İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYASAL TANKER TERMİNALLERİNDE OPERASYONEL RİSK DEĞERLENDİRMESİ: BÜTÜNLEŞİK AHP VE TOPSIS YÖNTEMİ İLE BİR MODEL ÖNERİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak KAPLAN

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2026

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYASAL TANKER TERMİNALLERİNDE OPERASYONEL RİSK DEĞERLENDİRMESİ: BÜTÜNLEŞİK AHP VE TOPSIS YÖNTEMİ İLE BİR MODEL ÖNERİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak KAPLAN
(512221033)

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burak ZİNCİR

HAZİRAN 2026

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

OPERATIONAL RISK ASSESSMENT IN CHEMICAL TANKER TERMINALS: A MODEL PROPOSAL USING INTEGRATED AHP AND TOPSIS METHOD

M.Sc. THESIS

Burak KAPLAN
(512221033)

Department of Maritime Transportation Engineering

Maritime Transportation Engineering Graduate Programme

Thesis Advisor: Doç. Dr. Burak ZİNCİR

JUNE 2026

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün **512221033** numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Burak KAPLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KİMYASAL TANKER TERMİNALLERİNDE OPERASYONEL RİSK DEĞERLENDİRMESİ: BÜTÜNLEŞİK AHP VE TOPSIS YÖNTEMİ İLE BİR MODEL ÖNERİSİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Burak ZİNCİR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Dr. Öğr. Üyesi Çağlar KARATUĞ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Umut TAÇ Piri Reis Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 22 Mayıs 2026
Savunma Tarihi : 17 Haziran 2026

Denize,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın tamamlanması sürecinde tespitleri, yapıcı eleştirileri ve tavsiyeleri ile çalışmama değer katan danışmanım Doç. Dr. Burak ZİNCİR hocama teşekkür ederim.

Haziran 2026

Burak KAPLAN
(Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **ix**
İÇİNDEKİLER ..... **xi**
KISALTMALAR ..... **xiii**
SEMBOLLER ..... **xv**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Problem Tanımı 3
1.3 Kapsam ve Yöntem 4
2. LİTERATÜR TARAMASI **5**
2.1 Denizyoluyla Tehlikeli Kimyasal Taşımacılığında Mevzuatsal Çerçeve ve Endüstriyel Standartlar 5
2.1.1 Çevresel risk yönetimi: GESAMP ve MARPOL 73/78 Ek II 5
2.1.2 Operasyonel emniyet için gemi inşa standartları: IBC Kod 11
2.1.3 Terminal ve tankerler için operasyonel emniyet rehberi: ISGOTT 15
2.1.4 Kimyasal yüklere özgü emniyet yönetimi rehberi: Tanker Safety Guide 16
2.1.5 Mevcut düzenlemelerin değerlendirilmesi ve literatürdeki boşluk 17
2.2 Liman ve Terminal Operasyonlarında Kritik Risk Faktörleri 18
2.2.1 Fiziksel riskler 19
2.2.1.1 Parlama noktası (flash point) ve yangın potansiyeli 19
2.2.1.2 Buhar basıncı (vapor pressure) ve uçuculuk karakteristiği 21
2.2.1.3 Statik elektrik birikimi (static accumulator) riski 24
2.2.1.4 Reaktivite ve polimerleşme tehdidi 26
2.2.2 İnsan sağlığı ve toksik maruziyet 30
2.2.2.1 Solunum toksisitesi (LC50, ppm/4h) ve akut inhalasyon riski 30
2.2.2.2 Akut Sistemik Toksisite Göstergesi (Proxy: Oral LD50)) 31
2.2.3 Çevresel riskler 32
2.2.3.1 Sucul Yaşam Akut Toksisitesi (Aquatic Acute Toxicity) 33
2.2.3.2 Biyolojik Birikim Potansiyeli (LogKow) 35
2.3 Kimyasal Tanker Terminallerinde Risk Değerlendirmesine Yönelik Akademik Çalışmalar ve Metodolojik Boşluk 37
2.3.1 Terminal risk literatürünün ana temaları ve odak kaymaları 37
2.3.2 ÇKKV yaklaşımları ve terminal bağlamında metodolojik gereksinimler 39
2.4 Tezin Metodolojik Çerçevesi: Hibrit AHP-TOPSIS Yaklaşım 42
2.4.1 Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve kriter ağırlıklarının belirlenmesi 42
2.4.2 TOPSIS yöntemi ve alternatif kimyasalların sıralanması 45
2.4.3 Hibrit AHP-TOPSIS yaklaşımının seçilme gerekçesi 48

3. HİBRİT AHP-TOPSIS MODELİNİN TERMİNAL OPERASYONLARINA UYGULANMASI 51
3.1 Araştırmanın Tasarımı ve Uygulama Adımları 51
3.2 Alternatif Kimyasal Kargoların Seçimi ve Gerekçelendirilmesi 53
3.3 Karar Matrisinin Oluşturulması ve Kriter Veri Kaynakları 56
3.4 Uzman Grubunun Belirlenmesi ve Uzmanların Mesleki Profili 63
3.5 AHP ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması ve Tutarlılık Analizi 67
3.6 TOPSIS ile Alternatiflerin Sıralanma Adımları 71
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 77
4.1 AHP Kriter Ağırlıklarına İlişkin Bulgular 77
4.2 TOPSIS Göreli Risk Sıralamasına İlişkin Bulgular 80
4.3 Duyarlılık Analizi ve Veri Atama Hassasiyetinin Test Edilmesi 83
4.3.1 Parlama noktası üst sınır atamasının etkisi 85
4.3.2 LC50 üst sınır atamasının etkisi 85
4.3.3 Kriter ağırlıklarının etkisi 85
4.3.4 OAT duyarlılık analizi 86
4.3.5 Duyarlılık analizinin genel değerlendirmesi 88
4.4 Bulguların Terminal Emniyeti Açısından Değerlendirmesi 89
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 93
5.1 Genel Sonuçlar 93
5.2 Uygulamaya Yönelik Öneriler 95
5.3 Çalışmanın Sınırlılıkları ve Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler 97
KAYNAKLAR 103
ÖZGEÇMİŞ 107

KISALTMALAR

AHP : Analitik Hiyerarşi Prosesi

ATE : Akut Toksisite Tahmini (Acute Toxicity Estimate)

BCF : Biyokonsantrasyon Faktörü (Bioconcentration Factor)

CI : Tutarlılık İndeksi (Consistency Index)

CR : Tutarlılık Oranı (Consistency Ratio)

ÇKKV : Çok Kriterli Karar Verme

ESD : Acil Durdurma (Emergency Shutdown)

GBF : Güvenlik Bilgi Formu

GESAMP : Deniz Çevresini Koruma Bilimsel Danışma Uzmanlar Grubu (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection)

GHS : Kimyasalların Sınıflandırılması ve Etiketlenmesi için Küresel Uyumlaştırılmış Sistem (Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)

HNS : Tehlikeli ve Zararlı Maddeler (Hazardous and Noxious Substances)

IBC : Dökme Kimyasallar Uluslararası Kodu (International Bulk Chemical Code)

ICSC : Uluslararası Kimyasal Güvenlik Kartları (International Chemical Safety Cards)

ICS : Uluslararası Denizcilik Odası (International Chamber of Shipping)

IEC : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)

IMO : Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization)

IMDG : Uluslararası Denizcilik Tehlikeli Yükler Kodu (International Maritime Dangerous Goods Code)

ISGOTT : Petrol Tankerleri ve Terminaller için Uluslararası Emniyet Rehberi (International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals)

KDU : Kimyasal Değerlendirme Uzmanı

LC50 : Öldürücü Konsantrasyon 50 (Lethal Concentration 50%)

LD50 : Öldürücü Doz 50 (Lethal Dose 50%)

LEL : Alt Patlama Limiti (Lower Explosive Limit)

LFL : Alt Yanıcılık Limiti (Lower Flammable Limit)

MARPOL : Denizlerin Gemiler Tarafından Kirletilmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Sözleşme (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)

NFPA : Ulusal Yangından Korunma Birliği (National Fire Protection Association)

NOEC : Gözlenen Etkisiz Konsantrasyon (No Observed Effect Concentration)

OCIMF : Petrol Şirketleri Uluslararası Denizcilik Forumu (Oil Companies International Marine Forum)

OEL : Mesleki Maruziyet Limiti (Occupational Exposure Limit)

OS : Diğer Maddeler (Other Substances)

P/V : Basınç/Vakum (Pressure/Vacuum)

PPE : Kişisel Koruyucu Donanım (Personal Protective Equipment)

QRA : Kantitatif Risk Değerlendirmesi (Quantitative Risk Assessment)

RI : Rastgelelik / Rassallık İndeksi (Random Index)

SDS : Güvenlik Bilgi Formu (Safety Data Sheet)

SIMOPS : Eşzamanlı Operasyonlar (Simultaneous Operations)

SOLAS : Denizde Can Güvenliği Uluslararası Sözleşmesi (Safety of Life at Sea)

SSSCL : Gemi/Kıyı Emniyet Kontrol Listesi (Ship/Shore Safety Check-List)

SVC : Doygun Buhar Konsantrasyonu (Saturated Vapour Concentration)

TOPSIS : İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

TWA : Zaman Ağırlıklı Ortalama (Time Weighted Average)

UEL : Üst Patlama Limiti (Upper Explosive Limit)

UFL : Üst Yanıcılık Limiti (Upper Flammable Limit)

USCG : Amerika Birleşik Devletleri Sahil Güvenliği (United States Coast Guard)

VCE : Buhar Bulutu Patlaması (Vapour Cloud Explosion)

WRI : Suyla Reaksiyon İndeksi (Water Reactivity Index)

SEMBOLLER

A	: İkili karşılaştırma matrisi
A^+	: Pozitif ideal çözüm kümesi
A^-	: Negatif ideal çözüm kümesi
a_{ij}	: i kriterinin j kriterine göre göreli önem değeri
C_i*	: i alternatifinin göreli yakınlık katsayısı
i	: Alternatif indeksi j : Kriter indeksi
log Kow	: n-oktanol/su dağılım katsayısının logaritması
m	: Alternatif sayısı
n	: Kriter sayısı / matris boyutu
r_{ij}	: Normalize karar matrisi elemanı
R	: Normalize karar matrisi
S_i^+	: i alternatifinin pozitif ideal çözüme uzaklığı
S_i^-	: i alternatifinin negatif ideal çözüme uzaklığı
v_{ij}	: Ağırlıklı normalize karar matrisi elemanı
V	: Ağırlıklı normalize karar matrisi
w	: Ağırlık vektörü
w_j	: j kriterinin ağırlığı
x_{ij}	: Karar matrisinde i alternatifinin j kriterine ilişkin değeri
X	: Karar matrisi
λmax	: Karşılaştırma matrisinin en büyük özdeğeri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : GESAMP, kimyasalların akuatik çevre etkisinin sınıflandırması (URL-2). **7**
Çizelge 2.2 : GESAMP, kimyasalların memeli toksisitesinin sınıflandırması (URL-2). **8**
Çizelge 2.3 : GESAMP, kimyasalların denizin diğer alanlarına etkisinin sınıflandırması (URL-2). **9**
Çizelge 2.4 : MARPOL Appendix I - Kimyasalların kategorizasyonu (IMO, 2022). **10**
Çizelge 2.5 : IBC Kod tehlike sınıflandırması (IMO, 2020). **12**
Çizelge 2.6 : IBC Kod gemi tipi sınıflandırması (IMO, 2020). **14**
Çizelge 2.7 : AHP'de kullanılan göreceli önem ölçeği (Zincir, 2019). **43**
Çizelge 2.8 : Rassallık indeksi (Zincir, 2019). **44**
Çizelge 3.1 : Alternatif kimyasal kargolar ve temel tanımlayıcı özellikleri. **55**
Çizelge 3.2 : AHP ve TOPSIS modellerinde kullanılacak başlangıç karar matrisi. **61**
Çizelge 3.3 : Karar problemine katkı sağlayan uzman grubunun mesleki profili. .. **64**
Çizelge 3.4 : Uzmanların ikili karşılaştırma değerlendirmeleri ve geometrik ortalamalar. **66**
Çizelge 3.5 : Birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisleri. **68**
Çizelge 3.6 : Birleştirilmiş normalize matrisler ve yerel ağırlıklar. **69**
Çizelge 3.7 : Kriterlerin ağırlıklandırılması. **70**
Çizelge 3.8 : Karşılaştırma matrislerine ilişkin tutarlılık analizi sonuçları. **70**
Çizelge 3.9 : Normalize edilmiş ve AHP ağırlıklarıyla ağırlıklandırılmış karar matrisi, pozitif ideal (A^+) ve negatif ideal (A^-) çözümler. **73**
Çizelge 3.10 : Alternatiflerin ideal çözümlere Öklid uzaklıkları, göreli yakınlık katsayıları ve nihai risk sıralaması. **74**
Çizelge 4.1 : Duyarlılık analizine göre alternatiflerin C_i değerleri ve sıralamaları. **84**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 **:** Sızıntı senaryolarında buhar basıncının kaza zincirindeki rolü: Kaynak, yayılım ve fiziksel sonuç aşamaları. **23**
Şekil 2.2 **:** Terminal operasyonlarında statik elektrik riski oluşum zinciri. **25**
Şekil 2.3 **:** Terminal operasyonlarında reaktif kargoların (monomerler ve izosiyanatlar) kaza tetikleme mekanizmaları, üst olay (top event) ve fiziksel sonuç zinciri. **29**
Şekil 4.1 **:** Duyarlılık analizine göre alternatiflerin sıralama değişimi. **84**
Şekil 4.2 **:** OAT duyarlılık analizi ile örneklemlerin sıralama değişiminin karşılaştırılması. **87**

KİMYASAL TANKER TERMİNALLERİNDE OPERASYONEL RİSK DEĞERLENDİRMESİ: BÜTÜNLEŞİK AHP VE TOPSIS YÖNTEMİ İLE BİR MODEL ÖNERİSİ

ÖZET

Kimyasal tanker terminallerinde gerçekleştirilen yükleme, tahliye ve gemi-kıyı arayüzü operasyonları; yangın, patlama, toksik maruziyet ve çevresel yayılım gibi çok boyutlu riskler içermektedir. Bununla birlikte, uluslararası düzenleyici çerçeve içerisinde kimyasal kargoların sınıflandırılması büyük ölçüde deniz çevresine olası etkileri üzerinden yapılmakta; terminal sahasında anlık olarak ortaya çıkabilecek fiziksel ve insani riskler ise aynı ölçüde bütünleşik bir karar yapısı içinde ele alınmamaktadır. Bu durum, çevresel kategorizasyon ile terminal operasyonel öncelikleri arasında bir ayrışma doğurmakta ve terminal karar vericilerinin yalnızca mevzuat temelli sınıflandırmalarla operasyonel risk önceliğini belirlemesini güçleştirmektedir. Bu tez çalışmasının amacı, kimyasal tanker terminallerinde elleçlenen seçili sıvı kimyasal kargoların göreli operasyonel risk düzeylerini, fiziksel, insan sağlığına ilişkin ve çevresel kriterleri birlikte dikkate alan bütünleşik bir model aracılığıyla değerlendirmektir.

Bu amaç doğrultusunda, Çok Kriterli Karar Verme tekniklerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir model geliştirilmiştir. Çalışmada alternatifler, MARPOL Annex II kapsamındaki farklı risk profillerini temsil edecek şekilde seçilmiş 13 kimyasal kargodan oluşmaktadır. Değerlendirme kriterleri; fiziksel riskler altında parlama noktası, buhar basıncı, reaktivite ve statik akümülatörlük; insan sağlığı boyutunda LC50 ve vekâleten kullanılan oral LD50; çevresel boyutta ise sucul yaşam toksisitesi ile biyolojik birikim potansiyelini temsil eden Log Kow olarak belirlenmiştir. Kriter ağırlıkları, üç mühendis ve üç kimyagerden oluşan, ortalama yaklaşık 15 yıllık mesleki deneyime sahip altı uzmanın görüşleriyle AHP yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen ana kriter ağırlıkları fiziksel riskler için 0,6963, insan sağlığı için 0,1609 ve çevresel riskler için 0,1429 olarak bulunmuştur. Alt kriterler içinde en yüksek küresel ağırlığın statik akümülatörlük kriterine ait olduğu görülmüştür.

AHP ile belirlenen ağırlıklar daha sonra TOPSIS analizine aktarılmış ve 13 kimyasal kargonun göreli operasyonel risk sıralaması elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre Ethyl acrylate, Hexane, Methyl ethyl ketone, Methyl acetate ve Heptane en yüksek riskli ilk beş alternatif olarak belirlenmiştir. Buna karşılık Propylene Glycol, Diethanolamine ve Phosphoric acid listenin alt sıralarında yer almıştır. Elde edilen sonuçlar, MARPOL çevresel kategorizasyonunun terminal sahasındaki operasyonel önceliklerle birebir örtüşmediğini göstermiştir. Özellikle çevresel açıdan daha düşük kategoriye sahip bazı solventlerin, fiziksel risk bileşenleri nedeniyle terminal açısından daha kritik sıralarda yer aldığı görülmüştür. Bu bulgu, terminal operasyonlarında riskin çoğu zaman uçuculuk, yanıcı atmosfer oluşumu, ateşleme

duyarlılığı ve akut inhalasyon tehlikesi gibi unsurlar etrafında şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmada ayrıca sınırlı bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve özellikle veri atama tercihlerinin alt sıralardaki alternatifler üzerinde etkili olabildiği, ancak modelin genel risk mimarisinin korunduğu görülmüştür. Sonuç olarak bu tez, kimyasal tanker terminallerinde operasyonel risk değerlendirmesinin yalnızca çevresel sınıflandırmaya bırakılmaması gerektiğini; terminal emniyetini daha gerçekçi biçimde temsil eden çok kriterli ve göreli bir önceliklendirme yaklaşımının karar süreçlerine önemli katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle geliştirilen hibrit AHP-TOPSIS modeli, terminal yönetiminde kargo kabulü, operasyon öncesi risk gözden geçirmesi, SIMOPS planlaması ve acil durum hazırlık düzeyi gibi alanlarda kullanılabilecek tamamlayıcı bir karar destek aracı niteliği taşımaktadır.

OPERATIONAL RISK ASSESSMENT IN CHEMICAL TANKER TERMINALS: A MODEL PROPOSAL USING INTEGRATED AHP AND TOPSIS METHOD

SUMMARY

Chemical tanker terminals constitute one of the most critical operational interfaces in maritime logistics, as they involve the transfer of hazardous liquid cargoes between ship and shore under conditions where fire, explosion, toxic exposure, environmental release, and operational incompatibilities may occur simultaneously. In practice, terminal operators are often required to make rapid and defensible decisions regarding cargo acceptance, operational precautions, supervision intensity, and emergency preparedness. However, the existing international regulatory framework does not always provide a decision structure directly aligned with terminal operational priorities. MARPOL Annex II and the associated GESAMP-based categorization system primarily assess liquid chemicals according to their potential impact on the marine environment, whereas terminal operations frequently confront immediate physical and human safety hazards such as flammable vapor formation, static electricity accumulation, vapor release, inhalation exposure, and runaway reaction scenarios. This creates a gap between environmental categorization and operational safety prioritization.

The present thesis was developed in response to this gap. Its main objective is to propose a comparative, multi-criteria operational risk model for selected liquid chemical cargoes handled in chemical tanker terminals. Rather than relying solely on environmental categories, the study integrates physical, human health, and environmental dimensions into a unified decision-support structure. In this respect, the thesis argues that a cargo that appears relatively less critical from an environmental regulation perspective may still represent a high operational threat at the terminal due to its physicochemical behavior, ignition sensitivity, or acute inhalation hazard. The study therefore focuses on relative operational prioritization rather than absolute hazard declaration.

To achieve this objective, a hybrid decision-making framework based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) was developed. The rationale for using AHP lies in the fact that although the values of the criteria themselves are objective laboratory- or literature-based data, the relative operational importance of these criteria in terminal conditions requires expert judgment. By contrast, TOPSIS was selected as the ranking tool because the alternative cargoes are described by heterogeneous criteria expressed in different units and scales, making direct comparison difficult without a normalization-based multi-criteria method. The hybrid structure therefore combines expert-informed weighting with a data-driven ranking procedure.

The study was designed around a purposive sample of 13 liquid chemical cargoes selected to represent both different MARPOL Annex II categories and different hazard

profiles relevant to terminal operations. These cargoes were chosen not as a random statistical sample, but as a meaningful decision set that could capture diverse operational behaviors such as high volatility, low flash point, static accumulation tendency, reactivity, inhalation toxicity, corrosive behavior, and environmental persistence. The final set included Ethyl acrylate, Hexane, Methyl ethyl ketone, Methyl acetate, Heptane, Toluene, Toluene diisocyanate, 2-Ethylhexyl acrylate, Phenol, Propylene glycol methyl ether acetate, Phosphoric acid, Diethanolamine, and Propylene Glycol.

Eight evaluation criteria were used in the model. These criteria were structured under three main dimensions. The physical risk dimension included flash point, vapor pressure, reactivity, and static accumulator behavior. The human health dimension included acute inhalation toxicity represented by LC50 and acute systemic toxicity represented, as a proxy, by oral LD50. The environmental dimension included aquatic toxicity and bioaccumulation tendency represented by Log Kow. The criteria were selected after an extensive literature review and were conceptually separated in order to avoid double counting. For example, vapor pressure was treated as an indicator of hazardous atmosphere formation potential, whereas LC50 represented the biological severity of inhalation exposure. Similarly, aquatic hazard and bioaccumulation tendency were treated as distinct environmental mechanisms.

The data matrix was constructed through a standardized data collection procedure. PubChem served as the main access platform, while the underlying source documents such as ILO-WHO International Chemical Safety Cards (ICSCs), safety data sheets, and technical product information were used for cross-checking and completion. Flash point values were standardized, as far as possible, on a closed-cup basis, and vapor pressure values were standardized at 20°C. Reactivity scores were derived from NFPA-based reactivity indicators. Static accumulation was treated as a binary criterion using the industry-accepted threshold of 50 pS/m. LC50 values were standardized to ppm/4 hours whenever possible, and oral LD50 values were used as a proxy for acute systemic toxicity due to the limited availability of comparable dermal toxicity data. Aquatic toxicity was transformed into an ordinal scale using GHS hazard statements, while Log Kow was used as a practical proxy for bioaccumulation tendency.

The AHP stage of the study was based on judgments collected from a panel of six experts, composed of three engineers and three chemists, with an average professional experience of approximately 15 years. The expert group also included one participant with IMDG Code training experience and two participants qualified in the preparation of safety data sheets/chemical assessment documentation. Pairwise comparisons were performed using Saaty's 1–9 relative importance scale, and the individual matrices were aggregated by geometric mean. Consistency ratios were calculated for the relevant matrices and were found to be within acceptable limits.

The main AHP results clearly showed that physical risks dominate expert operational perception in the terminal context. The weight of physical risks was calculated as 0.6963, followed by human health risks with 0.1609 and environmental risks with 0.1429. Within the physical dimension, static accumulator behavior emerged as the most influential criterion, followed by flash point, vapor pressure, and reactivity. Within the human health dimension, LC50 was weighted significantly higher than LD50, indicating that inhalation exposure is regarded as more critical than acute systemic exposure through physical contact in terminal conditions. Within the environmental dimension, Log Kow received a higher weight than aquatic toxicity,

suggesting that experts considered not only immediate ecotoxic effects but also longer-term environmental accumulation potential.

These findings are highly significant because they quantitatively support the thesis argument that terminal operational priorities do not fully overlap with the environmental logic of MARPOL Annex II. The expert judgments suggest that in terminal practice, the most urgent concerns are related to ignition mechanisms, vapor release, flammability, and short-term human exposure, rather than to environmental damage alone. This does not diminish the importance of MARPOL, but it indicates that environmental categorization is not sufficient by itself as an operational prioritization tool for terminal safety management.

The AHP-derived weights were then used in the TOPSIS stage to rank the 13 selected chemicals. In this study, the positive ideal solution was not interpreted as the "best" or "safest" alternative in the classical TOPSIS sense; instead, it was defined as the most critical operational risk profile. This adaptation was necessary because the objective of the thesis was to identify the cargoes requiring the highest level of operational attention in terminal conditions. Benefit-type and cost-type criteria were therefore interpreted according to risk direction rather than desirability.

The final TOPSIS results indicated that Ethyl acrylate ranked first with a final score of 0.5910, followed by Hexane (0.5886), Methyl ethyl ketone (0.5219), Methyl acetate (0.5176), and Heptane (0.5016). Toluene, Toluene diisocyanate, 2-Ethylhexyl acrylate, Phenol, Propylene glycol methyl ether acetate, Phosphoric acid, Diethanolamine, and Propylene Glycol followed in descending order. This ranking clearly showed that the chemicals appearing at the top were mostly those characterized by low flash point, significant volatility, hazardous vapor formation potential, and/or static accumulation tendency. The ranking also showed that environmental categorization and operational prioritization do not necessarily converge. For instance, chemicals categorized as Y or Z under MARPOL could rank above a Category X product when their physical terminal-related risks were more critical.

This result is one of the most important contributions of the thesis. It demonstrates that a cargo may be environmentally less restrictive according to MARPOL and still present a higher operational threat to terminal safety. In other words, environmental severity and operational immediacy represent related but distinct dimensions of chemical cargo management. The thesis therefore provides quantitative support for the idea that terminal operators need an internal operational risk lens in addition to regulatory environmental categorization.

A limited sensitivity analysis was also conducted. The most notable test concerned the flash point assignment for Phosphoric acid, a non-flammable product. Two scenarios were compared by assigning a finite high flash point value of 599 K and an extreme high value of 999 K. The results showed that the overall high-risk structure of the model remained broadly stable, while some lower-ranked alternatives changed position. This indicates that the model is relatively robust at the upper end of the ranking but more sensitive to value assignment choices among lower-risk alternatives. Such a finding is methodologically meaningful because it shows that the ranking is not arbitrary, while also highlighting the importance of transparent assumptions where direct experimental data are limited.

From an operational perspective, the findings suggest several implications. First, terminals should not treat all chemical cargoes with a uniform safety intensity. Instead, they should adopt a relative operational prioritization logic. Second, cargo acceptance

and pre-transfer risk review procedures may benefit from explicitly incorporating flash point, vapor pressure, static accumulation, reactivity, and inhalation hazard in addition to MARPOL category and general SDS information. Third, emergency planning should not focus solely on spill containment; for certain cargoes, ignition control, hazardous atmosphere isolation, vapor cloud management, and rapid operational shutdown may deserve equal or greater priority. Finally, the model supports the argument that terminal safety management should be informed by a structured multi-criteria decision approach rather than by single-parameter classification.

The thesis also has several limitations. The study is based on 13 selected cargoes rather than the full IBC Code Chapter 17 list. Some criteria required proxy values or upper-bound assignments due to incomplete data. The expert panel, while qualified and adequate for AHP purposes, was limited to six participants. The model is also static in nature and does not directly incorporate dynamic variables such as real-time weather conditions, pumping rates, operational congestion, or simultaneous activity patterns. Nevertheless, these limitations do not invalidate the model; instead, they define the context within which its results should be interpreted.

Future studies may expand the number of alternative cargoes, incorporate measured BCF values instead of Log Kow where possible, and use more systematic sensitivity analysis on both data assignments and weight structures. The model may also be re-tested through fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS, or integrated with dynamic operational data to produce a more adaptive terminal decision-support tool.

In conclusion, this thesis demonstrates that operational risk assessment in chemical tanker terminals cannot be adequately represented by environmental categorization alone. By integrating expert judgment and heterogeneous cargo data through a hybrid AHP-TOPSIS framework, the study proposes a practical and analytically transparent model for relative operational prioritization. The model does not replace existing regulations; rather, it complements them from the perspective of terminal safety and operational reality. In this sense, the thesis contributes both to the academic literature on maritime risk assessment and to the practical decision-making needs of chemical tanker terminal operations.

1. GİRİŞ

Denizyolu taşımacılığı, küresel ticaret hacminin önemli bir bölümünü oluşturarak özellikle kimyasal maddelerin büyük ölçekli ve ekonomik şekilde taşınmasında kritik bir rol üstlenmektedir (Panayides vd., 2011). Bu kapsamda sıvı kimyasal kargoların taşınması ve elleçlenmesi, çevresel etkiler, insan sağlığı riskleri ve tesis emniyeti açısından risk potansiyeli barındırmaktadır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından yayımlanan Denizlerin Gemiler Tarafından Kirletilmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Sözleşme (MARPOL 73/78) ve özellikle Ek II (Annex II), dökme hâlde taşınan zararlı sıvı maddelerin sınıflandırılmasını ve bu maddelere ilişkin operasyonel gereklilikleri düzenleyerek söz konusu risklerin azaltılmasını hedeflemektedir (URL-1).

MARPOL Annex II kapsamında yer alan kimyasal kargolar; insan sağlığına etkileri, çevresel kalıcılıkları ve sucul ortam üzerindeki toksik etkileri gibi risk kriterlerine göre Kategori X, Y, Z ve OS olarak yalnızca dört kategoriye ayrılmaktadır (URL-1). Ancak bu sınıflandırma, operasyonel karar süreçlerinde her zaman yeterli ayrıntıyı sağlayamamakta; özellikle liman tesislerinde gerçekleştirilen yükleme, tahliye, depolama ve transfer operasyonlarında kimyasallar arası göreli risk farklılıklarının daha nicel ve karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Liman tesisleri, "gemi–kıyı" arayüzünde yer almaları nedeniyle kimyasal kargo kaynaklı risklerin en yoğun şekilde hissedildiği operasyonel alanlardır (Saruchera, 2020). Hortum bağlantıları, manifold işlemleri, yükleme ve tahliye faaliyetleri ile olası sızıntı veya döküntü senaryoları; hem personel emniyeti hem de tesis çevresindeki denizel ortam açısından risk unsurları oluşturmaktadır. Bu bağlamda, kimyasal kargoların yalnızca yasal sınıflandırmalar üzerinden değil; risk tabanlı, çok kriterli ve karşılaştırmalı bir yöntemle değerlendirilmesi, liman işletmeciliği açısından önemli bir ihtiyaçtır.

Bu tez çalışmasında, MARPOL Annex II kapsamında yer alan seçilmiş kimyasal kargolar için risk tabanlı bir etki katsayısı belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında; fiziksel tehlike özellikleri, insan sağlığına yönelik maruziyet riskleri ve çevresel etkiler gibi kriterler bütüncül bir yaklaşımla ele alınmış; bu kriterlerin göreli önem düzeyleri Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılarak uzman görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Böylece, liman tesislerinde kimyasal kargo operasyonlarına yönelik daha objektif, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir bir risk değerlendirme çerçevesi oluşturulması hedeflenmiştir.

Tez sonucunda elde edilecek risk tabanlı etki katsayılarının; liman tesislerinde operasyon planlaması, kimyasal kargo kabul kriterlerinin belirlenmesi, acil durum senaryolarının geliştirilmesi ve risk azaltıcı önlemlerin önceliklendirilmesi gibi alanlarda karar vericilere destek sağlaması beklenmektedir. Bu yönüyle çalışma, mevcut mevzuat temelli yaklaşımları tamamlayıcı nitelikte olup, liman ölçeğinde uygulanabilir bir risk değerlendirme modeli sunmayı amaçlamaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, MARPOL Annex II kapsamında sınıflandırılan sıvı kimyasal kargoların, liman tesislerinde gerçekleştirilen yükleme ve boşaltma operasyonları sırasında oluşturduğu riskleri çok kriterli ve karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirerek, risk tabanlı bir etki katsayısı geliştirmektir. Mevcut yasal sınıflandırmaların, kimyasal maddeler arasındaki göreli risk farklılıklarını operasyonel düzeyde yeterince yansıtamaması nedeniyle, liman ölçeğinde uygulanabilir ve karar destek niteliği taşıyan nicel bir değerlendirme yönteminin ortaya konulması hedeflenmektedir.

Bu kapsamda, MARPOL Annex II çerçevesinde yer alan ve liman tesislerinde yaygın olarak elleçlenen seçilmiş kimyasal kargolar; insan sağlığına yönelik maruziyet riskleri, fiziksel tehlike özellikleri ve çevresel etkiler gibi üç ana risk kriteri açısından ele alınmıştır. Söz konusu kriterlerin göreli önem düzeyleri, farklı disiplinlerden uzman görüşleri doğrultusunda Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılarak belirlenmiş; böylece kriter ağırlıklarının uzman yargılarına dayalı fakat sistematik tutarlılığı sınanabilir bir şekilde hesaplanması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının bir diğer amacı, elde edilen etki katsayıları aracılığıyla kimyasal kargoların liman tesisleri açısından göreli risk sıralamasını ortaya koymak ve bu sıralamanın operasyonel karar alma süreçlerinde kullanılabilirliğini değerlendirmektir. Bu doğrultuda geliştirilen yaklaşımın; liman tesislerinde kimyasal kargo kabul kriterlerinin belirlenmesi, operasyonel önceliklendirme, risk azaltıcı tedbirlerin planlanması ve acil durum yönetimi gibi alanlara katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

Sonuç olarak bu tez, MARPOL Annex II kapsamındaki kimyasal kargoların liman tesislerinde yarattığı risklerin daha bütüncül, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir bir şekilde değerlendirilmesine yönelik metodolojik bir çerçeve sunmayı ve literatürdeki mevcut boşluğa uygulamaya dönük bir katkı sağlamayı hedeflemektedir.

1.2 Problem Tanımı

Liman tesislerinde gerçekleştirilen kimyasal elleçleme operasyonlarında, güvenlik yönetimi büyük ölçüde uluslararası regülasyonlara ve Malzeme Güvenlik Bilgi Formları (MSDS/SDS) üzerindeki verilere dayandırılmaktadır. Bu noktada karşılaşılan temel sorun, mevcut sınıflandırma sistemlerinin odak noktası ile liman operasyonel gerçekliği arasındaki “eksen kayması"dır. MARPOL Ek II çevre koruma ekseninde, IBC Kod ise gemi ve yük emniyeti ekseninde tasarlanmıştır; ancak her ikisi de terminalde ihtiyaç duyulan göreli operasyonel risk sıralamasını doğrudan sunmamaktadır ve kimyasalları “deniz ortamına döküldüğünde yaratacağı biyolojik tahribat” (biyobirikim, sucul toksisite) üzerinden kategorize etmektedirler (GESAMP, 2002).

Ancak, bir tanker terminali için birincil risk her zaman "deniz kirliliği" ile sınırlı değildir. Sahada operasyonu yürüten personel ve tesis bütünlüğü için asıl tehdit; yükün parlama noktası, buhar basıncı ve statik elektrik biriktirme kapasitesi gibi fiziksel ve kimyasal karakteristiklerinden kaynaklanan yangın, patlama ve toksisite riskleridir (International Chamber Of Shipping vd., 2020). Mevcut durumda, MARPOL sınıflandırmasına göre "Düşük Riskli" (Kategori Z veya OS) olarak etiketlenen bir kimyasal; yüksek buhar basıncı ve düşük parlama noktası nedeniyle liman sahası için "Yüksek Riskli" bir patlayıcı tehdide dönüşebilmektedir.

Bu durum, liman operasyonlarında risk yönetiminin sadece çevresel mevzuatlara (MARPOL) dayandırılmasının, tesis güvenliği açısından kapsam eksikliği

yaratabileceğini göstermektedir. MARPOL sınıflandırmasının odak noktasının 'Deniz Kirliliği' olması, yangın ve patlama gibi ani gelişen operasyonel tehditlerin önceliklendirilmesi için farklı ve tamamlayıcı bir değerlendirme modeline ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla problem; mevzuatın yetersizliği değil, mevzuatın tasarım amacının (çevre koruma), liman sahasındaki operasyonel güvenlik ihtiyaçlarından farklı bir zeminde olmasıdır.

1.3 Kapsam ve Yöntem

Bu çalışmanın kapsamı, IBC Code CH 17 listesinde yer alan ve küresel deniz ticaretinde yüksek hacimde elleçlenen, farklı tehlike profillerine sahip seçilmiş sıvı kimyasal kargolar ile sınırlandırılmıştır. Çalışma, söz konusu kimyasalların liman sahasında (manifold bağlantısı, yükleme/tahliye, depolama) yarattığı riskleri analiz etmek üzere kurgulanmıştır.

Yöntem olarak, karmaşık karar problemlerinin çözümünde kullanılan Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden AHP ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemlerinin entegre edildiği hibrit bir model benimsenmiştir. Çalışmanın metodolojik akışı iki ana fazdan oluşmaktadır:

Ağırlıklandırma Fazı (AHP): Risk kriterleri; Fiziksel Riskler (Parlama noktası, buhar basıncı, statik akümülatör, reaktivite), İnsan Sağlığı (LC50, LD50) ve Çevresel Riskler (Sucul toksisite, biyobirikim) olmak üzere üç ana boyutta ele alınmıştır. Bu kriterlerin operasyonel güvenlikteki ağırlıkları, kimyager ve mühendislerden oluşan, sektör deneyimi yüksek uzman bir grubun görüşleri doğrultusunda AHP yöntemiyle belirlenmiştir. Bu aşamada, uzman kararlarının tutarlılığı matematiksel olarak test edilmiş ve doğrulanmıştır.

Sıralama Fazı (TOPSIS): Belirlenen kriter ağırlıkları kullanılarak, pilot olarak seçilen kimyasallar "İdeal Çözüme Benzerlik" prensibine dayalı TOPSIS yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda, her bir kimyasal için 0 ile 1 arasında değişen bir "Liman Operasyonel Risk Skoru" elde edilmiştir.

Bu yöntem seçimiyle çalışma; sübjektif yargıları matematiksel bir zemine oturtmayı, sadece kalitatif değil kantitatif (sayısal) verilerle desteklenen, denetlenebilir ve dinamik bir risk hiyerarşisi oluşturmayı hedeflemektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, tezin temel problemini oluşturan kimyasal tanker terminallerindeki operasyonel risk yönetimi konusu; yasal çerçeve, teknik standartlar ve akademik çalışmalar ışığında incelenmiştir. Literatür taraması, çalışmanın metodolojisine zemin hazırlamak amacıyla "Genelden Özele" ilkesiyle üç ana eksende yapılandırılmıştır. İlk olarak, tehlikeli kimyasal taşımacılığını düzenleyen uluslararası mevzuat ve endüstriyel standartlar (MARPOL, IBC Kod, ISGOTT) analiz edilmiştir. İkinci olarak, liman sahasındaki operasyonel süreçleri tehdit eden fiziksel ve kimyasal risk faktörleri (statik elektrik, toksisite, reaktivite) detaylandırılmıştır. Son olarak, denizcilik endüstrisinde kullanılan risk değerlendirme yöntemleri incelenerek, mevcut literatürdeki "operasyonel risk sıralaması" eksikliği (gap) ve çalışmanın bu boşluğu nasıl doldurduğu ortaya konulmuştur.

2.1 Denizyoluyla Tehlikeli Kimyasal Taşımacılığında Mevzuatsal Çerçeve ve Endüstriyel Standartlar

Denizyoluyla dökme sıvı kimyasal taşımacılığı, endüstriyel hammaddelerin küresel tedarik zincirindeki akışını sağlayan stratejik bir lojistik faaliyettir. Ancak taşınan yüklerin (HNS - Hazardous and Noxious Substances) yanıcılık, toksisite, koroziflik ve çevresel kalıcılık gibi tehlikeli karakteristikleri, bu operasyonları yüksek riskli bir faaliyet alanına dönüştürmektedir. Uluslararası denizcilik endüstrisi, bu riskleri yönetmek amacıyla çok katmanlı bir güvenlik mimarisi geliştirmiştir. Bu yapı; Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) çatısı altındaki zorunlu yasal düzenlemeler ile sektör paydaşları (OCIMF, ICS) tarafından oluşturulan tamamlayıcı endüstriyel standartların (Best Practices) bütününe dayanmaktadır.

2.1.1 Çevresel risk yönetimi: GESAMP ve MARPOL 73/78 Ek II

Kimyasal yüklerin deniz ortamına verebileceği zararları önlemek amacıyla geliştirilen temel enstrüman, MARPOL 73/78 Sözleşmesi'nin Ek II (Annex II) bölümüdür. Bu düzenleme, kimyasalları operasyonel deşarj durumunda deniz ekosistemine, insan

sağlığına (deniz ürünlerinin tüketimi yoluyla) ve kıyıların kullanımına vereceği zarara göre kategorize etmektedir (URL-1).

MARPOL Ek II'de kimyasal kargolar dört ana kategoride sınıflandırılır (URL-1):

- Kategori X (Major Hazard): Denize dökülmesi durumunda büyük tehlike arz eden ve kesinlikle yasaklanan yükler.
- Kategori Y (Hazard): Deniz kaynaklarına zarar veren ve deşarjı özel sınırlamalara tabi olan yükler.
- Kategori Z (Minor Hazard): Deniz kaynaklarına küçük çaplı zarar veren ve deşarjı daha serbest sınırlamalara tabi olan yükler.
- Diğer Maddeler (OS): Zararlı kabul edilmeyen maddeler.

Kimyasalların bu kategorilere nasıl atandığı MARPOL Annex II – Appendix 1'de detaylandırılmıştır. Ancak bu kategorizasyonun mantığını tam anlamıyla yorumlayabilmek için, bu karara temel oluşturan IMO GESAMP (International Maritime Organization Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, Uluslararası Denizcilik Örgütü Deniz Çevresini Koruma Bilimsel Danışma Uzmanlar Grubu) sınıflandırmasına bakmak gerekir.

GESAMP tarafından yapılan değerlendirme sistematiği; temel olarak biyolojik birikim, biyolojik bozunma, sucul toksisite, insan (memeli) sağlığı üzerindeki akut/kronik etkiler ve deniz kullanım alanlarına müdahale parametrelerinden oluşan biyolojik ve ekolojik bir risk profili sunmaktadır.

Önemle belirtilmelidir ki, söz konusu GESAMP profili yükün çevresel ve sıhhi etkilerine odaklanmakta olup; operasyonel emniyeti ilgilendiren fiziksel tehlike parametrelerini kapsam dışı bırakmaktadır. Özellikle yükün parlama noktası (flash point), uçuculuk karakteristiklerini belirleyen buhar basıncı (vapour pressure), statik elektrik biriktirme (static accumulator) özellikleri veya polimerleşme (polymerization) gibi reaktivite riskleri, bu sınıflandırma sistemindeki A-E sütunlarında derecelendirilmemektedir. Dolayısıyla, mevcut GESAMP sınıflandırma sisteminin kapsamı, yüklerin fiziksel emniyet özelliklerinden (safety hazards) ziyade, Çizelge 2.1, Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te gösterilen deniz kirliliği ve toksisite (pollution and health hazards) profilleri ile sınırlı kalmıştır.

Çizelge 2.1 : GESAMP, kimyasalların akuatik çevre etkisinin sınıflandırması (URL-2).

SKOR	**A** Biyolojik birikim ve biyolojik bozunma			**B** Akuatik toksisite	
	A 1 Biyolojik birikim		**A 2** Biyolojik bozunma	**B 1** Akut toksisite	**B 2** Kronik toksisite
	log Pow	BCF		LC/EC/IC50 (mg/l)	NOEC (mg/l)
0	<1 veya > ca.7	Ölçülemez	R: Kolay Bozunur (Readily)	>1000	>1
1	≥1 - <2	≥1 - <10	NR**:** Kolay Bozunmaz (Not Readily)	>100 - ≤1000	>0.1 - ≤1
2	≥2 - <3	≥10 - <100		>10 - ≤100	>0.01 - ≤0.1
3	≥3 - <4	≥100 - <500		>1 - ≤10	>0.001 - ≤0.01
4	≥4 - <5	≥500 - <4000		>0.1 - ≤1	≤0.001
5	≥5 - < ca.7	>4000		>0.01 - ≤0.1	
6				≤0.01	

Çizelge 2.2 : GESAMP, kimyasalların memeli toksisitesinin sınıflandırması (URL-2).

	C Akut memeli toksisitesi			**D** Tahriş, aşınma ve uzun dönem sağlık etkileri		
SKOR	**C 1** Oral toksisite LD50/ATE (mg/kg)	**C 2** Dermal toksisite LD50/ATE (mg/kg)	**C 3** Solunum toksisitesi LC50/ATE (mg/l)	**D 1** Cilt tahrişi ve aşındırıcılığı	**D 2** Göz tahrişi ve aşındırıcılığı	**D 3** Uzun dönem sağlık etkileri
0	>2000	>2000	>20	Tahriş edici değil	Tahriş edici değil	C - Kanserojen M - Mutajenik
1	>300 - ≤2000	>1000 - ≤2000	>10 - ≤20	Orta tahriş edici	Orta tahriş edici	R - Üreme Toksisitesi Ss - Cilt Duyarlılığı Oluşturan
2	>50 - ≤300	>200 - ≤1000	>2 - ≤10	Tahriş edici	Tahriş edici	Sr - Solunum Duyarlılığı A - Aspirasyon Tehlikesi
3	>5 - ≤50	>50 - ≤200	>0.5 - ≤2	Şiddetli tahriş edici veya aşındırıcı 3A Aşındırıcı (≤4 saat) 3B Aşındırıcı (≤1 saat) 3C Aşındırıcı (≤3 dakika)	Şiddetli tahriş edici	T - Hedef Organ Toksisitesi N - Nörotoksik I - İmmünotoksik
4	≤5	≤50	≤0.5			

Çizelge 2.3 : GESAMP, kimyasalların denizin diğer alanlarına etkisinin sınıflandırması (URL-2).

E Denizin Diğer Etki Alanlarına Dair Sınıflandırma			
E 1 Tat/Koku Bozumu	**E 2** Yaban hayatı ve taban habitatları üzerindeki etkiler	Skor	**E 3** Kıyı Kullanım Alanlarına Etkisi
T (Tainting - Positive): Maddenin balık veya kabuklu deniz ürünlerinde kötü tat/koku bıraktığı testlerle kanıtlanmıştır.	**Fp:** Kalıcı Yüzer Madde (Persistent Floater)	0	Etki Yok *Uyarı yok*
NT (Not Tainting): Maddenin tat veya koku bozumu yapmadığı test edilmiştir.	**F:** Yüzer Madde (Floater)	1	Hafif Sakıncalı *Uyarı verilir, alan kapatılmaz*
	S: Batan Maddeler (Sinking Substances)	2	Orta Derecede Sakıncalı *Alanın kapatılması muhtemeldir*
		3	Çok Sakıncalı *Alan kapatılır*

MARPOL Annex II sınıflandırması ise GESAMP sınıflandırmasını daha da sadeleştirerek algoritma mantığıyla işler (IMO/GESAMP, 2019). Bir sıvı yük için önce Kategori X kriterleri (Kural 1-4) sorgulanır. Bu kriterler biyolojik birikim (Sütun A1 ≥ 4) ve biyolojik bozunma (Sütun A2=NR) gibi en kritik çevresel tehditleri içerir. Eğer madde bu kriterleri karşılamıyorsa, akut sucul toksisite (Sütun B1) değerlerinin 2 ile 4 arasında olduğu Kategori Y kriterleri (Kural 5-7) değerlendirilir. Bu koşullar da sağlanmazsa, daha düşük risk profiline sahip Kategori Z kriterleri (Kural 8-12) kontrol edilir. Hiçbir tehlike profili içermeyen maddeler ise Kural 13 uyarınca 'Diğer Maddeler (OS)' sınıfına atanır.

Çizelge 2.4 : MARPOL Appendix I - Kimyasalların kategorizasyonu (IMO, 2022).

Kural	**A 1** Biyolojik birikim	**A 2** Biyolojik bozunma	**B 1** Akut toksisite	**B 2** Kronik toksisite	**D 3** Uzun vadeli sağlık etkileri	**E 2** Deniz yaşamı ve taban habitatlarına etkiler	Kat
1			≥ 5				
2	≥ 4		4				**X**
3		NR	4				
4	≥ 4	NR					
5			4				
6			3				**Y**
7			2				
8	≥ 4	NR		0 harici			
9				≥ 1			
10						Fp, F veya S olmayan (organik değilse)	
11					CMRTNI		
12	1 ila 11 arası ve 13 numaralı kuralların kriterlerini karşılamayan herhangi bir ürün						**Z**
13	Şu özelliklere sahip tüm ürünler: A1 sütununda ≤2; A2 sütununda R; D3 sütunu boş; E2 sütununda Fp, F veya S olmayan (organik değilse); ve GESAMP Tehlike Profili'nin diğer tüm sütunlarında 0 (sıfır) olanlar.						**OS**

Bu sınıflandırma sisteminin temel parametreleri; biyobirikim (bioaccumulation), sucul toksisite ve biyolojik bozunma gibi çevresel göstergelerdir. Dolayısıyla sistemin tasarım amacı, terminal sahasındaki yangın güvenliğini sağlamaktan ziyade, deniz ekosistemini kirlilikten korumaktır.

Önemli bir diğer husus ise, MARPOL Ek II sınıflandırma algoritmasının, GESAMP Tehlike Profili'nin tamamını değil, yalnızca belirli bir alt kümesini kullanıyor olmasıdır. GESAMP profili 13 farklı alt parametreden (A1-E3) oluşurken; MARPOL kategorizasyon tablosu (Appendix I) temel olarak A1, A2, B1, B2, D3 ve E2 sütunlarına odaklanmaktadır.

Dikkat çekici bir şekilde; Akut Memeli Toksisitesi (C1-C2-C3) ve Deri/Göz Tahrişi (D1-D2) sütunları, MARPOL'ün birincil sınıflandırma mantığında belirleyici kriter olarak kullanılmamaktadır. Bu durum, MARPOL'ün risk perspektifinin 'Doğrudan Maruziyet ve İşçi Sağlığı' (Occupational Health) yerine; biyobirikim ve sucul toksisite üzerinden ilerleyen 'Çevresel Etki' (Environmental Impact) üzerine kurgulandığını göstermektedir. Liman operasyonlarında meydana gelebilecek bir sızıntıda personelin maruz kalacağı akut inhalasyon (solunum) veya temas riskleri, MARPOL'ün X, Y, Z sınıflandırma mantığında doğrudan yer almamaktadır. Bu 'seçici' yaklaşım, liman sahası ve gemi operasyonları için iş güvenliği odaklı tamamlayıcı bir risk modelinin gerekliliğini bir kez daha doğrulamaktadır.

2.1.2 Operasyonel emniyet için gemi inşa standartları: IBC Kod

Kimyasal taşımacılığının operasyonel emniyet, gemi inşa standartları ve teknik güvenlik boyutu, IMO tarafından SOLAS (Safety of Life at Sea - Denizde Can Güvenliği) Bölüm VII altında zorunlu kılınan IBC Kod (International Bulk Chemical Code) ile düzenlenmektedir. MARPOL Annex II temel olarak kimyasalların çevresel etkilerine (deniz kirliliği) odaklanırken; IBC Kod, yükün gemi personeli, gemi bütünlüğü ve operasyonel süreçler üzerindeki fiziksel ve kimyasal tehlikelerine odaklanmaktadır.

IBC Kod, dökme sıvı kimyasal taşıyan tankerlerin; yükün tehlike profiline uygun tasarım, inşa ve donanım standartlarına sahip olmasını zorunlu kılar. Kodun temel amacı, yükün taşınması, yüklenmesi ve tahliyesi sırasında oluşabilecek yangın, patlama, zehirlenme veya reaksiyon risklerini minimize etmektir.

Bu kapsamda, taşınacak kimyasalın tehlike derecesine göre gemiler üç ana tipte sınıflandırılmıştır (URL-3):

- Tip 1 Gemiler (Ship Type 1): Çevre ve güvenlik açısından çok ciddi tehlike arz eden, sızıntı durumunda felaket boyutunda etki yaratabilecek yüklerin taşınması için tasarlanmış, maksimum önleyici tedbir gerektiren gemilerdir.
- Tip 2 Gemiler (Ship Type 2): Güvenlik ve çevre açısından oldukça ciddi tehlike arz eden yükler için tasarlanmış ve bu tür yüklerin sızmasını önlemek için önemli önleyici tedbirler gerektiren gemilerdir.
- Tip 3 Gemiler (Ship Type 3): Güvenlik ve çevre açısından yeterince ciddi tehlike arz eden yükler için tasarlanmış ve hasar durumunda hayatta kalma kabiliyetini artırmak için orta derecede muhafaza gerektiren gemilerdir.

IBC Kod'un birinci bölümü içerisinde ise bu kod kapsamındaki ürünlerin tehlikeleri sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma Çizelge 2.5 üzerinde detaylandırılmıştır.

Çizelge 2.5 : IBC Kod tehlike sınıflandırması (IMO, 2020).

1. Yangın tehlikesi	**2. Sağlık tehlikesi**	**3. Reaktivite tehlikesi**	**4. Deniz kirliliği tehlikesi**
(parlama noktası, LEL-UEL aralığı, kendine kendine tutuşma sıcaklığı gibi)	2.1. Ciltteki aşındırıcı etkisi	3.1. Su ile	4.1. Biyolojik birikim
	2.2. Akut toksik etki (LD50, LC50)	3.2. Hava ile	4.2. Biyolojik bozunma güçlüğü
	2.3. Diğer sağlık etkileri (kanserojen, cilt/solunum duyarlılığı vb)	3.3. Diğer ürünler ile	4.3. Sucul akut toksisite
		3.4. Ürünün kendisi ile (polimerizasyon gibi)	4.4. Sucul kronik toksisite
			4.5. Uzun dönem sağlık etkileri
			4.6. Ürünün yüzmesi veya batması gibi fiziksel özellikler

IBC Code, Çizelge 2.5'te özetlenen bu tehlike profillerini, gemi inşasında somut teknik gerekliliklere dönüştürmektedir. Kodun Bölüm 17 (Asgari Gereklilikler Özeti) tablosu, her bir kimyasal için; yükün parlama noktası, LC50 toksisite değeri ve reaktivite özelliklerini baz alarak gemi tipini (Tip 1, 2, 3), tank tipini, havalandırma sistemini (açık/kontrollü) ve yangınla mücadele yöntemini (alkole dirençli köpük vb.) belirler.

Tip 1 Gemi Zorunluluğu: En sıkı koruma gerektiren bu kategoriye, Çizelge 2.6'da belirtilen Kural 1 veya Kural 2 şartlarını sağlayan veya aşağıdaki aşırı güvenlik tehlikesi limitlerini aşan yükler atanır (IMO, 2020):

- Aşırı Solunum Toksisitesi: İnhalasyon LC50/ATE ≤ 0.5 mg/L/4h ve yüksek uçuculuk oranı (SVC/LC50 ≥ 20).
- Aşırı Dermal Toksisite: Dermal LD50/ATE ≤ 50 mg/kg.
- Yüksek Reaktivite: Suyla Reaksiyon İndeksi (WRI) = 3 (Su ile temasında büyük miktarda toksik veya yanıcı gaz çıkaranlar).
- Düşük Tutuşma Sıcaklığı: Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (Auto-ignition temperature) ≤ 65ºC.
- Patlama Riski: Havadaki patlama aralığı ≥ %50 v/v ve Parlama Noktası < 23ºC.

Tip 2 Gemi Zorunluluğu: Tip 1 kadar ekstrem olmamakla birlikte, standart tankerlerle taşınamayacak yükler bu gruba atanır. Bir yükün bu sınıfa girmesi için, Çizelge 2.6'da belirtilen Kural 3 ile Kural 10 arasındaki şartlardan birini sağlaması veya aşağıdaki güvenlik kriterlerine sahip olması gerekir (IMO, 2020):

- Yüksek Solunum Toksisitesi: İnhalasyon LC50/ATE ≤ 0.5 mg/L/4h (düşük uçuculukta) veya 0.5 < LC50 ≤ 2 mg/L/4h aralığında (yüksek uçuculukta).
- Dermal Toksisite: Dermal LD50/ATE değeri 50 ile 200 mg/kg arasında olanlar.
- Reaktivite: Suyla Reaksiyon İndeksi (WRI) = 2.
- Tutuşma Sıcaklığı: Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı ≤ 200 ºC.
- Yanıcılık/Patlama: Havadaki patlama aralığı ≥ %40 v/v ve Parlama Noktası <23 ºC.

Tip 3 Gemi Zorunluluğu: Tip 1 veya Tip 2 kriterlerini karşılamayan ancak IBC Kod Bölüm 17 kapsamına girecek kadar (güvenlik veya kirlilik açısından) risk taşıyan yükler için tasarlanmış gemilerdir. Bu kategori, Çizelge 2.6'daki Kural 11 ile 14 arasını kapsar.

Çizelge 2.6 : IBC Kod gemi tipi sınıflandırması (IMO, 2020).

Kural	**A 1** Biyolojik birikim	**A 2** Biyolojik bozunma	**B 1** Akut toksisite	**B 2** Kronik toksisite	**D 3** Uzun vadeli sağlık etkileri	**E 2** Deniz yaşamı ve taban habitatlarına etkiler	Kat
1			≥ 5				
2	≥ 4	NR	4		CMRTNI		1
3	≥ 4	NR			CMRTNI		
4			4				2
5	≥ 4		3				
6		NR	3				
7				≥ 1			
8						Fp	
9					CMRTNI	F	
10			≥ 2			S	
11	≥ 4						
12		NR					3
13			≥ 1				
14	Diğer "Y" Maddeleri						
15	Diğer "Z" / "OS" Maddeleri						NA

Ancak bu yaklaşım, doğası gereği "Kural Bazlı" (Prescriptive) ve "Statik" bir yapıya sahiptir. IBC Code, bir geminin belirli bir yükü taşıyıp taşıyamayacağına dair "Uygunluk" (Compliance) onayı verirken; operasyon anında oluşabilecek risk seviyesini derecelendirmez. Örneğin, IBC Code standartlarına tam uyumlu olan iki farklı gemi (biri Aseton, diğeri Toluen taşıyan) terminale yanaştığında; kodun perspektifinde her ikisi de "Güvenli"dir. Oysa liman işletmecisi açısından bu iki yükün operasyonel risk büyüklüğü (yangın yükü, zehirli gaz yayılım mesafesi vb.) eşit değildir.

Dolayısıyla IBC Code; riski teknik donanım ve tasarım yoluyla (çift cidar, kapalı ölçüm vb.) minimize etmeyi hedeflerken; liman sahasındaki anlık operasyonel riskleri karşılaştırmalı olarak sıralayan dinamik bir karar destek mekanizması sunmamaktadır. Bu çalışmada önerilen model, IBC Code'un tanımladığı bu teknik tehlike parametrelerini birer "veri girdisi" olarak kabul edip, bunları liman operasyon yönetimi için sayısal ve karşılaştırılabilir bir risk skoruna dönüştürerek literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

2.1.3 Terminal ve tankerler için operasyonel emniyet rehberi: ISGOTT

Uluslararası petrol ve tanker endüstrisinde operasyonel emniyetin “iyi endüstri pratiği olarak” kullanılan temel kaynak, ISGOTT (International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals) rehberidir. ICS (International Chamber of Shipping) ve OCIMF (Oil Companies International Marine Forum) tarafından ortaklaşa yayımlanan bu rehberin, yasal bir zorunluluk olmamasına rağmen ticari sözleşmelerde (Charter Party) bağlayıcı referans olarak kullanılıyor olması, onun tavsiyelerinin ne derece kabul gördüğünü göstermektedir.

ISGOTT, özellikle "Gemi-Kıyı Arayüzü" (Ship/Shore Interface) yönetimine odaklanarak; bir tankerin terminale yanaşmasından ayrılmasına kadar geçen süreçteki kritik riskleri ele alır. Rehberin tezin kapsamıyla en çok örtüşen yönü, Statik Elektrik riskinin yönetimi, kapalı mahal prosedürleri ve yükleme hızlarının kontrolü konusundaki teknik detaylarıdır. Ayrıca, operasyon öncesi gemi ve terminalin karşılıklı mutabakatını sağlayan Gemi/Kıyı Emniyet Kontrol Listesi (Ship/Shore Safety Check-List - SSSCL), operasyonel riskin minimize edilmesinde kullanılan en yaygın standart araçtır. Rehberin tezin kapsamıyla (fiziksel riskler) doğrudan örtüşen en kritik teknik parametreleri şunlardır:

- Statik Elektrik Yönetimi ve Akış Hızı Limitleri: ISGOTT, özellikle "Statik Akümülatör" (Static Accumulator) özelliği taşıyan düşük iletkenlikli yükler (<50 pS/m) için katı operasyonel kısıtlamalar getirir. Rehber, yükleme başlangıcında (cushioning aşamasında) boru hattı içerisindeki akış hızının 1 m/s (saniyede 1 metre) ile sınırlandırmaktadır. Ayrıca, statik yükün dağılması (relaxation) için, yükleme sonrası numune alımı veya ölçüm (ullaging/sounding) işleminden önce en az 30 dakika bekleme süresi

(relaxation time) uygulatır. Bu limitler, tezin "Fiziksel Risk" parametreleri arasında yer alan statik elektrik riskinin yönetilebilirliğindeki temel değişkendir.

- Kapalı Operasyon (Closed Operations): Toksik veya yanıcı gaz çıkaran yüklerde, gemi tankının atmosfer ile temasının tamamen kesildiği "Kapalı Yükleme" (Closed Loading) prensibini standartlaştırır. Bu kapsamda, P/V (Basınç/Vakum) valflerinin ayar değerleri ve gaz geri dönüş hatlarının (Vapor Return Line) basınç düşümü hesaplamaları, ISGOTT standartlarına göre belirlenir.
- Gemi/Kıyı Emniyet Kontrol Listesi (SSSCL): ISGOTT, operasyonel riskin karşılıklı teyidi için "Ship/Shore Safety Check-List" (SSSCL) mekanizmasını kurmuştur. Bu liste, sadece prosedürel bir onay değil; oksijen seviyesinin %8'in (hacimce) altında tutulması (inertleme), manifold basınç testleri ve acil durdurma (ESD) sürelerinin saniye bazında test edilmesi gibi somut teknik verilerin doğrulanmasını gerektirir.

Ancak ISGOTT, temel olarak petrol tankerleri için kurgulanmış olup, kimyasal yüklerin spesifik reaktivite riskleri konusunda ICS'in kimyasal rehberiyle desteklenmesi gerekmektedir.

2.1.4 Kimyasal yüklere özgü emniyet yönetimi rehberi: Tanker Safety Guide

ISGOTT genel tanker emniyetini çerçevelerken; ICS (International Chamber of Shipping) tarafından yayımlanan Tanker Safety Guide (Chemicals) (ICS, 2021), kimyasal yüklerin heterojen yapısından kaynaklanan spesifik riskleri yönetmek için ileri düzey operasyonel protokoller sunar. Bu rehber, IBC Kod'un donanım gerekliliklerini, sahadaki "karar alma süreçlerine" şu teknik başlıklarla entegre eder:

- Reaktivite ve Uyumsuzluk (Compatibility) Yönetimi: Rehber, USCG (United States Coast Guard) uyumluluk matrisini referans alarak, bitişik tanklarda (adjacent tanks) taşınan yüklerin veya ortak manifold hattını kullanan kimyasalların "Tehlikeli Reaksiyon" (Hazardous Reaction) risklerini analiz eder. Özellikle asitler, bazlar ve monomerlerin ayrıştırılması (segregation) konusunda, IBC Kod'un yapısal kurallarının ötesinde, "Pozitif Ayrıştırma" (Positive Segregation) adı verilen; hatların körlenmesi (blanking) veya makara

parçalarının (spool pieces) sökülmesi gibi fiziksel izolasyon yöntemlerini zorunlu kılar.

- Polimerleşme ve Isı Kontrolü: Tez çalışmasında "Stolt Groenland" vakası ile örneklendirilen polimerleşme riski için ICS rehberi; "İnhibitör Sertifikası" (Certificate of Inhibitor) yönetimini detaylandırır. Yükün yolculuk süresi boyunca maruz kalacağı maksimum sıcaklık ve yolculuk süresi (voyage duration) dikkate alınarak, katılacak inhibitör miktarının hesaplanması ve tank sıcaklığının günlük olarak takip edilerek kritik sıcaklık eşiğinin (örneğin Stiren Monomer için belirli bir derece) altında tutulması için prosedürler belirler.
- Toksik Maruziyet ve PPE Standartları: IBC Kod yükün LC50 değerine göre gemi tipini belirlerken; ICS rehberi bu değeri personel güvenliğine dönüştürür. Yükün OEL (Occupational Exposure Limit) ve TWA (Time Weighted Average) değerlerine göre; operasyon sahasında kullanılacak solunum koruyucu donanımın tipini (Filtreli maske mi yoksa SCBA/Temiz Hava Tüplü maske mi?) belirleyen algoritmalar sunar.

Güçlü bir rehber olan Tanker Safety Guide (Chemicals), kimyasal yüklerin spesifik tehlikelerine karşı alınacak önlemleri prosedürel düzeyde tanımlamaktadır. Ancak rehber, bu önlemlerin uygulanmasındaki operasyonel zorluk derecesini veya yükler arasındaki göreli risk farkını sayısal bir metrik ile derecelendirmemektedir.

2.1.5 Mevcut düzenlemelerin değerlendirilmesi ve literatürdeki boşluk

Kimyasal tanker terminallerinde operasyonel emniyet, yukarıda incelenen uluslararası sözleşmeler (MARPOL, IBC Kod) ve endüstriyel rehberler (ISGOTT, ICS) ile çok katmanlı bir yapı ile desteklenmektedir. Bu yapı, denizcilik endüstrisinde yüksek bir emniyet standardı oluşturmuş olsa da; mevcut sistemlerin ortak kısıtı, risk yönetimini "Kontrol Listesi" (Checklist) ve "Uygunluk" (Compliance) mantığıyla ele almalarıdır.

Mevcut çerçeve incelendiğinde odak noktalarının şu şekilde ayrıştığı görülmektedir:

- MARPOL: Çevresel kirlilik riskine ve biyobirikim etkilerine odaklanır.
- IBC Kod: Geminin yapısal bütünlüğüne ve donanım uygunluğuna odaklanır.
- ISGOTT/ICS: Operasyonel prosedürlerin adım adım uygulanmasına (Prosedürel Emniyet) odaklanır.

Ancak bu sistemlerin hiçbiri, dinamik bir liman operasyonunda karar verici konumundaki terminal yöneticisine şu sorunun cevabını sayısal ve karşılaştırmalı olarak sunmamaktadır:

"Şu an terminalimde elleçlenen farklı kimyasal yüklerden hangisi; sahip olduğu buhar basıncı, parlama noktası ve LC50 değeri kombinasyonuyla en yüksek operasyonel risk önceliğine sahiptir?"

Mevcut sistemler, "Kabul Edilebilir Risk" seviyesini sağlamak için gerekli statik bariyerleri kurar; ancak bir "Risk Şiddeti Sıralaması" yapmaz. Özellikle çoklu yük elleçleyen (multi-product) terminallerde; kaynak planlaması, denetim sıklığı (safety rounds), acil durum römorkörünün konuşlanması ve personel ataması için yüklerin göreli risk seviyelerinin bilinmesi kritik önem taşır.

Bu tez çalışması, MARPOL ve IBC Kod'un sağladığı teknik verileri, ISGOTT ve ICS rehberlerinin operasyonel hassasiyetleriyle birleştirip; AHP ve TOPSIS yöntemleriyle işleyerek, literatürdeki bu "Dinamik Sıralama ve Önceliklendirme" ihtiyacına cevap veren bütünleşik bir model önermektedir.

2.2 Liman ve Terminal Operasyonlarında Kritik Risk Faktörleri

Dökme sıvı kimyasal kargolar, doğaları gereği durağan (statik) yapıya sahip maddeler değildir. Gemi tankından sahil tanklarına (veya tersi) yapılan transfer işlemleri sırasında kimyasallar; sıcaklık değişimlerine, basınç değişimlerine, boru hattı sürtünmelerine ve atmosferik koşullara maruz kalırlar. Bu dinamik süreç, "gemi-kıyı arayüzünde" (ship-shore interface) her an değişebilen ve yönetilmesi gereken yeni tehlike profilleri üretir. Yasal mevzuatların belirlediği standartlar operasyonun temel güvenliğini sağlasa da; yükün taşıdığı spesifik karakteristikler, terminal sahasında anlık olarak kendini gösteren kaza potansiyelleri barındırır. Bu bağlamda, kimyasal tanker terminallerinde operasyonel süreçleri tehdit eden kritik risk faktörleri; yükün fiziksel reaksiyonları, terminal personelinin toksik maruziyeti ve olası bir sızıntının çevresel tahribatı olmak üzere üç ana boyutta incelenmektedir.

2.2.1 Fiziksel riskler

Kimyasal sıvı yüklerin gemi-kıyı arayüzündeki (ship-shore interface) transferi sırasında karşılaşılan en ani ve yıkıcı tehlike boyutu, kargonun kendi termodinamik ve fiziko-kimyasal doğasından kaynaklanan fiziksel risklerdir. Toksik veya çevresel etkiler genellikle belirli bir maruziyet süresine, kümülatif birikime veya yayılım alanına ihtiyaç duyarken; fiziksel riskler, uygun operasyonel tetikleyicilerle (kıvılcım, aşırı ısı, mekanik sürtünme veya kontaminasyon) buluştuğunda saniyeler içinde tesisin yapısal bütünlüğünü tehdit eden majör endüstriyel kazalara (yangın, buhar bulutu patlaması, tank infilakı) dönüşebilme potansiyeline sahiptir. Terminal operasyonlarında bu risklerin yönetimi, kargonun yalnızca stabil durumunu değil, değişen basınç, sıcaklık ve akış koşullarına vereceği tepkileri öngörmeyi gerektirir.

Bu tez çalışmasında kurgulanan karar destek modeli kapsamında, terminal sahasındaki acil durum karar alma mekanizmalarını, operasyonel hız limitlerini ve bariyer tahsisini doğrudan dikte eden temel fiziksel tehlike göstergeleri dört ana parametre üzerinden değerlendirilmiştir. Bunlar; kargonun yanıcılık ve tutuşma hassasiyetini belirleyen parlama noktası, tehlikeli atmosferin oluşum hızını ve hacmini tayin eden buhar basıncı, dışsal bir kaynağa ihtiyaç duymadan otonom ateşleme potansiyeli yaratabilen statik elektrik birikimi ve maddenin kendi içindeki kararsızlığını ifade eden reaktivite/polimerleşme tehdididir. Bu dört parametre, kargonun terminalde yaratacağı fiziksel yıkımın hem olasılığını hem de şiddetini modelleyen temel operasyonel kısıtlar olarak aşağıdaki alt bölümlerde detaylandırılmıştır.

2.2.1.1 Parlama noktası (flash point) ve yangın potansiyeli

Tehlikeli sıvı kimyasalların liman lojistik süreçlerinde (yükleme, tahliye, depolama ve manifold transferleri) karşılaşılan en kritik operasyonel kısıt, yükün yanıcılık karakteristiği ile liman sahasının çevresel dinamikleri arasındaki etkileşimdir (Phoon vd., 2014). Akademik literatürde ve liman risk yönetimi modellerinde Parlama Noktası (Flash Point); yalnızca termodinamik bir yanma eşiği olarak değil, "Sistemik

Kırılganlık" (Systemic Vulnerability[1]) ve "Acil Durum Karar Penceresi"nin (Decision-Making Window[2]) sınırlarını çizen temel bir parametre olarak ele alınmaktadır.

Kimyasal tanker terminalleri, yüksek mekansal yoğunluğa sahip karmaşık sosyo-teknik sistemlerdir. Bir gemi-kıyı arayüzünde (ship-shore interface) meydana gelebilecek olası bir sızıntı durumunda, ortam sıcaklığının yükün parlama noktasını aşması, yerel bir sıvı havuzu yangınından (pool fire) ziyade, terminalin tamamını tehdit eden Buhar Bulutu Patlaması (VCE - Vapor Cloud Explosion) ve Ani Parlama (Flash Fire) senaryolarını tetikleyebilmektedir. Geleneksel petrol kargoları hacimce dar ve öngörülebilir patlayıcılık bantlarında seyrederken; sıvı kimyasalların (örneğin metanol, toluen vb.) çok daha geniş patlama aralıklarına (LFL-UFL) ve agresif buharlaşma profillerine sahip olması, sızan gazın meteorolojik koşullar altında terminal sahasında uzun süre "ateşlenmeye hazır" (ignitable) kalmasına yol açabilir (Dadashzadeh vd., 2013).

Endüstriyel standartlar (IBC Kod, ISGOTT) parlama noktasını, elektrik donanımı (Ex-proof) seçimi veya kapalı ölçüm (closed gauging) zorunluluğu gibi "statik ve ikili (uygun/uygun değil)" mühendislik bariyerleri atamak için kullanır. Ancak eşzamanlı operasyonların (SIMOPS) yürütüldüğü, ağır vasıta trafiğinin ve mekanik operasyonların sürekli aktif birer ateşleme kaynağı (ignition source) potansiyeli taşıdığı terminal gerçekliğinde; bu statik bariyerler göreli operasyonel riski derecelendirmekte sınırlı kalabilir. Örneğin, parlama noktası 10°C olan bir kargo ile 50°C olan bir kargonun terminalde yaratacağı "Domino Etkisi" (cascading failure) potansiyeli ve anlık tahliye yarıçapı ihtiyacı birbirinden tamamen farklıdır.

Bu bağlamda parlama noktası; operasyon hızının sınırlandırılmasından, gaz geri dönüş (vapor return) sistemlerinin anlık basınç yüküne, iskeledeki acil durum römorkörü ihtiyacından saha personelinin yoğunluğuna kadar uzanan bir zinciri etkiler. Dolayısıyla, bu tez çalışmasında geliştirilen çok kriterli karar verme (AHP-TOPSIS)

---

[1] Systemic Vulnerability: Tekil bir ekipman arızasının, mevcut bariyerlerin kapasitesini aşarak olayın büyümesine ve domino etkisi doğurmasına yatkınlığını ifade eder. Parlama noktası kritik bir eşik olmakla birlikte, gerçek yanma/patlama potansiyeli tek başına parlama noktasından değil; LFL–UFL, buhar basıncı, sızıntı geometrisi (jet–pool rejimi) ve kısmi kapalı ortam koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

[2] Decision-Making Window: Bir boru hattından, hortumdan veya tanktan sızıntı/kaçak sonrası yanıcı atmosferin oluşum dinamiği ile (ör. LFL–UFL bandına girme) etkili kontrol/izolasyon bariyerlerinin (ESD'ler yani acil durdurma/izolasyon vanaları, algılama, müdahale) devreye girebildiği zaman aralığı olarak tanımlanmıştır.

modelinde Parlama Noktası; yasal bir sınıflandırma etiketinden çıkarılarak, alternatif kargolar arasındaki operasyonel hassasiyeti ve kaza şiddeti potansiyelini (consequence severity) sayısallaştıran ana risk çarpanlarından biri olarak konumlandırılmıştır.

Bu yaklaşım, proses endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan Dow Fire and Explosion Index (F&EI) metodolojisi ile de kavramsal paralellik göstermektedir (AICHE, 1994). Söz konusu indeksleme sisteminde, yanıcılık özellikleri (Material Factor) potansiyel hasar yarıçapı ve ekonomik kayıp tahminlerinin temel girdisini oluşturmaktadır. Bu bağlamda parlama noktası, yalnızca bir sınıflandırma parametresi değil; yangın ve patlama şiddetinin nicel temsiline zemin hazırlayan bir belirleyici olarak değerlendirilebilir (Gupta, 1997).

2.2.1.2 Buhar basıncı (vapor pressure) ve uçuculuk karakteristiği

Buhar basıncı, bir sıvının belirli bir sıcaklıkta gaz fazına geçme eğilimini nicel olarak ifade eden temel bir termodinamik parametredir. Liman ve terminal operasyonlarında bu parametrenin kritik önemi, yalnızca bir "uçuculuk" (volatility) tanımı olmasından değil; olası bir sızıntı veya döküntü (loss of containment) durumunda tehlikeli atmosferin oluşum hızını ve muhtemel gaz konsantrasyonunu tayin eden ana girdi olmasından kaynaklanır. Nitekim IBC Kod Bölüm 21'de yer alan inhalasyon tehlikesi değerlendirmelerinde, Doygun Buhar Konsantrasyonu (Saturated Vapour Concentration - SVC) ile LC50 değerinin birbirine oranlanması (SVC/LC50), buhar basıncının operasyonel "maruziyet oluşma hızı" ile olan doğrudan ilişkisine işaret etmektedir.

Terminal sahasında olası bir sızıntı/döküntü senaryosunda (ör. manifold, hortum, hat kaçakları), sıvı bir “havuz (pool)” oluşturarak yüzeyden buharlaşır veya basınçlı hat kırıklarında jet salım rejimi görülebilir. Havuz buharlaşması için güvenilir fiziksel etki hesap yaklaşımlarında buharlaşma akısının (vapour flux) belirlenmesinde buhar basıncı merkezi bir rol oynar; buhar basıncı yükseldikçe, aynı çevre koşullarında atmosfere geçen buhar miktarı artar ve oluşan bulut daha kısa sürede yanıcılık/toksisite eşiklerine ulaşır. Bu tür “kaynak terimi” tabanlı yaklaşım, endüstriyel proses güvenliği literatüründe hem yanıcı bulut (flash fire/VCE) hem de toksik bulut yayılımı sonuçlarının doğru kurulabilmesi için temel adım olarak kabul edilmektedir (Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), 2005).

Buhar basıncının terminal güvenliğine etkisi, iki temel risk senaryosunda kendini gösterir.

Birincisi yangın ve patlama riskidir. Yüksek buhar basıncına sahip maddeler, küçük bir sızıntıda dahi kısa sürede geniş hacimli yanıcı buhar bulutları oluşturur. Bu bulutlar, açık alanda parlama (flash fire) ya da kısmen kapalı alanlarda sıkışarak buhar bulutu patlamasına (Vapour Cloud Explosion – VCE) yol açabilir. Proses emniyeti rehberleri, özellikle bu tür kısıtlı alanlarda VCE kaynaklı aşırı basınçların oluşabileceğini ve bu durumun zincirleme kazalara (domino etkisi) neden olabileceğini vurgular (Center for Chemical Process Safety, 2010).

İkincisi ise toksik maruziyet riskidir. Aynı miktardaki bir sızıntıda, buhar basıncı yüksek olan kimyasalların havadaki doygun buhar konsantrasyonu (SVC) daha yüksek olur. Bu da, operasyon personelinin kısa süreli de olsa çok yüksek konsantrasyonlara maruz kalma ihtimalini artırır. Bu yaklaşımın mevzuattaki karşılığı da nettir: IBC Kod, sağlık tehlikelerini tanımlarken, bir maddenin buhar fazındaki toksik etkisini buhar basıncıyla birlikte değerlendirir.

Buhar basıncının olası bir sızıntı durumunda kaza zincirindeki rolü Şekil 2.1'de özetlenmiştir. Şemada görüldüğü üzere süreç; kaynak, yayılım ve sonuç olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama olan kaynak adımında buhar basıncı; doğrudan buhar üretim hızını ve doygunluk konsantrasyonunu (SVC) belirler. Üretilen bu gaz, rüzgar gibi çevresel faktörlerin de etkisiyle sahaya yayılarak (dispersion); ani parlama, buhar bulutu patlaması (VCE) veya toksik zehirlenme gibi nihai kaza sonuçlarının etki alanını oluşturur.

Şekil 2.1 : Sızıntı senaryolarında buhar basıncının kaza zincirindeki rolü: Kaynak, yayılım ve fiziksel sonuç aşamaları.

Bu tez kapsamında geliştirilen AHP modeline buhar basıncı kriterinin dahil edilme gerekçesi; tehlikeli atmosfer oluşumunun kaynak büyüklüğünü ve personelin toksik maruziyet potansiyelini operasyonel anlık bir değişkene dönüştürmesidir. Böylece buhar basıncı, "Kargo ne kadar zararlı?" sorusunun cevabı olan LC50 kriterinden ayrışarak; "Zararlı konsantrasyona ne kadar hızlı ve hangi çapta ulaşılır?" boyutunu temsil eden, tamamlayıcı ve bağımsız bir fiziksel risk göstergesi olarak konumlandırılmıştır.

2.2.1.3 Statik elektrik birikimi (static accumulator) riski

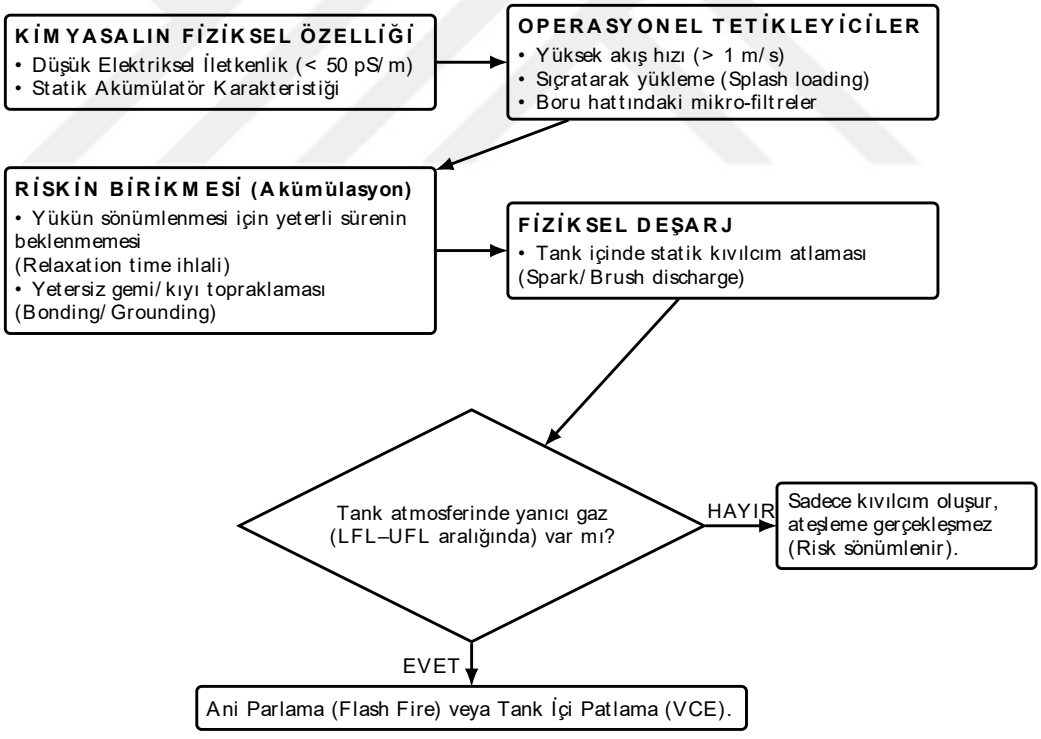
Kimyasal tanker terminallerinde yangın ve patlama üçgeninin tamamlanabilmesi için genellikle kargo dışı bir ateşleme kaynağına (ignition source) ihtiyaç duyulur. Terminalde kullanılan patlamaya dayanıklı (ex-proof) ekipmanlar, elektrikli donanımlardan kaynaklanan ateşleme risklerini ortadan kaldırsa da; düşük iletkenlikli sıvı kimyasalların önemli bir bölümü, bu korumanın dışında kalan elektrostatik deşarj yoluyla bağımsız bir ateşleme mekanizması oluşturabilir. Bu durum, yükün elektriksel iletkenlik (electrical conductivity) seviyesinin son derece düşük olmasından (genellikle <50 pS/m) kaynaklanan statik akümülatör karakteristiğidir (American Petroleum Institute, 1998). Britton (1999), bu elektrokinetik yük ayrışması mekanizmasını ve kritik deşarj koşullarını kapsamlı biçimde modelleyerek kimyasal operasyonlarda statik ateşleme tehlikesinin önlenmesine yönelik pratik eşikleri belirlemiştir (Britton, 1999).

Liman sahasında gerçekleştirilen transfer operasyonları sırasında; sıvının boru hatlarından pompalanması, mikro-filtrelerden geçmesi veya gemi tankına yüksek hızda dökülmesi (splash loading) esnasında şiddetli bir "elektrokinetik yük ayrışması" meydana gelir. İletkenliği yüksek olan kargolarda (örneğin alkoller) statik yükün dağılması ve potansiyel farkların dengelenmesi, gemi ve kıyı topraklama (bonding/grounding) sistemleri üzerinden daha hızlı sönümlenirken; statik akümülatör kimyasallarda yük, sıvının kütlesi içerisinde daha uzun süreler hapsolur. Özellikle buhar basıncı ve parlama noktası değerleri kritik seviyede olan bir yükün, kapalı bir tank atmosferinde kendi ürettiği bu yüksek voltajlı statik yükü bir kıvılcım (spark) olarak boşaltması; yanıcı atmosferin mevcut olduğu koşullarda ateşleme kaynağına dönüşebilir, "Buhar Bulutu Patlaması" (VCE) veya ani tank infilakı ile sonuçlanabilir.

Statik elektrik birikimi, terminal emniyet yönetiminde riskin proaktif olarak kontrol edilmesini zorlaştıran ve operasyonel prosedürlere katı kısıtlamalar getiren dinamik bir parametredir. ISGOTT rehberi, statik akümülatör kargoların transferinde tehlikeyi minimize etmek amacıyla doğrudan akışa müdahale eder. Boru hattı ve tank tabanında sıfır noktasından başlayan yüklemelerde, sıvı seviyesi dolum ağzını (drop line) tamamen kapatana kadar "yastıklama" (cushioning) fazı uygulanır ve akış hızı zorunlu olarak 1 m/s (saniyede 1 metre) ile sınırlandırılır. Bununla birlikte, risk yalnızca akış sırasında değil, akış durduktan sonra da devam eder. Biriken statik yükün güvenli bir şekilde toprağa akması (relaxation) için, operasyon bitiminde dahi tanka herhangi bir

iletken obje (numune kabı, iskandil metre) indirilmeden önce asgari 30 dakikalık bir bekleme süresi (relaxation time) zorunludur. Bu süre zarfında, tank atmosferinde yanıcı karışım bulunma ihtimali ve elektrostatik deşarj riski devam edebileceğinden herhangi bir kural ihlali ateşleme olasılığını belirgin biçimde artırabilir. ISGOTT'un öngördüğü bu akış hızı kısıtlamalarının teorik temeli, boru içi akışta oluşan şarj akımının (streaming current) akış hızıyla üstel ilişkisine dayanmakta olup; dikey atmosferik depolama tanklarına yapılan tek fazlı sıvı transferlerinde güvenli dolum hızı sınırlarının hesaplanmasına yönelik model, IEC 60079-32-1[3] standardının da dayanağını oluşturmuştur (Britton & Walmsley, 2012).

Statik elektrik riskinin terminal operasyonlarında nasıl oluştuğu ve hangi koşullarda ateşleme senaryosuna evrildiği Şekil 2.2'de özetlenmiştir. Şekil, ürünün düşük iletkenlik özelliklerinin operasyonel şarj üretim mekanizmalarıyla birleştiğinde yük birikimini ve olası deşarjı artırdığını; yanıcı atmosferin varlığı halinde ise bunun ateşleme riskine dönüştüğünü göstermektedir.



Şekil 2.2 : Terminal operasyonlarında statik elektrik riski oluşum zinciri.

[3] IEC TS 60079-32-1, patlayıcı ortamlarda statik elektrikten kaynaklanan tehlikeleri önlemek için yönergeler sunan uluslararası bir teknik şartnamedir.

Tankerlerde Statik elektrik kaynaklı kazaların yalnızca fiziksel mekanizmalar üzerinden değil, aynı zamanda insan hatası ve güvenlik bariyerlerinin etkinliği ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği literatürde ortaya konmaktadır. Nitekim tanker operasyonlarına yönelik çalışmalarda, bulanık bow-tie ve CREAM yaklaşımlarının entegrasyonu ile statik elektrik kaynaklı patlama ve yangın senaryolarında hem hata olasılıkları hem de koruyucu sistemlerin performansı kantitatif olarak analiz edilebilmektedir (Elidolu, Akyuz, vd., 2022). Bu bulgular, statik elektriğin yalnızca bir fiziksel özellik değil, operasyonel sürecin farklı bileşenleriyle etkileşime giren çok boyutlu bir risk kaynağı olduğunu göstermektedir.

IMO Deniz Emniyeti Komitesi'nin 35 kimyasal ve ürün tankerindeki patlama olayını inceleyen raporu (MSC 81/8/1), statik elektriği bazı olaylarda patlamayı başlatan faktörlerden biri olarak tanımlamaktadır (IMO, 2006).

Bu doğrultuda, bu tez çalışmasının Çok Kriterli Karar Verme (AHP) modelinde statik akümülatörlük; dışsal ateşleme kaynakları kontrol altında tutulsa dahi, yük transferi sırasında oluşabilecek elektrostatik deşarj yoluyla sistemin içsel tetiklenme potansiyelini temsil eden bağımsız bir kriter olarak modele dahil edilmiştir. Bu yaklaşımda buhar basıncı tehlikenin yayılım potansiyelini, parlama noktası ateşleme hassasiyetini temsil ederken; statik akümülatörlük, bu iki parametreden bağımsız olarak ateşlemenin başlatılmasına yönelik "içsel tetikleyici risk" bileşenini sayısallaştırmaktadır.

2.2.1.4 Reaktivite ve polimerleşme tehdidi

Liman ve terminal operasyonlarında risk çoğu zaman parlama noktası ve buhar basıncı gibi yanıcılık temelli parametreler üzerinden tartışılsa da, bazı kimyasal kargolarda kritik tehlike "yanıcı atmosferin oluşması"ndan önce, maddenin kendi içinde veya kontaminasyonla tetiklenen kimyasal reaksiyon potansiyelinden kaynaklanır. Reaktivite, bir kargonun; sıcaklık artışı, yabancı madde bulaşması (su, asit/baz, oksitleyici, metal iyonları vb.) ya da başka bir maddeyle teması sonucu ekzotermik (ısı veren) reaksiyonlara girerek olay zincirini hızlandırma eğilimidir. Bu reaksiyonlar; hızlı ısı üretimi, ani gaz oluşumu ya da viskozite artışı gibi mekanizmalarla aşırı basınca, ekipman hasarına ve dolayısıyla ikincil yangın ya da patlamalara zemin hazırlayabilir(Chen vd., 2022) .

Terminal ölçeğinde reaktivite denince akla gelen en kritik başlıklardan biri, özellikle vinil monomerlerde (akrilatlar, monomerler vb.) görülen polimerleşme eğilimidir. Polimerleşme reaksiyonları ekzotermiktir ve "oto-ivmelenen" yapıları nedeniyle belirli koşullar altında hızla kontrolden çıkarak "kontrolsüz reaksiyon" (runaway reaction) davranışı sergileyebilir. Bu termodinamik geri besleme (feedback) sürecinde hızla artan buhar basıncı, terminalin veya geminin gaz tahliye (venting) kapasitesini aşarak tankın yapısal olarak parçalanmasına (rupture) zemin hazırlayabilir.

Literatürde, bu tip reaksiyonların endüstriyel kazalarda önemli bir paya sahip olduğu (Khan & Abbasi, 1999) ve kontrol kaybına açık yapıları sıklıkla vurgulanır (Zhao vd., 2021).

Terminal operasyonları açısından polimerleşme tehlikesini "gizli" kılan iki temel özellik vardır (European Basic Acrylic Monomer Group (EBAM), 2015):

- İnhibitör Bağımlılığı ve Zaman/Sıcaklık Hassasiyeti: Birçok monomer, güvenli taşıma için içine katılan inhibitörler sayesinde kararlı halde tutulur. Bu inhibitörler, belirli bir "indüksiyon süresi" boyunca reaksiyonu baskılar. Ancak inhibitör tamamen tükendiğinde, polimerleşme normal hızında ilerlemeye başlar. Bu nedenle, sıcaklığın yükselmesi, inhibitörün etkisizleşmesi veya herhangi bir kontaminasyon, terminalde beklenmedik bir anda risk profilini tamamen değiştirebilir.
- Oksijen Gereksinimi (Özellikle akrilat monomerlerde): Akrilat monomerleri gibi bazı kimyasallarda inhibitörün etkin kalabilmesi için ortamda belirli bir miktar oksijen bulunması gerekir. Bu durum, terminal operasyonları için önemli bir ikilem yaratır. Yangın güvenliği için sıklıkla başvurulan inertleme işlemi, çözünmüş oksijeni azaltarak inhibitörü etkisiz hale getirebilir. Yani, yanıcılığı azaltmak için uygulanan bir önlem, bazı monomerlerde polimerleşme riskini artırabilir. Bu da reaktivite kriterini, kargonun fiziksel özelliğinden bağımsız, terminalin kontrol felsefesiyle doğrudan etkileşen bir emniyet değişkeni haline getirir. Bu paradoksal ilişki, tanker operasyonlarında inertleme uygulamalarının çok yönlü risk değerlendirmesini gerektirmekte; nitrojen kullanımının hem yanıcılık kontrolüne katkısı hem de doğurabileceği ilave operasyonel tehlikeler teknik ve emniyet perspektifinden bir arada ele alınmalıdır (Elidolu vd., 2024).

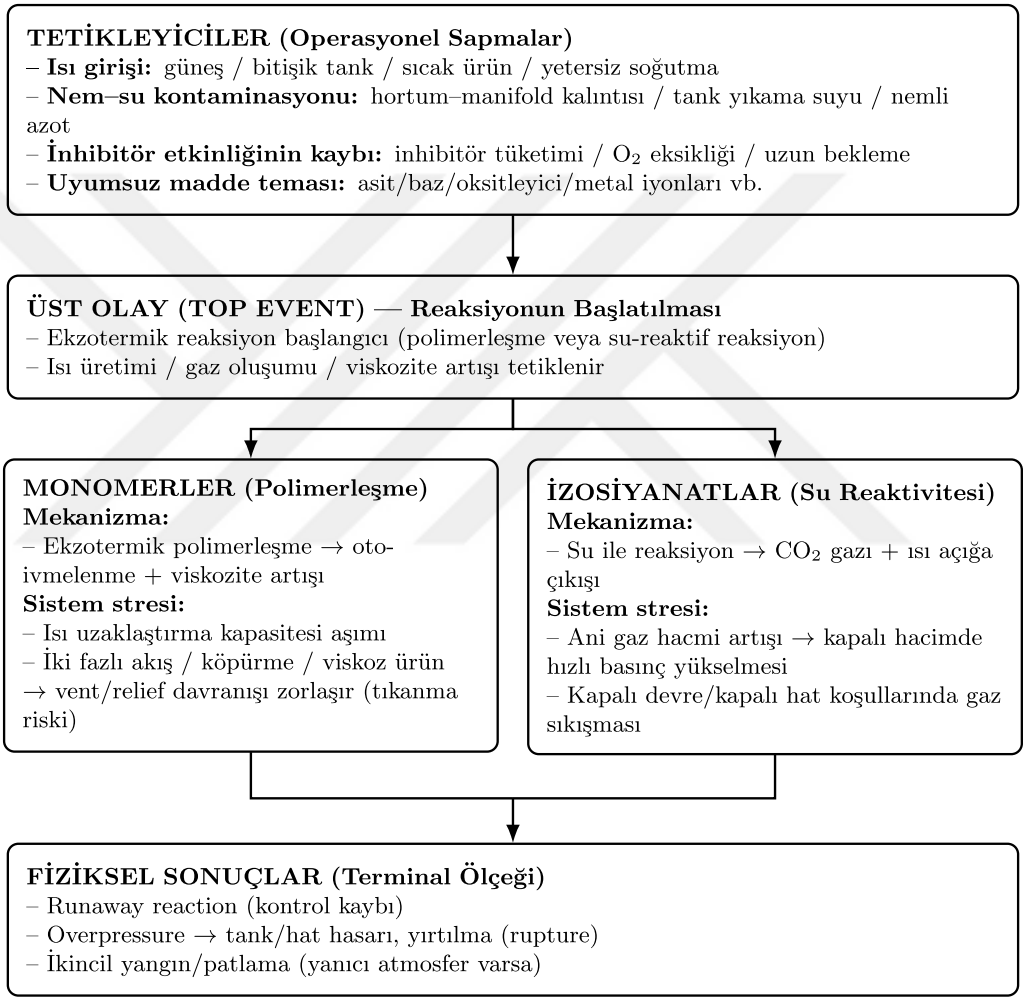
Reaktivite başlığının terminal operasyonlarıyla doğrudan bağ kurduğu bir diğer önemli örnek de izosiyanatlar grubudur. TDI (Toluen diizosiyanat) gibi maddeler suyla temas ettiğinde, karbondioksit (CO_2) gazı ve ısı açığa çıkarır. Kapalı bir sistemde bu durum, hızla basınç birikimine ve tank veya ekipmanın hasarına yol açabilir. Liman sahasında bu reaksiyonu tetikleyebilecek pratik durumlar oldukça fazladır: yükleme hortumlarında veya boru hatlarında kalan nem, tank yıkama sonrası kurutmanın yetersiz kalması, hatta açık kapaklardan giren nemli hava bile bu riski doğurabilir. Bu nedenle izosiyanat benzeri reaktif kargolarda asıl risk, yanıcılık değil; su kontaminasyonuyla tetiklenen gaz çıkışı ve aşırı basınçtır (Pawlak vd., 2024).

Polimerleşme veya diğer "runaway" reaksiyonların sonuçları, terminal emniyeti açısından oldukça ağır olabilir. Ekzotermik reaksiyonla ortaya çıkan ısı, ürün sıcaklığını daha da artırarak reaksiyon hızını katlayabilir. Aynı anda yükselen viskozite, ürünün akışkanlığını kaybetmesine neden olur. Bu durum, acil durumlarda basınç tahliye sistemlerinin (P/V vanaları) tasarlandığı gibi çalışmasını güçleştirebilir. Reaksiyon sonucu oluşan yapışkan ve akışkanlığını kaybetmiş polimerler, tankın acil durum tahliye vanalarının tıkanmasına neden olabilir. Bu durumda tank içinde biriken basınç kontrollü şekilde tahliye edilemez ve tank hasarına yol açabilir (Chen vd., 2022).

Bu kimyasal kararsızlığın terminal emniyeti üzerindeki yıkıcı etkisi, Eylül 2019'da Güney Kore'nin Ulsan limanında Stolt Groenland gemisinde meydana gelen katastrofik patlamada net bir şekilde belgelenmiştir. Olayın resmi kaza inceleme raporları; ısıtmalı bir kargonun yanındaki tankta depolanan stiren monomerin ısı transferine maruz kaldığını, bu ısının kargo içindeki polimerleşme inhibitörünü (TBC) hızla tükettiğini ve başlayan kontrolsüz reaksiyonun dakikalar içinde tankı patlattığını ortaya koymuştur. Bu kaza modeli, liman operasyonlarında reaktivite riskinin salt bir donanım uygunluğuyla (IBC Kod çift cidar kuralı vb.) değil; günlük sıcaklık takibi, inhibitör ömrü (inhibitor certificate) ve pozitif ayrıştırma (positive segregation) gibi dinamik operasyonel kısıtlarla yönetilmesi gerektiğini göstermiştir (MAIB, 2019).

Bu kaza özelinde, inhibe kargo operasyonlarının sistematik risk değerlendirmesine yönelik yakın tarihli bir FMECA çalışması da, stiren monomer örneği üzerinden polimerleşme tetikleyicilerini ayrıntılı olarak modellemiş ve inhibitör yönetimi, sıcaklık takibi ile kontaminasyon kontrolünün risk önceliklendirmesindeki belirleyici rolünü ortaya koymuştur (Elidolu, Teixeira, vd., 2024).

Terminal sahasında reaktif kargoların olay zinciri ve operasyonel sapmaların nasıl bir felakete dönüştüğü Şekil 2.3'te Proses Güvenliği (Bow-Tie) mantığıyla özetlenmiştir. Şemada görüleceği üzere; ısı girişi, nem kontaminasyonu veya inhibitör kaybı gibi başlatıcı hatalar, kargonun kontrolünü kaybetmesine (Üst Olay) neden olmaktadır. Kargonun kimyasal yapısına göre bu kontrol kaybı; ya viskozite artışına (monomerler) ya da ani gaz oluşumuna (izosiyanatlar) evrilerek, sistemi ortak bir aşırı basınç ve donanım yırtılması (rupture) sonucuna götürmektedir.



Şekil 2.3 : Terminal operasyonlarında reaktif kargoların (monomerler ve izosiyanatlar) kaza tetikleme mekanizmaları, üst olay (top event) ve fiziksel sonuç zinciri.

Bu tez kapsamında reaktivite/polimerleşme kriterinin AHP modeline dahil edilmesinin temel nedeni, bazı kargolarda tehlike zincirini başlatan unsurun dışsal bir ateşleme kaynağı değil, bizzat maddenin kendi kimyasal dönüşümü olmasıdır. Parlama noktası ve buhar basıncı, "yanıcı atmosfer oluşumu"nu temsil ederken; reaktivite kriteri,

kontaminasyon, sıcaklık değişimi veya inhibitör kaybı gibi faktörlerle kısa sürede şiddetlenebilen ve aşırı basınç ile ikincil yangın/patlama sonuçlarına yol açan içsel bir tehlike mekanizmasını modelde bağımsız bir boyut olarak temsil etmektedir.

Ancak, bu içsel tehlikenin Çok Kriterli Karar Verme modelinde (TOPSIS) alternatif kargolar arasında adil ve karşılaştırılabilir bir girdiye dönüşebilmesi için nesnel bir ölçüte ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada reaktivite kriterinin ölçümsel karşılığı olarak; kimyasalların Amerikan Ulusal Yangından Korunma Birliği (NFPA 704) standartlarında tanımlanan "Kararsızlık/Reaktivite (Instability/Reactivity)" endeks değerleri (0-4 ölçeği) temel alınmıştır (National Fire Protection Association, 2022). Böylelikle reaktivite gibi doğası gereği nitel ve karmaşık olan bir olay zinciri için nicel bir skorlama yapılabilmiştir.

2.2.2 İnsan sağlığı ve toksik maruziyet

Kimyasal tanker terminallerinde insan sağlığına yönelik riskler, çoğunlukla kargonun "içsel toksisite" (intrinsic toxicity) özellikleri ile terminal sahasında gerçekleşen "maruziyet senaryolarının" (soluma, cilt teması) kesişiminde ortaya çıkar. Terminal operasyonları; gemi-kıyı manifold bağlantısı, hortum/kol transferleri, numune alma ve tank atmosferine açılma (venting) gibi süreçler barındırdığı için, özellikle kısa süreli fakat yüksek konsantrasyonlu maruziyetler açısından kritik bir risk alanıdır. IBC Kod'un sağlık tehlikesi yaklaşımında; maddenin buharlaşma dinamiği ile toksik etkisinin entegre ele alınması, terminal bağlamında inhalasyon ve akut sistemik maruziyet göstergelerinin (LC50 ve LD50) analitik modellemedeki önemini vurgulamaktadır.

2.2.2.1 Solunum toksisitesi (LC50, ppm/4h) ve akut inhalasyon riski

Terminal operasyonlarında kimyasal maruziyetin birincil yolu çoğu ürün için inhalasyondur. Bunun nedeni, uçucu kimyasalların sızıntı/döküntü veya rutin ventilasyon/degaz süreçlerinde kısa sürede buhar fazına geçerek personelin solunum bölgesinde yüksek konsantrasyonlara ulaşabilmesidir. Bu nedenle, akut inhalasyon toksisitesini temsil eden LC50 (lethal concentration 50%) değeri, terminal ölçeğinde "insan sağlığı boyutunu" nicel olarak temsil eden en işlevsel göstergelerden biridir.

IBC Kod, inhalasyon tehlikesini değerlendirirken Doygun Buhar Konsantrasyonu (SVC) ile LC50 oranını (SVC/LC50) temel alır. Bu oran ("hazard quotient"), bir sızıntı

sonrası oluşan buharın, toksik eşiklere ne kadar hızlı ulaşabileceğine dair maddeye özgü bir ölçüt sunar. Bu yaklaşım, LC50'nin terminalde yalnızca "toksisite şiddetini" değil; buharlaşma/sızıntı dinamikleriyle birlikte akut tehlike üretme potansiyelini de temsil ettiğini göstermektedir.

Bu tez kapsamında kurgulanan AHP karar destek modelinde, fiziksel parametreler ile toksikolojik parametrelerin birbirini ezmemesi (double counting / çifte sayım hatasının önlenmesi) metodolojik bir zorunluluktur. Modelde Buhar Basıncı (VP), buhar üretim potansiyelini ve tehlikeli konsantrasyona ulaşma dinamiğini temsil eder. LC50 ise bu bulutun solunması halinde yaratacağı biyolojik yıkımın şiddetini ifade eder. Böylece iki parametre arasında kavramsal bir iş bölümü oluşturulmuş ve çifte sayım (double counting) hatası engellenmiştir. Bu kavramsal ayrım sayesinde LC50; buharın yayılma fiziğinden bağımsız olarak, doğrudan kargonun zehirleme kapasitesini ölçen bağımsız bir emniyet kriteri olarak modele entegre edilmiştir. Literatürdeki farklı test sürelerine (örneğin 1 saat, 8 saat vb.) ait veri farklılıklarını gidermek ve model içerisinde adil bir karşılaştırılabilirlik zeminini sağlamak amacıyla, toplanan tüm LC50 verileri toksikoloji literatüründe kabul gören Haber Kuralı (Haber's Rule) kullanılarak 4 saatlik (4h) maruziyet esasına göre matematiksel olarak indirgenmiş ve standardize edilmiştir.

2.2.2.2 Akut Sistemik Toksisite Göstergesi (Proxy: Oral LD50))

Terminal sahasında kimyasal maruziyetin ikinci önemli yolu dermal (cilt) temasıdır. Özellikle manifold sökümü, numune alma veya basınçsızlandırma işlemleri sırasında oluşabilecek sıvı sıçramaları (splashes), cilt yoluyla emilim riskini doğurur. Ne var ki, kimyasalların dermal toksisite verileri, Güvenlik Bilgi Formlarında (SDS) çoğu zaman ya eksiktir ya da standart bir metodolojiyle raporlanmamıştır. Bu durum, dermal riski doğrudan modellemeyi imkânsız kılmaktadır.

Öte yandan, bir kimyasalın akut sistemik toksisite potansiyelini değerlendirmek için en yaygın ve karşılaştırılabilir gösterge LD50 (Lethal Dose 50%) değeridir. LD50, deney hayvanlarının (genellikle sıçan) %50'sini öldüren oral yolla alınan madde miktarını (mg/kg) ifade eder. IBC Kod'un sağlık tehlikesi tanımında LD50 (oral) parametresine açıkça yer verilmesi, bu göstergenin kimyasal taşımacılık bağlamında "içsel toksisite" değerlendirmesinde geleneksel bir referans olarak kullanıldığını ortaya koyar. OECD kılavuzlarında da belirtildiği üzere, LD50 (oral) verisi bir

kimyasalın insan sistemine (kan dolaşımına) karıştığında yaratacağı akut yıkımın en yaygın referansıdır (OECD, 2022).

Bu tez kapsamında, AHP modelinde kargolar arasında adil bir kantitatif kıyaslama zemini oluşturmak amacıyla LD50 (oral/rat) verisi (bunun mevcut olmadığı durumlarda oral/mouse verisi) kullanılmıştır. Bununla birlikte, terminal operasyonları açısından oral maruziyetin (yutma) birincil senaryo olmadığı açıkça belirtilmelidir. LD50 (oral) verisinin kullanımı, dermal maruziyetin tüm yönlerini doğrudan temsil ettiği anlamına gelmemektedir. Dermal temas riski, karşılaştırılabilir nicel veri eksikliği nedeniyle modelde ayrı bir parametre olarak kurgulanamamış; LD50 (oral) değeri ise kimyasalların kana karıştığında yaratacağı akut sistemik toksisite düzeyini karşılaştırmak amacıyla bir "proxy" (vekil gösterge) olarak atanmıştır.

LD50'nin modele bu şekilde dahil edilmesinin temel amacı, inhalasyon riskini ölçen LC50 parametresini farklı bir maruziyet rotası (sıvı fazda temas) üzerinden tamamlamaktır. Bir kimyasalın uçuculuğunun (buhar basıncının) düşük olması onun solunum tehdidini azaltsa da; manifold sökümü veya numune alımı gibi işlemlerde sıvı halde cilde sıçraması durumunda yaratacağı sistemik zehirlenme riski son derece yüksek olabilir. Modelde LD50 verisinin kullanılması, solunum yoluyla ölçülemeyen bu "fiziksel temas ve kana karışma" riskini nicelendirerek, kargoların toksikolojik açıdan tek boyutlu (sadece gaz fazında) değil, çok boyutlu bir yaklaşımla değerlendirilmesini sağlar. Bu vekil (proxy) yaklaşım çalışmanın metodolojik bir sınırlılığı olarak değerlendirilmeli; LD50 (oral) verisinin sahadaki dermal maruziyet senaryolarını doğrudan temsil etmediği, ancak kimyasalın sistemik yıkım potansiyeli hakkında en güvenilir nicel göstergeyi sunduğu unutulmamalıdır.

2.2.3 Çevresel riskler

Kimyasal tanker terminallerinde çevresel riskler; ani ve görsel sonuçları olan yangın veya patlama gibi fiziksel tehlikelerden farklı olarak, "Gecikmiş ve Kümülatif Etki" mekanizmasıyla kendini gösterir. Terminal sahasında meydana gelen küçük çaplı bir sızıntı veya rutin degaz işlemi bile, kıyı sularına karışan kimyasalın biyolojik kalıcılığı ve biyobirikme kapasitesi nedeniyle, akut kazaların çok ötesinde, uzun vadeli ekosistem tahribatına yol açabilir (Cunha vd., 2015). Özellikle gemi-kıyı arayüzünde, manifold bölgesinde meydana gelen sınırlı hacimli sızıntılar dahi —vanalar, hortum bağlantıları, ölçüm ekipmanları gibi çok sayıda risk faktörünün bir araya geldiği bu

kritik noktada— kümülatif olarak önemli çevresel yük oluşturabilmektedir (Elidolu vd., 2025). Bu özellik, çevresel risk parametrelerini, diğer fiziksel risk kriterlerinden metodolojik olarak ayrıştıran temel unsurdur: Fiziksel riskler "anlık olayın şiddetini" temsil ederken, çevresel riskler "kalıcı hasarın büyüklüğünü" temsil eder.

Bu bağlamda literatür taramasında detaylandırıldığı üzere, MARPOL Annex II'nin tasarım felsefesi tam da bu "çevresel kalıcılık" kaygısı üzerine inşa edilmiştir. Kimyasalların X, Y, Z kategorilerine atanmasındaki temel belirleyiciler; biyobirikim (bioaccumulation), biyolojik bozunma (biodegradation) ve sucul toksisite (aquatic toxicity) parametreleridir. Ancak bu çalışmanın problem tanımında ortaya konulduğu gibi, MARPOL sınıflandırması yalnızca kaba bir kategorizasyon sunmakta; aynı kategori içindeki kimyasalların ekosistem üzerinde yarattığı göreli risk farklılığını nicel olarak temsil edememektedir.

Bu nedenle tez kapsamında geliştirilen AHP-TOPSIS modelinde, çevresel riskler iki bağımsız alt kriter üzerinden değerlendirilmektedir: Kargonun sucul canlılar üzerindeki akut ve kronik toksik etkisini temsil eden Sucul Toksisite ve kargonun biyolojik zincirdeki kalıcı birikme kapasitesini temsil eden Biyobirikim (Log Kow). Her iki kriterin modele ayrı birer girdi olarak dahil edilmesinin metodolojik gerekçesi, bu kriterlerin birbirini ikame etmemesidir: bir kimyasal sucul organizmalar için yüksek akut toksisiteye sahip olsa dahi biyolojik zincirlerde kalıcı olarak birikmeyebilir ya da tersi gerçekleşebilir. Dolayısıyla bu iki parametre, çevresel riskin farklı boyutlarını bağımsız olarak temsil eden tamamlayıcı göstergelerdir.

2.2.3.1 Sucul Yaşam Akut Toksisitesi (Aquatic Acute Toxicity)

Kimyasal kargoların deniz ortamına karışması halinde sucul flora ve fauna üzerinde oluşturduğu çevresel tehlikenin temel göstergelerinden biri sucul yaşam toksisitesidir. Bu tehlike, balıklar, kabuklular ve algler gibi organizmalar üzerinde belirli maruziyet koşullarında gözlenen biyolojik etkiler esas alınarak değerlendirilmekte; ancak farklı kimyasallar için ham LC50 veya EC50 verilerinin doğrudan karşılaştırılması, veri mevcudiyeti farklılıkları, test süresi farklılıkları ve deneysel standartlardaki değişkenlik nedeniyle karar destek modellerinde metodolojik güçlükler yaratabilmektedir.

Bu kısıtı aşmak ve model içerisinde karşılaştırılabilir bir çevresel değerlendirme zemini oluşturmak amacıyla, bu çalışmada kargoların sucul yaşam üzerindeki tehlike

düzeyleri, Birleşmiş Milletler Küresel Uyumlaştırılmış Sistem (UN GHS) kapsamında yer alan "Hazardous to the aquatic environment" hazard statement'ları (H-kodları) esas alınarak sıralı (ordinal) bir çevresel tehlike skoruna dönüştürülmüştür. Böylece farklı test formatlarından gelen ham ekotoksisite verileri yerine, uluslararası kabul görmüş ve standardize edilmiş hazard ifadelerine dayalı bir sınıflandırma kullanılmıştır.

Bu çalışmada, kargonun deniz ortamına karışması halinde oluşturabileceği çevresel tehlikenin şiddetini sayısallaştırmak amacıyla 1 ile 5 arasında değişen, boşluksuz ve sıralı aşağıdaki puanlama sistemi benimsenmiştir:

- 5 Puan (Kritik Risk): "Very toxic to aquatic life" düzeyindeki maddeler. GHS sınıflandırmasında H400 (Acute 1) ve/veya H410 (Chronic 1) kodlarına sahip kargolar.
- 4 Puan (Yüksek Risk): "Toxic to aquatic life" düzeyindeki maddeler. GHS sınıflandırmasında H401 (Acute 2) ve/veya H411 (Chronic 2) kodlarına sahip kargolar.
- 3 Puan (Orta Risk): "Harmful to aquatic life" düzeyindeki maddeler. GHS sınıflandırmasında H402 (Acute 3) ve/veya H412 (Chronic 3) kodlarına sahip kargolar.
- 2 Puan (Düşük Risk): "May cause long lasting harmful effects to aquatic life" ifadesiyle tanımlanan H413 (Chronic 4) kodlu kargolar.
- 1 Puan (Minimal Risk): GHS kriterlerine göre sucul çevre için tehlikeli olarak sınıflandırılmayan (not classified) veya bu bağlamda yeterli veri bulunmayan kargolar.

Bu puanlama yaklaşımında akut ve kronik hazard ifadeleri, "very toxic–toxic–harmful" ana tehlike düzeyleri esas alınarak aynı skala üzerinde birleştirilmiştir. Böylece bu kriter, nicel ekotoksisite ölçümünden ziyade, GHS hazard statement'lardan türetilmiş çevresel hazard şiddetini temsil eden sadeleştirilmiş bir sıralama aracı olarak kullanılmıştır. Chronic ifadelerde yer alan uzun dönem çevresel davranış boyutunun, çalışmada ayrıca değerlendirilen biyolojik birikim (Log Kow) kriteri ile kısmen temsil edilmesi nedeniyle, chronic sınıflar burada ilave bir puan artışı yaratacak şekilde yorumlanmamıştır. Bu tercih, çok kriterli karar verme modellerinde aynı çevresel risk

boyutunun birden fazla kriter altında tekrar edilmesiyle ortaya çıkabilecek çifte sayım (double counting) riskini azaltmaya yöneliktir.

Ayrıca, terminal sahasında meydana gelen hiçbir kimyasal döküntünün çevresel açıdan "sıfır risk" taşımadığı; en düşük düzeyde dahi temizlik, raporlama, operasyonel dikkat ve izleme gerektirdiği kabulünden hareketle, sınıflandırılmamış maddelere modelin taban puanı olan "1" değeri atanmıştır. Bununla birlikte, "not classified" ile "no data" durumlarının aynı puan altında birleştirilmesi, düşük çevresel hazard ile veri belirsizliği arasındaki ayrımın tam olarak yansıtılamaması bakımından çalışmanın sınırlılıklarından biri olarak değerlendirilmelidir.

2.2.3.2 Biyolojik Birikim Potansiyeli (LogKow)

Çevresel risk değerlendirmesinde sucul yaşam toksisitesi, bir kimyasalın deniz ortamına karışması halinde sucul organizmalar üzerindeki çevresel etki şiddetini temsil ederken; biyolojik birikim potansiyeli, bu etkinin zaman içinde biyolojik sistemlerde taşınma ve birikme eğilimini ifade eder. Terminal operasyonları açısından biyobirikim kriterinin önemi, yalnızca büyük döküntü senaryolarında değil, manifold, hortum veya bağlantı ekipmanlarından kaynaklanan görece sınırlı sızıntıların dahi uzun vadede kıyısal çevre üzerinde kalıcı bir yük oluşturabilme ihtimalinden kaynaklanır. Bu nedenle biyobirikim boyutu, sucul toksisite kriterinden ayrı ve tamamlayıcı bir çevresel risk ekseni olarak ele alınmalıdır. GESAMP değerlendirme sisteminde de "Aquatic Toxicity" ile "Bioaccumulation/Biodegradation" boyutlarının ayrı sütunlar altında değerlendirilmesi, bu ayrımın düzenleyici çerçevede de benimsendiğini göstermektedir.

Biyolojik birikim potansiyelinin değerlendirilmesinde en doğrudan göstergelerden biri biyokonsantrasyon faktörü (BCF) olmakla birlikte, uygulamada tüm kimyasallar için güvenilir ve karşılaştırılabilir BCF verisine ulaşmak çoğu zaman mümkün değildir. GESAMP prosedürü, ölçülmüş BCF verisi mevcut olduğunda bunun öncelikle kullanılmasını; BCF bulunmadığında ise n-oktanol/su dağılım katsayısının logaritması olan LogKow (logPow) değerinin biyobirikim eğiliminin göstergesi olarak kullanılabileceğini belirtmektedir. Aynı çerçevede, log Pow>4 düzeyi önemli biyobirikim eğilimine işaret etmekte; ancak ölçülmüş BCF verisinin mevcut olduğu durumlarda bu verinin daha belirleyici olduğu açıkça vurgulanmaktadır. Bu nedenle LogKow, MARPOL kategorizasyonunda tek başına belirleyici bir ölçüt olarak değil,

biyobirikim boyutunu temsil eden kabul edilmiş ve pratik bir gösterge olarak değerlendirilmelidir (Bkz. Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.1).

Bu tez kapsamında biyolojik birikim potansiyelinin göstergesi olarak LogKow değerinin tercih edilmesinin temel nedeni, seçili kimyasallar arasında kesintisiz ve karşılaştırılabilir veri sağlayabilmektir. Dolayısıyla bu kriter, biyobirikimin doğrudan ölçümü olarak değil; lipofiliklik ve biyolojik dokulara yönelme eğilimini yansıtan pratik bir gösterge (proxy) olarak kullanılmıştır. LogKow değerinin yükselmesi, maddenin su fazına kıyasla organik fazlara ve biyolojik dokulara afinitesinin artabileceğini; buna bağlı olarak biyolojik zincirde taşınma ve birikme potansiyelinin de yükselebileceğini düşündürür. Buna karşılık düşük veya negatif LogKow değerleri, maddenin daha hidrofilik karakter gösterdiğine ve biyolojik dokularda birikme eğiliminin görece düşük olduğuna işaret eder. Bununla birlikte, biyobozunurluk, hidroliz veya çevresel kalıcılık gibi davranışlar LogKow'dan doğrudan türetilemez; bu boyutlar farklı çevresel parametrelerin konusudur.

Metodolojik açıdan önemli olan husus, LogKow kriterinin sucul yaşam toksisitesiyle aynı çevresel mekanizmayı tekrar edecek şekilde kullanılmamasıdır. Bölüm 2.2.3.1'de kurgulanan sucul toksisite ölçeği yalnızca kimyasalın "anlık zehirlilik şiddetine" (Very toxic, Toxic vb.) odaklandığı için; GHS'nin kronik değerlendirmelerinde yer alan uzun vadeli biyobirikim potansiyeli, bu bölümde LogKow parametresi üzerinden tamamen bağımsız bir kriter olarak modele entegre edilmiştir. Böylece biri "kimyasal döküldüğü anda sucul yaşam için ne kadar zararlıdır?" sorusuna, diğeri ise "bu madde biyolojik zincirde ne ölçüde taşınabilir ve birikebilir?" sorusuna karşılık gelmektedir. Bu kavramsal ayrım, aynı mekanizmanın farklı kriterler altında tekrar edilmesiyle ortaya çıkabilecek çifte sayım (double counting) riskini sınırlar ve karar modelinin analitik tutarlılığını güvence altına alır.

Sonuç olarak LogKow, bu tezde "akuatik kronik toksisitenin tamamını" temsil eden bir parametre olarak değil; biyolojik birikim eğilimini sayısallaştıran, karşılaştırılabilir ve uygulamada erişilebilir bir gösterge olarak kullanılmıştır. Ölçülmüş BCF verisinin teorik olarak daha güçlü bir gösterge olduğu kabul edilmekle birlikte, veri sürekliliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle LogKow tercih edilmiştir. Bu tercih, terminal koşullarında küçük ölçekli sızıntıların dahi uzun vadeli çevresel ve operasyonel sonuçlar doğurabileceğini dikkate alan bütüncül bir risk değerlendirmesine katkı

sağlamakta; aynı zamanda yorum aşamasında göz önünde bulundurulması gereken metodolojik bir sınırlılık taşımaktadır.

2.3 Kimyasal Tanker Terminallerinde Risk Değerlendirmesine Yönelik Akademik Çalışmalar ve Metodolojik Boşluk

Kimyasal tanker terminallerine ilişkin risk literatürü, bir yandan majör kaza senaryolarının (LoC, yangın/patlama, toksik yayılım) modellenmesine dayanan mühendislik odaklı yaklaşımları; diğer yandan yönetimsel bariyerler, insan faktörü ve karar verme süreçlerini öne çıkaran yöntemleri içermektedir. Ancak bu çalışmaların önemli bir bölümü, terminal sahasında karar vericinin ihtiyaç duyduğu "kargo bazında göreli risk" sorusunu, kargonun içsel tehlike profili ile operasyonel bağlamı aynı çerçevede birleştirerek yanıtlamakta sınırlı kalmaktadır. Bu bölümde, önce terminal odaklı risk çalışmalarının ana temaları ve odak kaymaları özetlenmekte, ardından ÇKKV yaklaşımlarının terminal güvenliği bağlamındaki yeri tartışılarak çalışmanın metodolojik motivasyonu ortaya konulmaktadır.

2.3.1 Terminal risk literatürünün ana temaları ve odak kaymaları

Kimyasal tanker terminallerine yönelik akademik literatür, riski genellikle "majör kaza" senaryoları üzerinden ele alır. Bu yaklaşımın temel mantığı, bir muhafaza kaybı (Loss of Containment - LoC) ile başlayan olaylar zincirinin yangın, patlama veya toksik yayılımla sonuçlanması ve bu sonuçların olasılık ve şiddet ekseninde değerlendirilmesidir. Bu alandaki erken ve etkili çalışmalar, liman operasyonlarına özgü kaza dinamiklerinin sistematik olarak ortaya konmasına odaklanmıştır. Nitekim, Ronza ve arkadaşları liman kazalarını analiz ederek tipik olay dizilerini tanımlamış ve bunları olay ağaçlarına (event trees) dönüştürmüştür (Ronza vd., 2006). Benzer şekilde, Darbra ve Casal (2004) Avrupa limanlarındaki tarihsel kaza kayıtlarını inceleyerek liman operasyonlarına özgü tehlike dağılımını istatistiksel olarak ortaya koymuş ve senaryo temelli risk değerlendirme yaklaşımları için önemli bir frekans veri tabanı sağlamıştır (Darbra & Casal, 2004). Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, liman risk analizlerinde senaryo temelli yaklaşımların hem olay dizilerinin kurgulanması hem de bu senaryoların gerçekleşme olasılıklarının belirlenmesi açısından temel bir metodolojik çerçeve sunduğu görülmektedir.

Senaryolar tanımlandıktan sonraki adım, bu senaryoların fiziksel sonuçlarını sayısallaştırmaktır. Literatürün ikinci ana damarını oluşturan bu yaklaşım, kaynak terimi (buharlaşma, jet salım), atmosferik yayılım, yangın ısı radyasyonu ve patlama aşırı basıncı gibi çıktıların modellenmesine odaklanır. Bu alanda uzun yıllardır referans kabul edilen kaynaklardan biri, TNO tarafından yayımlanan "Sarı Kitap" (PGS 2 - Yellow Book) olup, özellikle terminal gibi açık ve yarı kapalı alanların bir arada bulunduğu karmaşık ortamlarda sonuç analizlerinin yapılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kantitatif Risk Değerlendirmesi (QRA) rehberlerinin temelini oluşturan bu yöntemler, "yangın-patlatma-toksik yayılım" üçlüsü etrafında şekillenir (Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), 2005).

Üçüncü bir araştırma hattı ise terminali yalnızca bir proses tesisi olarak değil, aynı zamanda insan faktörünün ve yönetimsel unsurların kritik rol oynadığı bir "sosyo-teknik arayüz" (ship-shore interface) olarak ele alır. Bu çerçevede bow-tie yöntemi, tehditler, üst olay, sonuçlar ve bu aşamalar arasındaki güvenlik bariyerlerini görselleştirmek için sıklıkla kullanılır. Mokhtari ve arkadaşlarının deniz limanları ve açık deniz terminalleri için önerdiği bow-tie tabanlı çerçeve, terminal risk yönetiminin yalnızca mühendislik hesaplarından ibaret olmadığını, bariyer yönetimi ve prosedürel kontrollerin de en az hesaplar kadar önemli olduğunu ortaya koyar (Mokhtari vd., 2011).

Literatürde giderek artan bir ilgi gören dördüncü tema ise domino etkileridir. Tank sahaları, birbirine yakın boru hatları ve eş zamanlı operasyonlar (SIMOPS), terminalleri zincirleme kazalara karşı hassas hale getiren başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle eş zamanlı yürütülen operasyonlar, sistemdeki yük ve stres dağılımını artırarak birincil olayların ikincil hasarlara evrilme olasılığını yükseltmektedir. Bu tür operasyonel çakışmaların risk değerlendirmesi, özellikle devreye alma ve bakım süreçlerinde, ilave risklerin ALARP seviyesine indirgenmesi açısından sistematik bir yaklaşım gerektirmektedir (Marucco, 2016). Bu tür operasyonel çakışmaların kritik biçimde yoğunlaştığı gemi-kıyı manifold arayüzündeki riskler; FMECA, Dempster–Shafer kanıt teorisi ve kural tabanlı Bayesian ağı yaklaşımlarının entegrasyonuyla modellenmiş; hatalı vana/borulama konfigürasyonu, uygun olmayan bağlantı ve topraklama/bağlama eksiklikleri en yüksek risk önceliğine sahip arıza modları olarak tanımlanmıştır (Elidolu vd., 2025).

Birincil bir patlamanın yaratacağı aşırı basınç veya termal radyasyon, komşu ekipmanlarda hasara yol açarak ikincil olayları tetikleyebilir. Bu alandaki araştırmalar, özellikle buhar bulutu patlaması (VCE) kaynaklı aşırı basınçların domino etkisi yaratma olasılığını incelemekte ve "tek olay" odaklı QRA yaklaşımlarının bu tür senaryolarda yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Cozzani vd. (2006), tesis ölçeğindeki ekipmanlara özgü termal ve mekanik hasar eşiklerini nicel olarak belirleyerek domino etkisi modellemesini sistematik bir yöntem hâline getirmiştir (COZZANI vd., 2006).

Tüm bu birikime rağmen, mevcut literatürde dikkat çekici bir odak kayması sorunu bulunmaktadır. Bir grup çalışma, riski neredeyse tamamen altyapı, ekipman ve arazi kullanım planlaması perspektifinden ele alırken; diğer bir grup, kimyasal kargoları IMDG/IMO sınıfları gibi oldukça genel kategoriler üzerinden değerlendirmekte, kargonun içsel tehlike profilini (buhar basıncı, statik akümülatörlük, reaktivite, LC50 gibi) bütüncül bir karar çerçevesine yerleştirmekte zorlanmaktadır. Bu durum, terminal işletmecisinin "hangi kargo, hangi koşullarda daha kritik bir risk oluşturur?" sorusuna yanıt bulmasını güçleştirmektedir. Bu bölümde özetlenen temalar, terminal bağlamında farklı kargo özelliklerini aynı potada eritecek bütünleşik bir yaklaşıma duyulan ihtiyacı açıkça ortaya koymakta ve bir sonraki alt bölümde (2.3.2) ele alınacak olan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerine zemin hazırlamaktadır.

2.3.2 ÇKKV yaklaşımları ve terminal bağlamında metodolojik gereksinimler

Denizcilik ve liman çalışmalarında ÇKKV yöntemlerinin giderek daha fazla kullanılmasının temel nedeni, terminal gibi çok paydaşlı ve çok hedefli sistemlerde karar problemlerinin tek bir risk metriğine indirgenemeyecek kadar karmaşık olmasıdır. Bu yöntemler (AHP, TOPSIS, ANP, DEMATEL ve bulanık mantık uzantıları), hem nicel verileri hem de uzman görüşlerini bir araya getirerek şeffaf ve sistematik karar destek araçları sunar. Literatürde bu yöntemlerin liman lojistiğinden emniyet yönetimine ve çevre korumaya kadar geniş bir yelpazede uygulandığı görülmektedir.

Terminal odaklı ÇKKV çalışmaları kabaca iki ana başlıkta toplanabilir. Birinci grup, terminal operasyonlarındaki riskleri veya iş sağlığı ve emniyeti unsurlarını çok kriterli bir yapı içinde önceliklendirmeyi amaçlar. Örneğin, AHP tabanlı yaklaşımlarla belirli terminal faaliyetlerindeki operasyonel riskler tanımlanmakta, ağırlıklandırılmakta ve

en kritik olanlar seçilmektedir. Benzer şekilde, liman otoritelerinde iş sağlığı ve güvenliği risklerinin bulanık mantık ve uzman görüşleriyle değerlendirildiği çerçeveler de mevcuttur. Bu çalışmaların ortak gücü, terminalin karmaşık risk ortamını "insan–ekipman–yönetim–çevre" gibi çok boyutlu bir perspektiften ele alabilmeleridir.

Bu birinci grubun iyi bir örneği, liman sahasındaki onshore tank farm operasyonları için FMEA, bulanık hata ağacı ve AHP-TOPSIS hibrit yöntemlerini bir araya getirerek bütünleşik bir risk temelli güvenlik yönetim çerçevesi öneren Dantsoho (2015) çalışmasıdır. Bu çalışmada AHP-TOPSIS, kaçak tespit sistemine yönelik alternatif emniyet kontrol önlemleri arasından optimal olanın seçiminde kullanılmış ve böylece aynı yöntem ikilisinin tank farm bağlamında hem risk önceliklendirme hem de emniyet iyileştirme kararlarında işlevsel olabileceği gösterilmiştir. Bu tezde ise aynı yöntem ikilisi, kimyasal kargoların içsel tehlike profillerine dayalı operasyonel risk sıralaması amacıyla kullanılarak, Dantsoho'nun emniyet iyileştirme odağını tamamlayıcı bir karar problemi olan "göreli risk önceliklendirmesi" boyutuna taşımaktadır (Dantsoho, 2015).

İkinci grup ise daha çok tehlikeli yüklerin limanlarda yarattığı risklerin üst düzey kriter setleriyle değerlendirilmesine odaklanır. Bu çalışmalar, tehlikeli yük olaylarının düşük olasılıklı ancak yüksek sonuçlu doğasını vurgulayarak, uzman yargısını ve çok kriterli yapıyı bir arada kullanır. Ancak bu araştırmaların önemli bir kısmı, kargoları tek tek kimyasal bazda "içsel tehlike profili" ile temsil etmek yerine, tehlikeli yük grupları, operasyonel faktörler veya genel emniyet yönetim kriterleri üzerinden ilerlemektedir.

Buna ek olarak, literatürde kimyasal tanker operasyonlarına yönelik daha gelişmiş risk modelleme yaklaşımlarının da geliştirildiği görülmektedir. Örneğin, kargo tankı temizliği sırasında yangın ve patlama riskinin değerlendirilmesinde, Evidential Reasoning tabanlı SLIM ve Bayesian Belief Network hibrit yaklaşımları kullanılarak sistemik risk faktörleri bütünleşik olarak modellenmiştir (Sezer & Akyuz, 2024). Benzer şekilde, gaz giderme (gas freeing) prosesinin operasyonel tehlikeleri de Fine–Kinney temelli sezgisel bulanık TODIM yaklaşımıyla önceliklendirilmiş; proseste oksijen seviyesinin kontrolü, tank atmosferinin izlenmesi ve havalandırma yönetimi en kritik risk faktörleri olarak belirlenmiştir (Elidolu, Uflaz, vd., 2022). Ancak bu tür çalışmalar, çoğunlukla belirli operasyon senaryolarına odaklanmakta olup, farklı

kimyasal kargoların içsel tehlike özelliklerini karşılaştırmalı bir karar çerçevesi içinde ele almamaktadır.

İşte tam bu noktada literatürde belirgin bir metodolojik boşluk ortaya çıkmaktadır. Mevcut ÇKKV çalışmaları terminal risklerini çok boyutlu olarak ele alabilse de, kimyasal kargonun içsel tehlike özellikleri (parlama noktası, buhar basıncı, statik akümülatörlük, reaktivite, akut inhalasyon toksisitesi gibi) ile terminalin operasyonel bağlamını aynı karar modeli içinde, birbiriyle çakışmayan ve karşılaştırılabilir bir biçimde birleştiren çalışmalar oldukça sınırlıdır. MARPOL Ek II ve GESAMP, kimyasalların çevresel profillerini sınıflandırmak için güçlü bir düzenleyici altyapı sunmasına rağmen, bu çevre odaklı profilin terminal sahasındaki yangın/patlama ve akut maruziyet riskleriyle bütünleştirilerek bir karar destek aracına dönüştürülmesi konusunda bir eksiklik bulunmaktadır.

Bu boşluğa ek olarak, terminal odaklı ÇKKV çalışmalarında sıkça karşılaşılan iki teknik zorluk, tezin metodolojik motivasyonunu doğrudan şekillendirmektedir. Birincisi veri heterojenliğidir: Toksisite verilerinin farklı maruziyet sürelerinde raporlanması, fiziksel özelliklerin farklı test yöntemleriyle belirlenmesi veya bazı kimyasallarda veri eksikliği, kimyasallar arasında adil bir karşılaştırma yapmayı güçleştirmektedir. İkincisi ise çifte sayım (double counting) riskidir: Aynı risk mekanizmasını farklı kriterler altında tekrar tekrar modele dahil etmek (örneğin, maruziyetin oluşma potansiyeli ile bu maruziyetin yaratacağı etki şiddetini ayrı kriterler olarak ele almak) sonuçları yapay olarak şişirebilir ve modelin açıklanabilirliğini zayıflatabilir. Bu nedenle, terminal bağlamında olsun veya olmasın güçlü bir ÇKKV uygulaması, yalnızca doğru kriterlerin seçilmesini değil; aynı zamanda her bir kriterin hangi risk mekanizmasını temsil ettiğinin net bir şekilde ayrıştırılmasını ve veri kaynaklarının standardize edilmesini de gerektirir (Pelegrina vd., 2022).

Bu tez, yukarıda tanımlanan boşluğu doldurmak üzere, terminal operasyonlarına özgü bir kargo risk değerlendirme modeli sunmayı hedeflemektedir. Bölüm 2.2'de gerekçelendirilen kriter seti, kimyasal kargonun içsel tehlike profilini terminaldeki risk gerçekleşme biçimleriyle ilişkilendirecek şekilde yapılandırılmıştır. Uzman görüşleriyle ağırlıklandırma ve kimyasalların göreli risk sıralaması için hibrit bir ÇKKV çerçevesi (AHP–TOPSIS) benimsenmiştir. Bu yaklaşım, bir yandan MARPOL Ek II ve GESAMP'ın çevresel risk sınıflandırmasını dışlamadan, diğer yandan

terminalin yangın/patlama ve akut inhalasyon maruziyeti gibi "operasyonel emniyet" eksenlerini aynı karar destek modelinde birleştirerek bütünleşik bir çözüm sunmaktadır.

2.4 Tezin Metodolojik Çerçevesi: Hibrit AHP-TOPSIS Yaklaşım

Kimyasal tanker terminallerinde operasyonel risk değerlendirmesi, tek bir değişken veya tek bir yöntemle temsil edilmesi güç olan çok boyutlu bir karar problemidir. Bu bağlamda karar vericiler; yangın ve patlama tehlikeleri, akut toksik maruziyet ve çevresel etkiler gibi farklı risk boyutlarını aynı anda dikkate almak zorundadır. Denizcilik ve ulaştırma alanındaki çok kriterli karar verme literatüründe AHP, Fuzzy AHP, TOPSIS ve Fuzzy TOPSIS yöntemlerinin en sık kullanılan yaklaşımlar arasında yer aldığı görülmektedir (KODAK, 2023). Bu durum, denizcilik kaynaklı karar problemlerinin genellikle heterojen veri yapısı ve çoklu değerlendirme ölçütleri içermesiyle ilişkilidir. Bu tez kapsamında da, kimyasal kargoların göreli operasyonel risk düzeylerini sistematik biçimde sıralayabilmek için hibrit bir AHP-TOPSIS yaklaşımı benimsenmiştir.

2.4.1 Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve kriter ağırlıklarının belirlenmesi

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen ve karmaşık karar problemlerini amaç, kriterler, alt kriterler ve alternatifler biçiminde hiyerarşik olarak yapılandıran bir çok kriterli karar verme yöntemidir. Yöntemin temel mantığı, karar vericilerin veya uzmanların kriterleri ikili karşılaştırmalar yoluyla değerlendirmesine ve bu karşılaştırmalardan göreli ağırlıkların türetilmesine dayanır (Saaty, 2008). AHP, özellikle kriterlerin önem düzeyinin doğrudan ölçülemediği, ancak uzman deneyimi ve saha bilgisiyle anlamlı biçimde karşılaştırılabildiği karar problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nitekim AHP, denizcilik alanındaki çok çeşitli karar problemlerinde kriter ağırlıklandırma aracı olarak başarıyla uygulanmıştır. Liman sıkışıklığına yol açan faktörlerin önem derecelerinin belirlenmesinde AHP'den yararlanılmış; dokümantasyon prosedürleri, liman operasyon ve yönetimi ile gemi trafiği en kritik faktörler olarak öne çıkmıştır (Bolat vd., 2020). Benzer biçimde, sürdürülebilir denizcilik için optimum biyoyakıt seçiminde de emniyet, well-to-wake emisyonları ve uyumluluk kriterlerinin ağırlıklandırılmasında AHP metodolojisi kullanılmış; emniyetin uzmanlar tarafından

en kritik kriter olarak değerlendirildiği raporlanmıştır (Sevim & Zincir, 2026). AHP'nin denizcilik emniyeti bağlamındaki bir diğer uygulaması ise alternatif yakıtların gemi emniyeti açısından karşılaştırmalı değerlendirilmesidir. Parlama noktası, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, patlama limitleri ve maruziyet etkisi gibi kriterlerin AHP ile ağırlıklandırıldığı bu çalışmada, depolama, elleçleme ve mürettebat sağlığı boyutları birlikte ele alınmıştır (Zincir & Deniz, 2018). Bu çalışmanın kriter kurgusu ile tez kapsamında benimsenen fiziksel risk + insan sağlığı + çevre boyutları arasındaki kavramsal paralellik, AHP'nin farklı denizcilik emniyeti problemlerinde benzer çok boyutlu mantıkla kullanılabildiğini göstermektedir.

AHP'de uzmanlar kriter çiftlerini Saaty'nin 1–9 önem ölçeği üzerinden karşılaştırır ve bu karşılaştırmalar sonucunda karşılıklı (reciprocal) bir karar matrisi oluşturulur. Çizelge 2.7'de göreceli önem ölçeği ifade edilmiş olup; ölçekte 1 değeri iki kriterin eşit önemde olduğunu, 3 değeri orta düzeyde üstünlüğü, 5 değeri güçlü üstünlüğü, 7 değeri çok güçlü üstünlüğü ve 9 değeri mutlak üstünlüğü ifade etmektedir. Ara değerler olan 2, 4, 6 ve 8 ise iki komşu yargı arasındaki orta değerlendirmeleri temsil etmektedir. Bu nedenle ikili karşılaştırmalar, uzmanların kriterler arasındaki göreli önemi sistematik ve tutarlı bir biçimde ifade etmelerine imkân tanımaktadır.

Çizelge 2.7 : AHP'de kullanılan göreceli önem ölçeği (Zincir, 2019).

Ölçek	Tanım	Not
1	Eşit önemde	i ile j eşit derecede önemlidir
3	Biraz daha önemli	i j'den biraz daha önemlidir
5	Oldukça önemli	i j'den oldukça önemlidir
7	Çok önemli	i j'den çok önemlidir
9	Son derece önemli	i j'den son derece önemlidir
2, 4, 6, 8	Ara değerler	i'nin j'ye göre öneminin tek rakamlar arasındaki değerleri

Bu ikili karşılaştırmalar sonucunda n sayıda kriter için oluşturulan n×n boyutlarındaki A karar matrisi Denklem 2.1'de gösterilmiştir. Burada a_{ij}, i kriterinin j kriterine göre göreceli önemini temsil etmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

Elde edilen matristen, kriterlerin göreli önemini gösteren ağırlık vektörü türetilir. Ağırlık vektörü, karşılaştırma matrisinin en büyük özdeğerine (λmax) karşılık gelen özvektörden elde edilmekte ve toplamı 1 olacak şekilde normalize edilmektedir. Böylece her bir kriterin karar problemi içindeki göreli ağırlığı belirlenmektedir. Birden fazla uzmanın değerlendirmesinin bir araya getirilmesi gereken durumlarda, literatürde yaygın kabul gören yaklaşım geometrik ortalama ile grup yargısının oluşturulmasıdır (Saaty, 2008). Yöntemin önemli bir üstünlüğü de, uzman değerlendirmelerinin kendi içinde ne ölçüde tutarlı olduğunu test etmeye imkân vermesidir. Bu amaçla kullanılan tutarlılık oranı (Consistency Ratio, CR) için literatürde yaygın kabul gören eşik değerin 0,10 olduğu kabul edilmektedir. Tutarlılık Oranı (CR), Tutarlılık İndeksinin (CI) Rassallık İndeksine (RI) bölünmesiyle hesaplanır ve Denklem 2.2'de gösterilmiştir.

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - \mathrm{n}}{\mathrm{n} - 1} \quad , \quad \mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \tag{2.2}$$

Burada λmax, matrisin en büyük özdeğerini ifade eder; ikili karşılaştırma matrisi A ile normalize edilmiş ağırlık vektörü w arasındaki özdeğer ilişkisinden gelir ve Denklem 2.3'te gösterildiği şekilde hesaplanabilir:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(Aw)_i}{w_i} \tag{2.3}$$

Yine burada kullanılan RI değeri ise, karşılaştırma matrisinin boyutuna (n) bağlı olarak değişmektedir. Başka bir ifadeyle, 3×3, 4×4 veya daha büyük boyuttaki karşılaştırma matrisleri için farklı rassallık indeksi değerleri kullanılmaktadır. Bu nedenle tutarlılık oranının doğru hesaplanabilmesi için, ilgili matris boyutuna karşılık gelen uygun RI değerinin kullanılması gerekmektedir. İki kriterli karşılaştırma matrislerinde karşılıklılık gereği tutarsızlık oluşmadığından, bu düzeyde CR değeri yorumlayıcı bir sınırlılık taşımamaktadır. Bu çalışmada esas alınan RI değerleri Çizelge 2.8'te sunulmuştur.

Çizelge 2.8 : Rassallık indeksi (Zincir, 2019).

Matris Boyutu (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rassal İndeks (RI)	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54	1,56	1,58

Bu tez bağlamında AHP'nin tercih edilmesinin temel nedeni, kriterlerin sayısal değerlerinin nesnel olmasına karşın, bu kriterlerin terminal sahasındaki operasyonel önem derecesinin uzman yargısı gerektirmesidir. Örneğin bir kimyasalın parlama noktası, buhar basıncı veya LC50 değeri laboratuvar ve literatür verisi olarak nesnel biçimde tanımlanabilir; ancak bu risk boyutlarından hangisinin terminal operasyonları açısından daha kritik olduğu, tesisin altyapısı, operasyon karakteri, saha tecrübesi ve acil müdahale kapasitesi gibi bağlamsal unsurlara bağlıdır. Bu nedenle AHP, fiziksel ve toksikolojik olarak nesnel verilerin kendisini değil, bu verilerin terminal karar problemindeki göreli önemini sayısallaştırmak amacıyla kullanılmıştır.

2.4.2 TOPSIS yöntemi ve alternatif kimyasalların sıralanması

TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tercihi Tekniği), Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen ve alternatifleri pozitif ideal çözüme yakınlık ile negatif ideal çözümden uzaklık esasına göre sıralayan çok kriterli karar verme yöntemidir. Yöntemin temel varsayımı, en uygun alternatifin her bir kriter bakımından en iyi değerleri temsil eden ideal çözüme en yakın; en olumsuz değerleri temsil eden negatif ideal çözüme ise en uzak alternatif olması gerektiğidir. Bu yaklaşım, özellikle farklı ölçü birimleri ve farklı büyüklük aralıklarıyla ifade edilen kriterlerin aynı karar matrisi içinde birlikte değerlendirilmesi gereken problemlerde işlevseldir (Hwang & Yoon, 1981).

TOPSIS yönteminde ilk olarak alternatifler ve kriterlerden oluşan karar matrisi tanımlanır. m adet alternatif ve n adet kriterden oluşan karar matrisi genel olarak Denklem 2.4'teki gibi gösterilir:

$$X = \left[x_{ij}\right]_{m \times n} \tag{2.4}$$

Burada x_{ij}, i. alternatifinin j. kriterine ilişkin değerini ifade etmektedir. Karar matrisinde yer alan veriler farklı birimlerde ve farklı ölçeklerde olabildiğinden, TOPSIS uygulamasında ikinci adım bu verilerin ortak bir matematiksel yapıya dönüştürülmesidir. Bu amaçla karar matrisi vektör normalizasyonu yöntemiyle normalize edilir. Normalize edilmiş karar matrisi $R = \left[r_{ij}\right]$ ise Denklem 2.5 ile elde edilir:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \tag{2.5}$$

Bu işlem, farklı birimlerle ifade edilen kriterleri boyutsuzlaştırarak karşılaştırılabilir hale getirir. Normalize edilmiş karar matrisi oluşturulduktan sonra, kriter ağırlıkları dikkate alınarak ağırlıklı normalize karar matrisi hesaplanır. Eğer w_j, j. kriterin ağırlığını gösteriyorsa; ağırlıklı normalize matris $V = [v_{ij}]$ Denklem 2.6 kullanılarak elde edilir:

$$v_{ij} = w_j \, . r_{ij} \tag{2.6}$$

Bu aşamadan sonra her kriter bakımından pozitif ideal çözüm (A^+) ve negatif ideal çözüm (A^-) tanımlanır. Pozitif ideal çözüm, karar probleminde her kriter açısından en uygun değerleri; negatif ideal çözüm ise en olumsuz değerleri temsil eder. Ancak burada kriterlerin yönü önemlidir. Bazı kriterlerde yüksek değer daha avantajlı iken, bazı kriterlerde düşük değer daha avantajlı olabilir. Bu nedenle TOPSIS'te kriterler genel olarak fayda yönlü ve maliyet yönlü kriterler olarak iki grupta değerlendirilir.

Bu doğrultuda pozitif ideal çözüm $A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$ ve negatif ideal çözüm $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$ biçimlerindede ifade edilir.

Burada:

- fayda yönlü kriterler için $v_j^+ = \max(v_{ij})\,, \quad v_j^- = \min(v_{ij})$
- maliyet yönlü kriterler için $v_j^+ = \min(v_{ij})\,, \quad v_j^- = \max(v_{ij})$

olarak belirlenir.

Pozitif ve negatif ideal çözümler belirlendikten sonra, her bir alternatifin bu iki referans noktaya olan uzaklığı hesaplanır. TOPSIS yönteminde bu amaçla genellikle Öklid uzaklığı kullanılır. Buna göre i. alternatifin pozitif ideal çözüme olan uzaklığı S_i^+, negatif ideal çözüme olan uzaklığı ise S_i^- ile gösterilir ve Denklem 2.7'deki gibi hesaplanır:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^+\right)^2} \quad , \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \tag{2.7}$$

Son aşamada, her bir alternatif için göreli yakınlık katsayısı (C_i^*) hesaplanır. Bu katsayı, alternatifin pozitif ideal çözüme ne kadar yakın ve negatif ideal çözümden ne kadar uzak olduğunu birlikte dikkate alır. (C_i^*) değeri Denklem 2.8 ile hesaplanır:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \tag{2.8}$$

Burada (C_i^*) değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Değerin 1'e yaklaşması, alternatifin pozitif ideal çözüme daha yakın olduğunu; 0'a yaklaşması ise negatif ideal çözüme daha yakın olduğunu göstermektedir. Böylece alternatifler, (C_i^*) değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanarak karar problemi bakımından göreli üstünlük veya öncelik düzeyleri belirlenir.

Yöntemin pratik gücü, farklı veri türlerini aynı matematiksel yapı içinde karşılaştırılabilir hale getirmesinden kaynaklanır (Behzadian vd., 2012). Bu nedenle TOPSIS, bir yandan sayısal verilerin korunmasına imkân verirken, diğer yandan karar vericiye açık ve sistematik bir sıralama çıktısı sunar (Çelikbilek & Tüysüz, 2020).

Bu tez kapsamında TOPSIS yönteminin tercih edilmesinin temel nedeni, incelenen kimyasal kargoların farklı ölçeklerde ifade edilen heterojen kriter değerlerine sahip olmasıdır. Parlama noktası sıcaklık birimiyle, buhar basıncı kPa cinsinden, LC50 ppm/4 saat biçiminde, sucul yaşam toksisitesi ise sıralı çevresel hazard skoru olarak ifade edilmektedir. Bu çeşitlilik, alternatiflerin doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir. TOPSIS, bu heterojen kriter yapısını normalize ederek ve AHP ile belirlenen kriter ağırlıklarını dikkate alarak, alternatif kimyasalların göreli operasyonel risk sıralamasını sistematik biçimde üretmeye elverişli bir yöntem sunmaktadır.

Bununla birlikte, bu çalışmada TOPSIS yöntemi klasik "en iyi alternatifin seçimi" mantığından farklı olarak en yüksek operasyonel riski taşıyan alternatiflerin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Dolayısıyla pozitif ideal çözüm bu çalışmada "en güvenli" değil, en kritik risk profiline karşılık gelecek şekilde tanımlanmıştır. Buna bağlı olarak kriterlerin fayda veya maliyet yönlü oluşu, risk mantığına göre yeniden yorumlanmıştır. Bu yaklaşım, TOPSIS'in esnek yapısının risk değerlendirme problemlerine uyarlanabilirliğini göstermekte ve yöntemin kimyasal tanker terminali bağlamında kullanılmasını uygun hale getirmektedir.

Sonuç olarak TOPSIS, bu tezde AHP ile belirlenen kriter ağırlıklarını kullanarak alternatif kimyasal kargoların göreli operasyonel risk sıralamasını elde etmeye yarayan

sıralama bileşenini oluşturmaktadır. Yöntemin uygulamaya özgü adımları, karar matrisinin yapısı, kriter yönlerinin risk mantığına göre sınıflandırılması ve hesaplamaların bu çalışmadaki özgül yürütülüş biçimi ise bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

2.4.3 Hibrit AHP-TOPSIS yaklaşımının seçilme gerekçesi

Bu tezde AHP ve TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanılması, yöntembilimsel bir tercih olmanın ötesinde, araştırma probleminin yapısından kaynaklanan bir gerekliliktir. Kimyasal tanker terminallerinde karar problemi hem uzman yargısına dayalı göreli önceliklendirmeyi hem de nesnel kimyasal verilerin karşılaştırmalı sıralanmasını içermektedir. Yalnızca AHP kullanılması durumunda, alternatif kimyasalların tümünün ikili karşılaştırmalarla değerlendirilmesi hem pratikte güçleşecek hem de nesnel veri yapısı gereksiz biçimde uzman yargısına bağımlı hale gelecektir. Buna karşılık yalnızca TOPSIS kullanılması durumunda ise kriterlerin terminal operasyonları bakımından taşıdığı göreli önem farkları modele yeterince yansıtılamayacaktır.

Bu nedenle önerilen hibrit yapı içinde AHP, karar probleminin ağırlıklandırma aşamasını; TOPSIS ise alternatiflerin sıralanması aşamasını üstlenmektedir. Başka bir ifadeyle, AHP ile uzman bilgisi ve saha deneyimi kullanılarak kriterlerin terminal operasyonları açısından göreli önem düzeyi belirlenmekte; TOPSIS ile de bu ağırlıklar altında kimyasal kargoların göreli risk sıralaması oluşturulmaktadır. Böylece yöntem, hem bağlamsal uzmanlığın karar modeline yansıtılmasına hem de alternatiflerin nesnel veri temelinde karşılaştırılmasına imkân tanımaktadır.

Hibrit AHP-TOPSIS yaklaşımının bu tez açısından bir diğer önemli avantajı, 2.2 bölümünde kavramsal olarak ayrıştırılan kriter setinin sistematik biçimde işlenmesine olanak vermesidir. Bu çalışmada buhar basıncı, parlama noktası, statik akümülatörlük, reaktivite, LC50, LD50, sucul hazard ve biyolojik birikim potansiyeli gibi kriterler; farklı risk mekanizmalarını temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır. AHP bu kriterlerin göreli önemini belirlerken, TOPSIS bu ayrıştırılmış kriter seti üzerinden alternatifleri sıralamaktadır. Böylece model, terminal operasyonlarına özgü çok boyutlu risk yapısını daha açıklanabilir ve karşılaştırılabilir bir karar çerçevesine dönüştürmektedir. Bu bölümde verilen kuramsal çerçeve, sonraki bölümde sunulacak uygulama adımları ve hesaplamalar için yöntembilimsel temeli oluşturmaktadır.

Bulanık AHP/TOPSIS yaklaşımları ise; uzman yargısındaki dilsel belirsizlikleri modele yansıtmak açısından avantajlı olmakla birlikte, bu çalışmada kullanılan kriter setinde uzmanların karşılaştırdığı boyutlar (fiziksel risk, sağlık riski, çevresel risk) birbirinden kavramsal olarak net biçimde ayrıştırılmıştır. Ayrıca TOPSIS aşamasında kullanılan veriler ölçülmüş/standartlaştırılmış nesnel değerler olduğundan, bulanık mantığın sağlayacağı ek esneklik bu aşamada sınırlı kalacaktır. Bu nedenlerle klasik AHP-TOPSIS tercih edilmiştir.

3. HİBRİT AHP-TOPSIS MODELİNİN TERMİNAL OPERASYONLARINA UYGULANMASI

Bu bölümde, önceki bölümde kuramsal ve kavramsal olarak temellendirilen risk kriterlerinin, kimyasal tanker terminallerine yönelik uygulamalı bir karar destek modeline nasıl dönüştürüldüğü açıklanmaktadır. Çalışma kapsamında seçilen kimyasal kargolar, belirlenen fiziksel, insan sağlığı ve çevresel risk kriterleri çerçevesinde değerlendirilmiş; kriterlerin göreli önem düzeyleri uzman görüşlerine dayalı olarak AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmış, ardından alternatif kimyasalların göreli operasyonel risk sıralaması TOPSIS yöntemiyle elde edilmiştir. Bu doğrultuda bölümde; araştırma tasarımı, alternatiflerin seçimi, karar matrisinin oluşturulması, uzman verilerinin işlenmesi, AHP ve TOPSIS uygulama adımları ile modelin hesaplama süreci sistematik biçimde sunulmaktadır.

3.1 Araştırmanın Tasarımı ve Uygulama Adımları

Bu çalışma, kimyasal tanker terminallerinde elleçlenen sıvı kimyasal kargoların göreli operasyonel risk düzeylerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla tasarlanmış, çok kriterli karar verme temelli uygulamalı bir araştırmadır. Araştırma kurgusu, terminal sahasında karar vericinin karşılaştığı temel problemi esas almaktadır: farklı fizikokimyasal, toksikolojik ve çevresel özelliklere sahip kimyasallar arasında, operasyonel emniyet bakımından hangi kargonun göreli olarak daha yüksek risk taşıdığını sistematik ve karşılaştırılabilir biçimde belirlemek. Bu amaçla çalışma, hem nesnel veri setlerini hem de uzman yargılarını birlikte işleyebilen hibrit bir AHP-TOPSIS modeli üzerine kurulmuştur.

Araştırma süreci beş temel aşamada yürütülmüştür:

İlk aşamada, çalışma kapsamına alınacak alternatif kimyasal kargolar belirlenmiş ve bu alternatiflerin farklı MARPOL kategorilerini ve farklı tehlike profillerini temsil etmesine dikkat edilmiştir.

İkinci aşamada, literatür taraması, uluslararası mevzuat, güvenlik bilgi formları ve teknik veri kaynakları esas alınarak karar modelinde kullanılacak kriterler tanımlanmıştır. Bu doğrultuda kriterler; fiziksel riskler, insan sağlığına ilişkin riskler ve çevresel riskler olmak üzere üç ana boyutta yapılandırılmıştır.

Üçüncü aşamada, uzman görüşleri kullanılarak bu kriterlerin göreli önem düzeyleri AHP yöntemiyle belirlenmiştir. Bu aşamada oluşturulan ikili karşılaştırma matrisleri üzerinden kriter ağırlıkları hesaplanmış ve uzman değerlendirmelerinin tutarlılığı matematiksel olarak test edilmiştir.

Dördüncü aşamada, seçilen kimyasal kargolara ait veri seti oluşturulmuş ve her bir alternatif, belirlenen kriterler bakımından sayısal veya sıralı (ordinal) değerlerle tanımlanmıştır. Böylece alternatifler ve kriterlerden oluşan karar matrisi elde edilmiştir.

Beşinci ve son aşamada ise AHP ile hesaplanan kriter ağırlıkları, TOPSIS yöntemine aktarılmış; karar matrisi normalize edilerek ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuş ve her bir alternatifin ideal çözüme göreli yakınlığı hesaplanmıştır. Bu işlem sonucunda kimyasal kargoların göreli operasyonel risk sıralaması elde edilmiştir.

Araştırmanın genel mantığı, uzman yargısına dayalı ağırlıklandırma ile nesnel kimyasal veri tabanlı sıralama süreçlerini birbirinden ayırmak üzerine kuruludur. Buna göre AHP yöntemi, kriterlerin terminal operasyonları açısından göreli önemini belirlemekte; TOPSIS yöntemi ise bu ağırlıklar altında alternatif kimyasalların göreli risk düzeylerini sıralamaktadır. Böylece model, bir yandan saha tecrübesini ve uzman bilgisini karar sürecine yansıtırken, diğer yandan alternatifler arasındaki karşılaştırmayı sistematik ve tekrarlanabilir bir matematiksel yapı içinde gerçekleştirmektedir.

Bu araştırma tasarımı, kimyasal tanker terminallerinde risk değerlendirme probleminin yalnızca tekil bir tehlike ekseni üzerinden değil, birbiriyle etkileşimli çoklu risk boyutları üzerinden ele alınmasını mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda çalışma, MARPOL ve ilgili düzenleyici çerçevelerin çevresel odaklı sınıflandırma yaklaşımını, terminal operasyonlarında öne çıkan yangın, patlama, toksik maruziyet ve çevresel yük boyutlarıyla birlikte değerlendiren bütünleşik bir karar destek modeli önermektedir. Sonraki alt bölümlerde, bu araştırma tasarımının her bir aşaması ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.2 Alternatif Kimyasal Kargoların Seçimi ve Gerekçelendirilmesi

Bu çalışmada değerlendirilen alternatifler, kimyasal tanker terminallerinde elleçlenebilen sıvı kimyasal kargolar arasından amaçlı örnekleme (purposive sampling) yaklaşımıyla seçilmiştir. Çalışmanın amacı, IBC Code Chapter 17'de yer alan tüm kimyasalları kapsayan bir envanter analizi yapmak değil; terminal operasyonları açısından farklı tehlike profillerini temsil eden ve çok kriterli karar verme modelinin ayırt ediciliğini test etmeye elverişli bir örnek kimyasal seti oluşturmaktır. Bu nedenle alternatif seçimi istatistiksel rastlantısallık esasına göre değil, tezin problem tanımı ve model yapısıyla uyumlu olacak şekilde temsiliyet, çeşitlilik, operasyonel anlamlılık ve veri erişilebilirliği ilkeleri temel alınarak yapılmıştır.

Alternatif kimyasalların belirlenmesinde dört temel ölçüt gözetilmiştir:

Birinci ölçüt, düzenleyici temsiliyettir. Seçilen kimyasalların MARPOL Annex II kapsamındaki farklı kategorizasyon düzeylerini temsil etmesine özellikle dikkat edilmiştir. Bu doğrultuda nihai alternatif seti; Kategori X, Y, Z ve OS sınıflarından kargoları içerecek biçimde yapılandırılmıştır. Böylece modelin yalnızca tek bir MARPOL kategorisi içinde değil, çevresel açıdan yüksek kısıtlama düzeyinden operasyonel olarak daha düşük görünen kargolara kadar uzanan geniş bir yelpazede nasıl çalıştığı gözlenebilmiştir. Bu tercih, aynı zamanda tezin temel savlarından biri olan "düzenleyici çevresel sınıflandırma ile terminal operasyonel riskinin her zaman birebir örtüşmeyebileceği" iddiasının test edilebilmesi açısından da önem taşımaktadır.

İkinci ölçüt, tehlike profili çeşitliliği ve duyarlılık testidir. Modelin gerçekten ayrıştırıcı bir sıralama üretebilmesi için, yalnızca farklı MARPOL kategorilerinin değil, aynı zamanda farklı fiziksel, toksikolojik ve çevresel karakterlerin de örneklem içinde bulunması amaçlanmıştır. Bu nedenle alternatif setine; düşük parlama noktalı ve uçucu hidrokarbonlar (örneğin heptan, hekzan, toluen), reaktivite ve polimerleşme potansiyeli taşıyan akrilatlar ve izosiyanatlar (örneğin ethyl acrylate, 2-ethylhexyl acrylate, toluene diisocyanate), toksik/korozif karakteri daha belirgin asidik veya fenolik maddeler (örneğin phosphoric acid, phenol), görece hidrofilik ve daha düşük biyobirikim eğilimli ürünler (örneğin diethanolamine, propylene glycol) ile keton ve ester grubu çözücüler (örneğin methyl ethyl ketone, methyl acetate, propylene glycol

methyl ether acetate) bilinçli olarak dahil edilmiştir. Burada özellikle belirtmek gerekir ki; Phosphoric Acid (Fosforik Asit), modelin veri duyarlılığını test etmek amacıyla örnekleme "uç değer (extreme value)" olarak eklenmiştir. Yüksek yanıcılığa sahip sıvıların domine ettiği bir karar matrisinde; tamamen yanıcı olmayan ancak korozif/toksik karakterdeki bu inorganik asit, en yüksek ağırlığa sahip olan "parlama noktası" parametresinin maskeleme etkisini (masking effect) kırmak ve modelin toksisite gibi diğer operasyonel tehditleri ne derece hassas tartabildiğini ölçmek için bir metodolojik "stres testi" işlevi görmektedir. Böylece alternatif küme, yangın-patlama duyarlılığı, akut toksik maruziyet, statik akümülatör davranışı, reaktivite ve çevresel etki gibi farklı risk eksenlerini birlikte sınayabilecek bir yapıya kavuşturulmuştur.

Üçüncü ölçüt, aynı kimyasal aile içinde dahi göreli risk farklılıklarının gözlenebilmesidir. Bu nedenle örneklem yalnızca birbirinden tamamen farklı ürün gruplarından değil, bazı durumlarda aynı ana gruba ait ancak özellikleri farklı kargolardan da oluşturulmuştur. Örneğin akrilat grubunda ethyl acrylate ile 2-ethylhexyl acrylate'in; parafin grubunda heptan ile hekzanın; ester grubunda methyl acetate ile propylene glycol methyl ether acetate'in birlikte değerlendirilmesi, modelin benzer kimyasal aileler içindeki operasyonel farkları ne ölçüde görünür kılabildiğini test etme imkânı sunmuştur. Böylece alternatif seti yalnızca "uç örneklerden" oluşan bir liste olmaktan çıkarılmış, aynı aile içi ayrımların da gözlenebildiği daha gerçekçi bir karar matrisi kurulmuştur.

Dördüncü ölçüt ise veri erişilebilirliği ve karşılaştırılabilirliktir. Çalışmada kullanılan tüm kriterlerin, seçilen kimyasallar için mümkün olduğunca karşılaştırılabilir veri formatlarında bulunabilmesi hedeflenmiştir. Parlama noktası, buhar basıncı, reaktivite, LD50, LC50, çevresel hazard ve Log Kow gibi kriterlerin farklı ürünler için aynı kalite ve açıklıkta temin edilememesi, karar modelinin güvenilirliğini doğrudan etkileyebileceğinden, nihai alternatif seti oluşturulurken veri mevcudiyeti önemli bir filtre olarak kullanılmıştır. Bu nedenle seçilen kimyasallar, yalnızca teorik olarak önemli görülen maddeler arasından değil; aynı zamanda belirlenen kriterler bakımından yeterli veriyle tanımlanabilen maddeler arasından seçilmiştir. Veri eksikliği bulunan durumlarda izlenen yaklaşım ve yapılan kabuller bir sonraki alt başlıklarda ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Bu çerçevede oluşturulan nihai alternatif seti toplam 13 kimyasal kargodan oluşmaktadır. Bunlar; Heptane, Hexane, Toluene Diisocyanate, Ethyl Acrylate, 2-Ethylhexyl Acrylate, Toluene, Phenol, Diethanolamine, Methyl Acetate, Propylene Glycol Methyl Ether Acetate, Methyl Ethyl Ketone, Phosphoric Acid ve Propylene Glycol olarak belirlenmiştir. Söz konusu set, hem MARPOL Annex II kapsamındaki düzenleyici çeşitliliği hem de terminal operasyonları açısından kritik olan farklı tehlike mekanizmalarını temsil edecek şekilde kurgulanmıştır. Böylece modelin, yalnızca tek tip tehlikeye sahip kimyasalları değil; birbirinden farklı ve kimi zaman birbiriyle çelişen risk karakterleri taşıyan kargoları da aynı karar çerçevesi içinde değerlendirme kapasitesi güçlendirilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada alternatif seçimi, nicel analizde kullanılacak kimyasalları rastgele belirleme işlemi değil; tezin problem tanımı, kriter yapısı ve amaçlanan karar destek mantığıyla uyumlu biçimde gerçekleştirilen bilinçli bir modelleme adımı olarak ele alınmıştır. Seçilen 13 kimyasal, terminal operasyonlarında karşılaşılabilecek farklı risk senaryolarını temsilen örneklem içine dahil edilmiş; böylece hibrit AHP-TOPSIS modelinin hem düzenleyici kategoriler arası hem de tehlike profilleri arası farklılıkları yansıtabilmesi hedeflenmiştir. Bu çerçevede oluşturulan nihai alternatif seti ve kargoların düzenleyici sınıflandırmalarına ait temel tanımlayıcı bilgiler Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 : Alternatif kimyasal kargolar ve temel tanımlayıcı özellikleri.

	Alternatif Kimyasal Kargo	Marpol Kategorisi	IBC Code Hazards	USCG Kimyasal Sınıfı
1	Heptane	X	P	PARAFFINS
2	Hexane	Y	S/P	PARAFFINS
3	Toluene diisocyanate	Y	S/P	ISOCYANATES
4	Ethyl acrylate	Y	S/P	ACRYLATES
5	2-Ethylhexyl acrylate	Y	S/P	ACRYLATES
6	Toluene	Y	S/P	AROMATIC HYDROCARBONS
7	Phenol	Y	S/P	PHENOLS AND CRESOLS
8	Diethanolamine	Y	S/P	ALKONOLAMINES
9	Methyl acetate	Z	P	ESTERS
10	Propylene glycol methyl ether acetate	Z	P	ESTERS
11	Methyl ethyl ketone	Z	S/P	KETONES
12	Phosphoric acid %85	Z	S/P	NON-OXIDIZING MINERAL ACIDS
13	Propylene Glycol	OS	n/a	ALCOHOLS AND GLYCOLS

3.3 Karar Matrisinin Oluşturulması ve Kriter Veri Kaynakları

Bu çalışmada alternatif kimyasal kargoların göreli operasyonel risk düzeylerini karşılaştırabilmek amacıyla, her bir kimyasalın belirlenen kriterler bakımından sayısal veya sıralı değerlerle tanımlandığı bir karar matrisi oluşturulmuştur. Karar matrisinin oluşturulmasında temel amaç, farklı fiziksel, toksikolojik ve çevresel boyutları temsil eden kriterlerin, alternatif kimyasallar için mümkün olduğunca aynı metodolojik çerçeve içinde ve karşılaştırılabilir veri formatlarında ifade edilmesini sağlamaktır. Bu nedenle veri toplama sürecinde yalnızca değerlerin kendisi değil, bu değerlerin hangi kaynaktan, hangi ölçüm koşullarında ve hangi standardizasyon kuralları altında elde edildiği de dikkate alınmıştır.

Çalışmada veri derleme süreci için temel erişim noktası olarak PubChem kullanılmıştır. Bunun başlıca nedeni, PubChem'in çok sayıda kimyasal için fizikokimyasal ve toksikolojik verileri tek bir platformda erişilebilir hale getirmesidir. Bununla birlikte PubChem'de sunulan birçok veri, doğrudan bu platform tarafından üretilen birincil ölçümler değil; ILO-WHO International Chemical Safety Cards (ICSCs), üretici güvenlik bilgi formları (SDS) ve teknik veri föyleri gibi ikincil veya aktarılan kaynaklardan derlenmiş kayıtlardır. Bu nedenle çalışmada PubChem üzerinden elde edilen veriler, mümkün olduğu ölçüde altta yatan kaynaklarla çapraz kontrol edilmiş; özellikle veri bulunmayan veya ölçüm koşulları bakımından uyumsuzluk gösteren durumlarda üretici SDS'leri ve resmî teknik kartlar tamamlayıcı kaynak olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, veri bütünlüğünü korumayı ve karar matrisinde kullanılan değerlerin karşılaştırılabilirliğini artırmayı amaçlamaktadır.

Karar modelinde kullanılan kriterler; parlama noktası, buhar basıncı, reaktivite, statik akümülatörlük, solunum toksisitesi (LC50), akut sistemik toksisite göstergesi (proxy: oral LD50), sucul yaşam toksisitesi ve biyolojik birikim potansiyeli (Log Kow) olmak üzere sekiz başlık altında toplanmıştır. Bu kriterlerin bir kısmı doğrudan sayısal verilerle, bir kısmı ise düzenleyici sınıflandırmalardan türetilmiş sıralı veya ikili değişkenlerle temsil edilmiştir. Böylece her bir kriter için hem veri erişilebilirliği hem de karar modeli içindeki işlevi dikkate alınarak uygun bir skorlandırma veya kodlama yaklaşımı benimsenmiştir.

Parlama noktası verileri, yöntemsel tutarlılığı sağlamak amacıyla kapalı kap (closed cup) ölçümleri esas alınarak derlenmiş ve işlem kolaylığı için tüm sıcaklıklar Kelvin

ölçeğine dönüştürülmüştür. Bu tercihin temel nedeni, farklı test yöntemlerinden elde edilen parlama noktası değerlerinin doğrudan karşılaştırılmasının model içinde ilave sapmalara yol açabilmesidir. Bu nedenle alternatif kimyasallar için öncelikle kapalı kap ölçümleri aranmış; PubChem kayıtlarında bu bilgi ICSC kaynakları üzerinden mevcut olduğunda bu değerler kullanılmıştır. Kapalı kap verisinin PubChem'de yer almadığı istisnai durumlarda ise üretici SDS'leri tamamlayıcı kaynak olarak değerlendirilmiştir. Örneğin diethanolamine için kapalı kap parlama noktası verisi PubChem üzerinden temin edilemediğinden, ilgili üretici SDS'sinde verilen değer esas alınmıştır. Veri setini domine etme (masking effect) riski taşıyan yanıcı olmayan Phosphoric Acid için karar matrisinde "sonsuz" bir değer kullanmak yerine, analitik duyarlılığı korumak amacıyla sonlu fakat baskın bir üst sınır değeri olan 599 K atanmıştır. Bu tercih, yöntemsel bir kabuldür ve etkisi bulgular bölümünde ayrıca tartışılmaktadır.

Buhar basıncı verileri, alternatifler arasında karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla 20°C'deki doygun buhar basıncı (kPa) değerleri üzerinden standardize edilmiştir. Bu karar, farklı sıcaklıklarda ölçülmüş buhar basıncı değerlerinin doğrudan karşılaştırılmasının fiziko-kimyasal açıdan yanıltıcı olabilmesi nedeniyle alınmıştır. Çalışmada mümkün olan tüm kimyasallar için 20°C referans sıcaklığındaki veriler tercih edilmiş; PubChem kayıtlarında bu değerlerin bulunmadığı durumlarda üretici SDS'lerinden yararlanılmıştır. Örneğin toluen için 20°C buhar basıncı değeri SDS üzerinden alınmıştır. Diethanolamine için ise ICSC kaydında verilen "20°C'de <1 Pa" bilgisi, kPa cinsine dönüştürülerek (0,001 kPa) karar matrisine işlenmiştir. Böylece bu kriterde de tüm alternatifler aynı sıcaklık referansı altında karşılaştırılmıştır.

Reaktivite kriteri, alternatif kimyasalların kararsızlık ve reaksiyon eğilimini temsil etmek üzere, PubChem kayıtlarında yer alan ve NFPA diamond system üzerinden türetilmiş reactivity score değerleri esas alınarak belirlenmiştir. Bu kriterin kullanımıyla amaç, yükün terminal operasyonları sırasında ısı, kontaminasyon, uyumsuz madde teması veya inhibitör kaybı gibi koşullarda kontrolsüz reaksiyon oluşturma potansiyelini sayısal bir değişkene dönüştürmektir. Reaktivite verileri bu çalışmada doğrudan bir kimyasal reaksiyon kinetiği modeli olarak değil, karşılaştırmalı karar analizinde kullanılabilecek pratik bir risk göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Statik akümülatörlük kriteri, elektriksel iletkenlik eşiği esas alınarak ikili (binary) biçimde kodlanmıştır. API RP 2003 ve ISGOTT'ta benimsenen endüstri pratiği doğrultusunda, elektriksel iletkenliği 50 pS/m'nin altında olan sıvılar "statik akümülatör" olarak kabul edilmiş; bu eşik üzerinde kalan sıvılar ise statik akümülatör olmayan ürünler olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmada kullanılan statik akümülatörlük verileri, Dr. Verwey's Tank Cleaning Guide'da yer alan ürün bazlı iletkenlik bilgilerinden temin edilmiştir (ChemServe GmbH, 2024). Bununla birlikte, 50 pS/m eşiğinin pratikte mutlak bir sınır olmadığı; ürünün saflık derecesine, inhibitör içerip içermediğine ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere bağlı olarak iletkenliğin bu eşiğin üzerinde seyredebileceği bilinmektedir. Bu nedenle bu çalışmada yapılan 'akümülatör / akümülatör değil' ayrımı, söz konusu kılavuzdaki verilere dayalı operasyonel bir gösterge olarak değerlendirilmeli; kesin bir fiziksel ölçüm olarak yorumlanmamalıdır. Bu kriter için sayısal iletkenlik değerinin doğrudan kullanılmamasının nedeni, çalışmanın amacının iletkenliğin nümerik farklılıklarını incelemekten çok, operasyonel prosedürü ve ateşleme riskini etkileyen eşiksel davranışı görünür kılmak olmasıdır. Dolayısıyla bu kriter, karar matrisinde "evet/hayır" mantığıyla tanımlanan yapısal bir risk göstergesi olarak yer almıştır.

Solunum toksisitesi (LC50) kriteri, kimyasalların akut inhalasyon tehlikesini karşılaştırılabilir hale getirmek amacıyla ppm/4 saat formatına standardize edilmiştir. Literatürde ve SDS'lerde yer alan LC50 verilerinin tür, maruziyet süresi ve veri kalitesi bakımından heterojen olması nedeniyle, farklı sürelerde raporlanan değerler gerekli durumlarda Haber Kuralı (Haber's Law $C \times t = k$) esas alınarak 4 saatlik eşdeğer maruziyet değerine indirgenmiştir. Bununla birlikte bu standardizasyon, tüm maddeler için aynı deneysel güvenilirlik düzeyini garanti etmemektedir. Bazı kimyasallarda veri yalnızca farklı türler üzerinden (öncelik sıçan "rat" verilerine verilmiş fakat bunun mevcut olmadığı yerlerde fare "mouse" verileri alınmıştır) veya eksik süre bilgisiyle raporlanmıştır; bu durumlarda ek SDS kaynakları ve teknik belgelerle çapraz kontrol yapılmıştır. Veri bulunmayan veya inhalasyon toksisitesi pratikte ayırt edilemeyecek kadar düşük olan (Propylene Glycol, Diethanolamine ve 2-Ethylhexyl Acrylate) durumlarda ise model bütünlüğünü korumak amacıyla yüksek eşik/üst sınır olarak 99999 ppm değeri atanmıştır. Bu tür atamalar, çalışmanın yöntemsel sınırlılıkları arasında değerlendirilmelidir.

Akut sistemik toksisite göstergesi (proxy: oral LD50) kriteri de benzer biçimde farklı kaynaklardan derlenmiştir. Bu çalışmada öncelik, mümkün olduğunca oral/rat verilerine verilmiş; bu veri mevcut değilse literatürde yer alan oral/mouse verileri tamamlayıcı olarak kullanılmıştır. Burada kullanılan LD50 değeri, dermal maruziyeti doğrudan temsil eden bir gösterge değil; kimyasalların akut sistemik toksisite düzeyini karşılaştırmak amacıyla kullanılan vekâleten (proxy) bir değişken olarak değerlendirilmiştir. Bu tercih, seçili kimyasallar için güvenilir ve karşılaştırılabilir dermal toksisite verisinin yaygın bulunmaması nedeniyle benimsenmiştir. Dolayısıyla LD50 kriteri, çalışmada terminal sahasında olası fiziksel temas sonrası ortaya çıkabilecek sistemik tehlikenin doğrudan ölçümü değil, bu tehlikeyi yaklaşık olarak temsil eden tamamlayıcı bir gösterge olarak kullanılmıştır.

Sucul yaşam toksisitesi kriteri, ham verilerden ziyade, UN GHS "Hazardous to the aquatic environment" hazard statement'larından türetilmiş sıralı (ordinal) bir çevresel tehlike skoru ile temsil edilmiştir. Bu yaklaşımın temel nedeni, farklı organizmalar ve farklı deney koşulları altında elde edilen ekotoksisite verilerinin doğrudan karşılaştırılmasının güç olmasıdır. Bu doğrultuda; H400/H410 sınıfındaki "very toxic" ifadeleri 5 puan, H401/H411 "toxic" ifadeleri 4 puan, H402/H412 "harmful" ifadeleri 3 puan, H413 ifadesi 2 puan ve sucul çevre bakımından sınıflandırılmamış veya yeterli veri bulunmayan maddeler 1 puan ile değerlendirilmiştir. Böylece akut ve kronik tehlike ifadeleri, taşıdıkları ana tehlike şiddeti esas alınarak aynı skala içinde birleştirilmiştir. Çalışmada chronic ifadeler, "long lasting effects" boyutuna ayrıca ek puan verilmeksizin, yalnızca temsil ettikleri hazard düzeyi bakımından değerlendirilmiştir. Bu tercih, çevresel risk boyutunda uzun dönem birikim davranışının ayrıca Log Kow kriteri ile temsil edilmesi nedeniyle, aynı çevresel mekanizmanın iki farklı kriter altında tekrar edilmesinden kaçınmak amacıyla benimsenmiştir.

Biyolojik birikim potansiyeli için kullanılan Log Kow değeri, GESAMP yaklaşımında ölçülmüş BCF verisinin bulunmadığı durumlarda biyobirikim eğiliminin göstergesi olarak kabul edilen pratik bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada da alternatifler arasında karşılaştırılabilir ve sürekli veri sağlayabilmek amacıyla Log Kow kullanılmıştır. Log Kow değeri arttıkça maddenin lipofilik karakteri ve biyolojik dokulara yönelme eğiliminin artabileceği kabul edilmiş; düşük veya negatif Log Kow değerleri ise daha düşük biyolojik birikim eğilimi ile ilişkilendirilmiştir. Ancak

biyobozunurluk, hidroliz veya çevresel kalıcılık gibi davranışlar Log Kow'dan doğrudan türetilmediğinden, bu kriter yalnızca biyobirikim eğilimi boyutunu temsil eden bir değişken olarak kullanılmıştır.

Karar matrisinin oluşturulmasında veri eksikliği veya ölçüm koşullarındaki uyumsuzluklardan kaynaklanan bazı istisnai durumlar için açık varsayımlar tanımlanmıştır. Bu varsayımlar, modelin tüm alternatifler için çalıştırılabilmesini sağlamak amacıyla benimsenmiş olup, ilgili bölümde ve bulguların tartışıldığı kısımda ayrıca değerlendirilmiştir. Bu çerçevede; yanıcı olmayan kimyasallara parlama noktası bakımından yüksek fakat sonlu bir üst sınır atanmış, inhalasyon toksisitesi verisi bulunmayan veya son derece düşük tehlike gösteren maddeler için yüksek eşik değeri tanımlanmış ve "not classified/no data" durumları çevresel tehlike skorunda en düşük düzeyde birleştirilmiştir. Bu kararlar modelin işleyişini mümkün kılmakla birlikte, sonuçların yorumlanmasında dikkate alınması gereken yöntemsel kabuller olarak kabul edilmiştir. Belirtilen kaynaklar, standardizasyon kuralları ve veri atama protokolleri sonucunda, ÇKKV modelinde kullanılmak üzere elde edilen 13 kimyasal kargoya ait Başlangıç Karar Matrisi Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2 : AHP ve TOPSIS modellerinde kullanılacak başlangıç karar matrisi.

Alternatif Kimyasal Kargolar	Parlama Noktası (c.c. Kelvin)	Buhar Basıncı (kPa @20°C)	Reaktivite (NFPA Skoru 0/4)	Statik Akümülatör (1/0)	LD50 Oral (mg/kg)	LC50 Solunum (ppm/4H)	Sucul Yaşam Skoru (1-5)	Biyobirikim (Log Kow)
Heptane	266	4,6	0	1	5840	25133	5	4,66
Hexane	251	17	0	1	28710	48000	4	3,9
Toluene diisocyanate	400	0,0013	2	0	1950	14	3	3,4
Ethyl acrylate	282	3,9	2	1	890	1500	3	1,32
2-Ethylhexyl acrylate	355	0,019	1	1	4400	99999	3	3,67
Toluene	277	3	0	1	5000	8000	4	2,73
Phenol	352	0,047	0	0	317	82	4	1,46
Diethanolamine	464	0,001	0	0	710	99999	1	-1,43
Methyl acetate	260	23,1	0	0	5000	15842	1	0,18
P. G. M. ether acetate	315	0,5	0	0	8532	5320	1	0,56
Methyl ethyl ketone	264	10,5	0	1	3400	10850	1	0,29
Phosphoric acid %85	599	0,29	0	0	1530	53	3	-0,77
Propylene Glycol	374	0,0106	0	0	22000	99999	1	-0,92

Çalışmada kullanılan sekiz kriter, Bölüm 2'de ayrıntılandırılan literatür taraması ve operasyonel risk mekanizmaları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, kimyasal tanker terminallerindeki operasyonel riski temsil edebilecek bazı potansiyel kriterler, metodolojik ve pratik gerekçelerle model kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu kriterlerin neden dahil edilmediğinin açıklanması, modelin sınırlarının netleştirilmesi ve sonuçların doğru yorumlanması açısından önem taşımaktadır.

Korozyon (Corrosivity): Korozif etki, terminal operasyonlarında KKD (koruyucu ekipman) ve uygun malzeme seçimi (paslanmaz çelik hatlar, aside dayanıklı tank kaplamaları) ile büyük ölçüde bertaraf edilebilen, yani operasyonel bariyerleri olan bir risk türüdür. Buna karşılık yangın, patlama ve fark edilmeyen toksik buhar maruziyeti gibi riskler, sahada operasyonel bariyerlerin anlık olarak aşılabildiği ve sonuçlarının çok daha hızlı geliştiği risk boyutlarıdır. GHS H314/H315 sınıfları ordinal bir skalaya dönüştürülebilse dahi, bu skala korozif şiddetten ziyade "temas süresine bağlı doku hasarı"nı sınıflandırır. Sucul toksisite skorundan farklı olarak, korozyonun terminal operasyonel riskiyle bağlantısı "anlık olay zinciri başlatma potansiyeli"nden çok "uzun vadeli ekipman bütünlüğü" ile ilgilidir. Dolayısıyla korozyon, bu modelin odağındaki "anlık operasyonel risk önceliklendirmesi" mantığıyla tam örtüşmemektedir. Yine de fosforik asit gibi korozif ürünlerin sıralamadaki konumunun yorumlanmasında bu sınırlılık göz önünde bulundurulmalıdır.

Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (Auto-ignition Temperature - AIT): IBC Kod'da Tip 1 gemi zorunluluğu için bir eşik kriter olarak kullanılan AIT ($\leq 65°C$), parlama noktasından farklı olarak dışsal bir ateşleme kaynağına ihtiyaç duymayan senaryolar için kritik bir parametredir. Bu kriterin modele dahil edilmemesinin temel nedeni, seçili 13 alternatif kimyasalın büyük çoğunluğu için AIT değerlerinin 200°C'nin üzerinde seyretmesi ve bu haliyle terminal sahasındaki operasyonel risk ayrıştırmasına anlamlı bir katkı sunmamasıdır. Başka bir deyişle, incelenen kimyasal setinde AIT, alternatifler arasında belirgin bir varyans göstermediğinden, TOPSIS sıralamasına etkisi sınırlı kalacaktır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık ortamlarında operasyon yapan terminaller veya düşük AIT'li özel kimyasalların (örneğin karbon disülfür gibi) dahil edildiği genişletilmiş modellerde bu kriterin kullanılması önerilir.

Kronik Toksisite: GESAMP Tehlike Profili'nin D3 sütununda yer alan ve IBC Kod'un sağlık tehlikesi tanımında "diğer sağlık etkileri" başlığı altında sınıflandırılan kronik toksisite (kanserojenlik, mutajenite, üreme toksisitesi, solunum duyarlılığı gibi),

terminal personelinin tekrarlayan maruziyetleri açısından önemli bir risk boyutudur. Bu kriterin modele dahil edilmemesinin iki temel gerekçesi bulunmaktadır. Birincisi, kronik toksisite göstergeleri (CMRTNI kodları) doğası gereği kategorik ve çok boyutludur; bu göstergelerin akut toksisite parametreleriyle (LC50, LD50) aynı ölçekte karşılaştırılabilir tek bir sayısal değere indirgenmesi metodolojik olarak sorunludur. İkincisi, bu çalışmanın odağında terminal sahasında anlık olarak ortaya çıkabilecek operasyonel risklerin (yangın, patlama, akut maruziyet) önceliklendirilmesi yer almakta olup, kronik sağlık etkileri daha çok uzun dönemli mesleki maruziyet yönetimi kapsamında değerlendirilmesi gereken ayrı bir risk eksenidir. Bu kriterin dışarıda bırakılması, kronik toksisitenin önemsiz olduğu anlamına gelmemekte; yalnızca bu çalışmanın operasyonel risk önceliklendirmesi odağıyla sınırlı kapsamını yansıtmaktadır.

Sonuç olarak bu bölümde oluşturulan karar matrisi, seçili kimyasallara ait fiziksel, toksikolojik ve çevresel verilerin tek bir analitik çerçeve altında standardize edilmesiyle elde edilmiştir. Böylece AHP ile ağırlıklandırılacak ve TOPSIS ile sıralanacak alternatiflerin, mümkün olan en yüksek karşılaştırılabilirlik düzeyi içinde temsil edilmesi amaçlanmıştır. Bir sonraki bölümde, uzman grubunun belirlenmesi ve bu uzmanlardan elde edilen değerlendirmelerin AHP sürecine nasıl aktarıldığı açıklanmaktadır.

3.4 Uzman Grubunun Belirlenmesi ve Uzmanların Mesleki Profili

Bu çalışmada AHP aşamasında kullanılacak ikili karşılaştırma verilerinin elde edilmesi amacıyla, kimyasal tanker terminallerinde operasyonel riskin farklı boyutlarını değerlendirebilecek nitelikte bir uzman grubu oluşturulmuştur. AHP literatüründe (Saaty, 2008), karar probleminin karmaşıklığı arttıkça konuya uzak geniş kitlelerden anket toplamak yerine; problemi analitik olarak kavrayabilecek, saha tecrübesine sahip küçük ama nitelikli bir uzman grubu kullanılması yöntembilimsel olarak daha geçerli kabul edilmektedir. Bu bağlamda uzman seçiminde temel amaç, istatistiksel büyük sayılara ulaşmak değil; terminal operasyonları, gemi-kıyı arayüzü emniyeti ve toksikolojik değerlendirme gibi birbirini tamamlayan disiplinlerin (denizcilik, mühendislik ve kimya) saha bilgisini aynı karar sürecinde derinlemesine temsil edebilmektir.

Çalışmada toplam altı uzman yer almıştır. Uzman grubunun mesleki dağılımı, üç mühendis ve üç kimyager olacak şekilde dengeli biçimde kurgulanmıştır. Uzman grubunun niteliğini güçlendiren en önemli husus, katılımcıların sahip olduğu üst düzey mesleki tecrübe ve resmi yetkinliklerdir. Katılımcıların mesleki tecrübe süreleri 10 ile 20 yıl arasında değişmekte olup, grubun ortalama mesleki deneyimi 15.3 yıl düzeyindedir. Bunun yanı sıra, uzmanlardan biri tehlikeli yük taşımacılığının temel yapıtaşı olan IMDG Kod eğitmenliği deneyimine; iki uzman ise Kimyasal Değerlendirme Uzmanı (KDU) yetkinliği ile Güvenlik Bilgi Formu (GBF/SDS) hazırlama yetkisine sahiptir. Bu özellikler, karar vericilerin yalnızca terminal operasyon pratiğine değil; aynı zamanda kimyasal güvenlik iletişimi ve mevzuat temelli risk değerlendirmesi alanlarında da yetkin bilgi ve deneyime sahip olduklarını göstermektedir.

Katılımcıların isimleri kişisel veri ve akademik etik hassasiyetleri doğrultusunda metinde paylaşılmamış; buna karşılık uzmanlık alanları, deneyim süreleri ve özel yetkinlikleri Çizelge 3.3'te toplulaştırılmış biçimde sunulmuştur.

Çizelge 3.3 : Karar problemine katkı sağlayan uzman grubunun mesleki profili.

Uzman Kodu	Mesleki Disiplini ve Görev Alanı	Özel Mesleki Yetkinlik	Mesleki Tecrübe
Uzman 1	Mühendis (Kimya / Terminal Operasyonları)	Saha Operasyon Yönetimi	16 yıl
Uzman 2	Mühendis (Denizcilik / Terminal Operasyonları)	Saha Operasyon Yönetimi	12 yıl
Uzman 3	Mühendis (Denizcilik / Terminal Operasyonları)	Saha Operasyon Yönetimi ve IMDG Kod Eğitmeni	15 yıl
Uzman 4	Kimyager (Tehlikeli Madde / Kalite Kontrol)	Laboratuvar / Kalite ve KDU (SDS Hazırlayıcı)	20 yıl
Uzman 5	Kimyager (Tehlikeli Madde / Kalite Kontrol)	Laboratuvar / Kalite ve KDU (SDS Hazırlayıcı)	19 yıl
Uzman 6	Kimyager (Tehlikeli Madde / Kalite Kontrol)	Laboratuvar / Kalite	10 yıl

Uzman görüşü toplama sürecinde, katılımcılara çalışmanın amacı, kapsamı ve değerlendirilecek kriterlerin anlamı hakkında açıklayıcı bir ön bilgilendirme yapılmıştır. Özellikle birbirine yakın görülebilecek bazı kriterlerin farklı risk mekanizmalarını temsil ettiği, anket öncesinde uzmanlara açık biçimde ifade edilmiştir. Örneğin buhar basıncının "maruziyetin oluşma potansiyeli", LC50'nin "biyolojik etkinin şiddeti", sucul yaşam toksisitesinin "çevresel hazard düzeyi" ve Log

Kow'un ise "biyolojik birikim eğilimi" boyutunu temsil ettiği vurgulanmıştır. Bu yaklaşım, Bölüm 2.2'de kurgulanan kuramsal çerçeveye sadık kalınmasını sağlamış ve kriterler arasında kavramsal karışıklık veya "çifte sayım (double counting)" oluşmasını azaltmayı amaçlamıştır.

Veri toplama sürecinde uzmanlardan, bu kavramsal sınırları çizilmiş ana ve alt kriterleri ikili karşılaştırma mantığı çerçevesinde değerlendirmeleri istenmiştir. AHP yapısına uygun olarak hazırlanan formlar üzerinden her uzman, kriter çiftlerini Saaty'nin 1–9 önem ölçeği üzerinden puanlamıştır. Elde edilen bireysel ikili karşılaştırma matrisleri, grup kararını (consensus) temsil edecek ortak yapıya dönüştürülmek üzere literatür standartlarına uygun olarak geometrik ortalama yöntemiyle birleştirilmiştir. Uzmanlardan toplanan ikili karşılaştırma verileri ve grubun ortak kararını temsil eden geometrik ortalamalar ise Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4 : Uzmanların ikili karşılaştırma değerlendirmeleri ve geometrik ortalamalar.

Kriterler	Karşılaştırma	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	Uzman 4	Uzman 5	Uzman 6	Geometrik Ortalama
ANA KRİTERLER	Fiziksel – Sağlık	4	5	5	9	4	6	5,277266
	Fiziksel – Çevre	2	2	4	9	7	5	4,140681
	Sağlık - Çevre	0,5	0,5	0,333333	6	6	2	1,348006
FİZİKSEL RİSKLER	Parlama Noktası - Buhar Basıncı	1	2	3	0,2	0,5	3	1,102924
	Parlama Noktası - Reaktivite	5	0,5	4	0,142857	6	5	1,870699
	Parlama Noktası - Statik Akümülatör	1	3	0,2	0,125	3	0,333333	0,649397
	Buhar Basıncı - Reaktivite	3	0,25	5	0,166667	3	5	1,452096
	Buhar Basıncı - Statik Akümülatör	1	2	0,25	0,142857	3	0,5	0,689171
	Reaktivite - Statik Akümülatör	0,5	4	0,333333	7	0,5	0,25	0,914084
İNSAN SAĞLIĞI	LC50 - LD50	6	5	1	7	4	0,333333	2,557759
ÇEVRESEL RİSK	Sucul Yaşam - LogKow	0,2	0,2	0,5	6	2	0,2	0,602847

Kriter ağırlıklarının hesaplanması ve uzman değerlendirmelerinin tutarlılık analizine (CR) ilişkin sayısal ayrıntılar bir sonraki bölümde sunulmaktadır.

3.5 AHP ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması ve Tutarlılık Analizi

Bu çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla AHP yöntemi uygulanmıştır. AHP aşaması, ikinci bölümde kavramsal olarak tanımlanan kriter yapısının uzman görüşleri yardımıyla nicel ağırlıklara dönüştürülmesini amaçlamaktadır. Bu doğrultuda karar problemi, üç düzeyli bir hiyerarşik yapı içinde modellenmiştir: Amaç düzeyi, ana kriterler düzeyi ve alt kriterler düzeyi. Amaç düzeyinde kimyasal tanker terminallerinde elleçlenen kargoların göreli operasyonel riskinin belirlenmesi yer almakta; ana kriterler düzeyinde fiziksel riskler, insan sağlığına ilişkin riskler ve çevresel riskler bulunmaktadır. Alt kriterler düzeyinde ise fiziksel riskler için dört, insan sağlığı ve çevresel riskler için ikişer alt kriter tanımlanmıştır.

AHP uygulamasında uzmanlardan, aynı hiyerarşik düzeyde yer alan kriterleri ikili karşılaştırma yöntemiyle değerlendirmeleri istenmiştir. Bu karşılaştırmalarda Saaty'nin 1–9 önem ölçeği esas alınmıştır. Buna göre 1 değeri iki kriterin eşit önemde olduğunu, 3 ve 5 değerleri sırasıyla orta ve güçlü üstünlüğü, 7 ve 9 değerleri ise çok güçlü ve mutlak üstünlüğü temsil etmektedir. Ara değerler ise uzmanların daha ince ayrım yapabilmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Her karşılaştırma sonucunda elde edilen a_{ij} değeri, i kriterinin j kriterine göre göreli önemini göstermekte; ters yöndeki karşılaştırma ise karşılıklılık ilkesi gereği $1/a_{ij}$ biçiminde matris içinde yer almaktadır. Böylece her uzman için pozitif ve karşılıklı bir ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur.

Çalışmada AHP hesaplamaları dört ayrı karşılaştırma kümesi üzerinden yürütülmüştür. İlk küme, üç ana kriterin birbiriyle karşılaştırıldığı ana kriter matrisidir. İkinci küme, fiziksel riskler altındaki dört kriterin karşılaştırıldığı fiziksel alt kriter matrisidir. Üçüncü ve dördüncü kümeler ise sırasıyla insan sağlığı ve çevresel riskler altındaki ikişer kriterin karşılaştırıldığı sağlık alt kriter matrisi ve çevresel alt kriter matrisidir. Böylece hem ana kriterlerin kendi aralarındaki göreli önemleri, hem de her ana kriter grubu içindeki alt kriterlerin yerel ağırlıkları ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Birden fazla uzmanın değerlendirmelerinin ortak bir karar yapısına dönüştürülebilmesi için, bireysel ikili karşılaştırma matrisleri geometrik ortalama yöntemiyle

birleştirilmiştir. Bu yaklaşım, AHP literatüründe grup kararının oluşturulmasında yaygın olarak benimsenen yöntemlerden biridir. Her bir karşılaştırma çifti için uzmanlardan elde edilen değerlerin geometrik ortalaması alınarak ortak uzlaşıyı temsil eden birleşik karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Böylece tek bir uzmanın görüşüne dayalı ağırlıklandırma yerine, uzman grubunun ortak değerlendirmesini yansıtan bir matris yapısı elde edilmiştir. Geometrik ortalama yöntemiyle birleştirilen ikili karşılaştırma matrisleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisleri.

ANA KRİTERLER	Karşılaştırma	Fiziksel	Sağlık	Çevre	
	Fiziksel	1	5,277266	4,140681	
	Sağlık	0,189492	1	1,348006	
	Çevre	0,241506	0,741836	1	
FİZİKSEL RİSKLER	Karşılaştırma	Parlama Noktası	Buhar Basıncı	Reaktivite	Statik Akümülatör
	Parlama Noktası	1	2	0,5	3
	Buhar Basıncı	0,5	1	0,25	2
	Reaktivite	2	4	1	4
	Statik Akümülatör	0,333333	0,5	0,25	1
İNSAN SAĞLIĞI	Karşılaştırma	LC50	LD50		
	LC50	1	2,557759		
	LD50	0,390967	1		
ÇEVRESEL RİSK	Karşılaştırma	Sucul Yaşam	LogKow		
	Sucul Yaşam	1	0,602847		
	LogKow	1,658797	1		

Birleşik karşılaştırma matrislerinden kriter ağırlıklarının hesaplanmasında, AHP'nin klasik özvektör yaklaşımı esas alınmıştır. Buna göre her matris için en büyük özdeğere karşılık gelen normalize edilmiş özvektör, kriterlerin göreli ağırlıklarını göstermektedir. Elde edilen bu ağırlıklar, ilgili düzeydeki kriterlerin toplamı 1 olacak şekilde normalize edilmiş ve Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 : Birleştirilmiş normalize matrisler ve yerel ağırlıklar.

	Karşılaştırma	Fiziksel	Sağlık	Çevre	Yerel Ağırlık	
ANA KRİTERLER	Fiziksel	0,698813	0,751843	0,638138	0,696265	
	Sağlık	0,132419	0,142468	0,207747	0,160878	
	Çevre	0,168768	0,105688	0,154114	0,142857	
FİZİKSEL RİSKLER	Karşılaştırma	Parlama Noktası	Buhar Basıncı	Reaktivite	Statik Akümülatör	Yerel Ağırlık
	Parlama Noktası	0,251185	0,259964	0,345352	0,199651	0,264038
	Buhar Basıncı	0,227745	0,235704	0,268073	0,21188	0,235851
	Reaktivite	0,134273	0,16232	0,184611	0,281027	0,190558
	Statik Akümülatör	0,386797	0,342011	0,201963	0,307441	0,309553
İNSAN SAĞLIĞI	Karşılaştırma	LC50	LD50	Yerel Ağırlık		
	LC50	0,718924	0,718924	0,718924		
	LD50	0,281076	0,281076	0,281076		
ÇEVRESEL RİSK	Karşılaştırma	Sucul Yaşam	LogKow	Yerel Ağırlık		
	Sucul Yaşam	0,37611	0,37611	0,37611		
	LogKow	0,62389	0,62389	0,62389		

Ana kriterler için hesaplanan ağırlıklar, ilgili kriter grubunun genel karar problemi içindeki önemini; alt kriterler için hesaplanan yerel ağırlıklar ise kendi ana kriter grubu içindeki önem derecesini ifade etmektedir. Son aşamada alt kriterlerin küresel ağırlıkları, ilgili ana kriter ağırlığı ile yerel alt kriter ağırlığının çarpılması yoluyla elde edilmiştir. Böylece TOPSIS aşamasında kullanılacak nihai kriter ağırlıkları oluşturulmuş ve Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 : Kriterlerin ağırlıklandırılması.

Kriter	Küresel Ağırlık
Statik Akümulatörlük	%21,55
Parlama Noktası (c.c. Kelvin)	%18,38
Buhar Basıncı (kPa @ 20 °C)	%16,42
Reaktivite (NFPA 0-4)	%13,27
Solunum Toksisitesi (LC50 ppm/4H)	%11,57
Biyo birikim (Log Kow)	%8,91
Sucul Yaşam	%5,37
Sistemik Toksisite (LD50 oral mg/kg)	%4,52

Uzman değerlendirmelerinin güvenilirliğini test etmek amacıyla her karşılaştırma matrisi için Tutarlılık İndeksi (CI) ve Tutarlılık Oranı (CR) hesaplanmış ve Çizelge 3.8'de gösterilmiştir. Bu hesaplamalarda, tezin kavramsal çerçevesinde detaylandırılan ve Denklem 2.2 ile ifade edilen matematiksel altyapı kullanılmıştır. AHP literatüründe yaygın kabul gören yaklaşıma göre, $CR < 0{,}10$ olması durumunda uzman değerlendirmeleri kabul edilebilir düzeyde tutarlı sayılmaktadır. Bu çalışmada da hem ana kriter matrisi hem de alt kriter matrisleri için hesaplanan tutarlılık oranları bu eşik değere göre değerlendirilmiş ve oluşturulan matrislerin tamamında tutarlılık oranlarının kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı görülmüştür. Böylece uzman görüşlerinden türetilen kriter ağırlıklarının, yalnızca içerik bakımından değil, matematiksel tutarlılık bakımından da güvenilir olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 3.8 : Karşılaştırma matrislerine ilişkin tutarlılık analizi sonuçları.

Matris	λmax	CI	RI	CR
Ana Kriterler (3×3)	3,05	0,03	0,52	0,05
Fiziksel Alt Kriterler (4×4)	4,09	0,03	0,89	0,03
Sağlık Alt Kriterleri (2×2)	2	0	0	-
Çevre Alt Kriterleri (2×2)	2	0	0	-

AHP aşamasında elde edilen ağırlıklar, çalışmanın kuramsal çerçevesi ile de uyumlu bir yapı sunmuştur. Ana kriterler düzeyinde fiziksel risklerin, insan sağlığına ilişkin risklerin ve çevresel risklerin göreli önemleri; alt kriterler düzeyinde ise her risk

grubunu oluşturan kriterlerin kendi iç ağırlıkları belirlenmiştir. Ancak bu bölümün amacı yöntemsel süreci ve hesaplama mantığını açıklamak olduğundan, ağırlıkların sayısal sonuçları bir sonraki bölümde bulgular kapsamında ayrıntılı olarak değerlendirilecektir.

Sonuç olarak AHP uygulaması, bu tezde yer alan kriterlerin göreli önem düzeylerinin uzman bilgisi ve saha tecrübesi temelinde sayısallaştırılmasını sağlamıştır. Tutarlılık analizinin kabul edilebilir sonuç vermesi, ağırlıklandırma sürecinin yöntemsel güvenilirliğini desteklemektedir. Elde edilen nihai kriter ağırlıkları, sonraki aşamada TOPSIS yöntemine aktarılmış ve alternatif kimyasal kargoların göreli operasyonel risk sıralamasının hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu nedenle AHP aşaması, hibrit modelin ağırlıklandırma bileşenini oluşturan temel yöntemsel basamak olarak değerlendirilmelidir.

3.6 TOPSIS ile Alternatiflerin Sıralanma Adımları

Bu çalışmada AHP yöntemiyle kriter ağırlıkları belirlendikten sonra, alternatif kimyasal kargoların göreli operasyonel risk düzeylerinin sıralanması amacıyla TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. TOPSIS'in kuramsal temeli ve matematiksel çerçevesi Bölüm 2.4.2'de sunulmuş olup, bu bölümde söz konusu yöntemin mevcut çalışmaya özgü uygulama adımları açıklanmaktadır. Bu bağlamda TOPSIS, seçilen kimyasal alternatiflerin farklı ölçü birimleriyle ifade edilen fiziksel, toksikolojik ve çevresel verilerini, AHP ile elde edilen kriter ağırlıkları altında tek bir karşılaştırmalı risk endeksine dönüştürmek amacıyla kullanılmıştır.

Bu çalışmada oluşturulan karar matrisi, 13 alternatif kimyasal ve 8 kriterden oluşmaktadır. Karar matrisinde yer alan kriterler; parlama noktası, buhar basıncı, reaktivite, statik akümülatörlük, LC50, LD50, sucul yaşam toksisitesi ve Log Kow olarak tanımlanmıştır. Bu kriterlerin bir kısmı sürekli sayısal veri, bir kısmı ise ikili veya sıralı veri niteliği taşımaktadır. Dolayısıyla alternatiflerin doğrudan karşılaştırılması mümkün olmadığından, karar matrisi Bölüm 2.4.2'de açıklanan normalizasyon adımları izlenerek boyutsuzlaştırılmış ve ardından AHP ile elde edilen kriter ağırlıkları matrise uygulanmıştır.

Bu aşamadan sonra her bir kriter bakımından pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm belirlenmiştir. Ancak bu çalışmada TOPSIS, klasik "en iyi alternatif" seçimi

için değil, en yüksek operasyonel riski taşıyan kimyasalların göreli sıralanması amacıyla kullanılmıştır. Bu nedenle pozitif ideal çözüm, güvenli veya arzu edilen koşulları değil; ilgili kriter bakımından en kritik risk profilini temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Negatif ideal çözüm ise göreli olarak en düşük risk profilini temsil etmektedir.

Bu bağlamda kriter yönleri, risk mantığına göre iki grupta değerlendirilmiştir. Değeri arttıkça riskin arttığı kriterlerde (buhar basıncı, reaktivite, statik akümülatörlük, sucul yaşam toksisitesi ve Log Kow) pozitif ideal çözüm ilgili sütunun maksimum değerinden, negatif ideal çözüm ise minimum değerinden oluşturulmuştur. Buna karşılık değeri azaldıkça riskin arttığı kriterlerde (parlama noktası, LC50 ve LD50) pozitif ideal çözüm ilgili sütunun minimum değerinden, negatif ideal çözüm ise maksimum değerinden belirlenmiştir. Böylece her bir kriter için "en kritik" ve "en düşük riskli" uç değerler, çalışmanın risk odaklı mantığıyla uyumlu biçimde tanımlanmıştır.

Normalize edilmiş ve AHP ağırlıklarıyla ağırlıklandırılmış karar matrisi, pozitif ideal (A^+) ve negatif ideal (A^-) çözümler Çizelge 3.9'da gösterilerek yukarıda anlatılanlar derlenerek özetlenmiştir.

Çizelge 3.9 : Normalize edilmiş ve AHP ağırlıklarıyla ağırlıklandırılmış karar matrisi, pozitif ideal (A^+) ve negatif ideal (A^-) çözümler.

Alternatif	Parlama Noktası	Buhar Basıncı	Reaktivite	Statik Akümülatör	LD50	LC50	Sucul Yaşam	Log Kow
Heptane	0,0381	0,0241	0	0,088	0,0068	0,0159	***0,0252***	***0,0473***
Hexane	***0,0359***	0,0892	0	0,088	***0,0335***	0,0304	0,0201	0,0396
Toluen diizosiyanat	0,0572	***0***	0,0885	0	0,0023	***0***	0,0151	0,0345
Etil akrilat	0,0404	0,0205	0,0885	0,088	0,001	0,0009	0,0151	0,0134
2-Etilhekzil akrilat	0,0508	0,0001	0,0442	0,088	0,0051	***0,0633***	0,0151	0,0372
Toluen	0,0396	0,0157	0	0,088	0,0058	0,0051	0,0201	0,0277
Fenol	0,0504	0,0002	0	0	***0,0004***	0,0001	0,0201	0,0148
Dietanolamin	0,0664	***0***	0	0	0,0008	***0,0633***	***0,005***	***−0,0145***
Metil asetat	0,0372	***0,1213***	0	0	0,0058	0,01	***0,005***	0,0018
PGMEA	0,0451	0,0026	0	0	0,0099	0,0034	***0,005***	0,0057
Metil etil keton	0,0378	0,0551	0	0,088	0,004	0,0069	***0,005***	0,0029
Fosforik asit	***0,0857***	0,0015	0	0	0,0018	***0***	0,0151	−0,0078
Propilen glikol	0,0535	0,0001	0	0	0,0257	***0,0633***	***0,005***	−0,0093
A^- (En riskli)	***0,0359***	***0,1213***	***0,0885***	***0,088***	***0,0004***	***0***	***0,0252***	***0,0473***
A^+ (En güvenli)	***0,0857***	***0***	***0***	***0***	***0,0335***	***0,0633***	***0,005***	***−0,0145***

Bu risk yönlü sınıflandırma, çalışmanın kavramsal çerçevesi ile de uyumludur. Zira bu tezde amaç, kimyasal kargoları çevresel veya fiziksel açıdan "uygunluk" bakımından sınıflandırmak değil; terminal operasyonları açısından göreli risk yoğunluğunu görünür hale getirmektir. Bu nedenle TOPSIS çıktısı olan göreli yakınlık katsayısı (C_i^*), bu çalışmada alternatif kimyasalın "en kritik risk profiline yakınlığını" ifade etmektedir. (C_i^*) değerinin 1'e yaklaşması, ilgili kimyasalın pozitif ideal risk profiline daha yakın olduğunu ve dolayısıyla göreli olarak daha yüksek operasyonel risk taşıdığını; 0'a yaklaşması ise daha düşük risk profiline daha yakın olduğunu göstermektedir. Nihai risk sıralaması, kimyasalların (C_i^*) değerlerine göre büyükten küçüğe doğru sıralanmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10 : Alternatiflerin ideal çözümlere Öklid uzaklıkları, göreli yakınlık katsayıları ve nihai risk sıralaması.

Sıra	Alternatif	S^+ (En güvenliye uzaklık)	S^- (En riskliye uzaklık)	C_i	MARPOL
1	Etil akrilat	0,1069	0,1545	**0,5910**	Y
2	Hekzan	0,1047	0,1497	**0,5886**	Y
3	Metil etil keton	0,1210	0,1320	**0,5219**	Z
4	Metil asetat	0,1348	0,1447	**0,5176**	Z
5	Heptan	0,1325	0,1333	**0,5016**	X
6	Toluen	0,1394	0,1276	**0,4778**	Y
7	Toluen diizosiyanat	0,1522	0,1269	**0,4547**	Y
8	2-Etilhekzil akrilat	0,1452	0,1204	**0,4533**	Y
9	Fenol	0,1775	0,0862	**0,3269**	Y
10	PGMEA	0,1788	0,0788	**0,3059**	Z
11	Fosforik asit	0,1885	0,0718	**0,2758**	Z
12	Dietanolamin	0,1986	0,0379	**0,1604**	Y
13	Propilen glikol	0,1970	0,0335	**0,1455**	OS

TOPSIS aşamasında kullanılan bir diğer önemli uygulama tercihi, heterojen veri yapısının tek bir karar yapısı içinde korunmasıdır. Bu çalışmada parlama noktası kelvin sıcaklık birimiyle, buhar basıncı kPa ile, LC50 ppm/4 saat cinsinden, sucul yaşam toksisitesi ise GHS hazard statement'lardan türetilmiş ordinal bir skorla ifade edilmektedir. Aynı şekilde statik akümülatörlük kriteri ikili, Log Kow ise sürekli bir

değişken niteliğindedir. TOPSIS yöntemi, bu heterojen yapıyı ortak bir matematiksel zeminde işleyerek, farklı risk mekanizmalarını aynı karar problemi içinde birlikte değerlendirme imkânı sunmuştur. Bu durum, yöntemin kimyasal tanker terminali gibi çok boyutlu risk ortamlarında kullanılmasını özellikle anlamlı kılmaktadır.

Bununla birlikte, statik akümülatörlük kriterinin ikili (0/1) yapısı ile diğer kriterlerin sürekli veya ordinal yapısı arasındaki farklılık, normalizasyon aşamasında metodolojik bir hassasiyet oluşturmaktadır. Vektör normalizasyonu, sürekli değişkenler için verinin dağılımını korurken; ikili bir değişkenin normalize edilmiş değeri, o kritere ait sütundaki "1" ve "0" sayısına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada 13 alternatiften altısı statik akümülatör, yedisi ise statik akümülatör olmayan ürünlerden oluştuğundan, normalize edilmiş değerler sırasıyla 0,4082 ve 0 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, statik akümülatörlük kriterinin TOPSIS hesaplamalarında sürekli değişkenlere kıyasla daha keskin bir ayrım yaratmasına yol açmakta; ancak bu keskinlik, kriterin operasyonel gerçeklikteki eşik temelli doğasını (ISGOTT'taki 50 pS/m eşiği ve buna bağlı prosedürel kısıtlar) yansıtması bakımından metodolojik olarak savunulabilirdir. Nitekim AHP sonuçlarında bu kritere atfedilen yüksek ağırlığın da benzer bir operasyonel mantığı yansıttığı görülmektedir. Yine de ikili değişkenlerin TOPSIS normalizasyonundaki bu özel konumu, sonuçlar yorumlanırken göz önünde bulundurulması gereken yöntemsel bir not olarak değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada TOPSIS hesaplamaları Microsoft Excel ortamında gerçekleştirilmiştir. Karar matrisinin normalize edilmesi, ağırlıklı normalize matrisin oluşturulması, risk yönüne göre pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi, alternatiflerin bu referans noktalara olan uzaklıklarının hesaplanması ve göreli yakınlık katsayılarının elde edilmesi aynı çalışma dosyası içinde sistematik olarak yürütülmüştür. Böylece modelin yalnızca teorik olarak değil, uygulama düzeyinde de şeffaf, izlenebilir ve tekrar edilebilir biçimde kurulması sağlanmıştır.

Sonuç olarak TOPSIS aşaması, hibrit modelin sıralama bileşenini oluşturmaktadır. AHP ile uzman yargısına dayalı olarak belirlenen kriter ağırlıkları, TOPSIS aracılığıyla alternatif kimyasalların somut veri profilleriyle birleştirilmiş ve her bir kargo için göreli operasyonel risk düzeyi hesaplanmıştır. Böylece model, terminal operasyonlarında farklı tehlike mekanizmalarını aynı karar çerçevesi içinde değerlendiren ve sonuçta açık, karşılaştırılabilir ve uygulamaya aktarılabilir bir risk sıralaması üreten bütüncül bir karar destek yapısına dönüşmüştür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, önceki bölümde açıklanan hibrit AHP-TOPSIS modelinin uygulanması sonucunda elde edilen bulgular sunulmakta ve kimyasal tanker terminali bağlamında değerlendirilmektedir. İlk olarak AHP yöntemiyle elde edilen ana ve alt kriter ağırlıkları incelenerek, terminal operasyonlarında hangi risk boyutlarının göreli olarak daha baskın olduğu ortaya konulmaktadır. Ardından TOPSIS yöntemiyle alternatif kimyasal kargolar için hesaplanan göreli risk sıralaması sunulmakta; sonrasında veri atama tercihleri ve model varsayımlarının sonuçlar üzerindeki etkisi duyarlılık analizi yoluyla değerlendirilmektedir. Bölümün son kısmında ise elde edilen bulgular, terminal emniyeti, operasyonel önceliklendirme ve mevcut düzenleyici çerçeveler ile ilişkisi bakımından tartışılmaktadır.

4.1 AHP Kriter Ağırlıklarına İlişkin Bulgular

AHP uygulaması sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları, kimyasal tanker terminallerinde operasyonel riskin değerlendirilmesinde hangi risk boyutlarının uzmanlar tarafından daha belirleyici görüldüğünü ortaya koymaktadır. Bu kapsamda ana kriterler düzeyinde hesaplanan ağırlıklar incelendiğinde, fiziksel risklerin 0.6963 ile en yüksek ağırlığa sahip olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla insan sağlığına ilişkin riskler 0.1609 ve çevresel riskler 0.1429 izlemektedir. Elde edilen bu dağılım, uzman grubunun terminal operasyonları açısından öncelikli tehdit algısının, çevresel etkilerden çok yangın, patlama, uçuculuk, reaktivite ve ateşleme mekanizmaları gibi fiziksel risk bileşenleri etrafında şekillendiğini göstermektedir.

Bu bulgu, tezin problem tanımında ortaya konan temel varsayımı destekler niteliktedir. MARPOL Annex II ve GESAMP çerçevesi ağırlıklı olarak çevresel etki, biyobirikim ve sucul toksisite gibi parametreler üzerinden şekillenirken, terminal operasyonlarının günlük karar mantığında uzmanlar tarafından daha yüksek öncelik verilen boyutun fiziksel riskler olduğu anlaşılmaktadır. Başka bir ifadeyle, uzman ağırlıkları terminal sahasında "hangi risk önce yönetilmelidir?" sorusuna verilen pratik yanıtın, çevresel kategorizasyon mantığından farklılaştığını göstermektedir. Bu durum, tezin temel

çıkış noktalarından biri olan düzenleyici çevre odaklı yaklaşım ile terminal operasyonel gerçekliği arasındaki ayrışmanın nicel olarak görünür hale geldiğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, bu sonuç evrensel bir genelleme olarak değil; bu çalışmada yer alan uzman grubu, kriter seti ve terminal bağlamı içinde yorumlanmalıdır.

Ana kriter matrisine ilişkin tutarlılık oranı CR=0.0453 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, AHP literatüründe yaygın kabul gören CR<0.10 eşiğinin altında olduğundan, uzman değerlendirmelerinin kabul edilebilir düzeyde tutarlı olduğu söylenebilir. Dolayısıyla ana kriter düzeyinde elde edilen ağırlıkların yalnızca içerik bakımından değil, matematiksel tutarlılık bakımından da güvenilir olduğu kabul edilmiştir.

Fiziksel riskler altındaki alt kriterler incelendiğinde, yerel ağırlıklar bakımından statik akümülatörlük 0.3096 ile ilk sırada yer almakta; bunu parlama noktası 0.2640, buhar basıncı 0.2359 ve reaktivite 0.1906 izlemektedir. Bu dağılım, uzman grubunun terminal ortamında bağımsız bir ateşleme mekanizması yaratabilen statik yük birikimini, diğer fiziksel risk bileşenlerine kıyasla daha yüksek öncelikli bir tehlike olarak değerlendirdiğini göstermektedir. Özellikle gemi-kıyı arayüzünde yük transferi, manifold işlemleri ve kapalı tank atmosferleri bağlamında düşünüldüğünde, statik akümülatörlük kriterinin öne çıkması, operasyonel prosedürler üzerindeki belirleyici etkisi ile uyumludur.

Parlama noktası ve buhar basıncının fiziksel riskler içinde birbirine yakın ve yüksek ağırlıklar alması da dikkat çekicidir. Bu iki kriter birlikte değerlendirildiğinde, uzman grubunun terminal operasyonlarında yangın ve patlama riskini yalnızca "ürünün yanıcı olup olmaması" üzerinden değil; aynı zamanda tehlikeli atmosfer oluşturma potansiyeli üzerinden de kavradığı anlaşılmaktadır. Reaktivite kriteri ise fiziksel riskler içinde görece daha düşük ağırlık almış olmakla birlikte, yine de dikkate değer bir yer tutmaktadır. Bu durum, reaktivitenin tüm kimyasallar için sürekli ve baskın bir operasyonel belirleyici olmaktan çok, belirli kimyasal ailelerde kritik hale gelen özel bir risk mekanizması olarak algılandığını düşündürmektedir. Fiziksel riskler alt matrisi için hesaplanan tutarlılık oranı CR=0.0340 olup, bu değer de kabul edilebilir sınırlar içindedir.

İnsan sağlığına ilişkin riskler altında yer alan iki alt kriterin ağırlıkları incelendiğinde, solunum toksisitesi (LC50) kriterinin 0.7189 ile açık biçimde baskın olduğu, buna

karşılık akut sistemik toksisite göstergesi (proxy: oral LD50) kriterinin 0.2811 düzeyinde kaldığı görülmektedir. Bu bulgu, uzman grubunun terminal operasyonları bağlamında inhalasyon maruziyetini, sıvı temasına dayalı sistemik toksisiteye kıyasla daha kritik bir risk boyutu olarak değerlendirdiğini göstermektedir. Bu sonuç, özellikle sızıntı, buhar oluşumu, venting ve gaz yayılımı gibi senaryoların kimyasal tanker terminallerinde merkezi önemde olması nedeniyle operasyonel açıdan da anlamlı görünmektedir. İki kriterli karşılaştırma matrisi olması nedeniyle bu düzeyde tutarsızlık oranı sıfır olarak hesaplanmıştır; ancak 2×2 matrislerde karşılıklılık gereği tutarsızlık problemi zaten sınırlı olduğundan, burada asıl önemli olan elde edilen ağırlıkların kavramsal tutarlılığıdır.

Çevresel riskler altında ise biyolojik birikim potansiyeli (Log Kow) kriterinin 0.6239 ile, sucul yaşam akut toksisitesi kriterinden 0.3761 daha yüksek ağırlık aldığı görülmektedir. Bu bulgu, uzman grubunun terminal ölçeğinde çevresel risk değerlendirmesi yaparken yalnızca ani ekotoksik etkiyi değil, döküntü sonrasında çevresel yükün devamlılığı ve biyolojik sistemlerde taşınma eğilimini de önemli bir parametre olarak gördüğünü göstermektedir. Başka bir deyişle, çevresel boyutta anlık zarar kadar uzun dönemli çevresel kalıcılık ve birikim eğilimi de dikkate alınmıştır. Bununla birlikte çevresel risklerin toplam ağırlığının ana kriterler içinde en düşük düzeyde kalması, bu iki alt kriterin göreli öneminin esas olarak çevresel boyutun kendi iç dengesi açısından anlam taşıdığını göstermektedir. Bu düzeydeki matris de 2×2 yapıda olduğundan, tutarsızlık oranı sıfır olarak elde edilmiştir.

Küresel ağırlıklar dikkate alındığında, çalışmada kullanılan sekiz alt kriter içinde ilk dört sırayı tamamen fiziksel risk bileşenlerinin aldığı görülmektedir. Buna göre en yüksek küresel ağırlığa sahip kriter statik akümülatörlük (0.2155) olup, bunu parlama noktası (0.1838), buhar basıncı (0.1642) ve reaktivite (0.1327) izlemektedir. Bu dört kriterin ardından solunum toksisitesi LC50 (0.1157), biyolojik birikim potansiyeli Log Kow (0.0891), sucul yaşam akut toksisitesi (0.0537) ve akut sistemik toksisite göstergesi LD50 (0.0452) gelmektedir. Bu sıralama, terminal operasyonlarında riskin uzman algısı bakımından öncelikle fiziksel kontrol kaybı senaryoları çerçevesinde değerlendirildiğini; insan sağlığı ve çevre boyutlarının ise önemli olmakla birlikte daha sonra gelen risk eksenleri olarak konumlandığını göstermektedir.

Bu bulguların birlikte değerlendirilmesi, terminal operasyonlarına yönelik çok kriterli bir risk modelinde kriter ağırlıklarının eşit kabul edilmesinin önemli ölçüde yanıltıcı

olabileceğini göstermektedir. Uzman görüşleri, kriterler arasında belirgin bir öncelik farklılaşması olduğunu ortaya koymakta; bu da hibrit modelde AHP kullanımının yöntemsel gerekçesini güçlendirmektedir. Başka bir ifadeyle, TOPSIS sıralamasına doğrudan geçmeden önce kriterlerin terminal bağlamındaki göreli öneminin uzman yargısıyla ağırlıklandırılması, modelin operasyonel gerçekliğe daha yakın sonuçlar üretmesine katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak AHP bulguları, bu tezde geliştirilen modelin yalnızca teknik bir hesaplama aracı değil, aynı zamanda terminal operasyonlarında risk önceliklerinin nasıl algılandığını sayısal biçimde görünür kılan bir karar destek çerçevesi sunduğunu göstermektedir. Elde edilen ağırlıklar, sonraki bölümde alternatif kimyasal kargoların TOPSIS yöntemiyle sıralanmasında kullanılmış ve modelin nihai operasyonel risk çıktılarının temel belirleyicisi olmuştur.

4.2 TOPSIS Göreli Risk Sıralamasına İlişkin Bulgular

AHP yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak yürütülen TOPSIS analizi sonucunda, çalışmaya dahil edilen 13 kimyasal kargo için göreli operasyonel risk sıralaması elde edilmiştir. TOPSIS yakınlık katsayısı (C_i^*) değeri, bu çalışmada alternatif kimyasalın pozitif ideal risk profiline yakınlığını ifade edecek şekilde yorumlanmıştır. Buna göre C_i^* değerinin yükselmesi, ilgili kargonun terminal operasyonları açısından göreli olarak daha kritik bir risk profiline yaklaştığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek göreli risk skoruna sahip alternatif Ethyl acrylate olup, bu kimyasal C_i^* = 0.5910 değeri ile sıralamanın ilk sırasında yer almıştır. Ethyl acrylate'i sırasıyla Hexane (0.5886), Methyl ethyl ketone (0.5219), Methyl acetate (0.5176), Heptane (0.5016) ve Toluene (0.4778) izlemiştir. Listenin alt yarısında ise Toluene diisocyanate (0.4547), 2-Ethylhexyl acrylate (0.4533), Phenol (0.3269), Propylene glycol methyl ether acetate (0.3059), Phosphoric acid (0.2758), Diethanolamine (0.1604) ve Propylene Glycol (0.1455) yer almıştır. Böylece alternatifler arasında belirgin bir göreli risk farklılaşmasının oluştuğu görülmüştür.

Sıralama dikkatle incelendiğinde, yüksek risk düzeyine sahip ilk grubun büyük ölçüde uçuculuk, düşük parlama noktası ve bazı durumlarda statik akümülatörlük gibi fiziksel risk bileşenleri bakımından öne çıkan kimyasallardan oluştuğu görülmektedir.

Özellikle Ethyl acrylate'in birinci sırada yer alması, bu kimyasalın yalnızca düşük parlama noktası ve anlamlı buhar basıncı ile değil, aynı zamanda reaktivite ve statik akümülatörlük özelliklerinin birleşik etkisiyle açıklanabilir. Benzer şekilde Methyl ethyl ketone, Methyl acetate, Heptane ve Toluene'in de üst sıralarda yer alması, terminal operasyonları açısından yangın, patlama ve buhar yayılımı ile ilişkili parametrelerin belirleyiciliğini desteklemektedir. Dolayısıyla TOPSIS sıralaması, modelin yalnızca çevresel veya toksikolojik bir öncelik üretmediğini; daha çok terminal sahasında anlık operasyonel tehlike oluşturabilecek fiziksel risk kümelerine duyarlı bir yapı ortaya koyduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, özellikle ilk altı sıradaki ürünler bakımından, terminal operasyonel güvenliğinin MARPOL çevresel kategorizasyon mantığından farklı bir öncelik yapısı üretebildiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Nitekim TOPSIS sıralamasında ilk sırada yer alan Ethyl acrylate ve ikinci sırada yer alan Hexane, MARPOL açısından Kategori Y ürünlerdir. Üçüncü ve dördüncü sıralarda yer alan Methyl ethyl ketone ile Methyl acetate ise Kategori Z ürünlerdir. Buna karşılık MARPOL açısından en yüksek çevresel kısıt düzeyini temsil eden Heptane (Kategori X) ancak beşinci sırada yer almaktadır. Bu bulgu, terminal sahasında göreli operasyonel riskin, MARPOL kategorizasyonunun temel aldığı çevresel zarar kriterlerinden farklı bir ağırlık yapısına göre şekillenebildiğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, çevresel bakımdan daha düşük kategoriye sahip bir kimyasal, fiziksel ve operasyonel risk bileşenleri nedeniyle terminal açısından daha üst sırada yer alabilmektedir.

Orta sıralarda yer alan Toluene diisocyanate ile 2-Ethylhexyl acrylate arasındaki çok küçük fark da dikkat çekicidir. Bu iki kimyasalın C_i^* değerleri birbirine son derece yakın olup, alternatifler arasındaki göreli risk farklarının her zaman keskin kümeler halinde oluşmadığını, bazı ürünlerin birbirine oldukça yakın profiller sergileyebildiğini göstermektedir. Bu durum, TOPSIS çıktılarının yalnızca sıralama olarak değil, aynı zamanda yakınlık düzeyleri üzerinden yorumlanması gerektiğini düşündürmektedir. Özellikle orta sıralarda yer alan kimyasallar bakımından, küçük puan farklarının operasyonel uygulamada benzer düzeyde dikkat gerektirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Alt sıralarda yer alan Phosphoric acid, Diethanolamine ve Propylene Glycol ise model kapsamında görece daha düşük operasyonel risk profiline sahip görünmektedir. Özellikle Propylene Glycol'ün son sırada yer alması, düşük uçuculuk, yüksek parlama

noktası ve sınırlı yanıcı atmosfer oluşturma potansiyeli gibi özelliklerle uyumludur. Diethanolamine de benzer şekilde düşük uçuculuk ve görece daha sınırlı fiziksel risk karakteri nedeniyle alt sıralarda yer almıştır. Phosphoric acid ise korozif karakterine rağmen, modelde yüksek ağırlık taşıyan yanıcılık ve uçuculuk parametreleri bakımından daha düşük risk profili sergilediğinden üst sıralara çıkmamıştır. Bununla birlikte bu ürünlerin "önemsiz" veya "risksiz" olduğu sonucuna varılmamalıdır. Elde edilen TOPSIS sıralaması, yalnızca bu tezde tanımlanan kriter seti ve ağırlık yapısı altında, alternatifler arasındaki göreli operasyonel önceliği ifade etmektedir.

TOPSIS sıralamasının genel deseni, 4.1 bölümünde sunulan AHP bulgularıyla uyumludur. Ana kriterler içinde fiziksel risklerin en yüksek ağırlığa sahip olması, üst sıralarda düşük parlama noktası, yüksek buhar basıncı ve statik akümülatörlük gibi özellikleri baskın olan ürünlerin öne çıkmasına yol açmıştır. Buna karşılık çevresel açıdan yüksek sınıfa sahip olmasına rağmen uçuculuk veya ateşleme duyarlılığı görece daha sınırlı olan bazı ürünler, sıralamada daha alt basamaklarda kalmıştır. Bu durum, hibrit modelin tam da amaçlandığı gibi, yalnızca düzenleyici çevresel sınıflandırmaya değil, terminal operasyonları açısından anlam taşıyan çoklu risk mekanizmalarına duyarlı bir çıktı ürettiğini göstermektedir.

Elde edilen sıralama aynı zamanda, kimyasal tanker terminali bağlamında "yüksek riskli kargo" kavramının tek bir parametreye indirgenemeyeceğini ortaya koymaktadır. Örneğin yalnızca çevresel tehlike sınıfına bakıldığında üst düzeyde öncelik verilmesi beklenen bazı ürünler, operasyonel risk sıralamasında daha geri kalabilmekte; buna karşılık MARPOL açısından daha düşük kategoride yer alan bazı solventler ve uçucu ürünler terminal açısından daha üst sıralarda yer alabilmektedir. Bu bulgu, tezin temel varsayımlarından biri olan "çevresel kategorizasyon ile operasyonel risk önceliğinin aynı şey olmadığı" yönündeki yaklaşımı sayısal sonuçlarla desteklemektedir.

Sonuç olarak TOPSIS analizi, seçilen 13 kimyasalın yalnızca tekil özelliklerine göre değil, AHP ile ağırlıklandırılmış çok boyutlu kriter seti altında göreli operasyonel risk sıralamasını görünür hale getirmiştir. Elde edilen sıralama, terminal karar vericilerine kargo kabulü, operasyonel önlem yoğunluğu, gözetim düzeyi ve acil müdahale hazırlığı gibi alanlarda önceliklendirme yapılmasına katkı sağlayabilecek bir çerçeve sunmaktadır. Bununla birlikte sıralamanın, kullanılan veri atamaları ve model varsayımlarından ne ölçüde etkilendiğinin değerlendirilmesi de önem taşımaktadır. Bu

nedenle bir sonraki bölümde, model sonuçlarının veri atama tercihleri karşısındaki duyarlılığı incelenmektedir.

4.3 Duyarlılık Analizi ve Veri Atama Hassasiyetinin Test Edilmesi

Bu çalışmada geliştirilen AHP-TOPSIS modelinin güvenilirliğini ve sonuçların belirli parametrelere olan bağımlılığını değerlendirmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi kapsamında iki temel yaklaşım benimsenmiştir:

- kritik veri girişlerinin değiştirilmesine dayalı veri atama hassasiyeti analizi,
- kriter ağırlıklarının değiştirilmesine dayalı model yapısı hassasiyeti analizi.

Senaryo 1: Fosforik asit için atanan parlama noktası değerinin 599 Kelvin'den 999 Kelvin'e yükseltilmesi.

Senaryo 2: Fosforik asit için aynı değerin 599 Kelvin'den 500 Kelvin'e düşürülmesi.

Senaryo 3: 2-EHA'nın LC50 değerinin orijinal modeldeki 99999 ppm üst sınır ataması yerine, Ethyl acrylate ile aynı akrilat ailesinden gelmesi nedeniyle, bu ailenin bilinen inhalasyon toksisite aralığında varsayımsal bir değer olan 1500 ppm atanmıştır. Amaç, LC50 üst sınır atamasının model çıktısı üzerindeki etkisini sınamaktır.

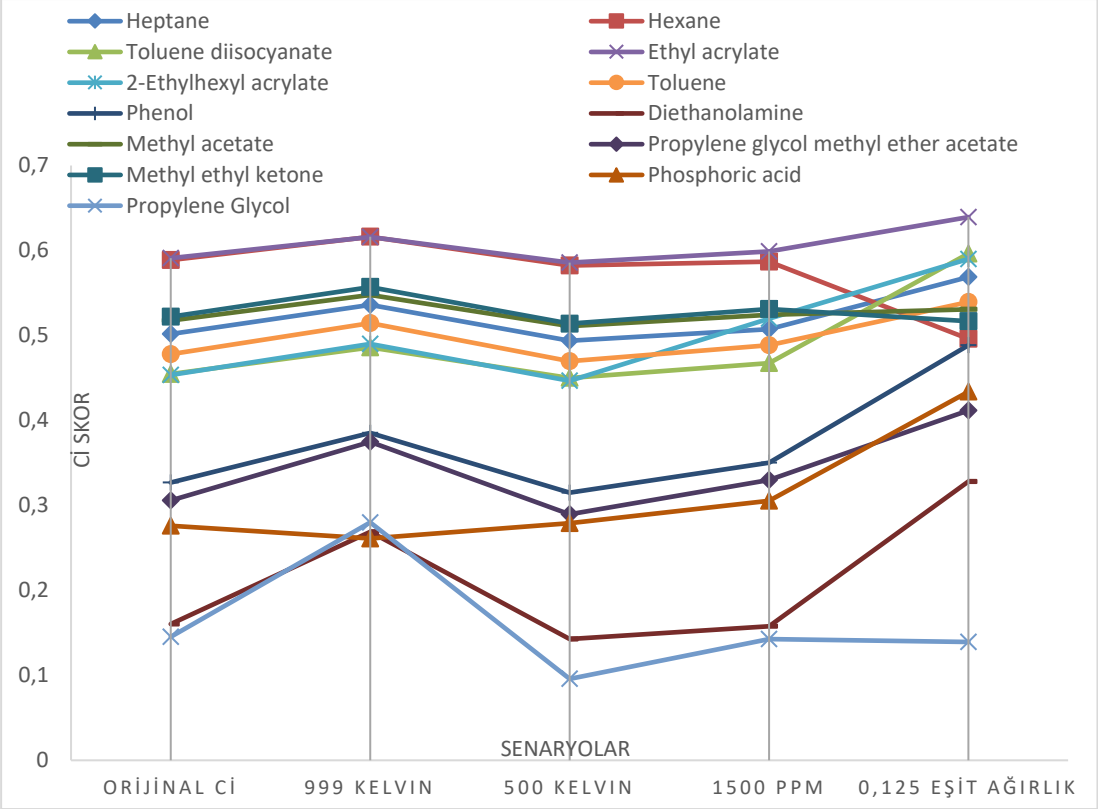
Senaryo 4: AHP ile belirlenen kriter ağırlıkları yerine tüm alt kriterlere eşit ağırlık (0,125) atanması.

Bu dört senaryo için TOPSIS hesaplamaları tekrarlanmış ve elde edilen göreli yakınlık katsayıları (C_i) ile nihai sıralamalar Çizelge 4.1'de, sıralama değişimi ise karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1'de sunulmuştur.

Buna ek olarak, kriter ağırlıklarının sıralama üzerindeki etkisini daha sistematik biçimde test etmek amacıyla, her bir kriterin küresel ağırlığının sırasıyla %20 artırıldığı ve %20 azaltıldığı bir kademeli ağırlık değişimi analizi (OAT — One-at-a-Time) gerçekleştirilmiş; diğer yedi kriterin ağırlıkları toplamı 1 olacak şekilde orantılı olarak yeniden hesaplanmıştır. Bu kapsamda her bir kriter için iki alt senaryo olmak üzere toplam 16 alt senaryo üretilmiş ve sonuçlar, veri ataması ve eşit ağırlık senaryolarından ayrı olarak Bölüm 4.3.4'te değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1 : Duyarlılık analizine göre alternatiflerin C_i değerleri ve sıralamaları.

Alternatif	Orijinal C_i	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4
Etil akrilat	1 (0,5910)	2 (0,6160)	1 (0,5857)	1 (0,5991)	1 (0,6393)
Hekzan	2 (0,5886)	1 (0,6161)	2 (0,5824)	2 (0,5868)	8 (0,4960)
Metil etil keton	3 (0,5219)	3 (0,5569)	3 (0,5139)	3 (0,5311)	7 (0,5169)
Metil asetat	4 (0,5176)	4 (0,5477)	4 (0,5110)	4 (0,5244)	6 (0,5306)
Heptan	5 (0,5016)	5 (0,5361)	5 (0,4938)	6 (0,5074)	4 (0,5687)
Toluen	6 (0,4778)	6 (0,5146)	6 (0,4697)	7 (0,4884)	5 (0,5393)
Toluen diizosiyanat	7 (0,4547)	8 (0,4860)	7 (0,4499)	8 (0,4673)	2 (0,5964)
2-Etilhekzil akrilat	8 (0,4533)	7 (0,4900)	8 (0,4466)	5 (0,5200)	3 (0,5900)
Fenol	9 (0,3269)	9 (0,3854)	9 (0,3150)	9 (0,3501)	9 (0,4885)
PGMEA	10 (0,3059)	10 (0,3747)	10 (0,2895)	10 (0,3298)	11 (0,4117)
Fosforik asit	11 (0,2758)	13 (0,2610)	11 (0,2791)	11 (0,3053)	10 (0,4338)
Dietanolamin	12 (0,1604)	12 (0,2688)	12 (0,1427)	12 (0,1576)	12 (0,3281)
Propilen glikol	13 (0,1455)	11 (0,2799)	13 (0,0958)	13 (0,1428)	13 (0,1392)



Şekil 4.1 : Duyarlılık analizine göre alternatiflerin sıralama değişimi.

4.3.1 Parlama noktası üst sınır atamasının etkisi

Fosforik asit için yapılan parlama noktası atamasının iki uç değerle (500 K ve 999 K) test edilmesi sonucunda, modelin üst sıralamasının bu değişikliklere karşı oldukça kararlı olduğu görülmüştür. İlk altı sıradaki alternatifler her üç senaryoda da (orijinal, senaryo 1, senaryo 2) aynı kalmış; yalnızca Etil akrilat ile Hekzan arasında senaryo 1 için ihmal edilebilir düzeyde bir yer değişikliği ($\Delta C_i = 0{,}0001$) meydana gelmiştir. Bu bulgu, modelin üst sıralardaki ayırt ediciliğinin, yanıcı olmayan maddelere atanan sonlu üst sınır değerinden bağımsız olduğunu göstermektedir.

Buna karşılık alt sıralarda (11-13) belirgin bir hareketlilik gözlenmiştir. Senaryo 1'de Fosforik asit son sıraya gerilerken, Senaryo 2'de 11. sıradaki konumunu korumuştur. Bu durum, yanıcı olmayan maddelerin parlama noktası atamasının yalnızca düşük risk grubu içindeki göreli konumlanmayı etkilediğini, modelin genel risk mimarisini değiştirmediğini ortaya koymaktadır.

4.3.2 LC50 üst sınır atamasının etkisi

Duyarlılık analizinin en kritik bulgularından biri, 2-Etilhekzil akrilat için yapılan LC50 atamasının test edilmesiyle elde edilmiştir. Orijinal modelde 99999 ppm olarak atanan bu değerin, çok daha düşük bir değer olan 1500 ppm olarak güncellendiği Senaryo 3'te, 2-EHA'nın C_i değeri 0,4533'ten 0,5200'e yükselmiş ve sıralaması 8. sıradan 5. sıraya çıkmıştır. Bu değişiklik, söz konusu maddenin inhalasyon toksisitesi boyutunun model tarafından algılanabilir hale gelmesinin doğrudan bir sonucudur.

Bu bulgu, Bölüm 3.3'te metodolojik bir sınırlılık olarak belirtilen "veri yokluğunda üst sınır atama" yaklaşımının, ilgili alternatifin operasyonel riskini olduğundan düşük gösterme potansiyeli taşıdığını nicel olarak doğrulamaktadır. Bununla birlikte, bu etki yalnızca LC50 değeri gerçekte anlamlı düzeyde toksik olan maddeler için ortaya çıkmakta; Propilen glikol ve Dietanolamin gibi gerçekten düşük inhalasyon toksisitesine sahip maddeler için üst sınır ataması sıralamada anlamlı bir sapma yaratmamaktadır. Nitekim her iki madde de tüm senaryolarda alt sıralardaki konumlarını korumuştur.

4.3.3 Kriter ağırlıklarının etkisi

Tüm alt kriterlere eşit ağırlık (0,125) atanan Senaryo 4, nihai sıralamada en dramatik değişikliklerin gözlendiği test olmuştur. Toluen diizosiyanat 7. sıradan 2. sıraya,

2Etilhekzil akrilat 8. sıradan 3. sıraya yükselmiş; buna karşılık Hekzan 2. sıradan 8. sıraya gerilemiştir. Bu sonuç, AHP ile belirlenen kriter ağırlıklarının nihai sıralama üzerinde ne ölçüde belirleyici olduğunu açık biçimde göstermektedir.

Senaryo 4 ile orijinal model arasındaki bu farklılaşma, tezin metodolojik kurgusunu destekler niteliktedir. Bölüm 2.4.3'te gerekçelendirildiği üzere, tüm kriterlerin eşit önemde olduğu varsayımı terminal gerçekliğini yansıtmamakta; bu nedenle uzman görüşüne dayalı ağırlıklandırma yapılması gerekmektedir. Senaryo 4'ün sonuçları, bu gerekliliğin deneysel kanıtı olarak değerlendirilebilir.

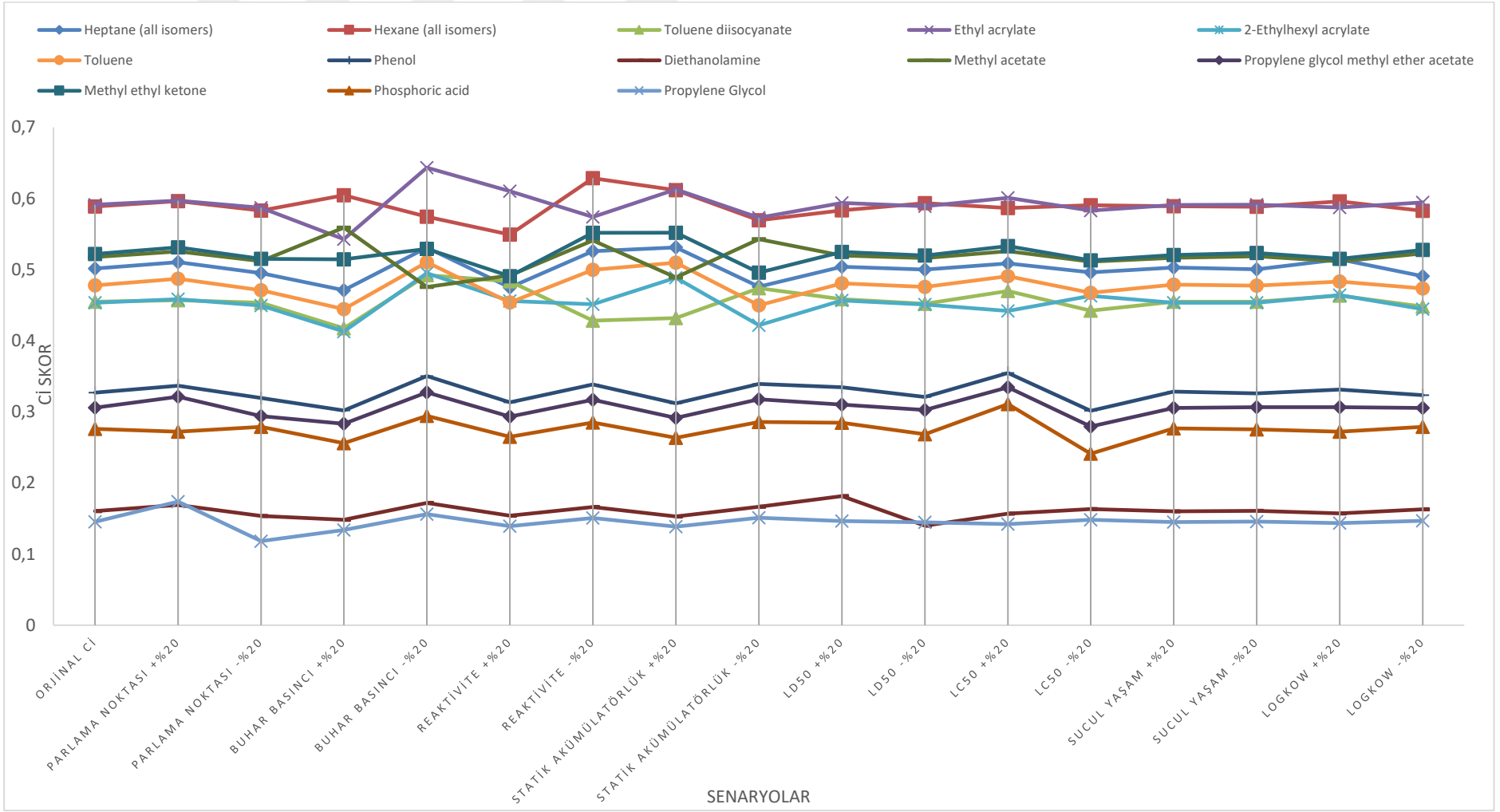
4.3.4 OAT duyarlılık analizi

Bu bölümde, AHP ile belirlenen her bir alt kriter ağırlığının ±%20 oranında değiştirildiği ve kalan kriterlerin orantılı biçimde yeniden ölçeklendirildiği sistematik bir OAT (One-At-a-Time) duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Her kriter için biri artış, biri azalış yönünde olmak üzere 16 senaryo test edilmiş; her senaryoda TOPSIS hesaplamaları tekrarlanarak nihai sıralamalar Şekil 4.2'de karşılaştırılmıştır.

Analiz sonuçları, modelin üst küme kararlılığı bakımından güçlü olduğunu ortaya koymaktadır. Ethyl acrylate ve Hexane, 15 senaryonun tamamında 1. ve 2. sırayı aralarında paylaşmış; bu iki alternatif buhar basıncının baskın olduğu senaryo dışında 3. veya daha alt bir sıraya gerilememiştir. Alt kümede yer alan Phenol, PGMEA ve Fosforik Asit de 9., 10. ve 11. sıra konumlarını tüm senaryolarda değiştirmeksizin korumuştur.

Buna karşılık, analiz Methyl acetate'in konumunun buhar basıncı kriterine yapısal olarak bağımlı olduğunu ortaya koymuştur. Buhar basıncı ağırlığı %20 azaltıldığında bu alternatif 4. sıradan 8. sıraya gerilemektedir. Bu bulgu, Methyl acetate'in yüksek sırasının esas olarak tek bir fiziksel tehlike parametresinden kaynaklandığını göstermektedir. Terminal uygulaması açısından bu sonuç, söz konusu alternatifin risk değerlendirmesinde salt sıra numarasının ötesinde baskın risk mekanizmasının da dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir.

Model, kriter ağırlıklarındaki değişimlere rağmen genel sıralama mimarisini korumuş; en büyük hareketler birbirine yakın risk profiline sahip alternatifler arasında gözlenmiştir.



Şekil 4.2 : OAT duyarlılık analizi ile örneklemlerin sıralama değişiminin karşılaştırılması.

4.3.5 Duyarlılık analizinin genel değerlendirmesi

Beş senaryolu duyarlılık analizi, modelin şu özelliklerini ortaya koymuştur:

Üst sıralamanın kararlılığı: Etil akrilat, Hekzan, Metil etil keton, Metil asetat ve Heptan'dan oluşan yüksek riskli ilk grup, parlama noktası atamalarındaki değişikliklere karşı kararlıdır. Bu durum, modelin operasyonel açıdan en kritik kargoları belirleme işlevinin güvenilir olduğunu göstermektedir.

Alt sıraların veri atamalarına duyarlılığı: Düşük risk grubundaki alternatiflerin kendi aralarındaki sıralaması, parlama noktası ve LC50 atamalarından etkilenebilmektedir. Bu nedenle, özellikle veri yokluğunda yapılan üst sınır atamalarının gerekçeleri ve sınırlılıkları sonuçların yorumlanmasında dikkate alınmalıdır.

AHP ağırlıklarının belirleyiciliği: Eşit ağırlık senaryosunun sıralamayı dramatik biçimde değiştirmesi, AHP aşamasının modelin ayrılmaz bir bileşeni olduğunu ve kriterler arasındaki göreli önem farklılıklarının göz ardı edilemeyeceğini kanıtlamaktadır.

LC50 atamalarının potansiyel etkisi: 2-EHA örneğinde görüldüğü üzere, bir maddeye yüksek üst sınır atanması, o maddenin operasyonel riskinin olduğundan düşük görünmesine yol açabilmektedir. Bu bulgu, gelecekteki çalışmalarda mümkün olan tüm kimyasallar için ölçülmüş veya güvenilir biçimde tahmin edilmiş LC50 verilerinin kullanılması gerektiğine işaret etmektedir.

Kademeli ağırlık değişimine duyarlılık: Her bir kriter ağırlığının ±%20 oranında değiştirildiği OAT duyarlılık analizi, model çıktılarının özellikle yüksek ağırlıklı fiziksel kriterlerde daha belirgin değişim gösterdiğini ortaya koymuştur. Buna karşın, alternatiflerin genel sıralama yapısının büyük ölçüde korunduğu; üst ve alt uçlardaki alternatiflerin tüm senaryolarda benzer konumlarını sürdürdüğü gözlenmiştir. Sıralama değişimleri çoğunlukla risk profilleri birbirine yakın alternatifler arasında gerçekleşmiştir. Bu bulgular, AHP ile belirlenen ağırlık yapısının TOPSIS sonuçları üzerinde sistematik bir etkisi bulunduğunu, ancak modelin makul ağırlık değişimleri altında tamamen farklı bir risk mimarisi üretmediğini göstermektedir.

4.4 Bulguların Terminal Emniyeti Açısından Değerlendirmesi

Bu çalışmada elde edilen AHP ve TOPSIS bulguları birlikte değerlendirildiğinde, kimyasal tanker terminallerinde operasyonel riskin yalnızca çevresel kategorizasyon veya tekil bir toksisite göstergesi üzerinden okunamayacağı açık biçimde görülmektedir. AHP sonuçları, uzman grubunun terminal operasyonları açısından öncelikli risk boyutunu büyük ölçüde fiziksel riskler etrafında konumlandırdığını; TOPSIS sonuçları ise bu ağırlık yapısının alternatif kimyasalların nihai sıralamasına doğrudan yansıdığını göstermektedir. Böylece model, terminal sahasında hangi kimyasalların daha yüksek operasyonel dikkat, daha yoğun kontrol önlemi ve daha yüksek hazırlık düzeyi gerektirdiğini göreli olarak görünür kılmıştır.

Bulguların ilk dikkat çekici yönü, üst sıralarda yer alan kimyasalların büyük ölçüde düşük parlama noktası, yüksek uçuculuk, yanıcı atmosfer oluşturma potansiyeli ve bazı durumlarda statik akümülatörlük gibi fiziksel risk bileşenleri bakımından öne çıkmasıdır. Nihai sıralamada ilk altı sırada yer alan Ethyl acrylate, Hexane, Methyl ethyl ketone, Methyl acetate, Heptane ve Toluene, terminal operasyonlarında yangın, patlama ve hızlı buhar oluşumu ile ilişkili parametrelerin belirleyici rolünü açık biçimde yansıtmaktadır. Bu sonuç, gemi-kıyı manifold bağlantıları, yük transfer hatları, yükleme/tahliye rejimi, tank atmosferi ve potansiyel ateşleme kaynaklarının bir arada bulunduğu terminal gerçekliği ile uyumludur. Başka bir ifadeyle, terminal sahasında "kritik kargo" çoğu durumda ilk olarak yanıcı atmosfer oluşturabilen ve kısa sürede olay zinciri başlatabilen kargo anlamına gelmektedir.

Bu çerçevede özellikle statik akümülatörlük, terminal emniyeti açısından "görünmez tehlike" niteliği taşıyan bir risk bileşeni olarak öne çıkmaktadır. AHP sonuçlarında küresel ağırlığı en yüksek kriterin statik akümülatörlük olması, uzman grubunun gemi-kıyı arayüzündeki en önemli endişelerinden birinin, düşük iletkenlikli sıvıların transfer sırasında yük biriktirme ve uygun koşullarda ateşleme mekanizmasına dönüşebilme potansiyeli olduğunu göstermektedir. TOPSIS sıralamasında üst sıralarda yer alan ürünlerin önemli bir bölümünün aynı zamanda düşük parlama noktası ve uçuculuk özellikleri göstermesi, bu kriterin neden bu kadar yüksek ağırlık aldığına dair pratik bir açıklama sunmaktadır. Terminal yönetimi açısından bu bulgu, operasyon öncesi kontrol süreçlerinde yalnızca döküntü müdahale hazırlığına değil; bonding/grounding sürekliliği, iletkenlik bilgisi, akış rejimi, kapalı devre koşulları ve ateşleme kaynağı

kontrolü gibi fiziksel emniyet unsurlarına da yüksek öncelik verilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

Bulguların ikinci önemli yönü, bazı kimyasalların yalnızca tek bir baskın tehlike ile değil, çok boyutlu risk birleşimi ile üst sıralara çıkmasıdır. Bunun en belirgin örneği Ethyl acrylate'tir. Ethyl acrylate'in nihai sıralamada birinci sırada yer alması, bu ürünün yalnızca düşük parlama noktası ve anlamlı buhar basıncı nedeniyle değil; aynı zamanda reaktivite ve statik akümülatörlük gibi diğer fiziksel risk boyutlarıyla birlikte değerlendirilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu durum terminal emniyeti açısından önemli bir mesaj içermektedir: Bazı kargoların tehlikesi, yalnızca "yanıcı", "toksik" veya "çevre için zararlı" gibi tek bir sıfatla açıklanamayacak kadar bileşik bir yapı göstermektedir. Dolayısıyla terminal personelinin ve operasyon yöneticilerinin yalnızca genel tehlike sınıflarına değil, yükün çoklu risk mekanizmalarına hâkim olması gerekmektedir.

Benzer şekilde üst sıralarda yer alan Hexane, Methyl ethyl ketone, Methyl acetate ve Toluene gibi kimyasallar da terminal sahasında operasyonel önceliğin çoğu zaman çevresel zarar potansiyelinden önce anlık fiziksel kontrol kaybı senaryoları etrafında şekillendiğini göstermektedir. Bu ürünlerde öne çıkan temel risk, döküntü sonrası deniz ortamında yaratabilecekleri uzun dönem etkiden çok, kısa sürede buharlaşarak yanıcı veya tehlikeli atmosfer oluşturabilmeleri ve bu atmosferin terminaldeki operasyonel faaliyetlerle etkileşime girebilmesidir. Bu nedenle loading master, vardiya amiri veya terminal operasyon sorumlusu açısından öncelikli karar çoğu durumda "çevreye ne kadar zarar verir?" sorusundan önce "hangi ürün kısa sürede en kritik operasyonel senaryoyu üretir?" sorusu etrafında oluşmaktadır.

Bu sonuçlar, tezin başlangıcında ortaya konan temel savı da desteklemektedir. MARPOL Annex II kapsamında en yüksek çevresel kısıt düzeyini temsil eden ürünlerin terminal operasyonları açısından mutlaka ilk sırada yer almaması; buna karşılık çevresel kategori bakımından daha düşük görünen bazı solvent ve hafif organik kimyasalların operasyonel riskte daha üst sıralara çıkması, çevresel kategorizasyon ile terminal risk önceliğinin aynı şey olmadığını göstermektedir. Nitekim nihai sıralamada ilk dört sırada Y ve Z kategorisindeki ürünler yer almakta; buna karşılık Kategori X niteliğindeki Heptane beşinci sırada bulunmaktadır. Bu bulgu, MARPOL sisteminin çevresel koruma açısından değerini azaltmamakta; ancak

terminal emniyeti için tek başına yeterli bir önceliklendirme aracı olarak görülmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu ayrışmanın en önemli pratik sonucu, acil durum yönetimi önceliklerinin her zaman çevresel kategori mantığı ile aynı doğrultuda şekillenmeyebilmesidir. Çevresel açıdan daha ağır yaptırımlara veya daha sıkı temizlik prosedürlerine tabi bir ürün ile terminal sahasında daha hızlı ateşleme, patlama veya akut maruziyet senaryosu yaratabilecek bir ürün, kriz anında farklı öncelik sıraları doğurabilmektedir. Örneğin çevresel olarak daha yüksek sınıfta yer alan bir ürün, döküntü sonrasında uzun dönem etkiler bakımından daha kritik olabilir; ancak aynı anda daha uçucu ve daha düşük parlama noktalı bir başka ürün, operasyonel emniyet bakımından ilk dakikalarda çok daha öncelikli müdahale gerektirebilir. Bu durum, terminallerde iç risk matrislerinin ve operasyon öncesi değerlendirme prosedürlerinin yalnızca çevresel sınıflandırma esas alınarak değil, buhar basıncı, parlama noktası, statik akümülatörlük ve akut maruziyet potansiyeli gibi kriterleri de merkeze alan tamamlayıcı bir operasyonel risk yaklaşımıyla desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.

Orta sıralarda yer alan Toluene diisocyanate ile 2-Ethylhexyl acrylate gibi birbirine yakın skorlara sahip alternatifler, riskin her zaman keskin kümeler halinde ayrılmadığını göstermektedir. Bu tür ürünler, bazı kriterlerde yüksek, bazı kriterlerde ise görece daha düşük profiller sergileyerek “orta-yüksek” nitelikte birleşik bir risk yapısı ortaya koymaktadır. Bu durum, terminal uygulamalarında sonuçların salt sıra numarası üzerinden değil, skor yakınlıkları ve baskın risk mekanizmaları dikkate alınarak yorumlanması gerektiğini göstermektedir. Uygulamada bu tür ürünler için benzer düzeyde operasyonel önlem paketi, aynı risk grubuna ait prosedürel kontroller veya ortak acil durum hazırlık düzeyleri düşünülebilir.

Alt sıralarda yer alan Phosphoric acid, Diethanolamine ve Propylene Glycol ise model kapsamında görece daha düşük operasyonel risk profiline sahip görünmektedir. Bunun temel nedeni, bu ürünlerin modelde yüksek ağırlık verilen fiziksel risk kriterleri bakımından daha sınırlı tehlike göstermesidir. Özellikle düşük uçuculuk, yüksek parlama noktası veya yanıcı atmosfer oluşturma potansiyelinin sınırlı olması, bu ürünleri üst sıralardan uzaklaştırmıştır. Bununla birlikte bu sonuçlar, söz konusu kimyasalların sahada “önemsiz” veya “ihmal edilebilir” olduğu şeklinde yorumlanmamalıdır. Örneğin phosphoric acid korozif etkileri, diethanolamine kimyasal temas ve proses uyumsuzluğu, propylene glycol ise ürün yönetimi ve saflık

bağlamında yine dikkat gerektiren maddelerdir. Dolayısıyla alt sıralarda yer almak, bu ürünlerin risksiz olduğunu değil; yalnızca bu çalışmada seçilen kriter seti ve ağırlık yapısı altında göreli operasyonel önceliklerinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Terminal emniyeti açısından bakıldığında, bu modelden çıkarılabilecek en pratik sonuçlardan biri, tüm kimyasallara aynı yoğunlukta yaklaşan homojen güvenlik yaklaşımının yetersiz olabileceğidir. Çalışma bulguları, bazı kargolar için öncelikli olarak ateşleme ve uçuculuk temelli fiziksel kontrol önlemlerinin; bazı kargolar için ise daha çok maruziyet kontrolü, çevresel yayılımın sınırlandırılması veya kimyasal uyumluluk denetiminin öne çıkabileceğini düşündürmektedir. Bu nedenle model, terminallerde kargo kabulü, operasyon öncesi risk gözden geçirmesi, SIMOPS kararları, gözetim yoğunluğunun belirlenmesi ve acil durum hazırlık seviyelerinin ayarlanması gibi süreçlerde tamamlayıcı bir karar destek aracı olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak bu bölümde tartışılan bulgular, kimyasal tanker terminallerinde operasyonel risk yönetiminin yalnızca mevzuata uyum mantığıyla değil, sahadaki gerçek risk mekanizmalarını dikkate alan bütünleşik ve göreli bir önceliklendirme yaklaşımıyla desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, terminal karar vericilerine uygulamaya dönük bir çerçeve sunmakla birlikte, aynı zamanda mevcut düzenleyici sınıflandırmaların operasyonel emniyet perspektifinden tamamlayıcı araçlara ihtiyaç duyduğunu da işaret etmektedir. Bu bulgulardan hareketle, bir sonraki bölümde çalışmanın genel sonuçları, uygulamaya yönelik önerileri ve yöntembilimsel sınırlılıkları ele alınmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, çalışmanın önceki bölümlerinde geliştirilen kuramsal çerçeve, uygulanan hibrit AHP-TOPSIS modeli ve elde edilen bulgular birlikte değerlendirilerek genel sonuçlara ulaşılmaktadır. İlk olarak çalışmanın temel problemi ve ulaşılan ana bulgular bütüncül biçimde özetlenmekte; ardından modelin terminal uygulamaları açısından taşıdığı pratik anlam tartışılmakta ve sektöre yönelik öneriler sunulmaktadır. Son olarak çalışmanın yöntemsel sınırlılıkları ortaya konulmakta ve gelecekte yapılabilecek araştırmalar için öneriler geliştirilmektedir.

5.1 Genel Sonuçlar

Bu tez çalışmasının temel amacı, kimyasal tanker terminallerinde elleçlenen sıvı kimyasal kargoların göreli operasyonel risk düzeylerini, yalnızca çevresel kategorizasyon mantığına dayanmayan bütünleşik bir karar modeli aracılığıyla değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda çalışma, MARPOL Annex II kapsamındaki seçili kimyasal kargoları fiziksel riskler, insan sağlığına ilişkin riskler ve çevresel riskler olmak üzere üç ana boyutta ele almış; kriter ağırlıklarının belirlenmesinde AHP, alternatif kimyasalların göreli risk sıralamasında ise TOPSIS yönteminden yararlanmıştır. Böylece tez, hem uzman yargısını hem de nesnel kimyasal verileri birlikte işleyebilen hibrit bir karar destek modeli önermiştir.

Çalışmanın ilk önemli sonucu, kimyasal tanker terminallerinde operasyonel risk önceliklerinin, uluslararası çevre mevzuatının odak noktası ile tam olarak örtüşmediğinin nicel olarak ortaya konmuş olmasıdır. AHP bulguları, uzman grubunun terminal operasyonları açısından en yüksek önemi fiziksel risk boyutuna verdiğini göstermiştir. Ana kriterler düzeyinde fiziksel risklerin açık ara en yüksek ağırlığa sahip olması; yangın, patlama, uçuculuk, statik elektrik birikimi ve reaktivite gibi unsurların terminal sahasında birincil operasyonel endişe alanı olarak algılandığını göstermektedir. Buna karşılık insan sağlığı ve çevresel risklerin daha düşük ağırlıklarla temsil edilmesi, terminal karar probleminin saha pratiğinde öncelikle fiziksel kontrol kaybı senaryoları etrafında şekillendiğini ortaya koymuştur.

Alt kriterler düzeyinde elde edilen sonuçlar da bu tabloyu güçlendirmiştir. Özellikle statik akümülatörlük, parlama noktası ve buhar basıncı kriterlerinin yüksek küresel ağırlıklara sahip olması, terminal operasyonlarında riskin büyük ölçüde yanıcı atmosfer oluşumu, ateşleme duyarlılığı ve hızlı buhar yayılımı üzerinden okunduğunu göstermektedir. İnsan sağlığı boyutunda LC50 kriterinin LD50'ye göre daha baskın çıkması, terminal sahasında inhalasyon riskinin sıvı temasına dayalı akut sistemik toksisiteye kıyasla daha yüksek öncelikli algılandığını düşündürmektedir. Çevresel boyutta ise Log Kow'un sucul yaşam toksisitesinden daha yüksek ağırlık alması, uzman grubunun çevresel riski yalnızca ani ekotoksik etki değil, daha uzun dönemli biyobirikim eğilimi açısından da değerlendirdiğini göstermektedir.

Çalışmanın ikinci önemli sonucu, TOPSIS yöntemiyle elde edilen nihai sıralamanın, çevresel kategori ile operasyonel risk önceliğinin aynı şey olmadığını açık biçimde göstermesidir. Nihai sıralamada ilk sıralarda yer alan Ethyl acrylate, Hexane, Methyl ethyl ketone, Methyl acetate, Heptane ve Toluene gibi ürünler; düşük parlama noktası, anlamlı buhar basıncı, statik akümülatörlük ve diğer fiziksel risk özellikleri nedeniyle terminal operasyonları açısından yüksek öncelikli kargolar olarak öne çıkmıştır. Buna karşılık MARPOL açısından çevresel bakımdan daha kısıtlayıcı kategoride yer alan bazı ürünler, operasyonel risk sıralamasında daha alt basamaklarda kalabilmiştir. Bu bulgu, tezin problem tanımında ortaya konan "çevresel kategorizasyon ile terminal operasyonel gerçekliği arasındaki eksen kayması" tezini desteklemektedir.

Bu çalışmanın üçüncü önemli sonucu, yüksek operasyonel riskin tek bir parametre ile açıklanamayacağı, aksine çoğu zaman çok boyutlu bir tehlike birleşimi olarak ortaya çıktığı yönündedir. Özellikle Ethyl acrylate örneğinde görüldüğü gibi, bazı kimyasallar yalnızca düşük parlama noktaları nedeniyle değil; aynı zamanda reaktivite, statik akümülatörlük ve uçuculuk gibi başka bileşenlerle birleşerek daha üst sıralara çıkmaktadır. Bu durum, terminal güvenliğinde yalnızca tekil bir tehlike göstergesine dayanmanın yetersiz kalabileceğini ve kargo profillerinin çok kriterli bir mantıkla değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu açıdan hibrit AHP-TOPSIS modeli, farklı risk mekanizmalarını aynı karar çerçevesi içinde bir araya getirme kapasitesi sayesinde anlamlı bir yöntemsel avantaj sunmuştur.

Çalışmanın bir diğer sonucu, terminal emniyet yönetiminde tüm kimyasallara eşit yoğunlukta yaklaşan homojen güvenlik anlayışının yetersiz kalabileceğidir. Elde edilen bulgular, bazı kargoların öncelikle ateşleme, uçuculuk ve fiziksel olay zinciri

bakımından; bazı kargoların ise toksik maruziyet veya çevresel etki bakımından öncelikli kontrol gerektirdiğini göstermektedir. Bu nedenle kargo kabulü, operasyon öncesi risk gözden geçirmesi, SIMOPS kararları, gözetim yoğunluğu ve acil müdahale hazırlık düzeyi gibi süreçlerde göreli risk yaklaşımının kullanılması, terminal yönetimi açısından daha rasyonel ve savunulabilir bir çerçeve sunabilir.

Sonuç olarak bu tez, kimyasal tanker terminallerinde operasyonel risk değerlendirmesinin yalnızca çevresel mevzuatın sunduğu kategorilere bırakılmaması gerektiğini; fiziksel, insan sağlığına ilişkin ve çevresel riskleri birlikte değerlendiren çok kriterli bir yaklaşımın terminal sahasındaki gerçek karar problemini daha iyi temsil ettiğini ortaya koymuştur. AHP ile uzman yargılarının sistematik biçimde sayısallaştırılması ve TOPSIS ile alternatif kimyasalların göreli risk sıralamasının üretilmesi, bu çalışma kapsamında hem yöntemsel hem de uygulamaya dönük olarak işlevsel bir model oluşturmuştur. Bu yönüyle tez, mevcut düzenleyici çerçeveyi dışlamayan, ancak onu terminal operasyonel emniyeti perspektifinden tamamlayan bir karar destek yaklaşımı önermektedir.

5.2 Uygulamaya Yönelik Öneriler

Bu çalışmada geliştirilen hibrit AHP-TOPSIS modeli, kimyasal tanker terminallerinde elleçlenen kargoların göreli operasyonel risk düzeylerini karşılaştırmalı olarak ortaya koyduğu için, yalnızca akademik bir değerlendirme aracı değil, aynı zamanda uygulamaya aktarılabilir bir karar destek çerçevesi niteliği taşımaktadır. Bu bağlamda elde edilen bulgulardan hareketle terminal yönetimi, operasyon planlaması ve emniyet uygulamaları açısından çeşitli öneriler geliştirilebilir.

İlk olarak, terminal işletmelerinde kargo kabul ve ön değerlendirme süreçlerinin, yalnızca MARPOL kategorisi, ürün adı veya genel tehlike sınıfı üzerinden değil; çok kriterli bir operasyonel risk bakışıyla desteklenmesi önerilmektedir. Mevcut uygulamada bazı kimyasallar çevresel kategori bakımından daha düşük öncelikli görünebilmekte, ancak fiziksel riskler açısından terminal sahasında daha kritik sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle terminallerde, kargo kabulü öncesinde en azından parlama noktası, buhar basıncı, statik akümülatörlük, reaktivite ve akut inhalasyon riski gibi kriterleri birlikte değerlendiren bir iç risk gözden geçirme prosedürü oluşturulması yararlı olacaktır.

İkinci olarak, modelden elde edilen göreli risk sıralamasının operasyonel hazırlık seviyesinin belirlenmesinde kullanılması önerilebilir. Tüm kimyasallara aynı yoğunlukta yaklaşan homojen bir emniyet yaklaşımı yerine, daha yüksek operasyonel risk skoruna sahip kargolar için daha yüksek gözetim düzeyi, daha sık saha kontrolü, daha sıkı operasyon öncesi teyit prosedürleri ve daha ayrıntılı toolbox meeting uygulamaları planlanabilir. Böylece saha kaynakları, riskin daha yoğunlaştığı ürün gruplarına yönlendirilerek daha rasyonel bir güvenlik yönetimi sağlanabilir.

Üçüncü olarak, SIMOPS (eş zamanlı operasyonlar) kararlarında bu tür bir göreli risk sıralamasının dikkate alınması önerilmektedir. Özellikle düşük parlama noktası, yüksek uçuculuk ve statik akümülatörlük özellikleri aynı anda taşıyan kargoların, terminal sahasında başka bakım, sıcak çalışma, yoğun araç hareketi veya ilave yük transferleri ile aynı zaman diliminde yürütülmesi daha dikkatli değerlendirilmelidir. Bu tür ürünler için operasyon pencereleri, saha yoğunluğu ve ilave ateşleme kaynakları yeniden gözden geçirilebilir. Dolayısıyla model, yalnızca "hangi kargo daha risklidir?" sorusuna değil, aynı zamanda "hangi operasyonlar aynı anda yürütülmemelidir?" sorusuna da dolaylı katkı sağlayabilir.

Dördüncü olarak, elde edilen bulgular doğrultusunda acil durum hazırlık ve müdahale planlarının ürün bazlı önceliklendirme mantığıyla güncellenmesi önerilebilir. Özellikle uçuculuğu yüksek ve düşük parlama noktasına sahip ürünlerde, ilk müdahale refleksinin yalnızca döküntünün çevreye yayılmasını sınırlamak değil; aynı zamanda yanıcı buhar bulutu oluşumu, ateşleme kaynağı kontrolü ve saha izolasyonu gibi fiziksel emniyet adımlarını da önceliklendirecek şekilde yapılandırılması önem taşımaktadır. Buna karşılık çevresel yayılım ve biyobirikim potansiyeli daha baskın ürünlerde, döküntü kontrolü ve çevresel sınırlandırma önlemleri nispeten daha öne çıkabilir. Bu nedenle acil durum senaryolarının ürün gruplarına göre farklılaştırılması, terminal emniyeti açısından daha etkili bir yaklaşım sunabilir.

Beşinci olarak, terminal personeline yönelik eğitim programlarının daha risk odaklı ve ürün profiline duyarlı hale getirilmesi önerilmektedir. Bu çalışmanın bulguları, özellikle statik akümülatörlük, yanıcı atmosfer oluşumu, buhar basıncı ve akut inhalasyon tehlikesi gibi konuların saha personeli açısından yüksek öncelikli bilgi alanları olduğunu göstermektedir. Bu nedenle operasyon personeli, vardiya amirleri, loading master'lar ve kontrol odası ekipleri için yalnızca genel tehlikeli madde eğitimi

değil; kargo bazlı olay zinciri, ateşleme mekanizmaları, operasyonel limitler ve ilk müdahale öncelikleri üzerine daha hedefli eğitimler planlanabilir.

Altıncı olarak, terminal işletmelerinde kullanılan mevcut iç risk değerlendirme formları, kargo bilgi föyleri ve operasyon öncesi kontrol listeleri bu modelin mantığıyla gözden geçirilebilir. Özellikle yalnızca ürün ismi ve MARPOL kategorisi üzerinden karar verilen pratiklerde, operasyonel açıdan daha belirleyici olan fiziksel risk parametreleri görünmez kalabilmektedir. Bu nedenle ürün kartları veya terminal içi kargo bilgi formlarında, kargonun göreli operasyonel risk profilini özetleyen kısa bir risk sınıfı veya öncelik göstergesi bulunması faydalı olabilir.

Son olarak, daha üst ölçekte düşünüldüğünde, mevcut düzenleyici çevresel kategorizasyon sistemlerinin terminal operasyonel emniyeti açısından tamamlayıcı iç indekslerle desteklenmesi önerilebilir. Bu çalışma, MARPOL kategorilerinin çevresel koruma amacı bakımından işlevsel olduğunu; ancak terminal sahasındaki anlık fiziksel ve operasyonel riskleri tek başına temsil etmekte sınırlı kalabildiğini göstermiştir. Bu nedenle terminal işletmeleri, mevzuata uyum yükümlülüklerini korurken, kendi iç süreçlerinde operasyonel risk önceliğini daha görünür kılacak ürün bazlı karar destek araçları geliştirmelidir.

Özetle, bu tez kapsamında geliştirilen modelin en önemli uygulama katkısı, terminal yönetimine tek boyutlu değil, çok kriterli ve göreli bir operasyonel risk bakışı sunmasıdır. Bu bakış açısının kargo kabulünden operasyon planlamasına, eğitimden acil durum hazırlığına kadar farklı süreçlere entegre edilmesi, terminal emniyet yönetiminin daha hedefli, daha şeffaf ve daha savunulabilir hale gelmesine katkı sağlayabilir.

5.3 Çalışmanın Sınırlılıkları ve Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Bu çalışma, kimyasal tanker terminallerinde elleçlenen seçili sıvı kimyasal kargoların göreli operasyonel risk düzeylerini bütünleşik AHP-TOPSIS yaklaşımıyla değerlendiren bir model önermektedir. Elde edilen bulguların terminal emniyeti açısından anlamlı ve uygulanabilir çıktılar sunduğu görülmekle birlikte, çalışmanın yöntemsel kapsamı ve veri yapısı bazı sınırlılıklar içermektedir. Bu sınırlılıkların açık biçimde ortaya konulması, hem sonuçların doğru yorumlanması hem de gelecekte

yapılacak araştırmalar için daha sağlam bir geliştirme zemini oluşturulması açısından önem taşımaktadır.

Çalışmanın ilk temel sınırlılığı, alternatif kümenin kapsamı ile ilgilidir. Model, IBC Code Chapter 17 kapsamındaki tüm kimyasalları değil, farklı MARPOL kategorilerini ve farklı tehlike profillerini temsil edecek şekilde seçilmiş 13 kimyasal üzerinden kurulmuştur. Bu tercih, modelin kavramsal ayırt ediciliğini test etmek ve çalışmayı yönetilebilir kılmak açısından bilinçli bir örnekleme yaklaşımı sunmakla birlikte, elde edilen sıralamanın tüm kimyasal tanker kargolarına genellenmesini sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla bu tezde üretilen sonuçlar, evrensel ve kesin bir kimyasal risk listesi olarak değil; seçili örneklem üzerinde test edilmiş, genişletilmeye açık bir karar destek modeli olarak değerlendirilmelidir.

İkinci sınırlılık, veri standardizasyonu ve veri kalitesi ile ilgilidir. Çalışmada parlama noktası, buhar basıncı, LC50, LD50, sucul yaşam toksisitesi ve Log Kow gibi kriterler mümkün olduğunca ortak metodolojik kurallar altında derlenmiş olsa da, özellikle toksikolojik ve çevresel verilerde literatür kaynakları arasında önemli heterojenlik bulunmaktadır. Farklı türler, farklı maruziyet süreleri, farklı test koşulları ve farklı kaynak formatları nedeniyle bazı verilerin doğrudan karşılaştırılması güçleşmiştir. Bu nedenle belirli durumlarda standardizasyon yapılmış, bazı kriterlerde ise üst sınır veya vekâleten (proxy) temsil yaklaşımı benimsenmiştir. Özellikle LC50 verilerinin 4 saatlik eşdeğere indirgenmesi, LD50 için oral verinin akut sistemik toksisite göstergesi olarak kullanılması ve Log Kow'un biyobirikim eğilimini temsil eden pratik bir gösterge olarak seçilmesi, çalışmanın uygulanabilirliğini artıran ancak aynı zamanda sonuçların yorumuna dikkat gerektiren yöntemsel tercihlerdir. Benzer şekilde, Propilen Glikol, Dietanolamin ve 2-Etilheksil Akrilat için LC50 değerinin bulunmadığı veya pratik olarak ölçülemeyecek kadar düşük olduğu durumlarda 99.999 ppm gibi bir üst sınır atanmıştır. Bu atama, "veri yokluğu" ile "fiilen düşük toksisite" durumlarını aynı sayısal değerle temsil ettiğinden, ilgili maddelerin inhalasyon toksisitesi boyutundaki göreli konumunu etkileme potansiyeli taşımaktadır. Duyarlılık analizi (Bölüm 4.3.2), bu etkinin gerçekte anlamlı düzeyde toksik olan maddeler (örneğin 2-EHA) için sıralama farklılığı yaratabildiğini, buna karşılık gerçekten düşük inhalasyon toksisitesine sahip Propilen Glikol ve Dietanolamin için anlamlı bir sapma oluşturmadığını göstermiştir. Bu ayrım, model sonuçlarının yorumlanmasında veri

mevcudiyeti ile toksisite düzeyi arasındaki epistemik farkın gözetilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Üçüncü sınırlılık, bazı kriterlerde yapılan özel veri atamaları ve varsayımlar ile ilgilidir. Özellikle yanıcı olmayan maddeler için parlama noktası kriterinde yüksek fakat sonlu üst sınır değer kullanılması ve bazı inhalasyon toksisitesi verilerinde yüksek eşik ataması yapılması, modelin ayırt ediciliğini korumak amacıyla benimsenmiştir. Bununla birlikte bu tür atamalar, özellikle birbirine yakın risk profilleri sergileyen alternatiflerde sıralama üzerinde belirli bir etki yaratabilmektedir. Bu nedenle modelin çıktıları, kullanılan veri atama kararlarından tamamen bağımsız kesin sonuçlar olarak değil; belirli varsayımlar altında elde edilmiş göreli sıralamalar olarak değerlendirilmelidir.

Dördüncü sınırlılık, uzman görüşlerine dayalı ağırlıklandırma yapısı ile ilgilidir. AHP aşamasında kullanılan uzman grubu, mesleki deneyim ve alan çeşitliliği bakımından nitelikli bir yapı sunmakla birlikte, toplam uzman sayısı altı kişi ile sınırlıdır. Bu durum AHP uygulaması açısından yöntemsel olarak kabul edilebilir olsa da, kriter ağırlıklarının farklı terminal tipleri, farklı kurumsal kültürler veya farklı coğrafi operasyon koşullarında değişebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Başka bir ifadeyle, bu çalışmada elde edilen ağırlıklar terminal bağlamına duyarlı bir uzman uzlaşısını temsil etmekte, ancak tüm terminaller için değişmez ve evrensel bir öncelik yapısı sunduğu iddia edilmemektedir. Ayrıca AHP ağırlıkları, terminal operasyonlarına yakın profildeki (mühendis-kimyager) bir uzman grubunun risk algısını yansıtmakta olup; çevre mühendisliği, iş sağlığı veya liman otoritesi perspektifinden gelen uzmanların katılımıyla ağırlık yapısının bir miktar değişebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Beşinci sınırlılık, modelin hem yapısal varsayımlarından hem de temsil kabiliyetinden kaynaklanan metodolojik kısıtları içermektedir. Öncelikle, geliştirilen hibrit AHP-TOPSIS modeli statik ve göreli bir karar yapısı üretmektedir. Model, seçilen kriterler altında kimyasalların göreli risk sıralamasını vermekte; ancak gerçek zamanlı meteorolojik koşullar, operasyon yoğunluğu, ekipman güvenilirliği, personel sayısı, bakım durumu veya eş zamanlı operasyon türleri gibi dinamik saha değişkenlerini doğrudan içermemektedir. Bu nedenle model, terminal operasyonlarının anlık ve değişken risk seviyesini ölçen canlı bir sistemden ziyade, operasyon öncesi planlama ve göreli önceliklendirme amacıyla kullanılabilecek bir karar destek aracı olarak

değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, modelin bir diğer metodolojik sınırlılığı, kriterler arası olası korelasyonların istatistiksel olarak test edilmemiş olmasıdır. Örneğin, parlama noktası ile buhar basıncı arasında fiziko-kimyasal olarak ters yönlü bir ilişki beklenebilir; düşük parlama noktasına sahip maddeler çoğunlukla daha yüksek buhar basıncı değerleri göstermektedir. ÇKKV modellerinde kriterler arası yüksek korelasyon, aynı risk mekanizmasının farklı kriterler altında tekrar edilmesiyle sonuçlanarak "gizli çifte sayım" riskini doğurabilir. Bu çalışmada kriter seti kavramsal olarak ayrıştırılmış (buhar basıncı "maruziyetin oluşma potansiyeli", parlama noktası ise "ateşleme hassasiyeti" olarak tanımlanmıştır) olsa da, 13 alternatiften oluşan sınırlı veri seti üzerinde yapılacak istatistiksel korelasyon analizlerinin anlamlı sonuç üretmeyeceği öngörüldüğünden bu tür bir analiz gerçekleştirilmemiştir. Gelecek çalışmalarda daha geniş alternatif setleri üzerinde korelasyon yapısının incelenmesi, modelin yapısal sağlamlığını artırarak kriter setinin daha rafine edilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu sınırlılıklar doğrultusunda gelecekte yapılabilecek araştırmalar için çeşitli öneriler geliştirilebilir. İlk olarak, modelin daha geniş bir kimyasal evrenine uygulanması ve alternatif sayısının artırılması önemlidir. Böylece önerilen yaklaşımın daha fazla ürün grubu üzerindeki ayırt ediciliği test edilebilir ve daha geniş kapsamlı terminal risk haritaları oluşturulabilir.

İkinci olarak, çevresel boyutta yalnızca Log Kow yerine, mümkün olan durumlarda ölçülmüş BCF verilerinin kullanılması ve toksikolojik boyutta daha yaygın dermal veri temin edilmesi modelin bilimsel temsil gücünü artırabilir.

Üçüncü olarak, bu çalışma çerçevesinde sınırlı düzeyde ele alınan duyarlılık analizlerinin daha sistematik hale getirilmesi yararlı olacaktır. Özellikle veri atama hassasiyeti, farklı normalizasyon yöntemlerinin etkisi, kriter ağırlıklarının değişimi ve uzman grubu kompozisyonunun sonuçlar üzerindeki etkisi gelecekte ayrı bir çalışma başlığı olarak ayrıntılandırılabilir.

Dördüncü olarak, modelin klasik AHP-TOPSIS yapısı, gelecekte Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS, ANP veya DEMATEL gibi yöntemlerle karşılaştırılarak belirsizlik ve uzman yargısı boyutu daha ileri düzeyde analiz edilebilir.

Beşinci olarak, farklı terminal türleri ve farklı operasyon profilleri için bağlamsal model varyasyonları geliştirilebilir. Örneğin kimyasal tanker terminali, akaryakıt

terminali, çok amaçlı liman veya petrokimya entegre tesislerinde risk öncelikleri aynı olmayabilir. Bu nedenle gelecekteki çalışmalar, terminal tipi, iklim koşulları, saha yerleşimi ve operasyon ölçeği gibi bağlamsal değişkenleri modele entegre ederek daha özelleştirilmiş risk değerlendirme yaklaşımları geliştirebilir.

Son olarak, bu tezde önerilen modelin gerçek saha uygulamalarıyla karşılaştırılması da önemli bir gelecek araştırma alanıdır. Terminalde meydana gelmiş olay kayıtları, near-miss raporları, operasyonel gecikme nedenleri, acil durum tatbikat sonuçları veya denetim bulguları ile model çıktıları karşılaştırılarak, önerilen göreli risk sıralamasının pratik geçerliliği daha ileri düzeyde test edilebilir. Böylece model yalnızca teorik ve analitik bir yapı olarak değil, aynı zamanda sahada doğrulanabilir bir emniyet yönetimi aracı olarak geliştirilebilir.

Sonuç olarak bu çalışmanın sınırlılıkları, geliştirilen modelin değerini ortadan kaldırmamakta; aksine, hangi bağlamda ve hangi varsayımlar altında yorumlanması gerektiğini açık hale getirmektedir. Aynı zamanda bu sınırlılıklar, kimyasal tanker terminallerine yönelik çok kriterli operasyonel risk modellemelerinin gelecekte hangi yönlerde derinleştirilebileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, tamamlanmış ve kapalı bir sonuca ulaşmaktan çok, terminal emniyetine yönelik daha gelişmiş ve bağlama duyarlı karar destek modelleri için bir başlangıç zemini sunmaktadır.

KAYNAKLAR

AICHE. (1994). *Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide*. John Wiley & Sons, Inc. hiips://doi.org/10.1002/9780470938195

American Petroleum Institute. (1998). *API Recommended Practice 2003* (6th bs).

Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, *39*(17), 13051-13069. hiips://doi.org/10.1016/J.ESWA.2012.05.056

Bolat, P., Kayisoglu, G., Gunes, E., Kızılay, F. E., & Ozsogut, S. (2020). Weighting Key Factors for Port Congestion by AHP Method. *Journal of ETA Maritime Science*, *8*(4), 252-273. hiips://doi.org/10.5505/jems.2020.64426

Britton, L. G. (1999). *Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations*. Wiley. hiips://doi.org/10.1002/9780470935408

Britton, L. G., & Walmsley, H. L. (2012). Static electricity: New guidance for storage tank loading rates. *Process Safety Progress*, *31*(3), 219-229. hiips://doi.org/10.1002/prs.11510

Center for Chemical Process Safety. (2010). *Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards*. Wiley.

ChemServe GmbH. (2024). *Dr. Verwey's Tank Cleaning Guide* (C. Bruhn, J. Kammle, & S. Rowe, Ed.; 12th bs).

Chen, Q., Wang, J., Gao, M., Liu, L., & Tao, J. (2022). Review on loss prevention of chemical reaction thermal runaway: Principles and application. *Emergency Management Science and Technology*, *2*(1), 1-8. hiips://doi.org/10.48130/EMST-2022-0010

COZZANI, V., GUBINELLI, G., & SALZANO, E. (2006). Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Materials*, *129*(1-3), 1-21. hiips://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.012

Cunha, I., Moreira, S., & Santos, M. M. (2015). Review on hazardous and noxious substances (HNS) involved in marine spill incidents—An online database. *Journal of Hazardous Materials*, *285*, 509-516. hiips://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2014.11.005

Çelikbilek, Y., & Tüysüz, F. (2020). An in-depth review of theory of the TOPSIS method: An experimental analysis. *Journal of Management Analytics*, *7*(2), 281-300. hiips://doi.org/10.1080/23270012.2020.1748528

Dadashzadeh, M., Khan, F., Hawboldt, K., & Amyotte, P. (2013). An integrated approach for fire and explosion consequence modelling. *Fire Safety Journal*, *61*, 324-337. hiips://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.09.015

Dantsoho, A. M. (2015). *Risk-Based Framework For Safety Management Of Onshore Tank Farm Operations*.

Darbra, R.-M., & Casal, J. (2004). Historical analysis of accidents in seaports. *Safety Science*, *42*(2), 85-98. hiips://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00002-X

Elidolu, G., Akyuz, E., Arslan, O., & Arslanoğlu, Y. (2022). Quantitative failure analysis for static electricity-related explosion and fire accidents on tanker vessels under fuzzy bow-tie CREAM approach. *Engineering Failure Analysis*, *131*, 105917. hiips://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105917

Elidolu, G., Arslanoglu, Y., & Teixeira, A. P. (2024). Evaluation of technical and safety aspects of nitrogen use onboard tanker ships. Içinde *Advances in Maritime Technology and Engineering* (ss. 259-263). CRC Press. hiips://doi.org/10.1201/9781003508762-32

Elidolu, G., Sezer, S. I., Akyuz, E., Aydin, M., & Gardoni, P. (2025). A comprehensive risk analysis for cargo leakage pollution at tanker ship manifold under cloud modelling and Bayesian belief network approach. *Marine Pollution Bulletin*, *219*, 118238. hiips://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2025.118238

Elidolu, G., Teixeira, Â. P., & Arslanoğlu, Y. (2024). A risk assessment of inhibited cargo operations in maritime transportation: a case of handling styrene monomer. *Ocean Engineering*, *312*, 119049. hiips://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.119049

Elidolu, G., Uflaz, E., Aydin, M., Celik, E., Akyuz, E., & Arslan, O. (2022). Numerical risk analysis of gas freeing process in oil/chemical tanker ships. *Ocean Engineering*, *266*, 113082. hiips://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2022.113082

European Basic Acrylic Monomer Group (EBAM). (2015). *Safe Handling and Storage of Acrylic Esters*. hiips://www.petrochemistry.eu/wp-content/uploads/2018/04/AE-guidelines-final-01-2016-blocked-version-2.pdf

GESAMP. (2002). *The Revised GESAMP Hazard Evaluation Procedure for Chemical Substances Carried by Ships*. hiip://www.gesamp.org/site/assets/files/1242/the-revised-gesamp-hazard-evaluation-procedure-for-chemical-substances-carried-by-ships-en.pdf

Gupta, J. P. (1997). Application of DOW's fire and explosion index hazard classification guide to process plants in the developing countries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *10*(1), 7-15. hiips://doi.org/10.1016/S0950-4230(96)00040-X

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making* (C. 186). Springer Berlin Heidelberg. hiips://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9

ICS. (2021). *Tanker Safety Guide (Chemicals)* (5th bs).

IMO. (2006). *Study on incidents involving fires and explosions in chemical and product tankers (MSC 81/8/1)*.

IMO. (2020). *International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Dangerous Chemicals in Bulk (IBC Code)*.

IMO. (2022). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)* (Consolidated ed.).

IMO/GESAMP. (2019). *GESAMP HAZARD EVALUATION PROCEDURE FOR CHEMICALS CARRIED BY SHIPS*.

International Chamber Of Shipping, The Oil Companies International Marine Forum, & The International Association Of Ports And Harbours. (2020). *International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals* (6TH bs).

Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1999). Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *12*(5), 361-378. hiips://doi.org/10.1016/S0950-4230(98)00062-X

KODAK, G. (2023). Investigation of the Use of Multi-Criteria Decision-Making Techniques in Maritime Studies With Prisma Method. *Marine Science and Technology Bulletin*, *12*(4), 510-521. hiips://doi.org/10.33714/masteb.1379443

MAIB. (2019). *Report on the investigation of the cargo tank explosion and fire on board the chemical tanker*.

Marucco, D. (2016). Simultaneous operations risk assessment. *Chemical Engineering Transactions*, *53*, 115-120. hiips://doi.org/10.3303/CET1653020

Mokhtari, K., Ren, J., Roberts, C., & Wang, J. (2011). Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals. *Journal of Hazardous Materials*, *192*(2), 465-475. hiips://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.035

National Fire Protection Association. (2022). *NFPA 704: Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response*.

Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO). (2005). *Methods for the calculation of physical effects: Due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*.

OECD. (2022). *Test Guideline No. 425 Acute Oral Toxicity: Up-and-Down Procedure*.

Panayides, P. M., Lambertides, N., & Savva, C. S. (2011). The relative efficiency of shipping companies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *47*(5), 681-694. hiips://doi.org/10.1016/J.TRE.2011.01.001

Pawlak, M., Pobłocki, K., Drzeżdżon, J., Gawdzik, B., & Jacewicz, D. (2024). "Isocyanates and isocyanides - life-threatening toxins or essential compounds?" *Science of The Total Environment*, *934*, 173250. hiips://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173250

Pelegrina, G. D., Duarte, L. T., Grabisch, M., & Romano, J. M. T. (2022). Dealing with redundancies among criteria in multicriteria decision making through independent component analysis. *Computers & Industrial Engineering*, *169*, 108171. hiips://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108171

Phoon, L. Y., Mustaffa, A. A., Hashim, H., & Mat, R. (2014). A Review of Flash Point Prediction Models for Flammable Liquid Mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *53*(32), 12553-12565. hiips://doi.org/10.1021/ie501233g

Ronza, A., Carol, S., Espejo, V., Vílchez, J. A., & Arnaldos, J. (2006). A quantitative risk analysis approach to port hydrocarbon logistics. *Journal of Hazardous Materials*, *128*(1), 10-24. hiips://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.032

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, *1*(1), 83. hiips://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590

Saruchera, F. (2020). Determinants of effective high-risk cargo logistics at sea ports: A case study. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, *14*. hiips://doi.org/10.4102/jtscm.v14i0.488

Sevim, C., & Zincir, B. (2026). Selection of optimum sustainable biofuel for maritime transportation using analytic hierarchy process. *Journal of Marine Engineering & Technology*, *25*(2), 90-105. hiips://doi.org/10.1080/20464177.2025.2463208

Sezer, S. I., & Akyuz, E. (2024). A conceptual risk modelling for cargo tank fire/explosion in chemical tanker by using Evidential Reasoning -SLIM and Bayesian belief network approach. *Reliability Engineering & System Safety*, *252*, 110455. hiips://doi.org/10.1016/J.RESS.2024.110455

Zhao, J., Zhang, W., Hu, J., Lin, S., Gui, X., Li, S., Wang, X., Li, Z., Tu, Y., Nian, F., & He, D. (2021). Research on the Risk of Thermal Runaway in the Industrial Process of Styrene Solution Polymerization. *Organic Process Research & Development*, *25*(6), 1366-1374. hiips://doi.org/10.1021/acs.oprd.0c00554

Zincir, B. (2019). *An Alternative Fuel Assessment Model for Ships and Experiments on the Effect of Methanol on Diesel Engines*.

Zincir, B., & Deniz, C. (2018). Assessment of alternative fuels from the aspect of shipboard safety. *Journal of ETA Maritime Science*, *6*(3), 199-214. hiips://doi.org/10.5505/jems.2018.71676

URL-1 < hiips://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/chemicalpollution-default.aspx >, erişim tarihi 10.01.2026.

URL-2 <hiips://www.gov.uk/government/publications/min-699-m-amendments-to-marpol-annex-ii-abbreviated-legend-to-the-revised-gesamp-hazard-evaluation-procedure/min-699-m-amendments-to-marpol-annex-ii-abbreviated-legend-to-the-revised-gesamp-hazard-evaluation-procedure>, erişim tarihi 06.03.2026.

URL-3 < hiips://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/ibc-code.aspx>, erişim tarihi 12.01.2026.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **: Burak KAPLAN**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018 - 2022 Uzakyol Vardiya Zabiti, Arkas Denizcilik ve Nakliyat A.Ş.
- 2022 - 2025 Gemi Operasyon Mühendisi, Solventaş Teknik Depolama A.Ş.
- 2025 - … Gemi Operasyon Şefi, Solventaş Teknik Depolama A.Ş.