcaklık ( $T_j$ ) ve molekül ağırlığı ( $W_{gk}$ ) parametreleri yer alır. Alev yüzey alanı ( $A$ ) hesaplanması için ise “Alev Yüzey Alanı” denklemi Eş. 8 kullanılmakta olup alev taban kesiti ( $W_1$ ), alev tavan kesiti ( $W_2$ ) ve alev kesit uzunluğu ( $RL$ ) değerleri gereklidir [20].

$$E = \frac{f_{rad} Q \Delta h_c}{A} \quad (5)$$

$$f_{rad} = 0,21 C_{MW} \exp(-0,00323 u_j) + 0,11 \quad (6)$$

$$u_j = M_j \sqrt{\frac{\gamma_g R_c T_j}{W_{gk}}} \quad (7)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (W_1^2 + W_2^2) + \frac{\pi}{2} (W_1 + W_2) \left[ R_L^2 + \left( \frac{W_2 - W_1}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Toksik yayılım senaryolarında atmosfere salınan gazların dağılımının modellenmesi için gauss veya ağır gaz metodu bulunmaktadır [18]. ALOHA yazılımında, atmosferik şartlar, sızıntı kaynağına ait konum ve kimyasal gazın yayılım davranışına göre uygun metod otomatik olarak belirlenebilmekte veya kullanıcı seçimi ile gauss veya ağır gaz dağılımına göre hesaplama sağlanabilmektedir [17]. Havadan hafif gaz salınımları için “Gauss Dağılım” denklemi Eş.9 kullanılır. Gauss dağılımı hesaplamalarında sürekli ve denge koşullu kaynaklarda dağılım ( $\chi$ ), salınım parametreleri ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ) ve salınım süresi ( $t_r$ ) yer alır.

$$C(x, y, z, t) \begin{cases} \frac{\chi}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x - u_x}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) \right] & (t \leq t_r) \\ \frac{\chi}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x - U(t - t_r)}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x - U_t}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) \right] & (t_r < t < \infty) \end{cases} \quad (9)$$

ALOHA’ da yoğun gazlar için kullanılan Ağır Gaz dağılımı hesaplamaları DEGADIS modeline dayanır. DEGADIS ise Colenbrander tarafından tanımlanan Shell HEGADIS modelinin bir uyarlamasıdır. ALOHA-DEGADIS, yer seviyesindeki salınımlarla sınırlıdır ve bir jet salınımindan kaynaklanan ilk momentumu hesaba katmaz. ALOHA-DEGADIS ’te kullanılan sayısal yöntemlerden bazıları, DEGADIS ’te kullanılanlara kıyasla basitleştirilmiştir. ALOHA’ da kullanılan ortam hava basıncı, konum ve zamandan bağımsızdır. Kirletici ve havanın etkileşmeyen ideal gazlar gibi davranıldığı varsayılır. Hesaplamalarda kullanılan ve tesisin bulunduğu alandaki son 10 yıla ait ortalamalara dayanan atmosferik veriler Tablo 5’de belirtilmiştir.

Tesisin bulunduğu alanda hâkim rüzgâr yönünün Kuzey-Kuzey Doğu istikametinde olduğu ve hava sıcaklığının genellikle mevsim normallerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Tesisin bulunduğu alanda coğrafi koşullar ve rüzgâr hızları göz önünde bulundurulduğunda, ters hava akımının meydana gelmesi beklenmemektedir. Modellemede kullanılan diğer veriler ise Tablo 6 içerisinde belirtilmiştir.

Sızıntı modeli olarak belirli bir süre ve kaynaktan salınımı gerçekleşen kimyasal kütlesi kullanılmıştır. Depolama tankının üst noktasından salınımın meydana geleceği değerlendirildiği için yükseklik 3m olarak hesaplama dahil edilmiştir. 1,3-bütadien

**Tablo 5.** ALOHA yazılımında kullanılan atmosferik veriler (Atmospheric data used in ALOHA software)

Rüzgâr Hızı	Rüzgâr Yönü	Hava Sıcaklığı	Nem	Bulut ile Kapalılık	Ters Hava Akımı
m/s	-	°C	%	-	-
2,5	Kuzey(%24) Kuzey Doğu (%21)	25	50	Kısmi Bulutlu	Beklenmiyor



**Tablo 6.** ALOHA yazılımı modelleme verileri (ALOHA software modeling data)

Sızıntı Modeli	Kaynak Tipi	Salınan Kimyasal Kütlesi	Salınım Süreleri	Yerden Yükseklik	Dağılım Tipi
-	-	kg/s	dakika	m	-
Doğrudan Kaynak	Sürekli	11,48	10 /60	3	Ağır Gaz Dağılımı

gazının bağlı buhar yoğunluğunun 1,92 [21], olması sebebi ile ağır gaz dağılımının uygun olacağı belirlenmiştir. Atmosfere salınan kimyasal kütlesi ise Eş. 2 kullanılarak hesaplanmış ve yazılıma girilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan kimyasal özellikleri Tablo 7 ve sızıntı hızının hesaplanmasında kullanılan veriler Tablo 8 içerisinde bulunmaktadır.

**Tablo 7.** Hesaplamalarda Kullanılan Kimyasal Özellikleri (Chemical properties used in calculations)

Kimyasal Adı	-	1,3-Bütadien
CAS	-	2825-82-3
Molar Kütle	kg	54,09
Gaz/Hava Bağlı Yoğunluk	-	1,92
Politropik İndeks	-	1,176
Parlama Noktası	°C	-85
Tutuşma Sıcaklığı	°C	415
Kaynama Noktası	°C	-4,5
Buhar Basıncı	bar	2,4
Alt Patlama Limiti	%	1,4
Sıvı Yoğunluğu	kg/m <sup>3</sup>	650

**Tablo 8.** IEC 60079-10-1 göre hesaplama bilgileri (Calculation information according to IEC 60079-10-1)

Alan Bilgisi	-	Açık Alan (Kısıtlanmamış)
Yerden Yükseklik	m	2 - 5
Çıkış Bağlı Yoğunluğu	-	Buoyant
Çıkış Engeli	-	Engel Yok
Yayılm Tipi	-	Jet
Kritik Basınç	Pa	174399
Sızıntı Türü	-	Sonik
Boşalma Hızı	kg/s	11,48

Termal radyasyon eşik değerleri Tablo 9'da ve toksik yayılım maruziyet seviyelerinde kullanılan eşik değerler Tablo 10 içerisinde verilmiştir [22].

**Tablo 9.** Termal radyasyonun insan hayatı üzerindeki sınır değerleri (Threshold values of thermal radiation on human life)

Termal Radyasyon	Hasar
kW/m <sup>2</sup>	
2	Minör yaralanma, ilk yardım gerektirecek yanma hissi
5	2. derece yanık tıbbi müdahale gerektirecek yanma
10	Potansiyel ölüm meydana gelebilecek yanma

**Tablo 10.** Toksik maruziyetin insan hayatı üzerindeki sınır değerleri (Threshold values of toxic exposure on human life)

Toksik Maruziyet	Hasar
ppm	
670	Minör seviyede rahatsızlık, tahriş meydana gelmesi
5300	Uzun süreli kalıcı hasar
22000	Kalıcı hasar veya ölüm meydana gelmesi

Termal radyasyon ve toksik maruziyet senaryolarında eşik değerler, maruz kalınan enerji veya doz ile doğrudan ilişkili olarak görünmesine karşın maruz kalınan süre de hesaplamalarda parametre olarak değerlendirilmektedir. ALOHA' da maruz kalınan sürenin 60 saniye veya daha az olduğu belirtilmektedir [17].

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Kimyasalların elleçlendiği veya depolandığı tesislerde proses güvenliği kapsamında gerçekleştirilen yarı kantitatif tehlike analizi çalışmaları ile tesisin sahip olduğu bariyerler ve bağımsız koruma katmanları göz önünde bulundurularak potansiyel tehlikeli senaryolarının meydana gelme sıklığı ve sonuç olayına ait şiddet belirlenebilmektedir. Potansiyel kaza senaryolarını önlemesi veya etkilerini hafifletmesi beklenen bağımsız koruma katmanlarının yalnızca istenmeyen olay frekansını düşürmesi proses güvenliği kapsamında yürütülen çalışmalarda yeterli olmamaktadır. Bir bariyerin bağımsız koruma katmanı olarak değerlendirilebilmesi için etkin, bağımsız ve denetlenebilir olması gerekmektedir [23].

Tesiste temel proses kontrol sistemi arızası ile başlayan sızıntı olayının potansiyel etkilerinin değerlendirilmesinde gerçekleştirilen tüm hesaplamalar, tesisten sağlanan mevcut ve planlı yatırım sonrası sahip olunacak koruma katmanları göz önünde bulundurularak iki farklı şekilde hesaplanmıştır. Sızıntı olayının potansiyel sonuçlarına ait hesaplanan frekans değerleri Tablo 11 içerisinde yer almaktadır.

Tesis yatırımlarının başlatıcı olay(kritik olay) frekansına doğrudan etkisi sebebi ile kümülatif frekans değerleri karşılaştırılan iki durum için farklılık göstermiştir. Tesis yatırımları öncesi patlama ile sonuçlanan olay olasılığı 5,45x10<sup>-5</sup>/yıl iken bu değer yatırımlar sonrası 1,06x10<sup>-7</sup>/yıl değerine gerilemiş, toksik yayılım senaryoları için ise 1,21x10<sup>-6</sup>/yıl değerinden 2,37x10<sup>-9</sup>/yıl değerine düşmüştür. Hesaplanan değerlere göre yatırımlar sonrası ilgili tesiste 1,30x10<sup>-7</sup>/yıl ölümcül istenmeyen olay hedefi sağlanmıştır. Erken ve geç tutuşma hesaplamalarında, 60 dakikalık tespit ve müdahale süresinin 10 dakikaya düşürülmesi kaynaklı ara olay olasılıkları ise değişmemiştir.

Senaryo sonucunda, 5 bar basınç DN100 çaplı hattan gaz fazında atmosfere salınımı beklenen 1,3-bütadien'in kritik basıncının yüksek olması sebebi ile sonik karakterdeki kütleli akış hızı 11,48 kg/s olarak hesaplanmıştır. Sızıntı tespit ve müdahale süresi kaynaklı değişkenlik gösteren toplam sızıntı miktarları Tablo 12'de sunulmuştur.

Sızıntı noktası ve proses koşullarının belirtilen iki durum için değişmemesi sebebi ile kütleli akış hızı aynı kalmış ve toplam sızıntı miktarı yalnızca tespit ve müdahale süresi kaynaklı 6 kat azalmıştır.

Patlama, jet yangını ve toksik yayılım sonuç olaylarına ait eşik değerler ve etki mesafeleri hesaplanmış; sonuçlar Tablo 13'de verilmiştir. En geniş etkilerin tespit edildiği toksik yayılım sonuç olaylarına ait model doküman Şekil 6'da sunulmuştur.

Aşırı basınç, termal radyasyon ve maruziyet miktarlarına dayalı hesaplamalar incelendiğinde belirtilen iki durum için yalnızca aşırı basınç ile sonuçlanan senaryoya ait etki mesafeleri değişim göstermiştir. Tablo 13'de belirtilen aşırı basınç mesafeleri gerçek değerlerdir. Ölçeklenmiş mesafe, gerçek mesafe ve patlayıcı kütlelerini

**Tablo 11.** Sızıntı olayına ait potansiyel sonuçlar ve hesaplanan frekans değerleri  
(Potential consequences of the leakage and calculated frequencies)

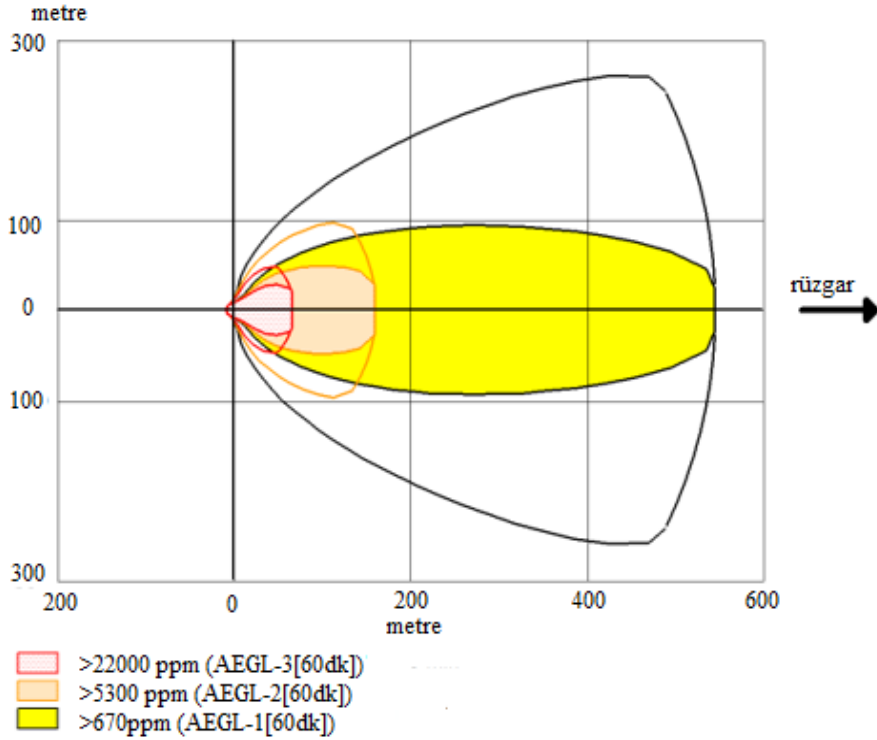
Kritik Olay	Proses Şartları	Başlatıcı Olay Frekansı	Jet Yangını	Patlama	Jet & Flaş Yangını	Toksik Yayılım
#	#	(olay/yıl)	(olay/yıl)	(olay/yıl)	(olay/yıl)	(olay/yıl)
BPCS arızası sebebi ile DN100 hat üzerinden gaz fazda 1,3- bütadien salınımı	Tehlike Analizi Öncesi	1,27x10 <sup>-4</sup>	5,65x10 <sup>-6</sup>	5,45x10 <sup>-5</sup>	5,91x10 <sup>-5</sup>	1,21x10 <sup>-6</sup>
	Tehlike Analizi Sonrası	2,48x10 <sup>-7</sup>	1,10x10 <sup>-8</sup>	1,06x10 <sup>-7</sup>	1,13x10 <sup>-7</sup>	2,37x10 <sup>-9</sup>

**Tablo 12.** Sızıntı hızı hesaplamasına ait sonuçlar (Results of leakage rate calculation)

Sızıntı Çapı	Sızıntı Alanı	Kritik Basınç	Sızıntı Karakteri	Yayılım Tipi	Kütleli Akış Hızı	Toplam Sızıntı Miktarı (10 min)	Toplam Sızıntı Miktarı (60 min)
mm	m <sup>2</sup>	Pa	#	#	kg/s	kg	kg
100	0,007853982	174398,8623	Sonik	Jet	11,48	114,81	688,87

**Tablo 13.** Hesaplanan aşırı basınç, termal radyasyon ve toksik yayılım etki mesafeleri  
(Calculated overpressure, thermal radiation and toxic emission impact distances)

Etki Türü	Etki Büyüklüğü	Birim	Etki Mesafeleri	
			Tehlike Analizi Öncesi	Tehlike Analizi Sonrası
			m	m
Aşırı Basınç	Ölümcül	(0,7 bar)	39,87	21,94
	Ciddi Yaralanma	(0,2 bar)	87,12	47,81
	Minör Yaralanma	(0,07 bar)	199,34	109,94
Termal Radyasyon	Ölümcül	(2 kW/m <sup>2</sup> )	27	27
	Ciddi Yaralanma	(5 kW/m <sup>2</sup> )	41	41
	Minör Yaralanma	(10 kW/m <sup>2</sup> )	65	65
Toksik Maruziyet	Ölümcül	(22000 ppm)	66	66
	Ciddi Yaralanma	(5300 ppm)	159	159
	Minör Yaralanma	(670 ppm)	546	546

**Şekil 6.** Toksik yayılım etki alanları (10 dk ve 60 dk) (Toxic release threat zones (10 min and 60 min))

içeren bir fonksiyondur. Patlayıcı kütlesi ise eşleniği sağlanacak kimyasala ve TNT'ye ait enerji, patlama verimi, eşlenik sağlanacak

kimyasal kütlesini içeren bir fonksiyondur. Ölçeklenmiş mesafeden gerçek mesafeye ulaşmak için iterasyon yapılmıştır. Temel olarak

patlama basıncı, pozitif faz süresi, impuls ve basınç varış süresi arasındaki korelasyon kurulmuştur. Örnek hesaplamada kullanılan veriler Tablo 14 ve elde edilen sonuç ise Tablo 15’de sunulmuştur. Erken ve geç tutuşma olasılığı hesaplamalarına paralel olarak 60 dakikalık tespit ve müdahale süresinin 10 dakikaya düşürülmesi, jet yangını ve toksik maruziyet kaynaklı etki mesafelerini değiştirmemiştir. Sızıntı noktası ve proses koşullarının belirtilen iki durum için değişmemesi sebebi ile kütleli akış hızı aynı kalmış ve toplam sızıntı miktarı yalnızca tespit ve müdahale süresi kaynaklı 6 kat azalmıştır.

**Tablo 14.** Örnek TNT eşdeğer hesaplamasında kullanılan veriler (Data used in TNT equivalent example calculation)

Sembol	Açıklama	Değer	Birim
M	Bütadien Kütle	114,81	kg
$\eta$	Patlama verimi	0,15	-
$E_c$	Yanma Enerjisi	44,7688	MJ/kg
$E_{TNT}$	TNT Yanma Enerjisi	4,52	MJ/kg
W	TNT Eşlenik Kütle	-	kg
r	Mesafe	21,94	m
Z	Ölçekli Mesafe	-	m/kg <sup>1/3</sup>

**Tablo 15.** Örnek TNT eşdeğer hesaplamasına ait sonuçlar (Patlama Basıncı) (Results of TNT equivalent example calculation (Explosion Pressure))

Hesaplama Adı	Sembol	Değer	Hesaplanan Değer	Birim
	a	-0,2144	-	-
	b	1,3503	-	-
	0	2,7808	2,7808	-
	1	-1,6559	-0,9804	-
	2	-0,1542	-0,0541	-
	3	0,5141	0,1067	-
	4	0,0989	0,0122	-
Patlama Basıncı	5	-0,2939	-0,0214	-
	6	-0,0268	-0,0012	-
	7	0,1091	0,0028	-
	8	0,0016	0,0000	-
	9	-0,0215	-0,0002	-
	10	0,0001	0,0000	-
	11	0,0017	0,0000	-
			0,700	bar

Yatırımlar ile başlatıcı olay frekansının düşürülmesi kaynaklı yangın, patlama ve toksik yayılım ile sonuçlanabilecek olaylara ait frekans değerlerinde azalma olduğu ancak tutuşma olasılıkları, termal maruziyet ve toksik maruziyet kaynaklı etki mesafelerinde değişim olmadığı belirlenmiştir. Yatırımların güvenilirlik seviyeleri kaynaklı iyileştirmede etkili olduğu, ancak tespit ve müdahale süresindeki 50 dakikalık iyileştirmenin yetersiz olduğu görülmüştür. Tesis hedef değeri olan  $1,30 \times 10^{-7}$ /yıl değerine ulaşılmasına karşın ilgili senaryoya ait salınım miktarlarının optimum seviyede tutulabilmesi için süre odaklı tespit sistemlerinde iyileştirme gerçekleştirilmesi ve etki modellemelerinin tekrarlanması gerektiği düşünülmektedir.

#### 4. Simgeler (Symbols)

$P_c$	: Kritik basınç (Pa)
$P_a$	: Atmosferik basınç (Pa)
$\gamma$	: Adyabatik genleşme politropik indeks (-)
$W_g$	: Deşarj olan kütleli akış miktarı (kg/s)
$C_d$	: Deşarj sabiti (-)
S	: Sızıntı çapı (m <sup>2</sup> )
p	: Özkütle (kg/m <sup>3</sup> )
M	: Kütle (kg/kmol)
Z	: Sıkıştırılabilirlik faktörü (-)

R	: Gaz sabiti (J/kmol K)
T	: Mutlak sıcaklık (K)
$\eta$	: Ampirik patlama katsayısı (-)
$E_c$	: Yanma enerjisi (MJ/kg)
$E_{TNT}$	: TNT tutuşma enerjisi (MJ/kg)
W	: TNT eşdeğer kütle (kg)
Ra	: Etki mesafesi (m)
Z	: Ölçekli mesafe (-)
$f_{rad}$	: Yüzeiden yayılan ısı oranı (-)
Q	: Kütleli akış hızı (kg/s)
$h_c$	: Tutuşma enerjisi (J/kg)
A	: Alev yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
$C_{MW}$	: Doğrulama faktörü (-)
$U_j$	: Gaz akış hızı (kg/s)
$\gamma_g$	: Spesifik ısı kapasitesi oranı (-)
W1	: Alev taban kesiti (m)
W2	: Alev tavan kesiti (m)
RL	: Alev kesit uzunluğu (m)

#### 5. Sonuçlar (Conclusions)

Yürütülen çalışmada, 1,3-bütadien kimyasalını depolayan örnek bir tesiste risk analizi yapılmıştır. Tesiste geçmişte gerçekleştirilen HAZOP ve LOPA analizleri ile güvenlik enstrümanlı sistem, gaz algılama ve temel proses kontrol sistemine ait iyileştirmeler ve bunlara ait yatırım planı sonuçları, çalışmada dikkate alınmıştır. İlgili yatırımların, seçilen depolama tesisinde yangın, patlama ve toksik yayılım senaryolarının meydana gelme frekansı ve şiddetine olan etkileri korelasyon ve yazılım kullanılarak modellenmiştir. Modellemeler için gerekli kimyasal, ekipman verileri, P&ID ile meteorolojik veriler temin edilmiştir. Gerçekleştirilen yatırımlar ile başlatıcı olay frekansı düşürülmüş ve tesis hedef değerine ( $1,30 \times 10^{-7}$ /yıl) ulaşılmıştır. Yangın, patlama ve toksik yayılım ile sonuçlanabilecek olaylara ait frekans değerleri azalmış ancak tutuşma olasılıkları, termal maruziyet ve toksik maruziyet kaynaklı etki mesafeleri değişmemiştir. Yatırım sonrası sadece aşırı basınç etki mesafeleri azalmıştır. Yatırım sonrası sızıntı noktası ve proses koşulları değişmediğinden 1,3- bütadien kütleli akış hızı sabit kalmış; toplam sızıntı miktarı 6 kat azalmıştır. İyileştirmeler, acil durum müdahale planları ve prosedürlerine olumlu katkılar sunmuştur. Sızıntı tespit ve müdahale süresinin azalması, acil duruma erken müdahaleyi sağlamıştır. Yangın, patlama ve toksik yayılım kaza frekanslarının azaltılması yanında ortam salınım toplam kimyasal miktarı azaltılarak kaza şiddeti de kısmen düşürülebilmektedir. İyileştirme çalışmaları ile ilgili enstrümanlar üzerinden P&ID yeniden oluşturulmuş; alanda yalnızca operatörün ilgili sızıntıyı saha kontrollerinde fark etmesine dayanan mevcut prosedürler revize edilerek etkin hale getirilmiştir. Bağımsız koruma katmanlarının tespit ve müdahale süresine olan majör etkisinin “bağımsız koruma katmanlarının etkinliği” kapsamında değerlendirildiğinde yeterli olmadığı söylenebilir. Farklı üreticilerden sağlanacak enstrümanların kullanımı, güvenlik enstrümanlı sistem tasarımının veya kendinden güvenli sistem tasarımı kapsamında dolun operasyonlarında kullanılan proses tasarımının gözden geçirilmesi önemlidir. Sonuç olarak, çalışmada kullanılan metodlar, fikir verici bir ön değerlendirme niteliindedir; karar verme ve yatırım süreçlerinde daha detaylı analizlere ihtiyaç bulunmaktadır.

#### Kaynaklar (References)

1. Lees F., Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier, Gezondheidszorg, 2012.
2. OECD, Saving Costs in Chemicals Management: How the OECD Ensures Benefits to Society, OECD Publishing, 2019.
3. T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. 2021 Kimya Sektörü Raporu. <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sector-raporlari/mu0110011408>. Yayın tarihi Aralık, 2021. Erişim tarihi Temmuz 2, 2023.

4. Tauseef S., Abbasi T., Pompapathi V., Abbasi S., Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms, *Process Safety and Environmental Protection*, 120, 331-338, 2018.
5. Chang J. I., Lin C. C., A study of storage tank accidents, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 19 (1), 51-59, 2006.
6. Luo T., Wu C., Duan L., Fishbone diagram and risk matrix analysis method and its application in safety assessment of natural gas spherical tank, *J. Cleaner Prod.*, 174, 296-304, 2018.
7. Wang Q., Sun Y., Shu C. M., Jiang J., Zhang M., Wang Q., Wang X., Effect of separation distance on gas dispersion and vapor cloud explosion in a storage tank farm determined using computational fluid dynamics, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 68, 104282, 2020.
8. Cheraghi M., Bagherian-Sahlavani A., Noori H., Mohammad-Fam I., Toxic Chemical Release Hazard Distance Determination Using Chemical Exposure Index (CEI) in a Gas Refinery, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 38 (4), 273-291, 2019.
9. Antonioni G., Spadoni G., Cozzani, V., Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 22 (5), 614-624, 2009.
10. Sakizadeh M., Short- and long-term variations, spatial analysis along with cancer health risk assessment associated with 1, 3-butadiene, *Atmospheric Pollution Research*, 11 (4), 755-765, 2020.
11. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve İçişleri Bakanlığı, Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik. T.C. Resmî Gazete. <https://www.mevzuat.gov.tr>, 2019.
12. ISA, Guidance on the Evaluation of Fire, Combustible Gas, and Toxic Gas System Effectiveness, 2018.
13. CCPS, Guidelines for Determining the Probability of Ignition of a Released Flammable Mass, Wiley-AIChE, 2014.
14. International Electrotechnical Commission, Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. IEC International, <https://iec.ch>, 2020.
15. CCPS, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Wiley, 2010.
16. Clancey V. J., Diagnostic Features of Explosion Damage, 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland, 1972.
17. NOAA, ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) Technical Documentation, Seattle, Washington, 2013.
18. Casal J., Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants, Elsevier, 2017.
19. Cook J., Bahrami Z., Whitehouse R.J., A Comprehensive Program for Calculation of Flame Radiation-Levels, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 3 (1), 150-155, 1990.
20. Chamberlain G. A., Developments in Design Methods for Predicting Thermal-Radiation from Flares, *Chemical Engineering Research & Design*, 65 (4), 299-309, 1987.
21. IFA. GESTIS Substance Database. [https://gestis-database.dguv.de/data?name=011430\\_](https://gestis-database.dguv.de/data?name=011430_) Yayın tarihi 2022. Erişim tarihi Ocak 13, 2023.
22. EPA, Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures, United States Environmental Protection Agency, 1988.
23. CCPS, Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment, Wiley, 2001.