



**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN KİMYASAL PROSESLERE ETKİLERİNİN
RİSK ANALİZİ**

Nurhan ARIK AŞCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2024

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.

Nurhan ARIK AŞÇI

12/01/2024

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN KİMYASAL PROSESLERE ETKİLERİNİN RİSK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Nurhan ARIK AŞCI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

İklim değişikliğine bağlı doğa olaylarının sayısının ve şiddetinin artmasıyla afetlerin tetiklediği proses kazaları önem kazanmaktadır. Doğal afetler, kimyasal tesis veya petrol ve gaz boru hatlarında bütünlük kaybı meydana getirerek tehlikeli kimyasalların salımına yol açmakta; can, mal ve çevre kayıplarına neden olan yangın, patlama, toksik yayılım ile sonuçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, iklim değişikliğinin proses kazalarına etkilerinin risk analizi amaçlanmış buna yönelik bir metodoloji önerisi getirilmiştir. Öncelikle, 2008-2023 yılları arasında meydana gelen proses kazaları veri tabanları (eNatech, EM-DAT) üzerinden analiz edilmiş, proses kazalarını en çok tetikleyen doğal afet türleri ve proses ekipmanlarının kırılganlığı değerlendirilmiştir. Ardından, öne çıkan doğal afet türü ve proses ekipmanlarını barındıran, risk analizi çalışmaları yürütülecek il ve kuruluş seçimleri yapılmıştır. Son aşamada, hasar analizi, olay ağacı ve sonuç analizi üzerinden risk analizi gerçekleştirilmiştir. Önerilen metodolojinin saha uygulaması da yapılmıştır. Ön analizler ile iklim değişikliğine bağlı sel/taşkın olaylarının proses kazalarında öne çıktığı, atmosferik depolama tanklarının en kırılgan ekipman olduğu tespit edilmiştir. Ülkemiz sel afet haritası, mevzuat kapsamındaki endüstriyel kuruluş lokasyonları ile kırılgan ekipmanlar dikkate alınarak İzmir ilindeki örnek bir kuruluşta uygulama yapılmıştır. Örnek kuruluştaki atmosferik benzin tankı, hasar analizlerinden kritik doluluk oranı (CFL: %27); kırılganlık (ψ : %36) ve bütünlük kaybı meydana gelme frekansı (f_{LOC} : 7.1×10^{-4} /yıl) ile sel/taşkına karşı en riskli bulunmuştur. Olay ağacı analizlerinde bu tank için toksik yayılım, jet yangını, parlama yangını ve buhar bulutu patlaması kaza olasılığı sırasıyla 7.09×10^{-7} /yıl, 4.03×10^{-7} /yıl, 3.44×10^{-5} /yıl ve 2.11×10^{-5} /yıl olarak belirlenmiştir. Örnek kuruluş mevzuat eşik değerini (10^{-4} /yıl) karşılamıştır, ilave önem gerekmediği tespit edilmiştir. Sonuç analizi ile benzin tankı için 301,8 m' lik ölümcül etkilerin görülebileceği (termal radyasyon= 40 kW/m^2) etki çapı hesaplanmıştır. Kuruluş içi domino etkilerinin yaşanabileceği tespit edilmiştir. Kaza olasılığı düşük olmasına rağmen yüksek şiddet etkileri, bu tür proses kazalarına hazırlığın önemini bir kez daha göstermiştir.

Bilim Kodu : 91210
Anahtar Kelimeler : İklim değişikliği, proses kazaları, Natech, risk analizi
Sayfa Adedi : 105
Danışman : Prof. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ

RISK ANALYSIS OF THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON CHEMICAL PROCESSES

(M. Sc. Thesis)

Nurhan ARIK ASCİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

As the number and severity of natural events due to climate change increases, process accidents triggered by disasters are gaining importance. Natural disasters cause loss-of-containment in chemical plants or oil and gas pipelines, leading to the release of hazardous chemicals; it results in fire, explosion and toxic release that cause loss of life, property and environment. In this thesis, the risk analysis of the effects of climate change on process accidents was aimed and a methodology was proposed. First of all, process accidents that occurred between 2008 and 2023 were analyzed through databases (eNatech, EM-DAT), and the types of natural disasters that most triggered process accidents and the fragility of process equipment were evaluated. Then, selections were made for the provinces and organizations that host the prominent natural disaster type and process equipment and where risk analysis studies will be carried out. In the final, risk analysis was performed with damage analysis, event tree and consequences analysis. A case study of the proposed methodology was also performed. With preliminary analysis, it was determined that flood events due to climate change were prominent in process accidents and atmospheric storage tanks were the most fragile equipment. The case study was carried out in a sample organization in Izmir, taking into account our country's flood disaster map, industrial establishment locations within the scope of the legislation and fragile equipment. Atmospheric gasoline tank in the sample organization was found to be the most risky against flood with critical filling rate (CFL: 27%); with its fragility (ψ : 36%) and loss-of-containment frequency (f_{LOC} : 7.1×10^{-4} / year) by damage analysis. In the event tree analysis, the accident probability of toxic release, jet fire, flash fire and vapor cloud explosion for this tank was 7.09×10^{-7} / year, 4.03×10^{-7} / year, 3.44×10^{-5} / year and 2.11×10^{-5} / year, respectively. The sample organization met the regulatory threshold value (10^{-4} / year), and it was determined that no additional precaution was required. By consequence analysis, the impact radius of 301.8 m, where lethal effects can be seen (thermal radiation = 40 kW/m^2), was calculated for the gasoline tank. It has been determined that domino effects may occur within the organization. Although the probability of an accident is low, the high severity effects have once again shown the importance of preparation for such process accidents.

Science Code : 91210

Key Words : Climate change, process accidents, Natech, risk analysis

Page Number : 105

Supervisor : Prof. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen, akademik serüvenimde kişisel gelişimime katkı sağlayacak her türlü bilgi ve katkıyı sağlayan, güvenini ve desteğini her daim hissettiren saygıdeğer Tez Danışmanım Prof. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ' a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu ve stresli süreçte yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen hayat arkadaşım değerli eşim Mustafa AŞCI' a , büyük sabırları ve desteklerini hep hissettiğim güzel kızlarım Zeynep Cemre AŞCI ve Nil AŞCI'ya ,

Benimle her zaman gurur duyan, çok kıymetli dualarını esirgemeyen, değerli annem Hatun ARIK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇALIŞMA KONUSU VE KAPSAMI.....	5
2.1. İklim Değişikliği ve Etkileri	5
2.2. Afetler ve Proses Kazaları	6
2.3. Doğal Afetler	7
2.4. Teknolojik Afetler	11
2.5. Doğal Afetlerin Tetiklediği Teknolojik Kazalar (Natech).....	11
2.6. Proses Kazalarının Etkileri	28
2.7. İlgili Mevzuat	34
2.7.1. Uluslararası mevzuat	34
2.7.2. Ulusal mevzuat.....	37
2.8. Proses Güvenliği.....	38
2.9. Risk Analiz Teknikleri.....	40
2.10. Kimyasal Proseslerde Risk Analizi	43
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	45
3.1. İklim Değişikliği ve Proses Kazaları Üzerine İstatistiksel Çalışmalar	45

Sayfa

3.2. İklim Değişikliği Etkileri Özelinde Kimyasal Proseslerde Risk Analizine Yönelik Çalışmalar	50
4. MATERYAL VE METOT	57
4.1. Proses Kaza Verilerinin İstatistiksel Değerlendirmesi	57
4.2. Risk Analizi Yapılacak İl ve Kuruluş Seçimi.....	58
4.3. İklim Değişikliğinin Kimyasal Proseslere Etkilerinin Risk Analizi.....	58
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	77
5.1. Proses Kaza Verilerinin İstatistiksel Değerlendirmesi	77
5.2. Risk Analizi Yapılacak İl ve Kuruluş Seçimi.....	80
5.3. İklim Değişikliğinin Kimyasal Proseslere Etkilerinin Risk Analizi.....	82
6. SONUÇLAR.....	93
7. ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. EM-DAT veri tabanı afet sınıflandırması	7
Çizelge 4.1. Çalışmada uygulanan girdi verileri ve atmosferik tankların sel olaylarına karşı savunmasızlığının değerlendirilmesi için model denklemleri.....	67
Çizelge 4.2. Atmosferik ve basınçlı depolama tankları için hasar durumları ve ilgili salım kategorileri.....	70
Çizelge 5.1. Dünya genelinde meydana gelen proses kazalarını tetikleyen doğal afetler (2008-2023, EM-DAT)	77
Çizelge 5.2. Dünya genelinde meydana gelen proses kazalarını tetikleyen doğal afetlerin alt grup dağılımı (2008-2023, EM-DAT)	77
Çizelge 5.3. Dünya genelinde meydana gelen Natech kazalarını tetikleyen doğal afetler (2008-2023, eNatech).....	78
Çizelge 5.4. Natech kazalarında en sık hasar gören ekipman kategorileri (2008-2023, eNatech)	79
Çizelge 5.5. Örnek kuruluştaki yer alan atmosferik tankların verileri	81
Çizelge 5.6. Sel/taşkın karakteristikleri.....	83
Çizelge 5.7. Vaka çalışmasının sonuçları (%10 doluluk oranı)	83
Çizelge 5.8. Vaka çalışmasının sonuçları (%75 doluluk oranı)	84
Çizelge 5.9. Örnek kuruluştaki tanklar için hesaplanan sızıntı delik çapları	88
Çizelge 5.10. Termal Radyasyon, havuz çapı ve alev yüksekliği değerleri.....	91

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Afet tipine göre doğal afetlerin sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.2. Dünya genelinde meydana gelen doğal afetlerin afet türlerine göre dağılımları (%) (2000-2019).....	9
Şekil 2.3. 1960-2019 periyodunda Dünya genelinde meydana gelen hava-iklim kaynaklı doğal afetler.....	9
Şekil 2.4. Türkiye’de 2020 yılı meteorolojik karakterli doğal afetlerin oluşum yüzdeleri.....	10
Şekil 2.5. Salım sonrası olası senaryolar ve sonuçları	28
Şekil 2.6. BLEVE - Kaynayan sıvı genleşen buhar patlaması şematik gösterimi	30
Şekil 2.7. Endüstriyel bir tesiste meydana gelebilecek yangın türleri	31
Şekil 2.8. Dünya’da seveso direktifi gelişimi	37
Şekil 2.9. Endüstriyel faaliyet türlerine göre kaza sayıları	39
Şekil 3.1. 48 Natech kazası kaydına dayalı olarak sel/taşkın şiddetinin karakterizasyonu (h: maksimum su yüksekliği, m)	46
Şekil 3.2. Selin tetiklediği kazalarda etkilenen ekipman kategorileri: (a) genel, (b) depolama tankları özelinde.....	46
Şekil 3.3. 170 kaza kaydına dayalı olarak sel tarafından başlatılan kaza senaryoları..	47
Şekil 3.4. Natech kazalarını tetikleyen doğal afetler.....	47
Şekil 3.5. Natech kazalarına ait nihai senaryolar	48
Şekil 3.6. Soğuk hava dalgası (a) ve sıcak hava dalgası (b) tarafından tetiklenen kazalar için kaydedilen nihai senaryolar arasındaki paylaşım	48
Şekil 3.7. (a) Doğal olayların makro kategorilerine göre Natech olaylarının dağılımı (%), (b) Natech olaylarının sayısı	49
Şekil 3.8. Sel dalgasından etkilendiğinde atmosferik tanka etki eden kuvvetlerin şematik gösterimi	52

Şekil	Sayfa
Şekil 3.9. Sel/taşkın suyunun yatay tanklar üzerindeki etkisini açıklamak için benimsenen şematik gösterim: (a) Geometrik parametrelerin tanımı; (b) Kaldırma kuvvetinin etkisi; (c) Tankın sürüklenme kuvveti etkisini gösteren üstten görünüş; (d) Ekipmanın sürüklenme kuvveti etkisini gösteren yandan görünüş; (e) Sel suyundan etkilenen tankın dış yüzeyi; (f) Ankraj sistemi düzeninin ve parametrelerinin üstten görünüşü (Kesikli alanlar ankrajlı desteği gösterir; M_B : sel suyu tarafından üretilen eğilme momenti; M_T : sel suyu tarafından üretilen tork).....	55
Şekil 4.1. Selden etkilenen bir depolama tankında oluşabilecek hasar modları (Olivar, 2018).....	60
Şekil 4.2. Sel sırasında tankın yer değiştirmesi (a)ve burkulma (b) örneği (e-NATECH).....	61
Şekil 4.3. Sel olaylarına dahil olan atmosferik tankların hasar analizi için metodolojik yaklaşım.....	63
Şekil 4.4. Selin dikey atmosferik tanka etki eden kuvvetlerinin şematik gösterimi	64
Şekil 4.5. Olay ağacı analizi.....	68
Şekil 4.6. Havuz yangınında rüzgarın etkisiyle alev yüksekliği ve alev sürüklenme şematik gösterimi	75
Şekil 5.1. Natech kazalarında en sık hasar gören ekipman kategorilerinin şematik gösterimi (2008-2023, eNatech)	79
Şekil 5.2. Türkiye’de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin illere göre dağılımı	80
Şekil 5.3. Üst seviyeli kuruluşların illere göre dağılımı.....	81
Şekil 5.4. Tank kabuğuna uygulanan net basınçla P_{net} , ile kritik basıncın (P_{cr}) karşılaştırılması	85
Şekil 5.5. Dikey atmosferik tankların sele karşı savunmasızlığının belirlenmesi için şematik yaklaşım.....	86
Şekil 5.6. 3152 nolu benzin tankı için CCPS Tutuşma Olasılığı Hesaplama Modülü’ne parametre girişi ekran görüntüleri	89

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Katrina / Rita kasırgaları	15
Resim 2.2. Japonya’da tsunami etkisiyle sular altında kalmış tank çiftliği görüntüsü	16
Resim 2.3. Sandy kasırgası	16
Resim 2.4. Livorno petrol rafineri sel, İtalya, 09/09/2017	18
Resim 2.5. Arkema Crosby tesisinde oluşan patlama	19
Resim 2.6. Cosmo petrol rafinerisi, Chiba limanı.....	20
Resim 2.7. Sendai Jx Nippon petrol rafineri limanı	21
Resim 2.8. Bazzano-Paganica sanayi bölgesinde hasar gören silolar ve boru hattı.....	22
Resim 2.9. Tohoku depremi ve tsunami.....	24
Resim 2.10. TÜPRAŞ İzmit rafinerisi yangını.....	26
Resim 2.11. TÜPRAŞ İzmit rafinerisi yangını sonrası	26
Resim 2.12. Kahramanmaraş depremi sonrası İskenderun LimakPort yangını, 2023 ...	28
Resim 5.1. Örnek kuruluştaki 3152 nolu Benzin Tankında Yangın Etki Alanı Google Earth görüntüsü	92

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
ΔH_c	yanma ısısı
η_{rad}	radyasyon fraksiyonu
I_p	nokta kaynağı ile hedef (m) arasındaki mesafedir
Q_r	birim zaman (kw) başına termal radyasyon
y^{-1}	geridönüş periyot
CFL	kritik doluluk oranı
D	çap
E	emissivite
fLOC	hasar sıklığı
g	yerçekimi ivmesi
kg/m³	yoğunluk
m	metre
m/s	hız
m²	metrekare
m³	metreküp
Pa	paskal (basınç)
t	zaman
tcr	kritik zamandır
V	hacim
y,	yakıt yanma hızı (m s-1)
ϕ	doluluk seviyesi (%)
ψ	tank kırılganlığı
I	termal radyasyon yoğunluğu

Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	Avrupa Birliği
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı

Kısaltmalar	Açıklamalar
BEKRA	Büyük Endüstriyel Kazalar Bildirim Sistemi
CCPS	Center for Chemical Process Safety – AIChE/ Kimyasal Proses Güvenliği Merkezi
eNatech	Natech Kazaları Veri Tabanı
ETA	Event Tree Analysis-Olay Ağacı Analizi
FMEA	Failure Mode And Effects Analysis-Hata Türleri ve Etkileri Analizi
FTA	Fault Tree Analysis-Hata Ağacı Analizi
HAZOP	Hazard and Operability Analysis-Tehlike Ve İşletilebilirlik Analizi
PODI	Gecikmeli Tutuşma Olasılığı
POEGDI	Gecikmeli Tutuşma Sonucu Patlama Olasılığı
POII	Ani Tutuşma Olasılığı
QRA	Quantitative Risk Analysis-Kantitatif Risk Analizi
TÜPRAŞ	Türkiye Petrol Rafineri
UNISDR	Birleşmiş Milletler Afet Riskini Azaltma Ofisi

1. GİRİŞ

İnsanlar için fiziksel, ekonomik, sosyal ve çevresel kayıplar doğuran, normal yaşamı ve insan faaliyetlerini durdurarak veya kesintiye uğratarak toplumları etkileyen, etkilenen toplumun yerel imkân ve kaynaklarını kullanarak baş edemeyeceği doğa, teknolojik veya insan kökenli olayların sonuçları afet olarak tanımlanmaktadır. Deprem, sel ve fırtına gibi doğal afetler, kimyasal tesis veya petrol ve gaz boru hatlarına zarar verebilmekte, tehlikeli maddelerin salımına yol açmakta ve yangın, patlama, toksik yayılım ile sonuçlanmaktadır. Bu kazalar ise “Doğal Afetlerin Tetiklediği Teknolojik Kazalar (Natech- Natural hazard-triggered technological accidents) olarak tanımlanmaktadır. Yoğun nüfuslu ve sanayileşmiş bölgelerde doğal afetlerin tetiklediği meteorolojik afetler ile ilgili endişeler artmaktadır. Yüksek doğal tehlike riskine maruz kalan alanlarda yaşayanlar, genellikle komşu endüstriyel tesislerden, kimyasal depolardan veya tehlikeli maddelerin bulunduğu diğer kuruluşlardan tehlikeli madde salımı gibi ikincil afet potansiyelinden habersizdirler. Natech kazaları, tehlike tanımlama ve değerlendirme aşamalarındaki hatalar ve risklerin tam ve gerçekçi olarak belirlenememesi sonucu meydana gelmektedir (Cozzani vd., 2010; Misuri vd., 2020). Bu durum, tehlikelerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi alanındaki çalışmaların, ilgili kazaları önleme açısından yeterli düzeyde olmadığını ortaya koymaktadır. Özellikle günümüz afet bölgelerinde, düşük olasılıklı ancak şiddetli Natech olaylarının yönetilmesi gerekmektedir. Natech riskinin nasıl değerlendirebileceği konusunda çok az kılavuz bulunmaktadır. Afet bölgelerindeki kimyasal proseslerde ayrıntılı risk değerlendirmeleri yapılması için ekonomik kaynaklara ve uzman kişilere ihtiyaç vardır.

Tehlike, canlı, çevre, çalışma ortamında istenmeyen durum ve hasarlara yol açabilecek tehlikeli maddeler ya da fiziksel durumlardır. Risk, bu tehlikelere maruziyet sonucu hasarın, yaralanmaların meydana gelme olasılığıdır. Natech kazaları meydana geldiğinde yangın, patlama ve toksik salım gibi tehlikeler ortaya çıkmaktadır. Yangın, ısı, ışık ve sıklıkla duman ve alevlerin görüldüğü yanma prosesidir. Yangının meydana gelebilmesi için ortamda yanıcı madde, oksijen ve ısı kaynağı bulunmalıdır. Yangın, termal radyasyon nedeniyle insanlarda cilt yanıkları hatta ölümlere; yakınlarındaki yanıcı materyallerin tutuşmalarına neden olabilmektedir. Yangınlar jet yangınları, havuz yangınları, ani parlama yangınları, ikincil yangınlar ve ateş topları olarak sınıflandırılabilir. Jet yangınları, yanıcı buhar ya da sıvının boruların sınırlı boyutlu açıklıklarından sızarak tutuşması ile meydana gelen yangınlardır. Havuz yangınları, su üzerinde, sıvı üzerinde ya da yerde havuz şeklinde

toplanmış yanıcı materyallerin tutuşması sonucu meydana gelen yangınlardır. Ani parlama yangınları, yüksek sıcaklığa sahip, kısa süreli ve hızla hareket eden alevler ile görülmektedir. İkincil yangınlar, depolanmış ham maddeler gibi prosesle doğrudan ilgili olmayan yanıcı materyallerin tutuşması ile ortaya çıkan yangınlardır. Ateş topları, turbülent akış ile oluşan küresel alev kütleleridir. Patlama, enerjinin hızlı salımı sonucu hasara yol açan basınç dalgasıdır. Bu dalga patlamanın merkezinden uzaklaştıkça enerji azalmaktadır. Patlamalar enerjinin ortaya çıkış şekillerine göre kimyasal patlamalar (enerjinin kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıktığı olaylar), fiziksel patlamalar (enerjinin mekanik, fiziksel yollarla ortaya çıktığı olaylar) ve nükleer patlamalar (enerjinin nükleer reaksiyonlar sonucu ortaya çıktığı olaylar) olarak sınıflandırılabilirler. Patlamalar şarapnel etkilerle yangınlara ve toksik gaz salımlarına yol açabilmektedirler. Tehlikeli olaylardan sonra toksik bulutlar oluşabilir ve hava koşulları, rüzgâr gibi etmenlerle bu tehlikeli bulutlar yayılabilmekte; canlılar ve çevre üzerinde istenmeyen etkilere yol açabilmektedir. Sıralanan yangın, patlama ve toksik yayılım tehlikelerinin etkilerinin belirlenebilmesi için modelleme yazılımları kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılanlarından biri ALOHA (Areal Location Of Hazardous Atmosphere Software)'dır. PHAST, BREEZE, EFFECTGIS, FLACS, CEBAM, SAFER TRACE, BLEVE Kaza Simülatörü (BIS), AUTOREAGAS, CHARM, ADORA, HAMS-GPS gibi aynı amaçla kullanılan başka yazılımlar da mevcuttur. Ücretsiz ALOHA yazılımı, buhar bulutu patlamaları, kimyasal yangınlar sonucu ortaya çıkan termal radyasyon ve kimyasalların salımı ile meydana gelen toksik hava tehlikelerinin modellenmesi amacıyla tasarlanmıştır. İçerisinde maddelerin fiziksel, kimyasal ve toksik özelliklerinin yer aldığı büyük bir kütüphanesi vardır. Çalışılmak istenilen kimyasal bu kütüphanede yer almıyor ise o kimyasalın özellik bilgilerinin giriş yapılmasına fırsat vermektedir. Kullanımı kolaydır ve uygun olmayan girişler yapıldığında kullanıcıyı uyarmaktadır.

Seveso Direktifi kapsamında üretim ve/veya depolama amacıyla tehlikeli kimyasalları tesisinde kullanan/depolayan işletmeler, Natech kazaları da dahil olmak üzere büyük kazaların oluşmasını önlemek, büyük kazanın meydana gelmesi durumunda etkilerini sınırlamak, seviyelerine göre büyük kaza önleme politikası, güvenlik raporu ve acil durum eylem planı hazırlamak ve sunmak ile yükümlüdürler. Bu işletmeler, BEKRA (Büyük Endüstriyel Kazalar Bildirim Sistemi) Bildirim Sistemi'ne veri girişi sağlayarak üst seviyeli ve alt seviyeli olarak sınıflandırılmaktadırlar. SEVESO Direktifi kapsamında işletmeler proses tehlike analizi yapma yükümlülükleri vardır. Bu analiz için kalitatif ya da kantitatif teknikler kullanılabilirler.

Bu tez çalışmasında, iklim değişikliğinin neden olduğu risklerin kimyasal proseslere etkisinin değerlendirmesine yönelik bir metodoloji önerilmiştir. Metodolojinin uygulanabilirliğini göstermek için bir vaka çalışması da yapılmıştır. Önerilen metodolojinin, dünyada ve ülkemizde yaşanan büyük endüstriyel kazalardan çıkarılan deneyimler ve bilimsel çalışmalar ışığında iklim değişikliğinin neden olduğu sel, yıldırım vb. afetler sonrası meydana gelebilecek proses kazalarının önlenbilmesine önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Alanında ilk olma özelliği taşıyan çalışma sonuçlarının, konu ile ilgili mevzuat yapıcılara, uygulayıcılara ve bilimsel çalışmalara kılavuz olacağı ön görülmektedir.

2. ÇALIŞMA KONUSU VE KAPSAMI

2.1. İklim Değişikliği ve Etkileri

Küresel iklim değişikliği, fosil yakıt tüketimi, endüstriyel, tarımsal vb. faaliyetler sonucu atmosferdeki miktarı ve yoğunluğu artan sera gazları nedeniyle küresel ısınmanın yol açtığı iklim değişiklikleridir. Bu iklim değişiklikleri, aşırı sıcaklık değişimleri, yağışlardaki dengesizlik ve sapmalar, su baskınları, tayfun, fırtına, hortum vb. meteorolojik olaylarda artışlar gibi belirtilerle kendini göstermektedir.

IPCC'nin 6. Değerlendirme Raporu'nda, geçmişteki ve şimdiki durumundan uzaklaştıkça hava olaylarının yaşanacağı, insan kaynaklı iklim değişikliğinin, iklim sisteminin birçok yönünü hâlihazırda etkilediği vurgulanmaktadır. Küresel ortalama sıcaklıklardaki artış devam ederken, önümüzdeki beş yılın en az birinde ısınma ortalamasının geçici olarak 1,5°C üzerine çıkması riski artmaktadır. Yaşanan sıcaklık değişiminin 1,5°C veya 2°C seviyesinin üzerinde gerçekleşmesinin, küresel ısınma seviyesinin aşıldığı anlamına geldiği belirtilmektedir. Şiddetli yağış olaylarının sıklığı ve yoğunluğunun, küresel ölçekte ve kara bölgelerinin çoğunda arttığının altı çizilmektedir. 20. yüzyılın iklimine kıyasla son yıllarda eşi benzeri görülmemiş doğa olaylarının meydana geldiği, küresel yüzey sıcaklığındaki artışla birlikte, birçok hava ve iklim türünün önemli ölçüde değiştiği, aşırı sıcakların sıklığı ve yoğunluğunun arttığı altı çizilen diğer başlıklar arasındadır (IPCC 6. Değerlendirme Raporu, 2021:55).

Gözlemler, iklimin küresel ölçekte değişmekte olduğuna işaret etmektedir. Küresel ortalama sıcaklıklardaki (1 ° C'ye yaklaşan) artış, kara ve deniz buzullarının erimesi ve deniz seviyesinin (17 cm civarında) yükselmesi, iklim değişikliğinin başlıca göstergeleri olarak kabul edilmektedir (IPCC 6. Değerlendirme Raporu, 2021:55). Geleceğe yönelik projeksiyonlar bu değerlerin içinde bulunduğumuz yüzyılda daha da artacağını ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, bu projeksiyonların çoğunluğunda Akdeniz Havzası yağışlarında gelecekte önemli oranlarda düşüş olacağı belirtilmektedir. Bu nedenle, bir Akdeniz ülkesi olan Türkiye'nin iklim değişikliği açısından kapsamlı bir şekilde araştırılması önem arz etmektedir. Türkiye'de sıcaklıklar artmaya devam etmektedir. Bu artış son yıllarda daha belirgindir. Bazı çalışmalar, Türkiye buzullarının yılda ortalama 10 m civarında geri çekildiğini göstermektedir. Kıyılarımızdaki ölçümler ise deniz seviyesinin

yıllık 6 mm civarında yükseldiğine işaret etmektedir (Şen vd., 2017) . Bu değişimlere paralel olarak Türkiye’de son yıllarda şiddetli yağış, fırtına, sıcak hava dalgası, orman yangınları, sel ve taşkın gibi hidrometeorolojik karakterli afet sayılarında önemli artışlar belirlenmiştir. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli’nin dördüncü (AR4) değerlendirme raporlarına göre Türkiye’nin tümü için 5 derecelere varan sıcaklık artışı ve Türkiye’nin güney ve batı kesimleri için %30’lara varan yağış azalması öngörülmektedir. Buna karşılık bazı modeller ile özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi için %20’lere varan yağış artışı tahmin edilmektedir. Ayrıca, Fırat ve Dicle gibi karla beslenen nehirlerin akımlarında %25’lere varan azalma ile akım zamanlarında bir ay mertebesinde erkene kaymaların meydana geleceği ön görülmektedir. Bütün bu öngörülen değişiklikler ışığında hidrometeorolojik karakterli afet sayı ve şiddetinde artışların devam edeceği söylenebilir. Özellikle sıcak hava dalgaları, kuraklık ve orman yangınları artarak ülkemizi tehdit etmeye devam edecektir. Yağışlarda meydana gelebilecek artışlar ise hem sel ve taşkın hem de heyelan olaylarında artışa neden olacaktır. Bu sebeple, iklim değişikliği, afet risklerinin altında yatan nedenlerden birisidir.

Dünya genelinde iklim değişikliğine bağlı doğa kökenli olayların sayısının ve şiddetinin artmasıyla afetlerin tetiklediği teknolojik/ kimyasal, biyolojik, radyoaktif, nükleer ve patlayıcı (KBRN-p) riski olayları, birbiriyle bağlantılı ve ardışık yeni riskler açığa çıkarmaktadır. Teknolojik ve KBRN-p olayları dünya çapında hızla artan sanayileşme ve iklim değişikliği nedeniyle daha sık meydana gelmektedir.

2.2. Afetler ve Proses Kazaları

Afet, “can ve mal kaybına, yaralanmalara, sakatlıklara ve olumsuz çevresel sonuçlara neden olarak, toplumu ekonomik ve sosyal yönden etkileyen, yerel kaynaklar ile üstesinden gelinemeyen, ulusal veya uluslararası yardıma gereksinimin duyulan, sıklıkla doğal nedenler ile oluşan ancak insan kaynaklı nedenlere bağlı olarak da gerçekleşebilen beklenmedik olay” olarak tanımlanmaktadır (EM-DAT 2017; UNISDR 2009; UNISDR 2015).

Afetler, doğal ve teknolojik afetler olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğal afetler, bazı kaynaklarda gelişme hızı (ani gelişen/yavaş gelişen) veya ölçeğine (küçük ölçekli/büyük ölçekli) göre sınıflandırılmaktadır. Şiddetli soğuk, kuraklık vb. yavaş gelişen; deprem, sel, kitle hareketi, heyelan vb. ani gelişen doğal afetlerdendir. Ulaşım kazaları, endüstriyel kazalar, savaşlar vb. ise teknolojik afetler arasında yer almaktadır (Işık vd., 2012).

EM-DAT veri tabanında afetler başlıca doğal ve teknolojik afetler olarak ikiye ayrılmakta ve bu afetlerin altında bulunan alt gruplar Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi incelenmektedir (Bahadır vd., 2018).

Çizelge 2.1. EM-DAT veri tabanı afet sınıflandırması

<i>Doğal Afetler</i>		<i>Teknolojik Afetler</i>	
<i>Afet alt grubu</i>	<i>Ana afet tipi</i>	<i>Afet alt grubu</i>	<i>Ana afet tipi</i>
Jeofizik	Deprem	Endüstriyel kaza	Kimyasal sızıntı
	Kitle hareketi		Çökme
	Volkanik faaliyet		Patlama
Meteorolojik	Aşırı Sıcaklık		Yangın
	Sis		Gaz sızıntısı
	Fırtına		Zehirlenme
Hidrolojik	Sel		Radyasyon
	Heyelan	Ulaşım kazası	Havayolu
	Dalga hareketi		Karayolu
Klimatolojik	Kuraklık		Demiryolu
	Buzul gölünün patlaması		Denizyolu
	Orman yangını	Çeşitli kazalar	Çökme
Biyolojik	Salgın		Patlama
	Böcek istilası		Yangın
	Hayvan kazası		Diğer

2.3. Doğal Afetler

Dünya’ daki durum

Doğal afetlerin büyük bölümünü meteorolojik afetler oluşturmaktadır. Orman yangınları, tarımsal zararlıların istilaları, kuraklık, çölleşme, göl ve deniz suyu seviyesi yükselmeleri, çığ ve seller, hava şartları ile çok yakından ilişkili olan doğal afetlerdir. Yağışlar, şiddetli yerel fırtınalar, tropikal fırtınalar, şiddetli kış şartları, kırağı, don ise hava şartları tarafından doğrudan oluşturulan afetlerdir. Meteorolojik şartlar ile doğrudan ve dolaylı olarak ilişkili olan doğal afetlerin tümü, meteorolojik afetler veya meteorolojik karakterli doğal afet olarak adlandırılır.

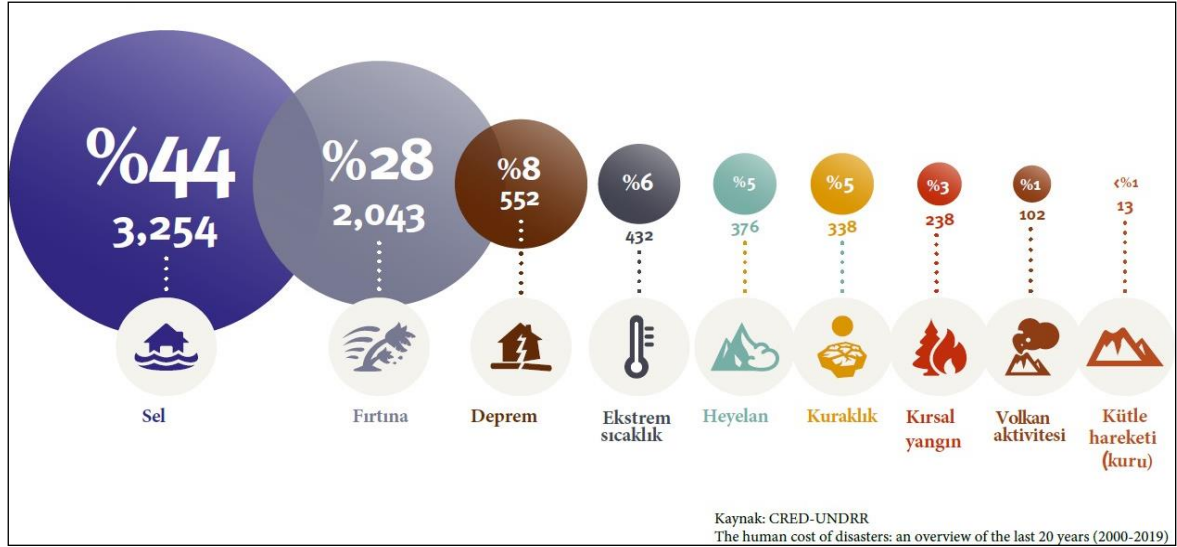
Uluslararası ölçekte afet veri tabanı bulunan Afet Araştırma ve Epidemiyoloji Merkezi (CRED) tarafından doğal afetler; jeofizik, hidrolojik, meteorolojik, klimatolojik, biyolojik ve uzay kaynaklı olmak üzere altı ana grupta sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.1.)



Şekil 2.1. Afet tipine göre doğal afetlerin sınıflandırılması (UNISDR&CRED, 2015)

Dünya genelinde meydana gelen doğal afetlerin afet türlerine göre dağılımına bakıldığında 2000-2019 periyodunda meydana gelen sel, fırtına, aşırı sıcaklık, kuraklık, orman yangını ve heyelan sayılarında, 1980-1999 periyodunda meydana gelen afetlere göre önemli artışlar olduğu görülmektedir.

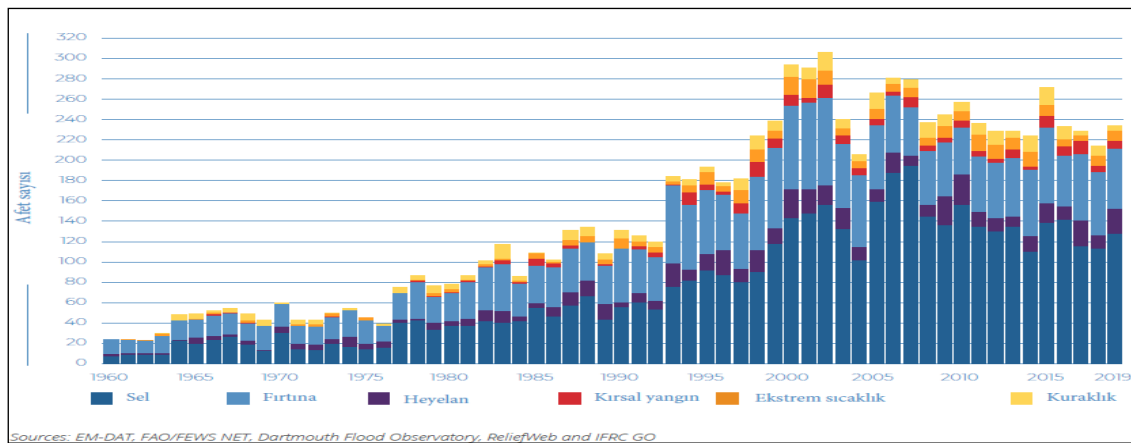
Şekil 2.2’de dünya genelinde meydana gelen doğal afetlerin afet türlerine göre dağılımları görülmektedir. Dünya çapında seller en yaygın görülen afet türü olup bunu fırtınalar izlemektedir. 2000-2019 periyodu içinde Dünya genelinde 3254 (%44) sel, 2043 (%28) fırtına, 552 (%8) deprem, 432 (%6) ekstrem sıcaklık, 376 (%5) heyelan ve 338 (%5) kuraklık olayı meydana gelmiştir. Meteorolojik afetlerin bir alt grubu olan fırtınalar en çok kıyı bölgelerinde etkili olmaktadır. Okyanus kıyılarına yakın alanlarda yaşayan yerleşik topluluklar büyük ölçüde fırtınaların etkisinde kalmaktadır.



Şekil 2.2. Dünya genelinde meydana gelen doğal afetlerin afet türlerine göre dağılımları (%) (2000-2019)

Dünya Meteoroloji Örgütü'nün (WMO) 2020 yılında yayınlanan ‘‘2020 State of Climate Service-2020 İklim Durumu Servisi’’ isimli raporda, Dünya genelinde aşırı hava ve iklim olayları, sıklık, yoğunluk ve şiddet olarak artmaktadır.

1960'lardan beri seller, iklimsel tehlikelerin açık ara en önemlisidir. Şekil 2.3'te 1960-2019 periyodunda dünya genelinde meydana gelen hava-iklim kaynaklı afet sayılarının yıllar bazındaki dağılımları görülmektedir. Sel sayıları yıllar içinde giderek artmıştır.

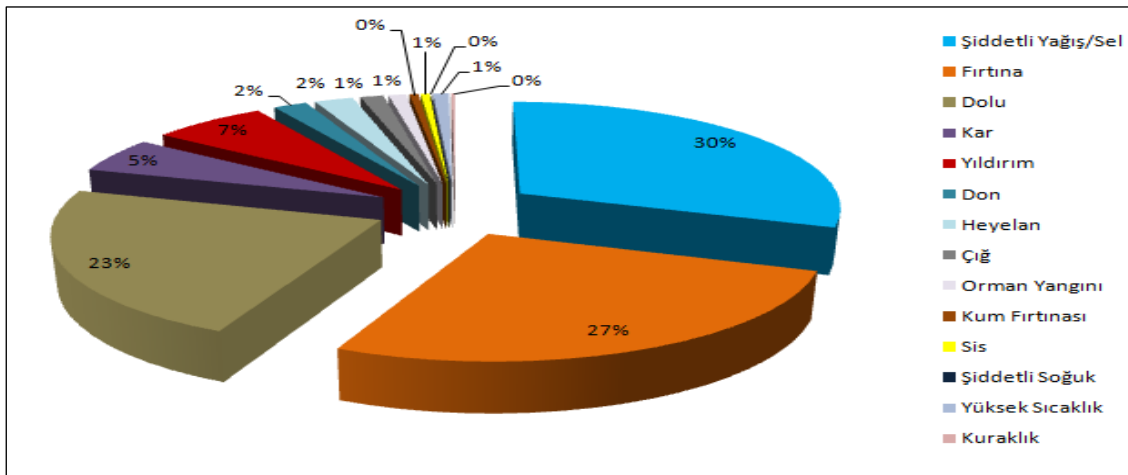


Şekil 2.3. 1960-2019 periyodunda Dünya genelinde meydana gelen hava-iklim kaynaklı doğal afetler (World Disasters Report, 2020)

Türkiye’ deki durum

Büyük bir coğrafya ve farklı iklim bölgelerine sahip olan ülkemizde afetlere dönüşen fazla sayıda ve türde şiddetli meteorolojik olaylar gözlenmektedir. Ülkemizde, başta fırtına, sel, dolu, don, kar ve kuraklık olmak üzere meteorolojik afetler oldukça sık meydana gelmekte ve önemli ölçüde can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. 2020 yılında ülkemizin farklı kesimlerini farklı ölçülerde etkileyen meteorolojik afetler yaşanmıştır. Ülkemizde, 2020 yılı içerisinde toplam 984 meteorolojik karakterli doğal afet rapor edilmiştir. Uzun yıl dağılımına bakıldığında 2020 yılı içerisinde meydana gelen meteorolojik afet sayısı, 1940-2020 periyodu içerisindeki en yüksek değer olarak kayıtlara geçmiştir.

Ülkemizde özellikle 2000’li yıllardan sonra meteorolojik afetlerin oluşum sayılarında belirgin bir artış görülmektedir. Ülkemizde 2020 yılı içinde en fazla meydana gelen meteorolojik karakterli doğal afet, şiddetli yağış/sel olayıdır. 2020 yılı içerisinde toplam 297 adet şiddetli yağış/sel afeti rapor edilmiştir. İkinci sırada ise 262 olay ile fırtına afeti yer almaktadır. 2020 yılında fırtına ve sel afeti ülkemizin büyük bir kısmında görülmüştür. 2020 yılında 223 dolu afeti meydana gelmiş olup, görülen afetler içerisinde üçüncü sırada yer almaktadır. Kar afeti ise tüm yıl içinde toplam 52 kez görülmüş olup meteorolojik karakterli doğal afetlerin %5’ini oluşturmaktadır (Şekil 2.4) .



Şekil 2.4. Türkiye’de 2020 yılı meteorolojik karakterli doğal afetlerin oluşum yüzdeleri

2020 yılında gözlenen ve ülkemizi etkileyen meteorolojik karakterli doğa afetleri içinde;

- Şiddetli yağış/sel (%30),

- Fırtına (%27),
- Dolu afeti (%23)

en büyük payı oluşturmaktadır.

2.4. Teknolojik Afetler

Teknolojik afetler, endüstriyel bir faaliyet, üretim ya da bir hizmet gerçekleştirirken meydana gelen afetlerdir. Teknolojik afetlerin kök nedeni insandır. Teknolojik afetler çok farklı alanlarda gerçekleşebilmektedir. Teknolojik afetler, gerçekleşme alanları, gerçekleşme nedenleri gibi farklı konulara göre farklı şekillerde alt sınıflara bölünebilmektedir. Teknolojik afetler, “endüstriyel kazalar”, “ulaşım-taşımacılık kazaları” ve “diğer kazalar” olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır (Bahadır vd., 2018). Buna göre, endüstriyel kazalar-afetler içinde kimyasal maddelerin dağılması-saçılması, patlamalar, gaz kaçaqları, zehirlenmeler ve radyasyon gibi afetler bulunmaktadır. Ulaşım-taşımacılık kazalarında ise taşımacılıkta meydana gelen (kara, deniz, hava) büyük kazalar yer almaktadır. Endüstriyel olmayan alanlarda ve binalarda meydana gelen insan kaynaklı büyük kazalar (patlama, yangın, çökme vb.) ise çeşitli kazalar grubunda incelenmektedir.

Teknolojik afetler farklı doğal afetlere neden olabildiği gibi, doğal afetler de teknolojik afetleri tetikleyebilmektedir. Buna göre büyük bir deprem neticesinde çok sayıda teknolojik afet (endüstriyel alanlarda patlamalar, gaz sızıntıları, radyasyon sızıntısı vb.) meydana gelmektedir. Diğer yönden bir petrol arıtma tesisindeki bir afet, tüm bölgenin ekolojik dengesini bozup pek çok doğal afetin meydana gelmesini tetikleyebilmektedir. Bu gibi teknolojik afetlerin nedeni deprem ya da benzeri doğal afetler görülse de esasında esas neden bu doğal afetlere yönelik gerekli tedbirlerin alınmamasıdır. Bu nedenle teknolojik afetlerin esas sorumlusu insan olarak görülmektedir.

2.5. Doğal Afetlerin Tetiklediği Teknolojik Kazalar (Natech)

Bir kuruluşun işletimi esnasındaki kontrolsüz olaylardan kaynaklanan ve kuruluşun içinde ve/veya dışında insan sağlığı ve/veya çevre için derhal veya daha sonra önemli etkilere yol açabilen olaylar endüstriyel kaza olarak ifade edilir (Deniz, 2021). Bazı afetler, özellikle meteorolojik afetler, endüstriyel kazaların tetikleyicisi olabilir. Ya da bir başka nedenle

meydan gelen endüstriyel kaza, afete dönüşebilir. Deprem, sel veya yıldırım düşmesi vb. doğal olayların tetiklemesi ile başlayan ve tehlikeli maddelerin salımına neden olan kazalar; literatürde kısaca “Natech” olarak adlandırılmaktadır (Antonioni vd., 2015). Bu tür endüstriyel kazalar özellikle herhangi bir yerde hem doğal afet tehlikesi hem de tehlikeli kimyasallar mevcutsa, başka bir ifade ile tehlikeli kimyasal depolayan, üreten tesisler var ise daha önem kazanmaktadır. Natech kazaları sonucunda genellikle yangın ve patlamalar ile kimyasal gaz salımı ve kaçakları meydana gelebilmektedir.

Natech olayları, özellikle doğal afetlere eğilimli alanlarda, düzenleyici makamlar ve endüstri için artan bir endişe kaynağıdır. Doğal afetler birçok endüstriyel tesiste önemli hasarlar yapmakta, bu hasarların büyüklüğüne bağlı olarak da tehlikeli sonuçlar doğurabilecek ikincil olayların başlamasına neden olabilmektedir. Son yıllarda, Natech olaylarının meydana gelme olasılığının artması, araştırmacıların insanlara, çevreye ve proses tesislerine olası zararı önlemek ve azaltmak için yeni risk analizi yöntemleri çalışmasına olan ilgisini harekete geçirmiştir.

Tehdit faktörlerinin doğal afetler olabildiği bir afeti tetikleyici bir olay oluşturmak için izole, eşzamanlı bir şekilde veya zincirleme reaksiyonla ortaya çıkan iki veya daha fazla tehdit faktörünün kombinasyonunu meydana getirme durumu söz konusu olabilir. Bu bağlamda, doğal afetlerden etkilenen insan sayısı artmaktadır (Salzano vd., 2013). Bunun nedeni, dünyanın birçok bölgesinin birden fazla doğal afete maruz kalması ve risk konusundaki bilimsel bilginin artmasına rağmen, teoriden pratiğe geç aktarımıdır (Komendantova vd., 2013). Karar vericiler yalnızca tek tek riskleri ve tehlikeleri değil, aynı zamanda bunların karşılıklı ilişkilerini de azaltma zorluğuyla karşı karşıyadır. Son yıllarda, Natech risk değerlendirmesine ve çoklu tehlike risk değerlendirmesine daha fazla ilgi gösterilmektedir. Entegre risk analizi için araçlar ve prosedürler oluşturmak amacıyla, Avrupa’da ve dünya çapında çoklu tehlike yaklaşımlarına sahip birçok risk analizi önerilmiştir. Ortak arazi kullanımı uygulamalarının Natech olaylarının riskini azaltmak için son derece etkili bir yöntem olabileceği gösterilmiştir (Cruz vd., 2004:55).

Ek olarak, çoklu tehlike değerlendirmesinde çoğu yöntem tehlikeleri bağımsız olaylar olarak kabul eder. Potansiyel etkileşimler, bir sistemin evrimindeki etmenler ve süreçler arasındaki ilişkilerin yarı nicel bir tahmini ile neden-sonuç matrisi yoluyla analiz edilir.

Belirli doğal olayları göz önünde bulundurarak Natech riskini değerlendirmede tek bir tehlikeyi dikkate alan çalışmalar da mevcuttur. Cruz ve Okada (2008b) tarafından yakındaki endüstriyel tesislerden veya kentsel alanlarda tehlikeli maddeler içeren ekipman veya kimyasalları depolayan tesislerden tehlikeli madde salımını azaltmak için Natech riskinin ön değerlendirmesi yöntemi önerilmiştir. Ancak, bu çalışmanın ardından nitel analizleri içeren daha kapsamlı metodolojiler geliştirilmiştir. Bunlar arasında, Natech değerlendirme çerçevesi ; sel/taşkın eğilimli tesislerde risk analizi için Papyon metodolojisi (El Hajj vd., 2015); arazi kullanım planlamasını içeren boru hatları için kırılabilirlik eğrileri (Lanzano vd., 2013); sel/taşkın risklerinin analizi için sistematik metodoloji (El Hajj vd., 2015); Natech risk indeksi hesaplama aracı RAPID-N (Girgin ve Krausmann, 2013); ardışık etkilerin analizi yoluyla risk değerlendirmeleri için metodoloji (Kadri vd., 2014); coğrafi bilgi sistemi tabanlı metodoloji sayılabilir. Kantitatif analizler açısından, domino etkisi riskini, doğal afetler ile ilişkilendiren kapsamlı kantitatif risk değerlendirme (QRA) metodolojileri geliştirilmiştir (Salzano vd., 2013). Araştırmacılar sel, deprem ve şimşek gibi olaylara odaklanarak en sık görülen hasar türlerini ve bunlarla ilişkili oluşum senaryolarını belirlemek için yeni araçlar geliştirmişlerdir. Diğer ilgili yaklaşımlar: endüstriyel riskte harici olayların etkisinin nicel tahmini için metodoloji (Campedel , 2008); yıldırım çarpması etkisiyle tehlikeli maddelerin LOC'si nedeniyle endüstriyel riskin nicel değerlendirmesi için bir prosedür (Zeng vd., 2021); sismik kaynaklı kimyasal salımdan sonra hava yoluyla taşınan tehlikeli kimyasal dağılımının neden olduğu can kaybı riskini değerlendirmek için genel bir metodoloji (Meng vd., 2015); endüstriyel tesislerin sel/taşkın karşı kırılabilirliğini değerlendirmek için güvenilirliğe dayalı metodoloji (Khakzad ve Van Gelder, 2018) olarak belirtilebilir.

Tek bir tehlike yaklaşımı ve çoklu tehlike yaklaşımı ile Natech olaylarının risk analizine ilişkin literatür incelendiğinde; çoklu tehlike yaklaşımına sahip analizlerin aksine, tek tehlike yaklaşımına sahip analizlerin fazlalığı görülmektedir. Aslında temel bulgu, önerilen risk analizi ve yöntemleri yaklaşımının özellikle tek bir tehlikeye özgü olması ve en çok tartışılanların deprem, sel ve yıldırım olmasıdır (Necci vd., 2016). Bu nedenle, çoğu kurum ve endüstri, belirli bir tehlikeye odaklanan acil durum planları tasarlamış ve uygulamıştır. Bununla birlikte, Birleşmiş Milletler Afet Riskini Azaltma Ofisi (UNISDR), son yıllarda afetlerin yoğunluğu ve sıklığındaki artış eğilimiyle başa çıkmak için, değerlendirmeler, haritalar, izleme ve erken uyarı çoklu tehlike sistemleri kullanılarak afet riskinin azaltılması için çalışmalar yürütmektedir.

Dünya’da meydana gelmiş önemli Natech kazaları

İnsanoğlu ihtiyaçlarını karşılama noktasında sürekli bir arayış içerisinde. Bu arayışın oluşturduğu endüstriyel gelişim özellikle son yüzyılda insanların hayatlarını önemli ölçüde kolaylaştırmıştır. Enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik nükleer santraller, ulaşım ihtiyacını çözmek için daha hızlı ve konforlu ulaşım araçları, uçaklar-trenler, hızlı ve kolay iletişimi sağlayan iletişim ve haberleşme araçlarının geliştirilmesi yakın tarihlerde gerçekleşmiştir. Keşfedilen her yenilik, günümüzde sürekli geliştirilmeye çalışılmaktadır. Tüm yenilikler, farklı ürünler, ulaşım araçları insanlığa önemli faydalar sağlamış, bununla birlikte teknolojik afetlerle birçok kayıp ve zarar da meydana gelmiştir. Dünya üzerindeki birçok toplum bu afetlerden zarar görmüştür. Teknolojik afetler farklı toplumlarda farklı izler bırakmıştır. Örneğin Doğu Avrupalılar ve Ruslar için teknolojik afet denilince ilk olarak akıllara nükleer kazalar gelmektedir. Türk halkının ise afet denilince aklına ilk deprem gelmektedir. Türkiye’de teknolojik afet ya da endüstriyel afet denilince maden ocakları ve gaz sızıntıları ilk akla gelenlerdendir. Hindistan’da gaz sızıntıları neticesinde ölen binlerce insan bulunmaktadır. Bu nedenle birçok Hintli için gaz sızıntısı en kötü afetlerin başında gelmektedir. Neticede özellikle sanayi devriminden sonra tüm dünyada çok şiddetli endüstriyel kazalar-afetler ve ulaşımında büyük kazalar-afetler meydana gelmiştir. Meydana gelen farklı kazalar toplumlarda derin izler bırakmış ve bırakmaya devam etmektedir.

- Rita ve Katrina kasırgaları, kıyı ve açık deniz tesislerinde petrol dökülmesi, Meksika Körfezi, 2005

2005 yılında meydana gelen Rita ve Katrina kasırgaları sonrasında Meksika Körfezi’ndeki kıyı ve açık deniz tesislerinden 30 milyon litre petrol kaçağı meydana gelmiştir (Resim 2.1). 113 açık deniz platformu yok olmuştur, 163’ü ağır hasar görmüştür. Kara ve denize toplam 30 milyon L petrol salımı, küresel petrol fiyatında artışa neden olmuştur. Trajik bir şekilde, Körfez Kıyısı boyunca 1 800’den fazla insan hayatını kaybetmiş ve hasar 108 milyar doları aşmıştır. Katrina Kasırgası’ndan sonra Sundown Energy tesisindeki hasarlar arasında parçalanmış tanklar ve borular gözlenmiştir (Krausmann vd., 2017).



Resim 2.1. Katrina / Rita kasırgaları (ABD, Wikipedia, 2005)

- Sel, Spolana Chemical Works tesisi klor salımı, Çek Cumhuriyeti, 2002

2002 yılında Çek Cumhuriyeti'nde Prag'ın kuzeyindeki Neratovice kasabasındaki Labe nehri üzerinde bulunan “Spolana Chemical Works” firmasından klor gazı kaçağı önemli bir Natech örneğidir (Cruz, 2008a). Natech, Ağustos 2002'de plastik ve hammadde üreten bir kimya fabrikasında gözlemlenmiştir (Resim 2.2). Spolana'da (Çek Cumhuriyeti) sentetik elyaf üretimi yapan bir tesisi su basmıştır. Sel sularından zarar gören sıvı klor kapları, boru bağlantılarından atmosfere ve suya 80 tondan fazla toksik klor salınmasına neden olmuştur. Yetersiz sel önlemleri, salımı engellememiştir. Bu Natech olayında çevredeki ekinler, tarlalar klor bulutu tarafından zarar görmüş veya yok olmuştur, bu da önümüzdeki yıllarda topraklarını ekemeyecek olan çiftçiler için önemli ekonomik kayıplara neden olmuştur. İlginç bir şekilde, sel suları, salınan klorun çoğunu çözerek nötralize etmiş, salım sonuçlarını hafifletmiştir.



Resim 2.2. Japonya’da tsunami etkisiyle sular altında kalmış tank çiftliği görüntüsü (Loss Prevention, 2021)

- Sandy kasırgası, hidrokarbon salımı, ABD, 2012

2012 yılında ABD de meydana gelen Sandy kasırgasında 42 milyar L atık, suya dökülmüştür. Çoklu hidrokarbon dökülmelerine trajik bir örnektir (Resim 2.3).



Resim 2.3. Sandy kasırgası (ABD, 2012) (Louisiana Çevre Kalitesi Departmanı, 2012)

- Heyelan, ANSA tesis yangını, İtalya, 2015

2015 yılında İtalya'nın merkezindeki Pineto kasabasında meydana gelen heyelan sonucu bir metan gazı boru hattında borular hasar görmüş ve büyük bir yangına neden olmuştur. Üç patlamanın ardından sekiz kişi hastaneye kaldırılmıştır. Boru hattı boyunca tedarikin kesilmesiyle durum kontrol altına alınmıştır. Sonuç olarak, kuvvetli rüzgârlar boru hattının

çökmesine neden olmuş ve ardından kaçan gaz, bir elektrik direğinden kopan bir elektrik kabloyla temas ettiğinde patlamış ve üç kişiyi ölmüştür.

- Yıldırım, NGL Water Solutions-Atık su enjeksiyon tesisi yangını, ABD, 2015

17/04/2015 tarihinde Amerika Birleşik Devletleri Greeley'deki bir atık su tesisinde yıldırım düşmesi sonucu sıvı hidrokarbon içeren 3 atmosferik depolama tankı patlaması sonucu yangın çıkmıştır. Son derece yanıcı olan propan, bütan ve pentan gibi atık suda çözünen hafif hidrokarbonların depolandığı bu tesiste yangın kısa zamanda büyümüştür. Bölgede bulunan üç çalışan kurtarılmış, tesis tamamen yanmıştır. Havaya salınan yoğun duman çevre kirliliği oluşturmuştur.

- Sel/taşkın, Cua Ong Ward atık baraj hasarı, Vietnam, 26/07/2015

Kömür madeninin atık barajı sağanak yağmur ve havza su baskını sonucunda 790 numaralı barajın 3 metre uzunluğundaki bölümü kırılmıştır. Arsenik, bor, baryum, kadmiyum, krom, kurşun, manganez, selenyum ve talyum gibi insan sağlığı ve çevre için tehlikeli çok çeşitli maddelerin bulunduğu atık barajından dökülen zehirli çamur, tarım arazilerini, nehirleri ve kıyı bölgelerini ciddi şekilde kirletmiştir. Yerdeki kara çamur kırsal alana yayılmış ve yakın şehrin bir bölümünü gömmüştür. İnsanlar, toprak, tarlalar, bitki örtüsü ve yaban hayatı zarar görmüştür. Quang Ninh'deki kömür madenlerinin yakınında yaşayan insanlar, evlerini kaybetmiştir. Birleşmiş Milletler yayınladığı bir durum raporunda, binlerce evin hasarı ve tahminen 2,7 trilyon VND'den (124 milyon ABD Doları) fazla ekonomik kayıp bildirilmiştir.

- Sel, Livorno petrol rafinerisi hidrokarbon salımı, İtalya, 09/09/2017

Bölgede aşırı yağış sel felaketine yol açmıştır. Petrol depolama tanklarının bulunduğu kuruluştaki depolama sahasının etrafına inşa edilen koruma duvarı yarılarak hidrokarbon depolama tankları sel suları etkisiyle sürüklenmiştir (Resim 2.4). Petrol atıklarının sel sularına karışmasıyla tehlike büyümüştür. Hidrokarbonlarla kirlenmiş su, sel sularıyla birlikte bir dereye akmıştır. Tehlikeli madde ekipleri, çevreleme bariyerleri kullanarak hidrokarbonların yayılmasını engellemiştir ve saha içinde ve saha dışında dökülen atık petrolü toplanmıştır Yangın oluşmamıştır. Ekonomik kayıp büyük olmuştur.



Resim 2.4. Livorno petrol rafineri sel, İtalya, 09/09/2017 (eNatech, 2022)

- Harvey kasırgası /sel, Arkema Crosby tesisi Termal Runaway, ABD, 28/08/2017

28/08/2017 tarihinde Harvey Kasırgası, 500 yıllık taşkın yatağı yüksekliğinin üzerinde sele yol açmıştır (Resim 2.5). Tesisteki peroksit dolu römorklardan istenmeyen tehlikeli reaksiyonları önlemek için, depolama alanının elektrik enerjisi gerektiren bir soğutma sistemi ile sürekli olarak soğutulması gerekmektedir. Bölgedeki Arkema tesisinde oluşan Harvey kasırgasının ardından yaşanan sel afetinde, Arkema Crosby tesisi 500 yıllık taşkın ovasında yer almasına rağmen, yoğun yağıştan kaynaklanan yoğun sel, ekipman tasarım yüksekliklerini aşmış ve tesisin gücünü, yedek gücünü, kritik organik peroksit soğutma sistemlerini ve organik peroksidi serin tutmak için ihtiyaç duyulan yedek soğutmalı ekipmanları kaybetmesine neden olmuştur. Sel nedeniyle elektrik kesildiğinde, römorkların her birinden 36 000 libre peroksit salınmıştır. Kaplarda sıcaklık yükseldiğinde kimyasal bozulmaya başlamıştır. Sonra reaksiyon, geri dönüşü olmayan bir kaçak reaksiyonu (termal runaway) ile "kendi kendine hızlanmaya" başlamıştır. Bu, organik peroksidin bozulmasına ve patlamasına neden olmuş; römorklardan birinde havaya siyah duman salan iki kimyasal patlamanın ardından yangın çıkmıştır. Çok geniş bir alanda zehirli bir duman bulutu oluşmuştur. Bölgede en az 21 kişinin ayrışma ürünlerine, yanan römorktan çıkan dumana ve organik peroksitlere maruz kaldığı bildirilmiştir. 350000 libreden fazla organik peroksit yanmıştır.



Resim 2.5. Arkema Crosby tesisinde oluşan patlama (eNatech, 2022)

- Tohoku (Büyük Doğu Japonya) depremi, Cosmo petrol rafinerisi Chiba limanı yangını, Japonya, 11/03/2011

Entegre bir petrokimya kompleksi içindeki Cosmo petrol rafineri 220 000 BPD kapasitelidir. Rafineri, sismik standartlara göre inşa edilmiş ekipman ve depolama tesislerine (sıvılaşmaya dayanıklı temeller) sahiptir. Depremi ön sarsıntıları başladığında 364 numaralı propan tankının ayakları kırılmış, tank çökerek yakındaki boruları ezmiştir. Tank çiftliğine giden boru hatlarından LPG sızmaya başlamıştır. Bir sıcak nokta (yakındaki buhar parçalama ünitesi) LPG bulutunu tutuşturmuştur. Soğutma sistemleri açılmasına rağmen LPG tankları arasında yangın çıkmıştır (Birinci tank BLEVE). Çiftlik genelindeki borular, güç eksikliği nedeniyle otomatik olarak kapanamamış ve kayda değer termal akışlar, manuel kapatmayı imkânsız hale getirmiştir. Denizden gelen rüzgâr, yangının karadan söndürülmesini imkânsız hale getirmiş; tank çiftliğindeki yangının kendi kendine sönmesine ve çevredeki tesislerin alevlerden korunmasına karar verilmiştir. Gece boyunca bir dizi başka üç BLEVE meydana gelmiştir (2 000 m³ lük beş LPG küresi patlamıştır). 1000 yerel sakin, 8 saat boyunca tahliye edilmiş ve biri ciddi olmak üzere altı çalışan yaralanmıştır. Beşi patlayan on yedi tank zarar görmüş (BLEVE, 600 m'lik bir ateş topu dahil), yakındaki borular ve binalar yıkılmış, 5 227 ton LPG yanmıştır. Isı dalgaları nedeniyle birkaç bitüm depolama tankında sızıntılar olduğu gözlenmiştir. Sahadaki yollar ve binalar, toprak sıvılaşması nedeniyle

hasar görmüştür. Şok dalgaları ve patlamalardan çıkan molozlar, petrokimya tesislerinde yangınları tutuşturmuştur. 100 milyon € ekonomik kayıp yaşanmıştır (Resim 2.6).



Resim 2.6. Cosmo petrol rafinerisi, Chiba limanı (Wikipedia, 2022)

- Thoku Tsunami, Sendai Jx Nippon petrol rafineri yangını, Japonya, 2011

Japonya'da 2011' de meydana gelen 9 büyüklüğündeki deprem nedeniyle 1,5 km² alana sahip olan Sendai Limanı'ndaki rafineri ve petrokimya kompleksinde depolama tanklarında çatı hasarı ile petrol sızıntısı meydana gelmiştir. Deprem sonrası oluşan tsunami felaketin boyutunu arttırmıştır. Tsunami verileri, limandaki yükseklik: 7–8 m; sahadaki su yüksekliği: 2,5–3,5 m olarak bildirilmiştir. Tesis, sismik standartlara göre inşa edilmiştir, ekipman ve depolama tesisleri (sıvılaşmaya dayanıklı temeller) mevcuttur ve tsunami koruması 3 metre yüksekliğinde deniz duvarı (limanda tahmini dalga seviyesi: 2–3 m) mevcuttur . Depremle birlikte soğutulmamış LPG stokları alev almış, ardından tsunami bir dizi dalga halinde gelmiş, hasarlı borular limana ham petrol ve akaryakıt sızdırmıştır. 4400 litre petrol açığa çıkmıştır. Küçük depolama tankları tsunami tarafından süpürülmüş, yangın yakındaki bitüm depolama tanklarına sıçramıştır. Yangın, sıvı kükürt ve asfalt içeren yakındaki birimlere yayılmıştır. Tsunaminin depolama birimlerine verdiği zarar, yangının yayılmasını kolaylaştırmıştır. Kükürt yanması ile zehirli yanma ürünleri oluşmuştur. Katalitik parçalama reaktörü çökmüş, ısı eşanjörleri hasar almıştır. Tsunami kısmen doldurulmuş küçük (çap 20-40 m) depolama tanklarını süpürmüş veya ezmiştir. Çok sayıda boru rafları, arabalar, konteynırlar, vb. hasar görmüştür. 4 kişi hayatını kaybetmiş, 200 kişi yaralanmıştır. Hasar

920 milyon € ekonomik kayıpla sonuçlanmıştır. Operasyonların yeniden başlaması, 2 yıl sürmüştür (Resim 2.7).



Resim 2.7. Sendai Jx Nippon petrol rafineri limanı (e Natech, 2022)

- Thoku Tsunami, Hiron Thermal güç ünitesi hasarı, Japonya, 2011

Japonya'nın elektriğinin çoğu termik santraller tarafından üretilmektedir (2010'da nükleer enerji için %29'a karşı günümüzde %63). Tohoku bölgesindeki kıyı şeridinde termik ve nükleer enerji santrali mevcuttur. Termal elektrik üretimi iki büyük şirket ve birkaç küçük şirket arasında paylaştırılmıştır. Tesiste buhar türbinleri her birimde, zemin seviyesinden 12 m yükseklikte (deniz seviyesinden 3–6 m yükseklikte) birinci katta yer almaktadır. Buhar türbinlerinde deprem ve sonrası tsunamiden kaynaklanan hasar, öncelikle dış mekân tesislerinin altındaki toprağın sıvılaşmasından kaynaklanmıştır. Binaların kendileri depreme karşı güçlendirilmiştir. 11 ve 12 Mart 2011 tarihlerinde 4 milyondan fazla insan elektriksiz kalmış ve sonraki aylarda Tokyo'yu çevreleyen Kanto bölgesinde 10 milyon evde sık sık elektrik kesintileri yaşanmıştır.

- Tropikal Calvin Fırtına/Sel, PEMEX rafineri yangını, Meksika, 14/06/2017

Rafineri tropikal yağmurların neden olduğu sel nedeniyle sular altında kalmıştır. Sel rafinerinin atık tutma havuzlarının taşmasına ve yanıcı yan ürünlerin dökülmesine neden

olmuş; taşma nedeniyle drenaj sistemlerinde yüzen petrol, elektrik trafosunda ateşleme kaynağıyla buluşmuş ve yangın başlamıştır. Pompa dairesindeki bir elektrik trafosunda kısa devre nedeniyle petrol tutuştuğunda pompa evinde iki patlama olduğu bildirilmiştir. Hızla salınan petrol ürünleri şiddetli bir şekilde yanmış, 500 000 litre petrol tükenmiş ve büyük bir siyah duman sütunu oluşmuştur. Bir Premex itfaiyecisi ölmüştür. Dokuz kişi yaralanmıştır. Civardaki sakinler siyah yağmurun gözlerde tahrişe neden olduğunu bildirmiştir. Büyük alanda çevresel kirlilik oluşmuş, ekili arazi, orman, göl, dere kirliliği meydana gelmiştir.

- L'Aquila depremi, Bazzano-Paganica sanayi bölgesinde kaza, Almanya, 2009

2009'da, İtalya'nın merkezinde, L'Aquila kasabasında normal bir fay üzerinde yaklaşık 8 km derinliğinde olan 6,3 Mw'lık bir deprem meydana gelmiştir. Deprem sırasında L'Aquila'nın çevresinde bulunan üç sanayi bölgesi (Bazzano-Paganica, Pile ve Sassa) incelenmiş ve spesifik ve tekrarlayan hasar gözlemlenmiştir. L'Aquila kasabasının 7 km güneyindeki Bazzano-Paganica sanayi bölgesinde yer alan ve polipropilen boncukları depolayan üç uzun çelik silonun ciddi hasar gördüğü bildirilmiştir. Binalar ağır hasar görmüş, birçok gaz boru hattı kırılmıştır (Resim 2.8).



Resim 2.8. Bazzano-Paganica sanayi bölgesinde hasar gören silolar ve boru hattı (eNatech, 2022)

Başta L'Aquila şehir merkezinde olmak üzere ciddi hasarın olduğu bölgelerde doğal gaz ve elektrik kesilmiş ve çok sayıda kullanıcının bağlantısı kesilmiştir. Depremin yol açtığı hasar nedeniyle su, elektrik ve telefon hizmetlerine yönelik şebekeler kısa süreliğine kesintiye uğramıştır.

- Yıldırım, Ibbenbüren klor işleme ünitesi klor salımı, Almanya, 2009

Ünitede, hücre odası içinde elektrolizin gerçekleştiği düşük yükseklikte (birkaç on cm) ve geniş yüzeyli (birkaç on m²) hücreler içerir. Hücrelerde üretilen sıcak ve ıslak klor gazı, hücre odasından birincil klor işlemeye giden, ıslak gaz soğutma ve düşük basınçlı sıkıştırmadan oluşan bir toplama borusuna beslenir. Bu tanklar doğrudan hücre odasının önündedir. Normal çalışma sırasında acil durum güç iletken rayı, dahili güç dağıtımı tarafından desteklenir. Yıldırım dahili güç şebekesinde voltaj düşüşüne neden olmuş, acil durum anahtarı açılmış ve acil durum güç jeneratörü çalıştırılmıştır. Voltaj düşüşü çok kısa bir süre(30ms - 200ms) meydana gelmiştir. Acil durum güç jeneratörünün acil durum iletken rayına bağlanamadığı bu kısa sürenin ardından dahili ağ geri yüklenmiştir. Çelişkili komutlar ablukaya neden olduğundan açılan anahtar kapatılamamıştır. Acil durum iletken rayının tamamının, dahili ağ mevcutken birimleri destekleyecek gücü yoktur. Klor işleme ünitesinin orta basınçlı kompresörü arızalanmış, devamında cıva pompalarının arızalanması, doğru akımın negatif kutbuna bağlı olan hücrenin çelik tabanını kaplayan cıva yüzeyinin kırılmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, hücrede doğrudan çıplak çelik katotta hidrojen oluşmuştur. Ayrıca 6kA devresi potansiyometre ile izlenmemektedir. Sonuç olarak operatör, tesisin durumuna ilişkin eksiksiz ve doğrulanmış bir genel görüş elde edememiştir. Bu, klor işleme sisteminde yaklaşık 30 dakika boyunca tehlikeli bir klor/hidrojen karışımının oluşmasına neden olmuştur. Klor-hidrojen karışımının patlaması meydana gelmiştir. Toplama borusundaki ilk patlamadan sonra, kompresör tarafından alçak basınç sistemine hava çekilmiş ve müteakip tutuşma ve infilaklar meydana gelmiştir. Kaza sırasında 500 kg'a kadar klor gazı açığa çıkmış, gazın çoğu patlayan tanklar yoluyla salınmıştır.

- Colle Cretone di Mutignano'da heyelan, SNAM metan boru hattı sızıntısı, yangın ve patlama İtalya, 2015

Eğim hareketine neden olan şiddetli yağmurlar nedeniyle meydana gelen heyelan, Snam enerji şirketine ait doğal gaz boru hattının bükülerek hasar almasına neden olmuştur. Kırılan boru hattından yüksek derecede yanıcı metan gazı havaya salınmıştır. Yanıcı buhar/hava karışımı ateş kaynağıyla buluşunca tutuşmuş ve patlamıştır. Bir jet yangını başlamış ve gaz beslemesi kesilene kadar yanmaya devam etmiştir.

- Tohoku (Büyük Doğu Japonya) depremi, Fukuşima nükleer santrali kazası, Japonya, 2011

1 Mart 2011'de gerçekleşen Fukuşima Nükleer Santrali kazası önemli bir Natech kazasıdır. Tohoku'da 9.0 büyüklüğünde meydana gelen bu deprem, Japonya'da büyük bir tsunamiye yol açmış ve atmosfere radyoaktif madde salınmasına sebep olmuştur (Resim 2.9). Uzmanlar, kazayı Çernobil felaketinden sonra en büyük ikinci nükleer kaza olarak tanımlamaktadır. Tsunami elektrik şebekesine zarar vermiş ve santralin jeneratörlerini su basmıştır. Bu, santralde bir elektrik kesintisine neden olmuş, bunu takip eden soğutma eksikliği santralde kısmi erime ve patlamalara yol açmıştır. Santralin 5,7 metrelik bir tsunamiye dayanabilecek önlem amaçlı bir duvarı vardır; fakat depremde santral 14 metrelik bir tsunamiye maruz kalmış ve duvarın herhangi bir koruyucu etkisi olmamıştır. Tesisin elektrik şebekesiyle olan bağlantısı ciddi hasar almıştır. Jeneratörlerde dahil olmak üzere tüm santral sular altında kalmıştır. Soğutma sisteminin devre dışı kalmasıyla reaktör çekirdeğindeki kısmi erimeyle tepe kısımlar havaya uçmuştur. Nükleer sızıntı meydana gelmiştir. Santraldeki nükleer sızıntının tehlike derecesi, Uluslararası Nükleer Olay Ölçeği'ne göre 7'ye yani Çernobil reaktör kazasıyla aynı seviyeye çıkarılmıştır. Çok fazla sayıda ölüm vakaları olmuştur. Tohoku içme sularında radyasyona rastlanmıştır. Patlamanın etkisiyle açığa çıkan radyasyon İzlanda'ya kadar ulaşmıştır.



Resim 2.9. Tohoku depremi ve tsunami (Japonya, 2011) (Wikipedia, 2011)

Türkiye’de meydana gelmiş önemli Natech kazaları

Ülkemizde, 1999 Marmara depreminin TÜPRAŞ rafinerisi başta olmak üzere bölgedeki birçok tesisi etkilediği, tesislerdeki boru hatları ve depolama tanklarının en çok etkilenen

ekipmanlar olduğu bilinmektedir. Özellikle eski tesislerdeki ekipmanlar, korozyon, malzeme yaşlanması, yetersiz bakım vb. nedenler bu kazalara yönelik önemli tehlike kaynaklarını oluşturmaktadır.

- Kocaeli depremi, TÜPRAŞ İzmit rafineri yangını, 17/08/1999

17 Ağustos 1999'da gerçekleşen Kocaeli depremi ($M_w = 7,4$) Türkiye'nin modern tarihindeki en yıkıcı doğal afetlerden biridir. Rafineride beklenen maksimum deprem büyüklüğü $M_w = 6,5-7,0$ olarak hesaplanmış, olası bir depremin süresi 20-25 sn olarak tahmin edilmiştir. 1999 Kocaeli depremi (45 saniye), bu tahminlerin doğru olmadığını göstermiştir. Bu depremle meydana gelen doğal afetlerin tetiklediği teknolojik kazalardan(Natech) biri olan TÜPRAŞ İzmit Rafineri Yangını, boyutları ve sonuçları nedeniyle özellikle önemlidir(Resim 2.10-2.11). Depremden kısa bir süre sonra rafinerinin üç farklı yerinde aynı anda yangınlar başlamıştır. Kimya deposunda başlayan ilk yangın sınırlı büyüklüktedir. Raflarda depolanan malzemeler yere düşmüş, cam kaplar kırılmış ve içerikler yere yayılmıştır. Yangın yarım saatten kısa sürede söndürülmüştür. Borularda bulunan oldukça yanıcı maddelerin tutuşmasıyla başlayan ikinci yangın, 4 saat sonra söndürülmüştür. Üçüncü ve en büyük yangın, rafinerinin tank çiftliği alanının yaklaşık olarak ortasında yer alan nafta tankında meydana gelmiştir. Ciddi çabaların ardından yangın kontrol altına alınmış ve kontrollü bir şekilde yanmaya bırakılan tank(TK-242) dışındaki tüm tanklar 20 Ağustos'ta söndürülmüştür. TK-242'deki yangın 1 gün sonra nihayet söndürülmüştür. Meydana gelen felakette, bir ham petrol işleme tesisi (Tesis-25), bir boru hattı, 5 depolama tankı, yükleme ve boşaltma iskelesi ağır hasar görmüş; büyük nafta tankı çiftliği yangını sırasında 6 nafta tankı ve 30 500 ton ürün tamamen yanmış; bir soğutma kulesi yanmıştır. Can kaybı veya yaralanma olmadığı bildirilmiştir. 250 000m³ ham petrol ve 100 000m³ petrol ürününün atmosfere salınımıyla hava ve su kirliliği meydana gelmiştir. Özellikle yangınla mücadele çabaları kaynaklı deniz kirliliği önemlidir. Denizdeki polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) konsantrasyonları artmıştır. Olayın ardından kriz merkezi tarafından rafineri çevresindeki 5 km'lik bir bölge için tahliye emri çıkarılmış ve uluslararası yardım istenmiştir. Yangının kaynayan sıvı genişleyen buhar patlamasına (BLEVE) neden olmasını önlemek için yanan nafta tankı ile LPG tankları arasına bir bariyer inşa edilmiştir. Yangın, rafinerinin ham petrol, benzin ve LPG tanklarını ve yakındaki gübre fabrikasının amonyak depolama tanklarını etkilemediği bildirilmiştir. TK-242 tankı yanmaya bırakıldığında olası domino etkisi meydana gelmemiştir (ramak kala) .Depreme yönelik

kritik bileşenlerin ve yapıların analizi yeniden değerlendirilerek 2000 yılında bir afet yönetim planı hazırlanmıştır. Bu plana iki Natech senaryosunu eklenmiştir.



Resim 2.10. TÜPRAŞ İzmit rafinerisi yangını (Türkiye, 1999) (eNatech, 2022)



Resim 2.11. TÜPRAŞ İzmit rafinerisi yangını sonrası (Türkiye,1999) (eNatech, 2022)

- Kocaeli depremi, AKSA Akrilik Kimya San. A.Ş. Akrilonitril salımı, 17/08/1999

AKSA Akrilik Kimya San. A.Ş. İzmit Körfezinde yer alan 550 000 ton/yıl kapasiteye sahip akrilik elyaf üretim tesisidir. Tesiste büyük miktarlarda depolanmakta olan akrilonitril(AN), akrilik elyaf üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır; son derece yanıcı, toksik, su

ortamı için tehlikeli ve kansere neden olabilen tehlikeli bir kimyasaldır. Depremde tesiste yer alan üç AN depolama tankının hasar görmesi sonucu yaklaşık 6500 ton AN salımı olmuştur. Dökülen AN sıvısının önemli bir kısmı muhafaza setlerinden taşmış ve drenaj kanalından denize ulaşmıştır. Depremin beton muhafaza setlerinin dibinde yarattığı çatlaklar nedeniyle, önemli miktarda AN toprağa sızmıştır. AN son derece yanıcı olmasına rağmen olay sırasında yangın çıkmamıştır. İlk müdahale sırasında 27 işçinin zehirlendiği bildirilmiştir (Hürriyet, 1999b). Askeri yangınla mücadele ekibinin bir üyesi komaya girerken, diğerleri kötü şekilde etkilenmiştir (Yargıtay, 2004). Tesisin sızıntı yapan depolama tanklarına 200 m mesafede bulunan hayvanat bahçesindeki hayvanlar ve bitki örtüsünde bulunan bitkiler ve çam ağaçları ölmüştür. Tesis çevresindeki yerleşim yerlerinde yaşayanlar ses kısıklığı, baş dönmesi, mide bulantısı, solunum problemleri, cilt tahrişi, baş ağrısı, göz ve burun tahrişi gibi akut toksisite semptomları göstermiştir. Yeraltı suyunun AN seviyelerini geri kazanmak için yeraltı suyu, tesisin atık su arıtma tesisinde arıtılmıştır. 5 yıl içinde AN konsantrasyonu(< 80 000 mg / l) düşürülmüş ve stabilize edilmiştir (Krausmann vd., 2017).

- Kahramanmaraş depremi, İskenderun LimakPort liman işletmeciliği yangını, 06/02/2023

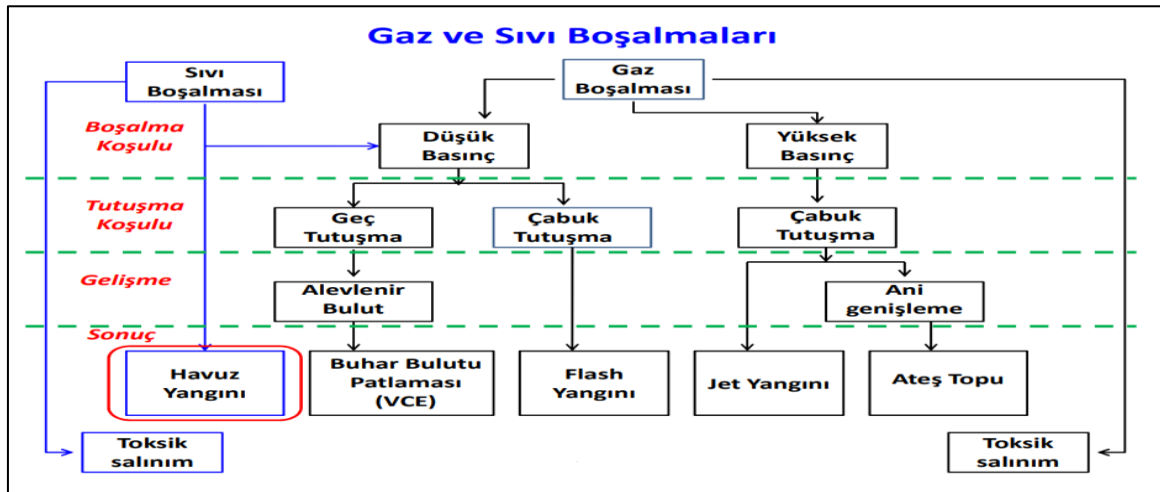
6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş merkezli depremler, önemli bir liman kenti olan ve geniş sanayi hinterlandına sahip olan Hatay'ın İskenderun ilçesinde de büyük yıkımlara yol açmıştır. Depremin ardından LimakPort İskenderun Uluslararası Liman İşletmeciliği'nde yangın çıkmış ve faaliyetlere ara verilmiştir. Yangınlar 13 Şubat'a kadar devam etmiştir. Karadan, havadan ve denizden müdahaleyle uzun sürede söndürülebilmiştir. Deprem esnasında konteynerlerin birçoğu da şiddetli sarsıntı ile devrilip yan yatmıştır. Yangın sonucunda yaklaşık 1700 konteynerin yandığı (Resim 2.12) ve yaklaşık 2 000 konteynerin da depremle hasar gördüğü bildirilmiştir. Yangın büyük ekonomik kayıplara sebep olmuştur (e-Natech).



Resim 2.12. Kahramanmaraş depremi sonrası İskenderun LimakPort yangını, 2023 (Wikipedia, 2023)

2.6. Proses Kazalarının Etkileri

Ekipman arızaları, insan hataları, doğal afetler, sabotaj, terör saldırıları, yangınlar vb. nedeniyle istenmeyen kimyasal salımlar meydana gelebilir ve bu yangın, patlama ve toksik yayılım ile sonuçlanabilir. Tehlikeli kimyasal salımından sonra ortaya çıkan sonuçlar çoğunlukla yayılım, jet yangını, havuz yangını, parlama yangını, ateş topları, BLEVE, buhar bulutu patlamalarını içerir (Şekil 2.5). Yangınlardan kaynaklanan termal radyasyon ve patlamanın aşırı basınç etkileri hasara neden olur (Vatansever vd.,2021).



Şekil 2.5. Salım sonrası olası senaryolar ve sonuçları

Patlama

Patlama, enerjinin hızlı bir şekilde serbest bırakılmasıyla üretilen hasara neden olan bir şok/basınç dalgasıdır. Patlama dalgası enerjisi patlamanın merkezinden uzaklaştıkça azalır.

Buhar bulutu patlaması

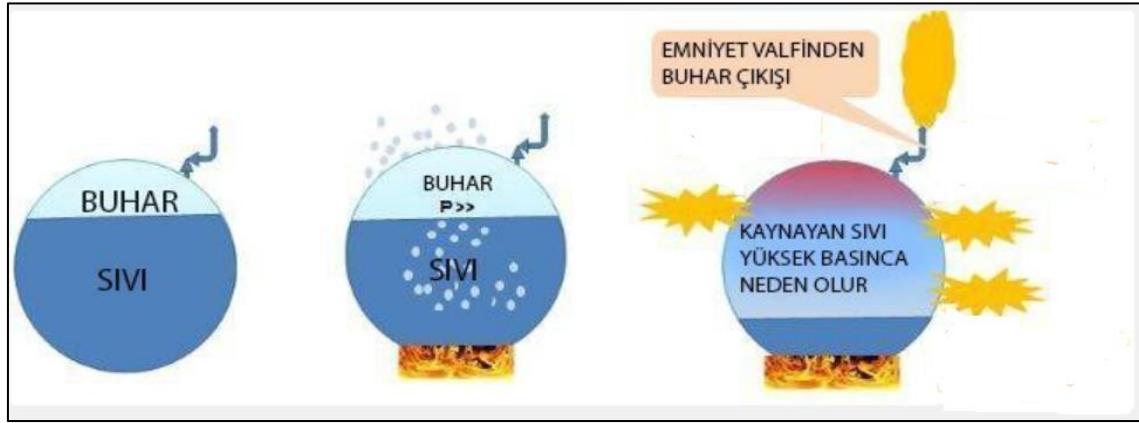
Buhar bulutu patlaması, bir depolama tankından, işlem kabından, taşıma teknesinden veya boru sisteminden çıkan yanıcı buharın, buhar, gaz, aerosol veya sis karışımının aşırı basınç oluşturan yanıcı buhar bulutu olarak tutuşmasıdır. Patlamanın etkisi, patlamanın meydana geldiği alanın sınırlanmasına bağlıdır.

Gaz patlaması ile buhar bulutu patlaması arasındaki fark, maddenin oda koşullarında gaz veya sıvı durumu ile ilgilidir. Örneğin, benzin yakıtı sıvıdır ve bir buhar bulutu oluşturarak buharlaşabilir. Buhar bulutu patlamaları; kapalı patlamalar, kısmen kapalı patlamalar ve serbest patlamalar olarak üç tipe ayrılabilir. İç patlamalar olarak da adlandırılan kapalı patlamalar, bir tankta, boru hattında vb. meydana gelirken, kısmi kapalı patlamalar bir binada meydana gelir. Serbest patlamalar, açık havada veya uzayda bulutların yanmasını kapsar (Bjerketvedt vd., 1997).

Kaynayan sıvı genişleyen buhar patlaması (BLEVE)

BLEVE, bir tank içerisinde bulunan sıvının atmosfer basıncındaki kaynama noktasının çok üstündeki bir sıcaklığa ulaşarak içerisinde bulunduğu tankı parçalamasıdır. BLEVE, tank yangına maruz kaldığında ve alevlerin tankı zayıflatığı durumlarda meydana gelir. Şekil 2.6 'de BLEVE oluşumu şematik gösterimi sunulmuştur. Normal şartlarda bir tankta sıvı ve gaz fazları bir arada bulunur. Tank ısındıkça, içindeki sıvının sıcaklığı ve basıncı artar. Sıvının sıcaklığı, normal kaynama noktasının üzerine çıkar. Bu noktada, emniyet valfinden çıkış ya da tankın bir noktasındaki açıklık ile tank içindeki basınç hızla düşer ve sıvı çok hızla buharlaşır. Böylece oluşan basınç tankı parçalar ve çok yıkıcı patlamalara neden olur. Tank içerisinde yanıcı bir sıvı veya LPG varsa, patlama sonrasında bir alev topu oluşabilir. Alev topunun şekli ve büyüklüğü tank içindeki sıvı miktarına ve patlamanın şekline bağlıdır. Alev topunun kalıcılığı yakıt kütlesine bağlıdır. Bir BLEVE'ye yol açabilecek unsurlar aşağıda sıralanmıştır:

- Tankın standartlara uygun olmaması
- Tankın bakım onarımının uygun olmaması
- Korozyon
- Emniyet valfinin düzgün çalışmaması
- Tankın üzerinde mekanik hasarlar
- Malzeme yorgunluğu
- Tankın yangına maruz kalması



Şekil 2.6. BLEVE - Kaynayan sıvı genleşen buhar patlaması şematik gösterimi

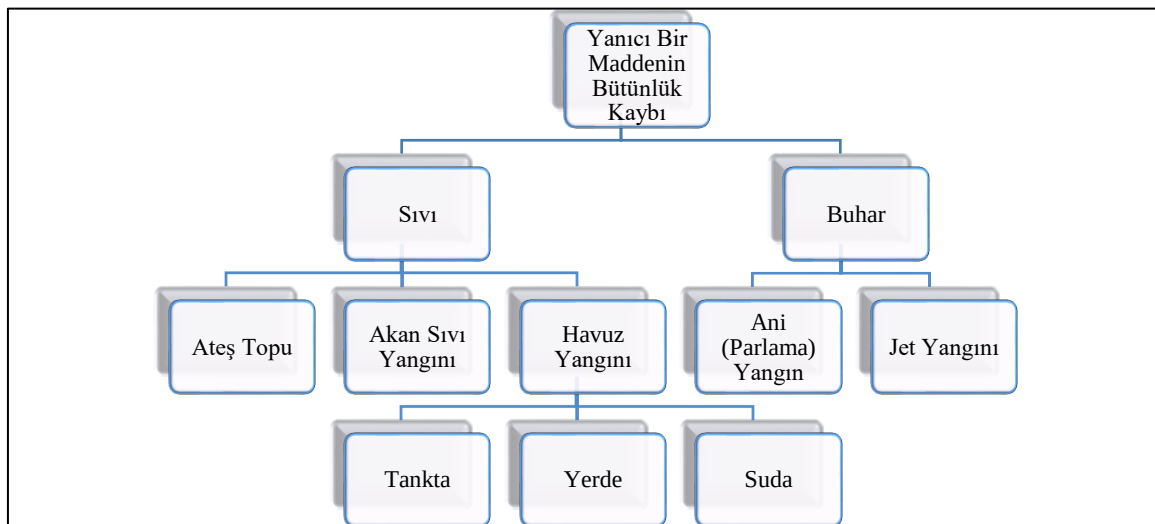
Yangın ve yanma çeşitleri

Yanma, bir yakıtın bir oksidanla reaksiyona girerek çeşitli ürünler ortaya çıkardığı ve enerji açığa çıkardığı kimyasal bir reaksiyondur. Yanma her zaman gaz fazında gerçekleşir: sıvı yakıtlar alevlerden gelen ısı nedeniyle buharlaşır ve ardından havadaki oksijenle reaksiyona girer; katılar, yüksek sıcaklık nedeniyle ayrıştırılır ve salınan gazlar, genellikle havadaki oksijen ile reaksiyona girer. Alevler, yüksek sıcaklıkta reaksiyona giren bu gazlardır. Yanma ürünleri, yanmamış yakıtı da içeren duman olarak salınır. Kazara çıkan yangınlarda, yanıcı gaz veya buharın oksijenle zayıf karışması nedeniyle yanma genellikle oldukça kötüdür ve büyük miktarlarda siyah duman oluşur.

Yanmanın meydana gelmesi için üç element gereklidir: yakıt, oksitleyici ve ateşleme kaynağı. Bu üç element birbirine bağlıdır ve yanma mümkündür. Başka bir unsur da kimyasal zincirleme reaksiyonun meydana gelmesidir. Yanmanın gerçekleşmesi için bazı ek koşulların da yerine getirilmesi gerekir: oksitleyici ve yakıt yeterli miktarlarda bulunmalı, yakıt tutuşmaya hazır olmalı, minimum yoğunluğa sahip olmalıdır.

Endüstriyel tesislerde veya tehlikeli maddelerin taşınmasında meydana gelebilecek yangınlar, kullanılan yakıtın durumuna ve yanmanın meydana geldiği koşullara göre sınıflandırılabilir. Yanıcı bir malzemenin bütünlük kaybının bir sonucu olarak meydana gelebilecek çeşitli yangın türlerini gösteren basitleştirilmiş bir diyagram Şekil 2.7’ da verilmiştir.

Katı maddelerin yanması da büyük yangınlara neden olabilir, ancak proses kazalarına dahil olan en yaygın yakıtlar genellikle sıvılar ve gazlardır. Bu nedenle kaza, yanıcı bir sıvının bütünlük kaybıyla başlar. Sıvı, salım zeminde - set varsa sınırlı bir alanda - veya su üzerinde bir havuz oluşturabilir. Bir patlama nedeniyle çatısını kaybeden bir tank için de sonuç benzerdir. Bu durumların hepsinde, ateşleme/tutuşma bir yangın başlatacaktır (tank yangını, havuz yangınının özel bir durumu olarak kabul edilebilir). Akan sıvı yangını farklı özelliklere sahiptir ve bazen söndürülmesi çok zordur. Sıvı ani bir basınçsızlaşma nedeniyle ani buharlaşmaya maruz kalırsa, muhtemelen bir ateş topu oluşacaktır. Malzeme salımı bir gaz veya buhar olduğunda, tutuşma hemen gerçekleşirse bir jet yangını olur. Tutuşma hemen olmazsa, belirli meteorolojik koşullar altında yanıcı bir karışım içeren bir bulut birikebilir; bu bulutun tutuşması ani bir yangına(parlama yangını) neden olur. Yakıtın buharlaşması nedeniyle bir havuz ateşlenmezse, ani yangın yine meydana gelebilir (Şekil2.7).



Şekil 2.7. Endüstriyel bir tesiste meydana gelebilecek yangın türleri

Havuz yangınları en sık görülen yangın türleridir, bunu jet yangınları, ani yangınlar ve ateş topları izlemektedir. Havuz yangınları ve jet yangınları uzun süre yanabilirken, bir ateş topu genellikle 1 dakikadan az sürer ve bir ani yangın sadece birkaç on saniye sürer.

Havuz yangını

Endüstriyel kazalarda meydana gelen havuz yangınları, buharlaşan yatay bir yakıt havuzu üzerinde türbülanslı difüzyon alevleri ile karakterize edilir. Sıvı, konveksiyon ve ısıma yoluyla alevlerden ısı alır, sıvı katmanın altına kayar veya sıvı alt tabakaya doğru/bu yüzeyden iletim yoluyla ısı alır. Yangın kararlı duruma ulaştığında, alevlere yakıt buharı beslemesini kontrol eden bir geri bildirim mekanizması vardır. Yakıt ile alttaki arayüz arasında transfer edilen ısı miktarı, yakıt ve alt tabaka koşullarına bağlıdır. Alt tabaka soğuk ve yakıt başlangıçta ortam sıcaklığında olan sıvı ise, ısı kayıpları önemlidir ve yakıt buharlaşması, alevi koruyamayacak kadar azalabilir. Aksine, eğer yakıt kriyojenik ise en azından ilk periyotta alt tabakadan yakıt ısı aktarılacak ve yanma iyileşecektir.

Yanma oranı havuz çapının bir fonksiyonudur. Farklı yakıtlar ve çaplara sahip havuz yangınlarının davranışı üzerine yürütülen bir deneysel çalışmada, tüm yakıtlar için aynı davranış gözlemlenmiştir. En yüksek yanma oranları, laminar rejimde daha küçük havuz çaplarına karşılık gelmiştir.

Çapı 1 metreden büyük olan büyük havuz yangınlarında, kötü yanma nedeniyle büyük miktarlarda kurum oluşur. Bu kurum alevlere sarı rengini verir, daha sonra soğur ve alevden gelen radyasyonu emen siyah duman çıkarır. Duman blokajı olarak bilinen bu durum, yangından yayılan genel termal radyasyon üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir.

Yerdeki havuz yangınları, bir yakıtın salımı sette veya yerde bir havuz oluşturduğunda meydana gelir. Boşalma, anlık veya örneğin bir delikten sızıntı nedeniyle sürekli veya yarı sürekli olabilir. Set yoksa havuzun çapı, salım tipine, yanma oranına ve zemin eğimine bağlıdır. Ani bir salımda sıvı, bir bariyere ulaşana veya yakıtın tamamı yanana kadar yayılır. Sürekli salımda havuzun boyutu yanma hızı salım akış hızına eşit olana ve böylece denge çapına ulaşana kadar artar.

Yakıt, genellikle itfaiyecilerin müdahalesiyle oluşan bir su tabakası üzerinde yanabilir. Ateş belli bir süre yanarsa, su kaynayarak ince tabaka kaynaması olarak bilinen olaya yol açar. Havuz yangınları deniz yüzeyinde de meydana gelebilir. Bu durumda yakıttan suya olan ısı transferi önemli olabilir ve alevin sürdürülemeyeceği bir duruma gelinebilir. Ayrıca tutuşma

geciktirilirse havuzun çapı artar ve kalınlığı minimum bir değere ulaşır ve tutuşma daha uzun sürede mümkün olur.

Jet yangını

Jet yangınları, bir delikten, bir flanştan vb. belirli bir hızla salınan yanıcı bir gazın veya buharın yanmasından kaynaklanan türbülanslı yayılan alevlerdir. Jet yangınları, akışın türbülansından dolayı aleve büyük miktarda hava katar. Tipik olarak, sürüklenen havanın hacmi stokiyometrik yanma için gerekli olanın beş katına kadar çıkabilir. Karışmanın verimliliği ve daha iyi yanma oranı nedeniyle, jet alevlerindeki sıcaklıklar genellikle bir havuz yangınındaki doğal difüzyon alevlerinde ulaşılanlardan daha yüksektir. Sonuç olarak jet yangınları, hem termal radyasyon hem de özellikle alev çarpması yoluyla ekipmanda ciddi hasara neden olabilir.

Ani yangın

Belirli meteorolojik koşullarda - sakın veya düşük rüzgâr hızında - yanıcı bir gaz veya buhar açığa çıktığında bir bulut oluşur. Bu oluşum, bir ani buharlaştırma altında basınçlı bir sıvının salımından veya bir havuzdan buharlaşmadan da kaynaklanabilir. Sıvılaştırılmış doğal gaz veya sıvılaştırılmış propan yangınları bu türdendir. Bir havuz oluşursa, yoğun buharlaşmaya uğrar. Salım anlık veya sürekli olabilir. Bulut dağılır, boyutu artar ve rüzgâr yönüne göre hareket eder. Bulut, bir ateşleme kaynağıyla - elektrikli bir cihaz, bir alev, bir kıvılcım - karşılaştığında, alevler bulut boyunca yayıldığı için alev alma limitleri arasındaki kütle çok hızlı yanar.

Ateş topu

Basınçlı sıvı içeren bir tank ısıtılırsa, tank içindeki basınç artar. Tank duvarları yüksek gerilime dayanamazsa sonunda çöker. Arıza durumunda, anlık basınçsızlaştırma nedeniyle, sıvının bir kısmında ani bir flaş meydana gelir ve ardından iki fazlı bir sıvı/buhar karışımı salınır. Eğer madde bir yakıtsa, proses endüstrisinde (propan) sıklıkla olduğu gibi, bu karışım tutuşarak başlangıçta yer seviyesinde bir ateş topu oluşturur. Daha sonra, türbülanslı kütlenin tamamı hacim olarak artar. Termal radyasyon çok güçlüdür. Ateş topunun meydana

gelebileceği anı öngörmenin zorluğu nedeniyle çok fazla ölümlü kaza meydana gelmektedir. Acil durumun başlangıcından itibaren herhangi bir anda ateş topu gerçekleşebilir.

Toksik yayılım

Endüstriyel tesisler tehlikeli madde sızdıracak şekilde tasarlanmamıştır ancak her ekipmanın özellikle ek veya bağlantı noktalarından sızdırma potansiyeli vardır. Yayılım, tehlikeli maddelerin kazara salımıdır. Malzeme basınçlı bir sıvı ise deşarj çok daha büyük tehlikelere neden olabilir.

Zehirli maddeler vücuda girdiklerinde zarar verebilecek maddelerdir. Toksik maddenin vücuda girme yolu anlamına gelen maruz kalma yolu, soluma, cilt teması ve yutma gibi farklı şekillerde olabilir. Toksik maddelere maruz kalma nedeniyle oluşabilecek sağlık sorunlarını önlemek için potansiyel tehlikeleri ve bunlardan nasıl korunacağını anlamak önemlidir. Zehirli duman, tehlikeli olay ve rüzgâr hızı gibi faktörlerden sonra oluşabilir, hava koşulları bu tehlikeli bulutun yayılmasında önemli rol oynar.

Toksik yayılım, hava, su ve toprak üzerinde olumsuz etkilere yol açarak ciddi çevresel etkiler de meydana getirebilir.

2.7. İlgili Mevzuat

2.7.1. Uluslararası mevzuat

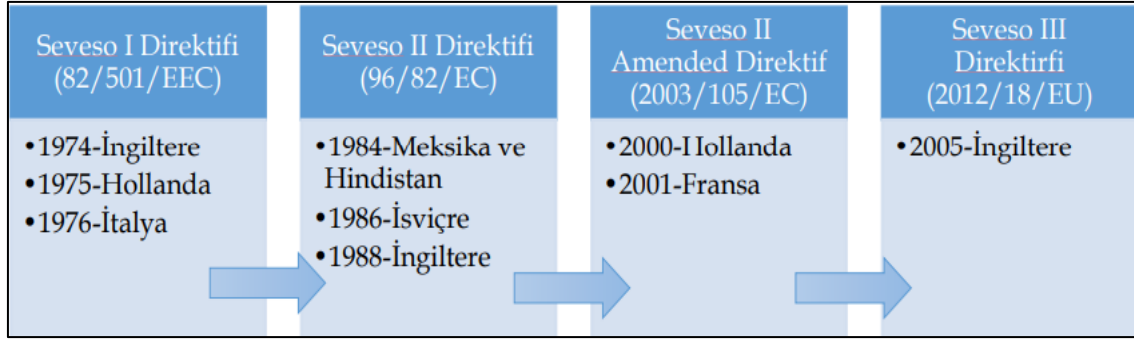
Büyük endüstriyel kazaların geçmişte yaşanan olumsuz etkilerinin sonucunda düzenleme yapılması gerekliliği gündeme gelmiştir. Çalışanların ve halkın sağlığını korumaya yönelik 27 Haziran 1967 tarihinde 67/548/EEC sayılı “Tehlikeli Maddelerin Sınıflandırılması, Paketlenmesi ve Etiketlenmesi Direktifi” yayımlanmıştır (EC, 1967). Dünya genelinde tehlikeli madde ve karışımların farklı tanımlanması, sınıflandırması, etiketlenmesinden kaynaklanan karışıklıkların oluşturduğu sıkıntılar nedeniyle, Birleşmiş Milletler (BM) tarafından 1992 yılında Rio Zirvesi’nde bu konu görüşülmüş ve karışıklıkları çözüme kavuşturmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır . Küresel sınıflandırma ve etiketleme sisteminin geliştirilmesi ile Avrupa Komisyonu (AK) tarafından 1999 yılında 1999/45/EC sayılı “Tehlikeli Karışımların Sınıflandırılması, Paketlenmesi ve Etiketlenmesi Direktifi” çıkarılmıştır (EC, 1999). Kimyasalların kullanımıyla ilgili düzenlemelerin yanı sıra

endüstriyel tesislerde güvenli çalışma ile ilgili düzenlemeler de yapılmıştır. Daha önce yaşanan kazalar ve Seveso kazası, Seveso direktifleri olarak bilinen yasal düzenlemelerin çıkmasını hızlandırmıştır. İtalya'nın Seveso kasabasında 1976 yılında endüstriyel bir tesiste yaşanan teknik bir arıza sonucu oluşan dioksin salımı, yaklaşık 40 bin kişinin bir kısmının hemen ölümüne, bir kısmının ağır derecede cilt yanıklarına yakalanmasına ve geri kalanların da yüksek kanser riskine maruz kalmasına sebep olmuştur (Vesilind, Morgan ve Heine, 2012). Seveso kazasının ardından endüstriyel kazaların tekrar etmesi ve mevcut önlemlerin endüstriyel kazaları önlemede yetersiz kalmasından yola çıkılarak Avrupa ülkeleri tarafından 1982 yılında Seveso I olarak bilinen 82/501/EEC sayılı direktif kabul edilmiştir. Direktifte tehlike kaynağı olabilecek önemli maddeler ve işlemler belirlenmiş, direktifin hangi işletmeler tarafından uygulanacağını yanı sıra kapsam dışı olan işletmeler belirlenerek büyük endüstriyel tesislerin çerçevesi çizilmiştir (EC,1988). Direktifin etkin şekilde uygulanması, kapsamının geliştirilmesi ve çevrenin korumasına yönelik ilgili ek şartların eklenmesi ile 1996 yılında 82/501/EEC yeniden düzenlenmiş ve 96/82/EC sayılı “Tehlikeli Maddelerle İlgili Büyük Kaza Risklerinin Kontrolüne İlişkin Direktif” (Seveso II Direktifi) kabul edilmiştir. Ek şartlar, gelişmiş arazi kullanım planlaması, yeni yönetim sistemleri, kamunun bilgiye erişimini kolaylaştırıcı yükümlülükler ve denetim başlıklarını kapsamaktadır (EC,1996). Tüm önleme çabalarına rağmen 2000 - 2001 yıllarında havai fişek üretimi yapan bir fabrikada (Enschede) ve amonyum nitrat üreten başka bir fabrikada (Toulouse) patlamalar sonucu felaketler yaşanmıştır. Seveso II direktifinin kabulünden yedi yıl sonra uygulama sorunlarının ve eksikliklerin giderilmesi, uyumun güçlendirilmesi için AK tarafından direktifin gözden geçirilmesi önerilmiştir . 16 Aralık 2003 tarih ve 345/97 sayılı Avrupa Birliği Resmi Gazetesi'nde(Eur-Lex) 2003/105/EC sayılı direktif yayımlanmıştır. Seveso II'deki patlayıcı ve yanıcı maddelere amonyum nitrat dahil edilerek kurallar güncellenmiş ve katılaştırılmıştır. Bununla birlikte daha önce kapsam dışı kalan işletmeler bu direktif ile alt seviyeli kuruluşlar olarak tanımlanmış, alt ve üst seviyeli kuruluşlar arasında da bazı yer değişiklikleri yapılması öngörülmüştür (EC,2003).

31 Aralık 2008 tarihinde 1272/2008 sayılı “*Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Paketlemesi (CLP)*” direktifinin yayımlanması ile kimyasal maddelerin sınıflandırılmasının düzenlendiği 67/548/EEC Tehlikeli Maddeler Direktifi, 1999/45/EC Tehlikeli Karışımlar Direktifi ve 1907/2006/EC sayılı Tüzükte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik yayımdan kaldırılmıştır. AB'nin bu yeni direktifi, BM'nin sınıflandırma ve etiketlemede “Küresel Uyumlaştırılmış Sistem(GHS)” kriterlerine uyumlu şekilde

hazırlanarak, kapsama dâhil olmayan bazı tehlike sınıfları da kapsama alınmış ve GHS’ nin ilkeleri ortaya konulmuştur. CLP yönetmeliğinin 16. maddesine göre; ilgili maddelerin ve karışımların sınıflandırılması, tehlikelerin belirlenmesi sorumluluğu sadece üreticiye ait olmayıp; dağıtıcılar, tedarik zincirindeki ithalat ve ihracatçılardan son kullanıcıya kadar tüm kişiler ve kuruluşlar, madde ve karışımların tehlikelerini ilgili otoritelere bildirmek zorundadırlar (EuroLex, 2008). CLP/1272/2008 sayılı direktifle, Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması (REACH) hükümleri çerçevesinde maddelerin sınıflandırması yapılmıştır. İlgili direktifle daha önce kullanılmakta olan semboller yenilenmiştir. R(risk), S(güvenlik) harf sembolleri yerlerini H(zararlılık)ve P(önlem) ifadelerine bırakmıştır. 67/548/EEC ile 99/45/EC direktiflerinin yürürlükten kalkması ve yeni bir etiketleme sisteminin (GHS) geliştirilmesi, Seveso II direktifinde de güncelleme yapılması gereğini doğurmuştur. Bununla birlikte daha sağlıklı ve yaşanabilir bir çevrede günümüz ve gelecek nesillerin yaşam haklarının korunmasına katkı sağlanması, çevresel konularda bilgi ve belgeye ulaşım, verilecek kararlarda halkın karar sürecine katılımı ve yargıya başvurma konularını ele alan ve 30 Ekim 2001 tarihinde yürürlüğe giren “Çevresel Konularda Bilgiye Erişim, Çevresel Karar Verme Sürecine Halkın Katılımı ve Yargıya Başvuru Sözleşmesi” (Aarhus Sözleşmesi) bir anlamda çevresel konularda eksiklikleri bulunan Seveso II direktifinin yeniden düzenlenmesi görüşünü kuvvetlendirmiştir (Güneş, 2011). Tüm bu gerekçeler sonucunda, Seveso II direktifinde güncellemeye gidilerek 4 Temmuz 2012 tarihli Avrupa Birliği Resmi Gazetesi’nde yayımlanan 2012/18/EEC sayılı Seveso III Direktifi, 26 Haziran 2012 tarihinde AB Bakanlar Konseyi’nde kabul edilmiştir (EC, 2012). 1 Haziran 2015 tarihinde AB ülkelerinde Seveso II direktifi kaldırılmış ve Seveso III yürürlüğe girmiştir (EC, 2015).

Dünya’nın farklı ülkelerinde 1976 yılına kadar yaşanan kazalar ve özellikle 1976 yılında İtalya’da gerçekleşen kaza sonrasında, endüstriyel kazaların oluşmasının engellenmesi ve gerekli önlemlerin alınması adına 1982 yılında Seveso I Direktifi (82/501/EEC) kabul edilmiştir (Erdoğan,A., Çakmak, M.,2023) . Çeşitli ülkelerde meydana gelmeye devam eden büyük endüstriyel kazalarla bu direktifte farklı zamanlarda güncellemeler yapılmıştır. Bu güncellemeler Şekil 2.8’ de sunulmuştur. Şekilden, ülkelerin seveso direktiflerine dâhil olduğu yıllar görülmektedir.



Şekil 2.8. Dünya’da seveso direktifi gelişimi (Erdoğan ve Çakmak, 2023)

2.7.2. Ulusal mevzuat

Ülkemizde tehlikeli maddeler bulunduran kuruluşlarda büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve muhtemel kazaların insanlara ve çevreye olan zararlarının en aza indirilmesi amacıyla, yüksek seviyede, etkili ve sürekli korumayı sağlamak için alınması gerekli önlemler ile ilgili usul ve esaslar 2019 tarih ve 30702 sayılı *Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik* ile belirlenmiştir (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2019). Söz konusu Yönetmelik, 2012/18 / EU Seveso III direktifi dikkate alınarak hazırlanmıştır. Yönetmelik ile tehlikeli madde bulunduran kuruluşlar kapsam ve seviye açısından alt seviyeli, üst seviyeli olarak sınıflandırılmaktadır. Alt seviyeli kuruluş, yönetmelik Ek-1 Bölüm 1 ve Bölüm 2’de verilen tehlikeli madde listelerinde, Sütun 2’deki eşik değerlere eşit veya bunların üzerindeki, ancak Sütun 3’teki değerlerin altındaki miktarlarda tehlikeli madde bulunduran veya bulundurması muhtemel kuruluşu ifade eder. Üst seviyeli kuruluş ise yönetmelik Ek-1 Bölüm 1 ve Bölüm 2’de verilen tehlikeli madde listelerinde, Sütun 3’teki eşik değerlere eşit veya üzerindeki miktarlarda tehlikeli madde bulunduran veya bulundurması muhtemel kuruluşu ifade eder. Yönetmelikte güvenlik raporu; kuruluşun, kuruluşta yürütülen faaliyetlerin ve proseslerin tanıtımının yapıldığı ve kuruluşta uygulanan güvenlik yönetim sistemi ile ilgili bilgilerin bulunduğu bir belge şeklinde tanımlanmaktadır. Büyük kaza senaryo dokümanı ise yönetmelik Madde 5/1 e bendinde kuruluşta büyük endüstriyel kaza tehlikelerinin belirlenmesi ve bu tehlikelerden kaynaklanacak risklerin değerlendirilmesi amacıyla hazırlanır.

İklim değişikliğinin proses kazalarına etkisi konusunda aynı yönetmeliğin ilgili tebliğ maddeleri önemlidir. 19 Nisan 2019 tarihinde yayınlanan “Büyük Endüstriyel Kazalarla İlgili Hazırlanacak Güvenlik Raporu Tebliği“, kuruluşun çevresel yapısı ve koşulları;

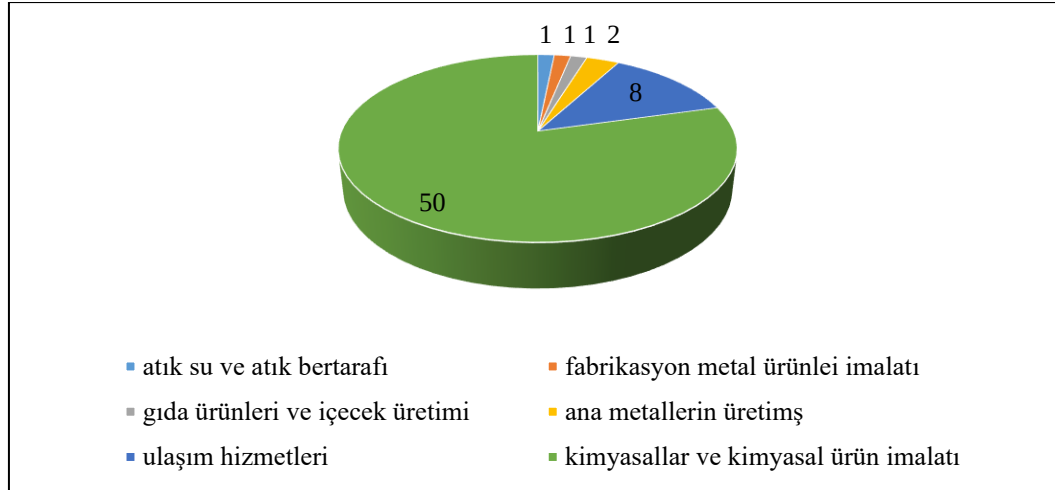
deprem, sel, toprak kayması tehlikeleri hakkında bilgi verilmesi gereğini belirtilmektedir. Ayrıca tebliğde meteorolojik olaylar çerçevesinde yıldırım, fırtına ve endüstriyel kazanın etkisini artırabilecek diğer meteorolojik tehlikeler hakkında bilgi verilmesi gereği vurgulanmaktadır. Büyük Endüstriyel Kazalarla İlgili Hazırlanacak Büyük Kaza Senaryo Dokümanı Tebliği (30 Haziran 2020) Ek 2/6’ da, harici tehlikelerin tanımlanması kapsamında sel, kaya düşmesi, heyelan ve deprem gibi afetlerin yanında yıldırım ve fırtına gibi meteorolojik olayların değerlendirilmesi gerekliliği belirtilmiştir. Yönetmeliğin yayınlanan en son tebliği olan “Büyük Endüstriyel Kazalarda Uygulanacak Dahili Acil Durum Planları Hakkında Tebliğ (15 Ağustos 2020)” Madde 5/3’ te, “Dâhili acil durum planı, büyük kaza senaryo dokümanında belirtilen her bir kaza türünü (yangın, patlama, toksik yayılım) içerecek şekilde tüm büyük kaza senaryolarına uygulanabilecek nitelikte ve endüstriyel kazayı tetikleyebilecek deprem, sel, taşkın gibi doğal afetler de dikkate alınarak hazırlanır.” hükmü yer almaktadır. İklim değişikliği doğal afetlerin en önemli tetikleyicisidir ve sonucunda küresel ölçekte ciddi can, mal ve çevre kayıpları yaşanmaktadır. Özellikle tehlikeli kimyasalları barındıran kuruluşlardaki etkilerinin sonuçları daha vahim olabilmektedir. Endüstriyel kuruluşlarda, iklim değişikliğinin etkileri dikkate alınarak kök nedenlerden başlayıp olası yangın, yayılım ve patlama olaylarını kapsayacak nitelikte risk analiz çalışmaları önem kazanmaktadır.

2.8. Proses Güvenliği

Önemini her geçen gün artıran proses güvenliği kavramı için çeşitli tanımlar yapılmıştır. Amerikan Kimya Mühendisleri Enstitüsü Kimyasal Proses Güvenliği Merkezi (Center For Chemical Process Safety-CCPS) proses güvenliğini, “kimyasal proses tesislerinde katastrofik boyutta gerçekleşebilecek kimyasal veya enerji salımını önleme, azaltma, salıma hazırlıklı olma, müdahale veya normale dönme faaliyetleri” olarak tanımlamıştır (Arendt, Lorenzo , 2014:89). Marshall ve Ruhemann’a göre proses güvenliği, prosesin kendine özgü karakteristik özelliklerinden kaynaklanan kazaların kontrolü ile ilgilenen bir güvenlik dalıdır. Proses güvenliğinin, enerji veya zararlı maddelerin akut salımlarının önlenmesi veya meydana gelmeleri durumunda bu tür salımların büyüklüğünün ve sonuçlarının tesis içinde ve tesis dışında mala veya çevreye etkisinin sınırlandırılmasıyla ilgilendiği ifade edilir (Marshall ve Ruhemann, 2001:102). Avrupa Endüstriyel Gazlar Derneği (European Industrial Gases Association-EIGA) ise enerji veya tehlikeli maddelerin yayılmasıyla sonuçlanan kazaları, olayları özellikle patlama, yangın ve kayıpları önlemeye odaklanan

mühendislik ve yönetim ilkelerinin bir kombinasyonu olarak proses güvenliği tanımını yapmaktadır (EIGA, 2014). Çeşitli kaynaklarda yapılan tanımlardan yola çıkarak proses güvenliği; iyi tasarım, mühendislik ve işletme ilkeleri uygulayarak, tehlikeli maddeler veya enerji salma potansiyeline sahip olan olayların proses bütünlüğünü yönetmek için disiplinli bir çerçeve sunulması olarak tanımlanabilir.

İngiltere ve Hollanda arasında gerçekleştirilen Büyük Kaza Hata Oranları Projesi ile 2008-2010 yılları arasında 63 Hollanda’da yaşanan ve 998 İngiltere’ de yaşanan 998 kaza analiz edilmiştir. Bu kazalar 23’ü eMARS sisteminde kayıtlıdır. Hollanda’da yaşanan 63 kazanın analizi sonucunda (Şekil 2.9), en büyük oranın kimyasal proses endüstrisinde meydana geldiği tespit edilmiştir (Health and Safety Executive-HSE, 2012).



Şekil 2.9. Endüstriyel faaliyet türlerine göre kaza sayıları

Kimyasal proses endüstrileri genellikle tehlikeli kimyasalları içeren çok sayıda karmaşık sisteme ve çeşitli operasyonlar için gerekli bileşenlere ev sahipliği yapar. Yoğun çalışma koşulları ve sistemler arasındaki karmaşık etkileşimler, kimyasal tesisleri kazalara karşı savunmasız hale getirir ve bu kazalar felaketle sonuçlanabilir (Roy vd., 2014). Tarihte yaşanmış felaketlerin en çarpıcı örneği 1984’ de Hindistan, Bhopal’de yaşanmıştır. Zehirli ve yanıcı bir madde olan metilizosiyanatın yayılımı ile 3 000’den fazla insan ölmüştür. Bhopal trajedisinin kaza kök neden analizleri, kimyasal proses endüstrileri için sağlam ve iyi tasarlanmış bir risk değerlendirme metodolojisine olan ihtiyacı ortaya koymuş ve risk değerlendirmesi proses güvenliğinin temel prensibi haline gelmiştir (Arendt vd., 2016:100).

Kimyasal proses endüstrisinde otuz yılı aşkın süredir tesislerin yaşam döngüsü boyunca tehlikeli madde salımı, yangın ve patlamaya sebep olan durumları tespit etmek ve önlemek amacıyla farklı isimler ile risk değerlendirmesi (tehlike tanımlama ve risk analizleri, tehlike değerlendirmesi vb.) çalışmaları yapılmaktadır (Arendt vd.,2008:54). *Risk*, bir faaliyet sonucunda meydana gelebilecek kazaların beklenen sıklığı ve sonuçlarının birleşimi olarak tanımlanır. *Risk analizi*, kişinin bir faaliyetle ilişkili risk hakkındaki anlayışını artırmaya yönelik resmi bir süreçtir (Arendt vd., 2000:15). Risk analizi süreci üç soruyu yanıtlamayı içerir:

- Ne yanlış gidebilir?
- Ne kadar olası?
- Etkiler nelerdir?

Risk değerlendirmesi, risk analizi sonuçlarının alınmasından sonraki süreçtir ve dördüncü bir soruyu yanıtlar: Riskler tolere edilebilir mi?

Bu soruların bir veya daha fazlasına verilen niteliksel cevaplar, proses güvenliği için kaynakların tahsisi hakkında iyi kararlar almak için genellikle yeterlidir.

2.9. Risk Analiz Teknikleri

Tehlike, kuruluştaki var olan ya da dışarıdan gelebilecek; insanı, kuruluştaki veya çevreyi etkileyebilecek zarar veya hasar verme potansiyeline sahip herhangi bir fiziksel durum veya nesnedir. Kimya endüstrisinde prosesler farklı kaynaklara sahip tehlikeler içerir: çok düşük veya çok yüksek sıcaklık ve basınç gibi aşırı çalışma koşullarından kaynaklanan fiziksel tehlikeler; proseste mevcut olan ve kendiliğinden tepkime nedeniyle toksik, yanıcı, patlayıcı vb. olabilen veya enerji açığa çıkarabilen maddelerden kaynaklı kimyasal tehlikeler; makine ve ekipman, iş organizasyonu, prosedürler, çalışanlar ve çalışma ortamı gibi unsurların birinden veya birkaçından kaynaklı tesis faaliyetleriyle ilişkili diğer tehlikeler. Tehlike tanımlama sürecinin mümkün olduğu kadar kapsamlı olması için tüm bu farklı tehlike kaynaklarının ele alınması önemlidir (Gadd vd., 2003).

Risk, belirli bir süre içinde istenmeyen bir olayın meydana gelme olasılığıdır. Bu nedenle risk, belirli bir tehlikenin gerçekleşmesinin hem olasılığının hem de sonucunun bir fonksiyonudur (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2019; Gadd vd., 2003).

Risk değerlendirme, tehlikelerden kaynaklı olayların gerçekleşme olasılığı ve sonuçlarının ciddiyetini gösteren risk seviyesinin tahmin edilmesidir. Belirlenen seviye risk önceliklendirme sıralamasının nicel tanımlanmasına yardımcı olur. Mevcut kontrol ve azaltma önlemleri ve bunların etkinliği dikkate alınarak belirlenen her bir risk seviyesinin kabul edilebilir olup olmadığına karar verilir (Gadd vd., 2003). Bu noktada ALARP (As Low As is Reasonably Practicable) kavramı devreye girer. ALARP prensibi, riskin niceliksel ölçülebildiği durumlarda, tolere edilebilir bir risk seviyesi olduğunu ve riskin bu seviyenin altında olması gerektiğini varsayar. Prensip, risklerin ancak tespit edildiğinde, değerlendirildiğinde ve tüm önlemler alınarak kontrol edildiğinde pratik olarak ulaşılacak en ideal seviyeye kadar düşürülebileceğidir (Yasseri, 2013). Risk değerlendirme çalışmalarında risk seviyesi tahminini, riskin tamamen bertaraf edilmesi, bunun mümkün olmadığı durumda ise kabul edilebilir seviyeye indirilmesi için kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması takip eder. Belirlenen risk için kontrol tedbirlerinin alınmasından sonra risk seviyesi yeniden belirlenir. Tespit edilen seviye, kabul edilebilir risk seviyesinin üzerinde ise risk değerlendirme adımları tekrarlanır, altında ise yapılan faaliyetler dokümanite edilir (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2019). Sonuç olarak, risk değerlendirme çalışmaları, kuruluşların bir proses ile ilişkili riskleri ve olası olayların sıklığını ve şiddetini nasıl azaltacaklarını konusunda yol göstericidir (Arendt vd., 2014:89).

Hata ağacı analizi

Hata ağacı analizi (Fault Tree Analysis-FTA), spesifik bir istenmeyen olayın (potansiyel kaza, tehlikeli durum, istenmeyen başarısızlık modu vb.) ortaya çıkma olasılığının ve kök nedenlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan bir tekniktir. Hata ağacı (fault tree, FT), istenmeyen olay veya duruma götüren, hata veya normal olarak sınıflandırılan mümkün olayların çeşitli kombinasyonlarını mantıksal ve grafiksel olarak ifade etmek amacıyla kullanılır. İstenmeyen olay sistemdeki bir tehlike olabileceği gibi gerçekleşmiş bir kazaya ilişkin aksilik de olabilir. Analiz, genel bir problemten spesifik bir nedeni araştırdığı için tündengelim yapıdadır. FT, en tepedeki tek bir istenmeyen olaydan en alttaki bütün mümkün kök nedenlere uzanan mantıksal hata yolları geliştirir. Anlaşılması ve

kullanılmasının kolay oluşu, sisteme yararlı bir bakış açısı sağlaması ve incelenen probleme ilişkin mümkün tüm nedenleri göstermesi FTA' ın bazı avantajlarındanıdır.

Olay ağacı analizi

Olay ağacı analizi (Event Tree Analysis-ETA), tetikleyici bir olayın oluşmasını takip eden potansiyel kaza senaryolarındaki olay sırasının değerlendirilip tanımlanması için kullanılır. Temel amaç tetikleyici olayın ciddi bir aksiliği ortaya çıkarması durumunu ve tetikleyici olayın yeterince kontrol edilip edilmediğinin değerlendirilmesidir. Bu metot tek bir tetikleyici olayın neden olabileceği çok çeşitli sonuçları ortaya koyabileceği gibi her bir sonuca ilişkin ortaya çıkma olasılıklarını hesaplama kabiliyetine de sahiptir. ETA tek bir tetikleyici olayın neden olabileceği çok sayıda sonuç olayını üretirken, FTA tek bir olayın çok sayıda nedenini üretir.

Başarısızlık türleri ve etkileri analizi

Başarısızlık (hata, arıza) türleri (modları) ve etkileri analizi (Failure Mode and Effects Analysis- FMEA), alt-sitem, montaj, bileşen veya fonksiyonların potansiyel başarısızlık modlarının sahip olduğu etkilerin değerlendirilmesi amacıyla kullanılan bir araçtır. Nicel olasılıklı analiz ortaya koymak amacıyla her bir başarısızlık moduna ilişkin başarısızlık hızlarını da içeren bir kabiliyete sahiptir. FMEA, ürün veya süreç başarısızlıklarının risklerini azaltmak için ilgili ürün veya sürecin tasarım veya bir fonksiyonuna odaklanarak aşağıdan yukarıya doğru bir süreç takip eder.

Tehlike ve işletilebilirlik analizi

Tehlike ve işletilebilirlik analizi (Hazard and Operability Analysis- HAZOP), bir sisteme ilişkin kavramsal safhadan bertaraf safhasına değin işletimsel (operasyonel) endişe ve tehlikelerin belirlenip analiz edilmesine yönelik bir tekniktir. HAZOP, tehlikelerinin belirlenmesinde referans anahtar kelimeleri ve tasarımı ifade eden diyagramları kullanır. “Daha fazla”, “Yok”, “Daha az” gibi referans kelimeler, hız, akış, basınç gibi süreç veya sistem koşullarıyla birleştirilerek sistem tehlikeleri belirlenmeye çalışılır. HAZOP, tasarımdaki amaçlanan işlemlerden potansiyel sapmaların neden olduğu tehlikeleri araştırır.

HAZOP, kimyasal tesisler, nükleer güç tesisleri, rafineriler, demiryolu sistemleri gibi çok çeşitli alanlarda başarıyla uygulanabilir.

Neden-sonuç analizi

Neden-sonuç analizi (Cause consequence analysis- CCA), tetikleyici bir olayın oluşması nedeniyle ortaya çıkan olaylar dizisinin değerlendirilmesi ve tanımlanmasına yönelik bir analiz yöntemidir. CCA, neden sonuç diyagramı adı verilen görsel bir mantıksal ağaç yapısı kullanır. Diyagram, dizedeki olaylar arasında bulunan ilişkiler ve olayların nedenlerini görsel olarak ifade eder. CCA'nın amacı tetikleyici olayın vahim bir aksiliğe neden olup olmayacağını, olayın güvenlik sistemi tarafından yeterli şekilde kontrol edilip edilmediğini, sistem tasarımında bu kontrole yönelik prosedürlerin olup olmadığını değerlendirmektir. CCA, tek bir tetikleyici olayın neden olacağı çok sayıda mümkün çıktı ile sonuçlanabilir ve her bir çıktıya yönelik olasılıkların hesaplanmasına imkân sağlayacak yapıya sahiptir.

2.10. Kimyasal Proseslerde Risk Analizi

Proses kazaları ve özellikle doğal afetlerin tetiklemesiyle proseslerde meydana gelen Natech olayları, dünya çapında hızla artan sanayileşme ve iklim değişikliği nedeniyle daha sık meydana gelmektedir. Doğal, teknolojik ve diğer insan kaynaklı tehlikelerin doğrudan ve dolaylı bağlantılarını ve etkilerini araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Bu sebeple pek çok ulusal ve yerel otorite, çoklu risk yönetimi için çerçeveler geliştirmektedir (EU, 2023). Natech olayları, teknolojik veya endüstriyel koşullardan, tehlikeli prosedürlerden, altyapı arızalarından veya belirli insan faaliyetlerinden kaynaklanabileceği gibi afet boyutundaki bir olayın tetiklemesiyle beklenmedik ikincil olaylar şeklinde asıl olay kadar ciddi olma eğilimindedir ve afetin etkilerinin genel süresine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Natech olay yönetiminde, çoklu tehlike yaklaşımına (doğal, teknolojik, sağlık, ekonomik, ekolojik, sosyal vb.) dayalı genel riskler belirlenmeli ve potansiyel tehlike ve kırılganlık etkileşimleri hesaba katılmalıdır (Dökmeci, 2018).

Mevzuat gereği tehlikeli kimyasalları kullanan/depolayan kuruluşlar, büyük kazaların oluşmasını önlemek, büyük kazanın meydana gelmesi durumunda etkilerini en az zarar verecek şekilde sınırlamak, seviyelerine göre Büyük Kaza Önleme Politikası, Büyük Kaza Senaryo Dokümanı, Güvenlik Raporu ve Dahili Acil Durum Planı hazırlamak/hazırlatmak

ile yükümlüdürler. Kuruluşlar, tehlikeli kimyasal envanter bilgilerini Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – BEKRA Bildirim Sistemi’ni kullanarak girdiklerinde üst seviyeli, alt seviyeli ve kapsam dışı olarak sınıflandırılmaktadırlar. Mevzuat kapsamında kuruluşların proses tehlike analizi yapma yükümlülüğü de bulunmaktadır. Bu analiz için Ön Tehlike Analizi (PHA), Olursa Ne Olur? (What-if?), Çeklist (Check-list), Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA), Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) gibi kalitatif teknikler ya da Hata Ağacı Analizi (FTA), Olay Ağacı Analizi (ETA) gibi kantitatif teknikler kullanılabilmektedir (Hoşcan, 2019).

Proses kazalarının yangın, patlama ve toksik yayılım etkilerinin öncesinde belirlenmesi ya da kaza anında acil durum yönetimi için modelleme programları geliştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılanlarından biri ücretsiz ALOHA (Areal Location Of Hazardous Atmosphere Software)’dır. PHAST, BREEZE, EFFECTGIS, FLACS, CEBAM, SAFER TRACE, BLEVE Kaza Simülatörü (BIS), AUTOREAGAS, CHARM, ADORA, HAMS-GPS gibi diğer yazılımlar da vardır. ALOHA programı, buhar bulutu patlamaları, kimyasal yangınlar sonucu ortaya çıkan termal radyasyon ve kimyasalların salımı ile meydana gelen toksik hava tehlikelerinin modellenmesi amacıyla tasarlanmıştır. İçerisinde maddelerin fiziksel, kimyasal ve toksik özelliklerinin yer aldığı büyük bir kütüphanesi bulunmaktadır. Çalışılmak istenilen kimyasal bu kütüphanede yer almıyor ise o kimyasalın özellik bilgilerinin giriş yapılmasına fırsat vermektedir. Kullanımı kolaydır ve uygun olmayan girişler yapıldığında kullanıcıyı uyarmaktadır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

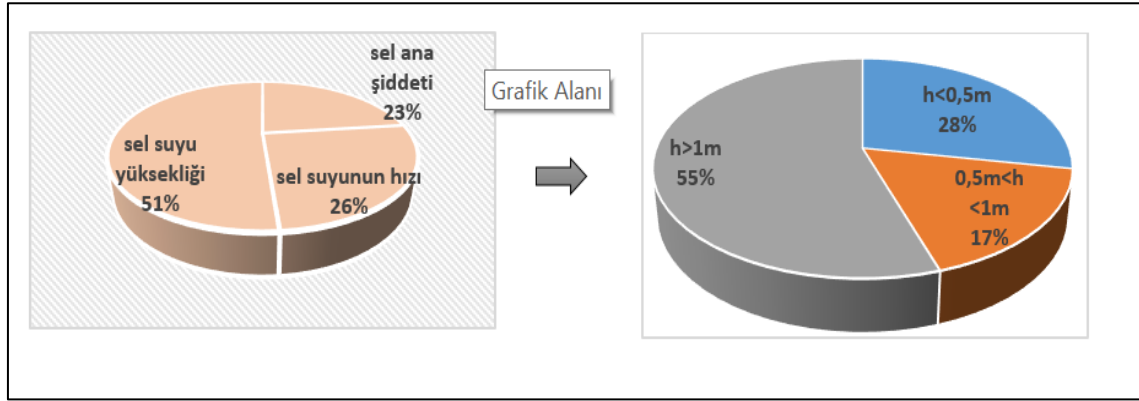
Bu bölümde, iklim değişikliğinin kimyasal tesislere etkilerinin incelenmesi amacıyla ilgili istatistiksel çalışmalar ile risk analize yönelik çalışmalar üzerinde durulmuştur.

3.1. İklim Değişikliği ve Proses Kazaları Üzerine İstatistiksel Çalışmalar

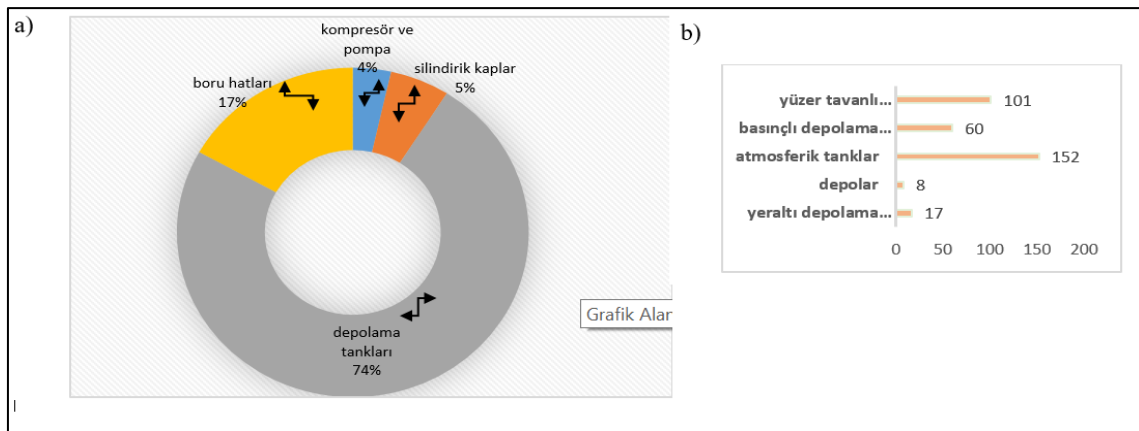
Campedel (2008) tarafından yapılan araştırmada, harici olayların endüstriyel kuruluşlara etkisinin nicel değerlendirmesi için bir metodoloji geliştirilmiştir. Farklı türde doğa olaylarının sanayi tesisleri üzerindeki etkilerinin sonuçları, doğa olaylarına bağlı olarak değişebilmektedir. Çalışmanın amacı, QRA(kantitatif risk analizi) yanında Natech olaylarının standart endüstriyel risk endekslerine katkısının değerlendirilmesine yönelik bir prosedür uygulamaktır. Endüstriyel risk endekslerinin değerinin sayısallaştırılması için doğal olaya özgü bazı parametrelerin eklenmesi ve bunun yanı sıra doğal olayın hedef her ekipman kaleminin savunmasızlığını tanımlamak için spesifik alt modellerinin uygulanması gerekliliği belirtilmiştir. Bu çalışma, sel ve sismik olayların tetiklediği geçmişteki endüstriyel kazaların istatistiksel analizine dayanmaktadır. Çalışmanın kısıtı, ekipman hasar olasılığının sayısallaştırılmasını sağlayacak belirli verilerin bulunmaması olarak belirtilmiştir. Bir doğa olayı sırasında en yüksek güvenlik açığına sahip nesneler, ilgili bağlantılara sahip depolama tankları olarak bulunmuştur. Atmosferik ve basınçlı tankların farklı kırılmalıklarının ise doğal olayın türüne bağlı olduğu gösterilmiştir. Boru hatları ve sistemlerinin doğal olaylara karşı çok hassas olduğu, yüksek oranda salım ve çevresel etki olasılığı ile göz ardı edilemez bir risk kaynağı teşkil ettiği vurgulanmıştır.

Cozzani vd. (2010) tarafından, Natech kazalarında meydana gelebilecek ekipmanın hasar modunun nihai senaryoya etkisinin araştırılması amacıyla büyük endüstriyel kaza veri tabanlarından sellerin tetiklediği 272 Natech kazasına ilişkin veriler analiz edilmiştir. Analizde, ARIA, FACTS, MARS, MHIDAS, TAD ve ABD (NRC) veri tabanları kullanılmıştır. İklim değişikliği etkisi ile sel ve yıldırım olaylarının teknolojik kazaları tetikleyen en yaygın doğal afetler olduğu belirtilmiştir. Analiz edilen selin tetiklediği Natech kazalarında, sel şiddeti, suyun hızı ve suyun yüksekliği parametrelerinin hasarda etkin olduğu gösterilmiştir (Şekil 3.1). Olayların %50'sinden fazlasında ekipman hasarına, 1 m'yi aşan su yüksekliğinin sebep olduğu tespit edilmiştir. Sel nedeniyle en sık hasar gören ekipman kategorileri ise depolama tankları %74 ve boru tesisatı %17 olarak belirlenmiştir

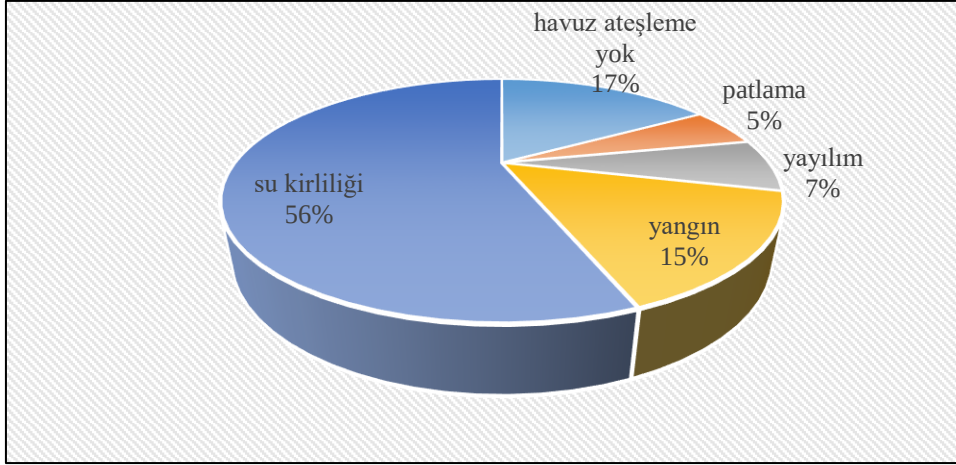
(Şekil 3.2.a). Depolama tankı kategorisinin daha ayrıntılı analizi (Şekil 3.2.b), atmosferik tankların daha düşük yapısal dirençleri nedeniyle bütünlük kaybına en sık uğrayan ekipman olduğu gösterilmiştir. Sel olaylarında ekipmanların bütünlük kaybının nedenleri; su sürüklemesi, bağlantıların kopması, yüzer tavanlı tankların su basıncı ve/veya sürüklenme nedeniyle çatısının çökmesi olarak tespit edilmiştir. Toplanan veriler ile selden etkilenen sanayi sektörleri de analiz edilmiştir. Kazaların yaklaşık %27'sinin kimya ve petrokimya sektörüne ait olduğu gösterilmiştir. Atmosferik depolama tanklarının selden etkilenen başlıca ekipman olması nedeniyle, bu tür olaylara en sık karışan maddelerin genellikle bu tür tanklarda depolanan benzin, yağ ve mazot olduğu belirlenmiştir (213 olaydan 142 sinde). Selden tetiklenen Natech kazalarında, proses endüstrisine özgü iki senaryo yangın (%15) ve su kirliliği (%56) olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.1. 48 Natech kazası kaydına dayalı olarak sel/taşkın şiddetinin karakterizasyonu (h: maksimum su yüksekliği, m) (Cozzani vd., 2010)

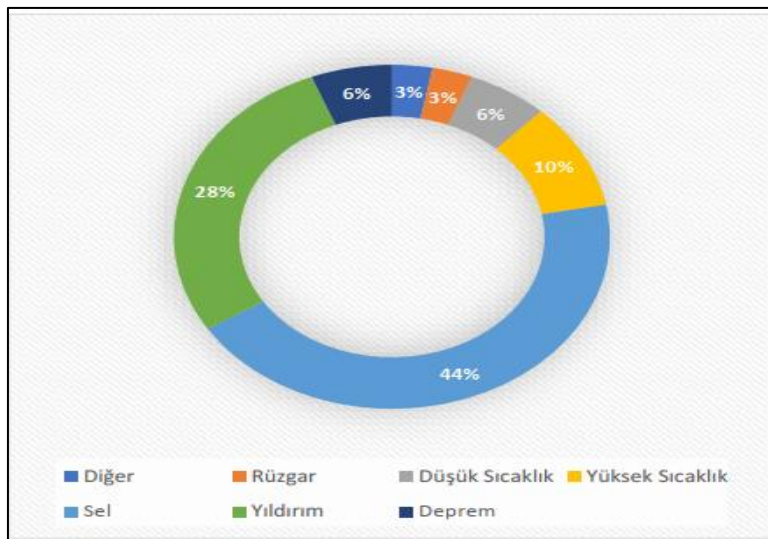


Şekil 3.2. Selin tetiklediği kazalarda etkilenen ekipman kategorileri: (a) genel, (b) depolama tankları özelinde (Cozzani vd., 2010)

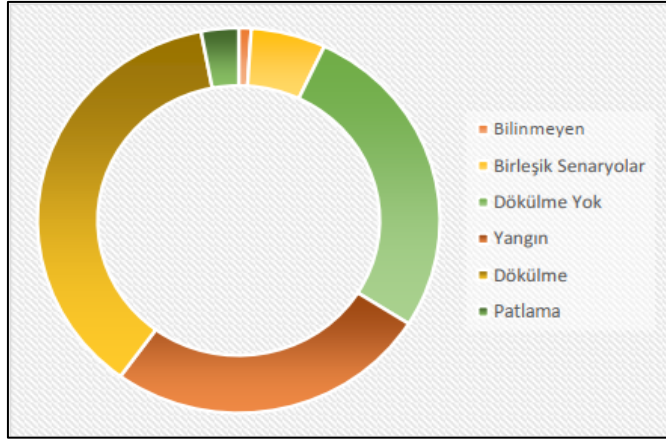


Şekil 3.3. 170 kaza kaydına dayalı olarak sel tarafından başlatılan kaza senaryoları (Cozzani vd., 2010)

Moreno vd. (2019) tarafından kimya ve proses endüstrisini etkileyen 438 geçmiş Natech kaza verisi incelenmiş ve doğal afetlerin eğilimi, coğrafi konum, kazayı tetikleyen doğal tehlikenin türü, nihai senaryolar (örn. yangın, patlama) açısından kaza eğilimleri analiz edilmiştir. ARIA (Fransız Endüstriyel Riskler ve Kirlilik Analiz Bürosu), FACTS (Factsonline: kimyasal ve endüstriyel kaza veritabanı, 2018) ve eMARS (Major Accident Hazards Bureau) veritabanları üzerinden analizler yürütülmüştür. Artan meteorolojik afetler paralelinde kimyasal proseslerdeki kazaların artışına dikkat çekilmiştir. Doğal afetler içerisinde en büyük payı %44 oran ile selin oluşturduğu, bunu %28' lik oran ile yıldırımın izlediği belirtilmiştir(Şekil 3.4). Nihai senaryolarda zehirli madde salımı(%37) ve yangınların(%26) öne çıktığı gösterilmiştir(Şekil 3.5).

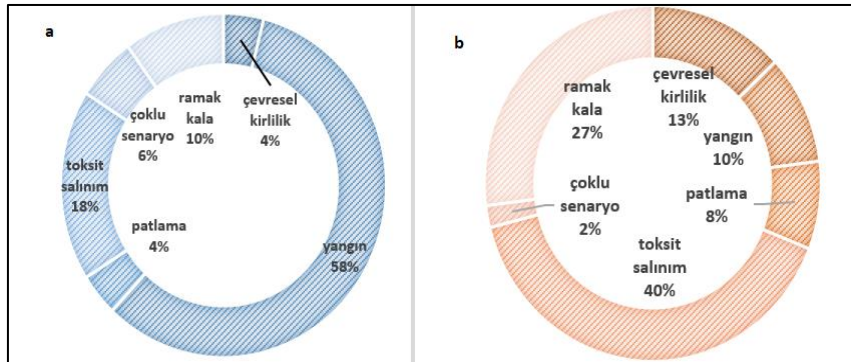


Şekil 3.4. Natech kazalarını tetikleyen doğal afetler (Moreno vd., 2019)



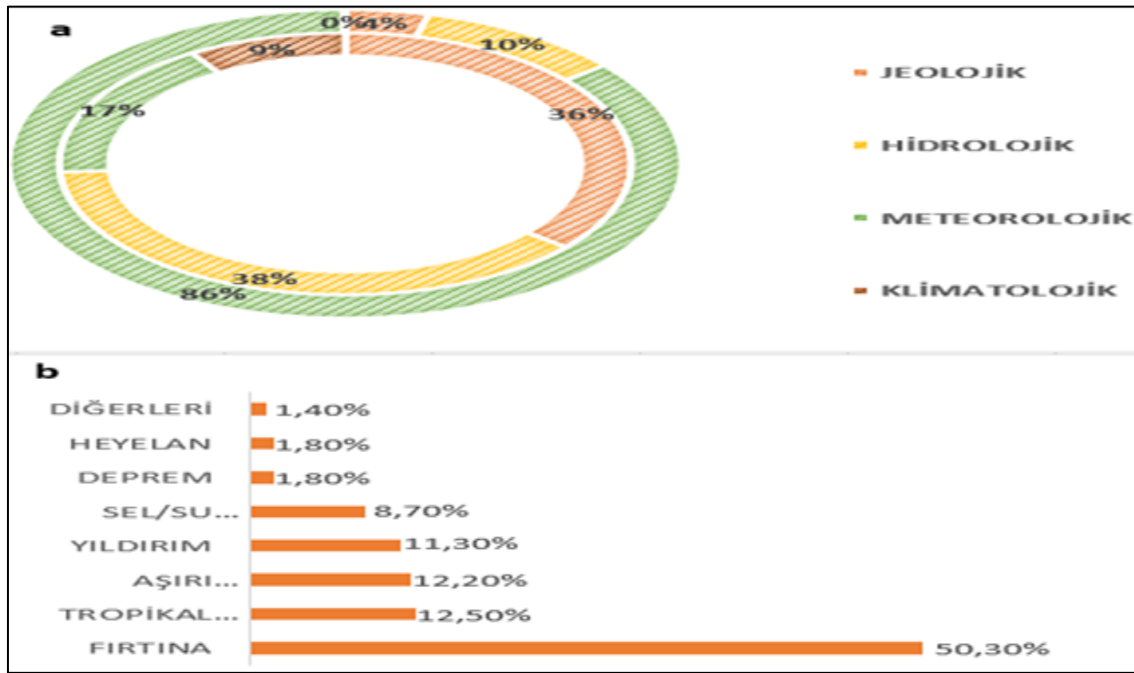
Şekil 3.5. Natech kazalarına ait nihai senaryolar (Moreno vd., 2019)

Ricci vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, dünya genelinde meydana gelen iklim değişikliğinin en belirgin etkilerinden birinin ortalama sıcaklıklardaki değişimler olduğu vurgulanmıştır. Aşırı sıcaklıkların, aşırı hava ve iklim olaylarının sıklığında, yoğunluğunda, süresinde ve mekansal boyutunda değişikliklere yol açabileceği belirtilmiştir. Devam etmekte olan aşırı sıcaklıkların, Natech kazalarında ve bunun paralelinde endüstriyel tesislerle etkileşimlerini incelemek için 305 geçmiş olaydan oluşan bir veri seti analiz edilmiştir. Çeşitli veri tabanları üzerinden iklim değişikliğine paralel olarak oluşan önemli sıcaklık değişimlerinin endüstriyel tesislerde Natech kazalarını artırdığı gösterilmiştir. Mevcut çalışmada ele alınan nihai senaryolar, yangın, patlama, toksik salım açısından değerlendirildiğinde; soğuk hava dalgasının tetiklediği Natech kazalarında toksik salımın(%40); sıcak hava dalgasının tetiklediği Natech kazalarında yangınların(%58) öne çıktığı bildirilmiştir (Şekil 3.6). Soğuk ve sıcak hava dalgasından en çok etkilenen sanayi sektörü ise %25' lik oran ile kimya ve petrokimya olarak belirlenmiştir. Bu sektörde, sıcaklık değişimlerinin boru hattı (%34) ve vanalar (%20) üzerine ciddi etkileri rapor edilmiştir.



Şekil 3.6. Soğuk hava dalgası (a) ve sıcak hava dalgası (b) tarafından tetiklenen kazalar için kaydedilen nihai senaryolar arasındaki paylaşım (Ricci vd., 2020)

Ricci vd. (2021) tarafından yürütülen bir başka çalışmada, Natech olaylarına adanmış orijinal bir veri seti oluşturulması ve Natech senaryolarının oluşumuna ilişkin kapsamlı bir analiz sağlanması amaçlanmıştır. Son 70 yılda gerçekleşen 9000'den fazla Natech kazaları incelenmiştir. Natech olaylarının eğilimini, coğrafi dağılımını, nihai teknolojik senaryoları ve insan kayıpları ve hasarlar açısından ilişkili sonuçlarını anlamak için kaza verileri, MHIDAS, TAD , ARIA, NRC , CONCAWE veri tabanları üzerinden analiz edilmiştir. Meteorolojik olayların Natech senaryolarının ana tetikleyicisi olduğu gösterilmiştir (%86) (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. (a) Doğal olayların makro kategorilerine göre Natech olaylarının dağılımı (%), (b) Natech olaylarının sayısı (Ricci vd., 2021)

Natech olaylarının %45'inden fazlasının tehlikeli madde salımı, %9'unun yangın ve yalnızca sınırlı sayıda patlama (%0,8) ve toksik gaz salımları(%0,1) olduğu rapor edilmiştir. Natech olayına karışan tehlikeli madde türlerinin en fazla doğal gaz ve LPG gibi maddeler olduğu bildirilmiştir. Depremin tetiklediği Natech olaylarının, insanlara zarar verme olasılığının en yüksek olduğu, bunu selin izlediği raporlanmıştır.

Dökmeci ve Akduman (2022) tarafından yapılan çalışmada, ülkemizde doğa kökenli olayların tetiklemesiyle birlikte ardışık etkilerle ortaya çıkabilecek büyük ölçekli Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik, Nükleer ve Patlayıcı (KBRN-p) tehlikelerine yönelik hazırlanmış haritalar bulunmadığı belirtilmiştir. İklim değişikliğinin, hava ile ilgili doğal tehlikelerin

sıklığını ve yoğunluğunu artırdığı düşünüldüğünde mevcut KBRN-p maddelerinden kaynaklanabilecek tehlikelerin envanterinin bilinmesinin, risklerin azaltılmasında ve olası faciayı önlemede kilit rol oynayabileceği vurgulanmıştır. KBRN-p olaylarının gerçekleşme olasılığı bulunan illerdeki endüstriler ve enerji tesislerini içeren haritalar, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından oluşturulmuş; deprem, sel/taşkın, heyelan ve çığ tehlike haritaları (AFAD) üzerinde örtüştürülmüş ve ardışık etkiler sonucu açığa çıkabilecek riskler literatür taramasına dayandırılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın, KBRN-p tehlike ve risk haritalarının hazırlanmasında yol gösterici olması beklenmektedir. Ülkemizdeki sel ve taşkın sayısının Samsun, Trabzon, Afyonkarahisar, Zonguldak, Aksaray, Hatay ve Eskişehir’de yoğunlaştığı görülmüştür. Son 10 yılda küresel iklim değişikliğinin etkileriyle yurdun birçok yerinde sel ve taşkın sayısı ve şiddeti hızla artmıştır. Buna paralel olarak BEKRA kapsamında alt ve üst seviyeli kuruluşların illere göre dağılım haritaları incelenmiş; Teknolojik Kazalar Bilgi Sistemi’ndeki veri tabanına göre, endüstriyel kazaların çoğunun İzmir, Tekirdağ, Kırıkkale ve Ankara gibi BEKRA kuruluşlarının yoğun olarak bulunduğu illerde gerçekleştiği gösterilmiştir. Ardışık ve zincirleme yaşanan hem çevresel hem de insan sağlığını tehdit edebilecek bu olaylardaki zincir unsurlarını izole etmenin önemi ifade edilmiştir.

3.2. İklim Değişikliği Etkileri Özelinde Kimyasal Proseslerde Risk Analizine Yönelik Çalışmalar

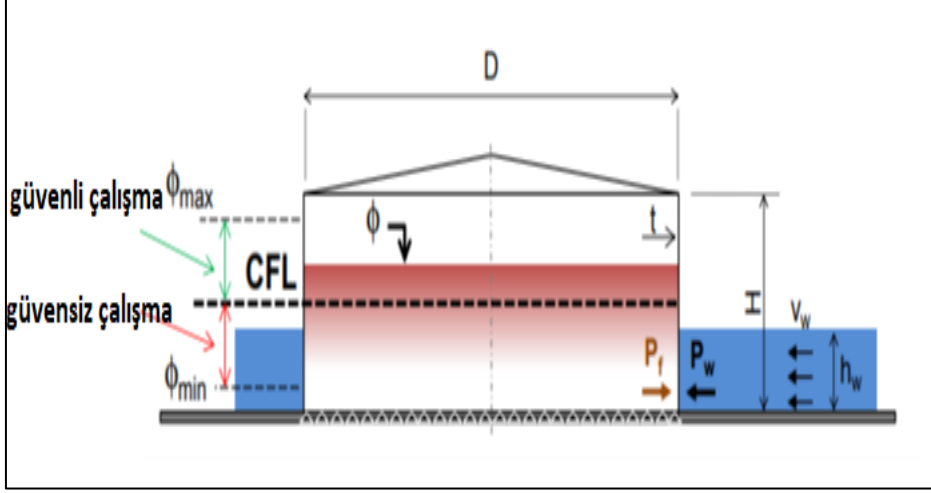
Cruz ve Okada (2008a) tarafından kentsel alanlarda Natech riskinin ön değerlendirmesi için bir metodoloji önerilmiştir. Önerilen metodoloji, yerel hükümet yetkilileri tarafından halkla istişare halinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Metodoloji, kentsel alanda çeşitli sistemler arasındaki olası etkileşimlere dayandırılmıştır: fiziksel altyapı (örn. endüstriyel tesisler, kritik tesisler), topluluk (örn. maruz kalan nüfus), doğal çevre (örn. hassas ekosistemler, nehir havzaları) ve risk ve acil durum yönetim sistemleri (ör. yapısal ve yapısal olmayan önlemler). Hassasiyet ve tehlike ile ilgili faktörler analiz edilmiş ve niteliksel önlemler önerilmiştir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli, Türkiye depremi sırasında yaşanan tehlikeli madde salımlarından elde edilen veriler, metodolojinin uygulanabilirliğini göstermek için bir vaka çalışmasında kullanılmıştır. Önerilen RNRA (Rapid Natech Risk Assessment) metodolojisi, veri toplama ve envanter geliştirme, tehlike tanımlama ve güvenlik açığı analizi ile tehlikeli madde içeren her depolama tankı için bir Natech risk indeksinin tahminini içermektedir. RNRA metodu ile tehlikeli madde içeren depolama tanklarının yeri doğal tehlike haritaları

üzerine yüklenerek, “en kötü durum” doğal tehlike kuvvetlerine maruz kalan alanlarda hangi tehlikeli maddelerin bulunduğu belirlenmiştir. Bir sonraki adım, her Natech olayı nedeniyle potansiyel etki alanının belirlenmesi, sonuç analizi ile ilgilidir. Sonuç analizi yapabilmek için her Natech olayından etkilenen alanın kapsamının belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Yine bu aşamada, depolama koşullarına ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak, tehlikeli madde salımlarının üç biçimde meydana gelebileceği belirtilmiştir: sıvı dökülmeleri, zehirli gaz salımları ve yangın/patlamlar. Metodolojinin diğer aşamaları, Natech'lerin sonuçlarının tahmin edilmesi, domino etkisi potansiyelinin belirlenmesi, güvenlik açığı alan skorun tahmin edilmesi, temel tesisler üzerindeki etkilerden kaynaklanan güvenlik açığının tahmin edilmesi ve Natech risk indeksinin tahmin edilmesidir. Metodolojinin bir Natech'in nerede oluşabileceğini tahmin etmeye hizmet etmese de potansiyel Natech sıcak noktalarına işaret ettiği; Natech riskine karşı bir planlama aracı olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Antonioni vd.(2009) tarafından deprem ve selin tetiklediği kazaları içeren iki Natech olayının neden olduğu riskin niceliksel olarak değerlendirilmesini için hasar modelleri geliştirilmiştir. Ekipman kalemlerinin, doğa olayları nedeniyle hasar görme olasılıkları hesaplanmıştır. Prosedür, doğal olayların etkisinin neden olduğu çoklu arıza senaryoları da dahil olmak üzere bireysel ve toplumsal risk endekslerinin hesaplanmasını içermektedir. Bireysel ve toplumsal riske ilave katkının hesaplanmasında Aripa yazılımı da kullanılmıştır. Metodoloji, vaka çalışmasına uygulanmıştır. Metodolojinin başlangıç noktasında, ilgili tesisin bulunduğu sahadaki doğal tehlikelerin sıklığı ve şiddeti analiz edilmiştir (adım 1). İkinci adımda, ilgili hedef ekipman kalemleri tanımlanmıştır. 3. adımda, bütünlük kaybının sonuçlarını hesaplamak için olası hasar modu hesaplanmıştır. Salınan maddenin özelliklerine dayalı olarak özel olay ağaçları uygulanmış, hasar moduyla ilişkilendirilebilecek referans senaryoları tanımlanmıştır. Takip eden adımda (4), tanımlanan hasar türleri temelinde, hasar olasılıkları, 1. adımda tanımlanan doğal olayın ciddiyetini karakterize etmeye uygun parametrelere dayalı olarak basit, spesifik hassasiyet veya kırılganlık modellerinden hesaplanmıştır. QRA yaklaşımı dahilinde kullanıma uygun, basitleştirilmiş ekipman hasar modelleri geliştirilmiştir.

Landuccia vd. (2014a) tarafından yapılan çalışmada, sel olaylarına karışan atmosferik tankların hasar olasılığının değerlendirilmesi için bir güvenlik açığı modeli önerilmiştir. Güvenlik açığı modeli, hem doğal olayın hem de ekipman özelliklerine dayandırılmıştır. Sel/taşkın yoğunluğu ile bir tankın direnci arasındaki karşılaştırmaya dayalı olarak mekanik

bir model geliştirilmiştir. Mekanik model kurulumunda, bir sel dalgasından etkilendiğinde atmosferik tanka etki eden kuvvetler dikkate alınmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Sel dalgasından etkilendiğinde atmosferik tanka etki eden kuvvetlerin şematik gösterimi (Landuccia vd., 2014a)

Mevcut çalışma için kabul edilen girdi parametreleri dikkate alındığında, az sayıda kabın boşken bile başarısız olduğu görülmüştür. Ayrıca, bildirilen güvenilir aralığa göre girdi parametrelerinin değiştirilmesi, %15'in üzerindeki doluluk seviyesi değerleri için öngörülen başarısızlık oranını sıfıra ulaştırmıştır. Bu doğrulama, model tarafından tahmin edilen arıza koşullarının, güvenilir girdi parametrelerinin seçimine göre sağlam olduğunu ve mevcut literatür verileriyle yeterince uyum içinde olduğunu kanıtlamıştır. Tank kabuk hasarında, doluluk seviyesi kritik parametre olarak kabul edilmiştir. Taşkın sırasında tank doldurma seviyesi Kritik Doldurma Seviyesi (CFL)'den düşükse, tank dış basınca karşı koyamadığı için "güvensiz koşullar" bölgesindedir. Metodolojiyi tipik bir QRA çerçevesinde hasar olasılıklarının hesaplanmasında, sel geri dönüş süresi, sıklık ile şiddet parametreleri analiz edilmiştir. Düşük hassasiyet değerlerine rağmen, sel koşulları, düşük geri dönüş süresi nedeniyle daha yüksek frekans(f_{LOC}) değerleri vermiş ve tank çiftliğinin risk profili önemli ölçüde artmıştır.

Antonioni vd. (2015) tarafından sel/taşkın tetiklediği Natech senaryolarının QRA uygulanması için özel bir metodoloji geliştirilmiş ve farklı ekipmanların değerlendirilmesine uygulanmıştır. Spesifik güvenlik açığı modelleri, hem atmosferik hem de basınçlı ekipmanın arıza olasılığı ve Natech' in neden olduğu salım frekansları tahminini sağlamıştır. Vaka çalışması, sel/taşkınlara maruz alanlarda bulunan endüstriyel tesislerde önemli bir risk

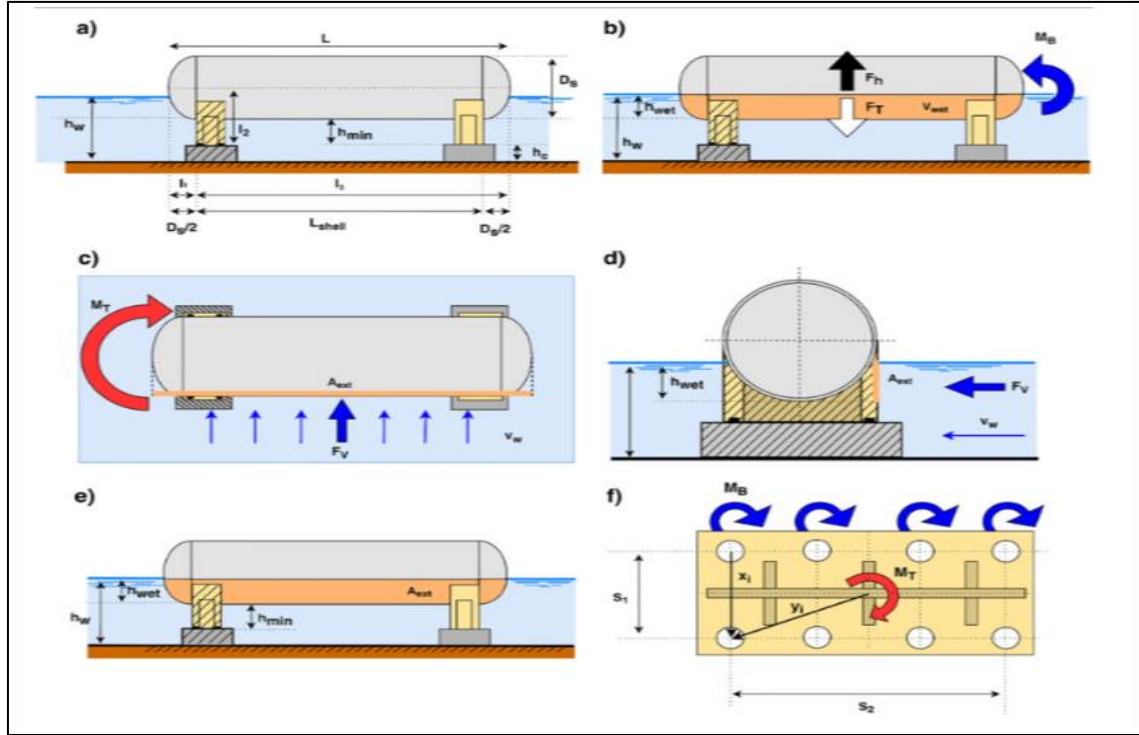
artışını göstermiştir. Tanımlanan referans senaryolar, farklı hasar potansiyeline ve beklenen sıklığa sahip çeşitli sel/taşkın senaryolarının etki değerlendirmesini sağlamıştır. Ekipman arıza olasılığı için hesaplanan düşük değerlere rağmen sel/taşkın olaylarının yüksek sıklığı nedeniyle oldukça yüksek kaza frekans değerleri elde edilmiştir

Mayorgaa vd.(2019) tarafından yapılan çalışmada, depolama tanklarının çeşitli doğa olaylarına (depremler, seller, vb.) karşı savunmasızlığı göz önüne alınarak, kırılgenlik ve olasılıksal bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu metodoloji, doğal afetlere maruz kalan yer üstü depolama tanklarındaki ana hasar türlerinin değerlendirilmesi için parametrik ve olasılıksal bir analiz sağlamıştır. Önce tank ve tehlike karakterizasyonu yapılmış, sonrasında olası kaza senaryoları ve durum denklemlerinin tanımı, en son olarak da hasar olasılığının tahmini tespit edilmiştir. Göz önünde bulundurulan hasar tiplerinin her birinde depolama tanklarının hasar durumunun tahmini için kırılgenlik eğrileri elde edilmiştir. Ekipmanın doluluk derecesinin hem devrilme hem de burkulma olasılığı üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Burkulma ve devrilme hasarı olasılığının, hem yoğunluk büyüklüğü hem de eğrilik açısından büyük ölçüde depolama tankının çap/yükseklik (D/H) oranına bağlı olduğu gösterilmiştir. Doluluk ve D/H değeri arttıkça medyan yoğunluk artmıştır. Bu daha büyük kütleye ve depolanmış sıvıya sahip bir yapının sel/taşkınla ilgili hasarlara daha az eğilimli olacağını göstermiştir. Hasar olasılığı, daha düşük doluluk dereceleri ve daha yüksek dalga yükseklikleri ile artmıştır. Rüzgâr kuvvetleri söz konusu olduğunda, 60 m/s hızla hareket eden 20 kg'lık bir nesne için enkaz penetrasyonunun meydana gelme olasılığı %50 olarak bulunmuştur. Boş tankların hem kabuk burkulması hem de yüzdürme hasarlarına yüksek oranda maruz kaldığı; her iki maruziyette 2 m'den düşük dalga yükseklikleri için neredeyse kesin hasar meydana gelebileceği tespit edilmiştir.

Misuri vd. (2020) tarafından yürütülen çalışmada; yıldırımın atmosferik depolama tanklarında Natech kazalarına yol açan en sık doğa olayı olduğu vurgulanmıştır. Ortaya çıkan yangınların genellikle sınırlı şiddete ve yalnızca lokal etkilere sahip olmasına rağmen, domino etkisinin bu birincil olayların tırmanmasına neden olabileceği ve yakınlardaki basınçlı depoları ve proses ekipmanlarını etkileyebileceği belirtilmiştir. Çalışmada, Natech kazalarının artmasına neden olan domino etkisi kaynaklı riskin nicel değerlendirmesi için kapsamlı bir metodoloji geliştirilmiştir. Daha önceki çalışmada, genel senaryoların sonuçlarının analizinin ve kaynaklanan ek riskin hesaplanmasının dikkate alınmadığı, yalnızca endüstriyel tank çiftliklerinde yıldırım tarafından tetiklenen domino senaryolarının

sıklık değerlendirmesinin ele alındığı belirtilmiştir . Bu nedenle, Natech senaryolarının nicel risk değerlendirmesi için mevcut metodolojiler, spesifik senaryolardan kaynaklanan riske katkıyı yakalayamamıştır. Şiddetli domino kazalarının yıldırım tarafından tetiklendiği çok sayıda vaka geçmişi göz önüne alındığında, bu senaryoları QRA' ya dahil etmek için özel bir metodoloji sağlanması son derece önemli bulunmuştur. Probit yaklaşımına ve kombinatoriyal analize dayalı domino tırmanışı için olasılıksal modelleri içerecek şekilde yıldırım risk değerlendirmesini uyarlayan kapsamlı bir prosedür elde edilmiştir. Geliştirilen prosedür dört ana bölüme dayandırılmıştır: i) ön veri toplama; ii) birincil Natech senaryolarının değerlendirilmesi; iii) Natech kaynaklı domino tırmanışının değerlendirilmesi; ve iv) genel risk hesaplaması. Önerilen metodoloji, domino etkisi nedeniyle risk rakamlarındaki değişimi ve ikincil domino senaryolarının güvenilirliğini doğrulamak için bir vaka çalışmasına uygulanmıştır. Vaka çalışması, geleneksel senaryolara kıyasla iki büyüklük mertebesinde riskte artışa yol açmıştır.

Caratozzolo vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, geliştirilen genelleştirilmiş güvenlik açığı modeli, sel suyunun yüksekliği ve hızına ve tankın ayrıntılı geometrik verilerine dayalı olarak yüzdürme veya yer değiştirme nedeniyle olası yapısal hasarın değerlendirmesini sağlamıştır. Sel/taşkında yer değiştirme ve yüzdürme, flanşlı bağlantıların bağlantısının kesilmesi veya boru tesisatının yırtılmasının bir sonucu işlenmiş/depolanmış maddenin salımına neden olmaktadır. Bu nedenle, dayk tipi mesnetlerin bütünlüğüne odaklanan mekanik bir model, sel yükü altında mesnet semerlerinin zemine bağlantısının direnci dikkate alınarak geliştirilmiştir. Sel olayları sırasında, desteklenen silindirik yatay tanka etki eden kuvvetler şematize edilmiştir (Şekil 3.9) . Geliştirilen mekanik model, kritik hızın (V_{cr}) ve kritik ağırlığın (W_{cr}) sel/taşkına karşı ekipman savunmasızlığı üzerindeki spesifik etkisinin anlaşılmasını sağlamıştır. Sürüklenme kuvveti ve üretilen tork nedeniyle oluşan kayma gerilimi, sel suyunun ekipmanın dış yüzeyi üzerindeki etkisiyle ilişkilidir. Aslında, sabit bir sel suyu yüksekliği için sel suyunun ekipmana çarptığı alan yatay uzunluk arttıkça artar ve bağlantı cıvatalarında daha yüksek kayma gerilimi oluşturur. Bu, daha yüksek yatay uzunluğa sahip ekipmanın, ana arıza nedeninin kaldırma kuvveti ile ilgili olduğunu ve daha küçük tanklara kıyasla yüksek sel su hızında daha savunmasız olduğunu doğrulamıştır.



Şekil 3.9. Sel/taşkın suyunun yatay tanklar üzerindeki etkisini açıklamak için benimsenen şematik gösterim: (a) Geometrik parametrelerin tanımı; (b) Kaldırma kuvvetinin etkisi; (c) Tankın sürüklenme kuvveti etkisini gösteren üstten görünüş; (d) Ekipmanın sürüklenme kuvveti etkisini gösteren yandan görünüş; (e) Sel suyundan etkilenen tankın dış yüzeyi; (f) Ankraj sistemi düzeninin ve parametrelerinin üstten görünüşü (Kesikli alanlar ankrajlı desteği gösterir; M_B : sel suyu tarafından üretilen eğilme momenti; M_T : sel suyu tarafından üretilen tork) (Caratozzolo vd., 2022)

4. MATERİYAL VE METOT

Tez çalışmamda, iklim değişikliğinin kimyasal proseslere etkilerinin risk analizi amacıyla öncelikle 2007-2023 yılları arasında meydana gelmiş proses kazaları eNatech ve EM-DAT veri tabanları üzerinden analiz edilmiştir. Proses kazalarını en çok tetikleyen doğal afet türleri ve bunların etkilediği proses ekipmanları ile kazaların coğrafi konumu, kaza dinamiği, nihai senaryolar (yangın, patlama, toksik yayılım) ve dahil olan endüstri türleri değerlendirilmiştir. Ardından, ilgili doğal afet türü ve proses ekipmanlarını barındıran, risk analizi çalışmaları yürütülecek il ve mevzuat kapsamındaki kuruluş seçimleri yapılmıştır. Son aşamada ise hasar analizi, olay ağacı analizi ve sonuç analizleri uygulanarak risk analizi metodolojisi oluşturulmuştur. Önerilen metodolojinin saha uygulaması da yapılmıştır.

4.1. Proses Kaza Verilerinin İstatistiksel Değerlendirmesi

İklim değişikliğinin kimyasal proseslere etkileri Natech kazaları ile kendini göstermektedir. Natech” terimi, teknolojik kazaları tetikleyen doğal afetleri barındırır. Doğal ve endüstriyel risk arasındaki etkileşim nedeniyle, endüstriyel tesislerde ve depolama sahalarında, örneğin boru hatlarına, proses ekipmanlarına, depolama tanklarına zarar veren ve sonuç olarak atıkların salınmasına neden olan çeşitli etkilerin meydana gelmesi mümkündür. Farklı türde doğa olayları veya genel olarak endüstriyel kazaların doğal nedenleri (heyelanlar, kasırgalar, şiddetli rüzgârlar, tsunamiler, yıldırım, soğuk/sıcak sıcaklık, sel, şiddetli yağmurlar vb.) vardır.

Veri analizinin başlangıç noktası geçmişe yönelik kaza verileri toplanarak veri kaynağı sağlamak ve veriler ışığında kazaların etki ve niteliklerinin saptanması, olası bir korelasyonun elde edilmesidir. Farklı türde doğa olaylarının endüstriyel kuruluşlar üzerindeki etkilerinin sonuçları doğa olaylarına bağlı olarak değişebilmektedir. Her doğal neden vakasında tek bir etki analizi yaklaşımına sahip olmak ve Natech olaylarından kaynaklanan riskin değerlendirilmesi için genel ve birleşik bir çerçeve geliştirmek faydalı olabilmektedir. QRA (niceliksel risk analizi) yanında Natech olaylarının standart endüstriyel risk endekslerine katkısının değerlendirilmesi gerekmektedir. Endüstriyel risk endekslerinin değerinin sayısallaştırılması için doğal olaya özgü bazı parametrelerin eklenmesi ve bunun yanı sıra doğal olayın hedeflenen her ekipman kaleminin savunmasızlığını tanımlamak için spesifik alt modellerinin uygulanmasına gereksinim vardır (Campedel, 2008).

Natech kazalarına ilişkin kayıtların incelenmesi ile

- bu olaylara daha sık dahil olan ekipman kategorileri
- tekrarlayan hasar türleri
- ilişkili senaryolar
- basitleştirilmiş modeller

geliştirilerek doğal olayın şiddet parametresi ile ekipman öğelerinin savunmasızlığı arasında olası bir ilişki tespit edilip, basitleştirilmiş ekipman güvenlik açığı modelleri türetilir.

Tez çalışmasında, proses kazalarının istatistiksel değerlendirmesi amacıyla eNatech(Natural Hazard -Triggered Technological Accidents Database) ve EM-DAT (The International Disaster Database) veri tabanları analiz edilmiş ve 2007-2023 yılları arasında son 17 yıl içerisinde meydana gelen kazalar belirlenmiştir. EM-DAT üzerinden dünya genelinde meydana gelen 5738 kazanın istatistiksel analizi yapılmıştır. İncelenen kazaların doğal afet gruplarına göre dağılımları tespit edilmiştir. Selin en sık endüstriyel kaza tetikleyicisi olduğunun belirlenmesi ardından eNatech veri tabanı üzerinden sel nedeniyle oluşan 44 Natech kazası incelenerek en çok hasar gören ekipmanlar analiz edilmiştir.

4.2. Risk Analizi Yapılacak İl ve Kuruluş Seçimi

Proses kazalarında öne çıkan doğal afet tipleri ve bu kazalardan etkilenen ekipman türleri değerlendirilmiştir. Türkiye’ de bu afet türlerini içeren il ve bu ilde ilgili Yönetmelik kapsamında söz konusu ekipman türlerini barındıran kuruluşlar seçilmiştir (Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik, 2019).

4.3. İklim Değişikliğinin Kimyasal Proseslere Etkilerinin Risk Analizi

Tehlikeli maddeleri işleyen, depolayan veya kullanan tesislerin çoğu prensip olarak doğal afetlerin etkilerine karşı savunmasızdır. Geçmişteki birçok doğal afet, tesislerde can kaybı, sağlık etkileri, çevre kirliliği ve ekonomik kayıplarla sonuçlanan büyük hasarlara neden olmuştur. Veriler ve tahminler, iklim değişikliğine bağlı doğal afetlerin sıklığının ve yoğunluğunun önümüzdeki yıllarda artacağını göstermektedir. Artan sanayileşme, kentleşme, iklim değişikliği risklerinin ve belirsizliklerinin Natech risk yönetimine

entegrasyonu, Natech kazalarının önlenmesi, hazırlıklı olunması ve müdahale edilmesi için esastır.

Yapısal hasara ilişkin veriler, ekipmanlar ve sızıntı sonrası olası ateşleme/tutuşma senaryosu oluşturularak riskin sayısallaştırılması mümkündür. Hasar ekipmanı olasılığının sayısallaştırılmasını sağlayacak veriler kaynaklarda kısıtlıdır. Bununla birlikte, analiz, temel ekipman kalemleri için basitleştirilmiş güvenlik açığı modelleri geliştirmek için hangi yönlerin ayrıntılı olarak incelenmesi gerektiğini ve hangi yolun izlenmesi gerektiğini netleştirilir.

UNISDR&CRED verileri, dünya genelinde meydana gelen doğal afetlerin en yaygınının meteorolojik afetler olduğu ve sellerin en yaygın görülen afet türü (%44) olduğunu öne çıkarmaktadır. Literatürde ise dünyadaki Natech kazalarının %85 oranla meteorolojik afetlerin tetiklenmesi ile meydana geldiği ve bu sürecin en fazla etkilediği ekipmanın depolama tankları olduğu belirtilmiştir (Ricci vd., 2021; Cozzani vd., 2010).

Endüstriyel tesislerde selin tetiklediği önemli sayıda teknolojik kazanın analizi ile elde edilen sonuçlar şunları göstermiştir:

- Natech kaza senaryolarının ciddiyeti genellikle daha yüksektir, çünkü birçok ekipman aynı anda hasar görür ve bu nedenle birden fazla ve aynı anda serbest bırakma kaynakları üretilir (Antonioni vd., 2009).
- Olası senaryoların sayısı, ek senaryolar nedeniyle daha yüksektir (örneğin, su ile temastan kaynaklanan yanıcı/zehirli gazlar nedeniyle yangın ve yayılım) (Gomez vd., 2020).
- Bazı ekipman kategorileri, örneğin basınçlı kaplar ve depolar, doğal olayların etkisi nedeniyle daha savunmasız veya tehlikeli olabilir (Campedel, 2008; Cozzani vd., 2010).

Ayrıca doğa olaylarının ekipman öğeleri üzerindeki etkileri;

- Bir doğa olayı sırasında en yüksek güvenlik açığına sahip nesneler, boru hatları ve depolama tanklarıdır. Atmosferik tanklar basınçlı kaplardan daha savunmasızdır.
- Atmosferik ve basınçlı tankların farklı kırılabilirlikleri, doğal olayın türüne bağlıdır.
- Boru hatları ve boru hattı sistemleri, doğal olaylara karşı çok hassastır ve yüksek salım ve çevresel etki olasılığı ile göz ardı edilemez bir risk kaynağı teşkil eder.

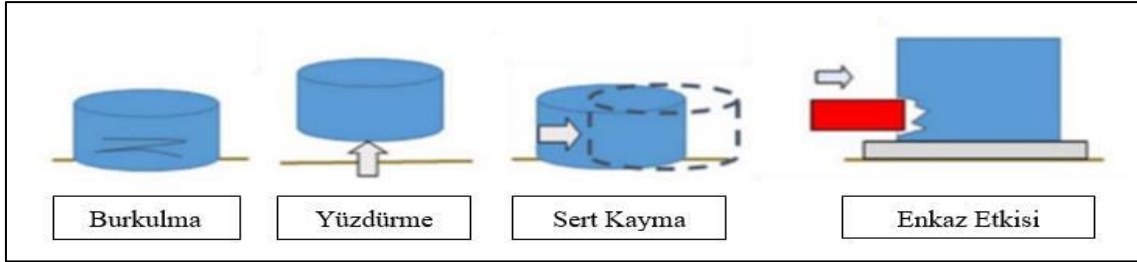
- Patlama ve yangın senaryoları en yaygın, yanıcı maddelerin depolandığı bölümlerde görülmektedir (Campedel , 2008).

olarak sıralanabilir.

Selin tetiklediği Natech kazalarının tesislere etkileri şu şekilde özetlenebilir;

- Ekipmanın yüzdürülmesi ve bağlı parçalarda veya ekipmanda hasar,
- Sel suları ile birlikte sürüklenen yüzer ekipman veya moloz ve çarpışma yoluyla sahadaki hassas ekipmana zarar verme,
- Sel suyunun kuvveti yeterince güçlüyse tanklarda çökme ve patlama,
- Elektrikli ekipmanla su temas ettiğinde kısa devreler ve elektrik kesintisi,
- Uzun mesafelerde tehlikeli maddelerin taşınması ile geniş alanlarda etkiler
- Su ile şiddetli reaksiyona giren salınan kimyasallardan kaynaklanan zehirli veya yanıcı buharlar.

Doğal tehlikelere maruz kalan tanklar için ilgili hasar modları ise Şekil 4.1 ‘de özetlenmiştir (Mayorga vd., 2019).



Şekil 4.1. Selden etkilenen bir depolama tankında oluşabilecek hasar modları (Olivar, 2018)

Sel durumunda tanklarda yer değiştirme ve burkulma örneği fotoğrafları Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Sel sırasında tankın yer değiştirmesi (a)ve burkulma (b) örneği (e-NATECH)

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi esas olarak yüzdürme nedeniyle yer değiştirmesinin sel kaynaklı en sık yaşanan hasar modu olduğu bildirilmiştir (Santella, 2010). Sel nedeniyle 30 m’ye varan yer değiştirmeler kaydedilmiş; boru hattının ayrılması ve ciddi yapısal hasarlar meydana gelmiştir (Godoy, 2007) .

Metodoloji

Sel nedeniyle tetiklenen Natech kazalarında, bir ekipman kategorisi için geliştirilen belirli bir güvenlik açığı modeli kullanılarak, endüstriyel ekipman üzerinde selin neden olduğu kaza sıklığının değerlendirilmesi için çeşitli metodolojiler önerilmektedir: Başarısızlık olasılığının kaba bir tahminine izin veren genel bir korelasyon bildirilmiştir (Antonioni vd., 2015). Selin neden olduğu LOC kazalarının risklerinin nicel analizi için bir risk değerlendirme çerçevesi (Gai vd., 2012); selin şiddetinin bir fonksiyonu olarak tankın hasar olasılığını hesaplamak için model geliştirilmiştir (Landucci ve diğ., 2012). Sel parametrelerinin şiddetine veya yoğunluğuna bağlı olarak ekipman hasarı olasılığını tahmin etmeyi amaçlayan güvenlik açığı modellerinin belirlenmesi için bir metodoloji de üretilmiştir (Landucci ve diğerleri, 2013). Taşkın yoğunluğu ile bir tankın direnci arasındaki karşılaştırmaya dayalı mekanik bir model önerisi de yapılmıştır (Tolo ve diğerleri, 2014). Model, Bayes ağlarının yüksek esnekliğini ve iklim değişikliği projeksiyonlarını yeterince dahil etme yeteneklerini gösteren gerçek bir vaka çalışmasının üç farklı senaryosuna uygulanmıştır. Sel olaylarına karışan atmosferik tankların arızalanma olasılığının değerlendirilmesi için bir güvenlik açığı modeli sunulmuştur (Landucci ve diğerleri, 2014a). Bir mekanik hasar modeli geliştirilmiş ve doğrulanmıştır (Landucci ve diğerleri, 2014b).

Tankın arızalanmasına yol açan kritik taşkın koşullarını hesaplamak için basitleştirilmiş korelasyonlar elde edilmiştir. Natech senaryolarında sellerin neden olduğu ekipman hasar olasılığının doğrudan değerlendirilmesi için bir kırılma modelini önerilmiştir. Taşkınların neden olduğu Natech olaylarının QRA'sının uygulanması için özel bir metodoloji geliştirilmiş ve bu farklı taşkın olaylarının ve ekipman kategorilerinin değerlendirilmesine uygulanmıştır (Cozzani vd., 2014). Spesifik güvenlik açığı modelleri, hem atmosferik hem de basınçlı ekipmanın arıza olasılığını ve Natech'in neden olduğu salın frekanslarının tahminini sağlamıştır (Khakzad ve Van Gelder, 2017). Kimyasal tesislerin, özellikle de sele maruz kalan yer üstündeki depolama tanklarının savunmasızlığını değerlendirmek için başka bir metodoloji geliştirilmiştir (Khakzad ve Van Gelder, 2018). Endüstriyel tesislerin sellere karşı kırılma modelini (başarısızlık olasılığını) değerlendirmek için fiziksel güvenilirlik modellerine ve Bayes ağlarına dayalı bir metodoloji de üretilmiştir; tank dizileri için kırılma eğrileri elde edilmiştir (Mayorga vd., 2019).

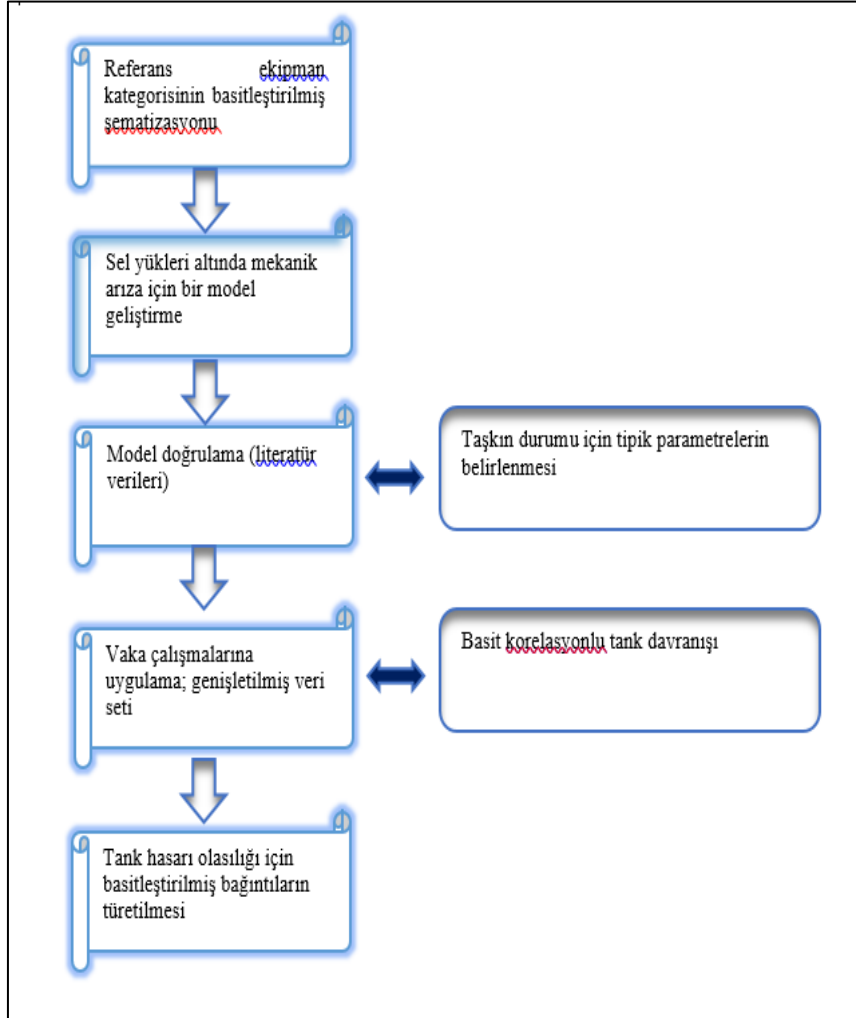
Bu tez çalışmasında, iklim değişikliğinin proseslere etkilerinin risk analizi, hasar analizi, olay ağacı analizi ve sonuç analizleri üzerinden yürütülmüştür.

Hasar analizi

NaTech olaylarının QRA için önemli bir nokta, doğal olayın şiddet veya yoğunluk parametreleri temelinde ekipman hasar olasılığının tahmini sağlayan ekipman güvenlik açığı modellerinin tanımıdır. Genellikle çok sayıda senaryonun değerlendirilmesini gerektiren bir QRA çalışmasının özelliklerinden dolayı, ekipman savunmasızlığının değerlendirilmesini etkili bir şekilde desteklemek için ekipman arıza koşullarının tahminini sağlayabilen basitleştirilmiş modellerin ve korelasyonların kullanılmasına gereksinim vardır. Atmosferik depolama tankları, daha düşük yapısal direnci nedeniyle daha sık hasar görme potansiyeline sahiptir. Bu sebeple bütünlük kaybına yol açan olaylarda en sık yer alan tank kategorisidir (Cozzani vd., 2010). Tez çalışmasında, atmosferik dikey tankların sellere karşı savunmasızlığı dikkate alınmıştır.

Literatür araştırması, iki ana parametrenin bir sel olayının yoğunluğunun basitleştirilmiş bir tanımına izin verebileceğini göstermiştir: maksimum su yüksekliği ve maksimum su hızı. Geçmiş kazalarda proses ekipmanında yaşanan hasarlar, bu iki parametreyle ilişkilendirilmiştir (Cruz ve Okada, 2008b) . Bu nedenle, maksimum sel yüksekliği (h_w) ve

maksimum su hızı (v_w) hasar olasılığını ilişkilendiren etkin parametrelerdir. Sel olaylarına dahil olan atmosferik tankların hasar analizi için metodolojik yaklaşım Şekil 4.3' de verilmiştir.

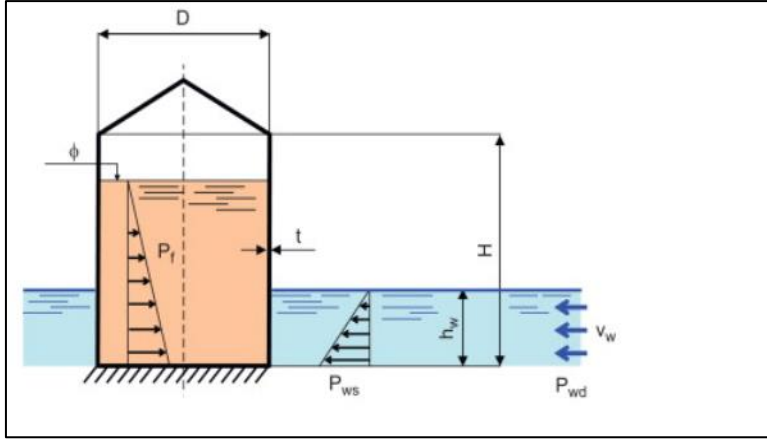


Şekil 4.3. Sel olaylarına dahil olan atmosferik tankların hasar analizi için metodolojik yaklaşım

Şekil 4.3' de gösterildiği gibi ilk adımda tank geometrisinin basitleştirilmiş bir temsili vardır. Adım 2'de, dış basınç yükü nedeniyle kapların burkulmasını hesaba katabilen ve böylece doğrudan sel suyunun neden olduğu kabuk dengesizliği ve yırtılmasına odaklanan mekanik bir model geliştirilir. 3. adımda, modeli doğrulamak için sel olaylarından kaynaklanan yapı hasarlarına ilişkin literatür verileri kullanılır. 4. adımda, depolama tankı mevcut gerçek verileri; 5. adımda, tankın sellere karşı savunmasızlığının değerlendirilmesinde basitleştirilmiş hasar olasılığı korelasyonları kullanılır.

Tank geometrisi

Sellerin tetiklediği geçmiş kazaların analizinden, yer üstü atmosferik depolama tanklarının sel olaylarında daha sık hasar gören proses öğeleri olduğu gösterilmiştir (Cozzani vd., 2010). Tank tipi ise atmosferik basınçta çalışan sabit veya yüzer tavanlı dikey bir silindirden oluşur (Şekil 4.4). Tankların tabanı tipik olarak düzdür ve bir dap bağlantısıyla doğrudan zemine sabitlenir. Bu tip kap, esas olarak atmosfere yakın basınçta sıvı depolamak için kullanılır. Bu çalışmada, atmosferik basınçta çalışan ve sıvı depolama için dikey silindirik kaplardan oluşan depolama tankları ele alınmıştır. Genellikle bu tür tanklarda depolanan ve en çok Natech kazalarına karışan kimyasallar ise benzin, yağ ve dizeldir (Campedel, 2008). Vaka çalışması, örnek kurustaki benzin ve dizel tanklarına uygulanmıştır.



Şekil 4.4. Selin dikey atmosferik tanka etki eden kuvvetlerinin şematik gösterimi

Mekanik model kurma

Metodolojinin çıkış noktası, referans sel koşullarının ve böylece QRA' da dikkate alınacak referans senaryoların belirlenmesidir. Her sel olayının, bir risk değerlendirme çerçevesinde (Şekil 43.-adım 3) sıklık ve şiddet açısından karakterize edilmesi gerekir. Sel sıklığı değerlendirmesi için standart parametre, yıl cinsinden ölçülen ve hidrolojik çalışmalarla belirlenen geri dönüş süresidir (t_r) (Charlton, 2008). Sel frekansı (f) böylece aşağıdaki gibi tahmin edilebilir:

$$f = 1/t_r \quad (4.1)$$

Şekil 4.4'de bir sel dalgasının tanka etki eden kuvvetlerinin şematik gösteriminden, tank kabuğunda bulunan harici yük (P_w), "statik" basınç bileşeni (P_{ws}) ile "dinamik" basınç bileşeninin (P_{wd}) toplamı olarak elde edilir (eşitlik 2).

$$P_w = P_{ws} + P_{wd} \quad (4.2)$$

Statik basınç bileşeni(P_{ws}), sel suyunun hidrostatik yükünden kaynaklanır ve maksimum değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_{ws} = \rho_w g h_w \quad (4.3)$$

burada g yerçekimi ivmesidir (9.81 m/s^2) ve ρ_w sel suyunun yoğunluğudur. İkinci basınç bileşeni P_{wd} , dalga'nın kinetik enerjisiyle ilişkili sürüklenme kuvvetinden kaynaklanır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_{wd} = \frac{1}{2} \rho_w k_w v_w^2 \quad (4.4)$$

Burada k_w hidrodinamik katsayı, sıcaklık 24.5°C ve atmosferik basınç 1 atm varsayılmıştır.

Tankın iç basıncı, P_f , iç sıvı tutmanın hidrostatik basıncıyla ilgili olarak Şekil 4.4'de gösterildiği gibi tankın sel dış basıncına karşı direncinin değerlendirilmesinde önemli bir role sahiptir. Maksimum P_f değeri, tankın tabanında aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_f = \rho_f g H \phi \quad (4.5)$$

burada ρ_f iç sıvının yoğunluğu, H tankın yüksekliği ve ϕ doluluk seviyesidir. Bu nedenle, kap kabuğu üzerindeki net basınç P_{net} , basit bir kuvvet dengesinden elde edilebilir.

$$P_{net} = P_{ws} + P_{wd} - P_f \quad (4.6)$$

Tanklar, duvar üzerinde bir dış basınca maruz kaldığında, direnç kaybı çoğunlukla burkulmadan kaynaklanır (Landucci vd., 2012). Tankın dış kabuğunu etkileyen net basınç(P_{net}), kritik basınca (P_{cr}) ulaşırsa, burkulma meydana gelebilir (American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1989) . P_{cr} yalnızca tank geometrisine ve yapı malzemesine bağlıdır; yükleme koşullarından bağımsızdır.

$$P_{cr} = k_1 C + k_2 k_1 = -0.199 k_2 = 6950 \quad (4.7)$$

Aşağıdaki koşul atmosferik tank kararsızdır;

$$P_{net} \geq P_{cr} \quad (4.8)$$

Depolama tankının geometrisi ve depolanan maddenin özellikleri tanımlandıktan sonra, tankın taşmaya karşı direncini etkileyen tek çalışma parametresi doluluk seviyesidir (Landuccia vd. , 2014a). Atmosferik tankın dolum seviyesi (CFL);

$$CFL = \frac{P_{ws} + P_{wd} - P_{cr}}{\rho_f g H} \quad (4.9)$$

$$CFL = \left(\left(\frac{\rho_w k_w}{2} v_w^2 + \rho_w g h_w - P_{cr} \right) \rho_f g H \right) = \frac{P_{ws} + P_{wd} - P_{cr}}{\rho_f g H} \quad (4.10)$$

Sel/taşkın tetikleyeceği bir kaza senaryosunun başlatıcı olay frekansı ya da bütünlül kaybına uğrama frekansı Eş. 11' e göre belirlenmiştir.

$$f_{LOC} = f \times \Psi \quad (4.11)$$

Burada

$$\Psi = \frac{CFL - \varphi_{min}}{\varphi_{max} - \varphi_{min}} \quad (4.12)$$

$$\varphi_{min} = \%1$$

$$\varphi_{max} = \%75 \text{ 'dir.}$$

CFL(kritik dolum seviyesi) 'nin, v_w ve h_w sel parametreleri verildiğinde "güvenli" çalışma koşullarını sınırladığı varsayılır. Doluluk seviyesi(ϕ), CFL'den düşükse, tank dış basınca karşı koyamadığı için "güvensiz" bölgededir. Bu değerlendirmeler temelinde tankların hasar olasılığı ψ , tüm olası çalışma koşullarına göre "güvenli olmayan" çalışma koşulları arasındaki oranla elde edilir. Denklemler ve sabitleri standartlardan alınmış ve Çizelge 4.1' de sunulmuştur (Landucci, 2012).

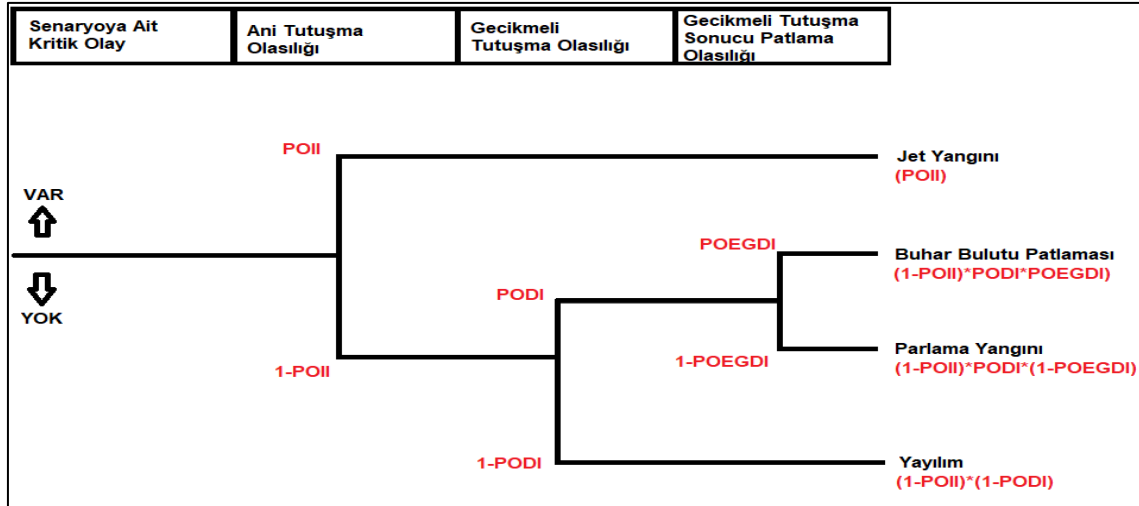
Çizelge 4.1. Çalışmada uygulanan girdi verileri ve atmosferik tankların sel olaylarına karşı savunmasızlığının değerlendirilmesi için model denklemleri

İşlem	Adım	Sembol	Öge Açıklama/ Tanım	Birim
1) Giriş parametrelerinin seçimi: depolama sisteminin karakterizasyonu	1.1.	D	Depolama tankı dış çapı	m
	1.2.	H	Depolama tankı yüksekliği	m
	1.3	t	Tank duvarının kalınlığı	m
	1.4	C	Tank kapasitesi	m ³
	1.5	$\emptyset$	İşletim/çalışma doluluk seviyesi	
	1.6	$\emptyset_{min}$	Minimum çalışma doluluk seviyesi	
	1.7	$\emptyset_{max}$	Maksimum çalışma doluluk seviyesi	
	1.8	ρ_f	Depolanan sıvının yoğunluğu (Benzin: 750 kg/m ³) (Dizel: 850 kg/m ³)	kg/m ³
2) Girdi parametrelerinin seçimi: sel/taşkın senaryosunun karakterizasyonu	2.1	h_w	Sel/taşkın suyunun derinliği	m
	2.2.	v_w	Sel/taşkın suyu hızı	m/s
	2.3.	ρ_w	Sel/taşkın suyunun yoğunluğu	kg/m ³
	2.4	k_w	Sel/taşkın hidrodinamik katsayısı	1.8
	2.5	f	Senaryonun beklenen sıklığı	1/y
3) Tank duvar direnci parametrelerinin belirlenmesi	3.1.	P_f	Tankın iç basıncı $P_f = \rho_f g H \emptyset$	P_a
	3.2.	P_{cr}	Damarın kritik basıncı, C tank kapasitesinin bir fonksiyonu olarak doğrusal korelasyonla basitleştirilmiş değerlendirme $P_{cr} = k_1 C + k_2$ $k_1 = -0.199$ $k_2 = 6950$	P_a
4) Taşkın dalga kuvveti-sel parametrelerinin belirlenmesi	4.1.	P_{ws}	Selin statik basıncı $P_{ws} = \rho_w g h_w$	P_a
	4.2.	P_{wd}	Selin dinamik basıncı $P_{wd} = \frac{1}{2} \rho_w k_w v_w^2$	P_a
	4.3.	P_w	Taşma basıncı nedeniyle toplam harici yük $P_w = P_{ws} + P_{wd}$	P_a
	4.4.	P_{net}	$P_{net} = P_w - P_f$	P_a
5) Tank hasarının tahmini	5.1.		Tank arızası koşullarının tanımı $P_{net} \geq P_{cr}$	P_a
	5.2.	CFL	Kritik doluluk seviyesi* altındaki bir sel senaryosunda hasarın tahmini $CFL = \frac{P_{ws} + P_{wd} - P_{cr}}{\rho_f g H}$	
6) QRA çalışmalarında uygulanan parametrelerin değerlendirilmesi	6.1.	Ψ	Sel senaryosu tank savunmasızlığı (kırılabilirliği): $\Psi = \frac{(CFL - \emptyset_{min})}{(\emptyset_{min} - \emptyset_{max})}$	
	6.2.	f_{LOC}	Bütünlük kaybının beklenen sıklığı (LOC) $f_{LOC} = \Psi(STEP6.1)f$	y ⁻¹
	6.3	v_2	Akışkanın hızı	(m/s)
		D_{delik}	Tank üzerinde oluşan delik çapı	(m)

Tez çalışmasında, hasar analizi için Çizelge 4.1’ deki adımlar uygulanmıştır. Mevcut çalışmalardan farklı olarak, kritik doluluk oranına karşılık gelen tank yüksekliği temel alınarak Bernoulli denklemi ile akış hızı ve delik çapı belirlenmiştir.

Olay ağacı analizi

Parlayıcı veya patlayıcı gazların/sıvıların kontrolsüz bir şekilde açığa çıkması ile farklı çıktılarla karşılaşmaktadır. Farklı çıktılara ait kaza senaryolarını gösteren olay ağacı Şekil 4.5’ de sunulmuştur. Olay ağacında tutuşma olasılıklarını bulmak üzere bazı hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Hesaplamalar için CCPS tarafından oluşturulan Tutuşma Olasılığı Hesaplama Modülü kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Olay ağacı analizi

Şekil 4.5’deki Olay Ağacı Analizi’nde kullanılacak olan olasılıklar aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Arendt vd., 2014:89):

- Ani 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)

Her bir kaza senaryosu için toplam olasılık ise aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır:

kaza frekansı

$$= \frac{\text{tetikleyici olay frekansı} \times \text{tutuşma}}{\text{patlama olasılığı} \times \text{operatör müdahalesi}}$$

Operatör müdahalesi, mevcut bağımsız koruma katmanı olarak varsayılmış ve ilgili yönetmelik gereği 0,1 olasılıkta temel alınmıştır (Büyük Endüstriyel Kazalar Yönetmeliği, 2019).

Sonuç analizi

Sonuç analizi, can ve çevreye zarar verebilecek potansiyel tehlikelerin analizini içerir. Tehlikenin başlangıç noktası ve olayların sırası önemlidir. En kötü senaryoya göre tehlikenin büyük bir kazaya dönüşmesi mümkündür. Tehlikeli olayların sayısallaştırılması gereklidir. İstenmeyen bir olayın meydana gelmesi durumunda olası etkiyi tahmin etmek için kullanılan sonuç analizinde aşağıda sıralananlar dikkate alınmalıdır.

- İlgili istenmeyen olaya dayanmalıdır.
- İstenmeyen olaydan kaynaklanan sonuçları açıklanmalıdır.
- Sonuçlar üzerinde etkisi olan tüm koşullarla birlikte sonuçları hafifletmek için mevcut önlemleri dikkate almalıdır.
- Kullanılan kriterler tanımlanmalıdır.
- Hem anlık hem de belirli bir süreden sonra ortaya çıkabilecek sonuçlar göz önünde bulundurulmalıdır.
- Bitişik ekipman ve sistemlerle ilişkiler gibi ikincil sonuçlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç modellemelerinde, salım geometrisinin/delik boyutunun eksikliği, kötü karakterize edilmiş veya bilinmeyen fiziksel özelliklere; salım işleminin veya kimyasalın zayıflığı, belirsizlikler ortaya çıkabilmektedir. Fiziksel etkilerde yangın, patlama ve toksik yayılım için sırasıyla termal radyasyon, pik basıncı ve konsantrasyon hesaplanır ardından senaryolar üzerinden etki mesafeleri belirlenir. Basitleştirilmiş analitik yaklaşımlar ve yazılımlar bu tür etkileri tahmin etmek için kullanılmaktadır (Piccinelli, 2013).

Atmosferik ve basınçlı depolama tankları için sel kaynaklı hasar durumları, ilgili salım kategorileri ile birlikte Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Atmosferik ve basınçlı depolama tankları için hasar durumları ve ilgili salım kategorileri (Piccinelli, 2013)

<i>Hasar Durumu</i>	<i>Salım Durumu</i>
Flanşların ve bağlantıların arızası	Eşdeğer çapı 10 mm olan bir delikten sürekli salım
Çatı arızası ve kabuk kırılması	Tüm envanterin sürekli salımı (10 dakikadan fazla)
Bitişik tanklar veya sürüklenen nesnelerin etkisi	Tüm envanterin anında salımı (2 dakikadan kısa sürede)
Felaket çöküş	Tüm envanterin anında salımı (2 dakikadan kısa sürede)
Kabuk kırılması (sadece basınçlı tanklar için)	Tüm envanterin sürekli salımı (10 dakikadan fazla)

Çizelgedeki tüm hasar durumları için 2 dk, 10dk içerisinde salım senaryoları ile 10dk’ dan fazla salım durumunda 60dk’ da salım süresi dikkate alınarak hesaplamalar yürütülmüştür.

Yangın termal radyasyon tahmini

Havuz yangınları belirli bir boyut ve şekle sahip, bir setin varlığı veya zemin eğimi ile belirlenen, yanıcı sıvıdan (genellikle bir hidrokarbon) oluşan bir havuzun kararlı halde yanmasıdır. Bir havuz oluşmuşsa ve malzeme yanıcı ise, bir ateşleme noktası havuz yangınına neden olacaktır: büyük miktarda (muhtemelen zehirli) duman açığa çıkar ve yoğun termal radyasyon yakındaki ekipmanı etkileyebilir. Ani bir tutuşma olmazsa zehirli veya yanıcı bir bulut oluşabilir.

Bir yangının etkilerini tahmin etme yeteneği, hem önleyici tedbirlerin uygulanması açısından hem de acil durum yönetimi için son derece yararlıdır. Bu nedenlerle, alevlerden belirli bir mesafede bulunan belirli bir hedefe ulaşacak termal radyasyonu tahmin etmek için matematiksel modelleme gereklidir. Bu aşamada literatürde öne çıkan kolerasyonlar üzerinden etki mesafeleri hesaplanmıştır. En iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan modeller:

- Nokta kaynak modeli
- Katı alev modeli

Nokta kaynak modeli

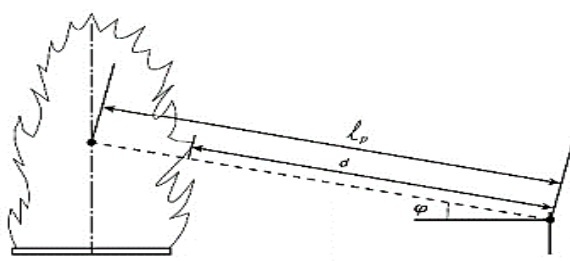
Yangının termal enerjiyi her yöne ışınlayan bir nokta ile temsil edilebileceğini varsaymaktadır. Nokta kaynağı genellikle yangının geometrik merkezinde bulunur. Yayılan enerji, yanma sonucu açığa çıkan toplam enerjinin bir kısmıdır. Genellikle bu enerjinin her yöne yayıldığı varsayılır. Bu nedenle, kaynaktan uzaklığın ters karesiyle orantılı olduğu varsayılan bir hedefe ulaşan termal radyasyon yoğunluğu;

$$I = \frac{Q_r}{4\pi l_p^2} \quad (4.13)$$

Burada I termal radyasyon yoğunluğu (kW m^{-2}) , Q_r , birim zaman (kW) başına termal radyasyon olarak salınan ısıdır ve l_p nokta kaynağı ile hedef (m) arasındaki mesafedir.

Jet yangınları ve havuz yangınları için Q_r , yanma hızı, yanma ısı ΔH_c ve radyasyon fraksiyonu veya radyant ısı fraksiyonunun bir fonksiyonudur.

$$Q_r = \eta_{rad} \dot{m} \Delta H_c \quad (4.14)$$



Radyant fraksiyon, tüm yangını etkileyen önemli bir parametredir ve bu da birkaç faktöre bağlıdır: yakıt tipi, alev sıcaklığı, alev tipi, yanma sırasında oluşan duman miktarı, vb. değerler hidrokarbonlar için deneysel olarak 0,1 ile 0,4 arasında elde edilmiştir.

Teorik olarak değeri tahmin etmek oldukça zordur ve bu aslında nokta kaynak modelinin sınırlamalarından biridir. D (m) çaplı havuz yangınları için aşağıdaki ifade önerilmiştir (McGrattan vd., 2020):

$$\eta_{rad} = 0.35e^{-0.05D} \quad (4.15)$$

Yayma gücü (Emissivite)

Yayma gücü, alevin birim yüzeyi ve birim süre başına yaydığı radyasyon ısıdır (kW m^{-2}); yangının ısıma özelliklerini temsil eder. Alevden yayılan termal radyasyon, sadece yüzeyinde değil, tüm ateş hacmi (sıcak yakıt gazından, yanma ürünlerinden, kurum partiküllerinden) tarafından üretilir.

$$E = \sigma \varepsilon (T_{fl}^4 - T_a^4) \quad (4.16)$$

Benzinli ve mazotlu havuz yangınları için $1.5 \text{ m} \leq D \leq 6 \text{ m}$ çapında dairesel bir havuzda elde edilen deneysel veriler, E_{soot} 'un yakıt çapından ve yakıt türünden bağımsız olduğunu göstermiştir. ($E_{soot} = 40 \text{ kW m}^{-2}$) (McGrattan vd., 2020):

$$E \approx E_{soot} \rightarrow D \geq 20m \quad (4.17)$$

Havuz yangını

Bir hidrokarbon havuzu yangınının tüm gelişimi, üç adımın varlığını açıkça göstermektedir. İlk aşamada alevin havuz yüzeyine yayıldığı bir başlangıç periyodundan sonra yangın gelişir ve yanma hızı maksimum değere kadar sürekli olarak artar. İkinci aşamada, tam gelişmiş yangın, havuza başlangıçta beslenen yakıt miktarına bağlı olarak belirli bir süre boyunca sabit bir rejimde sabit bir oranda yanar. Üçüncü adımda yangın azalır ve yangın söndürülene kadar yanma hızı sürekli olarak azalır. Elde edilen deneysel veriler, ilk aşamada alevler havuzun tüm yüzeyine yayıldığında anlık yanma hızının düzgün bir şekilde artan bir trend izlediğini göstermiştir. Rüzgar hızının yanma hızı üzerindeki etkisi 2 m/s 'ye kadar ihmal edilebilir (Jasal vd., 2001). Havuzun çapıyla birlikte belirgin bir şekilde artarak belirli bir çapta maksimum değere ulaşırlar; bu değer daha büyük çaplar için sabit kalır gibi görünmektedir. Bu, havuz çapının bir fonksiyonu olarak yanma oranının tahmin edilmesinde yol göstericidir.

Yanma hızı ve havuz çapı arasındaki bu korelasyon, çeşitli mekanizmaların alevden sıvı yakıtı ısı transferini açıklamaya katkı sağlamıştır (McGrattan vd., 2020).

Havuz yangını boyutu

Bir sıvı döküldüğünde ve bir havuz oluştuğunda, iki olasılık vardır: zeminde(yerde) bir havuz veya su yüzeyinde bir havuz.

Zemin havuzları

Sıvı dökülmesini içeren bir hendek veya bariyer varsa, havuz çapı sabittir. Hendek dik açılıysa, eşdeğer çap kullanılmalıdır:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times (\text{havuz yüzeyi})}{\pi}} \quad (4.18)$$

Zemindeki sıvı dökülmesinin neden olduğu havuzun boyutu, döküntünün süresine ve akış hızına bağlıdır. Böylece, sıvı dökülmeleri sürekli akan veya anlık olarak karakterize edilebilir. Dökülme ani gerçekleşirse, havuz fiziksel bir engel (örneğin bir dayk) bulana kadar veya havuz yangını varsa yanana kadar büyür.

Sürekli bir dökülme durumunda, havuz, fiziksel bir engel bulana kadar veya buharlaşma hızı veya yanma oranı dökülme akış hızına eşit oluncaya kadar büyüyecektir. Birçok döküntü aslında yarı-sürekli olsa da(belirli bir süre boyunca belirli bir miktar sıvı dökülür), ani ve sürekli dökülmeleri tanımlamak için yararlı kriter t_{cr} (Mudan vd., 1984):

$$t_{cr} = \frac{t_{dökülme} \gamma}{V_t^{1/3}} \quad (4.19)$$

t_{cr} boyutsuz bir kritik zamandır (-)

$t_{dökülme}$, dökülme süresi

γ , yakıt yanma hızı (m s^{-1})

V_t dökülen sıvının toplam hacmidir (m^3).

Bu kritere göre, $t_{cr} < 2 \times 10^{-3}$ ise dökülmeler anidir. Aksi takdirde, sürekli olarak kabul edilirler. Herhangi bir bariyer içermeyen ani bir dökülme için havuz çapı, aşağıdaki ifadeyle zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenebilir (Chatris vd., 2001):

$$D_{pool} = D_{max} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{t}{t_{max}} \right) \left[1 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^2 \right] \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

D_{max} , havuzun ulaşabileceği maksimum çaptır (m):

$$D_{max} = 2 \left(\frac{v_t^3 g}{y^2} \right)^{1/8} \quad (4.21)$$

t_{max} , bu maksimum çapa ulaşmak için gereken süredir:

$$t_{max} = 0.6743 \left(\frac{v_t}{gy^2} \right)^{1/4} \quad (4.22)$$

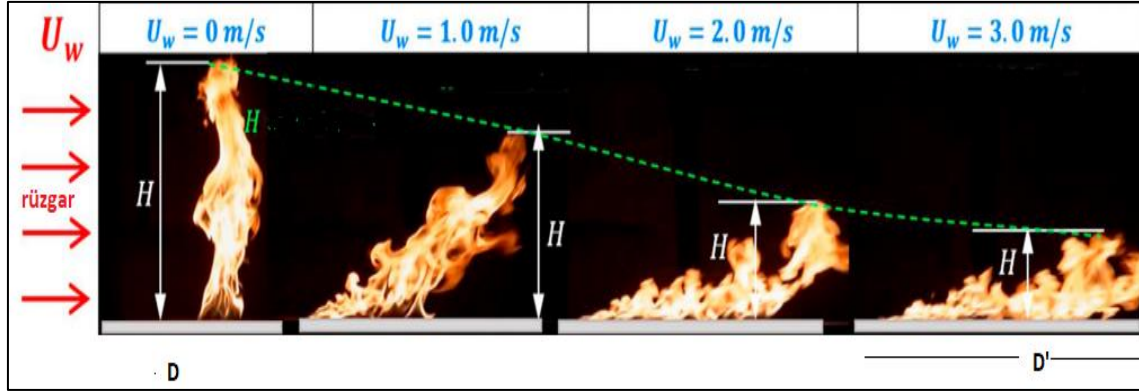
Alevlerin yüksekliği ve uzunluğu

Görünür alevin yüksekliği, havuz çapı ve yanma hızının bir fonksiyonudur. Bu değerin tahmini için en yaygın kullanılan ifade Thomas tarafından geliştirilmiştir (Thomas vd., 1963):

$$\frac{H}{D} = 42 \left[\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.61} \quad (4.23)$$

Rüzgarın etkisi

Rüzgarın alev uzunluğu üzerine etkisi olabilir. Bir çalışma (Thomas vd., 1963), rüzgârın yanma hızı üzerindeki etkisinin $u_w < 2 \text{ m s}^{-1}$ 'de ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir. Daha yüksek rüzgâr hızlarında, sıklıkla aşağıdaki denklem(Eş. 24) kullanılır (Thomas vd., 1963). Rüzgar ayrıca alevleri eğebilir ve alt kısımlarını önemli ölçüde hareket ettirebilir (Şekil 5.12), böylece alevlerin havuzun kenarına eğilmesine ve alev tabanının uzamasına neden olabilir. Yakınlarda ekipman varsa, termal radyasyon seviyesi artacağından bu durum çok önemli olabilir.



Şekil 4.6. Havuz yangınında rüzgarın etkisiyle alev yüksekliği ve alev sürüklenme şematik gösterimi

Alev sürüklenmesi herhangi bir yakıt için (Thomas vd., 1963) tahmin edilebilir:

$$\frac{D'}{D} = 1.5 \left(\frac{u_w^2}{gD} \right)^{0.069} \quad (4.24)$$

Hasar ve olay ağacı analizi sonucunda belirlenen en riskli tank için termal radyasyon etki mesafeleri burada sunulan eşitlikler üzerinden belirlenmiş, sonuç analizi yürütülmüştür.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Proses Kaza Verilerinin İstatistiksel Değerlendirmesi

Sanayi kuruluşlarında doğal afetler nedeniyle tetiklenen geçmiş proses kazalarının analizi yapılmıştır. eNatech ve EM-DAT veri tabanlarında bildirilen kaza dosyalarından proses kazalarını tetikleyen afet türleri ve kazalarda hasar gören ekipman türleri hakkında nicel veriler elde edilmiştir. EM-DAT veri tabanı üzerinden son on beş yılda meydana gelen 5738 proses kazası; eNatech veri tabanı üzerinden ise 44 kaza olayı incelenmiştir. Dünya genelinde meydana gelen proses kazalarını tetikleyen doğal afetler Çizelge 5.1’ de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Dünya genelinde meydana gelen proses kazalarını tetikleyen doğal afetler (2008-2023, EM-DAT)

<i>Doğal Afet Grubu</i>	<i>Proses kazası sayısı</i>	<i>%</i>
Meteorolojik	1911	33,3
Hidrolojik	2898	50,5
Jeolojik	492	8,6
Klimatolojik	435	7,6

Çizelge 5.2. Dünya genelinde meydana gelen proses kazalarını tetikleyen doğal afetlerin alt grup dağılımı (2008-2023, EM-DAT)

<i>Doğal Afet Alt Grubu</i>	<i>Proses kazası sayısı</i>	<i>Yüzde %</i>
Sel	2613	45,5
Fırtına	1631	28,4
Deprem	409	7,1
Heyelan	285	5,0
Yıldırım	153	2,7
Aşırı Sıcaklık Değişimi	281	4,9
Kuraklık	255	4,4
Diğerleri	85	2,0

Çizelge 5.1’ den hidrolojik afetlerin %50,5 oranla proses kazalarını en fazla tetikleyen afet grubu olduğu görülmüştür. Bunu meteorolojik, jeolojik ve klimatolojik afetler izlemiştir. Proses kazalarını tetikleyen doğal afet alt grupları dağılımı Çizelge 5.2’ verilmiştir.

Çizelge 5.2’ den hidrolojik afetler içerisinde yer alan selin, %45,5’lik ciddi bir oran ile öne çıktığı görülmüştür. Bir sel olayı durumunda, ekipmana gelebilecek olası hasarın ve tehlikeli maddelerin salınmasının tehlikeli sonuçları vardır. 2017 yılında İtalya-Livorno petrol rafinerisi, taşkın/sel sonucu ham petrol salımı ile ciddi ekonomik kayıplarla yüzleşmiştir. Meteorolojik afetler altında değerlendirilen fırtına ise %28,4 orana sahip bulunmuştur. Örneğin, Floyd Kasırgası, binlerce galon petrol, benzin ve diğer kimyasal ürünlerin dökülmesine neden olarak büyük çevresel etkiye ve hesaplanamaz ekonomik kayıplara yol açmıştır Cozzani vd., 2010. Fırtınayı, jeolojik afet içerisinde yer alan deprem izlemiştir. 2011 yılında meydana gelen ve tüm dünyayı etkileyen Tohoku (Büyük Doğu Japonya) Depremi ve ardından yaşanan tsunami ile çok sayıda insan hayatını kaybederken etkisi yıllarca sürmüştür. Bu tsunami ile Cosmo Petrol Rafinerisi, Chiba Limanı, Sendai Jx Nippon Petrol Rafineri Limanı, Hiron Thermal Güç Ünitesi, Fukuşima Nükleer Santralinde çok ciddi natech kazaları meydana gelmiş; oluşan patlamalar, yangınlar ve radyoaktif madde salımı ile ciddi hasarlar/kayıplar yaşanmıştır. Hidrojeolojik-heyelan, meteorolojik-aşırı sıcaklık değişimi, klimatolojik-kuraklık, meteorolojik-yıldırım olaylarının proses kazalarına sebebiyet oranı $\leq$ %5 bulunmuştur. eNatech veri tabanı üzerinden ise son 15 yıl için raporlanan 44 Natech kazası saptanmıştır. Bu kazaların doğal afet grubuna göre dağılımı Çizelge 5.3’ te verilmiştir.

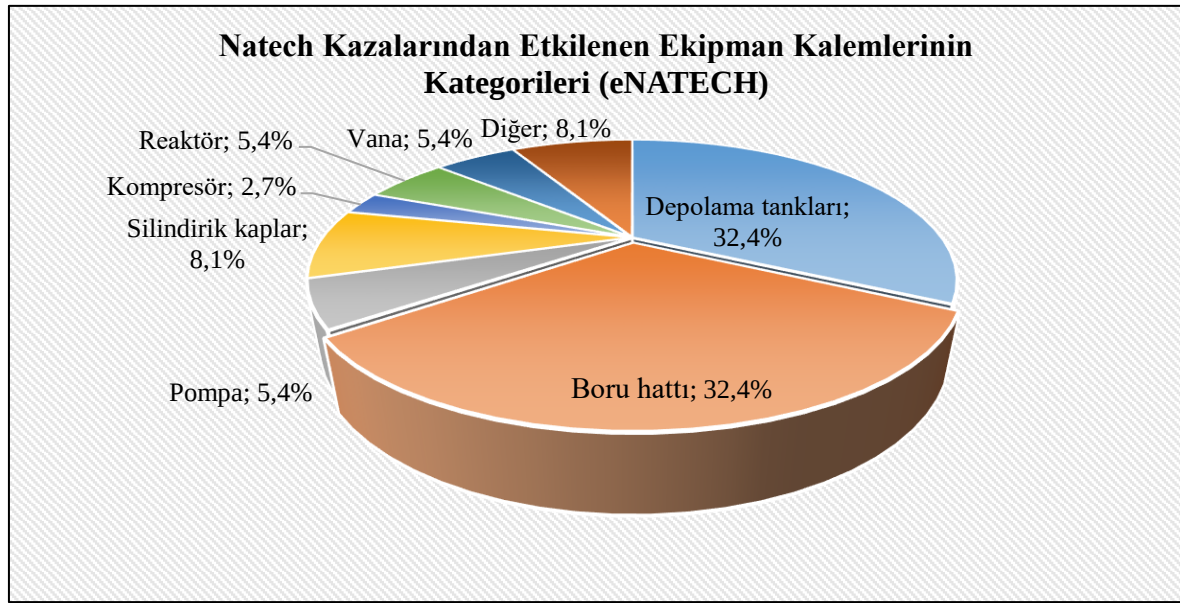
Çizelge 5.3. Dünya genelinde meydana gelen Natech kazalarını tetikleyen doğal afetler (2008-2023, eNatech)

<i>Doğal Afet Grubu</i>	<i>Veri Seti</i>	<i>Yüzde %</i>
Aşırı sıcaklık	3	6,8
Sel	13	29,5
Fırtına	5	11,4
Tsunami	4	9,1
Yıldırım	10	22,7
Heyelan	8	18,2
Deprem	6	13,6

Natech kazalarında, sel/taşkınların %29,5’ lik oran ile ilk sırada yer alan tetikleyici olduğu tespit edilmiştir. Yıldırım, sel olaylarının Natech olaylarının en yaygın tetikleyicisi olduğu belirtilmiştir (OECD, 2020) . Nihai senaryolara ilişkin veriler, suyla reaksiyona giren maddelerden kaynaklanan zararın, çevre ve insan için çok daha ciddi sonuçları olduğunu göstermiştir (Cozzani vd., 2010). Afetler nedeniyle Natech kazalarında en sık hasar gören ekipman kategorileri Çizelge 5.4’ te, şematik gösterimi Şekil 5.1 de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Natech kazalarında en sık hasar gören ekipman kategorileri (2008-2023, eNatech)

Ekipman Türü	Veri Seti	Yüzde %
Depolama tankları	12	32,40
Boru hattı	12	32,40
Pompa	2	5,40
Silindirik kaplar	3	8,10
Kompresör	1	2,70
Reaktör	2	5,40
Vana	2	5,40
Diğer	3	8,20



Şekil 5.1. Natech kazalarında en sık hasar gören ekipman kategorilerinin şematik gösterimi (2008-2023, eNatech)

Natech kazalarında, depolama tankları ve boru tesisatı aynı oran ile (%32,4) en fazla etkilenen ekipmanlar olarak öne çıkmıştır. Sel/taşkın olaylarında atmosferik tankların, daha düşük yapısal dirençleri ile muhafaza kaybına uğrayan ekipman olduğu belirtilmiştir (Cozzani vd., 2010; Landuccia vd., 2014a). 2002 yılında Çek Cumhuriyetindeki Spolana Chemical Works firması sel/taşkın afeti ile hasar gören boru bağlantılarından atmosfere ve suya 80 tondan fazla toksik klor salınmış; çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından ciddi hasarlar meydana gelmiştir. Kompresör, en az oranda hasar gören ekipman olarak belirlenmiştir.

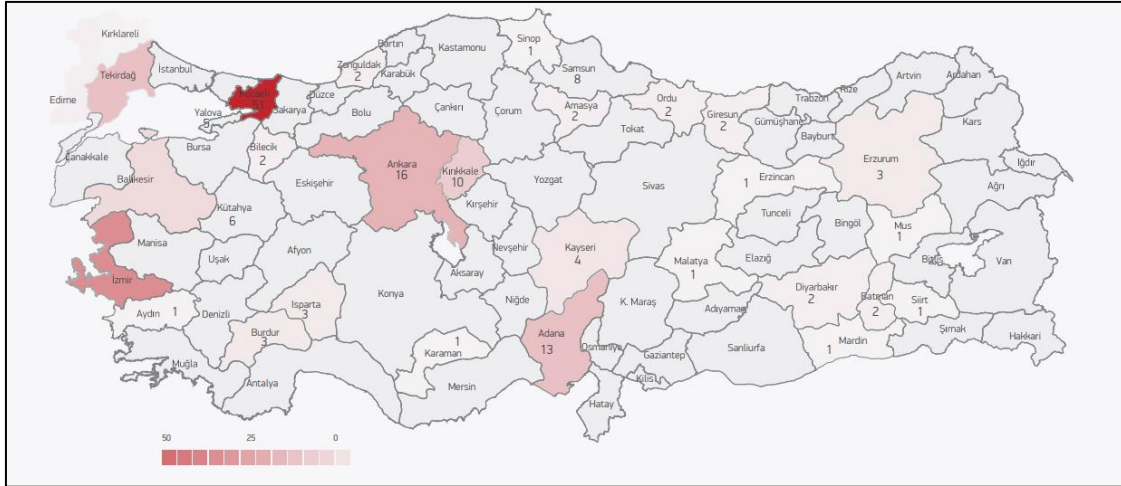
EM-DAT ve eNatech veri tabanlarından birbirine paralel olarak sel/taşkınların proses kazalarının en önemli tetikleyici olduğu; doğal afetin tetikleyici olduğu proses kazalarında depolama tanklarının öne çıktığı tespit edilmiştir. Tez çalışmasında, sel/taşkın afet türüne ve depolama tanklarına yoğunlaşılarak devam eden çalışmalar yürütölmüştür.

5.2. Risk Analizi Yapılacak İl ve Kuruluş Seçimi

Yapılan istatistiksel değerlendirme, doğal afet tiplerinden selin Natech ve proses kazalarında öne çıktığını göstermiştir. Bu sebeple Türkiye’ de meydana gelen sel/taşkınların il bazında yoğunlukları incelenmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü fevk kayıtlarına göre; ölkemizde 2010-2021 yılları arasında meteorolojik afetler en fazla sırasıyla Antalya, Balıkesir, İzmir, İstanbul, Konya, Mersin, Ordu, Van, Muđla, Aksaray, Çorum, Bursa, Elazığ, Kayseri, Manisa, Kastamonu, Nevşehir ve Aydın illerinde meydana gelmiştir (Şekil 5.2). Ayrıca 2000-2023 yılları arası EM-DAT veri tabanından (61 kaza olayı) analiz edildiğinde en çok sel afetinin yaşandığı iller sırasıyla Rize, İzmir, Antalya, İstanbul olarak tespit edilmiştir. Ölkemizde “Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik” kapsamına giren kuruluş lokasyonlarının bulunduğu harita (Şekil 5.3) incelenmiştir. Sel/taşkın afet haritası ve ilgili mevzuat kapsamındaki endüstriyel kuruluşların bulunduğu haritalar örtüştürölerek incelenmiş, İzmir ilinde risk analizi çalışmasının yürütölmesine karar verilmiştir.



Şekil 5.2. Türkiye’de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin illere göre dağılımı (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023)



Şekil 5.3. Üst seviyeli kuruluşların illere göre dağılımı (ÇSGB, 2023)

Risk analizi çalışmasında İzmir’de yönetmelik kapsamına giren örnek bir kuruluş seçilmiştir. Bu örnek kuruluşta yer alan atmosferik depolama tankları özellikleri Çizelge 5.5’ de sunulmuştur. Kuruluş içerisinde; 10000 m³ kapasiteli 9 adet, 30000 m³ kapasiteli ve 20000m³ kapasiteli birer adet benzin tankı, 10000 m³ kapasiteli 7 adet, 40000 m³ kapasiteli 1, 50000 m³ kapasiteli 4 ve 30000m³ kapasiteli 2 adet dizel tankı bulunmaktadır. Tüm tanklar atmosferik basınçta işletilmektedir. Bu veriler ışığında Kuruluş sel/taşkın afeti tetikleyici mekanizması özelinde analiz edilmiştir.

Çizelge 5.5. Örnek kuruluşta yer alan atmosferik tankların verileri

Tank no	Kimyasal	Çap (m)	Yükseklik(m)	Kapasite (m ³)
3063	Benzin	29,5	14,89	10000
3064	Benzin	29,5	14,89	10000
3065	Benzin	29,5	14,89	10000
3066	Benzin	29,5	14,89	10000
3067	Benzin	30,4	14,1	10000
3068	Benzin	30,3	14,1	10000
3069 A	Benzin	42,0	16,00	20000
3069-3	Benzin	45,0	19,00	30000
3069-4	Benzin	45,0	19,00	30000
3081	Benzin	29,5	14,89	10000
3082	Benzin	29,5	14,89	10000
3084	Benzin	29,5	14,89	10000
3152	Benzin	12,3	8,88	1000
3153	Benzin	14,2	11,83	2000
3091	Dizel	34,3	11,92	10000

Çizelge 5.5. (devam) Örnek kuruluştaki yer alan atmosferik tankların verileri

<i>Tank no</i>	<i>Kimyasal</i>	<i>Çap (m)</i>	<i>Yükseklik(m)</i>	<i>Kapasite (m³)</i>
3092	Dizel	34,2	11,92	10000
3093	Dizel	34,2	11,92	10000
3094	Dizel	34,2	11,92	10000
3095	Dizel	34,2	11,92	10000
3096	Dizel	34,2	11,92	10000
3097	Dizel	34,2	11,92	10000
3098	Dizel	57,3	15,73	40000
3099/C	Dizel	60,7	15,94	50000
3099/D	Dizel	60,7	15,94	50000
9901	Dizel	56,2	20,50	50000
9901	Dizel	56,2	20,50	50000
9903	Dizel	45,0	19,00	30000
9904	Dizel	45,0	19,00	30000

5.3. İklim Değişikliğinin Kimyasal Proseslere Etkilerinin Risk Analizi

Hasar analizi

Bu aşamada, örnek kuruluştaki atmosferik tankların tümü üzerinde çalışılmıştır. Tankın doluluk oranının, tank kabuk hasarına etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, %10 ve %75 iki farklı doluluk oranlarında hesaplamalar yapılmıştır (Antonioni vd., 2015; Landuccia vd., 2014b).

Durum çalışması W1: Tank doluluk oranı %75

Durum çalışması W2: Tank doluluk oranı %10

Vaka analizi için seçilen bölgenin sel/taşkın verileri kayıtlı olmadığından sel/taşkın karakteristikleri araştırılmıştır. Sel/taşkın kaynaklı kazalarda Çizelge 5.6. 'de belirtilen tipik verilerin kullanıldığı görülmüştür (Landucci vd.,2014b). Sel/taşkın su yüksekliği, su hızı için ortalama değerler ve kötü durum senaryosu düşünülerek daha yüksek frekans değeri esas alınarak hesaplamalar yürütülmüştür. Taşkın sıklığı, geri dönüş süresi (tr, hidrolojik çalışmalarla verilen veya yerel yetkili makamlarda mevcut olan) kullanılarak aşağıdaki şekilde tahmin edilmiştir (Landucci vd.,2014b). :

Çizelge 5.6. Sel/taşkın karakteristikleri

Sel koşulları	Yükseklik $h_w (m)^*$	Hız $v_w (m/s)^*$	Geri dönüş süresi $tr (yıl)^*$	Sıklık $f (1/yıl)$
Değişim aralıkları	0-4	0-3,5	50-500	$2,0 \times 10^{-2} - 2,0 \times 10^{-3}$
W1 (1.durum)	2	1,75	50	$2,0 \times 10^{-2}$
W2 (2.durum)	2	1,75	50	$2,0 \times 10^{-2}$

* Landucci vd., 2014b)

Sel olaylarında atmosferik tankların hasar olasılığını hesaplamak için bir model geliştirilmiştir. Modelleme yaklaşımı, tank kabuk direncini etkileyen daha kritik parametreleri belirleyerek doğrulanmasını sağlamaya yöneliktir. Model, tank arızası ve hasar olasılığı için basitleştirilmiş bir korelasyon elde etmek için bir çok veri veya kabuller gereklidir. vaka çalışmalarının analizi için metodoloji uygulanması için sel suyu hızı ve yüksekliği verileri çok kısıtlı olduğundan literatürde verilen kabuller ile çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile beklenen hasar sıklıklarının değerlerinin taşkınlardan kaynaklanan

NaTech senaryolarının endüstriyel tesislerin risk profilini etkileyebileceğini araştırılmıştır.

Tankların belirlenen doluluk oranı için sel suyu hızı ve yüksekliği sabit alınmış ve geri dönüş süresi en kötü durum senaryosu için ele alınmıştır.

Bölüm 4' de detayları sunulan Eş.1-10 üzerinden hesaplamalar yapılmış, elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 5.7 ve 5.8' de sunulmuştur.

Çizelge 5.7. Vaka çalışmasının sonuçları (%10 doluluk oranı)

Tank no	Kimyasal	$\hat{C}_{ap} (m)$	Yükseklik(m)	$P_w (Pa)$	$P_l (Pa)$	$P_{net} (Pa)$	$P_{cr} (Pa)$	CFL	Ψ	f_{LOC}
3063	Benzin	29,5	14,89	24613,9	1095,5	23518,3	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3064	Benzin	29,5	14,89	24613,9	1095,5	23518,3	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3065	Benzin	29,5	14,89	24613,9	1095,5	23518,3	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3066	Benzin	29,5	14,89	24613,9	1095,5	23518,3	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3067	Benzin	30,4	14,1	24613,9	1037,4	23576,5	4960,0	0,19	0,24	0,000485
3068	Benzin	30,3	14,1	24613,9	1037,4	23576,5	4960,0	0,19	0,24	0,000485
3069 A	Benzin	42,0	16,00	24613,9	1177,2	23436,7	2970,0	0,18	0,23	0,00047
3069-3	Benzin	45,0	19,00	24613,9	1397,9	23216,0	980,0	0,17	0,21	0,00043
3069-4	Benzin	45,0	19,00	24613,9	1397,9	23216,0	980,0	0,17	0,21	0,00043
3081	Benzin	29,5	14,89	24613,9	1095,5	23518,3	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3082	Benzin	29,5	14,89	24613,9	1095,5	23518,3	4960,0	0,18	0,23	0,000458

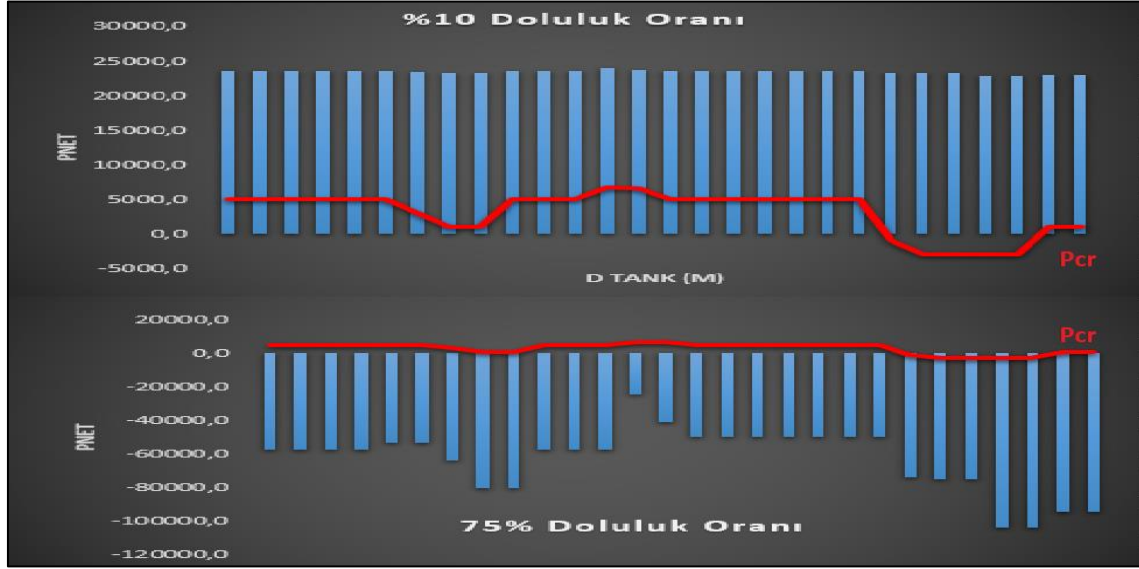
Çizelge 5.7. (devam) Vaka çalışmasının sonuçları (%10 doluluk oranı)

Tank no	Kimyasal	Çap (m)	Yükseklik(m)	$P_w(Pa)$	$P_f(Pa)$	$P_{net}(Pa)$	$P_{cr}(Pa)$	CFL	Ψ	f_{LOC}
3084	Benzin	29,5	14,89	24613,9	1095,5	23518,3	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3152	Benzin	12,3	8,88	24613,9	653,3	23960,5	6751,0	0,27	0,36	0,00071
3153	Benzin	14,2	11,83	24613,9	870,4	23743,5	6552,0	0,21	0,27	0,000534
3091	Dizel	34,3	11,92	24613,9	993,9	23619,9	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3092	Dizel	34,2	11,92	24613,9	993,9	23619,9	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3093	Dizel	34,2	11,92	24613,9	993,9	23619,9	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3094	Dizel	34,2	11,92	24613,9	993,9	23619,9	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3095	Dizel	34,2	11,92	24613,9	993,9	23619,9	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3096	Dizel	34,2	11,92	24613,9	993,9	23619,9	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3097	Dizel	34,2	11,92	24613,9	993,9	23619,9	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3098	Dizel	57,3	15,73	24613,9	1311,6	23302,2	-1010,0	0,20	0,25	0,000501
3099/C	Dizel	60,7	15,94	24613,9	1329,2	23284,7	-3000,0	0,21	0,27	0,000534
3099/D	Dizel	60,7	15,94	24613,9	1329,2	23284,7	-3000,0	0,21	0,27	0,000534
9901	Dizel	56,2	20,50	24613,9	1709,4	22904,5	-3000,0	0,16	0,20	0,00041
9901	Dizel	56,2	20,50	24613,9	1709,4	22904,5	-3000,0	0,16	0,20	0,00041
9903	Dizel	45,0	19,00	24613,9	1584,3	23029,6	980,0	0,15	0,19	0,000376
9904	Dizel	45,0	19,00	24613,9	1584,3	23029,6	980,0	0,15	0,19	0,000376

Çizelge 5.8. Vaka çalışmasının sonuçları (%75 doluluk oranı)

Tank no	Kimyasal	Çap (m)	Yükseklik (m)	$P_w(Pa)$	$P_f(Pa)$	$P_{net}(Pa)$	$P_{cr}(Pa)$	CFL	Ψ	f_{LOC}
3063	Benzin	29,5	14,89	24613,9	82164,9	-57551,0	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3064	Benzin	29,5	14,89	24613,9	82164,9	-57551,0	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3065	Benzin	29,5	14,89	24613,9	82164,9	-57551,0	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3066	Benzin	29,5	14,89	24613,9	82164,9	-57551,0	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3067	Benzin	30,4	14,1	24613,9	77805,6	-53191,7	4960,0	0,19	0,24	0,000485
3068	Benzin	30,3	14,1	24613,9	77805,6	-53191,7	4960,0	0,19	0,24	0,000485
3069 A	Benzin	42,0	16,00	24613,9	88290,0	-63676,1	2970,0	0,18	0,23	0,00047
3069-3	Benzin	45,0	19,00	24613,9	104844,4	-80230,5	980,0	0,17	0,21	0,00043
3069-4	Benzin	45,0	19,00	24613,9	104844,4	-80230,5	980,0	0,17	0,21	0,00043
3081	Benzin	29,5	14,89	24613,9	82164,9	-57551,0	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3082	Benzin	29,5	14,89	24613,9	82164,9	-57551,0	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3084	Benzin	29,5	14,89	24613,9	82164,9	-57551,0	4960,0	0,18	0,23	0,000458
3152	Benzin	12,3	8,88	24613,9	49001,0	-24387,1	6751,0	0,27	0,36	0,00071
3153	Benzin	14,2	11,83	24613,9	65279,4	-40665,5	6552,0	0,21	0,27	0,000534
3091	Dizel	34,3	11,92	24613,9	74546,2	-49932,3	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3092	Dizel	34,2	11,92	24613,9	74546,2	-49932,3	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3093	Dizel	34,2	11,92	24613,9	74546,2	-49932,3	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3094	Dizel	34,2	11,92	24613,9	74546,2	-49932,3	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3095	Dizel	34,2	11,92	24613,9	74546,2	-49932,3	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3096	Dizel	34,2	11,92	24613,9	74546,2	-49932,3	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3097	Dizel	34,2	11,92	24613,9	74546,2	-49932,3	4960,0	0,20	0,25	0,000507
3098	Dizel	57,3	15,73	24613,9	98373,5	-73759,6	-1010,0	0,20	0,25	0,000501
3099/C	Dizel	60,7	15,94	24613,9	99686,8	-75072,9	-3000,0	0,21	0,27	0,000534
3099/D	Dizel	60,7	15,94	24613,9	99686,8	-75072,9	-3000,0	0,21	0,27	0,000534
9901	Dizel	56,2	20,50	24613,9	128204,4	-103590,6	-3000,0	0,16	0,20	0,00041
9901	Dizel	56,2	20,50	24613,9	128204,4	-103590,6	-3000,0	0,16	0,20	0,00041
9903	Dizel	45,0	19,00	24613,9	118823,6	-94209,8	980,0	0,15	0,19	0,000376
9904	Dizel	45,0	19,00	24613,9	118823,6	-94209,8	980,0	0,15	0,19	0,000376

Çizelge 5.7 -5.8. sonuçlarından doluluk seviyesi ve sıvı yoğunluğu göz önüne alındığında, yüksek hacimli(kapasite) tankların arıza bölgesinin daha geniş olduğu, dolayısıyla daha yüksek bir kırılmalık gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.8).



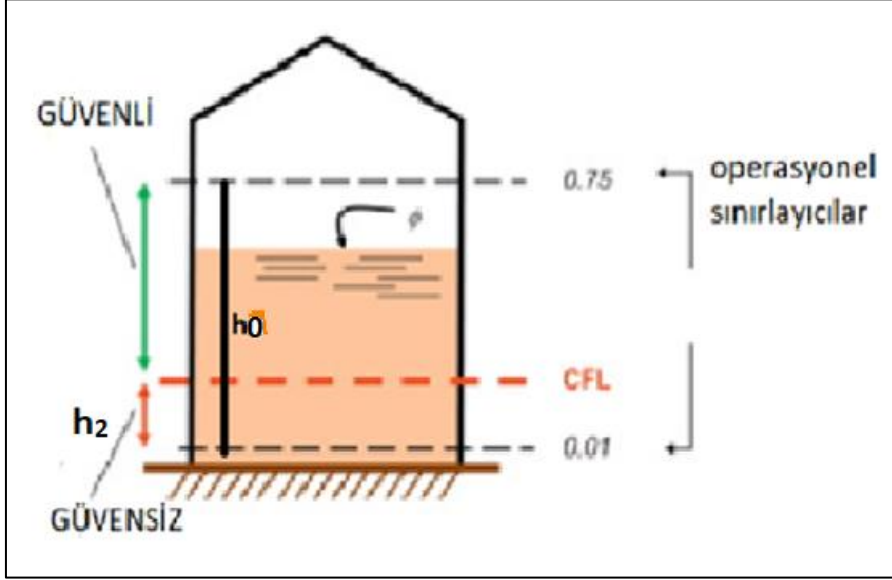
Şekil 5.4. Tank kabuğuna uygulanan net basınçla P_{net} , ile kritik basıncın (P_{cr}) karşılaştırılması

Kritik basınç, büyük ölçüde tankın geometrik özelliklerine bağlıdır. Doluluk seviyesi, ϕ ve depolanan sıvı yoğunluğu ρ_f artırıldığında tank kırılmalığı artmıştır. Artan akışkan yoğunluğu ρ_f 'nin etkisinin, bu parametrenin daha yüksek dolum seviyelerinde artan önemi nedeniyle daha yüksek ϕ değerlerinde daha etkin olduğu görülmüştür (Şekil 5.4.).

Çizelge 5.7 -5.8' de gösterildiği gibi f_{LOC} frekans değerleri $3.8 \times 10^{-4} \text{ yıl}^{-1}$ ile $7.1 \times 10^{-4} \text{ yıl}^{-1}$ arasında değişmektedir. Dahili arıza nedenlerinden kaynaklanan LOC olayları daha düşük frekanslara sahiptir. Atmosferik depolama tankları için dahili nedenlerden dolayı önerilen LOC frekansı $5 \times 10^{-6} \text{ yıl}^{-1}$ (yıkıcı ve tüm envanterin 10 dakikada serbest bırakılması) olarak belirtilmiştir (Landucci vd., 2012). Sel kaynaklı LOC değerlerinin ciddi oranda (~100kat) büyüklüğü dikkat çekicidir. Bu sonuçlar, sele/taşına maruz kalmaya eğilimli bölgelerde, sellerin tetiklediği NaTech senaryolarının bir tesisin risk profili üzerinde potansiyel olarak önemli bir etkiye sahip olabileceğini doğrulamaktadır. En yüksek arıza sıklığı 7.1×10^{-4} değeriyle 3152 nolu benzin tankı için belirlenmiştir. Bu tank selin tetikleyeceği bir natech kazası için en risklidir.

Salım delik çapının belirlenmesi

Dikey silindirik tankların sele karşı savunmasızlığını gösteren şema Şekil 5. 9’ verilmiştir.



Şekil 5.5. Dikey atmosferik tankların sele karşı savunmasızlığının belirlenmesi için şematik yaklaşım

Mevcut yaklaşımda, olası işletim doluluk ϕ seviyeleri; min (=%1) ve maksimum (=%75) varsayılmıştır (Landuccia, 2014b). Şekil 5.5 ‘ da şematik olarak görüldüğü üzere, sıvının kapladığı hacim kontrol hacmi olarak düşünülmüştür. Sıvının doluluk oranı %75’ tir. Kontrol hacminin boyutu sıvı seviyesi azaldıkça küçüleceğinden, bu değişken bir kontrol hacmidir. Zamanla değişen bir kontrol hacmi için kütlenin korunumu denkliği;

$$m_{in} - m_{out} = \frac{dm}{dt} \quad (5.1)$$

İşlem sırasında kontrol hacmine kütle girişi yoktur. ($m_{in} = 0$)

$$m_{out} = (\rho v A)_{out} \quad (5.2)$$

Çıkıştaki akışkanın hızı (v_2) Bernouilli denklemi uygulanarak hesaplanmıştır.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_0 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + h_2 g \quad (5.3)$$

$$P_1 = P_2 = P_{atm} \quad h_0 \gg h_2 \quad v_2^2 \gg v_1^2, v_1^2 \sim 0 \quad (5.3)$$

$$v_2^2 = 2gh_0 \rightarrow v_2 = \sqrt{2gh_0} \quad (5.4)$$

$$m_{out} = \rho(\sqrt{2gh})A_{delik} \quad (5.5)$$

$$m = \rho V = \rho A_{tank} h \quad (5.6)$$

$$m = \rho \pi D_{tank}^2 h / 4 \quad (5.7)$$

$$-\rho(\sqrt{2gh}) A_{delik} = \frac{d(\rho A_{tank} h)}{dx} \quad (5.8)$$

$$-\rho(\sqrt{2gh}) \left(\pi D_{delik}^2 / 4 \right) = \frac{\rho(\pi D_{tank}^2 / 4) dh}{dt} \quad (5.9)$$

$$dt = \frac{D_{tank}^2}{D_{delik}^2} \frac{dh}{\sqrt{2gh}} \quad (5.10)$$

Sınır koşulları

$$t = 0 \quad h = h_0 \quad (5.11)$$

$$t = t \quad h = h_2 \quad (5.12)$$

$$\int_0^t dt = - \frac{D_{tank}^2}{D_{delik}^2 \sqrt{2g}} \int_{h_0}^{h_2} \frac{dh}{\sqrt{h}} \quad (5.13)$$

$$t = \frac{\sqrt{h_0} - \sqrt{h_2}}{\sqrt{g/2}} \left(\frac{D_{tank}^2}{D_{delik}^2} \right) \quad (5.14)$$

Eş. 25 ile salım süresini veren ifade elde edilmiştir. Sel/taşkının atmosferik tankta meydana getirebileceği tüm hasar durumları dikkate alınarak (Bkz. Çizelge 4.2) üç farklı salım süresi için ($t_1=2$ dk, $t_2=10$ dk, $t_3=60$ dk) sızıntı delik çapları eşitlik (25) kullanılarak hesaplanmıştır. Örnek kuruluştaki tanklar için hesaplanan değerler Çizelge 5.9' da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Örnek kuruluştaki tanklar için hesaplanan sızıntı delik çapları

									$t_1=2$ dk	$t_2=10$ dk	$t_3=60$ dk
Tank no	Kimyasal	Çap (m)	Yükseklik (m)	Kapasite (m ³)	CFL	h_0 (m)	h_2 (m)	V_2 (m/s)	D_{delik} (m)	D_{delik} (m)	D_{delik} (m)
3063	Benzin	29,5	14,9	10000	0,18	11,0	2,6	14,7	2,4	1,1	0,3
3064	Benzin	29,5	14,9	10000	0,18	11,0	2,6	14,7	2,4	1,1	0,3
3065	Benzin	29,5	14,9	10000	0,18	11,0	2,6	14,7	2,4	1,1	0,3
3066	Benzin	29,5	14,9	10000	0,18	11,0	2,6	14,7	2,4	1,1	0,3
3067	Benzin	30,4	14,1	10000	0,19	10,4	2,6	14,3	2,4	1,1	0,3
3068	Benzin	30,3	14,1	10000	0,19	10,4	2,6	14,3	2,4	1,1	0,3
3069 A	Benzin	42,0	16,0	20000	0,18	10,8	2,6	14,6	3,3	1,5	0,3
3069-3	Benzin	45,0	19,0	30000	0,17	14,2	3,2	16,7	3,9	1,7	0,4
3069-4	Benzin	45,0	19,0	30000	0,17	14,2	3,2	16,7	3,9	1,7	0,4
3081	Benzin	29,5	14,9	10000	0,18	11,0	2,6	14,7	2,4	1,1	0,3
3082	Benzin	29,5	14,9	10000	0,18	11,0	2,6	14,7	2,4	1,1	0,3
3084	Benzin	29,5	14,9	10000	0,18	11,0	2,6	14,7	2,4	1,1	0,3
3152	Benzin	12,3	8,9	1000	0,27	6,3	2,3	11,1	0,8	0,3	0,2
3153	Benzin	14,2	11,8	2000	0,21	9,5	2,7	13,7	1,0	0,5	0,3
3091	Dizel	34,3	11,9	10000	0,20	8,1	2,2	12,6	2,5	1,1	0,2
3092	Dizel	34,2	11,9	10000	0,20	8,2	2,2	12,7	2,5	1,1	0,2
3093	Dizel	34,2	11,9	10000	0,20	8,2	2,2	12,7	2,5	1,1	0,2
3094	Dizel	34,2	11,9	10000	0,20	8,2	2,2	12,7	2,5	1,1	0,2
3095	Dizel	34,2	11,9	10000	0,20	8,1	2,2	12,6	2,5	1,1	0,2
3096	Dizel	34,2	11,9	10000	0,20	8,2	2,2	12,6	2,5	1,1	0,2
3097	Dizel	34,2	11,9	10000	0,20	8,2	2,2	12,7	2,5	1,1	0,2
3098	Dizel	57,3	15,7	40000	0,20	11,7	3,1	15,1	4,5	2,0	0,3
3099/C	Dizel	60,7	15,9	50000	0,21	13,0	3,6	15,9	4,8	2,2	0,4
3099/D	Dizel	60,7	15,9	50000	0,21	13,0	3,6	15,9	4,8	2,2	0,4
9901	Dizel	56,2	20,5	50000	0,16	15,1	3,2	17,2	5,0	2,2	0,5
9901	Dizel	56,2	20,5	50000	0,16	15,1	3,2	17,2	5,0	2,2	0,5
9903	Dizel	45,0	19,0	30000	0,15	14,2	2,8	16,7	4,0	1,8	0,4
9904	Dizel	45,0	19,0	30000	0,15	14,2	2,8	16,7	4,0	1,8	0,4

Çizelge 5.9 incelendiğinde; salım süresi arttıkça delik çapının azaldığı görülmektedir. Tank doluluk seviyesi ve kritik doluluk seviyesi arasındaki fark arttıkça ise sızıntı delik çapı artmıştır. Örnek kuruluştaki en riskli görülen 3152 nolu atmosferik benzin tankı hasar analizi basitleştirilmiş korelasyonlar üzerinden gerçekleştirilmiş, kritik doluluk oranı eşitlik 1-10 ile (CFL: %27); tankın kırılabilirliği (ψ : %36) ve başlatıcı olay frekansı (f_{LOC} : $7,1 \times 10^{-4}$ 1/yıl) hesaplanmıştır (Çizelge 5.8.). En kötü durum senaryosu (2dk içinde kimyasalın boşalması) dikkate alınarak çıkıştaki akışkanın hızı (11,1m/s) ve muhtemel sızıntı delik çapı (0,8m) Bernoulli denkleminden eşitlik 33 ile belirlenmiştir.

Kaza frekans tahmini ve olay ağaçları

Bölüm 4'te detayları sunulan örnek olay ağacı ve CCPS hesaplama modülü kullanılarak kaza senaryosu frekansları hesaplanmıştır .

Kaza frekansı = başlatıcı olay frekansı x sızıntı olasılığı x operatör müdahalesi

Hasar analizleri sonucunda (Bkz. Çizelge 5.7 ve 5.8) başlatıcı olay frekansı en yüksek örnek kuruluştaki 3152 nolu benzin tankı için belirlenmiştir. Bu en riskli tank için başlatıcı olay frekansı $7,1 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır. 3152 nolu benzin tankı üzerinden CCPS Tutuşma Olasılığı Hesaplama Modülü' ne parametre girişi yapılarak örnek olay ağacı olasılıkları(POII, PODI ve POEGDI) belirlenmiştir. Benzin tankı için operasyon basıncı 1 atm, sıcaklığı 25.4 °C olarak modüle işlenmiştir.(Şekil 5.6)

Probability of Ignition Tool

Read Me | Analysis Level | Release Data | Ignition Source | Ignition Control | Ventilation System*

Material Data

Chemical: gasoline | Material: 0,6647

Phase: Liquid | Reactivity: Medium | Reactivity: 1,0000

Min Ign Energy: 0.8 mJ | Boiling Point: 35 C

Auto Ign Temp: 263 C | Flash Point: -43 C

Release Conditions

Process Temp: 25.4 C | Process Pres: 1.013 barg | Temp Multiplier: 0,9945

Hole Diam***: 800 mm | Rel Duration: 2 min | Release Multiplier: 3,0000

• Outdoor | • Indoor | Indoor/Outdoor Mult: 1,0000

Intermediate Parameters

POIIS: 0,0008

POIIAI: 0,0000

PODI(s/d): 0,9900

POII: 0,0008

PODI: 0,9900

Results

Prob Imm Ign (Fire): 0,0008

Prob Del Ign (Fire or Expl): 0,989

Probability of Ignition Tool

Read Me | Analysis Level | Release Data | Ignition Source | Ignition Control | Ventilation System*

Material Data

Chemical: gasoline | Material: 0,6647

Phase: Liquid | Reactivity: Medium | Reactivity: 1,0000

Min Ign Energy: 0.8 mJ | Boiling Point: 35 C

Auto Ign Temp: 263 C | Flash Point: -43 C

Release Conditions

Process Temp: 25.4 C | Process Pres: 1.013 barg | Temp Multiplier: 0,9945

Hole Diam***: 800 mm | Rel Duration: 2 min | Release Multiplier: 3,0000

• Outdoor | • Indoor | Indoor/Outdoor Mult: 1,0000

Intermediate Parameters

POEGDI(magmult): 1,7321

POEGDI: 0,3000

Results

Prob Del Ign (Fire Only): 0,692

Prob Del Ign (Expl): 0,297

**Results for explosion probability are highly speculative, since they depend on the physical plant layout in the area of the release as well as the release properties. This output should not be used except in the context of knowing whether an explosion is physically

Şekil 5.6. 3152 nolu benzin tankı için CCPS Tutuşma Olasılığı Hesaplama Modülü' ne parametre girişi ekran görüntüleri

Modül ile belirlenen olasılık verileri kullanılarak, muhtemel havuz yangını, buhar bulutu patlaması, parlamam yangını ve toksik yayılım ile sonuçlanan kaza olasılıkları belirlenmiştir.

3152 nolu benzin tankı için toksik yayılım ile sonuçlanan kaza olasılığı:

$$(7.1 \times 10^{-4}) \times (1-POII) \times (1-PODI) \times (0,1) = (7.1 \times 10^{-4}) \times (1-0,0008) \times (1-0,99) \times (0,1) = 7.09 \times 10^{-7} / \text{yıl}$$

3152 nolu benzin tankı için havuz yangını ile sonuçlanan kaza olasılığı:

$$(7.1 \times 10^{-4}) \times POII \times X_{0,1} = (7.1 \times 10^{-4}) \times 0,0008 \times X_{0,1} = 4.03 \times 10^{-7} / \text{yıl}$$

3152 nolu benzin tankı için buhar bulutu patlaması ile sonuçlanan kaza olasılığı:

$$(7.1 \times 10^{-4}) \times (1-POII) \times (PODI) \times POEGDI \times X_{0,1} = (7.1 \times 10^{-4}) \times (1-0,0008) \times (0,99) \times (0,3) \times X_{0,1} = 2.11 \times 10^{-5} / \text{yıl}$$

3152 nolu benzin tankı için parlama yangını ile sonuçlanan kaza olasılığı:

$$(7.1 \times 10^{-4}) \times (1-POII) \times (PODI) \times (1-POEGDI) \times X_{0,1} = (7.1 \times 10^{-4}) \times (1-0,0008) \times (0,99) \times (1-0,3) \times X_{0,1} = 3.44 \times 10^{-5} / \text{yıl}$$

3152 nolu atmosferik benzin tankı için toksik yayılım, havuz yangını, parlama yangını ve buhar bulutu patlama olasılığı sırasıyla $7.09 \times 10^{-7} / \text{yıl}$, $4.03 \times 10^{-7} / \text{yıl}$, $3.44 \times 10^{-5} / \text{yıl}$ ve $2.11 \times 10^{-5} / \text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır. Sel/taşkın tetiklediği Natech kazasının parlama yangını olasılığı en yüksek bulunmuştur. Belirlenen tüm kaza olasılıkları, mevzuat eşik değerinin ($10^{-4} / \text{yıl}$) altındadır.

Sonuç analizi

Bölüm 4' te detayları sunulan sonuç analizi adımları uygulanarak örnek kuruluştaki tüm tanklar için, termal radyasyon eşiklik (15) , havuz çapı eşitlik (21) ve alev yüksekliği (eşitlik 23) kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Termal Radyasyon, havuz çapı ve alev yüksekliği değerleri

tank no	cins	tank çapı (m)	tank yüksek- lik(m)	dökülen sıvı hacmi (m^3)	n (radyant ısı fraksiyon)	m (yanma hızı) ($\frac{kg}{m^2s}$)	Sıvı Yakıt Yoğunluğ u ($\frac{kg}{m^3}$)	D_{max} (max havuz çapı, m)	alev sürüklen- mesi (3 m/s rüzgar hızında)	alev sürüklen- me miktarı (m)	D>20 m ise E , ($\frac{kW}{m^2}$)	H (alev yüksek- liği)	t_{max} dak
3063	benzin	29,5	14,9	5700	0,08	0,082	750	666,4	698,2	31,75	40	373,62	2,47
3064	benzin	29,5	14,9	5700	0,08	0,082	750	666,4	698,2	31,75	40	373,62	2,47
3065	benzin	29,5	14,9	5700	0,08	0,082	750	666,4	698,2	31,75	40	373,62	2,47
3066	benzin	29,5	14,9	5700	0,08	0,082	750	666,4	698,2	31,75	40	373,62	2,47
3067	benzin	29,5	14,9	5600	0,08	0,082	750	662,0	693,9	31,86	40	371,90	2,43
3068	benzin	29,5	14,9	5600	0,08	0,082	750	662,0	693,9	31,86	40	371,90	2,43
3069 A	benzin	29,5	14,9	11400	0,08	0,082	750	864,3	889,3	25,08	40	447,59	4,94
3069-3	benzin	29,5	14,9	17400	0,08	0,082	750	1012,8	1030,8	18,05	40	499,74	7,54
3069-4	benzin	29,5	14,9	17400	0,08	0,082	750	1012,8	1030,8	18,05	40	499,74	7,54
3081	benzin	29,5	14,9	5700	0,08	0,082	750	666,4	698,2	31,75	40	373,62	2,47
3082	benzin	29,5	14,9	5700	0,08	0,082	750	666,4	698,2	31,75	40	373,62	2,47
3084	benzin	29,5	14,9	5700	0,08	0,082	750	666,4	698,2	31,75	40	373,62	2,47
3152	benzin	29,5	14,9	480	0,08	0,054	850	301,8	303,0	31,13	40	166,97	0,22
3153	benzin	29,5	14,9	1080	0,08	0,054	850	409,1	402,2	33,66	40	206,27	0,49
3091	dizel	29,5	14,9	5500	0,08	0,054	850	753,1	709,9	31,44	40	315,27	2,49
3092	dizel	29,5	14,9	5500	0,08	0,054	850	753,1	709,9	31,44	40	315,27	2,49
3093	dizel	29,5	14,9	5500	0,08	0,054	850	753,1	709,9	31,44	40	315,27	2,49
3094	dizel	29,5	14,9	5500	0,08	0,054	850	753,1	709,9	31,44	40	315,27	2,49
3095	dizel	29,5	14,9	5500	0,08	0,054	850	753,1	709,9	31,44	40	315,27	2,49
3096	dizel	29,5	14,9	5500	0,08	0,054	850	753,1	709,9	31,44	40	315,27	2,49
3097	dizel	29,5	14,9	5500	0,08	0,054	850	753,1	709,9	31,44	40	315,27	2,49
3098	dizel	29,5	14,9	22000	0,08	0,054	850	1266,6	1151,8	10,82	40	452,47	9,94
3099/C	dizel	29,5	14,9	27000	0,08	0,054	850	1367,7	1237,2	5,11	40	477,28	12,20
3099/D	dizel	29,5	14,9	27000	0,08	0,054	850	1367,7	1237,2	5,11	40	477,28	12,20
9901	dizel	29,5	14,9	29500	0,08	0,054	850	1413,9	1276,1	2,35	40	488,42	13,33
9901	dizel	29,5	14,9	29500	0,08	0,054	850	1413,9	1276,1	2,35	40	488,42	13,33
9903	dizel	29,5	14,9	18000	0,08	0,054	850	1174,8	1073,9	15,59	40	429,42	8,13
9904	dizel	29,5	14,9	18000	0,08	0,054	850	1174,8	1073,9	15,59	40	429,42	8,13

Çizelge 5.10' dan, tanktaki kimyasal miktarı arttıkça havuz çapı ve alev yüksekliklerinin arttığı görülmüştür. Sızıntıların birikmesi ve bu tankların çevresinde yanıcı göletlerin oluşması nedeniyle, toplanan radyatör yoğunlukları tanklarda anında patlama potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, depolama tankları arasındaki mesafenin artırılması önemlidir. Hasar analiziden sel/taşkınının tetikleyeceği Natech kazası için en riskli bulunan 3152 nolu benzin tankının yangın etki çapı ($D=301.8m$) Google Earth üzerine aktarılmıştır (Resim 5.7).



Resim 5.1. Örnek kuruluştaki 3152 nolu Benzin Tankında Yangın Etki Alanı Google Earth görüntüsü

Herhangi bir bariyer içermeyen ani bir dökülme için havuz çapı (D_{max}) 301,8 m ve alev yüksekliği 166,97 m olarak bulunmuştur. Geniş bir etki alanında ölümcül etkilerin olabileceği belirlenmiştir. Bu etki alanındaki ısı enerjisi 40 kW/m^2 tespit edilmiştir ki bu oran ölümcül tehlikeli alanıdır. Alevin maksimum çapa ulaşması için gereken süre sadece 0,2 dakikadır. Tankın kuruluş içerisindeki kritik konumu göz önüne alındığında, bu çapta oluşan yangının etki alanının kuruluş sınırında kaldığı, aynı zamanda bu etki alanına beş petrol tankı, iki nafta tankı, iki dizel tankı girebileceği görülmüştür. Bu sonuç, muhtemel domino etkisinin yıkıcılığını ortaya koymaktadır. Kuruluşun bulunduğu konumun meteorolojik verileri dikkate alındığında 6 m/s rüzgar hızı (İzmir ili için) ile alev sürüklenme miktarı 32,13 m bulunmuştur.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, iklim değişikliğinin kimyasal proseslere etkilerinin risk analizi amaçlanmış ve buna yönelik bir metodoloji önerisi getirilmiştir. Literatürdeki istatistiksel çalışmalar ve risk analiz çalışmaları dikkate alındığında ülkemizde ilgili konuda bir çalışmanın yürütülmediği görülmüştür. Öncelikle proses kazalarının çeşitli veri tabanları (eNatech, EM-DAT) üzerinden analizi yapılmış; bu kazaları en çok tetikleyen doğal afet türleri ve bunların etkilediği proses ekipmanları değerlendirilmiştir. Ardından, öne çıkan doğal afet türü ve proses ekipmanlarını barındıran, risk analizi çalışmaları yürütülecek il ve kuruluş seçimleri yapılmıştır. Son aşamada, hasar analizi, olay ağacı ve sonuç analizi aşamalarını içeren risk analiz süreci gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, önerilen metodolojinin örnek bir kuruluştaki uygulaması yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları devam eden şekilde sıralanabilir:

- Son 15 yıllık periyotta çeşitli veri tabanları üzerinden 5738 proses kazası saptanmıştır. Proses kazalarının en önemli tetikleyicisinin hidrolojik afetler(%50,5) olduğu görülmüştür. Hidrolojik afetler içerisinde ise selin(%45,5) öne çıktığı tespit edilmiştir. Aynı periyotta 44 adet doğal afetin tetiklediği teknolojik kaza (Natech) belirlenmiştir. Natech kazalarında, sel ve taşkınların yine öncül olduğu görülmüştür(%29,5).
- Natech kazalarında en fazla etkilenen ekipman türleri, boru hatları ile aynı orana sahip atmosferik depolama tankları(%32,4) olarak belirlenmiştir.
- İklim değişikliğinin en önemli sonuçlarından biri olan sel/taşkın ciddi Natech ve proses kazalarına neden olduğu belirlenmiştir. Ülkemiz sel/taşkınların il bazında yoğunlukları üzerinden en çok sel afetinin yaşandığı iller sırasıyla Rize, İzmir, Antalya, İstanbul olarak tespit edilmiştir. İlgili mevzuat kapsamına giren kuruluş lokasyonlarının bulunduğu harita, sel/taşkın haritası ile örtüştürülerek, İzmir ilinde risk analizi çalışmasının yürütülmesine karar verilmiştir.
- İzmir ilinde uygulamanın yapılacağı örnek kuruluş, sel/taşkın karşı kırılganlığı yüksek proses ekipmanları barındıran tesisler arasından seçilmiştir. İklim değişikliğinin en ciddi sonucu olan sel/taşkın proses etkileri, hasar analizi, olay ağacı ve sonuç analizi üzerinden gerçekleştirilmiştir.
- Sel/taşkın su yüksekliği, su hızı için ortalama değerler ve kötü durum senaryosu düşünülerek daha yüksek frekans değeri esas alınarak hesaplamalar yürütülmüştür.

- Hasar analizinde, tank kırılabilirliği, doluluk seviyesi ve kimyasal yoğunluğu ile ilişkilendirilerek en yüksek kritik doluluk seviyesine sahip dolayısı ile sel/taşına en savunmasız örnek kuruluştaki atmosferik depolama tankı belirlenmiştir(3152 nolu benzin tankı). Bu tank için sel /taşkın kaynaklı ekipmanda bütünlük kaybına uğrama frekansı/başlatıcı olay frekansı ise $7,1 \times 10^{-4}$ olarak belirlenmiştir.
- Sel/afet etkisi ile atmosferik bir tankta bütünlük kaybına uğrama frekansı dahili etkiler için belirlenen frekans değerlerinden ciddi oranda yüksek(~100kat) bulunmuştur. Bu sonuç, sele/taşına maruz kalmaya eğilimli bölgelerdeki proseslerin riskini artırmaktadır.
- Sel/taşına karşı savunmasızlığı artıran kritik doluluk seviyesinde bir açıklığın/deliğin oluşması durumu Bernoulli denkleminden hesaplanmış, ilgili delik çapı ve akışkan hızları tespit edilmiştir. Sel/taşkının atmosferik tankta meydana getirebileceği tüm hasar durumları dikkate alınarak üç farklı salım süresi için($t_1=2$ dk, $t_2=10$ dk, $t_3=60$ dk) sızıntı delik çapları hesaplanmıştır. En kötü durum senaryosu (2dk içinde kimyasalın boşalması) için akışkanın hızı 11,1m/s ve muhtemel sızıntı delik çapı 0,8m olarak elde edilmiştir.
- Olay ağacı analizi ile 3152 nolu atmosferik benzin tankı için toksik yayılım, havuz yangını, parlama yangını ve buhar bulutu patlama olasılığı CCPS modülü üzerinden sırasıyla $7,09 \times 10^{-7}$ /yıl, $4,03 \times 10^{-7}$ /yıl, $3,44 \times 10^{-5}$ /yıl ve $2,11 \times 10^{-5}$ /yıl olarak hesaplanmıştır. Sel/taşkının tetiklediği Natech kazasının parlama yangını olasılığı en yüksek bulunmuştur. Tüm kaza olasılıkları mevzuat eşik değerinin altındadır, kuruluş için ilave önlem gereği yoktur.
- Sonuç analizi yürütülerek örnek kuruluştaki tüm tanklar için termal radyasyon, havuz çapı ve alev yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. Tanktaki kimyasal miktarı arttıkça havuz çapı ve alev yüksekliklerinin arttığı görülmüştür. Hasar analizi ve olay ağacı analizlerinden sel/taşkın tetikleyeceği Natech kazası için en riskli bulunan 3152 nolu benzin tankının yangın etki çapı $D=301,8$ m, alev yüksekliği 166,97 m olarak bulunmuştur. Etki alanındaki termal radyasyon miktarı 40 kW/m^2 belirlenmiştir ki bu ölümcül etkileri ifade etmektedir.
- Tankın etki alanının kuruluş sınırında kaldığı; kuruluş içerisinde diğer ekipmanları etkileyerek domino etkisi meydana getirebileceği belirlenmiştir.
- Proses kazalarının afet anında yönetilmesi daha zordur. Geniş bir alanın etkilenmesi yanında, acil durum planları şebeke kesintileri, iletişim kesintisi vb. ilave olumsuzluklar nedeniyle etkin yürütülememektedir ve sonunda ciddi can, mal ve çevre kayıpları

yaşanmaktadır. Önerilen risk analiz metodolojisi ile iklim değişikliğinin en ciddi sonucu olan sel/ taşkınların proseslere etkilerinin proaktif olarak incelenmesi sağlanmıştır.

7. ÖNERİLER

Ülkemiz için deniz seviyesinin yıllık 6 mm civarında yükseldiğine dikkat çekilmektedir. Ayrıca, Türkiye’de son yıllarda şiddetli yağış, fırtına, sel ve taşkın gibi hidrometeorolojik karakterli afet sayılarında önemli artışlar yaşanmaktadır. İklim değişikliği projeksiyonları, hidrometeorolojik karakterli afet sayı ve şiddetinde artışların devam edeceğini belirtmektedir. Bu sebeple, iklim değişikliği, afet risklerinin altında yatan nedenlerden biridir. Dünya genelinde iklim değişikliğine bağlı olarak doğa kökenli olayların sayısının ve şiddetinin artmasıyla afetlerin tetiklediği teknolojik kazalar da artış göstermektedir. Bu etki yanında artan sanayileşme birbiriyle bağlantılı ve ardışık yeni riskler açığa çıkarmaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen yeni risk analiz metodolojisinin, bu süreçte önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir. İlgili öneriler devam eden şekilde sıralanabilir:

- Önerilen metodoloji, yalnızca küçük değişikliklerle (temel olarak sonuç analizi üzerinde) diğer kimyasal türlerine entegre edilebilir.
- Çalışma, baz alınan yıl aralığı ve incelenen veri tabanları daha geniş tutularak yürütülebilir.
- Kantitatif risk analizi ile bu çalışmanın devamında sosyal ve bireysel risk haritaları oluşturulabilir.
- Tez çalışmasında sel/taşkın özelinde geliştirilen risk analiz metodolojisi diğer doğal afet türleri için de geliştirilebilir.
- Tez çalışmasının çıktıları, endüstriyel kuruluşların acil durum planlamalarında yardımcı kaynak olarak kullanılabilir.
- Acil durum planlamalarında kuruluşun bulunduğu bölgedeki doğal afet tipinin yoğunluğunun, prosesi nasıl etkileyeceği göz önünde bulundurularak planlar geliştirilebilir.
- Çalışmada geliştirilen yöntem, özellikle yeni projelendirilen terminallerin doğal afetler dikkate alınarak yerini belirlemeye yardımcı olabileceği gibi, liman yetkililerinin güvenliği garanti etmek amacıyla hidrokarbon depolama koşulları hakkında karar vermeleri için objektif bir temel oluşturmalarına da olanak sağlayabilir.
- Sonuç analizleri, korelasyon yerine ALOHA, BREZEE gibi yazılımlar üzerinden yürütülebilir. Bu şekilde rüzgâr hızı yanında hava sıcaklığı, pürüzlülük vb. parametrelerin etki alanlarına etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Antonioni, G., Bonvicini, S., Spadoni, G., ve Cozzani, V. (2009). Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events. *Reliability Engineering ve System Safety*, 94(9), 1442-1450.
- Antonioni, G., Landucci, G., Necci, A., Gheorghiu, D., ve Cozzani, V. (2015). Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods. *Reliability Engineering ve System Safety*, 142, 334-345.
- Antonioni, G., Spadoni, G., ve Cozzani, V. (2007). A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events. *Journal of hazardous materials*, 147(1-2), 48-59.
- Arendt, JS., Lorenzo, DK. (2000). *Center for Chemical Process Safety (CCPS) . Guidelines for hazard evaluation procedures*. (3. Baskı). New York: AIChE, 15-45.
- Arendt, JS., Lorenzo, DK. (2008). *Center for Chemical Process Safety (CCPS) . Guidelines for hazard evaluation procedures*. (3. Baskı). New York: AIChE, 54-78.
- Arendt, JS., Lorenzo, DK. (2014). *Center for Chemical Process Safety (CCPS), Guidelines for Chemical Process Risk Assessment, Center for Chemical Process Safety*. (29.Baskı). New York: AIChE, 89-102.
- Arendt, JS., Lorenzo, DK. (2016). *Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs*. (5.Baskı). New York: AIChE, 100.
- Bahadır, H., Uçgun , R., (2018). Uluslararası Acil Durum Veri Tabanına Göre Türkiye Cumhuriyeti Tarihindeki Afetler. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(1), 28-33.
- Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., ve Van Wingerden, K. (1997). *Gas explosion handbook*. *Journal of hazardous materials*, 52(1), 1-150.
- Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi Ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete Tarihi: 30.12.2019, Resmi Gazete Sayısı: 28867.
- Campedel, M. (2008). *Analysis of Major Industrial Accidents Triggered by Natural Events Reported In the Principal Available Chemical Accident Databases*. Italy: European Communities, 60.
- Caratozzolo, V., Misuri, A., ve Cozzani, V. (2022). A generalized equipment vulnerability model for the quantitative risk assessment of horizontal vessels involved in Natech scenarios triggered by floods. *Reliability Engineering ve System Safety*, 223, 10-50.
- Charlton, R., (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology* (3.Baskı). New York: Routledge, 208.
- Cozzani V., Antonioni G., Landucci G., Tugnoli A., Bonvicini S., Spadoni G., 2014. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas, *J. Loss Proc. Ind.* 28, 10-22.

- Cozzani V., Campedel M., Renzi E., Krausmann E., 2010. Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents, *J. Haz. Mat.* 175(3), 501–509.
- Cruz, A. M., ve Okada, N. (2008). Consideration of natural hazards in the design and risk management of industrial facilities. *Natural hazards*, 44, 213-227.
- Cruz, A. M., ve Okada, N. (2008). Methodology for preliminary assessment of Natech risk in urban areas. *Natural Hazards*, 46, 199-220.
- Cruz, A. M., Steinberg, L. J., Vetere Arellano, A. L., Nordvik, J.-P., ve Pisano, F. (2004). State of the art in Natech risk management. *Report EUR 21292 EN, Commission of the European Communities*. Ispra. 1-55.
- Deniz ,V., (2021). Deprem ve Büyük Endüstriyel Kazalardan Ne Öğrendik? . *Ölçü Dergisi*, 3(2), 15-18.
- Dökmeci, A. H., Akduman, Ö. (2022). Doğal olayların tetiklediği KBRN-p tehlikesi ve riski: Türkiye örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 210, 1-13.
- Dökmeci, A.H., (2018) . *Toksikolojik Çevresel ve Endüstriyel Afetler* (1.Baskı). İstanbul: Nobel Tıp Kitabevi, 210.
- El Hajj, C., Piatyszek, E., Tardy, A., ve Laforest, V. (2015). Development of generic bow-tie diagrams of accidental scenarios triggered by flooding of industrial facilities (Natech). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36, 72-83.
- Erdoğan A., Çakmak M., (2023). Büyük Endüstriyel Kazalara İlişkin Ulusal Kaza Veri Tabanı Eksikliği. *Çalışma İlişkileri Dergisi*, 14(1), 20-35.
- Gadd, S. A., Keeley, D. M., ve Balmforth, H. F. (2003). Pitfalls in risk assessment: examples from the UK. *Safety Science*, 42(9), 841-857.
- Gai, C., Weng, W., ve Yuan, H. (2012). Quantitative risk assessment of LOC accidents triggered by floods. *Journal of Tsinghua University Science and Technology*. 52(11), 1597-1600.
- Girgin, S., ve Krausmann, E. (2013). RAPID-N: Rapid natech risk assessment and mapping framework. *Journal of loss prevention in the process industries*, 26(6), 949-960.
- Health and Safety Executive. (2012). *The major accident failure rates project; RR915 research report*. HSE.
- Hoşcan, O. (2019). *Endüstriyel Kazalar İçin Acil Durum Toplanma Noktasının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi İle Seçimi* Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- İşık, Ö., Aydınlioğlu, H. M., Koç, S., Gündoğdu, O., Korkmaz, G., ve Ay, A. (2012). Afet yönetimi ve afet odaklı sağlık hizmetleri. *Okmeydanı Tıp Dergisi*, 28(2), 82-123.
- İnternet: Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2019). Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik, Web: <https://www.csgb.gov.tr>. Son erişim tarihi: 27.09.2023.

- İnternet: EC ,(1967), Commission of the European Communities (EC) (1967).
Web: <https://op.europa.eu/en/publicationdetail/-/publication>. Son erişim tarihi: 27.09.2023.
- İnternet: EIGA European Industrial Gases Association AISBL. Gaseous Hydrogen Installations: EIGA Doc 15/21, Bruksel, 2023.
Web: <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC015.pdf> /erişim tarihi 23.10.2023.
- İnternet: EU, (2023), Overview of natural and man-made disaster risks the European Union may face, Web: <https://op.europa.eu/en/publicationdetail/-/publication>. Son erişim tarihi: 27.09.2023.
- İnternet: UNISDR (2015), Bileşmiş Milletler Afet Riskini Azaltılma Ofisi, Web: <https://www.undrr.org>. Son erişim tarihi:30.11.2023.
- İnternet: UNISDR (2019), Bileşmiş Milletler Afet Riskini Azaltılma Ofisi, Web: <https://www.undrr.org>. Son erişim tarihi:30.11.2023.
- Kadri, F., Birregah, B., ve Châtelet, E. (2014). The impact of natural disasters on critical infrastructures: A domino effect-based study. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 11(2), 217-241.
- Khakzad, N., ve Van Gelder, P. (2017). Fragility assessment of chemical storage tanks subject to floods. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 75-84.
- Khakzad, N., ve Van Gelder, P. (2018). Vulnerability of industrial plants to flood-induced natechs: A Bayesian network approach. *Reliability Engineering ve System Safety*, 169, 403-411.
- Komendantova, N., Mrzyglocki, R., Mignan, A., Khazai, B., Wenzel, F., Patt, A., ve Fleming, K. (2013). New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Methods for Europe. *MATRIX results II and Reference Report. MATRIX Consortium*. Kaliforniya,4-12.
- Krausmann, E., Necci, A., ve Girgin, S. (2017). Natech emergency management--rising to the challenge. *Loss Prevention Bulletin*, (254).
- Landucci G., Necci A., Antonioni G., Tugnoli A., Cozzani V., 2014a, Release of hazardous substances in floodevents: Damage model for horizontal cylindrical vessels. *Reliability Engineering ve System Safety*, 132, 125-145.
- Landucci, G., Amos, N., Alessandro, T., Giacomo, A., ve Valerio, C. (2014b). NaTech scenarios caused by flooding: evaluation of accident frequency by the use of fragility models. *Chemical Engineering Transactions*, 36, 427-432.
- Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A., ve Cozzani, V. (2012). Release of hazardous substances in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering ve System Safety*, 106, 200-216.
- Landucci, G., Tugnoli, A., Antonioni, G., ve Cozzani, V. (2013). Damage models for storage and process equipment involved in flooding events. *Chemical Engineering Transactions*, 31, 697-702.

- Marshall, V. ve Ruhemann S. (Editörler). (2001). *Fundamentals of process safety*, United Kingdom: Institution of Chemical Engineers, 102-105.
- Marshall, V. ve Ruhemann S. (Editörler). (2011). *Fundamentals of process safety*, United Kingdom: *Institution of Chemical Engineers*, 102-105.
- Mayorga, S. Z., Sánchez-Silva, M., Olivar, O. R., Giraldo, F. M. (2019). Development of parametric fragility curves for storage tanks: A Natech approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 189, 1-10.
- McGrattan, K. B., Baum, H. R., ve Hamins, A. (2020). *Thermal radiation from large pool fires*. *National Institute of Standards and Technology*. US : Department of Commerce, 29.
- Meng, Y., Lu, C., Yan, Y., Shi, L., ve Liu, J. (2015). Method to analyze the regional life loss risk by airborne chemicals released after devastating earthquakes: A simulation approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 9(4), 3-7.
- Misuri, A., Antonioni, G., ve Cozzani, V. (2020). Quantitative risk assessment of domino effect in Natech scenarios triggered by lightning. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 6(4), 2-13.
- Moreno, V. C., Ricci, F., Sorichetti, R., Misuri, A., Cozzani, V. (2019). Analysis of Past Accidents Triggered by Natural Events in the Chemical and Process Industry. *Chemical Engineering Transactions*, 7(4), 15-17.
- Mudan, K. S. (1984). Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. *Progress in energy and combustion science*, 10(1), 59-80.
- Necci, A., Antonioni, G., Bonvicini, S., ve Cozzani, V. (2016). Quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightning. *Reliability Engineering ve System Safety*, 154, 60-72.
- Olivar, O. J. R. (2018). *Fragility Assessment Methodology of Storage Tanks in NaTech Events*. MSC Thesis, Universidad de los Andes Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Bogotá, Colombia.
- Piccinelli, R., ve Krausmann, E. (2013). Natech risk analysis methodologies for floods. *EU Report*. İtalya, 1-19.
- Ricci, F., Moreno, V. C., ve Cozzani, V. (2020). Analysis of natech accidents triggered by extreme temperatures in the chemical and process industry. *Chemical Engineering Transactions*, 8(2), 79-84.
- Ricci, F., Moreno, V. C., ve Cozzani, V. (2021). A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry. *Process Safety and Environmental Protection*, 1(4), 703-713.
- Roy, A., Srivastava, P., ve Sinha, S. (2014). Risk and reliability assessment in chemical process industries using Bayesian methods. *Reviews in Chemical Engineering*, 30(5), 479-499.

- Salzano, E., Basco, A., Busini, V., Cozzani, V., Marzo, E., Rota, R., ve Spadoni, G. (2013). Public awareness promoting new or emerging risks: Industrial accidents triggered by natural hazards (NaTech). *Journal of Risk Research*, 16(3-4), 469-485.
- Şen, Ö. L., Bozkurt, D., Göktürk, O. M., DüNDAR, B., ve Altürk, B. (2017). Türkiye’de iklim değişikliği ve olası etkileri. *Taşkın Sempozyumu*, 29, 30.
- Tarım ve Orman Bakanlığı (2021). Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli’nin (IPCC, 2021), 6. Değerlendirme Raporu. *Su Yönetimi Genel Müdürlüğü*. Ankara. 55.
- Thomas, P. H. (1963). *The size of flames from natural fires*. Yanma Sempozyumunda (Uluslararası) sunuldu, 84-85.
- Tolo, S., Patelli, E., ve Beer, M. (2014). Bayesian network approach for risk assessment of a spent nuclear fuel pond. In *Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Quantification, Mitigation, and Management*, 1(1), 59-60.
- Vatansever, Ö., Kırtas, H. A., ve Barışık, T. (2021). Bleve Temelli Kaza Etkilerinin Değerlendirilmesi. *Resilience*, 5(2), 143-157.
- Yasseri, S. (2013). *The ALARP Argument*. (61. Baskı), Londra: FABIG Newsletter, 61.
- Zeng, T., Chen, G., Reniers, G., ve Yang, Y. (2021). Methodology for quantitative risk analysis of domino effects triggered by flood. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 866-877.



Gazili olmak ayrıcalıktır