
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ENDÜSTRİYEL KURULUŞLARDA PROSES KAZALARININ DOMİNO ETKİLERİNİN RİSK ANALİZİ

Gizem TURAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2026

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.

Gizem TURAK
07/01/2026

ENDÜSTRİYEL KURULUŞLARDA PROSES KAZALARININ DOMİNO ETKİLERİNİN RİSK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gizem TURAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Endüstrileşmeyle birlikte can, mal ve çevreyi ciddi şekilde etkileyen endüstriyel kazalar meydana gelmektedir. Bu kazalar arasında en ciddi etkiler domino etkisi içeren kazalarda gözlenmektedir. Domino kazası, birincil bir kazanın tetiklemesiyle birden fazla tesis veya ekipmanı etkileyen ve zincirleme şekilde ilerleyen karmaşık olaylar dizisi olarak tanımlanır. Domino kazalarının meydana gelmesini önlemek ve yaratacağı zararı en aza indirmek büyük önem taşır. Bu tez çalışması, endüstriyel kuruluşlarda meydana gelen proses kazalarının domino etkilerinin risk analizini ele almaktadır. Çalışma kapsamında, geçmiş domino kazaları analiz edilmiş, öne çıkan birincil kazalar, yayılma etkisi, tetiklenen ikincil kazalar belirlenmiştir. Ardından, Bayes Ağları (BN) kullanılarak belirsizlik içeren olaylar arasındaki olasılıksal ilişkiler ortaya konulmuş muhtemel domino senaryoları üretilerek yeni bir risk analiz metodolojisi geliştirilmiştir. Metodoloji, temelde kantitatif risk analizi ve BN'e dayanmaktadır; verilerin toplanması, birincil birimin seçimi ve kazanın tanımlanması, eskalasyon vektörlerinin analizi, ikincil birimlerin belirlenmesi, eskalasyon olasılıklarının hesaplanması ve BN kurulması adımlarını içermektedir. Önerilen metodolojinin örnek bir kimyasal kuruluşta saha uygulaması da yapılmıştır. Domino senaryosunu başlatıcı tehlikeli ekipman, RPN(Risk Öncelik Numarası) modelinden yararlanılarak belirlenmiştir. Birincil kazadan başlayarak her aşamada kazanın başladığı tankın en yüksek olasılıkla yükseldiği hedef tank seçilmiş, bu seçilen tank sıradaki domino etkisini başlatan tank olarak belirlenmiştir. Örnek kuruluşta, seçilen jet yangını ve buhar bulutu patlaması birincil kaza senaryoları için aynı domino kaza zinciri elde edilmiştir. Bu domino kaza dizisine katılmayan tek tankın (K4), diğer tanklarla arasında en yüksek mesafeye sahip tank olduğu görülmüştür. Saha uygulaması ile kuruluşun domino kaza dizisi ve riski belirlenmiş(<10-4/yıl), önerilen metodolojinin etkinliği gösterilmiştir. Çalışmanın, endüstriyel kazaların domino etkilerinin önlenmesine ve etkili risk yönetimine önemli katkıları olacağı öngörülmektedir.

Bilim Kodu	:	91204
Anahtar Kelimeler	:	Domino etkileri, endüstriyel kazalar, risk analizi
Sayfa Adedi	:	93
Danışman	:	Prof. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ

RISK ANALYSIS OF DOMINO EFFECTS OF PROCESS ACCIDENTS IN INDUSTRIAL FACILITIES

(M. Sc. Thesis)

Gizem TURAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

Industrialization has led to industrial accidents that seriously affect lives, property, and the environment. Among these accidents, the most serious effects are observed in those involving a domino effect. A domino accident is defined as a complex series of events triggered by a primary accident, affecting multiple facilities or equipments and progressing in a chain reaction. Preventing domino accidents and minimizing the damage they cause is of paramount importance. This thesis examines the risk analysis of domino effects of process accidents occurring in industrial organizations. The study analyzed past domino accidents, identifying prominent primary accidents, the escalation, and triggered secondary accidents. Subsequently, a new risk analysis methodology was developed by using Bayesian Networks (BN) to reveal probabilistic relationships between uncertain events and generate possible domino scenarios. The methodology is fundamentally based on quantitative risk analysis and BN; it includes the steps of data collection, selection of the primary unit and identification of the accident, analysis of escalation vectors, identification of secondary units, calculation of escalation probabilities, and establishment of the BN. The proposed methodology was also field-tested at a sample chemical organization. The hazardous equipment that triggers the domino scenario was identified using the RPN (Risk Priority Number) model. Starting from the primary accident, at each stage the target tank that the tank where the accident started was most likely to escalate to was selected, and this selected tank was designated as the tank that initiated the next domino effect. In the sample organization, the same domino accident chain was obtained for the selected jet fire and vapor cloud explosion primary accident scenarios. The only tank not participating in this domino accident sequence (K4) was found to be the tank with the greatest distance between itself and the other tanks. The field application determined the domino accident sequence and risk of the organization (<10-4/year), and demonstrated the effectiveness of the proposed methodology. It is anticipated that the study will make significant contributions to preventing domino effects of industrial accidents and to effective risk management.

Science Code	:	91204
Key Words	:	Domino effects, industrial accidents, risk analysis
Page Number	:	93
Supervisor	:	Prof. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam sırasında bana yol gösteren, destek veren ve her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle katkıda bulunan değerli danışmanım Prof. Dr. Saliha ÇETİNYOKUŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Araştırma sürecinde karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde sabır ve hoşgörüyle beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Ayrıca, çalışma boyunca bana destek olan, önerileriyle değerli katkılarda bulunan ve motivasyon sağlayan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu süreçte emeği geçen herkese sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK BEYAN i

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELER LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xi

1. GİRİŞ 1

2. ÇALIŞMA KONUSU VE KAPSAMI 3

2.1. Domino Etkilerinin Tanımı, Karakteristiği, Sınıflandırılması 3

2.1.1. Domino etkilerinin tanımı 3

2.1.2. Domino etkilerinin karakteristiği 4

2.1.3. Domino etkilerinin sınıflandırılması 5

2.2. İlgili Mevzuat 6

2.2.1.Ulusal mevzuat – BEKRA Yönetmeliği 6

2.2.2. Seveso III Direktifi (2012/18/EU) 7

2.3. Tesislerin Zarar Görebilirliğinin Değerlendirilmesi 7

2.3.1. Deterministik yöntemler 8

2.3.2. Olasılık yöntemleri 11

2.3.3. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği / sonlu elemanlar yöntemleri 14

2.4. Domino Etkilerinin Güvenlik ve Emniyetinin Yönetimi 15

2.4.1. Öz güvenlik 16

2.4.2. Güvenlik bariyeri 19

Sayfa

2.4.3. İşbirlikçi önleme 23

2.4.4. Kasıtlı domino etkileri için güvenlik 25

2.5. Domino Etkilerinin Risk Değerlendirmesi ve Yaklaşımlar 27

2.5.1. Analitik yöntemler 28

2.5.2. Grafiksel yöntemler 28

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 31

3.1. Geçmiş domino kazalarının analizine yönelik çalışmalar 31

3.2. Domino kazalarının risk analizine yönelik çalışmalar 37

4. MATERYAL VE METOT 43

4.1. Metodoloji 43

4.2. Saha Uygulaması 55

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 57

5.1. Verileri topla 57

5.1.1. Örnek kuruluşun özellikleri 57

5.1.2. Kimyasal kaynakların özellikleri 58

5.2. Kazayı Başlatan Birincil Biriminin Seçilmesi 59

5.3. Birincil Kazanın Tanımlanması 64

5.4. Yükselme (Eskalasyon) Vektörlerinin Analiz Edilmesi ve Hesaplanması 64

5.5. Belirlenen Potansiyel İkincil Birimler ve Yükselme Olasılık Hesaplamaları 69

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 79

KAYNAKLAR 83

ÖZGEÇMİŞ 93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Domino etkisi için bazı tanımlamalar 3

Çizelge 2.2 Domino etkisinin sınıflandırılması 5

Çizelge 2.3. Yükseltme vektörlerinin yükseltme eşikleri ve farklı ekipmanlar için kuruluşlar arasındaki güvenlik mesafeleri 9

Çizelge 2.4. Sık kullanılan güvenlik bariyerlerinin PFD değerleri 20

Çizelge 3.1. Domino kazalarının taşıma ve sabit kuruluş bazında dağılımı 34

Çizelge 3.2. Domino kazalarının nedenlerinin dağılımı 34

Çizelge 3.3. Domino kazalarına en sık karışan malzemeler 35

Çizelge 4.1. Kimyasal tesislerde gerçekleşebilecek muhtemel domino senaryoları 48

Çizelge 5.1. Örnek kuruluşta bulunan tüm depolama taklarının özellikleri 58

Çizelge 5.2. Propan ve bütan için bazı kimyasal özellikler 59

Çizelge 5.3. Hacime göre belirlenen şiddet puanları 59

Çizelge 5.4. Olasılık puanları 60

Çizelge 5.5. Tespit edilebilirlik puanları 61

Çizelge 5.6. Tüm tanklar için risk öncelik sayıları 63

Çizelge 5.6. Tanklar arası mesafeler 66

Çizelge 5.7. Tüm tanklar için termal radyasyon değerleri 66

Çizelge 5.8. Tüm tanklar için aşırı basınç değerleri 69

Çizelge 5.9. Tüm tankların birinci senaryodaki yükselme vektörlerinin olasılıkları 72

Çizelge 5.10. Tüm tankların ikinci senaryodaki yükselme vektörlerinin olasılıkları 73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Farklı domino etki dizilerini gösteren göreli olasılık ağacı; köşeli parantezlerde: göreli olasılık 36

Şekil 4.1. Önerilen metodolojinin akış şeması..... 44

Şekil 4.2 Bayes ağının şematik diyagramı..... 54

Şekil 5.1 Örnek kuruluşun tank çiftliğinin yerleşim planı..... 57

Şekil 5.2. Oluşturulan risk matrisi 62

Şekil 5.3. Yükselme vektörlerine göre öngörülen domino etkileri..... 71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
kg/s	Kilogram/Saniye
kJ/kg	Kilojoule/kilogram
kW	KiloWatt
kW/m^2	KiloWatt/metrekare (Termal radyasyon)
kPa	Kilopascal
m	Metre
m²	Metrekare (Alan)
m^3	Metreküp (Hacim)
Pa	Pascal
s	Saniye

Kısaltmalar	Açıklamalar
ANN	Yapay Sinir Ağı
BKO	Büyük Kaza Olayları
BKÖP	Büyük Kaza Önleme Politikası
BLEVE	Kaynayan Sıvı Genleşen Buhar Patlaması
BN	Bayes Ağı
BTS	Kelebek Diyagramı Yöntemi
CE	Kapalı Patlama
CER	Maliyet-Etkinlik Oranlarını
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CPT	Koşullu Olasılık Tablosu
CVCE	Sınırlı Buhar Bulutu Patlamaları
ÇKK	Çoklu Karar Verme Yöntemleri
ÇSGB	Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
DŞBO	Düşük Şiddetli Başlatıcılar
EDP	Acil Basınç Düşürme Sistemleri

Kısaltmalar	Açıklamalar
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LOC	Bütünlük Kaybı
LFPN	Katmanlı Bulanık Petri Ağı
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
ME	Mekanik Patlama
MINLP	Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Program
MPC	Multi-Plant Council
NaTech	Doğal-Teknolojik
PFD	Güvenlik Bariyerinin Arızalanma Olasılığı
PHAST	Proses Tehlike Analizi Yazılım Aracı
PSV	Basınç Güvenlik Vanası
QRA	Kantitatif Risk Analizi
RPN	Risk Öncelik Sayısı
SMP	Basamaklı Matris Prosedürü
TCHPN	Zamanlı Renkli Hibrit Petri-Net
TNT	Trinitrotoluen
ttf	Arızaya Kadar Geçen Süre
TWDRI	Time-Weighted Domino Risk Index
VCE	Buhar Bulutu Patlaması
WDS	Su Püskürtme Sistemleri

1. GİRİŞ

Domino etkili kaza; bir endüstride bir ünitede meydana gelen bir kaza sonucu oluşan yangın / patlama / şarapnel / zehirli yükün diğer ünitelerde ikincil ve üst düzey kazalara neden olduğu kazalar zinciri olarak tanımlanabilir (Khan ve Abbasi, 1998). Dünya üzerinde domino etkili pek çok kaza gerçekleşmiştir. Bunlardan 1974'te meydana gelen Flixborough kazası ve 1976'da meydana gelen Seveso kazası Avrupa'da bir dönüm noktasıdır. Seveso kazası, İtalya'nın Seveso kasabasında gerçekleşmiştir ve kaza sonucunda yayılan toksik kimyasal nedeniyle 736 kişi tahliye edilmiştir (Wexler ve Anderson, 2014). En iyi bilinen domino etkili kazalardan bir başkası ise 1984 yılında Mexico City'de meydana gelmiştir. Bu kaza 500'den fazla kişinin ölümüne ve 7000 kişinin yaralanmasına neden olmuştur (Reniers ve Cozzani, 2013; Arturson, 1987). Domino etkili kazaların en yıkıcı olanlarından biri, Hindistan Bhopal'de 1984 yılında gerçekleşmiştir. Bu kazada toksik sızıntının oluşması sonucu ölü sayısının 15 bin ila 20 bin olduğu ve neredeyse yarım milyon insanın toksik gazdan etkilendiği bilinmektedir (Zhedan, 2025). Domino etkili kazalara güncel bir örnekte, 21 Mart 2019'da Çin'deki Jiangsu Tianjiayi Chemical Company'de meydana gelen kazadır. 78 ölüm, 617 yaralanma ve büyük mal kaybıyla sonuçlanmıştır (Chen, Reniers ve Yang, 2022; Chen, Khakzad ve Reniers, 2020).

Endüstrideki büyük kazalar genellikle çok karmaşıktır. Özellikle domino kaza mekanizmalarını modellemek oldukça zordur (Necci ve ark., 2015). Bu sebeple risk analiz yöntemi seçimi büyük önem taşır. Zhou ve Reniers (2018a), yaptıkları çalışmada yangın kökenli domino etkilerinden etkilenen birimler arasındaki etkileri modellemek için matris tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Alileche ve arkadaşları (2017) çalışmalarında olay ağacı analizine dayalı domino senaryolarının değerlendirilmesi için özel bir model geliştirilmiştir. George ve Renjith (2021) tarafından yürütülen çalışmada, Hindistan, Kerala'daki bir endüstrinin kimyasal depolama alanındaki domino kaza senaryosunu modellemek ve farklı seviyelerde domino olasılıklarını tahmin etmek için özel bir Bayes ağı geliştirilmiştir. Guo ve Wang (2023) tarafından yapılan çalışmada, domino etkilerinin yayılma standartlarını belirlemede uzman bilgisine dayalı olarak, domino etkili kaza senaryosunu modellemek için katmanlı bir bulanık Petri ağı (LFPN) önerilmiştir.

Büyük endüstriyel kazalar sonucu meydana gelen ölüm ve büyük yıkım, Avrupa'da ve dünyada büyük kaza tehlikelerinin kontrolü için gelişmiş bir mevzuatın kabul edilmesine yol açmıştır. Domino etkisinin potansiyel riskinin değerlendirilmesine yönelik ilk düzenleme, Seveso-I Direktifi (82/501/EEC) ile başlamıştır. Domino etkilerinin sadece söz konusu alanda değil, aynı zamanda yakındaki diğer tesisler için de dikkate alınarak değerlendirilmesi gereği Seveso II Direktifi'nde (96/82/EC) yer almıştır. Seveso III Direktifi (2012/18/EU)' nin yayınlanması ile domino etkilerinin değerlendirmesi süreci daha da ileri bir aşamaya geçmiştir. Ülkemizde ise domino etkilerinin, uluslararası mevzuatan doğrudan uyumlaştırılmadığı görülmektedir. 2 Mart 2019 tarihinde ülkemizde "Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik" yayınlanmıştır. Bu yönetmelikte tehlikeli maddeler bulunduran tesislerdeki büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve muhtemel kazaların insanlara ve çevreye olan zararlarının azaltılması amacıyla, yüksek seviyede, etkili ve sürekli korumayı sağlamak için alınması gerekli önlemler ile ilgili usul ve esasları belirlemek amaçlanmıştır (BEKRA Yönetmeliği, 2019). Yönetmelikte "domino etkisi" kavramına doğrudan değinilmemekle birlikte Madde 8' de büyük kaza senaryo dokümanının, tehlikeli ekipmanlar üzerinden dahili tehlikelerin ve tehlikeli ekipmanlara etki edebilecek kuruluş dışından kaynaklanabilecek harici tehlikelerin tanımlanarak hazırlanmasına vurgu yapılmaktadır. Bu unsurlar, kuruluş içi ve dışı domino etkilerinin düşünülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Ülkemizde, endüstriyel kazaların domino etkilerinin analizi üzerine sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Büyük endüstriyel kazaların domino etkileri ve analizinin bir organize sanayi bölgesinde uygulanması (Mutlu, 2020), büyük endüstriyel kazaların domino etkilerini modelleme, önleme ve yönetme (Çakır, 2020) ile bir büyük endüstriyel kimyasal depolama tesisinde domino etkili kaza oluşumu ve sonuçlarının kelebek diyagramı yöntemi (BST) ve ALOHA yazılımı kullanılarak incelenmesi (Olgun, 2020), konularında çalışmalar yürütülmüştür. Bu tez çalışmasında, endüstriyel kuruluşlarda domino etkilerinin kantitatif risk analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Bayes ağları üzerinden kimyasal kuruluşlarda muhtemel domino senaryosu üretilerek yeni bir risk analiz metodolojisi geliştirilmiştir. Metodolojinin saha uygulaması da yapılmıştır.

2. ÇALIŞMA KONUSU VE KAPSAMI

2.1. Domino Etkilerinin Tanımı, Karakteristiği, Sınıflandırılması

2.1.1. Domino Etkilerinin Tanımı

Endüstriyel kaza, tehlikeli madde içeren bir kuruluşun işletilmesi esnasında, kontrolsüz gelişmelerden kaynaklanan ve kuruluş içinde veya dışında çok sayıda insan ve/veya doğal çevre sağlığı için anında veya daha sonra ciddi tehlikeye yol açabilen bir veya birden fazla tehlikeli maddenin sebep olduğu büyük bir yayılım, yangın veya patlama olayını ifade eder (BEKRA Yönetmeliği, 2019). Dünyada sanayileşmeyle birlikte geçmişten bugüne insan ve çevre sağlığını büyük ölçüde etkileyen birçok endüstriyel kaza yaşanmıştır. Bu kazaların en yıkıcı etkiye sahip olanları, birincil kazanın etkisini arttırarak birden fazla tesis birimi ve ekipmanı etkileyerek yayılmasına neden olan domino etkisinin meydana geldiği kazalardır (Chen ve ark., 2020). Domino etkili kaza; bir endüstride bir ünitede meydana gelen bir kaza sonucu oluşan yangın / patlama / şarapnel / zehirli yükün diğer ünitelerde ikincil ve üst düzey kazalara neden olduğu kazalar zinciri olarak tanımlanabilir (Khan ve Abbasi, 1998).

Eskalasyon (yükselme) ise, endüstriyel kazalar bağlamında, birincil bir olayın fiziksel etkilerinin başka bir birim, tesis veya sistem üzerinde zincirleme etki yaratarak ikincil ve daha yüksek düzeydeki olaylara neden olma sürecini ifade eder. Domino etkisi için çok sayıda tanımlama yapılmıştır. Bunlardan bazıları Çizelge 2.1' de listelenmiştir.

Çizelge 2.1. Domino etkisi için bazı tanımlamalar

Kaynak	Tanım
Council Directive 96/82/EC	Tesislerin büyük kazaların gerçekleşme olasılığını artıracak veya sonuçlarını ağırlaştıracak şekilde veya birbirine çok yakın yerleştirilmesi
Khan ve Abbasi, 1998	Bir birimdeki kazanın bir veya daha fazla başka birimde kazaya neden olması
Reniers, Dullaert, Ale ve Soudan, 2005	Bir önceki kazanın sonuçlarının, zamansal olduğu kadar mekânsal olarak da takip eden kaza(lar) tarafından artırılarak büyük bir kazaya yol açtığı olaylar dizisi

Çizelge 2.1. (devam) Domino etkisi için bazı tanımlamalar

Khan ve Abbasi, 1998	Bir endüstride bir ünitede meydana gelen bir kazanın yarattığı yangın / patlama / şarapnel / zehirli yükün diğer ünitelerde ikincil ve daha yüksek dereceli kazalara neden olduğu kazalar zinciri
Darbra, Palacios ve Casal, 2010	Nispeten küçük bir kazanın, çok daha geniş bir alanda hasara neden olan ve çok daha ciddi sonuçlara yol açan bir dizi olayı başlatması
Abdolhamidzadeh, Abbasi, Rashtchian ve Abbasi, 2011	Bir proses ünitesindeki sızıntı kazasının, bir veya daha fazla diğer proses ünitesindeki bir veya daha fazla bütünlük kaybını tetiklemesi
Reniers ve Cozzani, 2013	Birincil kasıtsız veya kasıtlı olayın, bir ekipman içinde ('zamansal') ve/veya yakındaki ekipmana ('mekansal'), sırayla veya eşzamanlı olarak yayılarak bir veya daha fazla ikincil istenmeyen olayı tetiklemesi, bu olayların da muhtemelen daha üst düzey istenmeyen olayları tetikleyerek birincil olayın sonuçlarından daha ağır sonuçlara yol açması

2.1.2. Domino etkilerinin karakteristiği

Domino etkisi birbirinden farklı ve çeşitli kaynak sebeplerle ilişkilidir. Bu kaynak sebepler şu şekilde sınıflandırılır (Kadri ve Chatelet, 2014):

i. Doğal kaynaklı:

Meteorolojik kaynaklı: orman yangınları, taşkın (toprak tarafından emilmemiş yüzey suyu) ve seller, çığlar, kasırgalar ve fırtınalar;

Jeolojik kaynaklı: toprak kayması ve depremler, tsunamiler, volkanik patlamalar ve diğer doğal emisyonlar (gaz vb.).

ii. İnsandan kaynaklı:

Organizasyonel: İnsan hatası (hatalı insan eylemi, insan eyleminin eksikliği), tasarım, prosedürler ve/veya organizasyon;

Kötü niyet: Hırsızlık, sabotaj veya intikam eylemi.

ii. Teknolojik kaynaklı:

Yangın: havuz yangını, parlama yangını, ateş topu ve jet yangını;

Patlama: sınırlı buhar bulutu patlamaları (CVCE), kaynayan sıvı genleşen buhar patlaması (BLEVE), buhar bulutu patlaması (VCE), toz patlaması ve mekanik patlama;

Toksik salım: proses veya depolama alanlarından ve taşımacılık kazalarından salım.

2.1.3. Domino etkilerinin sınıflandırılması

Domino etkileri farklı kriterlere göre çeşitli kategorilerde sınıflandırılabilir. Reniers tarafından yapılan araştırmayı takiben, domino etkileri Çizelge 2.2'te gösterildiği gibi sekiz farklı kritere göre ayrılmıştır (Reniers, 2010). Domino etkileri, domino etkilerinin zarar verdiği alana göre kuruluş dışı domino etkileri ve kuruluş içi domino etkileri olarak ikiye ayrılabilir. Kuruluş içi domino etkileri, kazanın meydana geldiği tesis sınırları içinde meydana gelen yükselme(eskalasyon) etkilerini ifade ederken, kuruluş dışı domino etkileri, tesis sınırları dışında yayılan yükselme etkileridir. Başka bir ifadeyle bir domino etkili kaza, birden fazla tesise zarar verirse ve birkaç tehlikeli senaryo içerirse, buna kuruluş dışı domino etkisi veya birleşik domino etkisi denilebilir (Chen, Reniers ve Yang, 2022).

Çizelge 2.2 Domino etkisinin sınıflandırılması (Chen ve ark., 2022)

Tip	Kategori	Tanımlama
1	Kasıtsız	Kazaların veya doğal afetlerin neden olduğu domino etkileri
	Kasıtlı	Kasıtlı saldırıların neden olduğu domino etkileri
2	Yangın Kaynaklı	Birincil olayın yangın olduğu domino etkileri
	Patlama Kaynaklı	Birincil olayın patlama olduğu domino etkileri
3	Kuruluş İçi	Domino olayını karakterize eden yükselme vektörünün başlangıcı ve sonu aynı kimyasal tesisin sınırları içinde yer alır
	Kuruluş Dışı	Domino olayını karakterize eden yükselme vektörünün başlangıcı ve sonu aynı kimyasal tesisin sınırları içinde yer almaz
4	Doğrudan	Domino olayları bir önceki domino olayının doğrudan sonucu olarak ortaya çıkar
	Dolaylı	Domino etkisi, önceki domino etkisinin dolaylı bir sonucu olarak meydana gelir, ancak öncekinden farklıdır.
5	Zamansal	Domino olayları bir önceki olayla aynı alanda, ancak gecikmeli olarak meydana gelir
	Mekânsal	Domino olayları bir önceki olayın gerçekleştiği alanın dışında meydana gelir
6	Seri	Domino olayları, bir önceki olayın neden olduğu tek kaza zincirinin sonuç halkası olarak ortaya çıkar
	Paralel	Domino olayları, bir önceki olayın neden olduğu kaza zincirlerinin eşzamanlı olarak birbirini takip eden birkaç halkasından biri olarak ortaya çıkar

Çizelge 2.2. (devam) Domino etkisinin sınıflandırılması (Chen ve ark., 2022)

7	Isı yayılımı kaynaklı	Isı yayılımının neden olduğu domino etkileri
	Aşırı basınç kaynaklı	Aşırı basıncın neden olduğu domino etkileri
	Parça etkisinden kaynaklı	Parça / şarapnel etkisinin neden olduğu domino etkileri
	Birleşik	Domino etkisinin gelişimi sırasında birden fazla türde yükselme vektörü bulunması
8	Birinci Seviye	En yüksek yayılım birinci seviyededir
	İkinci Seviye	En yüksek yayılım ikinci seviyededir
	N Seviye	En yüksek yayılım N'inci seviyededir

2.2. İlgili Mevzuat

2.2.1. Ulusal mevzuat – BEKRA Yönetmeliği

Türkiye'de tehlikeli maddelerin bulunduğu sanayi tesislerinde meydana gelebilecek büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve bu kazaların etkilerinin sınırlandırılması amacıyla uygulanan temel yasal düzenleme, "Büyük Endüstriyel Kazaların Kontrolü Hakkında Yönetmelik (BEKRA)"dır. 2 Mart 2019 tarihli ve 30702 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan yönetmelik, Avrupa Birliği'nin Seveso III Direktifi'ne uyumlu olarak hazırlanmıştır. Yönetmelik, yangın, patlama ve toksik yayılım gibi büyük kaza senaryolarının yanı sıra, özellikle domino etkisi gibi zincirleme kaza olasılıklarının da analiz edilmesini zorunlu kılar. Domino etkisi, bir birimde meydana gelen olayın, diğer birimleri tetikleyerek zincirleme sonuçlar doğurmasıdır. Bu kapsamda BEKRA, işletmecilerin yalnızca kendi tesis sınırları içindeki riskleri değil, komşu tesislerle olan etkileşimleri de değerlendirmesini şart koşar. Üst seviyeli kuruluşlar güvenlik raporlarında domino etkilerini içeren ayrıntılı risk analizleri yapmakla yükümlüdür; alt seviyeli kuruluşlar ise büyük kaza önleme politikası (BKÖP) belgelerinde bu tür potansiyel risklere yönelik önleyici tedbirleri belirtmelidir. Ayrıca, komşu kuruluşlarla bilgi paylaşımı yapılması, karşılıklı domino senaryolarının

değerlendirilmesi ve halkın bilgilendirilmesi de yönetmelik kapsamında zorunludur. Böylece BEKRA Yönetmeliği, tesis içi güvenliğin ötesine geçerek çevresel ve toplumsal risk yönetimini bütüncül şekilde ele almaktadır.

2.2.2. Seveso III Direktifi (2012/18/EU)

Avrupa Birliği'nin büyük endüstriyel kazalara karşı oluşturduğu temel yasal düzenleme, Seveso III Direktifi (2012/18/EU)'dir. Bu direktif, 1976 yılında İtalya'nın Seveso kentinde gerçekleşen ve geniş çevresel etkiler doğuran dioksin sızıntısı sonrası oluşturulan Seveso Direktifleri serisinin üçüncü ve güncel versiyonudur. Direktifin temel amacı, tehlikeli kimyasallarla çalışan sanayi tesislerinde meydana gelebilecek büyük kazaların önlenmesi ve bu kazaların insan sağlığı, çevre ve mülkiyet üzerindeki etkilerinin sınırlandırılmasıdır. Seveso III, tesisleri bulundurdukları tehlikeli madde miktarına göre alt ve üst seviyeli olarak sınıflandırmakta; her iki grup için farklı güvenlik yükümlülükleri belirlemektedir. Direktif, domino etkisini açıkça tanımlamakta ve tesislerin yalnızca iç risklerini değil, diğer kuruluşlarla olan mekânsal etkileşimleri de değerlendirmesini zorunlu kılmaktadır. Komşu tesisler arasında risk iletişimi ve koordinasyon, bu bağlamda önemli bir yükümlülük haline gelmektedir. Ayrıca Seveso III, acil durum planlaması, halkın bilgilendirilmesi, imar planlamasıyla entegrasyon ve periyodik denetimler gibi konuları da kapsayan kapsamlı bir güvenlik yaklaşımı sunmaktadır. Seveso III, yalnızca teknik riskleri değil, aynı zamanda yönetsel ve toplumsal boyutları da içeren çok disiplinli bir çerçeve sunarak üye ülkeler için bağlayıcı nitelikte hükümler içermektedir.

2.3. Tesislerin Zarar Görebilirliğinin Değerlendirilmesi

Zarar görebilirlik (güvenlik açığı) değerlendirmesi, emniyet ve güvenlik risk değerlendirmesi için kritik olan istenmeyen bir olaya maruz kalan bir varlığın veya bir insanın zarar olasılığını tahmin etmek için güvenilir modeller sağlayabilir. Domino etkileri için bu değerlendirme, tesisin yükselme vektörünün etkisiyle olan arızaya dayanması konusundaki yetersizliğini belirlemek içindir. Oluşturulan yükseltme vektörleri tehlikeli kuruluşların başarısız olmasına yol açtığında bir kaza senaryosu elde edilir. Sonuç olarak, potansiyel basamaklı etkilerin artmasını değerlendirmek için bir güvenlik açığı değerlendirmesi gereklidir. Literatürdeki güvenlik açığı değerlendirme yöntemleri üç kategoriye ayrılabilir: deterministik yöntemler, olasılık yöntemleri ve CFD/FEM yöntemleri.

2.3.1. Deterministik yöntemler

Yayılma eşiklerine dayalı deterministik yöntemler, tehlikeli senaryolara maruz kalan kuruluşların başarısızlığını değerlendirmek için en eski güvenlik açığı analizi yaklaşımlarıdır. Eşik değerler, deneyler ve kaza analizleri ile elde edilebilir (Moodie, 1988) Yükselme eşiği, yayılmaya neden olabilecek fiziksel etkilerin minimum yoğunluğunu temsil eder ve temel kurallar geliştirmek için veya olası yükselme senaryolarının ön değerlendirmesi için bir tarama aracı olarak kullanılabilir (Reniers ve Cozzani, 2013:178). Yayılma olaylarını önlemek için iki tehlikeli kuruluş arasındaki gerekli minimum mesafe genellikle güvenlik mesafesi veya etki mesafesi olarak adlandırılır (Necci ve ark., 2015; Reniers ve Dullaert, 2007) Çizelge 2.3'te yükseltme vektörlerinin yükseltme eşikleri ve farklı ekipmanlar için kuruluşlar arasındaki güvenlik mesafeleri listelenmiştir.

Yükseltme eşikleri, sonuç analizi ile güvenlik mesafelerine aktarılabilir (Van Den Bosh ve Weterings, 1997). Yükselme eşikleri ve güvenlik mesafelerine göre, yükselme belirsizlikleri dikkate alınmadan domino etkileri kolayca değerlendirilebilir. Kuruluşların güvenlik açığı, yükseltme vektörlerinin karmaşıklığına ve hedef kuruluşların özelliklerine bağlıdır. Özel bir koşuldan elde edilen bir eşik değer diğer koşullar için uygun olmayabileceğinden, domino etkisinin artmasında pek çok belirsizlik mevcuttur. Sonuç olarak literatürde ve teknik belgelerde domino etkisi değerlendirmesi için farklı veya çelişkili eşik değerler gözlemlenebilmektedir (Bagster ve Pitblado, 1991). Örneğin, Avrupa ülkelerinde büyük kaza tehlikelerini değerlendirmeye yönelik uyumlaştırılmış bir yaklaşımın olmaması nedeniyle, önerilen eşik değerleri ve güvenlik mesafeleri, AB'deki farklı ülkeler arasında bir büyüklük sırasını aşmaktadır (Alileche ve ark., 2015). Ayrıca, tehlikeli senaryoların sonuç analizi sonuçlarının yükselme eşik değerleri ile karşılaştırılmasıyla elde edilen güvenlik mesafesi tutarlı olmayabilir.

Çizelge 2.3. Yükseltme vektörlerinin yükseltme eşikleri ve farklı ekipmanlar için kuruluşlar arasındaki güvenlik mesafeleri (Alileche ve ark., 2015)

Senaryo	Eskalasyon (yükselme) Vektörü	Yaklaşım	Hedef kategori	Yükselme eşiği	Güvenlik mesafesi
Parlama yangını	Termal radyasyon	Alev çarpması	Yüzer tavanlı tanklar	Alev yüksekliği	Maksimum alev yüksekliği
			Diğer tüm ekipmanlar	Yükselme olası değil	-
Ateş topu	Termal radyasyon	Alevle sarılma/kaplanma	Atmosferik	H > 100 kW/m^2	Maksimum alev yüksekliği
			Basınçlı	Yükselme olası değil	-
		Uzak mesafede termal radyasyon	Atmosferik	H > 100 kW/m^2	Maksimum alev yüksekliği
			Basınçlı	Yükselme olası değil	-
Jet yangını	Termal radyasyon	Alev çarpması	Tüm ekipmanlar	Alev yüksekliği	-
		Sabit termal radyasyon	Atmosferik	H > 15 kW/m^2	Alev sınırından 50 m mesafede
			Basınçlı	H > 45 kW/m^2	Alev sınırından 25 m mesafede
Havuz yangını	Termal radyasyon	Alevle sarılma/kaplanma	Tümü	Alev sınırı	
		Sabit termal radyasyon	Atmosferik	H > 15 kW/m^2	Alev sınırından 50 m mesafede
			Basınçlı	H > 45 kW/m^2	Alev sınırından 25 m mesafede
Buhar Bulutu Patlaması(VCE)	Aşırı basınç	Patlama dalgası etkileşimi	Atmosferik	Ps > 22 kPa	R= 1,75
					(ME); 1,50 (BS)
			Basınçlı	Ps>20kPa	R = 2,10
					(ME); 1,80 (BS)
			Elongated-ince uzun (toksik)	Ps>20kPa	R = 2,10
					(ME); 1,80 (BS)
			İnce uzun (yanıcı)	Ps > 31 kPa	R= 1,35
					(ME); 0,85 (BS)
	Termal radyasyon	Alev çarpması	Yüzer tavanlı tanklar	Alev yüksekliği	Maksimum alev yüksekliği
			Diğer tüm ekipmanlar	Yükselme olası değil	-

Çizelge 2.3. (devam) Yükseltme vektörlerinin yükseltme eşikleri ve farklı ekipmanlar için kuruluşlar arasındaki güvenlik mesafeleri (Alileche ve ark., 2015)

Senaryo	Eskalasyon (yükselme) Vektörü	Yaklaşım	Hedef kategori	Yükselme eşiği	Güvenlik mesafesi
Kapalı alan patlaması	Aşırı basınç	Patlama dalgası etkileşimi	Atmosferik	Ps > 22 kPa	Havalandırmaya 20 m mesafede
			Basınçlı	Ps>20kPa	Havalandırmaya 20 m mesafede
			İnce uzun (toksik)	Ps>20kPa	Havalandırmaya 20 m mesafede
			İnce uzun(yanıcı)	Ps>31kPa	Havalandırmaya 20 m mesafede
Mekanik patlama	Aşırı basınç	Patlama dalgası etkileşimi	Atmosferik	Ps > 22 kPa	R = 1,80
			Basınçlı	Ps > 20kPa	R=2,00
			İnce uzun (toksik)	Ps>20kPa	R=2,00
			İnce uzun (yanıcı)	Ps>31kPa	R = 1,20
	Şarapnel etki		Tüm ekipmanlar	Parça etkisi	300 m (p< 0.05)
BLEVE	Aşırı basınç	Patlama dalgası etkileşimi	Atmosferik	Ps > 22 kPa	R = 1,80
			Basınçlı	Ps>20kPa	R = 2,00
			İnce uzun (toksik)	Ps>20kPa	R=2,00
			İnce uzun (yanıcı)	Ps>31kPa	R = 1,20
	Şarapnel etki		Tüm ekipmanlar	Parça etkisi	300 m (p < 5%)
Nokta-kaynak patlaması		Patlama dalgası etkileşimi	Atmosferik	Ps > 22 kPa	-
			Basınçlı	Ps>20kPa	-
			İnce uzun (toksik)	Ps>20kPa	-
			İnce uzun (yanıcı)	Ps>31kPa	-

H: Isı radyasyon yoğunluğu PS: Statik pik aşırı basınç R: Enerji ölçekli mesafe ME: Çoklu Enerji yöntemi BS: Baker-Sthrelow yöntemi; p: Olasılık

2.3.2. Olasılık yöntemleri

Yükselme belirsizliklerini modellemek ve domino etkilerinin kantitatif risk analizini (QRA-Quantitative risk assessment) desteklemek için, tesislerin kırılganlığını değerlendirmek üzere olasılıksal yöntemler geliştirilmiştir. Olasılık teorisine göre, bir yükselme vektörüne maruz kalan bir tesisin kırılganlığı probit fonksiyonu ve normal dağılım gibi bir dağılım fonksiyonu ile modellenebilir. Probit analizi, Eşitlik 2.1'de gösterildiği gibi, toksik maddelere, termal radyasyona ve aşırı basınca karşı insan tepkileri için doz-etki ilişkisini değerlendirmede iyi bilinen bir yöntemdir (Lees, 2012).

$$Y = a + b\ ln(D) \tag{2.1}$$

D "dozu", Y ise "yanıtı" temsil eden probit değeridir. a ve b, doz ve yanıtın türüne bağlı olarak sabit parametrelerdir. Y, toksik maddelere maruz kalan insanların savunmasızlığını karakterize eder. Daha sonra ölüm veya yaralanma olasılığı, Eşitlik 2.2'de gösterildiği gibi kümülatif standart normal dağılım kullanılarak elde edilebilir (Cozzani ve ark., 2005).

$$P_r = \Phi\ (Y - 5) \tag{2.2}$$

Φ kümülatif standart normal dağılımın bir fonksiyonu, Pr ise ölüm veya yaralanma olasılığıdır. Olasılık modeli (Eşitlik 1 ve 2) domino etkilerinde en yaygın yükselme vektörlerine maruz kalan tesislerin kırılganlığını değerlendirmek için de genişletilebilir: aşırı basınç, termal radyasyon ve parçalar.

Aşırı basınç

Aşırı basınç ve parçalar, patlamaların neden olduğu iki başlıca yükselme vektörüdür. Bagster ve Pitblado (1991), birincil senaryonun merkezinden uzaklığa ve güvenlik mesafesine dayalı bir hasar olasılık fonksiyonu tanımlayan bir olasılık yaklaşımı önermiştir. Khan ve Abbasi (1998), aşırı basıncın neden olduğu hasar olasılığını modellemek için pik aşırı basıncı (statik basınç) ve dinamik basıncı dikkate alan bir probit fonksiyonu yaklaşımı benimsemiştir. Aşırı basınç için probit fonksiyonu, Eşitlik 2.1'deki doz “D” yerine aşırı basınç kullanılarak elde edilir. Ancak, aşırı basınca maruz kalan tüm ekipmanların savunmasızlığını değerlendirmek için genel bir probit modeli kullanılması büyük sapmalara neden olabilir. Bu nedenle,

Cozzani ve Salzano (2004), probit modelinin performansını artırmak için her tür ekipmana özel ayrı bir probit modeli geliştirmiştir. Ekipmanlar dört kategoriye ayrılmıştır: atmosferik, basınçlı, uzunlamasına ve küçük. Ekipmana özel modeller, genel probit modelinin neden olduğu hataları önemli ölçüde azaltarak farklı ekipman kategorilerinin hasar olasılıkları ve hasar eşik değerleri arasında önemli bir fark sunmaktadır. Probit modellerinin regresyon hatalarını azaltmak için, ekipmana özel modeller, hasarın kapsamını ayırt ederek ve her tür hasar için probit değeri ile gözlemlenen eşik değerler arasında doğrusal bir ilişki atayarak geliştirilmiştir (Zhang ve Jiang, 2008). Gözlemlenen veriler ile tahmin edilen veriler arasındaki hataları azaltan bir dizi daha doğru model elde edilmiştir. Ayrıca, Mukhim ve arkadaşları (2017), Zhang ve Jiang (2008), ikilisinin çalışmalarını daha da geliştirerek ekipmanları 11 kategoriye ayırmış ve her ekipman kategorisi için bir probit modeli oluşturmuştur. Bu aşırı basınca yönelik savunmasızlık modelleri, patlayıcılara maruz kalan tesislerin savunmasızlık değerlendirmesi için de uygulanabilir (Landucci ve ark. 2015). Bunun ötesinde, probit modelleri, patlama dalgalarının neden olduğu güvenlik mesafelerini ve ölçeklenmiş mesafenin bir fonksiyonu olarak hasar olasılığını tahmin etmede pik aşırı basınç için basitleştirilmiş hesaplama modelleriyle birleştirilmiştir. Ayrıca, Salzano ve Cozzani (2006), aşırı basınç dalgasının proses ekipmanıyla etkileşimi sonucunda oluşan bütünlük kaybı yoğunluğunu bulanık küme analizi kullanarak incelemiştir. Bu analiz, ikinci seviye büyüme değerlendirmesi için kullanılabilir. Aşırı basıncın neden olduğu büyüme belirsizliklerini ele alabilmesine rağmen, bu probit modelleri, ekipman duvar kalınlığı ve malzemesi gibi savunmasızlık üzerinde önemli etkileri olan bazı önemli parametreleri göz ardı etmektedir.

Parçalar

Parçalar ve şarapnel tehlikeleri BLEVE, fiziksel patlamalar, kapalı patlamalar ve kaçak reaksiyonlar gibi çeşitli kaza senaryolarından kaynaklanabilir. Bu kaza senaryoları arasında BLEVE, parça fırlamasını içeren endüstriyel kazaların çoğundan sorumludur ve genellikle ciddi sonuçlara yol açar (Tugnoli, Gubinelli, Landucci ve Cozzani, 2014). Gubinelli, Zanelli ve Cozzani (2004), parçaların neden olduğu hasar olasılığını değerlendirmek için olay sırasına göre olasılıksal bir model önermiştir. Modelde, parçaların neden olduğu hasar süreci dört bağımsız olaya bölünmekte ve hasar olasılığı her bir olayın olasılığının çarpılmasıyla elde edilebilmektedir:

$$f_{d,F} = f_p \times P_{gen,F} \times P_{imp,F} \times P_{dam,F} \quad (2.3)$$

$f_{d,F}$ bir F parçasının neden olduğu hasar olasılığını; f p birincil olay olasılığını; $P_{gen,F}$ parçanın birincil olayda oluşma olasılığını; $P_{imp,F}$ parça ile bir hedef arasındaki çarpma olasılığını; $P_{dam,F}$ parçayla çarpışma durumunda hedef hasar olasılığını temsil eder. Sonuç olarak, toplam hasar olasılığı her bir parçanın neden olduğu olasılığın toplamı olarak temsil edilebilir (Gubinelli ve ark., 2004). Bu model, bir tesisatta birden fazla parçanın neden olduğu eşzamanlı hasarlar göz ardı edilirken, sıralı olayların (bağımsız olaylar olarak kabul edildiğinde) olasılığının parçaların neden olduğu bir tesisin hasarı üzerindeki etkisini karakterize eder. Ayrıca, sıralı olaylar arasındaki bağımlılıklar da dikkate alınmamaktadır. Şarapnel parçalar, olası büyük etki mesafeleri nedeniyle birincil senaryodan ilgili mesafelerde ikincil kazalar oluşturabilir. Şarapnel parçalarla ilişkili tehlikeler parça sayısı, parça kütlesi ve hız ile ilgilidir. Parçalara maruz kalan tesislerin kırılganlığını değerlendirmek için genellikle izlenen adımlar: (i) patlama enerjisinin hesaplanması, (ii) parça sayısının tahmini, (iii) başlangıç hızının hesaplanması, (iv) kalkış açısının hesaplanması ve (v) yörüngenin hesaplanması (Hauptmanns, 2001). Başlangıç hızını ve kalkış açısını doğru bir şekilde elde etmek çok zor olduğundan, literatürde parçalar için eşik değerler nadirdir. Olasılık hesaplamasının karmaşıklığını azaltmak ve daha fazla belirsizliği dikkate almak için, Monte Carlo simülasyonu ve olasılık yoğunluk fonksiyonları her zaman parça projeksiyonunun hasar sürecini simüle etmek için kullanılır (Tugnoli ve ark., 2004; Hauptmanns, 2001). Zhang ve Chen (2009), patlama anını politropik bir süreç olarak ele alarak ve enerji dönüşüm denklemini çözerek parçaların ilk izdüşüm hızı için bir formül türetmiştir.

Termal radyasyon

Bir patlamanın neden olduğu hasardan farklı olarak, yangının hasar mekanizması dinamik bir süreçtir. Termal radyasyona maruz kalan tesisler hemen arızalanmaz. Zaman geçtikçe, kap içinde sıcaklık / basınç oluşması nedeniyle maruz kalan kapların kırılganlığı artar. Kap, bütünlük kaybı ortaya çıktığında arızalanır. Yangının başlaması ile hedef ekipmanın arızalanması arasındaki gecikme süresi "arızaya kadar geçen süre" (ttf-time to failure) olarak adlandırılır (Moodie, 1988). Arızaya kadar geçen süre kavramı, birinci seviye domino etkilerini değerlendirmek için türetilmiştir ve daha yüksek seviyeli yükselmelerde zaman atlamasını ihmal eder. Bunu daha üst düzey yayılmalara uygulamak için Chen ve arkadaşları

(2019), tarafından "arızaya kalan süre" kavramı önerilmiştir. Bir kabın kırılganlığı, daha yüksek seviyeli yayılımlarda alınan termal radyasyonu değiştiğinde arızaya kalan süre güncellenerek dinamik olarak değerlendirilebilir. Özel bir endüstriyel alan açısından, daha doğru sonuçlar elde etmek için iki varsayım ayarlanabilir. Bu nedenle, acil durum müdahalesi, termal radyasyonu yoğunluğunun (eşik) yanı sıra tesislerin kırılganlığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, Landucci ve arkadaşları (2009), ampirik formüllerle elde edilen ttf'ye dayalı olarak yangına maruz kalan depolama tanklarının hasar olasılığını tahmin etmek için bir probit modeli geliştirmiştir. Probit modeli üç varsayıma dayanmaktadır: (i) ttf = 5 dakika için %10 arıza olasılığı, ki bu süre sahada acil müdahale operasyonlarının başlatılması için gereken minimum süreye eşittir; (ii) ttf = 20 dakika için %90 başarısızlık olasılığı, bu da azaltma eylemlerini başlatmak için gereken minimum süreye eşittir. Chen ve arkadaşları (2018), bu çalışmayı daha üst düzey yayılımlarda "probit model" yaklaşımının sınırlamasını aşmak için genişletmiş ve acil durum müdahalesinin belirsizliğini normal bir dağılım kullanarak modellemiştir.

2.3.3. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği / sonlu elemanlar yöntemleri

Son yıllarda, fiziksel etki simülasyonundaki güçleri nedeniyle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD- Computational fluid dynamics) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM- Finite element method) gibi gelişmiş sayısal yöntemlere daha fazla dikkat edilmektedir. Bu gelişmiş yöntemlerin, üç boyutlu havuz yangını ve buhar bulutu dağılımı gibi karmaşık kaza senaryolarının değerlendirilmesini desteklemek için umut verici bir araç olduğu düşünülmektedir (Rum ve ark., 2018). Landucci ve ark. (2009), ticari bir FEM kodu kullanarak yangına maruz kalan depolama tanklarının arızasını modellemiştir. FEM modeli, termal radyasyonu, duvar sıcaklığı ve stres gibi termal radyasyon altındaki kap kabuklarının / duvarlarının termal ve mekanik parametrelerini simüle edebilir. Bir depolama kabının, birleşik gerilimin eşdeğer yoğunluğu izin verilen maksimum gerilmeden daha büyük olduğunda başarısız olduğu varsayılır. Bu çalışma, tankların pasif yangın koruması için önerilen farklı malzemelerin performansını modellemek için genişletilmiştir (Landucci, Molag, Cozzani, 2009). Jujuly ve ark. (2015), ANSYS CFX kullanarak sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) havuzu yangınının üç boyutlu bir CFD simülasyonunu geliştirmiştir. Bu çalışmada, depolama tanklarının arızasını belirlemek için kabuk sıcaklığı ve termal radyasyon eşikleri kullanılmıştır. Sonuçlar, rüzgâr hızının bir havuz yangınının davranışına ve buna eşlik eden olası domino etkilerine önemli bir katkısı olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, yangına maruz kalan LPG tanklarındaki ısı transferi ve basınç oluşumunu modellemek için ANSYS FLUENT de kullanılmıştır (Rum ve ark., 2018). Gexcon AS tarafından geliştirilen FLACS yazılımı da yanıcı bulut dağılımını ve VCE patlamasını modellemek için kullanılmış ve domino etkisi değerlendirmesini desteklemiştir (Dasgotra, Varun Teja, Sharma ve Mishra, 2018). Bu çalışmalar, gelişmiş simülasyon araçlarının kullanılmasının, yangına maruz kalan kapların arıza koşullarının daha kesin bir değerlendirmesini elde edebileceğini ve böylece yangına maruz kalan proses ekipmanı için güvenlik açığı modellerinin geliştirilmesini destekleyebileceğini göstermektedir. Yakın zamanda, bir tank çiftliğindeki tank ve set havuzu yangınlarını simüle etmek için Yangın Dinamikleri Simülatörü (FDS- Fire Dynamics Simulator) kullanılmıştır (Ahmadi ve ark,, 2019). CFD simülasyonu, fiziksel etkilerin daha doğru sonuçlarını elde edebilir ve böylece yükselme vektörlerine maruz kalan tesislerin güvenlik açığı değerlendirmesini kolaylaştırabilir, ancak çok karmaşık, zaman alıcı ve maliyetlidir (Assael ve Kakosimos, 2010:77). Bilgisayar bilimlerinin hızla gelişmesiyle birlikte, güvenlik açığı değerlendirmesinde CFD yöntemlerinin uygulanması gelecekte araştırmacılar ve mühendisler için daha erişilebilir ve kabul edilebilir hale gelebilir.

2.4. Domino Etkilerinin Güvenlik ve Emniyetinin Yönetimi

Kimya ve proses endüstrisinde emniyet ve güvenlik yönetimi, bir prosesin tehlikesini, kaza olasılığını ve sonuçlarını azaltır. Bu amaçla çok çeşitli stratejiler, teknikler, prosedürler, politikalar ve sistemler kullanılmaktadır.

Domino etkileri hem kasıtlı hem de kasıtsız olaylar tarafından tetiklenebildiğinden, Reniers ve ark. (2008), domino etkisi yönetimi için hem güvenliğin hem de emniyetin önemli olduğunu kabul etmiştir. Bu nedenle, olası kasıtlı domino etkilerini ve kasıtsız domino etkilerini önlemek veya azaltmak için çok çeşitli emniyet ve güvenlik önlemlerine ihtiyaç vardır (Bollinger ve Crowl, 1997).

Potansiyel kazaların sıklığını veya sonuçlarını azaltmak amacıyla risk azaltma stratejileri dört ana kategoriye ayrılmıştır (Bollinger ve Crowl, 1997:13):

- Öz güvenlik,
- Güvenlik bariyeri yönetimi,

- İşbirlikçi önleme stratejileri ve
- Kasıtlı domino etkileri için güvenlik stratejileri.

2.4.1. Öz güvenlik

Öz güvenlik indeksleri

Öz güvenlik, etkilerini hafifletmeye çalışarak tehlikeyi kabul etmek yerine tehlikeyi kaynağında ortadan kaldırmayı amaçlar. Öz güvenlik, en çok dikkat çeken pratik ve anlaşılır bir yaklaşımdır. Kletz (2003), beş öz güvenlik ilkesi önermiştir:

- Azaltma / minimizasyon (O kadar az tehlikeli madde kullanılır ki, hepsi dışarı sızsa bile önemli bir risk olmaz.),
- İkame (daha az tehlikeli malzeme veya bir kaza senaryosuna dönüşme olasılığı daha düşük olan bir proses kullanmak),
- Zayıflatma yoluyla ılımlılık (Tehlikeli maddeyi en az tehlikeli biçimde kullanmak (en az tehlikeli durumda)),
- Basitleştirme (daha az arızalanabilecek daha az ekipman sağlayan daha basit tesislerin kullanılması) ve
- Etkilerin sınırlandırılmasıyla ılımlılık (Şiddetli etki olasılığını sınırlamak için yinelenen veya ayrı süreçler, kritik faaliyetler, kuruluşlar).

Bazı ilkelerin pratikte uygulanması zor olabilir ve bu ilkelerin tümü domino etkisi yönetiminde kullanılamaz. Bu ilkeler, bir değerlendirmede dikkate alınmaları halinde, yükselmenin önlenmesine yönelik öz güvenlik önlemlerini belirlemek için her zaman kullanılabilir. Öz güvenlik stratejileri, kazanın başlamasını önleyebilir, potansiyel domino etkilerini azaltabilir veya kaza dizisini sonlandırabilir.

Yerleşim optimizasyonu

Yerleşim optimizasyonu, domino etkisi zincirleme reaksiyonlarını önlemek ve riskleri minimize etmek için kritik bir stratejidir.

Güvenlik alanlarının belirlenmesi: Tehlikeli maddeler ve işlemler, diğer ekipman ve personelden güvenli bir mesafede tutulur. Bu, bir kazanın diğer alanlara yayılma riskini azaltır.

Fiziksel bariyerler: Patlamalar veya yangınlar gibi olayların yayılmasını önlemek için güvenlik duvarları ve fiziksel bariyerler kullanılır. Bu, domino etkisini sınırlamak için önemli bir stratejidir.

Risk analizi ve simülasyonlar: Olası kazaların ve zincirleme reaksiyonların modellenmesi ve simülasyonu, potansiyel riskleri belirlemeye ve yerleşim düzenlemelerini optimize etmeye yardımcı olur.

Proses ayrımı: Yüksek riskli proseslerin düşük riskli proseslerden ayrı tutulması, bir olayın diğerini etkileme olasılığını azaltır. Bu, üretim hattındaki bağımlılıkları minimize eder.

Acil durum yolları ve tahliye planları: Tehlike anında çalışanların hızlı ve güvenli bir şekilde tahliye edilebileceği yolların ve planların oluşturulmasıdır. Bu, domino etkisinin insan kaynaklı zararlarını minimize eder.

Bu stratejilerin tamamı, literatürde domino etkilerinin önlenmesi için önerilen yerleşim tabanlı güvenlik yaklaşımlarıyla uyumludur (Reniers ve Cozzani, 2013; Jung ve ark., 2011)

Yerleşim optimizasyonunun domino etkisine karşı faydaları aşağıda sıralanmıştır (Reniers ve Cozzani, 2013; Jung ve ark., 2011):

- Kaza Yayılımını Azaltma: Olası bir kazanın veya arızanın diğer alanlara yayılmasını önleyerek domino etkisini sınırlar.
- Operasyonel Süreklilik: Olası kazaların üretim sürecini kesintiye uğratmasını önleyerek operasyonel sürekliliği sağlar.
- İş Güvenliğini Artırma: Çalışanların güvenliğini artırarak, iş kazalarını ve yaralanmaları azaltır.
- Maliyet Kontrolü: Kazaların yayılmasını ve büyük çaplı zararları önleyerek maliyetleri kontrol altında tutar.

Lee ve diğerleri (2005), yangın, aşırı basınç ve parçalar nedeniyle oluşabilecek yükselme etkilerini dikkate alarak patlayıcı tesislerin dağılımını optimize etmek için doğrusal olmayan bir program önermiştir. Optimizasyon, farklı birincil senaryoların olasılık farklarını göz ardı ederek, farklı yükselme senaryolarının neden olduğu toplam yükselme olasılıklarını en aza indirebilir. Geliştirilen bilgisayar destekli modül (MiniFFECT), tehlikeli tesisleri sınırlı bir araziye sıralı olarak yerleştirir (Lee ve ark., 2006). Bu optimizasyon yaklaşımı, farklı yükselme senaryolarının toplam ağırlıklı sonuçlarını en aza indirecek şekilde daha da geliştirilmiştir (So ve ark., 2011). Ayrıca, araştırma boru hattı bağlantı maliyeti, koruma maliyeti ve arazi kullanım maliyeti dahil olmak üzere toplam inşaat maliyetlerini en aza indirmek için de uygulanabilir hale getirilmiştir (Dan ve ark., 2015).

Jung ve ark. (2011), tesis yerleşimi ve düzeni karar verme süreci için karışık tam sayılı doğrusal olmayan program (MINLP) kullanarak bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmiştir. MINLP, sürekli ve ayrık değişkenlerle ve nesnel işlevde ve/veya kısıtlamalarda doğrusal olmayan fonksiyonlarla optimizasyon problemleri için yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır. Bu çalışma, arazi maliyetleri, tesisler arası bağlantı maliyetleri ve aşırı basınçlardan kaynaklanabilecek olası yapısal hasar risk maliyetleri dahil olmak üzere toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Optimizasyon sonuçları, yeni tesislerin güvenli ve ekonomik olarak konumlandırılmasını belirlemek için kullanılabilir. Probit modelleri ve sonuç indekslerine dayanarak, MINLP yaklaşımı ayrıca kimyasal tesis yerleşimini optimize etmek ve domino etkilerini azaltmak için kullanılmıştır (de Lira-Flores ve ark., 2014). Ayrıca, Latifi ve arkadaşları (2017), zehirli salım, yangın, patlama ve bunların neden olduğu olası domino etkileri gibi büyük kazaları dikkate alarak proses tesisi yerleşimini optimize etmek için bir MINLP formülasyonu önermiştir.

Bernechea ve Arnaldos (2014), içsel güvenlik tasarımı ve nicel risk değerlendirmesine (QRA) dayalı olarak depolama tesislerinin tasarımını optimize etmek için çok amaçlı bir optimizasyon yöntemi önermiştir. Çok amaçlı optimizasyon, farklı kısıtlamalara tabi olan iki veya daha fazla hedefin aynı anda optimize edildiği bir karar verme aracıdır. Sonuç olarak, domino etkisi yönetimi ile yatırım maliyetlerinin azaltılması arasındaki çatışmayı dengelemek için kullanılabilir (Bernechea ve Arnaldos, 2014). Nomen ve arkadaşları (2014), QRA sonuçlarına dayalı bir tesis yerleşim tasarımı yöntemi önermiştir. Bu yaklaşımda, farklı QRA sonuçlarını karşılaştırmak için izorisk eğrileri içinde yer alan yüzey alanına dayalı basit bir kriter kullanılmıştır. Khakzad ve Reniers (2015), kimyasal tesis tasarımını desteklemek

için analitik hiyerarşik süreç (AHP- Analytic Hierarchy Process) kullanarak çok kriterli karar verme (MCDM- Multiple Criteria Decision Making) aracı geliştirmiştir. Bu çalışmada, bayes ağı, çeşitli tehlikeli tesisleri ve birden fazla kaza senaryosunu dikkate alarak yerleşim optimizasyonu için MCDA teknikleriyle birleştirilmiştir.

Envanter optimizasyonu

Tesis yerleşiminin yanı sıra, domino etkileri tehlikeli maddelerin dağılımına da bağlıdır. Tehlikeli maddelerin depolama süreleri ve miktarları azaltılarak olası kazaların etkileri minimize edilebilir. Ayrıca tehlikeli maddeler için özel olarak tasarlanmış depolama alanları kullanarak güvenlik artırılabilir. Ancak tehlikeli maddelerin toplam kütlesini azaltmak mümkün olmadığında, kimyasal envanterlerin dağılımının optimizasyonu pratik bir seçenektir. Khakzad, ve arkadaşları (2014), kimyasal tesis envanterini optimize etmek ve domino etkisi riskini en aza indirmek için DBN (Dynamic Bayesian network -Dinamik Bayes Ağları) tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Bu çalışma, sabit güvenlik mesafelerine sahip proses tesisleri için tehlikeli envanterlerin dağılımının optimizasyonunun önemli olduğunu göstermiştir.

2.4.2. Güvenlik bariyeri

Güvenlik bariyerlerinin yönetimi

Proses güvenliği yönetiminde pasif bariyerler, setler, yangın duvarları ve yangına dayanıklı kaplamalar gibi herhangi bir cihazın aktif işleyişine gerek duymadan tehlikenin sıklığını veya sonucunu azaltabilecek önlemleri ifade eder.

Aktif bariyerler, kontrol sistemleri, alarmlar, güvenlik enstrümantasyon sistemleri veya işlevleri ve su püskürtme sistemleri (WDS), acil durum kapatma sistemleri (ESD) ve acil basınç düşürme sistemleri (EDP) gibi hafifletme sistemlerini kullanarak normal operasyon dışındaki süreç sapmalarını algılayıp yanıt verebilecek önlemleri içerir (Chen ve ark., 2020; Chen ve ark., 2019). Domino etkileriyle ilgili güvenlik bariyerleri üzerine yapılan önceki çalışmalar üç kategoriye ayrılmıştır: bariyer performans değerlendirmesi, bariyer optimizasyonu ve acil durum müdahalesi.

Güvenlik bariyeri performansı

Bir güvenlik bariyerinin yükselmenin önlemesini sağlama performansı, bariyerin kullanılabilirliği ve etkinliğine bağlıdır. Kullanılabilirlik, güvenlik bariyerinin arızalanma olasılığının (PFD) tamamlayıcısını temsil eder ve etkinlik ise bariyerin etkinleştirildiğinde yükselme önlenmesinin olasılığını ifade eder. Landucci ve arkadaşları (2015), güvenlik bariyerlerinin performansını değerlendirmek için nicel bir yöntem önermiştir. Güvenlik bariyerlerinin PFD'sini nicel olarak değerlendirmek için bir hata ağacı kullanılmıştır. Güvenlik bariyerlerinin işlevini dikkate alarak domino etkilerini analiz etmek için ise bir olay ağacı kullanılmıştır. Farklı bariyerlerin performansı, nicel yöntem ile anahtar performans göstergesi analizi birleştirilerek elde edilebilir (Landucci ve ark., 2016). Çizelge 2.4. Kimya ve proses endüstrisinde yaygın olarak kullanılan güvenlik bariyerlerinin PFD değerlerini listeler.

Çizelge 2.4. Sık Kullanılan Güvenlik Bariyerlerinin PFD Değerleri (Chen ve ark., 2020)

Güvenlik Bariyeri	Tetikleme Türü	Oranlama Yöntemi	PFD
Köpük-su sprinkler sistemi	Pnömatik	Çevrim içi eğitim cihazı	$5{,}43 \times 10^{-3}$
		Ölçüm oranlama	$5{,}01 \times 10^{-3}$
		Bladder tank	$3{,}76 \times 10^{-3}$
	Elektrik	Çevrim içi eğitim cihazı	$5{,}39 \times 10^{-3}$
		Ölçüm oranlama	$4{,}96 \times 10^{-3}$
		Bladder tank	$3{,}72 \times 10^{-3}$
LPG kaplarının korunması için WDS	Pnömatik	-	$1{,}89 \times 10^{-2}$
	Elektrik	-	$4{,}33 \times 10^{-2}$
Yatay ayırıcı koruması için WDS	Pnömatik	-	$2{,}24 \times 10^{-2}$
Yatay ayırıcı koruması için WDS	Elektrik	-	$2{,}24 \times 10^{-2}$
ESD sistemi	-	-	$3{,}72 \times 10^{-4}$
Basınç Güvenlik Vanası (PSV)	-	-	$1{,}00 \times 10^{-2}$
Yangına dayanıklı kaplama	-	-	$1{,}00 \times 10^{-3}$
Acil müdahale	-	-	$1{,}00 \times 10^{-1}$

Güvenlik bariyerlerinin performansı büyük ölçüde dış faktörlere, örneğin sıcaklık, rüzgâr ve dalga yüksekliği gibi faktörlere bağlıdır. Sonuç olarak, zorlu çevresel etkiler güvenlik bariyerlerinin performansını ve acil durum kaynaklarının kullanılabilirliğini azaltabilir (Landucci ve ark., 2017). Zorlu çevreler, insanların çalışmasının ve ekipmanın normal çalışmasının zor olabileceği iklim koşullarını ifade eder (Khan ve ark., 2015). Örneğin, zorlu çevreler nedeniyle acil durum müdahale prosedürlerinin güvenilirliği azalabilir ve bu da yükselme kontrolünün gecikmesine ve optimal kurtarma süresine ulaşılmamasına neden olabilir.

Güvenlik bariyerlerinin optimizasyonu

Performans değerlendirmesi, yangına dayanıklı kaplamalar ve su serpme sistemleri (WDS) gibi yükselme etkilerini önlemek ve hafifletmek için etkili güvenlik bariyerlerini tanımlar. Ancak, bu güvenlik bariyerleri, güvenlik bütçesi nedeniyle bir kimya sanayi bölgesindeki tüm ekipmanlar için uygulanamayabilir. Bu nedenle, havuz yangını ve jet yangını nedeniyle oluşan domino etkilerini dikkate alarak, yerleşim tanımının başlangıç aşamalarında yangına dayanıklı bölgeleri belirlemek için risk tabanlı bir metodoloji geliştirilmiştir (Tugnoli ve ark., 2012). Bu çalışma, farklı bütünlük kaybı (LOC) senaryolarının ciddiyetini sıralamak için bir risk matrisi kullanılmıştır ve böylece referans senaryolar belirlenmiştir. Daha sonra, referans LOC'lara karşılık gelen alanlar çizilerek yangına dayanıklı bölgeler belirlenmiştir (Tugnoli ve ark., 2012). Ayrıca, Ghasemi ve Nourai (2017), depolama tanklarını harici, temassız bir yangından korumak için su uygulama oranını belirlemek amacıyla bir yaklaşım geliştirmiştir. Optimizasyon, bitişik tanklar arasındaki ayırma mesafesini azaltmak için su uygulama oranını hesaplayarak tank çiftlik alanında en az %25 tasarruf sağlayabilir.

Janssens ve arkadaşları (2015), olası yangın kaynaklı domino etkilerinin sonuçlarını hafifletmek için güvenlik bariyerlerini optimize etmek amacıyla bir optimizasyon yöntemi geliştirmiştir. Optimizasyon, sınırlı bir bütçe göz önünde bulundurularak, domino etkisiyle ilişkili toplam arızalanma süresini maksimize etmeyi amaçlamıştır. Bu çalışma, güvenlik bariyerlerinin optimizasyonu kararını bir problem olarak ele almış ve optimal tahsis stratejisini elde etmek için bir metaheuristik algoritma önermiştir. Bu yaklaşım, sınırlı bir bütçe altında güvenlik bariyerlerinin oluşturulmasını destekleyebilir. Khakzad ve arkadaşları, (2018), güvenlik bariyerlerinin optimizasyonu konusunda karar vermek için maliyet-etkinlik analizini uygulamıştır. Maliyet-etkinlik analizi, koruma faydalarının parasal

değerlenmesini katı bir şekilde gerektirmezken, her zaman maliyet-etkinlik oranlarını (CER) hesaplamayı gerektirir. CER'ler, iki seçenek arasındaki en etkili koruma stratejilerini seçmek için kullanılır (Reniers ve Van Erp, 2016:220). Sınırlı bellek etki diyagramına dayalı maliyet-etkinlik analizi, güvenlik bariyerlerinin optimizasyonu için maliyet-etkin stratejiyi belirleyebilir.

Acil müdahale

Proses ve kimya endüstrisinde, tesislerin, halkın, çalışanların ve çevrenin korunması için acil durum müdahale eylemleri esastır (Chen ve ark., 2020). Ayrıca, acil durum müdahale eylemleri kazaların gelişimini de etkiler ve bu nedenle domino etkisi yönetiminde önemli bir rol oynar. Ancak, acil durum müdahalesinin performansının, acil durum müdahale prosedürleriyle ilgili belirsizlikler nedeniyle değerlendirilmesi zordur (Chen ve ark., 2019). Örneğin, yangın söndürme performansı, acil durum müdahale ekiplerinin becerileri ve hazırlıkları, yangın söndürme araçlarının sayısı, su kaynakları ile kimyasal tesisler arasındaki mesafe ve acil durum operasyonlarının başlama süresi gibi faktörlere bağlıdır (Cincotta ve arkadaşları, 2019). Kimyasal tesislere yönelik kasıtlı saldırılar söz konusu olduğunda, birden fazla yangın aynı anda meydana gelebilir ve bu yangınlar kimyasal sanayi bölgesinin farklı yerlerinde domino etkilerine yol açabilir. Bu durumda, sınırlı acil durum kaynaklarını birden fazla yere tahsis etmek zor olduğundan acil durum yönetimi zor olabilir. Bu zorluklar ışığında, son yıllarda acil durum yönetimi konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Zhou ve Reniers (2016), büyük ölçekli eşzamanlı yangınlara karşı acil durum müdahalesini Petri-net simülasyon yöntemi kullanarak incelemiştir. Simülasyon, acil durum müdahalesi sürecindeki eylemleri ve sistem durumunu analiz ederek itfaiyecilerin tahsisi için en uygun stratejiyi elde etmiştir. Çalışma, itfaiyecilerin tahsisinin ortalama dağılım yerine yangının ciddiyetine dayalı olması gerektiğini göstermektedir. İtfaiyeciler üzerindeki yedeklerin etkileri belirli yangın senaryolarına bağlıdır, bu nedenle her zaman yedekleri artırmak gerekli değildir (Zhou ve Reniers, 2016). Zamanlı renkli hibrit Petri-net (TCHPN) tabanlı bir analiz, yangın kaynaklı domino etkilerini önlemek için bitişik tankların soğutulmasının daha önemli olduğunu göstermektedir (Zhou ve Reniers, 2018b). Bu çalışma, bulanık Petri-net kullanılarak bir kaza ve acil durum müdahale eylemleri arasındaki sonuç-neden ilişkisini çıkarmak için geliştirilmiştir (Zhou ve Reniers, 2017). Ayrıca, olay dizisi diyagramı ve

Monte Carlo simülasyonunu birleştiren bir yaklaşım, diziliş, süre, doğruluk ve karşılıklı etkileşimleri dikkate alarak acil durum müdahale eylemlerini değerlendirmek için kullanılmıştır (Zhou ve ark., 2016).

Khakzad (2018b), petrol terminallerinde acil durum müdahale analizleri için DBN tabanlı bir risk yaklaşım geliştirmiştir. Bu çalışma, özellikle yangın söndürme araçlarının sayısının tüm yangınlara müdahale etmek için yetersiz olduğu durumlarda en uygun yangın söndürme stratejilerini belirlemeye yöneliktir. Çalışma, maruz kalan bir tankın soğutulmasının yangın yayılma olasılığını hemen azaltabileceğini, yanmakta olan bir tankın söndürülmesinin ise yayılan termal radyasyonunu hızla azaltamayacağını göstermektedir. Grafik tabanlı bir yaklaşımdan elde edilen sonuçlar, en yüksek dış yakınlık indeksine sahip tankların söndürülmesi ve soğutulmasının en uygun yangın söndürme stratejisi olduğunu göstermiştir. Risk azaltma tabanlı yangın söndürme optimizasyonuna ek olarak, Cincotta ve arkadaşları (2019), dayanıklılık kavramına dayalı yeni bir optimizasyon önermiştir. Bu çalışma, proses tesislerinin dayanıklılığını maksimize ederek yangın söndürme stratejilerini optimize etmek için kullanılmıştır. Geliştirilen dayanıklılık metriklerinde tesislerin arıza olasılığı dikkate alınırken, iyileşme yeteneği göz ardı edilmiştir. Hosseinnia ve arkadaşları (2018), kimyasal kümelerdeki domino etkileriyle başa çıkmak için bir acil durum müdahale karar matrisi geliştirmiştir. Yöntemde, karar ağacı ve karar matrisine dayalı bir uyarı bildirim sistemi kullanılmıştır. Kasıtlı domino etkileri için acil durum yönetiminde, güvenlik güçlerinin dikkate alınması önerilmiştir. Hedef tanımlamada, tesislerin düşmanlar için çekiciliği ele alınmıştır. Ayrıca, sonuç analizinin, kasıtlı saldırılara maruz kalan tesislerin ve yükselme etkilerine maruz kalan tesislerin kırılganlığını belirlemede önemi vurgulanmıştır (Hosseinnia ve ark., 2018)

2.4.3. İşbirlikçi önleme

Bir kimyasal endüstri alanı veya kimyasal kümelenme her zaman farklı kuruluşlara ait birden fazla kimyasal tesisten oluşur. Emniyet ve güvenlik kaynaklarının bir kimyasal tesiste uygulanması, olası harici domino etkilerinin önlenmesi ve hafifletilmesi nedeniyle yakındaki tesislere fayda sağlayabilir. Güvenlik açısından, iş birliği yoksa, kümedeki domino etkisi senaryoları diğer fabrikalar tarafından bilinemez. Ayrıca, kimyasal tesislerin olası ortak düşmanlar için çekiciliği, koruma önlemlerinin uygulanmasıyla azalabileceğinden, güvenlik önlemleri yakındaki tesislerin (güvenlik) riskini artırabilir. Sonuç olarak, kimyasal

kümelerdeki domino etkilerini önlemek ve hafifletmek için işbirlikçi önlem gereklidir (Reniers ve Cozzani, 2013:33).

Harici domino etkilerinin işbirlikçi önlemesi

Bir kimyasal tesis kümesinde domino etkisi, iki şekilde (dahili domino etkisi ve/veya harici domino etkisi) olabilir. Dahili domino etkileri, tesis sınırları içinde meydana gelen yükselme etkilerini ifade ederken, harici domino etkileri tesis sınırlarının dışında yayılan yükselme etkileridir (Reniers ve ark., 2005). Olası harici domino etkileri nedeniyle, kimyasal tesis A'ya yapılan bir terör saldırısı, tesis B üzerinde etkili olabilir ve kümede büyük bir felaketle sonuçlanabilir. Bu senaryolar, teröristin domino etkileri hakkında yeterli ve doğru bilgiye sahip olması durumunda daha olası hale gelebilir. Bu felaketler, bir kimyasal kümede birden fazla tesise zarar verebilir ve bu nedenle kimyasal kümedeki tüm tesislerin çapraz tesis güvenliği konusunda iş birliği yapması önemlidir. Bir tesis domino etkilerini önlemek için yatırım yapsa bile, komşuları yapmadığında, tesis kimyasal kümedeki bitişik bir kimyasal işletmede başlayan bir başlangıç olayından kaynaklanan büyük kazalardan etkilenebilir. Ayrıca, komşu tesis, güvenlik yatırımları yapılmadığında teröristler için daha çekici hale gelebilir (Reniers ve Soudan, 2010).

Olası harici domino etkilerini yönetmek için, Reniers ve Soudan (2005), Belçika'daki 24 kimyasal tesis tarafından kullanılan risk analiz araçlarını incelemiştir. Çalışmada, kullanılan kimya sanayi uygulamaları belirlenmiş ve risk analiz yaklaşımlarının güvenlik politikasını iyileştirmek için nasıl entegre edilebileceği incelenmiştir. Araştırma, uzmanlık değişimi ve iş birliğinin daha güvenli bir çalışma ortamına yol açabileceğini göstermiştir. Üç risk analiz aracı (HAZOP, olursa ne olur analizi ve risk matrisi yöntemi), tesisler arası iş birliğini teşvik etmek için umut verici araçlar olarak tanımlanmıştır. Harici domino etkisi yönetim çerçevesi (Hazwim) oluşturulmuştur. Hazwim , karar verme sürecinde dış domino etkilerini önlemek için çok yararlı olan bir süreç şeması ve organize bir program içerir (Reniers ve ark., 2005). Ayrıca, Reniers ve arkadaşları (2009), kimyasal küme içindeki farklı tesislerin önleme yatırımları konusundaki kararlarını modellemek için bir yaklaşım uygulmıştır. Bu yaklaşıma göre, tüm şirketlerin önlem tedbirlerine yapılan yatırımlardan fayda sağlayabileceği kazan-kazan stratejisi veya Nash dengesi olarak adlandırılan bir strateji ortaya çıkabileceğini göstermişlerdir.

Güvenlik ve güvenlik işbirliğinin artırılması

Harici domino etkilerinin son derece düşük olasılıkları, güven ve gizlilik kaygıları nedeniyle, tesisler arasında çapraz tesis önleyici tedbirler için yatırım konusunda bir anlaşmaya varmak zor olabilir. Pavlova ve Reniers (2011), bu nedenle, domino etkileriyle başa çıkan kimyasal kümelerde güvenlik ve güvenlik iş birliğini artırmak için sıralı hareket oyunu geliştirmiştir.

Bir kimyasal kümede önleme iş birliğini teşvik etmek için Multi-Plant Council (MPC) adlı bir kurum kurulabilir (Pavlova ve Reniers, 2011). MPC, kümedeki farklı şirketlerde güvenlik ve güvenlik iyileştirmelerinin sürekli olarak takip edilmesinden sorumlu olacaktır. İki aşamalı mücadelede, MPC, minimum maliyetle teşvik sistemi geliştirerek kuruluşlar arasında tam iş birliği sağlamayı amaçlayan bir liderdir. Lider bir karar verdikten sonra, takipçiler (farklı şirketler) domino kazalarının işbirlikçi önlenmesi konusunda yatırım yapmaya karar verebilirler.

2.4.4. Kasıtlı domino etkileri için güvenlik

Reniers ve ark. (2008) kimyasal altyapılara olası kasıtlı saldırılar ışığında kimyasal kümelerdeki kasıtlı domino etkilerini önlemeyi önermiştir. Diğer kritik altyapılardan farklı olarak, kimyasal endüstri alanlarındaki bir veya daha fazla tehlikeli tesise kasıtlı bir saldırı, yükselme etkilerini tetikleyerek ciddi sonuçlara yol açabilir. Kimyasal tesislerin emniyete alınmasına ek olarak, literatürde bazı girişimlerde bulunulmuştur. Bu girişimler üç kategoriye ayrılabilir: kritik tesislerin güvenliği, potansiyel sonuçların hafifletilmesi ve çekiciliğin azaltılması.

Kritik tesislerin güvenliği

Tehlikeli tesislerin domino etkisi potansiyeli, mevcut maddelerin miktarına, maddelerin fiziksel ve toksik özelliklerine ve spesifik süreç koşullarına vb. bağlıdır. Kritik tesisler, kazaları başlatma veya yayma olasılığı yüksek olan tesisleri belirtir. Bu kritik tesisler, felaketle sonuçlanacak kazaları tetiklemeyi amaçlayan düşmanlar için daha çekicidir. Sonuç olarak, kritik tesislerin güvenliği, sınırlı koruma kaynaklarının faydalarını maksimize edebilir. Kritik tesislerin güvenliğini sağlama stratejisi, domino etkisi yönetiminde güvenlikle ilgili sorunları ele almak için önerilmiştir (Reniers ve ark., 2008). Dayanıklılık

perspektifinden, Reniers, Sörensen, Khan ve Amyotte (2014), bir kimyasal endüstri alanının düzeninin bir güç yasası dağılımını izlediğini kanıtlamıştır. Başka bir deyişle, yalnızca birkaç tesis çok yüksek yükselme potansiyeline sahiptir ve bu tesislerin güvenliğini sağlamak, bir saldırının olası sonuçlarını azaltabilir. Bubbico ve Mazzarotta (2014), kimyasal endüstri alanlarında güvenlik riskini etkileyen tesis düzeninin rolünü araştırarak, tesis düzeninin güvenlik perspektifinden planlanmasının rolünü vurgulamıştır. Bu çalışmaya göre, tesis düzeni planlanırken en kritik bölgeler önceden belirlenmelidir; bu bölgeler arasında proses alanları, kontrol odaları, tehlikeli maddeler için depolama alanları, yükleme ve boşaltma tesisleri ve yangın ekipmanları bulunmaktadır. Koruma halkaları konseptine dayanarak, kritik tesisler ortada yer almalı ve merkeze doğru ilerlerken bariyerlerin sayısını ve karmaşıklığını artırmak için daha yoğun güvenlik sağlanmalıdır (Bubbico ve Mazzarotta, 2014).

Potansiyel sonuçların hafifletilmesi

Kasti saldırıların önlenmesi imkânsız görünüyorsa, güvenlik önlemleriyle potansiyel sonuçların hafifletilmesi, kimyasal endüstriyel tesisleri domino etkilerine karşı korumanın etkili bir yaklaşımı olarak değerlendirilebilir. Güvenlik önlemleri, kasti saldırıların potansiyel sonuçlarını hafifletmekle kalmaz, aynı zamanda istenmeyen domino etkilerinin önlenmesine de katkı sağlayabilir. Dolayısıyla, koruma stratejisi daha güvenli bir kimyasal tesisle sonuçlanabilir. Koruma stratejisine dayanarak, Srivastava ve Gupta (2010), güvenlik bariyerleri kullanarak domino etkileri ile başa çıkmak için bir Basamaklı Matris Prosedürü (SMP) yöntemi geliştirmişlerdir. Reniers ve Audenaert (2014), kasti domino etkilerinin potansiyel sonuçlarını en aza indirmeyi, zayıflık değerlendirmesine dayanarak önermişlerdir. Çalışmada önerilen yaklaşım, en savunmasız kuruluşları tanımlayarak yerleşim veya saha konumlama sorunlarını çözmek için de kullanılabilir. Khakzad ve Reniers (2019), yaklaşan terörist saldırılarda tesisin kasti saldırılara karşı güvenliğini artırmak için bazı depolama tanklarını boş tutarak, ekonomik-dayanıklı stratejisini önermişlerdir. Tankların bir kısmını boş bırakmak, olası bir patlama veya yangın sırasında, bu tankların etkilenmesini ve olayın diğer tanklara yayılmasını önler. Boş tank bırakmak, yüksek maliyetli güvenlik önlemleri yerine, daha düşük maliyetle uygulanabilir bir çözüm sunar. Bu önlem, saldırı riski ortadan kalkana kadar geçici bir koruma sağlar. Sonuç olarak, bu strateji**,** potansiyel terörist saldırı durumunda, tesisin daha güvenli hale gelmesi için basit,

düşük maliyetli ve etkili bir çözüm sunmayı amaçlar. Bu sayede, kasti domino etkilerinin meydana gelmesi önlenebilir veya etkileri minimuma indirilebilir.

Çekiciliğin azaltılması

Tehlikeli tesislerin düşmanlar için çekiciliği, birçok faktöre bağlıdır: erişim, güvenlik, görünürlük, ikincil tehlike, dayanıklılık, yasal uyum, kurban profil ve siyasi değer (Coster ve Hankin, 2003). Çekicilik analizi, bir hedefin düşmanlar için algılanan değerini ve düşmanların hedef seçimini değerlendirmelidir. Düşmanlar, genellikle mümkün olduğunca çok kayba neden olmak için saldırılar düzenlerler (Reniers ve Audenaert, 2014), bu nedenle kritik kuruluşların güvenliği ve potansiyel sonuçların hafifletilmesi stratejileri düşmanlar için çekiciliğin azaltılmasına yol açabilir. Dolayısıyla, kasti domino etkilerine karşı kimyasal endüstriyel bölgeleri korumak için hem güvenlik hem de güvenlik kaynaklarını kullanmak, çekiciliği azaltma stratejisi olarak değerlendirilir. Khakzad (2018a), kimyasal tesislerin terörist saldırılara karşı çekiciliğinin azaltılmasının rolünü vurgulamış ve doğal olarak daha güvenli tasarım ve arazi kullanım planlaması gibi güvenlik kavramlarının kimyasal tesislerin güvenliğini artırmak için kullanılmasını önermiştir. Bu güvenlik kavramları, kimyasal tesisin çekiciliğini ve saldırı senaryolarının sonuçlarını azaltabilir. Chen ve ark. (2019), kasti saldırılara maruz kalan kuruluşların savunmasızlığını ve ardışık domino etkilerine karşı kuruluşların savunmasızlığını göz önünde bulundurarak kasti domino etkilerini önlemek ve hafifletmek için birleşik bir yaklaşım önermişlerdir. Bu çalışmada geliştirilen kaynak tahsisi yöntemi, bir kimyasal kümenin çekiciliğini ve saldırıların potansiyel sonuçlarını etkin bir şekilde azaltabilir.

2.5. Domino Etkilerinin Risk Değerlendirmesi ve Yaklaşımlar

Domino etkileri için kullanılan risk değerlendirme yöntemleri üç başlık altında toplanabilir;

- Analitik yöntemler,
- Grafiksel yöntemler,
- Simülasyon yöntemleri.

2.5.1. Analitik yöntemler

Analitik yöntemler, grafik ve sayısal yöntemler kullanmadan domino etkisi risklerini elde etmek için kullanılabilecek formüller sunmada kesin teoremler kullanan yöntemleri ifade eder.

2.5.2. Grafiksel yöntemler

Kimyasal endüstri alanları, farklı domino etkisi potansiyellerine sahip çeşitli tehlikeli kuruluşlardan oluşur. Bazı kuruluşların domino kazalarını başlatma olasılığı yüksekken, diğer kuruluşların domino olaylarını yayma olasılığı daha yüksektir. Bu kuruluşlar düğüm olarak kabul edilebilir. Grafiksel modellerde, kaza yayılmasının nicel olasılığı, bir ağ veya grafikteki düğümler arasındaki bağlantıların ağırlığı ile temsil edilebilir. Analitik yöntemlerle karşılaştırıldığında, grafik modeller, domino etkilerinin gelişimi, karmaşık domino senaryoları ve üst düzey yayılımlarla mücadele için bir çerçeve sağlayabilir.

Grafik / ağ (network) modelleri

Bir grafikte, düğümler kimyasal kuruluşları temsil eder ve her bir düğüm çifti arasındaki yaylar yükselme vektörlerini gösterir. Her bir yayın ağırlığı, uç kuruluştan baş kuruluşa yükselme olasılığını belirtir.

Bayes ağı

Risk değerlendirmesi ve yapay zekada, Bayes ağı (BN), olasılıklı sistemlerde belirsiz bilgi ve bağımlılığı modellemek için yaygın olarak kullanılan bir olasılık grafik aracıdır. Aslında değişkenler arasındaki ilişkilerin, oklar ve düğümler yardımıyla gösterimi olarak ifade edilebilir.Örneğin, bir Bayes ağı kullanılarak kazalar ve sebepleri ya da domino kazaları ve başlatıcı etkileri arasındaki olasılıksal koşul ilişkileri modellenebilir. Böylece domino kazası olasılığı ve yükselme faktörleri ile ilgili olasılıklara ulaşılabilir.

Petri-net

Petri-net, eşzamanlı sistemleri analiz etmek ve simüle etmek için yaygın olarak kullanılan grafik araçlardır. Bir Petri-net iki düğüm kümesinden oluşur: sistem nesnelerini temsil eden yerler kümesi ve olaylar veya geçişler kümesi sistemin dinamiklerini belirtir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez çalışması kapsamında literatür araştırması, geçmiş domino kazalarının analizine ve domino kazalarının risk analizine yönelik çalışmalar olmak üzere iki başlık altında yürütülmüştür.

3.1. Geçmiş Domino Kazalarının Analizine Yönelik Çalışmalar

Tehlikeli maddeleri içeren kazalarda domino etkisinin analizi ve önemi karmaşık bir görevdir. Kaza veri tabanları genellikle eksik bilgiler içerir ve bazı durumlarda bir kazanın domino etkisi içerip içermediğini ve eğer içeriyorsa, bunun birinci veya ikinci seviye domino etkisi olup olmadığını belirlemek zordur. Bu zorluklar göz önüne alındığında, koruyucu bir yaklaşım benimsenmeli ve sadece domino etkisinin açık kanıtlarına sahip kazalar dikkate alınarak analizler yürütülmelidir.

Abdolhamidzadeh ve arkadaşları (2009), endüstriyel tesislerde ve taşımacılıkta meydana gelen 1917 ile 2008 yılları arasındaki 73 domino kaza vakasını incelemiştir (analiz edilen kazaların %21'i taşımacılıkla ilgilidir). Araştırmada, faaliyet türü, dahil olan maddeler, domino etkisi seviyesi ve etkilenen nüfus gibi konuları incelemiştir. Proses endüstri yapısı ve güvenliği önemli ölçüde değiştiği için geniş bir dönemde meydana gelen nispeten az sayıda kazaya odaklanılmıştır (geleneksel patlayıcıları içeren kazalar da dahil). Birinci ve ikinci seviye domino dizileri arasındaki oran 2,2 olarak tespit edilmiştir.

Darbra ve arkadaşları (2010), domino etkili kazaların kök nedenlerini araştırmak üzere 1961 ve 2007 yılları arasında, proses / depolama tesislerinde ve tehlikeli maddelerin taşınmasında meydana gelen domino etkisi içeren 225 kazayı analiz etmiştir. En sık görülen nedenlerin harici olaylar (%31) ve mekanik arızalar (%29) olduğu belirtilmiştir. Depolama alanları (%35) ve proses tesisleri (%28), en yaygın domino kazaları ortamı olarak gösterilmiştir. Kazaların yaklaşık %89'unun, en yaygını sıvılaştırılmış petrol gazı olmak üzere yanıcı maddelerle ilgili olduğu vurgulanmıştır. Domino etkisi zincirleri / dizileri, göreceli olasılıklı olay ağaçları kullanılarak analiz edilmiştir. En sık görülen dizilerin patlama / yangın (%27,6), yangın / patlama (%27,5) ve yangın / yangın (%17,8) olduğu gösterilmiştir.

Abdolhamidzadeh ve arkadaşlarının (2011) yaptığı çalışmada, 1917 ile 2009 yılları arasında gerçekleşen domino etkili 224 kaza analiz edilmiştir. Domino kazalarının %89'unun yanıcı maddeler ile ilişkili olduğu gösterilmiştir. Kaydedilen domino kazalarının %43'ünün yangınlardan ve %57'sinin patlamalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Domino etkisini başlatan yangın türlerinin ise %80'inin havuz yangınları, %12'sinin buhar bulutu yangını ve %8'inin jet yangınları olduğu belirtilmiştir. Bu kazalarda etkisini gösteren patlama türlerinin %84'inin buhar bulutu patlaması, %10'unun fiziksel patlama, %6'sının toz patlaması olduğu da gösterilmiştir.

Endüstriyel kazalar içerisinde domino kazalarının durumunu analiz eden çalışmalara da rastlanılmaktadır. Kourniotis, Kiranoudis, ve Markatos (2000), 1960 ile 1998 yılları arasında ekonomik olarak gelişmiş ülkelerde meydana gelen 207 büyük kimyasal kaza olayını incelemiş ve bunların 114'ünün domino etkisi içerdiği gösterilmiştir. Çalışmada, sıvı yakıtlar, buharlı hidrokarbonlar, toksik maddeler ve çeşitli maddeler olmak üzere dört kategorideki maddelerin karışımlarını içeren kazaların toplam sayısına göre birinci veya ikinci seviye domino dizilerine sahip kazaların olasılığını analiz etmişlerdir. Ayrıca, etkilenen nüfus üzerindeki sonuçlar, p-N eğrileri ve Pareto dağılımı üzerinden incelenmiştir. Kourniotis ve arkadaşları (2000) tarafından yayınlanan verilere göre, tek bir domino etkili kaza (80) ile en az iki domino etkili kaza içeren kaza sayısı (34) arasındaki oran 2,3 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer, Abdolhamidzadeh ve arkadaşları (2009) tarafından elde edilen değerle uyumludur.

Ronza ve arkadaşları (2003), tarafından liman bölgelerinde meydana gelen büyük kazalar incelenmiştir. Bir dizi kazanın meydana geldiği çeşitli domino dizilerin analizinde ilk kez göreceli olasılık olay ağacı uygulanmıştır. Önerilen metodoloji, gemi-gemi çarpışmaları ve gemi yükleme operasyonlarından kaynaklı kazalar dahil olmak üzere limanlarda meydana gelen 675 kazaya uygulanmıştır. Kazaların 390'ında sadece bir sızıntı meydana gelmiştir. Diğer 285 kazadan, 38' inde domino etkisi (birinci seviye) tespit edilmiştir. Göreceli olasılık olay ağacı kullanılarak, başlangıç olayının frekansı belirlendikten sonra (örneğin, bir gemi yükleme boru hattından sızıntı) kök olayın olasılığı ile çarpılmasıyla domino dizi senaryolarına bir frekans değeri atanmıştır. Önerilen metodolojinin güvenilirliği, geniş bir kaza yelpazesi ile kanıtlanmıştır. Ayrıca, metodoloji Oggero ve arkadaşları (2006) tarafından, karayolu ve demiryoluyla tehlikeli maddelerin taşınması sırasında meydana gelen domino etkili ve etkisiz kaza dizilerini analiz etmek için kullanılmıştır.

Tüm kaza türlerinde yapılan genel araştırmaların yanı sıra, domino etkisi oluşturma eğiliminde olan belirli olayların analizi de başka bir faydalı yaklaşımdır. Yangınlar, endüstriyel tesislerde veya tehlikeli maddelerin taşınmasında meydana gelen kazaların büyük bir kısmında rol oynamıştır. Çeşitli yangın türleri arasında, jet yangınları çok daha önemli bir rol oynar. Genellikle jet yangınları havuz veya parlama yangınlardan daha küçük boyuttadır ve tek başına sıklıkla ciddi kaza niteliği taşımazlar. Çok yoğun olabilirler ve alev teması varsa çok yüksek ısı akışlarını oluşturabilirler; eğer bir jet yangını görece kompakt bir kuruluşta meydana gelirse, muhtemelen (örneğin bir boru veya tank) ekipmana etki edecek ve sonuçta kazanın ölçeğini büyütebilecek ekipmanın başarısızlığına neden olacaktır. Gomez-Mares ve arkadaşları (2008), jet yangınlarını içeren 84 kaza senaryonu analiz etmiş ve bunların %50'sinde jet yangınlarının bir domino dizisinin başlangıç olayı olduğunu bulmuşlardır. En yaygın domino dizisi jet yangını- patlama olarak belirlenmiştir. Taşımacılıkta, tipik bir dizi genellikle bir raydan çıkma veya yol kazası sonrasında başlamış, boru hattında bir sızıntıya, jet yangınına, tank patlamasına ve sıklıkla bir ateş topuna yol açmıştır.

Domino etkisinin meydana geldiği kaza senaryolarının yüzdesini bilmek oldukça zordur. Bunu belirleyebilmek için birçok kaza analiz edilmelidir. Ancak, bunu yaparken genellikle bulunan bilgiler eksik olur ve bu etkinin gerçekten meydana gelip gelmediğini belirlemek mümkün olmaz. Yine de araştırmalar göstermektedir ki, domino etkisinin dahil olduğu önemli bir göreceli kaza sayısı vardır. Kourniotis ve arkadaşları (2000), bir kazanın domino etkisine neden olma olasılığının, içinde bulunan maddeye bağlı olduğunu belirtmiştir. Analiz edilen tüm kazaların %39'unda, domino etkisi bulunduğu; bu oranın sadece sıvı yakıtların dahil olduğu kazalarda %49'a ve buhar fazı hidrokarbonlarda %58'e ulaştığı tespit edilmiştir. Toksik maddelerin dahil olduğu kazalar için bu oran ise sadece %16 olarak belirlenmiştir.

Tehlikeli maddelerin taşınması sırasında meydana gelen kazalarda, domino etkisinin meydana gelme ihtimali önemli ölçüde daha düşüktür, çünkü genellikle kaza yerinde ekipmanlar (kompakt tesisler ve sabit depolama tankları) etkilenmez. Deniz limanlarında meydana gelen taşımacılık kazalarında, Ronza ve arkadaşları (2003) tarafından çok düşük bir yüzdede (%6) domino etkisi elde edilmiştir. Analizler, düşük buharlaşma oranına sahip sıvıları içermektedir. Oggero ve arkadaşları (2006) karayolu ve demiryolu taşımacılığında domino etkisi oranını 1932 kaza için %8 olarak elde etmişlerdir.

Abdolhamidzadeh ve arkadaşları (2009), oldukça sınırlı bir veri örneğinde (73 kaza) domino etkisi içeren kazaların %21'inin taşımacılık sırasında meydana geldiğini bulmuştur. Gomez-Mares ve arkadaşları (2008), jet yangınları özelinde, kazaların %44'ünün taşımacılık sırasında, %11'inin yükleme / boşaltma işlemlerinde, %36'sının işleme tesislerinde ve %9'unun depolamada meydana geldiğini bulmuşlardır. Darbra ve arkadaşları (2010) tarafından yapılan analizde (225 kaza) taşımacılık vakaları %18.7'yi oluştururken, "transfer" için (esasen yükleme / boşaltma) bu oran %13.3 olarak belirlenmiştir. Abdolhamidzadeh ve arkadaşları (2011) domino etkisi içeren kazaların(224 kaza) %20'sinin taşımacılıkta ve %80'inin sabit kuruluşlarda meydana geldiğini bulmuşlardır. Domino kazalarının çeşitli taşıma modları arasındaki dağılımı da incelenmiştir: %40 karayolu, %39 demiryolu, %13 denizcilik ve %8 boru hattı. Farklı kaynaklar üzerinden domino kazalarının karşılaştırması Çizelge 3.1.' de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Domino kazalarının taşıma ve sabit kuruluş bazında dağılımı

Kaynak	Taşıma* (%)	Sabit kuruluş (%)
Abdolhamidzadeh et al. (2009)	21	79
Darbra et al. (2010)	32	68
Abdolhamidzadeh et al. (2011)	20	80

Domino kazalarının nedenlerinin dağılımı ise Çizelge 3.2.' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Domino kazalarının nedenlerinin dağılımı (Darbra ve arkadaşları, 2010)

Nedeni	Olay sayısı	%
Harici etkenler	69	30,70
Mekanik arıza	65	28,90
İnsan faktörü	47	20,90
Darbe arızası	40	17,80
Şiddetli reaksiyon	21	9,30
Cihaz arızası	8	3,60
Bozulan proses koşulları	5	2,20
Servis-Hizmet hatası	3	1,30

Domino kazalarına genellikle birden fazla madde dahi olur. Örneğin, Darbra ve arkadaşları (2010) analiz edilen 225 kazada 335 madde tespit etmiştir. Ancak, gerçek madde sayısı daha yüksektir, çünkü çoğu zaman bilgi kaynağında yalnızca birincil kazaya dahil olan madde belirtilir ve ikincil kazayı tanımlamak için veri tabanlarında bazen 'yangın kimyasallar içeren depolama tanklarına yayıldı' gibi cümleler kullanılır. Göreceli olarak az sayıda kaza yalnızca bir maddeyi içerir; örneğin, bir dizi yangın ve patlamaya neden olan propan gaz çiftliğinde olduğu gibi sadece propan içeren kazalar. Çizelge 3.3.' de, domino kazalarına dahil olan tehlikeli kimyasalların dağılımı verilmiştir.

Çizelge 3.3. Domino kazalarına en sık karışan malzemeler (%) (Reniers ve Cozzani, 2013)

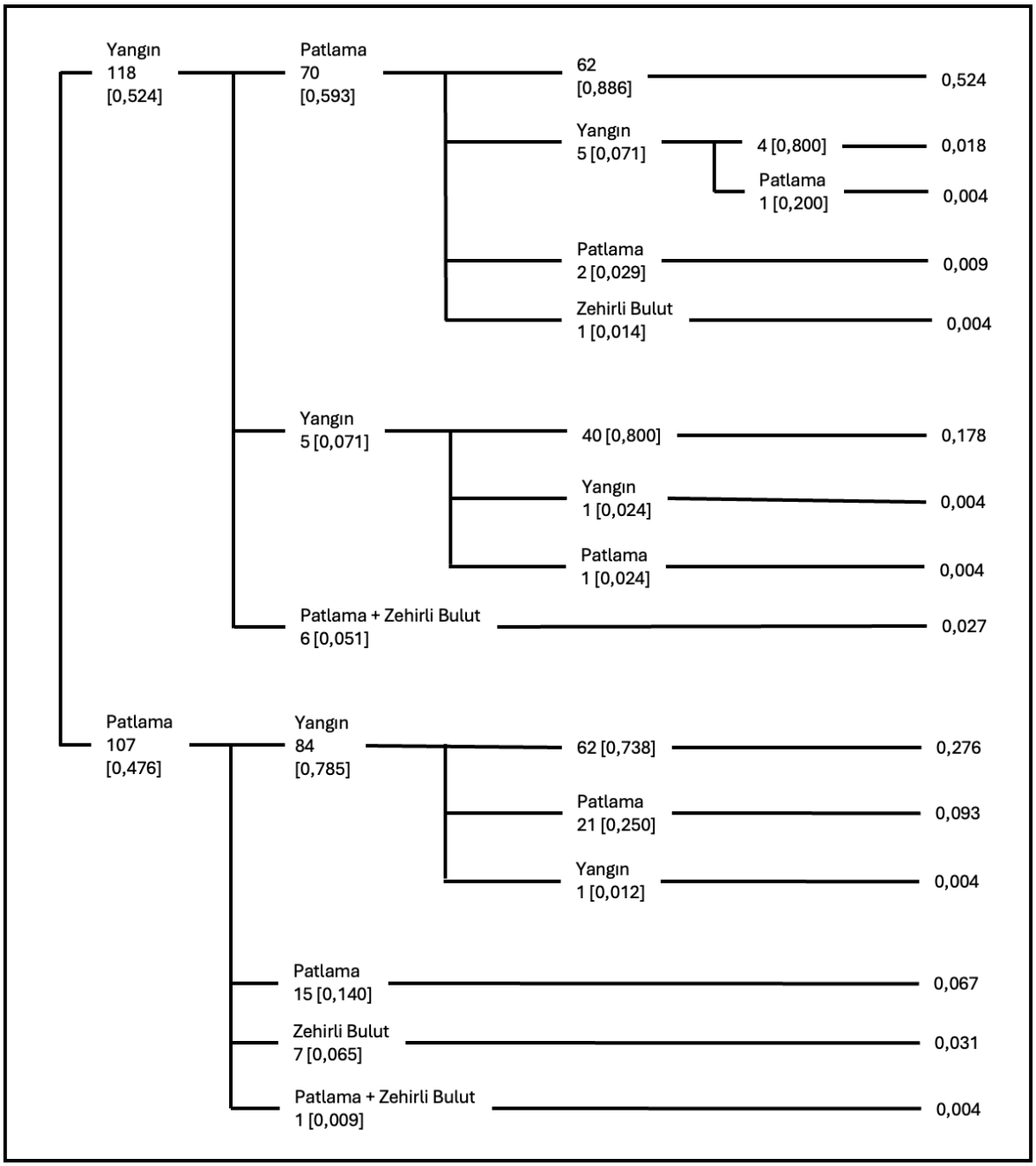
Kaynak	Yanıcı	Toksik	Çeşitli
Kourniotis et al. (2000)	45	22	33
Darbra et al. (2010)	89*	22*	16*
Abdolhamidzadeh et al. (2011)	89	4	7

*Bazı maddeler aynı anda yanıcı ve zehirli olduğundan yüzdelerin toplamı 100'den fazladır.

Yanıcı maddeler çoğu kazayla ilişkilendirilmiştir. Darbra ve arkadaşları (2010) ve Abdolhamidzadeh ve arkadaşları (2011) domino kazalarının %89'unda yanıcı maddelerin dahil olduğunu vurgulayarak benzer oranı tespit etmiştir. Kourniotis ve arkadaşları (2000) daha düşük bir değer (%45) elde etmiştir. Çizelge 3.3.'e göre, toksik ve 'çeşitli' malzemelerin oranı önemli ölçüde daha düşüktür.

Domino etkisi kazalarının ilginç bir yönü, kaza dizisinin uzunluğu ve bu süre içinde meydana gelen olaylardır.

Abdolhamidzadeh ve arkadaşları (2011) kazaların %53'ünün birincil ve ikincil olayları içerdiğini, %47'sinin ise üçüncül veya daha yüksek seviyeli yükselme olaylarını içerdiğini belirlemiştir. Darbra ve ark. (2010) domino dizilerini, göreceli olasılık olay ağacını kullanarak analiz etmiştir. Bunu yapmak için, kazaları dört kategoriye ayırmışlardır: sızıntı, yangın, patlama ve toksik yayılım. Ancak, 'sızıntı' kategorisi yanıltıcı olmaktadır, çünkü bu olay birçok veritabanında kaydedilmemiştir, çoğu kaza aslında bir sızıntı ile başlamaktadır.



Şekil 3.1. Farklı domino etki dizilerini gösteren göreli olasılık ağacı; köşeli parantezlerde: göreli olasılık (Darbra ve arkadaşları, 2010)

Şekil 3.1' deki bu ağaçta, dallar farklı kaza senaryolarını gösterir. Basit bir istatistiksel prosedürün uygulanması, her dizinin gerçekleşme olasılığını verir. Her dal için kaza sayıları ve göreceli gerçekleşme olasılığı (köşeli parantez içinde) gösterilmiştir. Köşeli parantez içindeki rakamlar, bir üst seviyeye göre gerçekleşme olasılığını temsil eder. Her dalın sonundaki değerler, belirli kaza dizisinin tüm olası olaylara göre gerçekleşme olasılığını temsil eder. Birincil olaylarda yangın (%52.4) ve patlama (%47.6) oranları yüksektir. Dördüncü seviyede bir kaza, tek bir vaka olarak rapor edilmiştir (sırasıyla yangın / patlama

/ yangın / patlama). En sık rastlanan nihai domino dizileri patlama / yangın (%27.6), yangın / patlama (%27.5) ve yangın / yangın (%17.8)dır. Dikkate alınan 225 kazadan 193'ü bir domino etkisini (yani birincil ve ikincil kazalar) içerirken, yalnızca 32'si en az iki domino etkisini (birincil, ikincil ve üçüncül kazalar dizisi) içermektedir. Bu, birincil seviye ve ikincil seviye domino etkisi dizileri arasındaki oranı 6 yapmaktadır. Bu sonuçlar, Kourniotis ve ark. (2000) ve Abdolhamidzadeh ve ark. (2011) tarafından bildirilenlerden önemli ölçüde yüksektir. Fark, genellikle veritabanlarında kazaların tanımındaki bilgi eksikliğine ve farklı yorumlara bağlanabilir.

Qi ve arkadaşları (2024) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, kimyasal depolama tanklarında meydana gelen domino etkili kazaların zincir uzunluklarını nicel olarak analiz etmekte ve bu uzunlukların akıllı yöntemlerle tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, 2000–2023 yılları arasında gerçekleşmiş 255 gerçek kaza olayı detaylı biçimde incelenmiş, her bir olayın zincir uzunluğu, başlangıç türü (yangın / patlama), tehlikeli madde tipi, kaza ortamı ve etkileyen koşullarla ilişkilendirilmiştir. Veri analizine göre domino zincirlerinin %52'si 2 kademeden oluşmakta, ancak zincir uzunluğu bazı durumlarda 5'e kadar çıkabilmektedir. Patlama ile başlayan kazaların yangınla başlayanlara göre daha uzun zincir ürettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca tehlikeli maddenin fiziksel durumu (gaz, sıvı, vb.) ve ortam sıcaklığı gibi faktörler zincirin uzama eğilimini belirleyici olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, domino zinciri uzunluğunun öngörülmesi için yapay sinir ağı (ANN) modeli eğitilmiş ve elde edilen modelin tahmin doğruluğu %97,3 olarak raporlanmıştır. Bu model, olası kaza senaryoları için zincir uzunluğu kestirimi yaparak, acil durum planlaması ve güvenlik yönetimi için karar destek sağlamaktadır.

3.2. Domino Kazalarının Risk Analizine Yönelik Çalışmalar

Yu ve arkadaşları (2025) tarafından yayımlanan bu çalışmada, sıvılaştırılmış doğal gaz depolama tank çiftliklerinde meydana gelebilecek yangın ve patlama kaynaklı domino etkilerinin risk analizi için Bayes ağı tabanlı bir metodoloji geliştirilmiştir. Literatürde çoğunlukla yalnızca tekil kaza türlerinin (yalnızca yangın veya yalnızca patlama) dikkate alındığı domino etkisi çalışmalarına karşılık olarak, bu çalışmada çoklu kaza senaryoları (yangın ve patlama birlikte) modelleme sürecine entegre edilmiştir. Geliştirilen yöntemde, farklı tank birimleri Bayes ağı üzerindeki düğümler olarak modellenmiş ve Probit modelleri aracılığıyla her bir tankın hasar olasılıkları hesaplanmıştır. Ardından bu değerler koşullu

olasılık tablolarına entegre edilerek, domino etkisinin farklı seviyelerdeki olasılıkları ileri ve geri çıkarım yöntemleriyle analiz edilmiştir. Modelin uygulaması, altı tanktan oluşan bir LNG çiftliği üzerinde gerçekleştirilmiş ve özellikle iki tankın (T1 ve T3) kritik düğümler olduğu belirlenmiştir. Yalnızca tekil kazaları dikkate alan modellere kıyasla, çoklu kaza türlerinin birlikte değerlendirilmesinin domino etkisi olasılıklarının daha gerçekçi biçimde tahmin edilmesini sağladığı gösterilmiştir. Çalışma, hem önleyici mühendislik önlemlerinin (yangın duvarları, güvenli mesafe planlaması vb.) planlanması hem de acil müdahale kaynaklarının stratejik tahsisi açısından güçlü bir karar destek aracı sunmuştur.

Raveendran ve arkadaşları (2025), endüstriyel tesislerde depolama tanklarının fiziksel düzenlemelerinin, yangın temelli domino etkilerinin tetiklenmesinde oynadığı rolü dinamik ve sinerjik bakış açısıyla ele almaktadır. Çalışmada, yangınların birden fazla tankı aynı anda etkilemesiyle ortaya çıkan sinerjik domino etkileri, geleneksel analizlerde çoğunlukla göz ardı edilen bir risk bileşeni olarak detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Özellikle yangınla termal etkileşimin yayılımı, ısı aktarım katsayısı, tank arası mesafe ve tank hacmi gibi parametrelere bağlı olarak modellenmiştir. Örneğin, çalışma kapsamında incelenen bir senaryoda, üç tanktan oluşan bir sistemde yangının tetiklenmesinden itibaren ilk tankın arıza süresi 290 saniye, ikinci tankın ise sadece 195 saniye sonra arıza gösterdiği tespit edilmiştir; bu da yangın yayılımının hızla ivmelendiğini ortaya koymaktadır. Yazarlar, tanklar arası mesafenin 10 metrenin altında olduğu durumlarda sinerjik etkilerin çok daha belirgin hale geldiğini, hatta ısı birikiminin klasik domino senaryolarına kıyasla %35'e kadar daha fazla termal yükleme oluşturduğunu rapor etmektedir. Ayrıca, tankların içerik türü de analizde dikkate alınmış; özellikle düşük parlama noktasına sahip sıvılar içeren tankların (örneğin benzen, propan) diğerlerine kıyasla daha kısa sürede arıza gösterdiği belirtilmiştir. Simülasyonlar, CFD temelli termal analizlerle desteklenmiş ve zamana bağlı yangın gelişim grafikleri sunulmuştur. Bu çalışma yalnızca statik güvenlik mesafeleri belirlemek yerine, yangın yayılımının zaman-mekân ekseninde dinamik olarak nasıl geliştiğini modelleyerek güvenlik stratejilerine yeni bir boyut kazandırmaktadır. Elde edilen bulgular, tank dizilimlerinin optimize edilmesi ve yangın senaryolarında aktif soğutma sistemlerinin konumlandırılmasının kritik önemde olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, makale, çoklu tank yapılandırmalarında meydana gelebilecek senaryolarda proaktif, zamana duyarlı bir risk değerlendirme yaklaşımı önermektedir.

Zeng ve arkadaşları (2024), bu çalışma kapsamında birden fazla tehlikeli olayın eş zamanlı veya ardışık şekilde meydana geldiği durumlarda ortaya çıkan sinerjik etkileri dikkate alan

bütüncül bir risk değerlendirme modeli sunmaktadır. Araştırmanın temel amacı, kimyasal proses endüstrilerinde karşılaşılan karmaşık kaza dizilimlerinin tetikleyici-tetiklenen sistematik yaklaşımının ötesine geçerek, birleşik etkilerin oluşturduğu artırılmış zarar potansiyelini kantitatif olarak ortaya koymaktır. Yazarlar, çalışmada 10 farklı senaryo üzerinden analiz gerçekleştirmiştir ve bu senaryolarda özellikle termal radyasyonun birikimli etkisi, yangın yayılımı ve zaman gecikmeli patlama riskleri birlikte değerlendirilmiştir. Örneğin, klasik analiz yöntemleri ile yapılan bir değerlendirmede domino olasılığı %28 olarak saptanırken, sinerjik etkiyi içeren model aynı senaryo için %47'ye kadar çıkabilen bir domino etkisi riski öngörmüştür. Bu bulgu, sinerjik etkilerin göz ardı edilmesinin ciddi risk alt tahminlerine yol açabileceğini açıkça göstermektedir. Modelleme sürecinde Bayes ağı ve Monte Carlo simülasyonu birlikte kullanılarak, senaryoların hem zamansal ilerleyişi hem de olaylar arası nedensel ilişkileri hesaba katılmıştır. Bulgular, aynı anda birden fazla ünitenin etkilenmesi durumunda ısıl yükün %60 oranında artabileceğini, bu da güvenlik sistemlerinin kapasitesini aşarak zincirleme olayların hızlandığını göstermektedir. Sonuç olarak, bu kapsamlı çalışma, proses güvenliği alanında sinerjik risk etkileşimlerinin kantitatif değerlendirilmesinde önemli bir metodolojik boşluğu doldurmakta ve acil durum müdahale planlamalarının güncellenmesine olanak sağlamaktadır. Yazarlar, özellikle tesis planlaması ve güvenlik sistemlerinin tasarımı aşamasında sinerjik etki bazlı risk haritalarının kullanılmasını önermektedir.

Hu ve arkadaşları (2025), bu çalışmada kimya sanayi bölgelerinde meydana gelebilecek domino etkili kazaları değerlendirmek amacıyla dinamik, olasılık temelli bir risk analiz modeli geliştirmiştir. Çalışmanın temel odak noktası, domino etkisinin yalnızca mekânsal değil, zamana bağlı olarak evrilen bir süreç olduğunu ortaya koymak ve bu süreci Monte Carlo simülasyonu yardımıyla kantitatif şekilde modellemektir. Modelde, yangın kaynaklı domino senaryoları için termal radyasyon seviyesi, tank arası mesafe, güvenlik sistemlerinin tepkime süresi gibi kritik değişkenler kullanılarak 10.000'den fazla Monte Carlo simülasyonu çalıştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, tanklar arası mesafe 15 metrenin altına indiğinde domino etkisi ihtimali %60'ın üzerine çıkarken, 25 metrelik mesafede bu olasılık %15'in altına düşmektedir. Ayrıca, geç müdahale edilen senaryolarda domino zincirinin ortalama 9 dakikada iki birim ötesine sıçradığı tespit edilmiştir. Çalışma, ayrıca yeni bir risk ölçütü olan Time-Weighted Domino Risk Index (TWDRI) kavramını sunmaktadır. Bu, domino etkisinin sadece olasılık değil, aynı zamanda zaman eksenindeki ağırlığını da ölçerek dinamik riski daha bütüncül bir şekilde değerlendirmeyi mümkün

kılmaktadır. TWDRI hesaplamalarına göre, en riskli senaryoda domino etkisi 3 saatlik periyotta yaklaşık 0.85 birim/saat artış oranı göstermiştir. Sonuç olarak, çalışma, olayların zamana bağlı risk dönüşümünü modelleyen ileri düzey bir metodoloji sunmaktadır.

Ma ve arkadaşları (2024), bu çalışmada depremlerle tetiklenen doğal-teknolojik (NaTech) kazaların, özellikle alkol temelli sıvıların depolandığı tank sahalarında oluşturabileceği domino etkilerini kantitatif olarak değerlendirmektedir. Araştırma, deprem sonrası meydana gelen yapısal hasarların, ikincil kazalara (yangın, patlama vb.) nasıl yol açabileceğini ve bu olayların birbirini tetikleyerek zincirleme şekilde nasıl ilerleyebileceğini sayısal yöntemlerle modellemeyi amaçlamaktadır. Çalışma sahası olarak, Çin'in belirli bir sanayi bölgesinde yer alan yüksek riskli bir likör depolama tank alanı seçilmiştir. Çalışmada, domino analizinde klasik deterministik modellerin yanı sıra yapı hasar olasılık eğrileri, yangın yayılımı fonksiyonları ve patlama etkileri gibi dinamik değişkenleri içeren bütünleşik bir yaklaşıma başvurmuştur. Deprem senaryosu altında, 6.5 büyüklüğünde bir yer hareketinin 4 tanktan 2'sinde ciddi hasara yol açtığı ve bu tankların ortalama 180 saniye içinde yangınla tetiklenmiş olaylara neden olduğu belirlenmiştir. Yangının yayıldığı hedef tanklar ise 300 saniye içinde yüksek sıcaklığa maruz kalmış ve bu maruziyetin ardından patlama olasılığı %42,6 olarak hesaplanmıştır. Risk analizi sürecinde, yazarlar probabilistik domino etkisi modellemesi için birleştirilmiş hasar fonksiyonları ve eşik temelli olay ağlarını kullanmışlardır. Model, deprem sonrası ilk arıza olasılığını, yangın başlama süresini, olayların sıçrama süresini ve patlama ihtimalini zamana bağlı olarak ayrı ayrı değerlendirmektedir. Buna göre, domino olay zincirinin tam gelişme süresi ortalama 9,3 dakika olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, NaTech-Domino birleşik senaryoları için önerilen modelin, afet yönetimi ve acil durum planlaması süreçlerinde uygulanabilirliği oldukça yüksektir. Özellikle tank yerleşimi planlamasının sismik bölgelere uygun olarak yeniden değerlendirilmesini, aktif ve pasif yangın önleme sistemlerinin güçlendirilmesini ve sistematik domino risk haritalarının oluşturulmasını önermektedir.

Gao ve arkadaşları (2024), bu çalışmada büyük ölçekli endüstriyel tesislerde yangın kaynaklı domino etkilerinin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini sistematik olarak değerlendirmektedir. Bu çalışmada, yangınla tetiklenen domino olaylarının termal radyasyon yayılımı, olay süresi, koruyucu yapıların etkinliği ve personelin maruz kalma süresi gibi parametreler ışığında, insan vücudu üzerindeki etkilerini kantitatif olarak analiz etmektedir. Araştırmada, farklı iş gücü dağılımlarına sahip üç senaryo ele alınmıştır: (1)

Açık sahada çalışan operatörler, (2) yarı kapalı sahalarda çalışan personel, ve (3) acil müdahale ekipleri. Çalışmaya dahil edilen modellemelerde, yangın olayının başladığı noktadan itibaren ilk 300 saniyelik sürede termal radyasyonun 5.7 kW/m² seviyesini aştığı bölgelerde bulunan bireylerin 3. derece yanık riski %86,2 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, maruziyet süresi 8 dakikayı aşan personelde hayati risk taşıyan ısı hasarları oluşma ihtimali %58 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu makale domino etkilerinin yalnızca endüstriyel ekipmanlara değil, insan sağlığına yönelik etkilerini ölçmek ve modellemek açısından yenilikçi ve uygulamaya dönük bir yaklaşım sunmaktadır. Elde edilen veriler, özellikle acil durum planlaması, personel rotası optimizasyonu ve koruyucu yapıların yerleştirilmesi konularında karar vericiler için önemli bir temel sağlamaktadır.

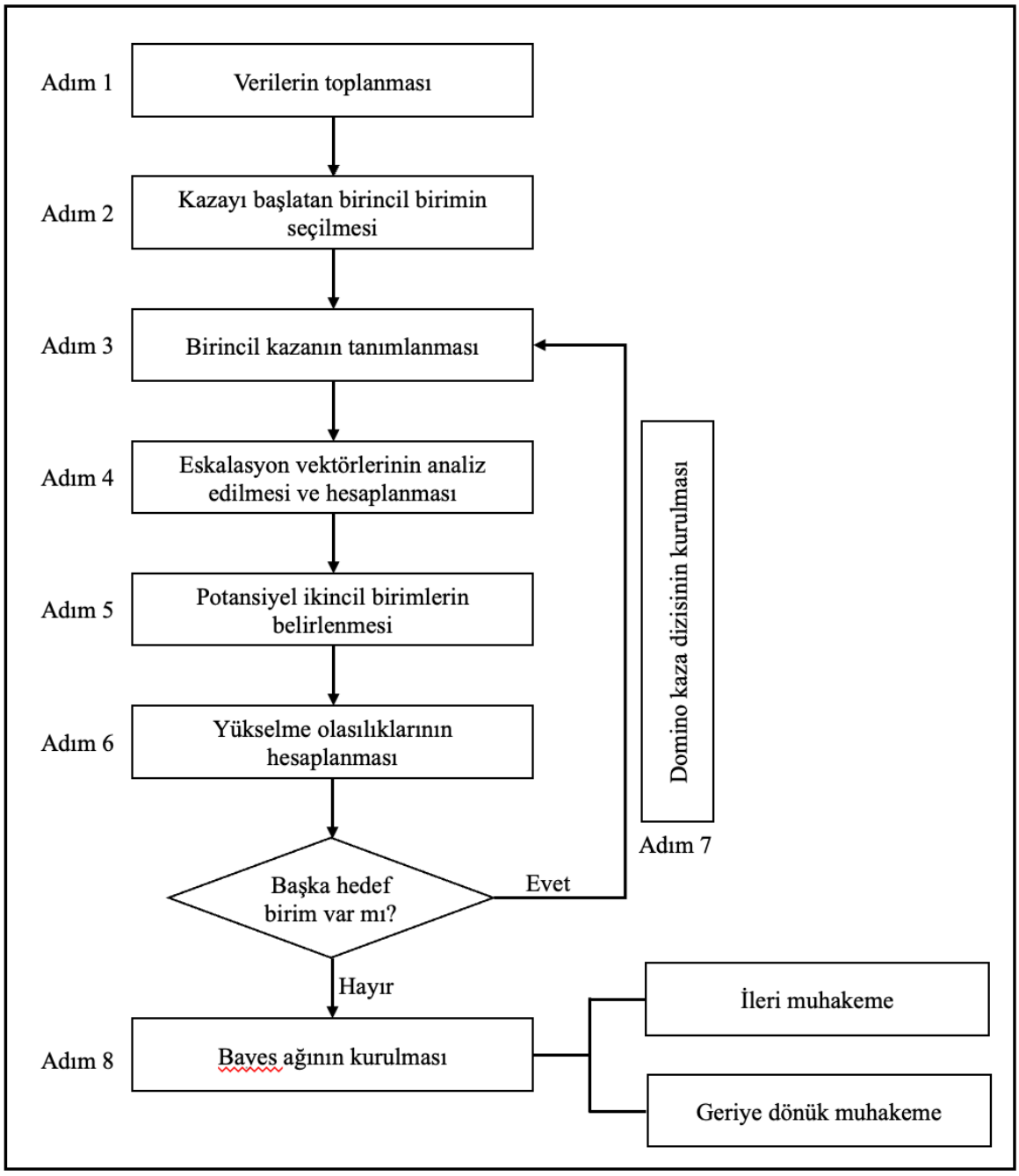
4. MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasında, endüstriyel kuruluşların domino etkilerinin risk analizi amaçlanmıştır. Bu analizin, deterministik ve objektif nitelikteki QRA yaklaşımı ile yürütülmesine karar verilmiştir. QRA, tehlikeli olayların olasılığını ve sonuçlarını tahmin ederek riski nicel olarak ifade eden sistematik bir yaklaşımdır. QRA, riskleri kapsamlı ve nicel olarak ortaya konmasını sağlar. Ayrıca, farklı kaza senaryolarını nicel açıdan karşılaştırılmasına imkân verir, belirsizlikleri daha görünür kılar. Tesis güvenliği için hangi alanlara öncelikli olarak müdahale edilmesi gerektiğini belirlemede önemli katkı sağladığı için literatürde kritik bir yöntem olarak vurgulanmaktadır (Casal, 2008:291; Nomen ve ark.,, 2014).

Domino dizilerinin belirlenmesinde ise Bayes teoreminden yararlanılmıştır. Bayes teoremi, önceden edinilen bilgilere ve yeni kanıtlara dayanarak bir olayın koşullu olasılığını belirlemek için kullanılan matematiksel bir formüldür. Yeni bilgiler geldiğinde olasılıkları ayarlar ve belirsiz durumlarda daha iyi kararlar almaya yardımcı olur. Bayes ağları domino etkili kazalarda olayların sırasının tanımlanmasındaki belirsizlikleri açıklar. Bu sayede domino etkilerinin risk değerlendirmesi ve yönetimi için çok önemli olan yükselme olasılıklarının daha doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar (Khakzad ve ark., 2018). Bu çalışmada, QRA ve Bayes' e dayanan metodoloji önerisi getirilmiş, ardından önerilen metodolojinin saha uygulaması gerçekleştirilmiştir.

4.1. Metodoloji

Literatür araştırması ve bilimsel temeller doğrultusunda önerilen metodolojinin akış şeması Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Önerilen metodolojinin akış şeması

Önerilen metodolojiye ait her bir adım, aşağıda detaylandırılmıştır.

Adım 1: Verilerin toplanması

İlgili bilgilerin toplanması, domino etkisinin nicel analizinde önemli bir adımdır. Bilgiler, tank çiftliği yerleşim planını, tehlikeli madde türlerini ve fizikokimyasal özelliklerini, depolama tankının işletim parametrelerini (sıcaklık, basınç, doluluk oranı vb.) ve çevre

koşullarını(atmosferik koşullar, coğrafi konum bilgileri) içermelidir. Tank haricinde kimyasal tesislerde başka ekipmanlar (ısı değiştiriciler, boru hatları vb.) da mevcuttur. Ancak, içerdiği tehlikeli kimyasal miktarı ve tesislerdeki sayı yoğunluğu ile geçmiş endüstriyel kazalar, depolama tanklarının domino kazalarında kilit rolüne dikkat çekmektedir. Yanıcı ve patlayıcı özellikteki maddeleri barındıran kimyasal depolama tankları başlıca risk odaklarını oluşturmaktadır (Khan ve Abbasi, 2001; Zhang ve ark., 2019). Xiang ve ark. (2022) tarafından 225 domino kazası analiz edilmiş, domino kazalarının en sık meydana geldiği yerin depolama alanları (%35) olduğu gösterilmiştir. Hemmatis ve ark. (2014) 21. yüzyılda meydana gelmiş 330 domino etkili kazayı analiz etmiş ve bu kazaların %33 oranında depolama alanlarında (depolama tanklarının bulunduğu) gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu nedenle, tez çalışmasında depolama tank verileri üzerinden ilerleme yaklaşımı benimsenmiştir.

1. Coğrafi konum bilgileri
- Özel konum: denizlere, ulaşım yollarına, yeraltı ve yerüstü kaynaklarına, kritik tesislere, komşu tesislere göre olan konumu ve yükseklik değerleri
- Matematik konum: Enlem ve boylam bilgisi

2. Atmosferik veriler: Rüzgâr hız ve yönü (rüzgâr gülü), hava sıcaklığı, nem oranı, bulutluluk, atmosferik kararlılık sınıfı, inversiyon, ortam pürüzlülüğü (kentsel, kırsal).

3. Fiziksel ve kimyasal özellikler*:* Tehlikeli madde türü, kimyasal özellikler (yanabilirlik, toksisite, yanma ısısı, pH, kimyasal kararlılık), fiziksel özellikler (renk, koku, tat, miktar, genleşme, çözünürlük, erime noktası, kaynama noktası, donma noktası, viskozite, iletkenlik vb.)

4. Analiz edilen prosese ait teknik özellikler
- Ekipman spesifikasyonları: Tank boyutları, tank şekli (küresel, silindirik), oryantasyon (dikey / yatay)
- Yerleşim planı: Tank çiftliği yerleşim planı ve tesisin yerleşim planı
- İşletim parametreleri: Depolama tankı sıcaklık, basınç, doluluk oranı vb.

Adım 2: Kazayı başlatan birincil biriminin seçilmesi

En yüksek riski taşıyan tank belirlenmelidir. Bu, tehlikeli ekipman olarak düşünülebilir. Tehlikeli ekipman, içerdiği tehlikeli maddenin niteliği, miktarı ve proses koşulları ile tesisteki yerleşimi nedeniyle büyük kazaya sebebiyet verme veya bu kazanın etkisini arttırma potansiyeline sahip olan ekipmanı ifade eder (BEKRA, 2019). Burada yerleşim ve termodinamik şartlar dikkate alınmalıdır. Bu durumda tankta yüksek miktarda tehlikeli madde bulunması ve daha yüksek basıncın olması göreli olarak yüksek bir kaza olasılığı olduğunu gösterir.

Birincil birimin belirlenmesi için Risk Öncelik Sayısı (RPN), yöntemi kullanılmasına karar verilmiştir. RPN, bir sistemdeki potansiyel hata modlarının kritik seviyesini değerlendirmek ve önceliklendirmek için kullanılan yarı nicel bir risk analiz yöntemidir. Üç temel parametre üzerinden analiz edilir. Şiddet (S), Olasılık (O) ve Tespit Edilebilirlik (D) indekslerinin çarpılmasıyla hesaplanır (Priyanta ve ark., 2024):

Risk Öncelik Sayısı = Şiddet (S) × Olasılık (O) × Tespit Edilebilirlik (D)

Şiddet, hata modunun ciddiyeti 1–10 ölçeğinde değerlendirilir. Yüksek şiddet puanı, yüksek risk anlamına gelir. Olasılık, hata oluşma olasılığı 1–10 ölçeğinde değerlendirilir. Yüksek oluşum puanı, hatanın meydana gelme ihtimalinin yüksek olduğunu gösterir. Tespit edilebilirlik, hatanın tespit edilebilme kapasitesi 1–10 ölçeğinde değerlendirilir. Yüksek tespit edilebilirlik puanı, düşük tespit kabiliyeti (yani hatanın fark edilmesinin zor olduğu) anlamına gelir.

Adım 3: Birincil kazanın tanımlanması

Birincil olaylar, domino etkisini başlatma potansiyeli taşıyan tehlikeli kazalardır. Tank sahasında bu olaylar, depolanan maddenin özellikleri ile tank tipine göre tanımlanır. Önceki kazalardan elde edilen verilere göre, birincil kazaların yol açtığı etkiler ikiye ayrılır: düşük şiddetli başlatıcı olay (DŞBO) ve büyük kaza olayı (BKO).

- DŞBO' lar, çoğunlukla sızıntının yol açtığı lokalize yangınlar gibi, çevredeki ekipmanlara yayılma olasılığı düşük küçük kazalardır. DŞBO' lar genellikle aynı ekipman içinde yayılır, daha derin sonuçlara yol açmaz ve kaza yayılma analizi gerektirmez.
- BKO ise fiziksel etkilerin hedef tesiste kazaya yol açtığı ve dışa doğru yayılmaya devam ettiği, daha ciddi sonuçlara ve daha geniş yaralanma kapsamına sahip kaza senaryosudur. Birleşik Krallık Güvenlik Durumu Yönetmeliği' ne göre BKO şöyle tanımlanır: (1) Çok sayıda ölüm veya ciddi yaralanmayla sonuçlanan yangın, patlama veya tehlikeli bir maddenin salımı; (2) bir yapı, tesis veya plana önemli hasar ve/veya (3) çevre üzerinde önemli olumsuz etki (Selleck ve ark., 2023).

Bu nedenle, domino etkileri analiz edilirken çoğunlukla BKO' lar birincil kaza senaryoları olarak ele alınır ve sonuçlarının ön değerlendirmesi yapılır.

DŞBO (düşük şiddetli başlatıcılar):

- Düşük oranda kimyasal sızıntı

BKO (büyük kaza olayları):

- VCE (yayılıp tutuşan ağır gaz bulutu → patlama),
- BLEVE (ısınan basınçlı tankın patlaması veya patlama+ateş topu) veya şarapnel üretmesi),
- Büyük jet / havuz yangınları**,**

En sık görülen yayılma dizileri, sırasıyla %23,7'ini oluşturan patlama→yangın ve %15,3 ile yangın→patlamadır (Xiang ve ark., 2025). Bu da çoklu kaza birleşiminin yaygın bir olgu olduğunu ortaya koymaktadır. Yangın ve patlama kazalarının sinerjik etkisi: (a) patlamanın ardından yangın; (b) yangın sırasında patlama; (c) yangının ardından patlama şeklindedir (Li ve ark., 2023b). Kaza riskinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi için domino etkisi analizinde farklı kaza türlerinin etkileşimleri tam olarak dikkate alınmalıdır. Çizelge 4.1.' de kimyasal kuruluşlarda meydana gelebilecek muhtemel domino senaryoları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kimyasal tesislerde gerçekleşebilecek muhtemel domino senaryoları (Geçer, 2024)

Senaryolar	Birincil Senaryo	Eskalasyon Vektörü	Beklenen İkincil Senaryo
Yangın ile Başlayan Domino Senaryoları	Havuz Yangını	Radyasyon ve Alev Çarpması	Jet Yangını, Havuz Yangını, BLEVE veya Toksik Yayılım
	Jet Yangını		Jet Yangını, Havuz Yangını, BLEVE veya Toksik Yayılım
	Ateş Topu		Tank Yangını
	Parlama Yangını	Alev Çarpması	Tank Yangını
Patlama ile Başlayan Domino Senaryoları	Mekanik Patlama (ME)	Parçalar ve Aşırı Basınç	Jet Yangını, Havuz Yangını, Parlama Yangını, Ateş Topu, BLEVE, Toksik Yayılım, VCE, ME, CE
	VCE		Jet Yangını, Havuz Yangını, Parlama Yangını, Ateş Topu, BLEVE, Toksik Yayılım, VCE, ME, CE
	Kapalı Patlama (CE)	Aşırı Basınç	Jet Yangını, Havuz Yangını, Parlama Yangını, Ateş Topu, BLEVE, Toksik Yayılım, VCE, ME, CE
	BLEVE	Aşırı Basınç ve Alev Çarpması	Jet Yangını, Havuz Yangını, Parlama Yangını, Ateş Topu, BLEVE, Toksik Yayılım, VCE, ME, CE
Toksik Yayılım ile Başlayan Domino Senaryoları	Toksik Yayılım	-	-

Geçmiş domino kazaları incelendiğinde LPG kimyasalının kazalara en sık dahil olduğu görülmektedir (Darbra ve ark., 2010). Bu nedenle, metodolojinin saha uygulamasının LPG içeren bir örnek kuruluşta yapılması planlamıştır.

Adım 4: Yükselme (eskalasyon) vektörlerinin analiz edilmesi ve hesaplanması

Başlıca birincil kazalar tanımlandıktan sonra, yükselme vektörü temelinde kazaların ürettiği fiziksel etkiler belirlenmeli ve çevredeki hedef ekipman üzerindeki etkileri değerlendirilmelidir. Genel olarak, domino etkisi doğrudan yükselme şeklinde kaza yükselmesini ifade eder; burada doğrudan yükselme, birincil kazasının fiziksel etkilerinin doğrudan hedef ekipmana etki etmesiyle tetiklenen kaza yükselmesi anlamına gelir. Dolaylı yükselme ise belirli fiziksel etkilerin etkisiyle kontrol kaybı yaşanması sonucu dolaylı olarak kazaların meydana gelmesidir.

Termal radyasyon, aşırı basınç ve şarapnel(parça) etki dominonun üç ana yükselme vektörüdür (Cozzani ve ark., 2006). Yükselme vektörleri genellikle Sarı Kitap'ta (Bosch ve Weterings, 1997) ve Kimyasal Proses Güvenliği Merkezi'nde (CCPS, 2010) sağlanan ampirik formüllerle hesaplanır veya Proses Tehlike Analizi Yazılım Aracı (PHAST) ve Tehlikeli Atmosferin Bölgesel Konumu (ALOHA) gibi sonuç modelleme yazılımları kullanılarak elde edilir. Tez çalışmasında, yükselme vektörü, ampirik formüller kullanılarak elde edilmiştir.

Bir yükselme vektörü olan termal radyasyon noktasal kaynak modeli ile hesaplanmıştır. Noktasal kaynak modeli, bir yangının tüm yönlere termal enerji yaydığı varsayılan bir noktayla temsil edilebileceğini kabul eder. Yayılan enerji, yanma sonucu açığa çıkan toplam enerjinin bir kısmıdır. Genellikle bu enerjinin tüm yönlere yayıldığı varsayılır. Bu nedenle, belirli bir hedefe ulaşan termal radyasyon yoğunluğu, kaynaktan olan mesafenin karesiyle ters orantılıdır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Casal, 2008:74):

$$I = \frac{Q_r}{4\pi {l_p}^2} \tag{4.1}$$

Burada:

I: termal radyasyon yoğunluğu (kW/m²),
Q_r: birim zamanda termal radyasyon olarak açığa çıkan ısı (kW),
l_p: noktasal kaynak ile hedef arasındaki mesafe (m).

Jet yangınları ve havuz yangınları için Q_r (kW), kütlesel akış hızı m (kg/s), yanma ısısı ΔH_c(kJ·kg⁻¹) ve radyatif fraksiyon η_{rad}(yanma enerjisinin termal radyasyon olarak yayılan kısmı) ile belirlenir:

$$Q_r = \eta_{rad}.m.\Delta H_c \tag{4.2}$$

Burada yanan kütle, bir gazın bir açıklıktan (delik) geçişine ait kütlesel debidir. Bu değer mekanik enerji dengesinden türetilmiş ve izentropik genişleme varsayımıyla, ayrıca bir deşarj katsayısı eklenerek aşağıdaki ifadeyle hesaplanabilir:

$$m = A_d C_D P_{Tank} \psi \sqrt{\gamma \frac{2}{\gamma+1}^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \times \frac{M_v}{Z \times T_{Tank} \times R \times 10^3}} \tag{4.3}$$

m: kütlesel debi (kg·s⁻¹),
C_D: deşarj katsayısı,
A_d: orifisin kesit alanı (m²),
Z: gazın sıkıştırılabilirlik faktörü— ideal gaz için $Z = 1$,
ψ: gazın hızına bağlı birimsiz bir faktördür.
γ: Isı kapasitelerinin oranıdır, birimsizdir.

Bir diğer yükselme vektörü aşırı basınç ise TNT eşdeğer modeliyle hesaplanmıştır. TNT eşdeğeri, belirli bir patlamanın yol açtığı hasarı belirlemek için yaygın kullanılan bir yaklaşımdır. Aynı düzeyde hasar oluşturacak TNT kütlesinin hesaplanmasına dayanır. TNT ve diğer güçlü patlayıcıların temel özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu nedenle güvenilir referans değerler olarak kabul edilir. Buhar bulutu patlamalarında, TNT eşdeğer kütle aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanabilir (Casal, 2008:125):

$$W_{TNT} = \eta \frac{M \Delta H_c}{\Delta H_{TNT}} \tag{4.4}$$

Burada:

M: buluttaki yakıtın kütlesi (kg),
ΔH_c: Yakıtın alt yanma ısısı (kJ·kg⁻¹),

η: patlama verim faktörü,
ΔH_{tnt}: TNT'nin patlama enerjisi (4680 kJ·kg^{-1}).
W_{TNT}: yükün (TNT eşdeğeri) kütlesi (kg).

TNT eşdeğer kütlesi W_{TNT}belirlendikten sonra, ölçeklendirilmiş mesafe (d_n) hesaplanmalıdır:

$$d_n = \frac{d}{{W_{TNT}}^{1/3}} \tag{4.5}$$

Burada:

d: patlamanın merkezinden, aşırı basıncın hesaplanacağı noktaya olan gerçek mesafe (m)dir.
d_n: ölçeklendirilmiş mesafe (m/kg$^{1/3}$).

Aşırı basınç ise ölçeklendirilmiş mesafeden aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir (Casal, 2008:125):

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{1}{d_n} + \frac{4}{{d_n}^2} + \frac{12}{{d_n}^3} \tag{4.6}$$

Burada:

ΔP: pik(aşırı) basıncı (Pa),
P_0: atmosfer basıncı (Pa)' dır.

Adım 5: Potansiyel ikincil birimlerin belirlenmesi

Bir birincil kazanın komşu birimlere zarar verme kapasitesi, hedef ekipmanda soğrulan/kalıcı etki eden enerjiye bağlıdır. Potansiyel ikincil birimlerin belirlenmesinde eşik değer yaklaşımı kullanılır. Domino etkisinde "eşik", bir domino etkisi kazasına neden olan en küçük fiziksel etkinin değerini ifade eder ve yükselme eşiği olarak da anılır. Yükselme vektörleri bu eşikleri aştığında, domino etkisinin ilerleyeceği kabul edilir. Literatürde, atmosferik depolama tankları için eşikler patlama aşırı basıncı 22 kPa ve yangın termal radyasyonu 15 kW/m²; basınçlı tanklar için ise sırasıyla 20 kPa ve 40 kW/m² olarak

önerilmektedir (Cozzani ve ark., 2006). Tez çalışmasında yangın ve patlama için bu eşik değerler dikkate alınmıştır.

Adım 6: Yükselme olasılıklarının hesaplanması

Kaza domino etkisi, ekipman hasar olasılığı ve sonuçlarını dikkate almalıdır; bunlar ekipmanın konumuna, kaza yükselmesinin fiziksel etkilerine ve etki süresine bağlıdır. Probit modelleri, hedef birimin yangın kaynaklı ısı radyasyonuna veya patlama kaynaklı aşırı basınca maruz kaldığında kaza yükselmesi olasılığını tahmin etmek için sıkça kullanılır.

Probit modelleriyle termal radyasyon / aşırı basınca bağlı hasar olasılığı hesaplanır.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{\frac{-u^2}{2}} du \quad (4.7)$$

Burada P, domino etkisinin yükselme (eskalasyon) olasılığıdır. Y ise eskalasyon vektörüne karşılık gelen olasılık fonksiyonudur. Bir diğer unsur olan u, standart normal dağılıma ait boyutsuz entegrasyon değişkenini temsil eder.

Domino etkili kazalarda ısı radyasyonu çoğunlukla yangından kaynaklanır. Isı radyasyonu etkisi genellikle bir "zaman transferi" gerektirir. Yangının başlaması ile hedef ekipmanın arızalanması arasındaki süre arıza zamanı (ttf – time to failure) olarak adlandırılır.

$$Y = 12{,}54 - 1{,}847 \ln(ttf) \quad (4.8)$$

Atmosferik depolama tankları için:

$$\ln(ttf) = -1{,}128 \ln(I) - 2{,}667 \times 10^{-5} V + 9{,}877 \quad (4.9)$$

Basınçlı depolama tankları için:

$$\ln(ttf) = -0{,}947 \ln(I) + 8{,}835\, V^{0.032} \quad (4.10)$$

Burada

V: Hedef ekipmanın hacmini (m^3),

ttf: ekipmanın arıza zamanı (s),

I: termal radyasyon (kW/m^2)' dur.

Domino kazalarında aşırı basınç etkisi genellikle patlamalardan kaynaklanır. Şok dalgası aşırı basıncı altındaki eşik değerine bağlı olarak, farklı ekipmanların zarar görme olasılıkları analiz edilir. Bu sayede, ekipman hasarı, basınç değerleri ve ekipman özellikleri ile güvenilir olasılıksal korelasyonlar elde edilir.

Atmosferik depolama tankları için:

$$Y = 018{,}96 + 2{,}44\ln(\Delta P) \quad (4.11)$$

Basınçlı depolama tankları için:

$$Y = -42{,}44 + 4{,}33\ln(\Delta P) \quad (4.12)$$

Burada ΔP (Pa), hedef ekipman üzerindeki pik basıncını göstermektedir.

Adım 7: Domino kaza dizisinin kurulması

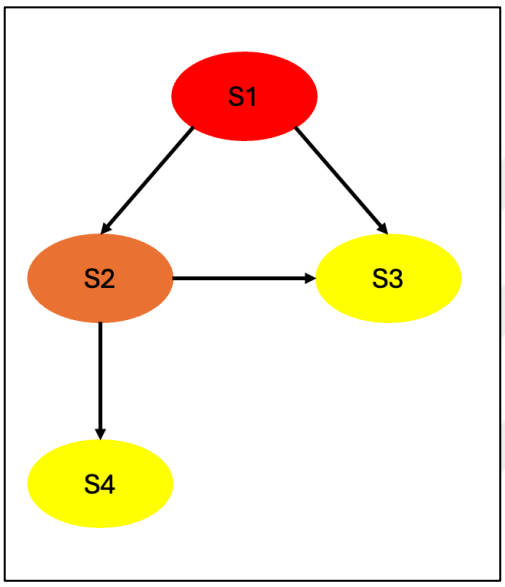
Potansiyel ikincil kaza birimleri belirlendikten sonra, birincil birim ikincil birimlerle değiştirilir ve 3., 4. seviye vb. olası birimler, Adım 3–6 tekrarlanarak belirlenir. Tesisteki tüm tanklar için bu işlem tekrarlanır. İşlemler sonunda potansiyel domino kaza dizisi oluşturulur.

Adım 8: Bayes ağının (BN) kurulması

Bayes ağı, olası domino kaza zincirine dayanarak kurulur. Tesis tank alanı içinde domino etkilerine dahil olabilecek tehlikeli tank birimleri BN'de düğümler olarak kabul edilir; farklı derecelerdeki birimler arasındaki nedensel ilişkiler yönlü oklarla gösterilir. Birincil kaza olasılıkları ve Probit modeliyle hesaplanan yükselme olasılıkları koşullu olasılık tablolarına girilir. Bayes ağının ileri ve geriye doğru çıkarımı yoluyla, tüm seviyelerde domino etkisi meydana gelme olasılıkları hesaplanır; böylece en olası domino kaza zinciri ve tank alanındaki kritik tanklar belirlenir.

Bayes ağı, bir sistemdeki olaylar veya değişkenler arasındaki olasılıksal ilişkileri gösteren grafik tabanlı bir modeldir. Düğümler ve oklardan oluşur. Her düğüm bir değişkeni temsil ederken, düğümler arasındaki oklar bu değişkenlerin birbirini nasıl etkilediğini ifade eder. Ağın yapısı, nedensel ilişkilerin açıkça gösterilmesini sağlar ve bu nedenle belirsizlik içeren

sistemlerin analizinde güçlü bir araçtır. Bayes ağında her düğüm, kendisine bağlı olan diğer düğümlerin değerlerine göre tanımlanan bir koşullu olasılık tablosu (CPT) içerir. Eğer bir düğümün ebeveyn düğümü yoksa, o düğüm için yalnızca başlangıç (prior) olasılığı tanımlanır. Eğer bir düğümün bir veya daha fazla ebeveyni varsa, bu durumda her ebeveyn kombinasyonu için koşullu olasılık değerleri belirlenir. Böylece ağ içerisinde tüm değişkenlerin ortak olasılık dağılımı, düğümlerin koşullu olasılıklarının çarpımı şeklinde ifade edilir. Örnek bir Bayes ağı Şekil 4.2' de verilmiştir.



Şekil 4.2. Bayes ağının şematik diyagramı (Yu ve ark., 2025)

Şekil 4.2'de gösterilen Bayes ağı yapısı, domino etkisinin sistem içinde nasıl ilerlediğini şematik olarak ortaya koymaktadır. Domino etkisinin bir seviyede meydana gelme olasılığı temel olarak iki bileşenin çarpımı ile ifade edilir: birincil olayın gerçekleşme olasılığı ve bir sonraki birimde yükselme sürecinin meydana gelme olasılığı. Bu ilişki Eşitlik 4.13 ile gösterilmiştir (Yu ve ark., 2025):

$$P_{Domino} = P_{Birincil} \times P_{Yükselme} \tag{4.13}$$

Şekil 4.2'de yer alan Bayes ağı dikkate alındığında, birincil seviye domino etkisinin oluşması için başlangıç düğümünün kendisine bağlı olan bir sonraki birimi etkileyebilmesi gerekir. Bu durumda birinci seviye domino etkisinin olasılığı, ilk düğümün gerçekleşme

olasılığı ile devam eden düğümün koşullu olasılığının birleşimi şeklinde hesaplanır. Bu ilişki Eşitlik 4.14 ile ifade edilmektedir:

$$P_{Birinci\ Seviye} = P(S1) \times P(S2|S1) \tag{4.14}$$

Şekil 4.2'deki yapı dikkate alındığında, ikinci seviye kaza birimleri olarak tanımlanan düğümlerin, önceki seviyedeki olaylardan kaynaklanan bileşik etkilere maruz kaldığı kabul edilir. Bu durumda, ikinci seviye domino etkisinin meydana gelme olasılığı, birincil olayın gerçekleşme olasılığı, birinci seviye birimin koşullu olasılığı ve ikinci seviye birimlerin en az birinde olayın meydana gelmesine ilişkin birleşik koşullu olasılığın çarpımı ile belirlenir.

$$P_{\text{İkinci Seviye}} = P(S_1)\, P(S_2 \mid S_1)\, P(S_3 \cup S_4 \mid S_1, S_2) \tag{4.15}$$

Bu yaklaşım, domino etkisinin yayılımının sistematik biçimde değerlendirilmesine, her seviyedeki kaza olasılığının açık bir şekilde hesaplanmasına ve olay zincirinin hangi koşullarda ilerleyebileceğinin niceliksel olarak belirlenmesine olanak sağlar (Cozzani ve ark., 2005).

4.2. Saha Uygulaması

Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik kapsamına giren üst seviyeli bir örnek kuruluşta önerilen metodolojinin saha uygulaması yapılmıştır.

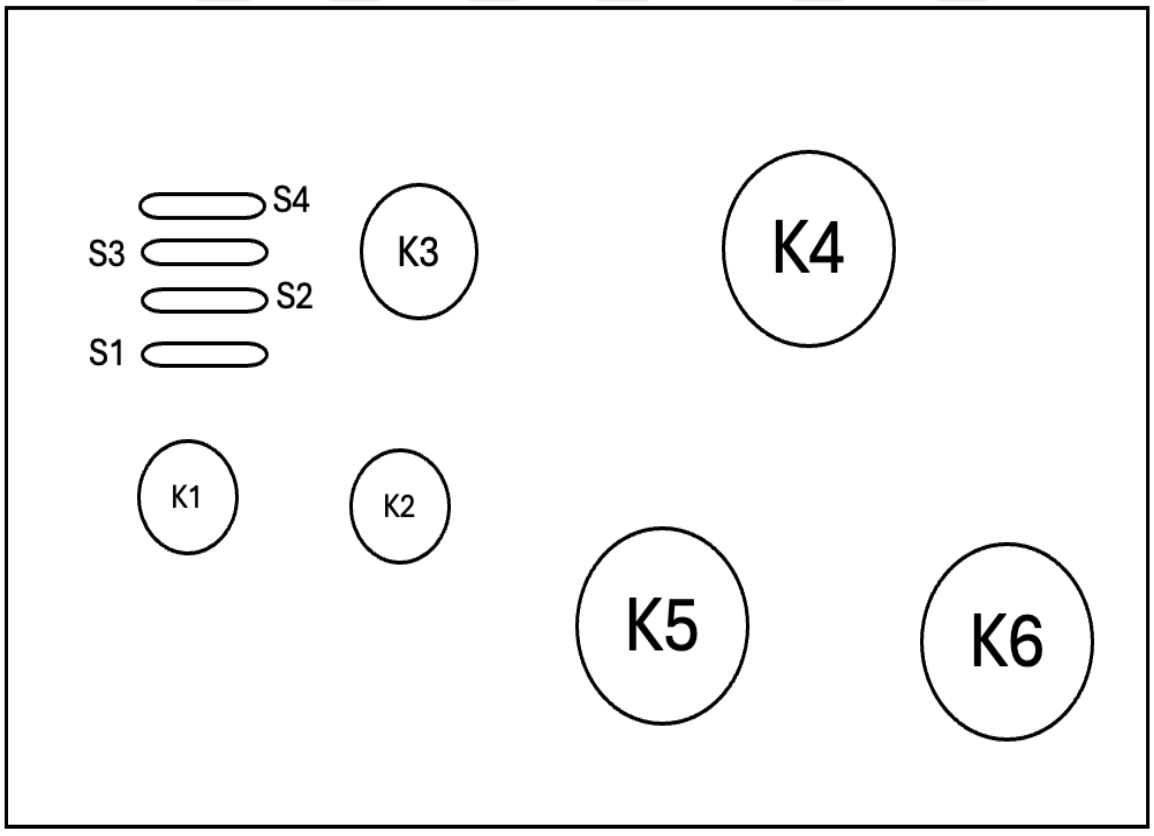
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Önerilen metodolojinin saha uygulamasına ait yapılanlar, değerlendirmeleriyle birlikte bu bölümde sunulmuştur.

5.1. Verilerin Toplanması

5.1.1. Örnek kuruluşun özellikleri

Seçilen örnek kuruluş sanayileşmenin yoğun olduğu bir bölgede Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik kapsamına giren üst seviyeli bir kuruluştur. Bu kuruluşun tank çiftliğinin yerleşim planı Şekil 5.1'de verilmiştir. Örnek kuruluşun tank çiftliğinde 4 adet silindirik, 6 adet küresel depolama tankı vardır. Kuruluş yerleşim alanında bulunan tüm depolama tanklarının özellikleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Örnek kuruluşun tank çiftliğinin yerleşim planı

Çizelge 5.1. Örnek kuruluşta bulunan tüm depolama taklarının özellikleri

Tank İsmi	Tank şekli	Kapasite (m^3)	Çap(mm)	Ürün	Basınç (kg/cm^2)	Sıcaklık (°C)	Doluluk (%)
S1	Silindirik	115	3 150	Propan	8	20	50
S2	Silindirik	115	3 150	Propan	8	20	50
S3	Silindirik	115	3 150	Propan	8	20	50
S4	Silindirik	115	3 150	Propan	8	20	50
K1	Küresel	1 000	12 410	LPG	6	21	60
K2	Küresel	1 000	12 410	LPG	6	21	60
K3	Küresel	2 000	15 635	LPG	6	21	60
K4	Küresel	5 000	21 200	LPG	6	21	60
K5	Küresel	5 000	21 200	LPG	6	21	60
K6	Küresel	5 000	21 200	Propan	8	20	60

5.1.2. Kimyasalların özellikleri

Örnek kuruluştaki tanklarda LPG ve propan depolanmaktadır. Propan (C_3H_8), üç karbonlu, renksiz ve kokusuz bir hidrokarbondur. Normal sıcaklık ve basınçta gaz halinde bulunur, ancak basınç altında kolaylıkla sıvılaştırılabilir. LPG'nin temel bileşenlerinden biridir. Fiziksel olarak havadan ağırdır bu nedenle sızıntı durumlarında yere çöker ve kapalı alanlarda birikerek patlama riski yaratır. Propanın kaynama noktası -42°C'dir; bu da onu soğuk ortamlarda bile kolaylıkla buharlaşabilen bir yakıt haline getirir (Green ve Southard, 2019).

Bütan (C_4H_{10}), LPG'nin ikinci ana bileşenidir ve genellikle propanla birlikte karışım hâlinde kullanılır. İki izomeri bulunur: n-bütan ve izobütan (metilpropandan). Her ikisi de renksiz, kokusuz ve çok kolay alevlenebilir gazlardır. Basınç altında sıvılaştırılabilen bütan, oda sıcaklığında sıvı hâlde depolanabilir, bu yüzden taşımada ve depolamada avantajlıdır. Fiziksel olarak havadan ağırdır ve yeterli havalandırma olmayan alanlarda birikebilir. Bu özellik, sızıntı durumlarında ciddi patlama tehlikesi yaratır. Bütanın kaynama noktası -0,6 °C olduğundan, propana göre buharlaşma eğilimi daha düşüktür; bu nedenle sıcak iklimlerde LPG karışımında daha fazla oranda tercih edilir. Normal hâlde kokusuz olduğundan, ticari LPG uygulamalarında tıpkı propan gibi etil merkaptan eklenerek sızıntıların kolay fark edilmesi sağlanır (Green ve Southard, 2019).

Türkiye'de yaygın olarak kullanılan LPG karışımı yaklaşık %30 propan ve %70 bütan içerir. LPG'nin yaklaşık %70 bütandan ve %30 propandan oluştuğu dikkate alınarak, modelleme çalışması yüksek bütan içeriği üzerinden yapılmıştır. LPG olarak bilinen tüm ürünler, Tehlikeli maddeler kapsamına girmekte ve "Çok Kolay Alevlenebilir" sınıfında değerlendirilmektedir (European Parliament and Council, 2008). Kimyasal açıdan LPG, hava ile belirli oranlarda karıştığında patlayıcı bir atmosfer oluşturabilir. Propan ve bütan için bazı kimyasal özellikler Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Propan ve bütan için bazı kimyasal özellikler (Green ve Southard, 2019).

	Mol Kütlesi (g/gmol)	Yanabilirlik Alt Limiti(%)	Yanabilirlik Üst Limiti (%)	Özgül Ağırlık(g/cm^3)	Parlama Sıcaklığı (°C)	Tutuşma Sıcaklığı (°C)
Propan	44,10	2,10	9,50	0,51	-102,15	449,85
n-Bütan	58,12	1,60	2,40	0,58	-74	287,85

5.2. Kazayı Başlatan Birincil Biriminin Seçilmesi

Birincil birimin belirlenmesi için RPN yöntemi uygulanmıştır. RPN hesabı için gerekli eşitlik;

Risk Öncelik Sayısı = Şiddet (S) × Olasılık (O) × Tespit Edilebilirlik (D)

RPN hesabında kullanılacak şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik değerleri sırasıyla Çizelge 5.3., Çizelge 5.4. ve Çizelge 5.5.'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Hacime göre belirlenen şiddet puanları

Şiddet Puanı	Hacim Aralığı (m^3)
1	0-50
2	51-100
3	101-300
4	301-600
5	601-900
6	901-1400
7	1401-1900
8	1901-3000
9	3001-4500
10	4501 ve üzeri

Literatürde, basınçlı kaplarda meydana gelebilecek yangın ve patlama senaryolarında ortaya çıkabilecek potansiyel enerji ve hasar büyüklüğünün, kap içindeki gaz hacmi ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, kaza sonuçlarını azaltmaya yönelik önlemler arasında envanterin ve kap hacminin azaltılması açıkça önerilmektedir (CCPS, 2010). Bu yaklaşım doğrultusunda, hacim arttıkça olası bir kazada etkilenebilecek kütlenin ve sonuç şiddetinin artacağı kabul edilmiştir. Bu nedenle RPN hesaplamasında şiddet parametresi hacim arttıkça artar. Hacim büyüdükçe olayın fiziksel sonuçları (etki mesafesi, radyasyon, aşırı basınç) katlanarak büyüdüğünden risk seviyesi de yükselmiş kabul edilir.

Çizelge 5.4. Olasılık puanları

Olasılık Puanı	Tank Şekli	Basınç Durumu
1	Küresel	Çok düşük ($1 \leq P < 3$ kgf/cm^2)
2	Küresel	Düşük ($3 \leq P < 5$ kgf/cm^2)
3	Küresel	Orta ($5 \leq P < 8$ kgf/cm^2)
4	Küresel	Yüksek ($8 \leq P < 10$ kgf/cm^2)
5	Küresel	Kritik ($P > 10$ kgf/cm^2)
6	Silindirik	Çok düşük ($1 \leq P < 3$ kgf/cm^2)
7	Silindirik	Düşük ($3 \leq P < 5$ kgf/cm^2)
8	Silindirik	Orta ($5 \leq P < 8$ kgf/cm^2)
9	Silindirik	Yüksek ($8 \leq P < 10$ kgf/cm^2)
10	Silindirik	Kritik ($P > 10$ kgf/cm^2)

Proses ekipmanlarında işletme basıncının artması, olası bir sızıntı durumunda salınan madde miktarını ve jet yangını ile buhar bulutu patlaması gibi kazaların şiddetini artırmakta; dolayısıyla basınç seviyesi kaza olasılığı ve sonuçlarının belirlenmesinde kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir (Lees, 2012).

Küresel tanklardaki çevresel gerilim silindirik tankların yarısı kadardır (Young ve Budynas, 2012). Bu nedenle küresel tankların kaçak veya patlama olasılığının, silindirik tanklara göre yaklaşık 2 kat daha düşük olduğu varsayılmıştır. RPN analizinde olasılık puanları, tank geometrisinin hacimsel gerilme dağılımına etkisi dikkate alınarak, küresel tanklar için daha düşük, silindirik tanklar için ise yaklaşık iki kat daha yüksek olacak şekilde tanımlanmıştır.

Çizelge 5.5. Tespit edilebilirlik puanları (AIAG & VDA, 2019)

D	Tespit Etme Düzeyi	Tespit Yönteminin Olgunluğu	Tespit Olanağı
10	Çok düşük	Herhangi bir test veya muayene yöntemi tanımlanmamış ya da mevcut olduğu bilinmemektedir.	Arıza türü tespit edilmez veya tespit edilmesi mümkün değildir.
9		Test veya muayene yönteminin arıza türünü tespit etmesi olası değildir.	Arıza türü, rastgele veya seyrek yapılan denetimler yoluyla kolayca tespit edilemez.
8	Düşük	Test veya muayene yöntemi etkin ve güvenilir olduğunu kanıtlamamıştır (ör. tesisin bu yöntemle ilgili deneyiminin az veya hiç olmaması).	İnsan muayenesi (görsel, dokunsal, işitsel) veya manuel ölçüm (niteliksel veya değişken) arıza türünü veya arıza nedenini tespit etmelidir.
7			Otomatik veya yarı otomatik makine tabanlı tespit (ışık, buzzer vb.) ya da koordinat ölçüm cihazı gibi muayene ekipmanları arıza türünü veya nedenini tespit etmelidir.
6	Orta	Test veya muayene yöntemi etkin ve güvenilir olduğunu kanıtlamıştır (ör. tesis deneyimi vardır).	İnsan muayenesi (görsel, dokunsal, işitsel) veya manuel ölçüm arıza türünü veya nedenini tespit eder (ürün numune kontrolleri dâhil).
5			Yarı otomatik makine tabanlı tespit (ışık, buzzer vb. bildirimlerle) veya koordinat ölçüm cihazı gibi muayene ekipmanlarının kullanımıyla arıza türü veya arıza nedeni tespit edilir (ürün numune kontrolleri dâhil).
4	Yüksek	Sistem etkin ve güvenilir olduğunu kanıtlamıştır (ör. tesisin aynı proses veya uygulama ile deneyimi vardır).	Makine tabanlı otomatik tespit yöntemi, arıza türünü prosesin ilerleyen aşamalarında (downstream) tespit eder, ileri işlemlerin devam etmesini engeller veya sistem ürünü uygunsuz olarak tanımlar ve ürünün otomatik olarak belirlenen red boşaltma alanına yönlendirilmesine olanak sağlar. Uygunsuz ürün, tesis dışına çıkışı engelleyen sağlam (robust) bir sistem ile kontrol altında tutulur.
3			Makine tabanlı otomatik tespit yöntemi, arıza türünü proses istasyonunda (in-station) tespit eder, ileri işlemlerin devam etmesini engeller veya sistem ürünü uygunsuz olarak tanımlar ve ürünün otomatik olarak belirlenen red boşaltma alanına yönlendirilmesine olanak sağlar. Uygunsuz ürün, tesis dışına çıkışı engelleyen sağlam (robust) bir sistem ile kontrol altında tutulur.
2	Çok yüksek	Tespit yöntemi etkin ve güvenilir olduğunu kanıtlamıştır (ör. tesis deneyimi vardır, hata önleyici doğrulamalar mevcuttur).	Makine tabanlı tespit yöntemi arıza nedenini tespit eder ve arızanın meydana gelmesini önler.
1	Çok yüksek	Arıza türü tasarım veya proses gereği fiziksel olarak oluşamaz veya tespit yöntemleri arıza türünü ya da arıza nedenini her zaman tespit edecek şekilde kanıtlanmıştır.	

Tespit edilebilirlik puanları, AIAG & VDA (2019) tarafından yayımlanan FMEA Handbook'ta verilen tespit edilebilirlik puanlarının yer aldığı tablo esas alınarak belirlenmiştir. Çalışmanın yürütüldüğü tesisin depolama tanklarında kritik proses parametrelerinin otomatik ve sürekli olarak izlenebilmesi nedeniyle, tespit edilebilirlik değeri 3 olarak belirlenmiştir. Bu veriler ışığında tespit edilebilirlik değeri (D=3) sabit tutularak Şekil 5.2'de görülen risk matrisi oluşturulmuştur.

Şiddet										
10	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
9	27	54	81	108	135	162	189	216	243	270
8	24	48	72	96	120	144	168	192	216	240
7	21	42	63	84	105	126	147	168	189	210
6	18	36	54	72	90	108	126	144	162	180
5	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
4	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
3	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
2	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Olasılık

Şekil 5.2 Oluşturulan risk matrisi

Çizelge 5.6. Tüm tanklar için risk öncelik sayıları

Tank	Hacim (m3)	Basınç (kgf/cm^2)	Tank Geometrisi	S	O	D	RPN	Risk Değerlendirmsi
K6	5 000	8	Küresel	10	4	3	120	En Yüksek Risk: En büyük hacim ve yüksek işletme basıncı. Domino etkisini başlatma gücü en yüksek tank.
K4	5 000	6	Küresel	10	3	3	90	Yüksek Risk: Hacim çok büyük, basınç K6'ya göre daha düşük.
K5	5 000	6	Küresel	10	3	3	90	(K4 ile aynı risk profilinde).
K3	2 000	6	Küresel	8	3	3	72	Orta-Yüksek Risk: Hacim K4'ten küçük olduğu için şiddet puanı düştü.
S1	115	8	Silindir	3	8	3	72	Orta-Yüksek Risk: Hacmi küçük (S=3) olmasına rağmen, Silindirik yapı ve Yüksek Basınç nedeniyle arıza olasılığı (O=8) yüksektir.
S2	115	8	Silindir	3	8	3	72	(S1 ile aynı risk profilinde).
S3	115	8	Silindir	3	8	3	72	(S1 ile aynı risk profilinde).
S4	115	8	Silindir	3	8	3	72	(S1 ile aynı risk profilinde).
K1	1 000	6	Küresel	6	3	3	54	Yönetilebilir Risk: Orta hacim ve düşük patlama olasılığı.
K2	1 000	6	Küresel	6	3	3	54	(K1 ile aynı risk profilinde).

Çizelge 5.6’ dan büyük hacimli ve yüksek basınçlı küresel K6 tankının en yüksek RPN değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu tank, domino etkisini başlatma potansiyeli en yüksek ekipman başka bir ifadeyle tehlikeli ekipmandır. Hacim büyüdükçe potansiyel olarak ortama salınabilecek madde miktarı artmakta, basınç yükseldikçe sızıntı veya ani kopma

ihtimali yükselmekte, bu da şiddet ve olasılık puanlarını doğrudan artırmaktadır. Küresel tank yapısı normalde olasılığı düşüren bir avantaj sağlarken, hacim ve basınç etkisi baskın olduğu için üst sıralardaki risk değerlerini engelleyememektedir. Silindirik ve küçük hacimli S1–S4 tankları ise düşük hacimden dolayı düşük şiddet puanına sahip olsalar bile yüksek işletme basıncı ve silindirik geometri nedeniyle olasılık değerleri artmakta ve orta seviyede bir risk oluşturmaktadır. Orta hacimli ve küresel geometriye sahip K1 ve K2 tankları ise daha dengeli basınç ve hacim kombinasyonları nedeniyle yönetilebilir bir risk seviyesinde yer almaktadır.

5.3. Birincil Kazanın Tanımlanması

Birincil kazanın meydana geleceği en tehlikeli ekipmanın belirlenmesinin ardından, K6 tankı için iki ayrı kaza senaryosu oluşturulmuştur.

İlk senaryoda, birincil kaza, K6 tankında oluşan bir sızıntı sonucu açığa çıkan propanın bir tutuşturucu kaynakla karşılaşmasıyla jet yangınıdır. Bu jet yangını sırasında ortaya çıkan termal radyasyon, yakın çevredeki diğer tankları etkileyerek domino etkisinin tetiklenmesine neden olabilecek bir ısı yükü oluşturmaktadır. Bu ısı termal radyasyondur.

İkinci senaryoda ise, K6 tankında meydana gelen bir çatlak nedeniyle dış ortama sızan propan, atmosferde yanıcı bir bulut oluşturmaktadır. Belirli bir zaman dilimi boyunca buhar bulutunun yayılması ve uygun konsantrasyona ulaşması sonrasında, bulutun bir tutuşturucu kaynak ile karşılaşması bir buhar bulutu patlamasına yol açmaktadır. Oluşan aşırı basınç dalgası, çevredeki diğer tanklara etki ederek yapısal hasar oluşturabilmekte ve böylece domino etkisinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

5.4. Yükselme (Eskalasyon) Vektörlerinin Analiz Edilmesi ve Hesaplanması

<u>Birinci senaryo</u>

Birinci senaryoda etki eden yükselme vektörü termal radyasyondur. Termal radyasyon, noktasal kaynak modelinde kullanılan ampirik formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Termal radyasyonu bulabilmek için öncelikle yangın sebebiyle ortaya çıkan ısıyı hesaplamak gerekir. Ortaya çıkan bu ısı bkz Eşitlik 4.2 ‘de görüldüğü gibi kütlesel debi ile ilişkilidir.

Bu sebeple öncelikle kütlesel debi hesaplanmalıdır. Kütlesel debi içinse delik çapı bilinmelidir.

$$A_d = \frac{\pi(0{,}13)^2}{4} = 0{,}01327\ m^2$$

Bu hesaplama, en tehlikeli tank olarak belirlenen K6 tankı ve ona en yakın mesafede (22 m) bulunan K5 tankı için yapılmıştır. Termal radyasyonun hesaplanması için gereken diğer tüm tanklar arası mesafeler Çizelge 5.6.'da görülmektedir. K6 tankında oluşabilecek çatlak için farklı delik çaplarıyla hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucu termal radyasyonun domino etkisini yaratabilecek eşiği (40 kW/m^2) ancak 0,13 m çapında delikle geçmeye başladığı görülmüştür. Bu nedenle termal radyasyon ile yaşanabilecek domino etkisini değerlendirmek amacıyla bu delik çapı üzerinden hesaplama yapılmıştır. Bulunan bu açıklıktan açığa çıkacak yakıtın yani propan gazının kütlesel debisi bkz. Eşitlik 4.3 kullanılarak hesaplanır.

Deşarj katsayısı, C_D, ise tam kopma durumu olduğu için $C_D = 1$ alınır.Gazın sıkıştırılabilirlik faktörü ideal gaz kabulü yapılarak Z=1 alınmıştır. ψ faktörü sonik akış durumu yani jet yangını olduğu için $\psi = 1$ alınır. Isı kapasitesi oranı, γ, propan için 1,15' tir. Bkz.Çizelge 4.1' deki operasyon koşulları dikkate alınarak kütlesel akış hızı ,

$$m = 0{,}01327\ m^2 \times 1 \times 784532\ Pa \times 1\sqrt{1{,}15\left(\frac{2}{1{,}15+1}\right)^{\frac{1.15+1}{1{,}15-1}} \times \frac{44{,}1\ kg/kmol}{1\times 293{,}15\ K \times 8{,}314 \times 10^3}}$$

$m =$ 28,28860 kg/s olarak bulunur.

Birim zamanda açığa çıkan ısı bkz. Eşitlik 4.2'den hesaplanır.

Toplam ısının hepsi radyasyon olarak yayılmaz. Bunun bir radyasyon fraksiyonu vardır. Radyasyon fraksiyon**,** η_{rad}, değeri jet yangınlarında 0,2 kabul edilir (McGrattan ve ark., 2000).

Propanın yanma ısısı ise 46000 kJ/kg'dır.

$$Q_r = 0{,}2 \times 28{,}28860\ kg/s \times 46000\ kJ/kg$$
$$Q_r = 260255{,}15300\ kW$$

Tüm değerler bkz. Eşitlik 4.1'de yerine konulup termal radyasyon değeri elde edilmiştir.

$$I = \frac{260255{,}15\ kW}{4\pi(22m)^2} = 42{,}79017\ kW/m^2$$

Burada K5 tankına etki eden değerin domino etkisi eşiğini aştığı görülmektedir. Hedef ekipmanlar üzerine etki eden termal radyasyon sırasıyla tüm tanklar için hesaplanmıştır (Çizelge 5.7).

Çizelge 5.6. Tanklar arası mesafeler

Tanklar arası mesafe (m)	K1	K2	K3	K4	K5	K6	S1	S2	S3	S4
K1	-	14,90	25,50	66,30	45,60	88,90	9,00	13,80	19,20	24,00
K2	14,90	-	14,00	41,80	18,60	61,00	17,90	21,50	25,70	29,80
K3	25,50	14,00	-	30,90	33,90	68,50	13,60	11,80	10,83	10,80
K4	66,30	41,80	30,90	-	23,50	28,90	58,50	58,20	57,60	57,45
K5	45,60	18,60	33,90	23,50	-	22,00	48,00	51,20	53,90	57,30
K6	88,90	61,00	68,50	28,90	22,00	-	88,70	91,10	92,30	94,40
S1	9,00	17,90	13,60	58,50	48,00	88,70	-	1,70	6,50	11,70
S2	13,80	21,50	11,80	58,20	51,20	91,10	1,70	-	1,70	6,50
S3	19,20	25,70	10,83	57,60	53,90	92,30	6,50	1,70	-	1,70
S4	24,00	29,80	10,80	57,45	57,30	94,40	11,70	6,50	1,70	-

Çizelge 5.7. Tüm tanklar için termal radyasyon değerleri

		Hedef Tank									
	I(kW/m^2)	K1	K2	K3	K4	K5	K6	S1	S2	S3	S4
Birincil Tank	K1	-	69,96	23,89	3,53	7,47	1,96	191,76	81,56	42,14	26,97
	K2	69,96	-	79,25	8,89	44,90	23,52	48,48	33,60	23,52	17,49
	K3	23,89	79,25	-	16,27	13,52	3,31	83,98	111,55	135,67	128,37
	K4	3,53	8,89	16,27	-	28,13	18,60	4,54	4,59	4,68	4,70
	K5	7,47	44,90	13,52	28,13	-	32,09	6,74	5,92	5,35	4,73
	K6	2,62	5,57	4,41	24,80	42,79	-	2,63	2,50	2,43	2,32
	S1	255,68	64,64	111,97	6,05	8,99	2,63	-	7166,24	490,19	151,29
	S2	108,75	44,80	148,74	6,11	7,90	2,49	7166,24	-	7166,24	490,19
	S3	56,18	31,36	180,89	6,24	7,13	2,43	490,19	7166,24	-	7166,24
	S4	35,96	23,32	171,16	6,27	6,31	2,32	151,29	490,19	7166,24	-

İkinci senaryo

İkinci senaryoda etki eden yükselme vektörü aşırı basınçtır. Bir buhar bulutu patlamasında propan gibi yanıcı bir gaz belirli bir bölgede havayla karışarak yanıcı bir bulut oluşturur. Bu bulut, bir tutuşturucu kaynakla karşılaştığında hızla yanar ve patlar**.** Bu patlama sırasında ortaya çıkan enerji, çevreye basınç dalgaları halinde yayılır. Bu basınç etkisi 4 adımda hesaplanır.

İlk adım patlayacak bulutun kütlesinin belirlenmesidir. Tankta oluşan çatlak sebebiyle belirli süre boyunca devam eden sızıntı sonucunda serbest kalan madde miktarı oluşan buhar bulutu kütlesine eşdeğer varsayılır. Bu kütleyi bulabilmek için kütlesel debi ve patlama olana kadar geçen süre bilinmelidir. Kütlesel debi içinse delik çapı bilinmelidir.

$$A_d = \frac{\pi(0{,}022)^2}{4} = 0{,}00038 m^2$$

Bu hesaplama en tehlikeli tank olarak belirlenen K6 tankında gerçekleşen buhar bulutu patlaması sonucu K5 tankına etki edecek aşırı basıncı bulmak için yapılmıştır. K6 tankında oluşabilecek çatlak için farklı delik çaplarıyla hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucu aşırı basıncın domino etkisini yaratabilecek eşiği (17 kPa) ancak 0,022 m çapında delikle geçmeye başladığı görülmüştür. Bu nedenle yaşanabilecek domino etkisini değerlendirmek amacıyla bu delik çapı üzerinden hesaplama yapılmıştır. Bu delikten açığa çıkacak propan gazının kütlesel debisi bkz. Eşitlik 4.3 kullanılarak hesaplanır.

Deşarj katsayısı, C_D, tam kopma durumu olduğu için $C_D = 1$ alınır. Gazın sıkıştırılabilirlik faktörü ideal gaz kabulü yapılarak Z=1 alınmıştır. ψ faktörü sonik akış durumu için $\psi = 1$ alınır.Isı kapasitesi oranı, γ, propan için 1,15' tir. Bkz. Çizelge 4.1.'deki operasyon koşullarından kütlesel akış hızı,

$$m = 0{,}00038\, m^2 \times 1 \times 784532\, Pa \times 1 \sqrt{1{,}15 \frac{2}{1{,}15+1}^{\frac{1.15+1}{1{,}15-1}} \times \frac{44{,}1\ kg/kmol}{1 \times 293{,}15\ K \times 8{,}314 \times 10^3}}$$

$$m = 0{,}81015\ kg/s$$

Patlamanın yaklaşık olarak 60 saniye sonra gerçekleştiği varsayımı yapılmıştır. Bu varsayım geçmişte gerçekleşmiş buhar bulutu patlamaları ve literatür verilerine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, risk değerlendirme uygulamalarında gecikmeli tutuşma için salım başlangıcından 60 s sonra tutuşma senaryosunun kullanıldığı çalışmalara dayanmaktadır (Stantec Consulting Ltd., 2023; Bain ve ark., 2012).

60 saniye sonra buhar bulutundaki yanıcı madde kütlesi;

$$M = \frac{0{,}81015kg}{s} \times 60s = 48{,}60952\ kg$$

Bu patlamada TNT eşdeğeri bkz. Eşitlik 4.4'ten hesaplanır.

Burada patlama verimi faktörü, η, %3 yani 0,03'tür (Casal, 2008:125).

$$W_{TNT} = 0{,}03\,\frac{48{,}6o952\ kg \times 46000\ kj/kg}{4680\ kj/kg} = 14{,}33357\ kg$$

Ölçeklendirilmiş mesafe (bkz. Eşitlik 4.5);

$$d_n = \frac{22\ m}{(14{,}33357\ kg)^{1/3}} = 9{,}56672\ m/kg^{1/3}$$

K6 tankındaki buhar bulutu patlaması sonucu K5 tankında oluşan aşırı basınç (bkz. Eşitlik 4.6);

$$\frac{\Delta P}{101325\ Pa} = \frac{1}{9{,}56672} + \frac{4}{9{,}56672^{\,2}} + \frac{12}{9{,}56672^{\,3}}$$

$$\Delta P = 17761{,}41664\ Pa$$

olarak hesaplanır.

Hedef ekipmanlar üzerine etki eden aşırı basınç sırasıyla tüm tanklar için hesaplanmıştır (Çizelge 5.8).

Çizelge 5.8. Tüm tanklar için aşırı basınç değerleri

		Hedef Tank									
	ΔP (kPa)	K1	K2	K3	K4	K5	K6	S1	S2	S3	S4
Birincil Tank	K1	-	27,82	12,58	3,86	5,99	2,78	67,06	31,51	18,83	13,68
	K2	27,82	-	30,77	6,65	19,74	4,25	20,91	15,97	12,45	10,21
	K3	12,58	30,77	-	9,74	8,64	3,72	32,27	41,03	48,75	46,41
	K4	3,86	6,65	9,74	-	14,08	10,63	4,46	4,49	4,54	4,56
	K5	5,99	19,74	8,64	14,08	-	15,45	5,63	5,21	4,91	4,57
	K6	3,09	4,75	4,16	12,1	17,76	-	3,1	3,01	2,97	2,89
	S1	80,76	24,25	37,95	4,99	6,32	3,10	-	4518,56	157,89	49,38
	S2	37,02	18,37	48,63	5,02	5,85	3,01	4518,56	-	4518,56	157,89
	S3	21,76	14,22	58,10	5,08	5,50	2,97	157,89	4518,56	-	4518,56
	S4	15,66	11,61	55,22	5,10	5,12	2,90	49,38	157,89	4518,56	-

5.5. Belirlenen Potansiyel İkincil Birimler ve Yükselme Olasılık Hesaplamaları

Bu aşamada, önerilen metodolojide sunulan adım 5 ve adım 6 bir arada değerlendirilmiştir. Potansiyel ikincil birimlerin belirlenmesinde eşik değer yaklaşımı kullanılmıştır. Eşikleri aşan yükselme vektörleri belirlenerek olasılık hesapları yapılmıştır. Örnek kuruluştaki depolama tanklarının hepsi basınçlıdır. Bu sebeple basınçlı tanklar için olan probit denklemler kullanılmıştır.

Birinci senaryo

Bu senaryoda, termal radyasyon için olasılık hesabı yapılmıştır. Olasılık bkz. Eşitlik 4.7'den görüldüğü Y değişkenine bağlıdır. Y değişkeni ise ttf, hacim ve termal radyasyonun fonksiyonudur. K6 tankından K5 tankına doğru olan yükselme vektörünün termal radyasyonu daha önce (Bkz. Çizelge 5.7) hesaplanmıştır.

$$\ln(ttf) = -0{,}947\ \ln(42{,}79017) + 8{,}835\ (5000m^3)^{0.032}$$
$$\ln(ttf) = 8{,}04586$$

$$Y = 12{,}54 - 1{,}847\ \times 8{,}0458$$
$$Y = -2{,}32071$$

$$P_{yükselme} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-2,32071-5} e^{\frac{-u^2}{2}} du$$

$$P_{yükselme} = 1{,}23330 \times 10^{-13}$$

Khakzad ve ark. (2013), yangın için birincil olayın olma olasılığı 1×10^{-5} olarak varsaymıştır.

$$P_{Domino} = P_{Birincil} \times P_{Yükselme}$$

$$P_{Domino} = 1 \times 10^{-5} \times 1{,}23330 \times 10^{-13}$$

$$P_{Domino} = 1{,}2331 \times 10^{-18}$$

Bu yol izlenerek tüm tanklar için yükselme vektörünün olasılığı hesaplanmıştır(Çizelge 5.9).

<u>İkinci senaryo</u>

Aşırı basınç yükselme vektörü için olasılık bkz. Eşitlik 7'den görüldüğü Y değişkenine bağlıdır. Y değişkeni aşırı basınç ile ilişkilendirilmiştir. K6 tankından K5 tankına doğru olan yükselme vektörünün aşırı basınç değeri daha önce bölüm 4.4 içerisinde hesaplanmıştır. Burada yerine konulduğunda;

$$Y = -42{,}44 + 4{,}33 \times \ln(17761{,}41664)$$

$$Y = -0{,}07189$$

$$P_{yükselme} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-0,07189-5} e^{\frac{-u^2}{2}} du$$

$$P_{yükselme} = 1{,}96946 \times 10^{-7}$$

Khakzad ve ark. (2013), buhar bulutu patlaması için birincil olayın olma olasılığı 2×10^{-6} olarak varsaymıştır.

$$P_{Domino} = P_{Birincil} \times P_{eskalasyon}$$

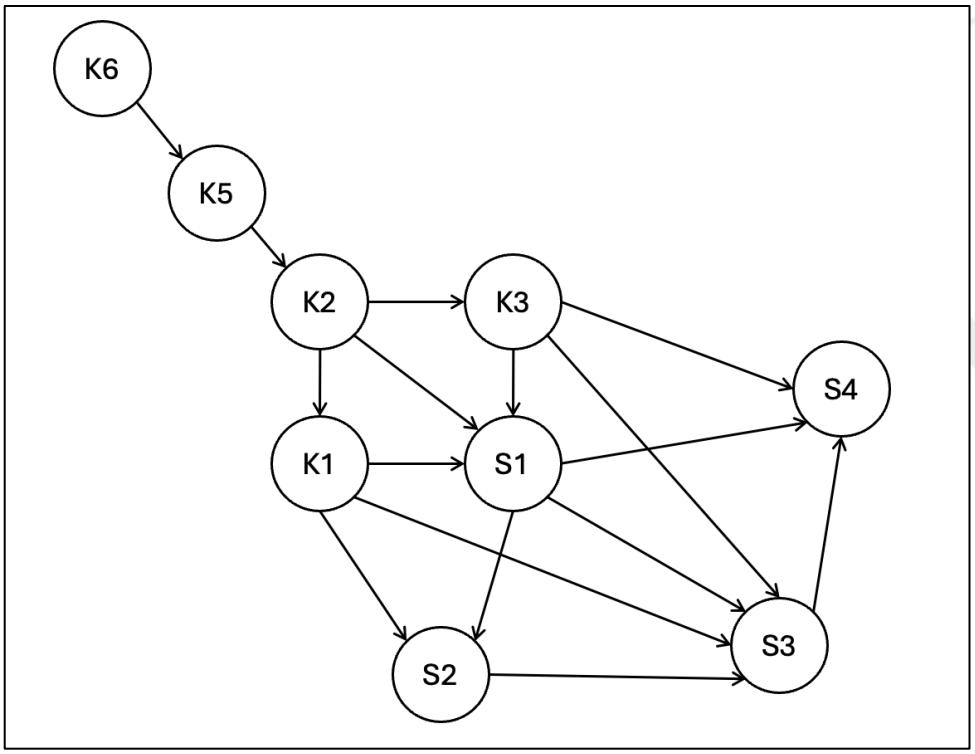
$$P_{Domino} = 2 \times 10^{-6} \times 1{,}96946 \times 10^{-7}$$

$$P_{Domino} = 3{,}93892 \times 10^{-13}$$

Bu yol izlenerek tüm tanklar için yükselme vektörünün olasılığı hesaplanmıştır (Çizelge 5.10).

5.6. Domino Kaza Dizisi ve Bayes Ağının Kurulması

Önerilen metodolojinin adım 7 ve adım 8' i burada uygulanmıştır. Bayes teoremi ve bayes ağı yardımı ile bütün tankların yükselme vektörleri her iki senaryo için hesaplanmıştır. Hesaplanan vektörlere göre tankların birbirine yükselme olasılıkları Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Yükselme vektörlerine göre öngörülen domino etkileri

Yükselme vektörleri için yükselme olasılıkları hesaplanmıştır ve her aşamada en yüksek yükselme olasılığına sahip tank ile devam ederek hesaplar yapılmıştır. Yapılan hesaplar sonucu birinci ve ikinci senaryolar için bulunan değerler sırasıyla Çizelge 5.9. ve Çizelge 5.10.'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Tüm tankların birinci senaryodaki yükselme vektörlerinin olasılıkları

Başlangıç Tankı	Hedef Tank	Termal Radyasyon (kW/m2)	Eskalasyon Olasılığı	Birincil Olayın Olasılığı	1. Seviye Domino	2. Seviye Domino	3. Seviye Domino	4. Seviye Domino	5. Seviye Domino	6. Seviye Domino	7. Seviye Domino	8. Seviye Domino
K6	K5	44,90000	1,23331E-13	1,00000E-05	1,23331E-18							
K5	K2	42,79000	2,30012E-13			2,83675E-31						
K2	K1	69,96000	3,62397E-08				1,02803E-38					
K2	K3	79,25000	1,18965E-07				3,37475E-38					
K2	S1	48,48000	8,37093E-10				2,37463E-40					
K3	S1	83,97943	1,67494E-08					5,65249E-46				
K3	S2	111,55440	2,51128E-07					8,47495E-45				
K3	S3	132,43227	1,14846E-06					3,87578E-44				
K3	S4	133,16903	1,20458E-06					4,06517E-44				
S4	S1	151,29262	3,73852E-03						1,51977E-46			
S4	S2	151,29262	3,73852E-03						1,51977E-46			
S4	S3	490,18810	2,68087E-01						1,08982E-44			
S3	S1	490,18810	2,68087E-01							2,92166E-45		
S3	S2	7166,24466	9,99977E-01							1,08979E-44		
S3	K1	56,18068	5,22713E-06							5,69662E-50		
S2	S1	7166,24466	9,99977E-01								1,08977E-44	
S2	K1	108,75051	5,72374E-04								6,23769E-48	
S1	K1	255,68453	3,94582E-02									4,30003E-46

Çizelge 5.10. Tüm tankların ikinci senaryodaki yükselme vektörlerinin olasılıkları

Başlangıç Tankı	Hedef Tank	Aşırı Basınç (Pa)	Eskalasyon Olasılığı	Birincil Olayın Olasılığı	1. Seviye Domino	2. Seviye Domino	3. Seviye Domino	4. Seviye Domino	5. Seviye Domino	6. Seviye Domino	7. Seviye Domino	8. Seviye Domino
K6	K5	20151,14524	3,01551E-06	2,00000E-06	6,03102E-12							
K5	K2	22457,21274	2,49451E-05			1,50445E-16						
K2	K1	31953,14110	5,71731E-03				8,60138E-19					
K2	K3	35446,99168	1,87713E-02				2,82404E-18					
K2	S1	23826,94465	7,24118E-05				1,08940E-20					
K3	S1	37227,90378	3,09120E-02					8,72968E-20				
K3	S2	47663,37175	2,12553E-01					6,00260E-19				
K3	S3	55661,65889	4,49911E-01					1,27057E-18				
K3	S4	55945,78168	4,58648E-01					1,29524E-18				
S4	S1	57663,04576	5,10798E-01						6,61607E-19			
S4	S2	190261,45971	9,99999E-01						1,29524E-18			
S4	S3	5718349,47447	1,0000E+00						1,29523E-18			
S3	S1	190261,45971	9,99999E-01							1,295229E-18		
S3	S2	5718349,47447	1,0000E+00							1,295230E-18		
S3	K1	24826,41249	0,00015							1,894243E-22		
S2	S1	5718349,474	1								1,29523E-18	
S2	K1	42866,90418	0,10440								1,35228E-19	
S1	K1	95640,96010	0,98672									1,27803E-18

Bu çizelgelerde görüldüğü gibi iki senaryo içinde domino dizisi aynı şekilde oluşmuştur. Bu dizi sırasıyla; K6-K5-K2-K3-S4-S3-S2-S1-K1 şeklindedir (Şekil 5.3).

Literatürde yapılan bazı senaryo bazlı domino etkisi çalışmalarında, başlangıç kaza türü (havuz yangını veya buhar bulutu patlaması) değiştirilse dahi, domino zincirinde yer alan kritik ekipmanların sıralamasının büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Özellikle Bayes ağı tabanlı analizlerde, farklı senaryolar altında hesaplanan eskalasyon olasılıkları değişmekle birlikte, belirli tank veya ekipmanların sistematik olarak daha yüksek domino potansiyeli sergilediği belirlenmiştir. Yu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı yangın ve patlama senaryoları değerlendirilmiş; ancak kritik tankların ve baskın domino dizilerinin senaryodan bağımsız olarak benzerlik gösterdiği ortaya konmuştur. Bu durum, domino etkisinin yalnızca kaza türüne değil, tesis yerleşimi, ekipman türü ve mesafe gibi yapısal faktörlere de güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir.

Bu domino dizisine katılmayan tek tankın K4 olarak belirlenmiştir. Bu tankın, diğer tanklarla arasındaki mesafe en yüksektir. Bu durum, literatürde sıkça vurgulanan mesafenin domino etkisini azaltıcı rolü ile desteklenmektedir. Domino etkisini tetikleyen temel fiziksel yükselme vektörleri olan ısı radyasyonu, aşırı basınç ve parça fırlaması, mesafe arttıkça önemli ölçüde zayıflamakta ve belirli bir eşik değerin altına düşmektedir (Cozzani ve ark., 2005). Bu nedenle, K4 tankının konumu itibarıyla maruz kaldığı fiziksel etki şiddeti, domino eşiği olarak kabul edilen aralıkların altında kalmış; böylece tank, herhangi bir ikincil arıza veya başarısızlık senaryosuyla ilişkilendirilmemiştir.

Jet yangını senaryosu için K6 tankı ile domino zincirindeki ilk hedef olan K5 tankı arasına ve zincirin ilerlediği hat üzerindeki diğer kritik noktalara, termal radyasyonun yükselme eşiği olan 40kW/m^2 değerini kesecek dayanıklı yangın duvarları veya setler gibi pasif güvenlik bariyerleri kurulabilir. Ayrıca, K6-K5-K2 hattındaki tanklar arasındaki güvenlik mesafeleri, K4 tankının konumunun sağladığı güvenli mesafeye uygun olarak yerleşim optimizasyonu (layout optimization) stratejileriyle yeniden tasarlanabilir. En yüksek riskli başlangıç birimi olan K6 tankındaki propan envanterini azaltılarak, yangın anında açığa çıkacak ısı enerjisi miktarı ve termal radyasyon yoğunluğu doğrudan düşürülebilir. Bu, RPN'deki şiddet (S) puanını düşürerek genel riski azaltır. Jet Yangını, bir sızıntının tutuşmasıyla başlar. K6 tankındaki potansiyel sızıntı noktalarına (vana, flanş, boru bağlantıları) sürekli izleme sistemleri kurulmalı ve büyük bir sızıntı durumunda akışı anında

kesmek için Acil Kapatma Sistemleri (ESD) kullanılmalıdır. Yangın söndürme kaynaklarında (su pompaları, jeneratörler, köpük stoku) yedeklilik sağlanmalıdır. Zorlu çevre koşulları (rüzgâr hızı, sıcaklık) gibi dış faktörlerin, söndürme sistemleri gibi güvenlik bariyerlerinin performansını azaltabileceği dikkate alınarak, bu sistemlerin her koşulda çalışabilirliği sağlanmalıdır (Fiorentini ve Cancelliere, 2024).

Buhar bulutu patlama senaryosu için en yüksek riskli birim olan K6 tankındaki yine propan miktarını (envanter) azaltarak, bir VCE patlamasında salınacak yakıt kütlesi ve dolayısıyla TNT eşdeğer kütlesi düşürülür. Bu, patlama sonucunda oluşacak aşırı basıncı doğrudan azaltır ve domino olasılığını düşürür. K6 tankında VCE'yi başlatan temel olay sızıntıdır. Kritik noktalara yüksek hassasiyetli gaz dedektörleri yerleştirilmeli ve sızıntı tespit edildiğinde otomatik olarak devreye girecek ESD kurulmalıdır. K4 tankının domino dizisine katılmaması, mesafenin aşırı basınca karşı en etkili pasif bariyer olduğunu göstermiştir. Domino zincirindeki en kritik transfer noktaları (Örn: K6-K5 arası) için, hesaplanan aşırı basınç eşik değerini (20kPa) aşmayacak minimum güvenlik mesafesi temel alınarak uzun vadede yerleşim optimizasyonu yapılabilir. K6 ile en yakınındaki tanklar arasına, patlamanın neden olduğu aşırı basınç dalgasını saptıracak veya emebilecek dayanıklı patlama duvarları (blast walls) inşa edilebilir. Bu duvarlar, tesisatın parça (şarapnel) etkisinden korunmasına da yardımcı olur. Kontrol odaları ve kritik boru hatları gibi tesisin merkezi unsurları, VCE senaryosunda hesaplanan aşırı basınç değerine dayanacak şekilde yapısal olarak güçlendirilmelidir. Tank çevresindeki tüm potansiyel tutuşturucu kaynaklar (elektrik ekipmanları, sıcak yüzeyler vb.) ATEX / Exproof standartlarına uygun hale getirilmeli veya tamamen uzaklaştırılmalıdır.

Risk Öncelik Sayısı (RPN) analizi ile en büyük hacme ve yüksek işletme basıncına sahip olan K6 tankı, domino etkisini başlatma potansiyeli en yüksek birim olarak tespit edilmiştir. Bu yüksek risk profili, tehlikeyi kaynağında ortadan kaldırmayı amaçlayan Doğal Güvenlik (Inherently Safer Design) ilkesini uygulamayı zorunlu kılar (Hendershot, 2012; Jinqiu ve Chen, 2023). Bu doğrultuda, K6 tankındaki propan envanteri, potansiyel kaza sonuçlarının (şiddet puanı) düşürülmesi için doluluk oranı veya depolama süresi azaltılarak minimize edilebilir. İşletme basıncının olasılık puanını artırdığı göz önüne alınarak, basınç güvenlik vanaları (psv) ve acil basınç düşürme sistemleri gibi aktif güvenlik bariyerlerinin periyodik test ve bakımları kısaltılmalı, böylece arızalanma olasılığı değerleri düşürülmelidir (CCPS,

2014). Ayrıca, yangın kaynaklı domino etkilerini yavaşlatmak amacıyla tank yüzeyine yangına dayanıklı kaplama uygulanması önerilebilir.

Yangın ve patlama senaryoları için hesaplanan yükselme olasılıkları ve domino dizisi, acil durum ekiplerinin hangi tanklara (K5, K2) ve hangi tip kazalara karşı daha hızlı ve etkili müdahale etmesi gerektiğini belirlemede kullanılacak dinamik risk bilgileri sunar. Çalışmada, termal radyasyon (jet yangını) ve aşırı basınç (buhar bulutu patlaması) olmak üzere iki senaryo için de domino dizisi elde edilmiştir. Bu dizinin ilk halkasını hedef alarak, aktif önleme sistemleri ve acil durum müdahalesi stratejik olarak güçlendirilmelidir. Domino zincirini en erken aşamada kırmak ve tankların arızaya kadar geçen süresini (ttf) uzatmak amacıyla, su püskürtme sistemleri öncelikli olarak K6 ve K5 tanklarına tahsis edilmelidir. Acil durum müdahale planları, K6-K5 bağlantısına yönelik senaryo bazlı eğitimlerle güncellenmeli ve müdahale süresinin kısaltılması hedeflenmelidir. Bu, yükselme kontrolünün gecikmesi önlenerek optimal kurtarma süresine ulaşılabilir. Ayrıca, komşu kuruluşlar varsa, harici domino etkilerini önlemek için işbirlikçi önleme stratejileri geliştirilebilir. Tehlikeli tesislerin çevresindeki yerleşim bölgelerinin imar planlamasıyla entegrasyonu için gerekli olan güvenlik mesafelerinin ve risk haritalarının oluşturulmasına katkı sağlanabilir.

Tezde önerilen ve uygulaması gerçekleştirilen QRA ve BN'yi birleştiren metodolojinin, özellikle domino etkilerinin risk analizine yönelik literatürdeki yöntemlerin iyileştirilmesine ve geliştirilmesine katkı sağlayacağı ön görülmektedir. Bayes Ağları'nın kullanılması, domino zincirindeki olayların sırası, yayılımı ve yükselme olasılıkları gibi konulardaki belirsiz bilgiyi ve bağımlılıkları modelleme yeteneği sayesinde, proses güvenliği alanında belirsizlikleri yönetme konusunda ileri bir adım sunar. Saha uygulamasıyla elde edilen nicel bulgular (termal radyasyon ve aşırı basınç değerleri, probit denklemleri ile hesaplanan yükselme olasılıkları), teorik probit modellerinin ve ampirik korelasyonların (Örn: TNT Eşdeğer Modeli) endüstriyel tesis koşullarında ne kadar tutarlı olduğunu göstermede önemli bir veri seti sağlar. Bu, gelecekteki araştırmalar için model kalibrasyonuna temel oluşturur (Casal, 2008:124).

Senaryo bazlı analiz, güvenlik bariyerlerinin (yangın duvarları, PSV'ler) performansını değerlendirme imkânı sunar ve sanayiciye hangi bariyerin hangi riske karşı daha uygun olduğu konusunda nicel veriye dayalı seçim yapma olanağı verir.

Elde edilen bulgular, domino etkili kazaların hem insan hem çevre hem de ekonomik açıdan yüksek yıkıcılığa sahip olduğunu göstererek, mevzuat yapıcılara çevresel ve toplumsal risk yönetimini bütüncül şekilde ele almanın zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, endüstriyel kuruluşlarda meydana gelen proses kazalarının domino etkileri ve bu etkilerin yayılma mekanizmaları incelenmiştir. Endüstriyel kuruluşlarda proses kazalarının domino etkilerinin risk analizine yönelik yeni bir metodoloji önerisi getirilmiştir. Metodoloji, temelde QRA ve BN'e dayanmaktadır; verilerin toplanması, birincil birimin seçimi ve kazanın tanımlanması, eskalasyon vektörlerinin analizi, ikincil birimlerin belirlenmesi, eskalasyon olasılıklarının hesaplanması ve BN kurulması adımlarını içermektedir. Önerilen metodolojinin etkinliğinin doğrulanması amacı ile saha uygulaması da yapılmıştır.

Metodoloji, İzmir'de bulunan bir LPG dolum tesisinin tank çiftliğinde uygulanmıştır. Uygulamanın yapılabilmesi için gerekli bilgiler toplanmıştır. Bu bilgiler, tank çiftliği yerleşim planı, tehlikeli madde türleri ve fizikokimyasal özellikleri ve depolama tanklarının işletim parametrelerinden oluşmaktadır. Bu veriler ışığında domino senaryosunu başlatıcı tehlikeli ekipman belirlenmiştir. Bunun için RPN modelinden yararlanılmış, böylece en riskli tank olarak K6 tankı tespit edilmişir. Literatür incelendiğinde domino etkisi başlatan birincil kazalardan en sık rastlananların yangın ve patlamalar olduğu görülmüştür. Bu sebeple iki farklı senaryo üzerinden ilerlenme kararı alınmıştır. Bu senaryolar jet yangını ve buhar bulutu patlamasıdır. Bu kazaların ürettiği fiziksel etkiler olan yükselme vektörleri (termal radyasyon ve aşırı basınç) uygun korelasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır. Potansiyel ikincil birimlerin belirlenmesi amacıyla eşik değer yaklaşımı kullanılmıştır. Basınçlı tanklar için önerilen eşik değerleri olan patlama aşırı basıncı (20 kPa) ve yangın termal radyasyonu (40 kW/m^2) üzerinde olan yükselme vektörleri için olasılıklar probit modelle hesaplanmıştır. Birincil domino etkisinden başlayarak her aşamada kazanın başladığı tankın en yüksek olasılıkla yükseldiği hedef tank seçilmiş, bu seçilen tank sıradaki domino etkisini başlatan tank olarak belirlenmiştir. Başka bir ifade ile her domino etkisinde tek tankın etkilendiği varsayımı yapılmıştır. Böylelikle her iki senaryo içinde domino dizisi belirlenmiş ve bu dizinin iki senaryo içinde aynı olduğu görülmüştür. Bu domino dizisine katılmayan tek tankın (K4), diğer tanklarla arasında en yüksek mesafeye sahip tank olduğu belirlenmiştir.

Son yıllarda dünya genelinde ve Türkiye'de meydana gelen büyük endüstriyel kazaların incelenmesi, özellikle depolama alanlarında domino etkisinin kritik bir risk unsuru olduğunu

göstermektedir. Domino etkili kazaların hem insani hem çevresel hem de ekonomik açıdan yüksek yıkıcılığa sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada ele alınan örnek kaza senaryosunda da birincil olayın komşu tanklara yayılma potansiyeli, uygun mevzuat ve tesis tasarımı bulunmadığında domino etkisinin ne kadar hızlı gelişebileceğini göstermektedir. Avrupa Birliği'nde bu tür kazaların önlenmesi amacıyla Seveso III Direktifi yürürlüktedir. Direktif, tehlikeli maddelerle çalışan tesislerde riskin sistematik biçimde değerlendirilmesi, domino tehlikelerinin analiz edilmesi ve uygun önlemlerin alınması gibi bir dizi yükümlülüğü zorunlu kılar. Türkiye'de doğrudan domino etkisini hedefleyen özel bir mevzuat bulunmamaktadır. Endüstriyel kazalara yönelik Mart 2019'da yayımlanan ve Seveso Direktifleri ile uyumlaştırılan "Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik (BEKRA)", tehlikeli maddelerin bulunduğu kuruluşlarda büyük kazaların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için temel çerçeveyi belirlemektedir. Ancak mevcut yönetmelikte domino etkisini doğrudan tanımlayan veya analizini zorunlu kılan bir madde bulunmamaktadır. Bu durum, özellikle LPG, yanıcı sıvı ve basınçlı tankların bulunduğu tesislerde domino riskinin değerlendirilmesini uygulamada tesislerin kendi inisiyatifine bırakmaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen domino etkisi QRA değerlendirmesi; jet yangını ve VCE) senaryolarının analizi, mesafe–etki ilişkilerinin incelenmesi, Bayes ağı tabanlı eskalasyon olasılıklarının hesaplanması ve farklı tankların aynı kaza senaryolarına verdiği tepkilerin karşılaştırılması aracılığıyla, mevcut yönetmeliklerde yer almayan domino etkisine odaklı teknik bir yaklaşımın mühendislik düzeyinde nasıl uygulanabileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla çalışmanın çıktıları hem ulusal mevzuatın geliştirilmesine hem de tehlikeli madde depolayan tesislerde daha güvenli yerleşim tasarımlarının oluşturulmasına, etkin acil durum planlarının hazırlanmasına, pasif ve aktif güvenlik önlemlerinin geliştirilmesine bilimsel katkı sağlayabilecek niteliktedir.

Bu çalışmada meteorolojik koşullar sabit olarak değerlendirilmiştir. Ancak, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, atmosferik stabilite sınıfı ve ortam sıcaklığı gibi meteorolojik parametrelerin, özellikle gaz yayılımının mekânsal dağılımı, bulut oluşumu ve termal etki alanlarının büyüklüğü üzerinde belirleyici etkileri olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak çalışmalarda ALOHA, PHAST, SLAB veya benzeri yayılım ve etki modelleme yazılımları kullanılarak, aynı kaza senaryolarının farklı meteorolojik koşullar altında yeniden analiz edilmesi önerilmektedir. Bu tür yazılımlar aracılığıyla, farklı rüzgâr hızları

ve atmosferik stabilite sınıfları için gaz yayılım mesafeleri, termal radyasyon seviyeleri ve aşırı basınç etki alanları daha ayrıntılı biçimde hesaplanabilir. Böylece, meteorolojik belirsizliğin domino etkisi üzerindeki rolü daha kapsamlı şekilde değerlendirilebilir.

Bu tez çalışmasında domino etkisinin nicel olarak modellenmesinde Bayes ağı yaklaşımı kullanılmıştır. Bayes ağları, kaza verilerinin sınırlı olduğu durumlarda ağ yapısı ve olasılıkların belirlenmesinde uzman görüşlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu durum, elde edilen sonuçların öznel değerlendirmelerden etkilenmesine neden olmakta ve Bayes ağı yaklaşımının temel sınırlılıkları arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, Bayes ağı yaklaşımının dinamik Bayes ağları ile genişletilmesi önerilebilir. Dinamik Bayes ağları, olayların zamana bağlı gelişimini dikkate alarak, kaza senaryolarının yalnızca oluşup oluşmadığını değil, hangi zaman aralığında ve hangi hızda ilerlediğini modelleme imkânı sunmaktadır. Bu sayede, domino etkisinin farklı aşamalarında güvenlik bariyerlerinin performansındaki değişimler, gecikmeler ve arıza olasılıkları daha gerçekçi bir biçimde temsil edilebilmektedir. Ayrıca, dinamik Bayes ağlarının kullanımı ile ısıl radyasyon, aşırı basınç ve parça fırlaması gibi eskalasyon vektörlerinin zamana bağlı etkileri ayrı ayrı değerlendirilebilecek; böylece domino etkisinin kritik eşik değerlere hangi sürede ulaştığı daha açık bir şekilde ortaya konabilecektir. Bu yaklaşım, acil durum yönetimi ve müdahale stratejilerinin zamanlama açısından optimize edilmesine de katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, gelecekteki çalışmalarda dinamik Bayes ağlarının gerçek zamanlı sensör verileri, bakım kayıtları ve işletme geçmişi ile entegre edilmesi, model sonuçlarının doğruluğunu artırabilecek önemli bir gelişme olarak değerlendirilmektedir. Bu tür veri entegrasyonları sayesinde, domino etkisi riskinin statik bir değerlendirme olmaktan çıkarılarak dinamik ve güncellenebilir bir karar destek sistemi hâline getirilmesi mümkün olabilir. Bununla birlikte, domino etkisinin yalnızca olasılıksal değil, aynı zamanda zamansal ve çok boyutlu bir problem olması nedeniyle, gelecekte yapılacak çalışmalarda Bayes ağı yaklaşımının Petri Netleri ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKK) yöntemleri gibi tamamlayıcı modelleme yaklaşımlarıyla birlikte ele alınması da önerilebilir. Petri Netleri, olayların sıralı ve zamana bağlı ilerleyişini açık bir biçimde temsil edebilmesi sayesinde, domino etkisi sürecinde kazaların tetiklenme sırası, güvenlik bariyerlerinin devreye girme anları ve olası gecikmelerin modellenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Isıl radyasyon, aşırı basınç ve parça fırlaması gibi farklı eskalasyon vektörlerinin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektiren durumlarda, ÇKKV yöntemleri kullanılarak ekipmanların, senaryoların veya

müdahale stratejilerinin göreli önceliklerinin sistematik bir biçimde belirlenmesi mümkün olabilir.

Ayrıca, bu çalışma örnek uygulamanın gerçekleştirildiği kuruluşa ait erişilebilir veriler doğrultusunda yürütülmüştür. Endüstriyel bölgelerde, bir kuruluşta meydana gelen büyük bir kazanın, tesis sınırlarını aşarak komşu kuruluşlarda yer alan depolama tankları ve proses ekipmanlarını etkileyebilme potansiyeli bulunduğu bilinmektedir. Komşu kuruluşlara ait tehlikeli madde türleri, depolama koşulları ve yerleşim bilgileri gibi ayrıntılı verilerin temin edilebilmesi hâlinde, domino etkisinin kuruluşlar arası boyutunun da nicel olarak değerlendirilmesi mümkün olabilir. Bu tür genişletilmiş analizler, özellikle endüstriyel kümelenmeler ve organize sanayi bölgeleri için bölgesel risk yönetimi, acil durum planlaması ve kuruluşlar arası koordinasyonun geliştirilmesine önemli katkılar sağlayabililir.

KAYNAKLAR

Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., Abbasi, S. A. (2010). A new method for assessing domino effect in chemical process industry. *Journal of Hazardous Materials,* 182(1-3), 416-426.

Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., Abbasi, S. A. (2011). Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(5), 575-593.

Abdolhamidzadeh, B., Rashtchian, D., Morshedi, M. (2009). *Statistical survey of domino past accidents. 8th World Congress of Chemical Engineering*, Montreal, 1-6.

Ahmadi O., Mortazavi S. B., Pasdarshahri H., Mohabadi, H. A. (2019). Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). *Process Safety and Environmental Protection,* 123, 379-389.

Alileche N., Cozzani V., Reniers G., Estel, L. (2015). Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: a review of approaches and regulations. *Reliability Engineering & System Safety,* 143, 74-84.

Alileche, N., Olivier, D., Estel, L., Cozzani, V. (2017). Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method, *Safety Science*, 97, 10-19.

Assael, M. J., Kakosimos, K. E. (2010). *Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis*. (1. Baskı). Florida: CRC Press, 76-77

Bagster, D. F., Pitblado, R. M. (1991). The estimation of domino incident frequencies an approach. *Process Safety and Environmental Protection,* 69(4), 195-199.

Bain, B., Celnik, M., Korneliussen, G. (2012, 12-15 Kasım). *Practical application of the UKOOA ignition model.* Hazards XXIII, Symposium Series No. 158, IChemE, 363–372.

Bernechea, E. J., Arnaldos, J. (2014). Optimizing the design of storage facilities through the application of ISD and QRA. *Process Safety and Environmental Protection,* 92(6), 598-615.

Bollinger, R. E., Crowl, D. A. (1997). *Inherently safer chemical processes: A life cycle approach*. (1. Baskı). New York: Wiley–AIChE, 115-126.

Bubbico, R., Mazzarotta, B. (2014, 13-16 Ekim). *Security risk assessment of process plants: The role of layout.* International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)*,* Rome, 1-6.

Casal, J. (2008). *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants*. (1. Baskı). Barselona: Elsevier, 74-128.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2010). *Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards* (2. Baskı). Hoboken: John Wiley & Sons.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2019). *Guidelines for Inherently Safer Chemical Processes*. (1. Baskı). Hoboken: John Wiley & Sons.

Chen, C., Khakzad, N., Reniers, G. (2020). Dynamic vulnerability assessment of process plants with respect to vapor cloud explosions. *Reliability Engineering & System Safety*, 200.

Chen, C., Reniers, G,. Khakzad, N. (2019). Integrating safety and security resources to protect chemical industrial parks from man-made domino effects: a dynamic graph approach. *Reliability Engineering & System Safety,* 191.

Chen, C., Reniers, G,. Khakzad, N. (2020). A thorough classification and discussion of approaches for modeling and managing domino effects in the process industries. *Safety Science*, 125.

Chen, C., Reniers, G,. Zhang, L. (2018). An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 312-324.

Chen, C., Reniers, G., and Yang, M. (2022). *Integrating Safety and Security Management to Protect Chemical Industrial Areas from Domino Effects*. Milano: Springer, 2-129.

Cincotta, S., Khakzad, N., Cozzani, V., Reniers, G. (2019). Resilience-based optimal firefighting to prevent domino effects in process plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 58, 82-89.

Coster, M. N., Hankin, R. K. (2003). Risk assessment of antagonistic hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16(6), 545-550.

Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S. (2005). The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials,* 127(1-3), 14-30.

Cozzani, V., Gubinelli, G., Salzano, E. (2006). Escalation thresholdsin the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Materials*, 129, 1-21.

Cozzani, V., Salzano, E. (2004). The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials,* 107(3), 67-80.

Çakır, C., (2020). *Büyük Endüstriyel Kazaların Domino Etkilerini Modelleme, Önleme ve Yönetme*, Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul.

Dan, S., Shin, D., Yoon, E. S. (2015). Layout optimization of LNG-liquefaction process on LNG- FPSO preventing domino effects. *Journal of Chemical Engineering of Japan,* 48(8), 646-655.

Darbra, R. M., Palacios, A., Casal, J. (2010). Domino effect in chemical accidents: main features and accident sequences. *Journal of Hazardous Materials,* 183(1-3), 565-573.

Dasgotra, A., Varun Teja, G., Sharma, A., Mishra, K. B. (2018). CFD modeling of large-scale flammable cloud dispersion using FLACS. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56, 531-536.

de Lira-Flores, J., Vázquez-Román, R., López-Molina, A., Mannan, M. S. (2014). A MINLP approach for layout designs based on the domino hazard index. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 30, 219-227.

European Commission. (1997). Council Directive 96/82/EC of 9 December 1996 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. *EC*. Luxembourg, 13–33.

European Parliament & Council of the European Union. (2008). Regulation (EC) No 1272/2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures (CLP). *EC*, Luxembourg, 1–1355.

European Parliament & Council of the European Union. (2012). Directive 2012/18/EU on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. *EC*, Luxembourg, 1–37.

Fiorentini, L., Cancelliere, P. (2024, 9-11 Ekim). *Fire Protection Systems functional safety requirements in performance-based design: proposed workflow and a simple case application*. 4th European Symposium on Fire Safety Science, Barselona, 1-6.

Gao, H., Zhang, Y., Shi, H. (2024). Assessment of overall human vulnerability to fire induced domino effects in large-scale plants. *Process Safety and Environmental Protection*, 91.

Geçer, C. (2024). *Kimyasal kuruluşlarda proses kazalarının domino etkilerine yönelik güvenlik mesafelerinin belirlenmesi.* Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

George, P. G., Renjith, V. R. (2021). Bayesian estimation and consequence modelling of deliberately induced domino effects in process facilities, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69.

Ghasemi, A. M., Nourai, F. (2017). A framework for minimizing domino effect through optimum spacing of storage tanks to serve in land use planning risk assessments. *Safety Science*, 97, 20-26.

Gomez-Mares, M., Zarate, L., Casal, J., (2008). Jet fires and the domino effect. *Fire Safety Journal*, 43(8), 583-588.

Green, D. W., Southard, M. Z. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9.Baskı). New York: McGraw-Hill Education, 2-29−2-41

Gubinelli, G., Zanelli, S., Cozzani, V. (2004). A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments. *Journal of Hazardous Materials,* 116(3), 175-187.

Guo, L., Wang, Z., (2023). Analysis of uncertainty propagation path of fire-induced domino effect based on an approach of layered fuzzy Petri nets. *Chemical Engineering Science*, 268.

Hendershot, D. C., (2012). Inherently safer design: The fundamentals. *Chemical Engineering Progress,* 108(1), 40-42.

Hauptmanns, U. (2001). A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 16(4), 307-312.

Hosseinnia, B., Khakzad, N., Reniers, G. (2018). Multi-plant emergency response for tackling majör accidents in chemical industrial areas. *Safety Science*, 102, 275-289.

Hu, H., Lan, M., Qin, R., Zhu, J. (2025). Dynamic probabilistic risk assessment considering the domino effect in chemical parks based on Monte Carlo simulation. *Process Safety and Environmental Protection,* 193, 856-873.

Janssens, J., Talarico, L., Reniers, G., Sörensen, K. (2015). A decision model to allocate protective safety barriers and mitigate domino effects. *Reliability Engineering & System Safety* 143, 44-52.

Jujuly, M., Rahman, A., Ahmed, S., Khan, F. (2015). LNG pool fire simulation for domino effect analysis. *Reliability Engineering & System Safety,* 143, 19-29.

Jung, S., Ng, D., Diaz-Ovalle, C., Vazquez-Roman, R., Mannan, M. S. (2011). New approach to optimizing the facility siting and layout for fire and explosion scenarios. *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 50(7), 3928-3937

Kadri, F., Chatelet, E. (2014). Domino Effect Analysis and Assessment of Industrial Sites: A Review of Methodologies and Software Tools, *International Journal of Computers and Distributed System*, 2(3), 1-10

Khakzad, N. (2018a). Reducing the attractiveness of chemical plants to terrorist attacks: dehorning rhinos. *Process Safety Progress,* 37(2), 150-152

Khakzad, N. (2018b). Which fire to extinguish first? A risk-informed approach to emergency response in oil terminals. *Risk Analysis*, 38(7), 1444-1454

Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., Cozzani, V., (2014). Risk management of domino effects considering dynamic consequence analysis. *Risk Analysis*, 34(6), 1128-1138

Khakzad, N., Landucci, G., Cozzani, V., Reniers, G., Pasman, H. (2018). Cost-effective fire protection of chemical plants against domino effects. *Reliability Engineering & System Safety,* 169, 412-421

Khakzad, N., Landucci, G., Reniers, G. (2017). Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects. *Reliability Engineering & System Safety,* 167, 232-247

Khakzad, N., Reniers, G. (2015). Risk-based design of process plants with regard to domino effects and land use planning. *Journal of Hazardous Materials,* 299, 289-297

Khakzad, N., Reniers, G. (2019). Low-capacity utilization of process plants: a cost-robust approach to tackle man-made domino effects. *Reliability Engineering & System Safety*, 191

Khakzad, N., Amyotte, P., Cozzani, V., Reniers, G., Pasman, H. (2018). How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 49-56

Khan, F., Ahmed, S., Yang, M., Hashemi, S. J., Caines, S., Rathnayaka, S., Oldford, D. (2015). Safety challenges in harsh environments: lessons learned. *Process Safety Progress,* 34(2), 191-195

Khan, F. I., Abbasi, S. A. (1998). Models for domino effect analysis in chemical process industries. *Process Safety Progress,* 17(2), 107-123

Khan, F. I., Abbasi, S., A. (2001). An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14(4), 283-306.

Khan, F.I., Abbasi, S. A., (1998). DOMIFFECT (DOMIno eFFECT): user-friendly software for domino effect analysis. *Environmental Modelling and Software*, 13(2), 163-177

Kletz, T. A. (2003). Inherently safer design—Its scope and future. *Process Safety and Environmental Protection*, 81(6), 401-405.

Kourniotis, S. P., Kiranoudis, C. T., Markatos, N. C., (2000). Statistical analysis of domino chemical accidents. *Journal of Hazardous Materials,* 71(1-3), 239-252.

Landucci, G., Argenti, F., Spadoni, G., Cozzani, V. (2016). Domino effect frequency assessment: the role of safety barriers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 44, 706-717.

Landucci, G., Argenti, F., Tugnoli, A., Cozzani, V. (2015). Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire. *Reliability Engineering & System Safety,* 143, 30-43.

Landucci, G., Bonvicini, S., Cozzani, V. (2017). A methodology for the analysis of domino and cascading events in oil & gas facilities operating in harsh environments. *Safety Science*, 95, 182-197.

Landucci, G., Gubinelli, G., Antonioni, G., Cozzani, V. (2009). The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis & Prevention,* 41(6), 1206-1215.

Landucci, G., Molag, M., Cozzani, V. (2009). Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires. *Journal of Hazardous Materials,* 172(1), 447-456.

Landucci, G., Reniers, G., Cozzani, V., Salzano, E. (2015). Vulnerability of industrial facilities to attacks with improvised explosive devices aimed attriggering domino scenarios. *Reliability Engineering & System Safety,* 143, 53-62.

Latifi, S. E., Mohammadi, E., Khakzad, N. (2017). Process plant layout optimization with uncertainty and considering risk. *Computers & Chemical Engineering,* 106, 224-242.

Lee, J., Kim, H., Yoon, E. S. (2006). A new approach for allocating explosive facilities in order to minimize the domino effect using NLP. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 39(7), 731-745.

Lee, J., Lee, J., Ko, J., Yoon, E. S. (2005). Optimization for allocating the explosive facilities in order to minimize optimize the domino effect using nonlinear programming. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 22(5), 649-656.

Lees, F. (2012). *Lees' Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control*. (4. Baskı). Oxford: Butterworth-Heinemann, 2523-2651

Ma, T., Zou, J., He, Y., Zhao, S., Chu, Y., Zhang, D., Huang, C. (2024). Application of domino effect quantitative risk assessment to Natech accident triggered by earthquakes in a liquor storage tank area. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 114.

McGrattan, K. B., Baum, H. R., Hamins, A. National Institute of Standards and Technology (2000). Thermal radiation from large pool fires. *NIST.* Gaithersburg. 10-11.

Mingguang, Z., Jiang, J. (2008). An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure. *Journal of Hazardous Materials,* 158(2-3), 280-286.

Moodie, K. (1988). Experiments and modelling: an overview with particular reference to fire engulfment. *Journal of Hazardous Materials,* 20, 149-175.

Mukhim, E. D., Abbasi, T., Tauseef, S. M., Abbasi, S. A. (2017). Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure—formulation of equipment-specific probits. *Process Safety and Environmental Protection,* 106, 263-273.

Mutlu, H., (2020). *Büyük Endüstriyel Kazaların Domino Etkileri ve Analizinin Bir Organize Sanayi Bölgesinde Uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul.

Necci, A., Cozzani, V., Spadoni, G., and Khan, F. (2015). Assessment of domino effect: State of the art and research needs, *Reliability Engineering & System Safety*, 143, 3-18.

Nomen, R., Sempere, J., Mariotti, V. (2014). QRA including domino effect as a tool for engineering design. *Procedia Engineering,* 84, 23-32.

Oggero, A., Darbra, R. M., Munoz, M., Planas, E., Casal, J. (2006). A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail. *Journal of Hazardous Materials,* 133(1-3), 1-7.

Olgun, P. (2019). *Bir Büyük Endüstriyel Kimyasal Depolama Tesisinde Domino Etkili Kaza Oluşumu ve Sonuçlarının Bst Metodu ve Aloha Yazılımı Kullanılarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul.

Pavlova, Y., Reniers, G. (2011). A sequential-move game for enhancing safety and security cooperation within chemical clusters. *Journal of Hazardous Materials,* 186(1), 401-406.

Qi, J., Zhang, M., Yu, G., Bo, C. (2025). Analysis and intelligent prediction of domino effect accidents in chemical storage tanks with a focus on accident chain length. *Public Library of Science ONE*, 20(9)

Raveendran, A., Renjith, V. R., Madhu, G. (2025). Dynamic analysis of synergistic domino effects due to multiple combinations of storage tanks under fire or vapour cloud explosion in a major hazardous chemical plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 96.

Reniers, G. (2010). An external domino effects investment approach to improve cross-plant safety within chemical clusters. *Journal of Hazardous Materials,* 177(1-3), 167-174.

Reniers G., Cozzani, V. (2013). *Domino effects in the process industries, modeling, prevention and managing*. (1. Baskı). Amsterdam: Elsevier, 1-200.

Reniers, G., Dullaert, W., Audenaert, A., Ale, B. J., Soudan, K. (2008). Managing domino effect-related security of industrial areas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 21(3), 336-343.

Reniers, G., Dullaert, W., Karel, S. (2009). Domino effects within a chemical cluster: a game theoretical modeling approach by using Nash-equilibrium. *Journal of Hazardous Materials,* 167(13), 289-293.

Reniers, G., Soudan, K. (2010). A game-theoretical approach for reciprocal security-related prevention investment decisions. *Reliability Engineering & System Safety,* 95(1), 1-9.

Reniers, G., Van Erp, H. N. (2016). *Operational safety economics: a practical approach focused on the chemical and process industries*. (1. Baskı). Chichester: John Wiley & Sons, 8-222.

Reniers G., Audenaert, A., (2014). Preparing for major terrorist attacks against chemical clusters: Intelligently planning protection measures w.r.t. domino effects. *Process Safety and Environmental Protection,* 92(6), 583-589.

Reniers G., Dullaert, W. (2007). DomPrevPlanning: user-friendly software for planning domino effects prevention. *Safety Science*, 45(10), 1060-1081.

Reniers G., Dullaert, W., Ale, B. J., Soudan, K. (2005). The use of current risk analysis tools evaluated towards preventing external domino accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 18(3), 119-126.

Reniers G., Sörensen, K., Khan, F., Amyotte, P. (2014). Resilience of chemical industrial areas through attenuation-based security. *Reliability Engineering & System Safety,* 131, 94-101.

Ronza, A., Felez, S., Darbra, R. M., Carol, S., Vilchez, J. A., Casal, J., (2003). Predicting the frequency of accidents in port areas by developing event trees from historical analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 16(6), 551–560.

Rum, A., Landucci, G., Galletti, C. (2018). Coupling of integral methods and CFD for modeling complex industrial accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 53, 115-128.

Salzano, E., Cozzani, V. (2006). A fuzzy set analysis to estimate loss intensity following blast wave interaction with process equipment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 19(4), 343–352.

Selleck, R. J., Cattani, M., Hassall, M. (2023). Proposal for and validation of a novel risk-based process to reduce the risk of construction site fatalities (Major Accident Prevention (MAP) program). *Safety Science*, 157.

O'Malley, D., Stantec Consulting Ltd. (2023). Quantitative Risk Assessment – Bear Head Energy Ammonia Production Facility. *Stantec*, Nova Scotia, 4-8.

So, W., Kim, Y., Lee, C. J., Shin, D., Yoon, E. S. (2011). Optimal layout of additional facilities forminimization of domino effects based on worst-case scenarios. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28(3), 656–666.

Srivastava, A., Gupta, J. P. (2010). New methodologies for security risk assessment of oil and gas industry. *Process Safety and Environmental Protection,* 88(6), 407-412.

T.C. Resmî Gazete. Büyük Endüstriyel Kazaların Kontrolü Hakkında Yönetmelik (BEKRA). 02.03.2019. Sayı:30702, Başbakanlık Basımevi, Ankara.

Tugnoli, A., Cozzani, V., Di Padova, A., Barbaresi, T., Tallone, F. (2012). Mitigation of fire damage and escalation by fireproofing: a risk-based strategy. *Reliability Engineering & System Safety,* 105, 25–35.

Tugnoli, A., Gubinelli, G., Landucci, G., Cozzani, V. (2014). Assessment of fragment projection hazard: probability distributions for the initial direction of fragments. *Journal of Hazardous Materials,* 279, 418-427.

Van Den Bosh, C. J. H., Weterings, R. A. M. P. (2005). *Methods for the calculation of physical effects (Yellow Book)*. (3. Baskı). Committee for the Prevention of Disasters, The Hague: TNO, 5.23-6.96

Young, W. C., Budynas, R. G. (2012). *Roark's Formulas for Stress and Strain*. (8. Baskı) New York: McGraw-Hill, 608-614

Yu, J., Ding, H., Wu, S., Zeng, Q., Ma, W. (2025). Risk assessment of domino effects under fire and explosion accidents in LNG storage tank farms based on Bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 93.

Zeng, T., Wei, L., Reniers, G., Chen, G. (2024). A comprehensive study for probability prediction of domino effects considering synergistic effects. *Reliability Engineering & System Safety*, 251.

Zhang, M., Zheng, F., Chen, F., Pan, W., Mo, S. (2019). Propagation probability of domino effect based on analysis of accident chain in storage tank area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62.

Zhang, X., Chen, G. (2009). The analysis of domino effect impact probability triggered by fragments. *Safety Science*, 47(7), 1026-1032.

Zhou, J., Reniers, G. (2016). Petri-net based simulation analysis for emergency response to multiple simultaneous large-scale fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 554-562.

Zhou, J., Reniers, G. (2017). Analysis of emergency response actions for preventing fire-induced domino effects based on an approach of reversed fuzzy Petri-net. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 47, 169-173.

Zhou, J., Reniers, G. (2018a). A matrix-based modeling and analysis approach for fire-induced domino effects, *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 347-353.

Zhou, J., Reniers, G. (2018b). Petri-net based evaluation of emergency response actions for preventing domino effects triggered by fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 51, 94-101.

Zhou, J., Reniers, G., Khakzad, N. (2016). Application of event sequence diagram to evaluate emergency response actions during fire-induced domino effects. *Reliability Engineering & System Safety,* 150, 202-209.



Gazili olmak ayrıcalıktır