

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TANKER GEMİLERİNDE TEHLİKELİ YÜK OPERASYONLARI ÜZERİNE
BİR RİSK DEĞERLENDİRMESİ YAKLAŞIMI**

DOKTORA TEZİ

Gizem ELİDOLU

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TANKER GEMİLERİNDE TEHLİKELİ YÜK OPERASYONLARI ÜZERİNE
BİR RİSK DEĞERLENDİRMESİ YAKLAŞIMI**

DOKTORA TEZİ

**Gizem ELİDOLU
(512192012)**

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU

ŞUBAT 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**A RISK ASSESSMENT APPROACH ON HAZARDOUS CARGO
OPERATIONS ONBOARD TANKER SHIPS**

Ph.D. THESIS

**Gizem ELİDOLU
(512192012)**

Department of Maritime Transportation Engineering

Maritime Transportation Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU

FEBRUARY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 512192012 numaralı Doktora Öğrencisi Gizem ELİDOLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TANKER GEMİLERİNDE TEHLİKELİ YÜK OPERASYONLARI ÜZERİNE BİR RİSK DEĞERLENDİRMESİ YAKLAŞIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özkan UĞURLU**
Ordu Üniversitesi

Prof. Dr. Emre AKYÜZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tayfun UYANIK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Bulut Ozan CEYLAN
Bandırma Onyedİ Eylöl Üniversitesi

Teslim Tarihi : 05 Ocak 2025
Savunma Tarihi : 07 Şubat 2025





Sevgili aileme



ÖNSÖZ

Öncelikle lisansüstü eğitimime başladığım dönemden bugüne kadar akademik çalışmalarında beni yönlendiren, öğreten ve her daim destek olan kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU'na çok teşekkür ederim. Tüm bu süreçte olduğu gibi gelecekte de bana yol göstereceğine eminim. Bana aktardığı tüm bilgi ve tecrübeleri zamanla geliştirerek çoğalttığımı ve bir gün kendi öğrencilerime aktardığımı görebilmesini diliyorum.

Doktora tez sürecimin son bir yılını geçirdiğim CENTEC/IST'te bana cömertçe zaman ayıran, yapıcı fikirleriyle gelişmeye destek olan, risk analizi ve güvenilirlik konularında önemli çalışmalarda bulunmuş değerli hocam Prof. Ângelo Palos TEIXEIRA'ya çok teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarında değerli yorum ve önerilerini eksik etmeyerek beni destekleyen tez izleme jürimdeki hocalarım Prof. Dr. Emre AKYÜZ ve Prof. Dr. Özkan UĞURLU hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Denizcilik konusunda uzmanlıkları olan, bilgi ve tecrübeleriyle beni destekleyen başta Kpt. Deniz TOKDEMİR, Kpt. Tülin KAYRAŞ ve Kpt. Deniz SEMERCİOĞLU olmak üzere, tüm denizcilere teşekkürü borç bilirim. Ayrıca değerli meslektaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Bulut Ozan CEYLAN, Dr. Öğr. Üyesi Tayfun UYANIK, Dr. Öğr. Üyesi Çağlar KARATUĞ, Dr. Emir EJDER, Öğr. Gör. Özcan DURUKAN ve bölümümüzdeki hocalarıma bana sağladıkları motivasyon ve destek için çok teşekkür ederim.

Doktora tez sürecimdeki çalışmalarım İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından Doktora Tez Projeleri kapsamında 43690 proje numarasıyla ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı kapsamında 1059B142201561 proje numarasıyla desteklenmiştir. Bu kurumlara sağlamış oldukları desteklerden ötürü çok teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca yanımda olan kıymetli aileme, tüm mutlu ve zor zamanlarımda sonsuz sevgisi ve saygısıyla bana güç veren sevgili eşim Alper ELİDOLU'ya minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Ocak 2025

Gizem ELİDOLU
(Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Deniz Yolu ile Sıvı Yük Taşımacılığı	1
1.2 Tankerlerde Kaza Risklerinin Değerlendirilmesi Üzerine Literatür İncelemesi.....	3
1.3 Tankerlerde Emniyet ile İlgili Uluslararası Düzenlemeler.....	7
1.4 Tezin Amacı ve Araştırma Konusu	9
1.4.1 Tezin organizasyonel yapısı.....	10
2. RİSK DEĞERLENDİRME SÜRECİ.....	11
2.1 Risk Değerlendirmesi ve Risk Yönetim Sürecindeki Rolü	11
2.1.1 Risklerin tanımlanması	12
2.1.2 Risk analizi.....	12
2.1.3 Risk analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	12
2.2 Risk Değerlendirme Yöntemlerinin İncelenmesi	13
2.3 Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün Risk Değerlendirmesine Yaklaşımı	17
3. TANKERLERDE TEHLİKELİ VE ÖZEL GEREKSİNİMLİ YÜK OPERASYONLARI.....	19
3.1 Yüklerin Operasyonel Açından Kritik Özellikleri	19
3.1.1 Yanıcılık ve patlayıcılık	19
3.1.2 Reaksiyon tehlikesi	21
3.1.3 Statik biriktiricilik	22
3.1.4 Yoğunluk faktörü	22
3.1.5 Yüksek viskozite faktörü	23
3.1.6 Aşındırıcılık tehlikesi	23
3.1.7 Zehirlilik faktörü	24
3.1.8 Kanserojen özellik	25
3.2 Reaktif Yüklerin Operasyonel Gereksinimlerinin İncelenmesi	25
3.2.1 Kendi kendine reaksiyona giren yüklerin elleçlenmesi	25
3.2.2 Farklı yükler ile reaksiyona giren yüklerin elleçlenmesi	26
3.2.3 Su ile reaksiyona giren yüklerin elleçlenmesi.....	27
3.2.4 Hava ile reaksiyona giren yüklerin elleçlenmesi	28
4. YÖNTEMSEL YAKLAŞIM	29
4.1 Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi (FMECA)	29
4.1.1 Hata türlerinin belirlenmesi	30

4.1.2 Hata türlerinin değerlendirilmesi	30
4.1.3 FMECA yönteminin kısıtları.....	32
4.2 Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)	34
4.2.1 Bulanık çıkarım sistemi (FIS) uygulaması.....	36
4.3 Bulanık Ortamda Kural Tabanlı FMECA Yaklaşımı	37
5. TANKERLERDE ÖZEL GEREKSİNİMLİ YÜK OPERASYONLARI ÜZERİNE RİSK DEĞERLENDİRMESİ	39
5.1 Stiren Monomer Karakteristiği ve Operasyonel Tehlikeleri	39
5.2 FMECA aşaması.....	42
5.2.1 Hata türlerinin belirlenmesi.....	42
5.2.2 Uzman grubunun oluşturulması	48
5.2.3 Hata türlerinin değerlendirilmesi	49
5.3 Kural Tabanlı FMECA Uygulaması.....	49
5.3.1 Bulanık çıkarım sisteminin modellenmesi	50
5.3.1.1 Model seçimi	50
5.3.1.2 Girdi ve çıktı üyelik fonksiyonlarının tanımlanması.....	51
5.3.1.3 Kural tabanının oluşturulması	53
5.3.1.4 Durulaştırma aşaması	55
5.3.2 F-RPN hesaplanması ve risklerin önceliklendirilmesi	55
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	59
7. SONUÇ.....	69
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	87

KISALTMALAR

ALARP	: Mantıksal olarak mümkün olan en düşük seviye
BBN	: Bayes İnanç Ağları
BM	: Birleşmiş Milletler
ETA	: Olay Ağacı Analizi
FMEA	: Hata Türü ve Etkileri Analizi
FMECA	: Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi
FIS	: Bulanık Çıkarım Sistemi
F-RPN	: Bulanık Risk Öncelik Sayısı
FSA	: Biçimsel Emniyet Değerlendirmesi
FTA	: Hata Ağacı Analizi
ILO	: Uluslararası Standartlar Örgütü
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
H	: Hata Türü
HAZID	: Tehlike Tanımlama Analizi
HAZOP	: Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi
hpa	: Hektopaskal/minibar
HRA	: İnsan Güvenilirliği Analizi
IBC (Kod)	: Dökme Tehlikeli Kimyasalları Taşıyan Gemilerin İnşa ve Ekipmanları Hakkında Uluslararası Kod
ILO	: Uluslararası Çalışma Örgütü
ISM (Kod)	: Uluslararası Emniyetli Yönetim Kodu
OSHA	: Amerika Birleşik Devletleri İş Güvenliği ve Sağlığı İdaresi
LOPA	: Koruma Katmanı (Bariyer) Analizi
MAIB	: Birleşik Krallık Deniz Kazalarını İnceleme Birimi
MARPOL	: Uluslararası Gemilerden Kaynaklanan Deniz Kirliliğinin Önlenmesi Konvansiyonu
MCDA	: Çok Kriterli Karar Verme Analizi
ppm	: Milyonda bir parçacık sayısı
PHA	: Başlangıç Tehlike Analizi
PRA	: Olasılıksal Risk Değerlendirmesi

RCA	: Kök Sebep Analizi
RCM	: Güvenilirlik Merkezli Bakım
RPN	: Risk Öncelik Sayısı
TBC	: 4-Tertiary Butyl Catechol
SILA	: Emniyet Bütünlük Seviye Analizi
SOLAS	: Uluslararası Denizde Can Emniyeti Sözleşmesi
SOPEP	: Gemi Kaynaklı Petrol Kirliliği Acil Durum Planı



SEMBOLLER

A	: Bulanık küme
ACentroid	: Bulanık kümenin ağırlık merkezi
D	: Tespit edilebilirlik
D_y	: Tespit edilebilirlik parametresine ait bulanık küme
FRPN_y	: Çıktı değişkeni
H	: Hata türü
Kural_n	: n.sıradaki kural
n	: kural sayısı [1, 125]
O	: Meydana gelme
O_y	: Meydana gelme parametresine ait bulanık küme
S	: Şiddet
S_y	: Şiddet parametresine ait bulanık küme
U	: Uzman
°C	: Santigrat
μA	: Üyelik derecesi
σ	: Standart sapma



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Risk değerlendirme tekniklerinin uygulanabilirliği.	16
Çizelge 2.1 (Devamı) : Risk değerlendirme tekniklerinin uygulanabilirliği.....	17
Çizelge 4.1 : FMECA yönteminde meydana gelme parametresinin değerlendirme ölçeği.	30
Çizelge 4.2 : FMECA yönteminde şiddet parametresinin değerlendirme ölçeği.	31
Çizelge 4.3 : FMECA yönteminde tespit edilebilirlik parametresinin değerlendirme ölçeği.	31
Çizelge 5.1 : Stiren monomer yüküne dair temel bilgiler.....	39
Çizelge 5.1 (Devamı) : Stiren monomer yüküne dair temel bilgiler.....	40
Çizelge 5.2 : Stiren monomer yükünün inhibitörlü operasyonuna ait hata türleri....	42
Çizelge 5.2 (Devamı) : Stiren monomer yükünün inhibitörlü operasyonuna ait hata türleri.....	43
Çizelge 5.3 : Hata türlerinin nedenleri, etkileri ve sonuçları.....	44
Çizelge 5.3 (Devamı) : Hata türlerinin nedenleri, etkileri ve sonuçları.....	45
Çizelge 5.3 (Devamı) : Hata türlerinin nedenleri, etkileri ve sonuçları.....	46
Çizelge 5.3 (Devamı) : Hata türlerinin nedenleri, etkileri ve sonuçları.....	47
Çizelge 5.4 : Uzmanlara ait temel bilgiler.	48
Çizelge 5.5 : Uzmanların hata türlerine dair değerlendirmeleri.	49
Çizelge 5.6 : Bulanık mantıkta kural tabanlı analiz sonucunda elde edilen F-RPN değerleri ve hiyerarşik sıralaması.....	56
Çizelge 5.7 : F-RPN değerlerine göre hata türlerinin önceliklendirilmesi.	57
Çizelge 6.1 : Hata türleri için uygulanabilecek risk kontrol seçeneklerinin değerlendirilmesi.....	66
Çizelge 6.1 (Devamı) : Hata türleri için uygulanabilecek risk kontrol seçeneklerinin değerlendirilmesi.....	67
Çizelge 6.1 (Devamı) : Hata türleri için uygulanabilecek risk kontrol seçeneklerinin değerlendirilmesi.....	68



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 2003-2024 yılları arasında milyon ton bazında uluslararası deniz taşımacılığı	2
Şekil 2.1 : Risk yönetim sürecinde risk değerlendirmesinin rolü.....	11
Şekil 2.2 : Biçimsel Emniyet Değerlendirmesi'nin uygulama basamakları	18
Şekil 3.1 : Oksijen ve hidrokarbon gazı konsantrasyonlarının yanmaya etkisi	20
Şekil 3.2 : Örnek yüklere ait LEL değerleri.	21
Şekil 4.1 : Klasik mantık ve bulanık mantık yaklaşımları.....	34
Şekil 4.2 : Üçgen bulanık üyelik fonksiyonu.....	35
Şekil 4.3 : Yamuk bulanık üyelik fonksiyonu	36
Şekil 4.4 : Tezin yöntemsel yaklaşımı: bulanık ortamda kural tabanlı FMECA uygulaması	37
Şekil 5.1 : Stiren monomer ve polimer yapısı	40
Şekil 5.2 : Stiren monomerin tank içerisindeki polimerizasyonu.....	41
Şekil 5.3 : İnhibitörlü yük operasyonu için kural tabanlı bulanık FMECA modeli ..	50
Şekil 5.4 : Girdi değişkenleri için üyelik fonksiyonları.....	52
Şekil 5.5 : Çıktı değişkeni için üyelik fonksiyonları	52
Şekil 5.6 : Kural yapısının iki boyutlu yüzey görünümü.....	54
Şekil 5.7 : Hata türlerinin RPN ve F-RPN değerlerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 5.8 : Hata türlerine ait O, S ve D parametrelerinin ortalama değerleri ve F-RPN seviyeleri.	58



TANKER GEMİLERİNDE TEHLİKELİ YÜK OPERASYONLARI ÜZERİNE BİR RİSK DEĞERLENDİRMESİ YAKLAŞIMI

ÖZET

Deniz yolu ile sıvı yük taşımacılığı, geçtiğimiz yüzyılda petrolün stratejik öneminin artmasıyla önem kazanan, zaman içerisinde ise petrol, petrol türevi ürünler, kimyasallar ve gıda maddeleri olmak üzere yüzlerce çeşit hammadde veya ürünün kıtalar arası tedarikini sağlayan büyük ve köklü endüstrilerden biridir. Her yıl milyarlarca ton sıvı yükün taşımacılığı tanker gemileri aracılığıyla sağlanabilmekte iken, bu süreçlerin devamlılığının tankerlerin emniyetli işletilmesine bağlı olması son derece açık ve anlaşılabilir bir durumdur.

Tanker gemilerinin dahil olduğu özellikle petrol sızıntıları gibi büyük kazalar bu gemilerin çevreye olan potansiyel yıkıcı etkilerinin fark edilmesine ve bazı uluslararası düzenlemelerin getirilmesine neden olmuştur. İnsan yaşamını ve denizel çevreyi tehdit eden birçok uygulama ve operasyonel süreç için başta SOLAS ve MARPOL konvansiyonları olmak üzere birçok kural yürürlüğe girmiş olup, bu kurallar günümüzde halen çeşitli kodlar ve yönetmelikler vasıtasıyla güncellenmeye devam etmektedir. Bu kurallar ile uyumlu olarak günümüzde modern tankerler emniyetli ve çevreye duyarlı bir şekilde işletimin sağlanması için çift cidar yapısı, radar, elektronik seyir sistemleri gibi teknolojileri ile donatılmaktadır. Bu ilerlemeler gemi operasyonlarında personele kolaylıklar sağlamasına rağmen, çeşitli riskler nedeniyle operasyonel süreçlerde istenmeyen olaylar veya kazalar meydana gelmeye devam etmektedir. Özellikle taşınan yüklerin özellikleri dikkate alındığında tanker gemilerinin yük işlemlerinin çeşitli riskler barındırdığı anlaşılmaktadır. Risklerin fark edilemediği veya tanımlanan riskler için uygun önlemler alınmadığı koşullarda patlama ve yangın gibi son derece tehlikeli kazalar meydana gelebilir. Buna bağlı olarak ise çevre kirliliği, ekonomik kayıp ve insan hayatına yönelik tehditler gibi sonuçlarla karşılaşılabilir.

Denizcilik sektöründe kaza raporları incelendiğinde patlama ve yangının bütün gemi tipleri için yaşanabilecek en ağır kazalar arasında olduğu açıkça görülür. Bu kaza riskleri esasında tankerlerde her yanıcı yük elleçlemesinde mevcuttur ve operasyonların her aşaması düşünülerek risklerin değerlendirilmesi gerektirmektedir. Ancak bazı yüklerin tehlikelilik özelliği yanıcılıkla sınırlı kalmamaktadır. İnert gaz operasyonu gibi son derece emniyetli tedbirlerin yetersiz kalabildiği hatta yükün türüne göre inert gaz uygulanmaması gerekebilen, bunun yerine özel gereksinimleri olabilen yükler de mevcuttur. Bu özel durumlar genellikle reaktif yükler için geçerlidir. Reaktivite tehlikesi olan yüklerin operasyonel süreçlerinin iyi planlanması ve çeşitlenen risklere dikkat edilmesi can, mal ve çevre açısından kritik önem taşımaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında tankerlerde söz konusu tehlikeli yük operasyonları üzerine bir risk değerlendirmesi çalışması yürütülmüştür.

Tezde tehlikeli yük kategorileri arasından reaktivite özelliği olan yükler üzerine bir inceleme yapılmıştır. Reaksiyon bir maddenin su, hava, bir başka yük ile arasında olabildiği gibi, kendi kendine reaksiyona girebilen yükler de mevcuttur. Kendi kendine

reaksiyon genellikle polimerleşme olarak da bilinir ve bu tür yüklerin inhibitör adı verilen katkıları eşliğinde taşınması oldukça önemlidir. Yükün inhibitörlü operasyonu özünde bir emniyet önlemi olarak uygulansa da bu süreç de kendi içerisinde farklı tehlikeler barındırmaktadır. Yükleme öncesinde, yükleme esnasında, açık deniz seyri esnasında, tahliyede ve tank temizliği aşamalarında kazalara neden olabilecek potansiyel birçok risk faktörü olabilmektedir. Bu tezde söz konusu özel gereksinimli operasyonlar odaklanılan konu olarak belirlenmiştir. Günümüzde kimya ve plastik endüstrilerinde kullanılan önemli bir hammadde olan ve deniz taşımacılığında inhibitörlü bir biçimde elleçlenmesi gereken stiren monomer örnek tehlikeli yük olarak seçilmiştir.

Tezde literatürde risk analizi çalışmalarında sıklıkla kullanılan Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi (FMECA) esas yöntem olarak belirlenmiş, yöntem ayrıca belirsizlik ve öznel yargıların analizi konusunda başarılı sonuçlar ortaya koyan bulanık mantık yaklaşımıyla desteklenmiştir. FMECA'nın ilk aşaması olan hataların tanımlanması için öncelikle stiren monomer yüküne dair bir literatür araştırması yapılmıştır. Temel özelliklerine dair bilgiler çoğunlukla kimya alanındaki çalışmalardan ve endüstriyel kaynaklardan edinilirken, bu yükün operasyonel tehlikelerinin anlaşılabilmesi için de ilgili kaza raporları incelenmiştir. Uygulamada ayrıca söz konusu tehlikeli ve özel gereksinimli yük operasyonlarına dair bilgi ve tecrübe sahibi altı denizcilik uzmanının görüşlerinden destek alınmıştır. Hataların tanımlanması aşamasını takiben, uzmanlar toplamda 24 hata türünü meydana gelme, şiddet ve tespit edilebilirlik risk parametreleri açısından değerlendirmişlerdir. Bu üç parametre sayesinde FMECA yöntemi bir risk öncelik sayısı (RPN) değeri hesaplamaktadır. Ancak FMECA'nın klasik yaklaşımındaki bu işlemin, parametrelerin eşit önemde kabul edilmesi, parametrelerdeki küçük değişimlerin RPN'e uygunsuz bir biçimde yansması gibi kısıtları sebebiyle iyileştirilmesi gerektiğine kadar verilmiştir. Bu noktada bulanık mantığın bir yaklaşımı olan kural tabanlı bir çıkarım sistemi modellemesi yapılmıştır. Model üç girdi değişkeni (risk parametreleri), bir çıktı değişkeni (RPN değeri) ve 125 adet kural ile hazırlanmıştır. Değişkenlerin bulanık ortamda işlenebilmesi için literatürde risk analizi çalışmalarında rasyonel sonuçlar elde ettiği görülen Gauss üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Bu yöntem entegrasyonunun en önemli aşamalarından ve tez çalışmasının özgün yanlarından biri kural yapısının oluşturulmasıdır. Kurallar EGER-O ZAMAN biçim formunda ve tezin konusuna uygun bir biçimde uzmanların görüşleri alınarak hazırlanmıştır. Bu sayede operasyonel risklerin daha güvenilir bir biçimde hesaplanması sağlanmıştır. Model kurulduktan sonra uzman değerlendirmeleri modelde işlenerek her bir hata türü için bulanık RPN (F-RPN) değerleri hesaplanmış ve risklerin önceliklendirmesi yapılmıştır.

Analiz sonucunda stiren monomer için inhibitörlü yük operasyonları sürecinde en yüksek risk öncelik değerli hata türlerinin 6.78 F-RPN değeri ile “İnhibitörün miktar bakımından yetersizliği”, 6.71 ile “Kargo tankı içerisinde geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı”, 6.30 değeri ile “İnhibitörün stiren monomer içerisinde homojen olmayan dağılımı” ve 6.28’lik F-RPN değeri ile “Stiren monomerin ısıtmalı bir tanka bitişik veya yakın bir tanka yüklenmesi” olduğu görülmüştür. Her bir hata türünün neden, etki ve sonuç ilişkileri incelenmiştir. Tezde ayrıca en yüksek risk öncelik değerli hata türleri için uygulanabilecek risk kontrol seçenekleri sunulmuştur.

Çalışma denizcilik endüstrisine reaktif yükler ve inhibitörlü yük operasyonları konusunda uygulanabilecek örnek bir risk değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır. Risklerin analizi için oluşturulan modelin kural yapısı, söz konusu operasyonların

tehlikesini yansıtabilmesi açısından konuya uygun bir biçimde oluşturulmuştur. Parametrelerin göreceli kombinasyonlarını ve özellikle şiddet parametresinin risk üzerindeki etkisini dikkate aldığı için, önemli risklerin göz ardı edilmemesi ve risklerin doğru bir şekilde önceliklendirilmesi mümkün olmuştur. Nitekim bu durum emniyet tedbirlerinin uygulanması konusunda zaman ve finansal kaynakların da etkili kullanımına katkı sağlayacaktır. Oluşturulan model diğer tehlikeli yüklerin risk analizi çalışmalarında da gerçekçi ve kullanışlı sonuçlar verebilecektir.

Buna ek olarak tez çalışmasının tankerlerde tehlikeli ve özel gereksinimli yük operasyonları konusunda literatüre önemli bir katkı sağlaması, okuyuculara operasyonel riskler ve emniyet konusunda yararlı bakış açıları sağlaması hedeflenmektedir.





A RISK ASSESSMENT APPROACH ON HAZARDOUS CARGO OPERATIONS ONBOARD TANKER SHIPS

SUMMARY

Maritime transportation is one of the major and significant industries for global trade that allows an international supply of hundred types of chemicals, edibles, oil, and oil derivatives. Due to the increasing strategic importance of oil in the past century, tanker vessels have developed over time, both in fleet size and vessel capabilities, for worldwide liquid cargo transportation. While the volume of liquid cargo transportation through tankers is billions of tonnes each year, it is clearly understandable that the succession of these processes depends on the safe operation of the tanker vessels.

Major accidents involving tanker ships, particularly oil spills, have led to the recognition of these ships' potential destructive impacts on the environment and therefore the introduction of some international regulations. For many practices and operational processes that threaten human life and the marine environment, a series of rules have been entered into force, primarily the SOLAS and MARPOL conventions, and these rules could be regularly updated through various codes and resolutions by the International Maritime Organization. In accordance with these rules, modern tankers are equipped with technologies such as radars, electronic navigation systems, and double hull structures to ensure safe and environmentally friendly operations. Although these advancements provide conveniences to ship crew in operations, accidents or undesired events still occur due to various risk factors. In particular, considering the characteristics of cargoes, it is clear that the cargo operations on tanker ships involve many hazardous aspects. If the risks are not being noticed or appropriate measures are not taken for identified risks, extremely dangerous accidents such as explosions and fires can occur during these processes. As a result, there could be consequences, such as loss of life or injuries, environmental pollution, and economic loss.

When examining accident reports in the maritime industry, it is clearly seen that explosions and fires are among the most severe accidents that can occur for all types of ships. These accident risks are essentially present during the handling of flammable cargoes on tankers, and they require risk assessment by considering every stage of the operations. However, the hazardous nature of some cargoes extends beyond their flammability. There are also chemicals of which safety measures such as inert gas application may be insufficient, and depending on the type of chemical inert gas would better not to be applied. Such cargoes may have more special requirements, generally required for reactive chemicals. The operational processes of cargoes with reactivity hazards must be well-planned, and careful consideration must be given to varied risks, as it is crucial for the safety of life, property, and the environment. Therefore, in this thesis, a risk assessment study has been conducted on the hazardous cargo operations on tanker vessels.

In the thesis, the literature is reviewed about reactive chemicals. The reaction can occur between a substance and water, air, or another substance, or some materials can react with themselves. Self-reaction is generally known as polymerization, and it is a critical property in the transportation of cargoes with additives called inhibitors. Although the inhibited cargo operation is basically implemented as a safety measure, this process also harbors different dangerous aspects within itself. Before and during the cargo operations, such as loading, discharge, and tank cleaning, and also during the open sea voyage, many risk factors could exist, leading to accidents in further stages. In the thesis, styrene monomer is selected for the case study, as it is an important raw material used in the chemical and plastic industries and must be handled with inhibitor during maritime transportation.

In the methodology section, Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA), which is frequently used in risk analysis research in the literature, is applied as the primary method. Additionally, it is supported by fuzzy logic, which is a successful technique in dealing with uncertainty and subjective judgments. At the first stage of FMECA, the identification of failure modes, a literature review on styrene monomer is conducted. Information about its basic properties is mostly obtained from studies in the field of chemistry and industrial sources, while relevant accident reports are examined to understand the operational hazards of this cargo. Besides, the study is benefitted by the opinions of six maritime experts who are familiar with the relevant hazardous cargo operations. Following the failure mode identification, the experts evaluated a total of 24 failure modes in terms of occurrence, severity, and detection risk parameters. The FMECA method calculates a risk priority number (RPN) by processing these three parameters. However, it is considered that this calculation in the classical FMECA requires improvements due to constraints such as the assumption that parameters are of equal importance, and inappropriate reflection of changes in parameters on the RPN. At this point, a rule-based inference system modelling is carried out in a fuzzy environment. The model is prepared with three input variables (risk parameters), one output variable (RPN value), and 125 rules. Gaussian membership functions, which help to output rational results in risk analysis studies, are employed. One of the most important stages of the methods' integration and unique aspects of the thesis is the formation of the rule-based structure. The rules are prepared in the IF-THEN form and in accordance with the thesis topic, by utilising the expert opinions. Hence, operational risks are calculated in a more reliable way. After building the model, expert evaluations are processed in the system, and fuzzy RPN (F-RPN) values are calculated for all failure modes, and the risks are prioritized.

According to the analysis results, the highest risk priority-valued failure modes of inhibited cargo operations with styrene monomer are found to be "Insufficient amount of the required inhibitor" with an F-RPN value of 6.78, "Residue from previous cargoes or cleaning agents in the tank" with 6.71, "Inhibitor's non-homogeneous distribution inside styrene" with a value of 6.30, and "Stowing styrene monomer in tanks adjacent or close to other tanks heated" with an F-RPN value of 6.28. The cause, effect, and consequence relationships of each failure mode are examined for detailed assessment. The thesis also presents risk control options that could be applied to the failure modes with the highest risk priority values.

The thesis presents a risk assessment model that could be applicable to reactive cargoes and inhibited cargo operations in the maritime industry. The rule-based structure of the model is developed step by step to reflect the dangers of such cargo operations. Since it takes into account the relative combinations of the parameters and the impact of the severity parameter on risk phenomenon, it could be ensured that significant risks are not neglected, and the risks are prioritized in correct ranking. Likewise, this study could contribute to the effective use of time and financial resources in the implementation of safety measures. The created model could also provide realistic and useful results in the risk analysis studies of other hazardous cargoes.

In addition, it is aimed that the thesis could make a significant contribution to the literature on hazardous and cargo operations with special requirement on tanker vessels, providing readers useful perspectives on operational risks and safety.



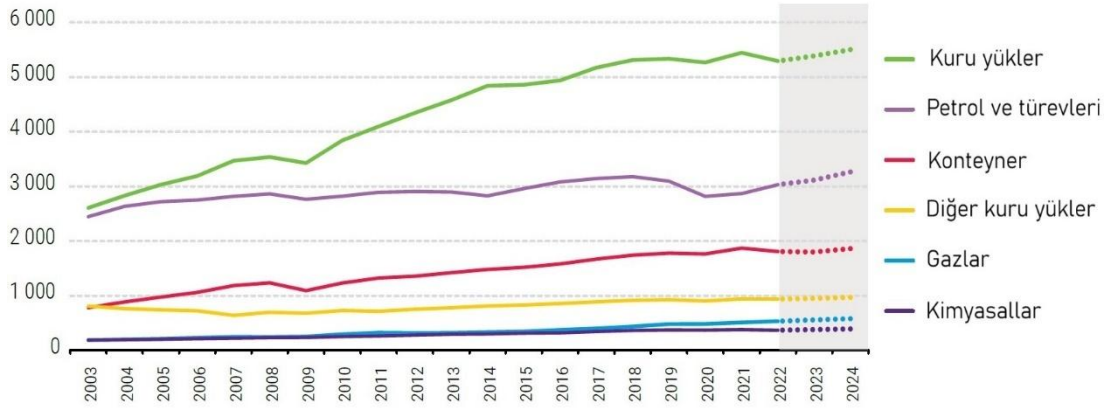


1. GİRİŞ

Deniz taşımacılığı çağlar boyu dünya ticaretinin temel taşlarından biri olup, kıtalararası kargo ve yolcu transferine olanak sağlar. En eski ulaşım yöntemlerinden biri olduğu gibi modern küresel ekonomide de kritik bir rol oynamaya devam etmektedir. Çeşitli tipte yüklerin istenilen tonajlarda taşınabilmesine ek olarak, zaman ve maliyet konusundaki verimliliği sayesinde kullanıcıların sıklıkla yöneldiği bir seçenek olmuştur. Konteyner, genel kargo, kuru yük, ro-ro, tanker gibi gemi çeşitliliği ile deniz taşımacılığı uluslararası ticaret, ekonomik kalkınma ve dünya çapında birçok endüstrinin işleyişine önemli katkılar sağlamaktadır (UNCTAD, 2023).

1.1 Deniz Yolu ile Sıvı Yük Taşımacılığı

Sıvı yükler gıda, sağlık, enerji ve ulaşım gibi temel gereksinimlere kaynak sağlayan tesislerin vazgeçilmez hammaddeleri arasındadır. Özellikle petrol, kimya ve proses endüstrilerinde uygulanan üretim, işleme ve dönüştürme gibi işlemler için girdi olarak çeşitli sıvı maddeler kullanılır. Söz konusu endüstrilerde ve bağlantılı birçok sektörde faaliyetlerin devamlılığı için sıvı maddelerin tedariki oldukça önemlidir. Yakın geçmişe bakıldığında COVID-19 pandemisi ve Rusya-Ukrayna savaşının etkisi küresel petrol piyasasında birtakım olumsuzluklara yol açmıştır. Kısıtlamalar, üretim faaliyetlerindeki kesintiler, liman çağrılarındaki gecikmeler, ambargo uygulaması gibi durumlar nedeniyle yüklere dair bir talep dalgalanması meydana gelmiştir. Değişen talepler karşısında potansiyel jeopolitik risklerin yönetilebilmesi için gemilerin ticaret rotaları yeniden modellenmiştir. Birleşmiş Milletler'in yayınladığı Review of Maritime Transport başlıklı rapora göre kuru yük, petrol ve kimyasal gibi yük türlerinin taşınma hacimlerinin yıllar boyunca değişimi ve yakın geçmişteki dalgalanmaları Şekil 1.1'de ifade edilmiştir.



Şekil 1.1 2003-2024 yılları arasında milyon ton bazında uluslararası deniz taşımacılığı (UNCTAD, 2023).

Sıvı maddelerin deniz yolu ile taşınması tanker gemileri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Tankerler diğer gemi türlerinden farklı olarak yük ve yük atığının depolanması için özel tanklara, sıvı transferi için boru hatlarına, tahliye için ise özel pompa veya türbin sistemlerine sahip gemilerdir. Bu esas nitelikler ve ilişkili ek sistemler elleçlenen sıvının niteliğine göre değişebilmektedir. Dolayısıyla tanker gemileri petrol, kimyasal ve gaz gibi farklı yük grupları için temel olarak üç kategoride sınıflandırılmaktadır.

Petrol tankerleri Uluslararası Gemilerden Kaynaklanan Deniz Kirliliğinin Önlenmesi Konvansiyonu'nun (MARPOL) birinci ekinde tanımlanmış olan ham petrol, petrolün rafine edilen türevleri, yakıt ve yağlı karışımları/atıkları taşımak için dizayn edilmiş gemilerdir (IMO, 2022). Bu grup kendi içerisinde kirli ve temiz olmak üzere ikiye ayrılır. Kirli yük tankerleri "ham petrol" tankerleri olarak da bilinip, ham petrol ve ağır formlardaki petrol türevlerini elleçlemek için inşa edilmiş gemilerdir. Genellikle diğer tanker türlerine göre daha büyük tonajlıdır. Temiz yük tankerleri ise petrolün rafinerilerde damıtılması sonucu içerisinde bulunan, kaynama noktası birbirinden farklı bileşenlerin sırayla ayrıştırılması ile elde edilen ürünleri taşır. Sektörde "ürün" tankeri olarak da adlandırılmakta olup, dizel, benzin, kerosen ve nafta bu tankerlerde taşınan başlıca yükler arasındadır.

Kimyasal tankerler, doğada kendiliğinden oluşan veya endüstrilerde reaksiyon, ayrıştırma, filtreleme gibi işlemler sonucu elde edilen kimyasal sıvıları elleçlemek için dizayn edilen gemilerdir; ancak yenilebilir yağ, meyve suyu, melas gibi gıda maddesi sıvı ürünlerin taşımacılığı için de kullanılmaktadır. MARPOL'ün ikinci eki, dökme halde taşınan zehirli sıvı yüklerle ilgili gereklilikleri açıklarken, bu konuyla ilişkili

olan Dökme Tehlikeli Kimyasalları Taşıyan Gemilerin İnşa ve Ekipmanları Hakkında Uluslararası Kod'un (IBC) on yedinci bölümünde kimyasal tankerlerin taşıyabileceği yükler listelenmektedir. Aseton, benzen, metanol, toluen, sülfürik asit bu yüklere örnek gösterilebilir (IMO, 2020).

Bir diğer kategori olan gaz tankerleri ise sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ve petrol damıtma işleminin ilk aşamalarında karışımdan ayrılan petrol gazının sıvılaştırılmış formlarını (LPG) taşımak için dizayn edilmiş gemilerdir. Bu tanker türü basınçlandırma ve tank sistemlerindeki teknik farklılıklara göre kendi içerisinde ayrıca sınıflandırılabilir.

Avrupa Denizcilik Emniyeti Ajansı (EMSA)'nın Equasis veri tabanınca derlenen 2022 yılı verilerine göre 100 groston ve üzeri toplamda 126.947 ticari gemi bulunurken bunların 16.926 adedini petrol, kimyasal ve sıvılaştırılmış gaz tankerleri oluşturmaktadır (Equasis, 2022). Toplam dünya filosu ise 2023 yılı itibariyle 2.27 milyar deadweight ton (DWT) iken petrol, kimyasal ve sıvılaştırılmış gaz tanker gemilerinin toplam payı bir önceki yıla göre artış göstererek 790.8 milyon DWT olarak kayıtlara geçmiştir (UNCTAD 2022; UNCTAD, 2023).

1.2 Tankerlerde Kaza Risklerinin Değerlendirilmesi Üzerine Literatür İncelemesi

Denizcilik sektöründe kazaların önlenmesi adına çeşitli gemi tiplerinde kazaların ve risklerin analizi için çalışmalar yapılmaktadır. Tüm gemi tiplerinin dahil olduğu çatışma, çatma ve karaya oturma en sık gerçekleşen kazalar arasında olup (EMSA, 2023), bu kazaların tankerlerde gerçekleşmesi halinde ise risklerin artması muhtemeldir. Kazalar neticesinde gerek tanklardaki yükün denize sızabilme ihtimali, gerekse de yangınlık ve patlayıcılık gibi tehlikeli özellikleri sebebiyle diğer gemilerde görülme sıklığı az olabilecek olumsuz durumlar da gerçekleşebilmektedir. Bunun yanında, yangın ve patlama kazaları da tankerlerde meydana gelebilen ve ölümcül olabilen kaza türleridir (Uğurlu, 2016). Bu kazalar, çatışma gibi kazalar ile bağlantılı olabileceği gibi, yükten ve yük ile ilgili operasyonlardan kaynaklanabilecek durumlardan da sıklıkla kaynaklanabilmektedir. Yükleme, tahliye ve özellikle tank temizliği aşamalarında çeşitli hatalı durumlar sebebiyle bu tür kazalar meydana gelebilirken, kazaların sonuçları can, mal ve denizel çevre açısından son derece olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Geçmişte meydana gelen birçok gemi kazasıyla

bağlantılı olarak kazaların önlenmesi adına risk analizinin önemine dair sektörel farkındalık artmış, bu da önleyici emniyet tedbirlerinin alınabilmesinin önünü açmıştır. Literatürde bu amaçla tankerlere odaklanan ve çeşitli kaza risklerini inceleyen akademik çalışmalar yer almaktadır.

Ramos ve Maturana (2012) petrol tankerlerinde çatışma kazalarında insan hatasının etkilerine odaklanmışlardır. Hata Ağacı Analizi (FTA) ile Bayes ağlarını birlikte kullanarak olasılıksal bir risk değerlendirmesi yapmışlardır (Ramos & Maturana, 2012). Goerlandt ve Montewka (2015) denizcilikte karar destek sistemlerinde önemli bir araç olarak alınabilecek bir risk analizi çalışması yapmışlardır. Uygulama kısmında tanker gemilerinde görülen çatışma kazaları sonucunda meydana gelen petrol kirliliği riski ele alınmış ve risklerin kantitatif hale getirilmesinde Bayes ağları yönteminden faydalanmışlardır (Goerlandt & Montewka, 2015). Zhou ve Thai (2016) tanker gemilerinde ana makine ekipman arızalarının tahmini için en yaygın kullanılan ve önemli yöntemlerden biri olan Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemini kullanmışlardır. Hata türlerinin önceliklendirilmesinde ise Gri İlişkisel Analiz (GRA) ve bulanık mantık yöntemlerinin karşılaştırmasını yapmışlardır (Zhou & Thai, 2016). Hsu ve diğerleri (2017) petrol tankerlerinde operasyonel emniyeti artırmak için bir risk değerlendirmesi çalışması yapmışlardır. Operasyonel emniyeti etkileyen risk faktörleri belirlenmiş ve bulanık ortamda Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) kullanılarak ağırlıklandırmaları yapılmıştır. Çeşitli risk faktörleri, insan faktörü, makine sistemlerinin kondisyonu, geminin yönetimi ve organizasyonel yönetim ana grupları altında sıralanmıştır. Analiz sonuçlarına bağlı olarak geleneksel risk matrisini revize etmişlerdir (Hsu vd., 2017). Ung (2018) ise petrol tankerlerinde meydana gelen karaya oturma kazalarını insan faktörü açısından incelemiştir. Yeterli deniz tecrübesine sahip uzmanların petrol tankerlerinin seyri konusundaki görüşlerinden faydalanmış ve Kavramsal Güvenilirlik ve Hata Analiz Yöntemini (CREAM) FTA çerçevesinde uygulamıştır. Uygulama sonucunda kazaya sebep olan en yüksek insan hata olasılık değerlerinin yorgunluk ve Denizde Çatışmayı Önleme Tüzüğü (COLREG) kurallarının ihlali olduğu anlaşılmıştır (Ung, 2018). Zhou ve diğerleri (2019), çalışmalarında uluslararası bir tanker işletme firmasından aldıkları ramak kala olay verilerini kullanarak için bir risk tahminlemesini yapmışlar, yöntem seçiminde Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemine (ANFIS) başvurmuşlardır. Tankerin demirde, limanda, açık denizde, nehir geçişinde vb. seyir zamanlarında

gerçekleşen ve kargo hasarı, çatışma, karaya oturma, patlama, kirlilik vb. gibi tehlikelere yol açma potansiyeli olan ramak kala olayları değerlendirmiş ve risk azaltıcı önlemler sunmuşlardır (Zhou vd., 2019) Arıcı ve diğerleri (2020) tankerlerde önemli bir operasyon olan gemiden gemiye yük transferi esnasında meydana gelebilecek çatışma kazalarıyla ilgili bir risk çalışması gerçekleştirmişlerdir. Papyon yöntemi ile FTA ve Olay Ağacı Analizi (ETA) aşamaları incelenmiş ve yararlandıkları uzman görüşlerinin belirsizliklerini gidermek için bulanık mantıktan yararlanmışlardır. Analiz sonuçlarına göre, manevra planına uymamak, tankerler arası çekim kuvvetine karşı gerekli önlemlerin alınmaması ve bir tankerin diğerini geçmesi durumunun uygun bir biçimde izlenmemesi, bu operasyon esnasında çatışmaya sebep olabilecek başlıca etmenler olarak bulunmuştur (Arici vd., 2020). Li ve Liu (2022) iç sularda kanal geçişi yapacak petrol tankerleri için bir risk değerlendirmesi yapmışlardır. Çalışmada, kanaldan emniyetli geçiş ve sonrasında nehirlerde emniyetli seyrin yapılabilmesi için çatışma-sızıntı-patlama üçlüsü problem olarak ele alınmıştır. Yöntem olarak Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) ve Koruma Katmanı Analizi (LOPA) seçilerek analiz gerçekleştirilmiştir (Li & Liu, 2022).

Tanker gemilerinde yük operasyonları esnasında meydana gelebilecek kazaları analiz eden ve literatüre önemli katkı sağlayan çalışmalar ise şu şekilde sıralanabilir: Arslan (2009), AHP yöntemini kullanarak kimyasal tankerlerde kargo operasyonları öncesinde ve sonrasında alınabilecek önlemleri önceliklendirmiştir (Arslan, 2009). Uğurlu (2016), 1999 ve 2013 yılları arasında tehlikeli yük taşıyan tankerlerde meydana gelen kazalara ilişkin bir inceleme yapmıştır. Kaza türü olarak yangın ve patlama kazasına odaklanmış ve bunların kök sebeplerini analiz etmiştir. FTA ve Bulanık AHP yöntemlerini kullanmış, en önemli kaza sebeplerinin sıcak çalışma, elektrik arkları, statik elektrik ve kargo tankı içerisinde patlayıcı gazların birikimi olduğu sonucuna ulaşmıştır (Uğurlu, 2016). Benzer bir biçimde, Ahn ve arkadaşları (2021), tankerlerde yangın ve patlama kazalarına sebep olabilecek nedenleri analiz etmişlerdir. 4M yaklaşımı çerçevesinde bu nedenleri uzman görüşleri de alındıktan sonra gruplandırmış ve sayısallaştırma aşamasını FTA çatısı altında gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarını Uğurlu'nun (2016) bulgularıyla karşılaştırmışlar ve bir paralellik olduğu, yani yangın ve patlamaya sebep olan birincil faktörün tank içi atmosferin emniyetsiz kondisyonu olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Ahn vd., 2021). Khan ve diğerleri (2021) ise tehlikeli bir kargo ile yüklü tanker gemisinin liman yanaşma

operasyonuna dair bir risk değerlendirmesi yapmışlardır. Literatür ve kaza verileri incelenerek uzman görüşlerinden destek alınmıştır. Sonrasında Bayes ağları ile birlikte lojistik regresyon yöntemleri kullanılarak kazaya neden olabilecek faktörler (insan faktörü, gemi faktörü, çevresel faktörler, tehlikeli yük) nedensellik ilişkisi içinde değerlendirilmiştir (Khan vd., 2021). Akyüz ve Çelik (2015) AHP yöntemi ile İnsan Hata Değerlendirmesi ve Azaltma Tekniği (HEART) yöntemini entegre ederek kimyasal tankerlerde tank temizliği operasyonunu insan güvenilirliği açısından değerlendirmişlerdir. En yüksek insan hata olasılığının, statik elektriğin kontrolü alt aşaması ve inertlenmemiş tankların içerisine yıkama sularının yüksek mesafeden girişi alt aşamasından kaynaklandığı sonucuna ulaşmışlardır (Akyüz & Çelik, 2015). Bir diğer çalışmada, Akyüz (2015), petrol tankerlerinde gazdan arındırma prosesi esnasında insan hata olasılığını hesaplamıştır. Yöntem olarak kullandığı CREAM ile birlikte, bu işlem esnasındaki en kritik hataların hazırlık aşamasındayken gerçekleştiği sonucuna ulaşmış ve risk azaltıcı önlemler önermiştir. Çalışmada, söz konusu gemi tipindeki emniyet seviyesini artırabilmek için uygun bir yönetim aracı oluşturmak hedeflenmiştir (Akyüz, 2015). Akyüz ve Çelik (2016), bir kimyasal tankerde yükleme operasyonu esnasındaki insan güvenilirliği konusuna da odaklanmışlardır. Yöntem olarak AHP ve HEART uygulanmış ve yükleme öncesi, yükleme esnası ve yükleme sonrasını toplamda altı aşamaya ayırarak süreci detaylı bir biçimde ele almışlardır (Akyüz & Çelik, 2016). Zhang vd. (2022) petrol tankerinde tahliye operasyonunda insan hatalarının önlenebilmesi için bir çalışma yürütmüşlerdir. İnsan hatalarını etkileyen ve performans şekillendirici faktörler (PSF) olarak bilinen unsurların tanımlanması için bir yöntem önermişlerdir. Hiyerarşik Görev Analizi (HTA) atısı oluşturarak insan hatalarının önlenmesinde önemli olan PSF'lere ulaşmışlar; PSF'lerde gördükleri eksiklik ve belirsizlikleri de giderebilmek için GRA yöntemini kullanmışlardır (Zhang vd., 2022). Arslan ve arkadaşları (2017) tanker terminallerinde gemilerin yükleme ve tahliye işlemleri esnasında meydana gelen kazaları insan faktörü ve emniyet gereklilikleri bakımından sınıflandırmışlardır. IMO'nun Küresel Bütünleşik Deniz Taşımacılığı Bilgi Sistemi (GISIS), ve İngiltere Deniz Kazalarını Soruştırma şubesi'nden (MAIB) aldıkları 10 adet gemi kazasını sonuçlarına göre sınıflandırmışlardır. Kazaya sebep olan durumları FTA yöntemini kullanarak değerlendirmişler ve sonuçları Monte Carlo Simülasyonu ile doğrulamışlardır. Prosedürlere uymamak ve bilgi eksikliği en kritik kaza sebepleri olarak bulunmuştur (Arslan vd., 2017). Aydın ve arkadaşları ise 2021 yılında yaptıkları bir çalışmada bir

petrol/kimyasal tankerinde sızıntı kaynaklı kirliliğe sebep olabilecek faktörleri bulanık FTA ve CREAM yöntemlerini kullanarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada teknik hatalara ek olarak insan hataları da dikkate alınmış ve kaza riskini artıran en önemli faktörlerin yetersiz kontrol ve koordinasyon, yükün özelliklerine aşına olunmaması ve yük devrelerinin yanlış ayarlanması olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Aydın vd., 2021a). Bir diğer çalışmalarında bir kimyasal tankerde gazdan arındırma operasyonu esnasında boğulma riski üzerine olasılıksal bir analiz yapmışlardır. Bayes ağları ile neden-sonuç ilişkilerini analiz ederken, bulanık mantık ile de başvurdukları uzman görüşlerinin sayısallaştırılması işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Boğulmaya sebep olabilecek kök düğümler arasında en kritik olanların oksijen sensörünün yerleşimi, pörç ve gazdan arındırma işlemleri için havalandırma sistemlerinin ayarlanması, nitrojen operasyonu ile ilgili alanlardaki uyarılar ve oksijen analiz ekipmanının kalibrasyonu olduğu anlaşılmıştır (Aydın vd., 2021b). Elidolu ve arkadaşları (2022) tanker kargo operasyonları esnasında statik elektrik sebebiyle meydana gelebilecek patlama ve yangın kazalarına odaklanmışlardır. Papyon diyagramı içerisinde operasyonel ve teknik hataları bulanık FTA ile, insan temelli hataları CREAM yöntemi ile ve kazadan sonraki olayları da bulanık ETA yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmanın önemli bulguları olarak kazalara sebep olabilecek faktörler, tank içi atmosfer takibinin yetersizliği, yüklere dair emniyet bilgilerinin yeterince bilinmemesi, prosedürlere uyulmaması, aleç ve numune alım ekipmanlarının güvenli elektriksel bağlantılarının yapılmaması hatalarıdır (Elidolu vd., 2022).

1.3 Tankerlerde Emniyet ile İlgili Uluslararası Düzenlemeler

Tanker gemilerinde iş ve personel emniyetinin sağlanabilmesi ve denizel çevrenin korunabilmesi için tasarlanmış çeşitli uluslararası kurallar bulunmaktadır. Bu düzenlemeler, başta IMO olmak üzere farklı uluslararası kuruluşlar tarafından oluşturulmuş olup, kurallardaki minimum gerekliliklerin gemiler tarafından karşılanması beklenmektedir.

Gemilerin neden olduğu çevresel risklere karşı yürürlükte olan MARPOL, petrol sızıntıları, tehlikeli maddeler ve gemi bünyesinde oluşmuş atıkların boşaltımından kaynaklanan deniz kirliliğinin önlenmesini amaçlamaktadır. 20.yüzyılın ortalarından itibaren petrol ve türevi maddelere olan ihtiyacın küresel çapta artmasından ötürü tanker gemi sayılarında da artışlar meydana gelmiş, gemi kaynaklı kirlilikler büyük

ölçüde kontrol edilememeye başlanmıştır. Ayrıca Torrey Canyon (1967) ve Amoco Cadiz (1978) gibi büyük çaplı tanker kazaları neticesinde deniz ortamı oldukça büyük kirliliklere maruz kalmıştır. Bu durumlara bağlı olarak MARPOL artan çevresel tehditleri ele almak için IMO tarafından hazırlanan en önemli uluslararası düzenlemelerden biri olarak kabul edilmektedir. Zaman içerisinde meydana gelen Exxon Valdez (1989) ve Erika (1999) gibi diğer büyük gemi kazaları sonucunda da sözleşme emniyetin artırılmasını hedefleyen yeni eklentiler ile gelişim göstermiştir. Bu doğrultuda MARPOL hem kazara hem de operasyonel olarak gemilerden kaynaklanan kirliliği önlemek veya en aza indirmek, dolayısıyla denizcilik sektörünün çevresel olarak sürdürülebilir bir şekilde çalışmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

MARPOL toplamda altı kısma ayrılmıştır ve petrol sızıntısı, kimyasal deşarjlar, paketli formda taşınan tehlikeli maddeler, gemide oluşmuş çöpler, gri ve siyah sular ve gemi kaynaklı oluşan emisyonlar gibi her türlü kirliliğin bertaraf yöntemlerine dair gereklilikler sunmuştur (IMO, 2022). Bunlar içerisinde tezin bir önceki alt bölümünde bahsi geçmiş olan birinci ve ikinci ekler, tanker gemilerinin yük işlemleri ile doğrudan ilgilidir. Birinci ekte petrol ve türevlerinin sebep olduğu kirliliğin kontrol altına alınması için getirilen çift cidar yapıları, ayrıştırılmış balast tank düzeni, ham petrol yıkama sistemi, petrol tahliyesi izleme ve takip sistemi (ODME), yağ kayıt defteri ve gemi kaynaklı kirlilikte acil durum planı (SOPEP) gibi kuralları açıklamaktadır. Öte yandan ikinci ek, tankerlerde taşınan zehirli sıvıların neden olduğu kirliliğe odaklanmaktadır ve bu yükler çevreye vereceği zarar potansiyeline göre kategorilere ayrılmıştır. Her bir yük kategorisi, tahliye esnasında ön yıkama zorunluluğu, kıyıya olan mesafe, bölgenin derinliği, gemi hızı gibi farklı minimum gerekliliklere sahiptir. Ek ayrıca tankerlerin sahip olması gereken yapısal ve teknik sistemleri özetlemektedir (IMO, 2022).

Tankerler için bir diğer temel sözleşme olan Denizde Can Emniyeti Sözleşmesi (SOLAS), esasında tüm gemiler için zorunlu olan ve denizde emniyet ile ilgili en önemli uluslararası kuraldır. Titanic (1912) kazasından kısa bir süre sonra ilk versiyonu yürürlüğe girmiş, zamanla diğer risklerin fark edilmesi ve emniyet ihtiyaçlarının artması ile güncellenerek konsolide bir hale getirilmiştir. SOLAS toplamda on beş bölümden oluşmakta olup, gemilerde yangın tespiti ve mücadele sistemleri, can kurtarma teçhizatları, telsiz haberleşmesi, seyir emniyeti, kargo emniyeti, tehlikeli yüklerin taşınması, nükleer gemiler, emniyetli yönetim sistemi ve

diğer konularda minimum emniyet gerekliliklerini belirler. Bunlar arasında yedinci bölümde yer alan tehlikeli maddelerin taşınması ile ilgili kurallar, sıvı tehlikeli maddeler için ayrıca IBC kod bünyesinde detaylandırılmıştır. IBC kod, söz konusu yüklerin taşınacağı tankerlerin karşılaması gereken tank yapısı, havalandırma gereksinimi, numune alım yöntemi, yıkama suyu tahliye sistemi ve benzeri yapısal, teknik ve emniyet sistemlerinde minimum standartları belirler. Tankerler bu kod içerisinde belirtilen yüklerin tabi olduğu kurallara göre yük operasyonları yapmakla yükümlüdür. Bunun yanında dokuzuncu bölüme göre gemilerin Uluslararası Emniyetli Yönetim (ISM) Kodu gerekliliklerine uygun bir biçimde işletilmesi gerekmektedir. Koda göre sistemli bir şekilde gemi genelinde risklerin değerlendirilmesi ve gerekli risk azaltıcı faaliyetleri yürütülmesi esastır. Özellikle tanker gemilerinde potansiyel tehlikeler karşısında bu kurallar ile uyumluluğun sağlanması gerekmektedir. Nitekim sektörel sürekliliğin sağlanabilmesi doğrudan gemilerin emniyetli bir biçimde işletilebilmesine bağlıdır.

1.4 Tezin Amacı ve Araştırma Konusu

Tanker gemileri ile ilgili çeşitli uluslararası düzenlemeler olmasına rağmen gemilerde yaşanan kazaların önüne tam anlamıyla geçilememektedir. Buna sebep olan temel durum gemilerin pratikte kurallar ile tam uyumlu bir biçimde işletilememesi, diğer bir deyişle, operasyonel süreçlerin emniyetli bir şekilde yürütülememesidir. Bu süreçler temel olarak seyir, manevra, makinenin yürütülmesi ve kargo operasyonlarını kapsayan ve çok fazla değişken tarafından etkilenen süreçlerdir. Mesleğin dinamiklerinden dolayı risklerin her bir operasyonun yapıldığı zamana, operasyonu yürüten personele, çevresel koşullara ve kontrol edilemeyen gemi/şirket dışı faktörlere göre değişebileceği anlaşılır bir durumdur. Bu çeşitliliğe rağmen operasyonel süreçlerde sadece kazalar neticesinde anlaşılan tehlikeler değil, potansiyel tehlikelerin de dikkate alınarak risklerin değerlendirilmesi, birçok kazanın engellenmesinde kilit rol oynayabilmektedir. Bu doğrultuda, bu tez çalışmasında tanker gemilerinin kargo operasyonları bölümündeki risklere odaklanılmıştır. Her bir operasyonun risk seviyesinin yükün türüne göre değişeceği anlayışı ile, özel gereksinimler gerektiren bir yük çeşidi seçilmiştir. İnhibitör ile elleçlenen ve son derece tehlikeli karakteristiğe sahip bir kimyasal olan stiren monomer yükü için operasyonel bir risk değerlendirmesi yapılmıştır.

1.4.1 Tezin organizasyonel yapısı

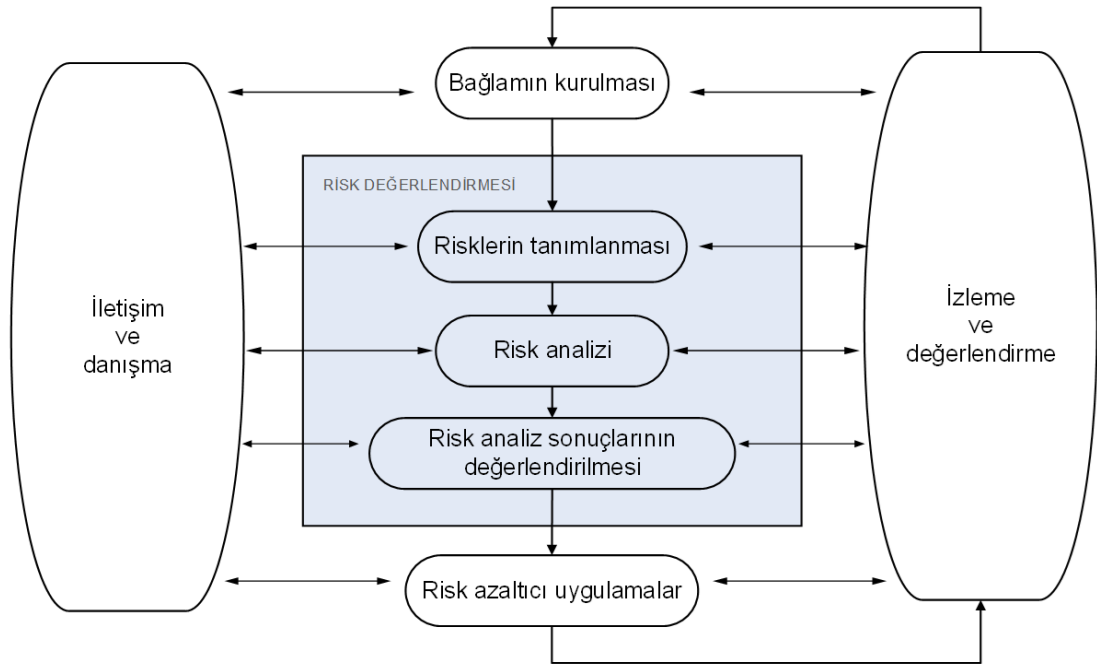
Tez çalışmasının birinci bölümünde denizcilikte sıvı yük taşımacılığından başlayarak tanker gemilerinde meydana gelen kazalara, literatürde bu gemi türünün dahil edildiği çeşitli risk analizi ve değerlendirmesi çalışmalarına ve tankerlerde emniyetin sağlanması için uygulanmakta olan uluslararası standartlara değinilmiştir. Tezin ikinci bölümünde tüm aşamaları ile risk değerlendirmesi ve risk değerlendirme yöntemleri üzerine bir inceleme yapılmıştır. Üçüncü bölümde ise tezin odaklandığı konu olan tankerlerde gerçekleştirilen özel gereksinimli yük operasyonları açıklanmıştır. Dördüncü bölümde özel gereksinimli ve kritik bir yük operasyonuna dair bir risk değerlendirmesi yapabilmek için uygulanacak risk analiz yöntemleri sunulmuştur. Beşinci bölüm yöntemin konuya uygulandığı risk analizi aşamasını içerirken, altıncı bölümde bulgular değerlendirilmiş ve uygun risk kontrol seçenekleri değerlendirilmiştir. Yedinci bölüm tezin sonuç bölümüdür.

2. RİSK DEĞERLENDİRME SÜRECİ

2.1 Risk Değerlendirmesi ve Risk Yönetim Sürecindeki Rolü

Risk değerlendirmesi çalışma ortamlarında, sistemlerde veya süreçlerde risklerin tanımlanması, analizi ve analiz sonuçlarının değerlendirilmesi aşamalarını kapsayan, risklere dair neden, sonuç ve olasılık ilişkilerinin kullanıcılar tarafından anlaşılmasına destek olan bir ön hazırlık çalışmasıdır.

Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) risk yönetim sürecinde risk değerlendirmesinin oldukça önemli bir role sahip olduğunu ifade etmektedir. Şekil 2.1’de işaret edildiği üzere risk değerlendirmesinin sistem emniyetinin sürdürülebilmesi için bağımsız bir çalışma olarak düşünülmemesi gerekir. Nitekim bu aşama risk yönetim sürecindeki iletişim ve danışma, izleme-değerlendirme ve risk azaltıcı uygulamaların geliştirilmesi basamaklarının da temelini oluşturan son derece kritik bir aşamadır (ISO, 2018).



Şekil 2.1 Risk yönetim sürecinde risk değerlendirmesinin rolü (ISO, 2018).

Risk değerlendirmesine göre risklerin sistem veya süreç üzerindeki olumsuz etkileri önceliklendirilebilir, böylece yüksek öncelikli risklerin azaltılabilmesi için aksiyon alınabilir. Bu doğrultuda sistemde hali hazırda kontroller ve önlemler mevcut ise bunların yeterliği sorgulanabilirken, riskleri kabul edilebilir bir düzeye indirmek için izlenecek yeni stratejilerde kullanıcıların karar alabilmesi kolaylaşmaktadır.

2.1.1 Risklerin tanımlanması

Risk değerlendirmesi yapılacak çalışma ortamında, sistemde veya süreçte öncelikle risklerin belirlenmiş olması gerekmektedir. Tüm değerlendirme sürecinde adeta kilit niteliğindeki bu aşamanın güvenilir bir biçimde gerçekleştirilmesi için kullanıcılar tarafından ilk etapta bağlamın ve kapsamın belirlenmesi gerekir (ISO, 2018). Bu sayede odaklanılan konu için doğru risklerin tanımlanması sağlanır. Risklerin tanımlanması aşaması bir sistem ve bileşenleri üzerinde tehlike oluşturabilecek durumlara ek olarak, kullanıcıların can emniyeti ve finansal profili üzerinde olumsuz etki yaratacak tehlikeleri de kapsayabilir. Ayrıca negatif çevresel etki yaratabilecek durumlar da dahil edilerek kapsamlı bir risk değerlendirmesi gerçekleştirilebilir.

2.1.2 Risk analizi

Risk analizi temel olarak risklerin doğasını anlamak ve risklerin seviyesini belirlemek için yapılan bir uygulamadır. Bu aşamada bir çalışma ortamı, sistem veya faaliyet için tanımlanmiş risklerin olasılık ve sonuç parametreleri ele alınmaktadır. Kalitatif (nitel) yaklaşımlar ile risk parametrelerinin düşük, orta, yüksek gibi sınıflandırmaları yapılabilirken, parametrelere sayısal değerler atandığında veya sisteme dair tarihsel veriler mevcut olduğunda kantitatif (nicel) yöntemlerden yararlanılarak riskler analiz edilebilmektedir. Literatürde analiz konusunda uygulanan yöntemlere Bölüm 2.2’de yer verilecektir.

2.1.3 Risk analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Risklerin uygun yöntemler ile analiz edilmesinin ardından sonuçların belli kriterlere göre değerlendirildiği bu aşama kullanıcıların karar alabilmesine olanak sağlar. Risk seviyesi doğal olarak farklı sistemlere göre değişkenlik gösterse de genellikle bir analiz sonucunda düşük, orta, yüksek ve çok yüksek (kritik) olarak dört seviye ile sınıflandırılabilir (ABS, 2020). Düşük seviyedeki risklerin gerçekleşme beklentisi nispeten daha az olduğu için acil müdahale gerektirmeyebilir. Düşük ve orta

seviyedeki riskler için alınacak önlemlerde sıklığın düşürülmesi üzerine yoğunlaşarak bu risklerin azaltılması sağlanabilmektedir. Yüksek ve çok yüksek kategorilerdeki riskler ise sistem, kullanıcılar veya çevre için önemli derecede tehdit oluşturduğundan bunlara karşı ivedi önlem alınması beklenir. Ancak petrol arama ve çıkarma, tehlikeli madde prosesleri, nükleer enerji endüstrisi ve benzeri alanlarda durum farklılaşabilir. Literatürde yüksek risk teşkil eden durumlar için “makul bir biçimde uygulanabilir en düşük seviye (ALARP) kavramı dikkat çekmektedir. ALARP, azaltılması için olabildiğince önlem alınan ancak herhangi bir ek maddi harcama ve çaba ile risklerin daha fazla azaltılamayacağını açıklayan bir risk değerlendirmesi yaklaşımıdır (ABS, 2020; ISO, 2018). Yapılan işin getirdiği faydalar karşısında risk azaltıcı önlemler için yapılacak harcamaların (para ve zaman) karşılaştırılarak orantısız uğraşlar gösterilmemesi gerektiğini ifade eder. Yüksek riskli endüstriler için ortaya çıkmış bir fikir olsa da farklı alanlarda risk azaltıcı uygulamaların ALARP mantığı ile uyumlu planlanması güvenli ve makul bir yaklaşım olacaktır. Nitekim önemli olan risklerin sistem üzerindeki etkilerinin kullanıcılar tarafından rasyonel bir biçimde ele alınması ve risk düzeyinin kabul edilebilir olmasıdır.

2.2 Risk Değerlendirme Yöntemlerinin İncelenmesi

Risk değerlendirme yöntemleri bir çalışma ortamını, projeyi veya sistemi etkileyebilecek potansiyel tehlikeleri belirlemek, analiz etmek ve azaltmak için kullanılan temel araçlardır. Bu yöntemler risklerin sistematik olarak belirlenmesine ve kazaların veya istenmeyen durumların olasılık, etki ve sonuçlarının anlaşılmasına yardımcı olur.

Risk değerlendirmesinin her bir aşamasında farklı yöntemsel yaklaşımlar izlenebilir. İlk aşama olan risklerin tanımlanması için öncelikle sistem genel hatlarıyla ele alınmalıdır. Burada kullanıcıların Başlangıç Tehlike Analizi (PHA), kontrol listesi (check-list), röportaj tekniği, beyin fırtınası oturumları, Yapılandırılmış “olursa ne olur?” Tekniği (SWIFT) gibi yaklaşımlara yönelmeleri uygun bir başlangıç olacaktır (IEC & ISO, 2019; Lyon vd., 2020; Signoret & Leroy, 2021). Ek olarak Delfi tekniği ile uzman kişilere anketler yapılarak görüşlerinin alınması ve ortak yargılarının belirlenmesi gibi uygulamalar ile riskli durumların olabildiğince gözden kaçmadan, detaylı bir şekilde tanımlanması sağlanabilmektedir. Söz konusu risk tanımlama

yöntemleri denizcilik, kimya, eğitim, sağlık gibi birçok endüstriye ve konuya kolaylıkla uyarlanabilmektedir (Bolbot vd., 2020; Chowdhury vd., 2022; Shi vd., 2020; Willey vd., 2020).

Analiz aşamasına gelindiğinde risklerin temelde olasılık ve sonuç yönleri ele alınır. Risk kavramının genellikle olasılık ve sonucun bir çarpımı olarak değerlendirilmesi sebebiyle bu konuda ilk önerilebilecek yöntemlerden biri Hata Türü ve Etkileri Analizi'dir (FMEA). FMEA, bir sistemde veya operasyonel bir süreçte karşılaşılabilecek hata türlerini, etkilerini ve sonuçlarını ele almaktadır (Liu vd., 2024). Kritiklik (C) boyutunun dahil edilmesiyle yöntem literatürde FMECA olarak bilinmektedir, bu haliyle de son yıllarda birçok alanda kullanılan popüler metotlardan biri haline gelmiştir. Risk değerlendirmesinin tüm aşamaları için kullanışlı olabilecek teknikler arasındadır. Sistemdeki hatalar tanımlandıktan sonra kullanıcıların hatanın meydana gelme, şiddet ve tespit edilebilirlik boyutlarını birlikte hesaba katarak riskleri analiz etmelerine olanak sağlar (Elidolu vd., 2023; Di Nario vd., 2022; Zhou vd., 2024).

Risk değerlendirmesinde kullanılan önemli yöntemlerden bir diğeri Papyon Analizi (Bow-tie) yöntemidir. Yöntem bir sistemde veya operasyonda istenmeyen bir durumu veya kazayı merkez (tepe olayı) olarak kabul eder. Grafikselleştirme yöntemi için oldukça önemlidir, nitekim olaylar papyon şekline benzeyen ve belirli bir yöne doğru ilerleyen bir akış ile ifade edilmektedir. Sistem için tehlike arz eden durumlar belirlendikten sonra, mevcutsa bunlar için bariyer uygulamaları ile birlikte merkezin solunda sıralanır. Bu kısım istenmeyen olay gerçekleşmeden önce meydana gelen olayları veya katkı sağlayan faktörleri temsil eder. Tepe olayın gerçekleşmesi halinde doğabilecek sonuçlar ise merkezin sağ kısmında sıralanır. Benzer biçimde, sonuç olayların önlenmesi için azaltıcı önlemler de mevcut ise akışa dahil edilir (Sheehan vd., 2021). Genel itibarıyla Papyon Analizi yöntemi kullanıcıların anlaşılır ve kapsamlı bir risk değerlendirmesi yapabilmelerine yardımcı olur. Literatürde bu yöntemin Hata Ağacı Analizi (FTA) ve Olay Ağacı Analizi (ETA) yöntemleriyle entegre edildiği, kazaların öncesi ve sonrasına dair detaylı incelemeler sunan çalışmalar mevcuttur (Akyuz vd., 2020; Ferdous vd., 2013; Lu vd., 2015).

Koruma Katmanı (Bariyer) Analizi (LOPA) bir sistemdeki veya süreçteki risklerin anlaşılmasına ve analizine olanak sağlayan bir diğer tekniktir (Lilli vd., 2024; Park vd., 2021). Tehlikeli senaryoların gerçekleşmesini önlemek için sistemde mevcut

bariyer aşamaların etkinliği analiz edilir. Her bir katmanın güvenilirlik seviyesinin farklı olabileceği dikkate alınır, ancak riskin kabul edilebilir bir seviyede olması için en azından bir katmanın kesinlikle başarılı bir koruma sağlaması hedeflenir. Analiz sonucunda yeterli bir koruma sağlanmadığı tespit edilirse sistemi güçlendirmek için önleyici uygulamalar artırılabilir.

Risklerin değerlendirilmesinde bir diğer önemli yaklaşım da insan hatalarının analiz edilmesidir. Bu yaklaşım literatürde İnsan Güvenilirliği Analizi (HRA) olarak bilinir. Genel olarak operatörlerin ve diğer çalışanların sistem performansına olan etkileri incelenip, insan hatalarının olasılık değerleri hesaplanmaya çalışılır (Zarei vd., 2021). İnsan Hatası Değerlendirme ve Azaltma Tekniği (HEART), Başarı Olasılığı Endeksi Yöntemi (SLIM), Standardize Tesis Analizi Riski - İnsan Güvenilirliği Analizi (SPAR-H), İnsan Faktörü Analizi ve Sınıflandırma Sistemi (HFACS), Kavramsal Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi (CREAM) gibi farklı yöntemler ile çeşitli sektörlerde uygulamaları bulunmaktadır, ancak denizcilik alanında da HRA uygulamaları oldukça önemli bir gelişim göstermiştir (Abhrishami vd., 2020; Ahn vd., 2022; Akyuz & Çelik, 2015; Wu vd., 2022).

Çok Kriterli Karar Verme Analizleri (MCDA) bir problem karşısında seçim yapmaya ve karar vermeye bilimsel yollardan destek olan yaklaşımlar bütünüdür (Wang vd., 2023). Risk değerlendirmesi uygulamaları da MCDA süreçlerine benzer bir şekilde işleyebilmektedir. Tehlike arz eden çeşitli faktörler birlikte ele alınıp birbirlerine göre önem sıraları belirlenebilir, buna bağlı olarak seçimler yapılarak en ideal emniyet önlemleri uygulamaya alınır. Literatürde risk analiz yöntemlerinin eksikliklerinin giderilebilmesi ve sonuçların güvenilirliğini desteklemesi sebebiyle bu yöntemlerden sıklıkla yararlanılmaktadır (Abdel-Basset & Mohamed, 2020; İlbarar vd., 2022).

Olasılıksal değerlendirmeye odaklanan ve istatistiki verileri ele alan konularda Bayes İstatistiği veya Bayes İnanç Ağları (BBN) yöntemi ön plana çıkmaktadır. Yöntem değişkenlerin birbiriyle ve sonuçlarla olan neden-sonuç ilişkilerini dikkate alır, birbirlerine göre koşullu olasılıklarını değerlendirir (Zhang vd., 2024). Risklerin tanımlanması ve ön olasılık değerlerinin belirlenmesi konusunda bir katkısı yoktur, ancak bu aşamalar tamamlandıktan sonra her bir risk faktörünün sonuç üzerindeki etkilerini ve sonuç olasılığının hesaplanması konusunda yardımcı olabilmektedir. Ayrıca sonuçların yorumlanabilmesine de imkan sağlar, bu sayede sistem için uygun risk azaltıcı önlemler değerlendirilebilmektedir.

İlk olarak havacılık endüstrisinde ortaya çıkan ve gelişmekte olan bakım yaklaşımları da sistemlerde ve ekipmanlarda risklerin önlenmesini amaçlayan önemli yaklaşımlardan biridir. İlk etapta arıza meydana geldikten sonra yapılan düzeltici bakım bir anlayışla başlamış, zaman içerisinde önleyici bir zihniyet ile planlı bakıma yönelmiş bir yaklaşımdır. Son yıllarda ise kondisyon merkezli (CBM) ve güvenilirlik merkezli bakım (RCM) ile daha öngörülü bir anlayış izlenerek sistemlerin korunması hedeflenmektedir. Askeri, nükleer, otomotiv endüstrileri gibi denizcilik alanında da söz konusu bakım uygulamaları ile riskler kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır (Geisbush & Ariaratnam, 2023; Karatuğ, 2023).

Çizelge 2.1 risk değerlendirme süreçlerinde kullanılmakta olan yöntemleri içermektedir. Her bir yöntemin farklı süreçlerde uygulanabilme yetenekleri kısaltmalar ile ifade edilmiştir (IEC & ISO, 2019).

Çizelge 2.1 Risk değerlendirme tekniklerinin uygulanabilirliği (IEC & ISO, 2019).

Risk Değerlendirme Teknikleri	Risk Değerlendirme Süreçleri				
	Risk Tanımlaması	Risk Analizi			Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi
		Sonuç	Olasılık	Risk Seviyesi	
ALARP	-	-	-	-	YU
Papyon Analizi	U	YU	U	U	U
Değişim Analizi	U	-	-	-	U*
Kontrol Listesi Analizi	YU	-	-	-	-
Delphi Yöntemi	YU	-	-	-	-
Başlangıç Tehlike Analizi	YU	-	-	-	-
ETA	-	YU	U	U	U
BBN	-	YU	-	-	YU
FTA	U	-	YU	U	U
Patlama Tehlikesi Analizi	-	U	U	U	U*
FMEA	YU	YU	-	-	-
FMECA	YU	YU	YU	YU	YU
Yangın Tehlikesi Analizi	-	U	U	U	U*
FSA	U	U	U	U	U
Gaz Dağılım Analizi	-	U	U	U	U*
HAZID	U	U	U*	U*	U*
HAZOP	YU	U	U*	U*	U*
HRA	YU	YU	YU	YU	U
Karar Ağacı Analizi	-	YU	YU	U	U

YU: Yüksek Uygulanabilirlik U: Uygulanabilir U: Belli koşullarda uygulanabilir -: Uyumlu değil*

Çizelge 2.1 (Devamı) Risk değerlendirme tekniklerinin uygulanabilirliği (IEC & ISO, 2019).

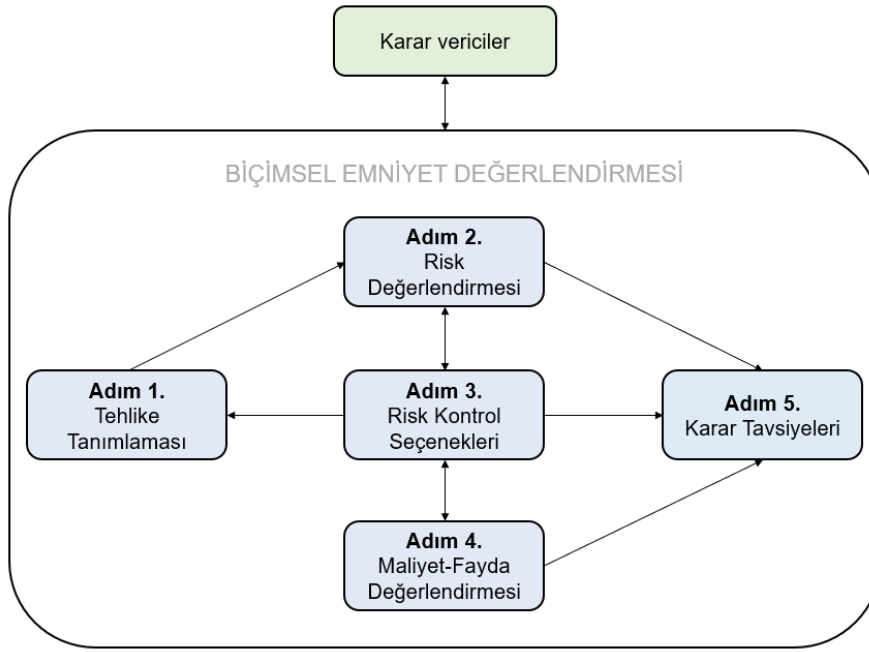
Risk Değerlendirme Teknikleri	Risk Değerlendirme Süreçleri				
	Risk Tanımlaması	Risk Analizi			Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi
		Sonuç	Olasılık	Risk Seviyesi	
LOPA	U	YU	U	U	U*
PRA	U	U	U	U	U
Markov Analizi	U	YU	-	-	-
MCDA	U	YU	U	YU	U
Monte Carlo Simülasyonu	-	-	-	-	YU
RCA	-	YU	YU	YU	YU
RCM	U	U	U	U	YU
SILA	-	U	U	U	U
What-If Analizi	YU	YU	U	U	U

YU: Yüksek Uygulanabilirlik U: Uygulanabilir U: Belli koşullarda uygulanabilir -: Uyumlu değil*

2.3 Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün Risk Değerlendirmesine Yaklaşımı

Denizcilikle ilgili konularda en yetkili kural koyucu mekanizma olan IMO emniyet ve çevrenin korunması için yürütülen faaliyetleri sürdürülebilir hale getirmek için risk konusunda da kapsamlı çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmaların bir çıktısı olarak denizcilik endüstrisine sunulan Biçimsel Emniyet Değerlendirmesi (FSA), risk değerlendirmesinin önemini ve ne şekilde uygulanabileceğine dair ipuçları sunmaktadır.

IMO'nun getirdiği kuralları destekler biçimde FSA da temel olarak denizde can, mal ve çevrenin korunmasını amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda risk analizi ve maliyet-fayda değerlendirmesi tekniklerini bir araya toplayan sistematik bir metodoloji olarak düşünülebilir. Denizcilik şirketlerinin sektördeki yeni kural veya düzenlemeler karşısında teknik, operasyonel, insan faktörü ve diğer açılardan uygunluklarının değerlendirilmesinde destekleyici olabilmektedir. Denizcilik faaliyetlerinin faydaları ve kurallar ile uyumluluğun sağlanması için yapılacak harcamalar arasında denge sağlamak için kullanıcılara rehberlik eder. FSA'nın uygulama basamakları Şekil 2.2'de özetlenmiştir. Süreçte bir risk değerlendirmesinde izlenecek temel adımlara ek olarak, mevcut ve potansiyel risk kontrol seçeneklerinin etkinliklerinin ve finansal değerlerinin ele alınması, armatörlerin ve gemi işletmecilerinin için doğru karar almalarına imkân sağlamaktadır.



Şekil 2.2 Biçimsel Emniyet Değerlendirmesi'nin uygulama basamakları (IMO, 2018).

FSA sektöre yeni bir kural veya düzenleme getirildiğinde şirketlerce izlenecek bir karar verme yaklaşımı olduğu gibi, bu yöntemin var olan sistemlerde durum değerlendirmesi yapabilmek için de uygulanması mümkündür. Operasyonların değişen faktörlere göre yeniden incelenmesi, mevcut risk kontrol seçeneklerinin etkinliğinin değerlendirilmesi, gerekli görüldüğünde yeni seçeneklerin uygulanmaya başlanması gibi çalışmalar yürütülebilir.

Gemilerde emniyetli koşulların sağlanması ve sürdürülebilmesi konusunda Uluslararası Emniyetli Yönetim (ISM) Kodu'nda tanımlanan Emniyetli Yönetim Sistemi (SMS) de risk değerlendirmesi ile doğrudan ilgili bir gerekliliktir. Kodun temel amacı emniyetli gemi operasyonlarının ve emniyetli çalışma ortamlarının sağlanmasıdır. Bu doğrultuda, belirlenen tüm risklere karşı önleyici faaliyetlerin uygulanması ve gemideki ve karadaki personelin emniyetli yönetim becerilerinin geliştirilmesi gerektiğini işaret etmektedir (IMO, 2018). Nitekim şirketlerin denetleyici makamlara gemilerinde söz konusu uyumluluğu sağladığına dair objektif kanıtlar sunmaları gerekir. Dolayısı ile kapsamlı ve gerekliliklere uygun bir SMS oluşturulabilmesi, risk değerlendirmelerinin anlaşılır ve etkin bir biçimde uygulanmasına bağlıdır.

3. TANKERLERDE TEHLİKELİ VE ÖZEL GEREKSİNİMLİ YÜK OPERASYONLARI

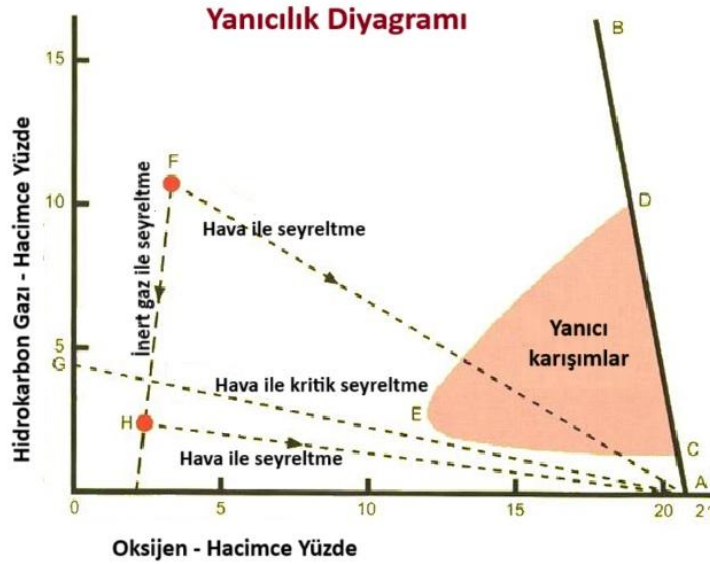
3.1 Yüklerin Operasyonel Açıdan Kritik Özellikleri

Tankerlerde taşınan sıvıların çeşitliliği IBC Kod'un 17. bölümünde görülebileceği üzere oldukça fazladır. Bölüm içerisinde her bir yükün emniyet ve kirleticilik tehlikeleri olup olmadığı, deniz kirleticiliği kategorisi, açık veya kapalı havalandırma gereksinimi, açık veya kapalı seviye ölçüm biçimleri, yanıcılık ve toksisite durumları ve yangın durumundaki operasyonel gereklilikler bu liste içerisinde özetlenmektedir. Tüm bu gereklilikler farklı yüklerde değişkenlik göstermektedir. Bunun yanında, kodun gerekliliklerine tabi olmayan fakat 18. bölümde listelenmiş, tankerlerde taşınan diğer yükler için de operasyonel açıdan gerekli emniyetli koşulların sağlanması gerekmektedir (IMO, 2020).

3.1.1 Yanıcılık ve patlayıcılık

Petrol, petrol türevi ve bazı kimyasal yüklerin en bilinen ve başlıca tehlikeli özelliklerinden yanıcılık ve patlayıcılık, gemi personelinin yük operasyonları esnasında ek önlemler almasını gerektirebilmektedir. Benzin ve metanol bu yüklere örnek olarak gösterilebilirken, endüstride LEL olarak tabir edilen “en düşük patlama sınırı” bu tür yüklerin tehlikelerinden kaçınmak için dikkate alınan önemli bir referans değeridir. LEL, kargo tankları gibi kapalı alanların atmosferinde hidrokarbon buharının hava ile patlayıcı karışımlar oluşturabildiği en düşük konsantrasyon sınırı anlamına gelmektedir ve bu değerin altı emniyetli olarak kabul edilir. UEL de konsantrasyon değerinin en yüksek sınırıdır ve bu değerden sonrasında ortamdaki hidrokarbon gazı konsantrasyonunun çok yüksek olması nedeniyle yine bir patlama olması beklenmemektedir. Ancak her halükârda emniyetli koşulların sağlanması için tank içerisindeki atmosferde yanıcı gaz konsantrasyonunun olabildiğince düşürülmesi, LEL değerinin altına çekilmesi gerekmektedir. Bunun takibi de tank temizliği de dahil olmak üzere tüm yük operasyonları boyunca devam ettirilmelidir (ICS vd., 2020).

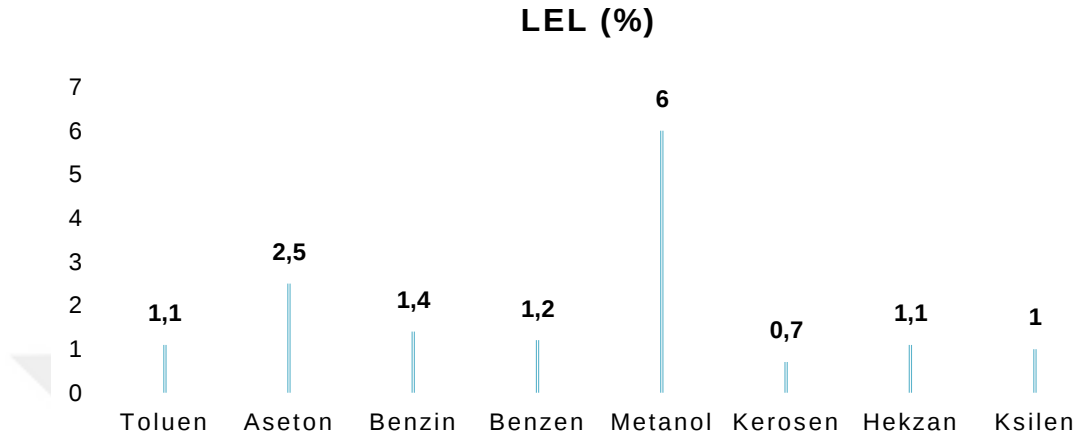
Şekil 3.1 yanıcılık ve patlayıcılık senaryosuna dair yük gazının konsantrasyon değişimlerinin etkisini ifade etmektedir. Görüldüğü üzere yanıcı/patlayıcı bir ortamın oluşması için hidrokarbon gazı konsantrasyonuna ek olarak tank atmosferindeki oksijenin hacimce miktarı da oldukça önemlidir.



Şekil 3.1 Oksijen ve hidrokarbon gazı konsantrasyonlarının yanmaya etkisi (ICS vd., 2020).

Tank içerisinde meydana gelebilecek yanmanın önüne geçebilmek için sektörde uygulanan en yaygın işlem ortamdaki oksijenin azaltılması, bir diğer deyimle tankların inertlenmesidir (ICS vd., 2020). Ancak yükün özelliğine göre bu işlemde kullanılan inert gaz türü farklılaşmaktadır. Petrol tankerlerinde baca gazı karışımı uygun bir oksijen içeriği olacak şekilde tanklara servis edilirken, kimyasal tankerlerde bu işlem nitrojen gazı ile gerçekleştirilir (ICS vd., 2020; OCIMF, 2017). Yükün özelliklerinin bozulmaması ve kontaminasyonun önlenmesi hedeflenir. Bir emniyet aksiyonu olarak uygulanan bu işlem de kendi içerisinde emniyetli ve etkili bir şekilde yapılmalı, sürecin emniyet ve teknik açıdan riskleri değerlendirilmelidir. İnert/nitrojen gazının ideal bir biçimde hazırlanması, zamanlaması, gemi dizaynına dikkat ederek kayıplara sebep olmadan tanklara uygun biçimlerde servis edilmesi, gemi personelinin de tüm bu süreçlerde nitrojenin ölümcül etkilerine karşı kişisel emniyet tedbirlerini maksimuma çıkarması gerekmektedir (Elidolu vd., 2024a).

Şekil 3.2 örnek olarak seçilmiş 8 farklı yükün LEL değerlerine ait bilgiler sunmaktadır. Görüldüğü üzere kerosen diğer yüklere göre nispeten daha düşük bir LEL değerine sahiptir. Bu da tank içerisindeki gaz konsantrasyon takibinin ekstra dikkatle sürdürülmesi gerektiği anlamına gelmektedir (NIOSH, 2007).



Şekil 3.2 Örnek yüklere ait LEL değerleri.

3.1.2 Reaksiyon tehlikesi

Maddelerin bir dış faktör etkisiyle kimyasal yapılarında değişiklikler meydana gelmesi olayı reaksiyon olarak bilinmektedir. Tanker taşımacılığında reaksiyon özellikle kimyasal yüklerin elleçlenmesinde karşılaşılmaması muhtemel ve istenmeyen durumlardan biri olabilir (ICS, 2002). Nitekim yükün reaksiyona uğraması öncelikle yükün yapısının değişmesi ve artık resmi evrakta belirtilen yükten farklı bir maddeye dönüştüğü, endüstriyel ve ticari bir değerinin kalmadığı anlamına gelmektedir. Ancak bu olumsuzluğun da ötesinde reaksiyon, patlamalara ve yangına sebep olabileceği için tanker gemilerinde yaşanabilecek en tehlikeli olaylardan biridir (MAIB, 2021).

Belirli yükler ısı veya ışık gibi bir etmen sebebiyle kendi kendine bir reaksiyon başlatabilirken, bazı yükler de su veya hava ile temas ettiğinde veya diğer yüklerle/gemi üzerindeki farklı maddelerle etkileşime girdiğinde reaksiyon verebilmektedir (ICS, 2002). Her yükün yapısı gereği gemi üzerinde farklı koşullarda elleçlenmesi gerekir ve bu koşullar idealden uzaklaştıkça reaksiyon riskinin artması kaçınılmazdır.

Reaktif yüklerin elleçlenmesi ile ilgili detaylar bölüm 3.2’de sunulacaktır.

3.1.3 Statik biriktiricilik

Statik elektrik genellikle iki farklı nesnenin birbirine sürtünmesi, temas veya indüklenme gibi yollarla etkileşimi sonucunda oluşan elektrik türüdür. Günlük yaşamda zararsız olsa da endüstrilerde emniyetsiz koşullar altında son derece tehlikeli olaylara sebebiyet verebilmektedir. Tankerlerde taşınan metil-tert-bütül-ether (MTBE) gibi bazı yükler yapısal olarak statik biriktirici özelliğe sahip olduğundan bu yüklerin operasyonları öncesinde riskler analiz edilmeli ve gerekli emniyet tedbirleri uygulanmalıdır. Nitekim statik elektriğin tanker kaza incelemelerinde zarar seviyesi oldukça yüksek, can kayıplarına ve çevresel kirliliklere neden olan patlama ve yangın gibi kazaların nedenleri arasında yer aldığı görülmektedir (Balisampang vd., 2018). Operasyonlar esnasında elektrostatik oluşumlara sebebiyet verecek tehlikeli durumlar genel olarak; bir sıvının tank içerisine yüksek hızda girişi, topraklanmamış boru hatlarından statik biriktirici bir yükün akışı, metalik bir malzemenin yüksekte düşüşü, numune alım ve seviye ölçüm ekipmanlarının statik elektrik oluşumuna karşı korunaksız oluşu şeklinde özetlenebilir. Bu tür yüklerin elleçlenmesinde başlıca bir emniyet tedbiri olarak tankların inertlenmesi, geminin ve ekipmanların topraklanması, yükleme başlangıcında yükün düşük hızda alınması, tank içerisinde ilk yükleme (first foot) tamamlandıktan sonra operasyona 30 dakikalık bir ara verilmesi gibi uygulamalar yapılabilir (Elidolu vd., 2022; ICS vd., 2020 Url-1).

3.1.4 Yoğunluk faktörü

Tankerlerde elleçlenen sıvı yüklerin yoğunluğu (specific gravity) da yük operasyonlarında dikkat gerektiren bir diğer faktördür. Geminin dizaynına göre değişebilecek bu değer her geminin prosedürler ve düzenlemeler (P&A) manuelinde ve geminin trim ve stabilite kitapçığında belirtilmektedir. Yüksek yoğunluklu bir yük için yükleme planı hazırlanırken her bir tankın maksimum yükleme seviyesi, yükün seyir esnasındaki çalkalanma (dalgalanma) ve serbest yüzey etkisi ile birlikte ele alınmalıdır. Zira bu tür yükler yüklenirken tankların doluluk seviyesi düşük olduğunda (slack), çalkalanma nedeniyle oluşacak serbest yüzey hareketi geminin stabilitesi üzerindeki riskleri artırabilir, bu hareket tank yapısına ve ekipmanlarına zarar verebilir. Ayrıca yükün buhar basıncının da dikkate alınması daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına katkı sağlayacaktır.

3.1.5 Yüksek viskozite faktörü

Bir sıvının akışkanlığa karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanan viskozite yük operasyonları ve çevre yönetimi açısından önem arz eden bir diğer faktördür. Bu faktör, tahliye sonucunda basılması artık mümkün olmayan ve tanklarda kalan yük miktarına da etki edeceği için, gemi pompalarının yükü basabilme kolaylığı ile de doğrudan ilgilidir. Sıcaklık ile değişebilen fiziksel bir özellik olup, pompa basımının kolaylaştırılması için sakınca olmayan yüklerde müsaade edilen ölçülerde ısıtma yapılması gerekebilir. Benzer biçimde yüklerde katılaşabilme karakteri de mevcutsa, tahliye sıcaklıklarının yükün erime noktası baz alınarak emniyetli bir aralığa ayarlanması gerekmektedir (IMO, 2022).

MARPOL'e göre yüksek viskoziteli yükler konvansiyonun ikinci ekinde X ve Y kategorilerine dahil edilmektedir. Dolayısıyla bu tür yüklerden sonra yapılacak tank temizleme işlemlerinde ön yıkama (prewash) yapılması zorunludur (IMO, 2022). Bunun yanında tahliye sıcaklığındaki viskozite değeri 50 milipascal ve üzeri bir değere sahip yükler, yüksek viskoziteli yükler olarak kabul edilmiştir. Kurallar gereğince yüklenecek her yükün 20°C'deki viskozite değerinin gemi tarafından bilinmesi gerekmektedir.

3.1.6 Aşındırıcılık tehlikesi

Asidik ve alkali yüklerin en belirgin özelliklerinden biri aşındırıcılıktır. Ph değeri üzerinden anlaşılabilecek bu özellik, değer 0'a ve 14'e yaklaştıkça etkisini artırmaktadır. Sülfürik asit ve sodyum hidroksit (kostik soda solüsyonu) tankerlerde sıklıkla taşınabilen aşındırıcı yüklere örnek olarak gösterilebilir (IMO, 2020). Bu yüklerin geçiş yaptıkları devrelere, bulundukları tanka ve diğer birçok ekipmana zarar verebilir. Özellikle asitlerin metaller ile verdiği tepkimeler sonrası zehirli ve yanıcı hidrojen gazı açığa çıkar, ayrıca materyal aşınıp delinebilir. Aşındırıcı maddelerin insan sağlığı üzerinde de ölümcül etkileri olabilmektedir. Özellikle haricen temaslarda deri üzerine hızlı bir şekilde nüfuz ederek yanıklara, göz üzerinde de çok ciddi ve geri döndürülemez yaralanmalara sebep olabilir (BASF, 2024; Carl Roth, 2024). Bu tür tehlikelerin önüne geçmek için geminin yapısal olarak aşındırıcı yükleri taşımaya elverişli olması gerekir. Bu tür maddeler ile tepkime vermeyen malzemedan üretilmiş kargo sistemleri sayesinde yükler emniyetli bir biçimde taşınabilecektir. Ayrıca kişisel

koruyucu emniyet ekipmanlarının kullanılması da kişisel temasın önlenmesine yardımcı olacaktır.

3.1.7 Zehirlilik faktörü

Tankerlerde yük operasyonlarında bir diğer kritik özellik yükün zehirlilik (toksik) özelliğidir. Bu maddeler yapıları gereği canlı yaşamı üzerinde tehdit oluşturur ve bu etkisini akut veya kronik bir biçimde gösterebilir. Yutma, cilt ile temas ve solunum yolu ile vücuda girerek hücre yapısını bozar ve kana karışarak yaşamsal faaliyetleri büyük ölçüde engeller. Zehirli yüklere örnek olarak aseton ve toluen maddeleri gösterilebilir (IMO, 2020).

Tankerlerde toksik maddeler ile temasın solunum yolu ile gerçekleşmesi son derece olasıdır. Bu nedenle, zehirlilik faktörü ile birlikte “maruz kalma” durumu arasında doğrudan bir ilişki kurulmuştur. Eşik sınır değer (TLV), kişinin çalışma alanındaki atmosferde bulunabilecek toksik madde buharının maksimum konsantrasyon değerini ifade eder. Bu eşiğin üzeri insan sağlığı için zararlı olup, değer arttıkça maddenin türüne göre etkileri ölümcül olabilmektedir. TLV değeri belli göstergelere göre değerlendirildiğinde anlamlıdır. Zaman ağırlıklı ortalama (TWA) değeri ile birlikte değerlendirildiğinde kişinin söz konusu toksisiteye maruz kalabileceği değer günde 8 saatlik, haftada ise 40 saatlik bir çalışma periyodu üzerinden ele alınmaktadır. Kısa süreli maruz kalma limiti (STEL) ise, TLV değerini kişinin toksik bir ortama 15 dakikalık maruz kalım süresi üzerinden değerlendirir. Bu değer günde 4 saati aşmaması ve her bir maruz kalma süreci arasında 1'er saatlik dinlenme periyodu olması gereklidir. Dolayısıyla TLV-STEL, TLV-TWA değerinden daha yüksek bir değer ile ifade edilecektir. Bir diğer terim tavan (ceiling) değeri olup, TLV'nin hiçbir koşulda aşmaması gereken değeri ifade etmektedir.

Operasyonel anlamda toksik maddelerin zararından korunabilmek için geminin yapısal özellikleri de dikkate alınarak havalandırma konusunda önlemler alınabilir (IMO, 2020). Kişisel koruyucu ekipmanlar da hem solunum hem de cilt teması gibi durumlardan kaçınılmasına yardımcı olabilmektedir (Url-2). Öte yandan yutma halinde bazı yüklerin ölümcül etkilerinden dolayı spesifik önlemlerin alınması gerekir (WHO, 2007). Aseton siyanohidrin, akrilonitril (ACN), etilen siyanohidrin, propionitril ve elleçlenirken zehirlenme ihtimaline karşı gemide olarak panzehir

(antidot) bulunması gerekmektedir ve bu yükleme operasyonu başlangıcının da bir ön şartı olmalıdır.

3.1.8 Kanserojen özellik

Tankerlerde taşınan bazı maddelerin en tehlikeli özelliklerinden biri de kanserojen olmalarıdır. Kanserojenler canlı bedeninde hedef bölgede anormal ve kontrolsüz bir biçimde hücre çoğalmasına neden olup, zaman içerisinde farklı dokulara da sıçrayarak tahribata yol açar. Tedavinin mümkün olmadığı koşullarda canlının yaşamına son verebilen maddelerdir. Akrilamid, anilin, benzen, formaldehit ve stiren tankerlerde taşınan bazı kanserojen yükler arasındadır (IMO, 2020; NIOSH, 2007; USCG, 1990). Bu tür yükler için en önemli ve başlıca emniyet tedbiri, yükleme limanına ulaşmadan gemi personelinin yük hakkında çok net bir biçimde bilgilendirilmesi, yükün tehlikelerine karşı farkındalıklarının artırılmasıdır. Bunun devamında kapalı yükleme ve tahliye ortamının sağlanması, yük operasyonları boyunca kapalı numune alım ve kapalı seviye ölçüm işlemlerinin yapılması, hortum bağlantısı ve sökümü gibi yük ile ilgili operasyonlarında fiilen görev alan personel için kimyasal koruyucu giysilerin ve solunum cihazlarının hatasız bir şekilde kullanıma hazır olması gibi uygulamalar bu tür yüklere karşı alınabilecek en kritik tedbirlerdir.

3.2 Reaktif Yüklerin Operasyonel Gereksinimlerinin İncelenmesi

Tankerlerde yükle ilgili tehlike türü ne olursa olsun, tehlikeden kaçınmanın temelini yüke dair kişisel farkındalıklar oluşturur. Dolayısı ile yükün emniyet bilgi kartının (MSDS) tüm gemi personeli tarafından doğru bir biçimde anlaşılması gerekmektedir. Bu farkındalık özellikle reaksiyon potansiyeli olan yükler elleçleneceği zaman hayati önem taşımaktadır. Reaksiyon tehlikesi olan yükler genel olarak dört kategori altında incelenebilir:

3.2.1 Kendi kendine reaksiyona giren yüklerin elleçlenmesi

Bir yükün kendi kendine reaksiyona girmesi sıcaklık, ışık veya hava gibi dış etmenlere maruz kalması nedeniyle kimyasal yapısında değişiklikler olması anlamına gelir. Bu değişiklik polimerleşme, oksitlenme veya bozunma şeklinde gerçekleşmekte olup, bunlar arasında polimerleşme son derece tehlikeli durumlara ve kazalara sebebiyet verebilmektedir (MAIB, 2021). Nitekim polimerleşme ekzotermik bir reaksiyondur ve bu esnada ısı açığa çıkar. Buna bağlı olarak yükün sıcaklık artışından etkilenerек

polimerleşmesi daha da şiddetli ve önü durdurulamayan bir hal alabilir. Stiren monomer, vinil klorid, vinil asetat gibi yükler kendi kendine reaksiyona giren, doğal hali ile stabil olmayan yüklere örnek olarak gösterilebilir (IMO, 2020).

Bu kategorideki yüklerin gemi bünyesinde taşınabilmesi için yüke inhibitör katılması gereklidir. İnhibitör, eklendiği maddenin girebileceği kimyasal reaksiyonu yavaşlatıcı veya durdurucu etkiye sahip maddelere verilen genel bir adlandırma olup, katkı maddesi olarak da bilinir. Bir diğer deyimle inhibitör, kendi kendine reaksiyona girme riski olan yüklerin bozulmadan ve can, mal ve çevre açısından emniyetli bir biçimde taşımacılığının yapılması için uygulanan bir emniyet tedbiridir (IMO, 2020).

Her ne kadar emniyetin sağlanması için uygulanan bir eylem olsa da inhibitörlü yük operasyonları kendi içerisinde çok sayıda risk faktörü barındırmaktadır (Elidolu, 2024b; MAIB, 2021). Öncelikle, inhibitörün kendisi de bir kimyasaldır ve bu maddelerin tehlikeli ve insan sağlığına zararlı etkileri olabileceği unutulmamalıdır. İnhibitörün eklenme şekli ve miktarı da işlevini yerine getirebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bir diğer kritik konu, inhibitörün oksijen bağımlı olup olmamasıdır. Bazı inhibitörlerin etkin bir biçimde koruma sağlayabilmesi için yükün içerisinde ideal miktarda çözünmüş oksijen bulunması gerekir (IMO, 2020). Ancak bu özellik nedeniyle diğer süreçlerde ekstra dikkat gerekebilir, örneğin tank içerisinde yanıcı atmosfer oluşumunu önlemek için başka yüklerde uygulanan nitrojen ile inertleme işlemini bu tür durumlarda uygulamak mümkün değildir. Gemi personelinin söz konusu ısınmayı ve buna bağlı riskleri önlemek için farklı çabalara yönelmesi gerekir. Bu tür yükler inhibitörlenmiş olsa dahi çevresel risklere her zaman açıktır. Dolayısıyla polimerleşme riski olan yükler elleçlenirken yük sıcaklıklarının emniyetli üst değeri asla geçmemesi gerekir.

3.2.2 Farklı yükler ile reaksiyona giren yüklerin elleçlenmesi

Birbiriyle uyumsuz olan yüklerin temas etmesi, yük buharlarının karışması veya yakın tanklara yüklenmesi durumunda kimyasal reaksiyonlar gerçekleşebilir. Bu uyumsuzluk genellikle asitler ve alkaliler arasında olur. Reaksiyon sonucunda toksik gazlar açığa çıkabilir, artan basınç nedeniyle tanklarda patlamalar meydana gelebilir. Bir yükün farklı yüklerle reaksiyona girmesinin önlenmesinin en uygun yolu yüklerin birbirine göre ideal uzaklıktaki tanklara yüklenmesidir. Ancak sadece tankların ayrılması değil, bu yüklerin alındığı devrelerin de birbirinden tamamen izole tutulması

gerekmektedir. Dolayısıyla yük planı oluşturulmadan önce mutlaka yük uyumluluk tablosu dikkate alınmalıdır (Url-3). Uyumluluk tablosuna göre örneğin sülfürik asit kendisi hariç tüm yük kategorileriyle uyumsuz bir asit çeşididir. Alkalilerden alifatik aminler de benzer biçimde diğer birçok yük kategorisi ile uyumsuz yüklerdir ve birlikte yüklenmesi gerekiyorsa yükler arasında emniyetli bir ayrışım yapılması gerekmektedir.

Buna ek olarak, dikkatlerden kaçan veya önemsenmeyen benzer bir tehlike de yüklerin numunelerinin muhafazasıdır. Gemi personelinin farklı kimyasallar arasındaki uyumsuzluğu, sadece birbirinden uzak tanklara istif ederek giderilebileceğine güven duyması önemli bir yanlış olabilir. Bu tür kargoların numuneleri öncelikle cam gibi, yükün türüne uygun bir materyalden yapılmış şişelere alınmalıdır. Ayrıca gemide numunelerin tutulduğu ortamda da reaksiyon potansiyeli olan numunelerin tam izole bir biçimde saklanması gerekir.

3.2.3 Su ile reaksiyona giren yüklerin elleçlenmesi

Su ile reaksiyon, bir yükün yapısı gereği su, su buharı (havadaki nemlilik) veya su içerikli bir madde ile teması sonucu meydana gelen, yanıcı ve toksik gazların oluşumuna neden olan bir tepkimedir. Bu tehlikeyi barındıran yük türlerine tolüene di-isosiyanat (TDI) gibi di-isosiyanat ailesi örnek olarak verilebilir. TDI su ile bulunduğu karbondioksit (CO_2) gazı açığa çıkarır. Ayrıca bazı asitlerle ve alkalilerle de şiddetli reaksiyon verebilir. Genel olarak bu reaksiyonlar sonucu CO_2 'ye ek olarak nitrojen oksitler (NO_x) ve karbon monoksit (CO) gazlarını da açığa çıkarabilmektedir (Thermo Fisher, 2024).

Bu tür yükler elleçlenirken komşu tanklarda uyumsuz olabilecek, su karışımı yüklerin olmaması, komşu balast tanklarına balast alınmaması gerekmektedir. Ayrıca bu yükler için kullanılan yük devreleri ve havalandırma devreleri de sudan tamamen izole edilmiş olmalıdır. Tank temizliği aşamasında ise tanklara su verilmemesi ve su bazlı olmayan özel maddelerle temizlenmesi gerekir (Chemserve, 2022). Bu yük türleri aynı zamanda toksik karakterli de olabildiğinden tüm yük operasyonu ve numune alım gibi işlemler de kapalı bir biçimde gerçekleştirilmeli, buhar geri dönüşüm hattı (VRL) da kullanılarak yük buharının hava ile karışması engellenmelidir.

3.2.4 Hava ile reaksiyona giren yüklerin elleçlenmesi

Hava ile reaksiyona giren yükler çoğunlukla hava içerisindeki oksijene karşı duyarlı olduğu için bu tepkime gerçekleşmektedir. Herhangi bir tetikleyici enerji olmadan da bu yükler oksijen ile tepkime verebilir. Söz konusu yüklerde oksijen ile temasın kesilmesi için yük operasyonları ve ilgili diğer süreçler kapalı bir biçimde yapılmalıdır. Yükleme öncesinde tanklardaki havanın nitrojen ile inertlenerek tank içerisindeki oksijen oranının %1'in altına düşürülmesi gerekir. Bunun için sahilden yüksek saflıkta nitrojen alınmalıdır, ancak gerektiğinde kullanmak üzere gemi üzerindeki nitrojen jeneratörünün de sorunsuz çalışır konumda olması gerekmektedir. Yükün hassaslığına ve özel gerekliliklerine göre bu işlem nitrojen örtüsü (blanketing) gibi kısmi bir şekilde de yapılabilir (ICS, 2002).

4. YÖNTEMSEL YAKLAŞIM

4.1 Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi (FMECA)

Çeşitli endüstrilerde sistem, süreç veya operasyonlar bünyesindeki zayıflıkları anlaşılması, daha emniyetli ve güvenilir bir çalışma ortamının sağlanması için risk değerlendirmesinin önemi tartışılmazdır. Kullanıcıların ihtiyaçlarına göre riskler farklı bakış açılarıyla ele alınabilir. İnsan güvenilirliği analizi ve insan hata olasılık tahminlemesi, deniz kazaları analizi, tehlike ve işletilebilirlik analizi ve hata/arıza analizi gibi birçok farklı yöntem ile riskler üzerinde değerlendirmeler yapılması mümkündür.

Bu tez çalışmasında hata/arıza analizi yaklaşımı izlenerek literatürde yaygın bir biçimde kullanılan FMECA'dan yararlanılmıştır. FMECA, temel olarak FMEA ile eşdeğer bir yöntem olup, ek olarak risklerin kritiklik yönünü de ele alarak daha bütünsel ve güvenilir analizler yapılmasına olanak sağlar. Kullanıcıların bir sistemdeki potansiyel hata türlerini ve dolayısıyla riskli durumları anlamalarına, buna bağlı olarak da gerekli emniyet aksiyonları almalarına yardımcı olur.

FMECA ile risk değerlendirmesi sistemdeki her bir hatalı durumun meydana gelme olasılığı (O), meydana geldikten sonraki etkilerinin şiddeti, (S) ve bu hataların tespiti (D) olmak üzere üç parametre (risk bileşeni) üzerinden yapılmaktadır.

$$RPN = O \times S \times D \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de gösterildiği üzere, bu üç risk bileşenin çarpımı yapılarak her bir hata türüne özel bir Risk Öncelik Sayısı (RPN) değeri hesaplanır. RPN değerinin büyüklüğüne göre hata türleri karşılaştırılabilmekte, buna bağlı olarak alınabilecek emniyet aksiyonları bakımından da önceliklendirme yapılabilmektedir. Bu durum kişilerin ve kurumların ellerindeki finansal kaynağı etkili bir biçimde kullanabilmelerine de büyük ölçüde katkı sağlar.

FMECA kullanıcılara kolay ve adım adım uygulanabilen bir sayısal analiz imkânı sunar. Basit matematiksel yapısına rağmen birçok alanda işlevsel ve güvenilir bir yaklaşım olduğu ispatlanmıştır (Ahmed & Gu, 2020; Balaraju vd., 2019; Godina vd., 2021; Sharma & Srivastava, 2018). Nitekim etkili bir FMECA uygulaması çalışanlara ve kurumlara sistem performansının ve süreç verimliliğinin artırılması, yapısal değişikliklere olan ihtiyacın azalması, zaman kayıplarının önlenmesi, operasyon ve bakım giderlerinin azaltılması gibi çeşitli avantajlar sunabilmektedir (Paciarotti, 2013).

4.1.1 Hata türlerinin belirlenmesi

FMECA’da yöntemin ilk aşaması bir sistem veya operasyonel bir süreçte karşılaşılabilecek tehlikelerin tanımlanmasıdır. Örneğin bir sistemin işletilmesiyle toksik gaz salınımı gibi bir tehlike muhtemel ise, sistemi bu tehlikeye sürükleyebilecek hatalı durumların tanımlanması yapılmalıdır. Birden fazla tehlikenin mevcut olduğu durumlarda bu tehlikelerin birbirine bağıllık veya görece bağımsızlık durumlarına göre hata tanımlamaları detaylandırılmalıdır.

4.1.2 Hata türlerinin değerlendirilmesi

Hata türlerinin belirlenmesinden sonra, sistem veya operasyon hakkında bilgi ve tecrübe sahibi uzmanların desteği ile hata türlerinin meydana gelme olasılığı, şiddet ve tespit edilebilirlik parametreleri üzerinden değerlendirme yapılır. Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 temel olarak FMECA’nın her bir parametresine göre değerlendirmenin yapılabileceği ölçekleri özetlemektedir.

Çizelge 4.1 FMECA yönteminde meydana gelme parametresinin değerlendirme ölçeği (Pillay & Wang, 2003).

Meydana Gelme (O)		
Değer	Olasılık	Muhtemel kaza oranı
10	Çok yüksek	1:2
9		1:10
8		1:20
7		1:100
6		1:200
5	Orta	1:1000
4		1:2000
3		1:10000
2	Düşük	1:20000
1		< 1:20000

Çizelge 4.2 FMECA yönteminde şiddet parametresinin değerlendirme ölçeği (Pillay & Wang, 2003).

Değer	Şiddet
10	Çok yüksek
9	
8	
7	Yüksek
6	
5	
4	Orta
3	
2	
1	Çok seyrek

Çizelge 4.3 FMECA yönteminde tespit edilebilirlik parametresinin değerlendirme ölçeği (Pillay & Wang, 2003).

Tespit Edilebilirlik (D)		
Değer	Olasılık (%)	Tespit edilebilirlik
10	0-5	Çok yüksek
9	6-15	
8	16-25	
7	26-35	Yüksek
6	36-45	
5	46-55	
4	56-65	Orta
3	66-75	
2	76-85	
1	86-100	Çok seyrek

Meydana gelme ve şiddet parametreleri doğruca ve aynı mantık üzerinden ele alınır. Uzman, hatanın meydana gelme olasılığının düşük olduğunu düşünüyorsa düşük bir skor, etki şiddetinin yüksek olduğunu düşünüyorsa benzer şekilde yüksek bir skor ataması yapmalıdır. Ancak FMECA prensip olarak tespit edilebilirlik kavramında ters yönlü bir mantıkla değerlendirme yapılmasını gerektirir. Çizelge 4.3'te belirtilen olasılık yüzdeleri bu durumu özetlemektedir. Buna bağlı olarak uzman bir hatanın tespit edilebilirliğinin zor ve ihtimal bakımından düşük olduğunu düşünüyorsa, bu parametre için atayacağı skorun yüksek bir değerde olması gerekmektedir.

4.1.3 FMECA yönteminin kısıtları

FMECA birçok alanda kullanılan etkili bir risk değerlendirme yöntemi olmasına rağmen kısıtları olan, geliştirilmeye açık bir yöntemdir. RPN değerinin hesaplanması sürecinde fark edilebilen bu kısıtlar genel olarak şu şekilde özetlenebilir:

- Klasik bir FMECA uygulamasında, iki farklı hata türü için meydana gelme, şiddet ve tespit edilebilirlik parametrelerine uzmanlarca farklı skorlar verilse bile, farklı sayıların çarpımını aynı sonucu (RPN) verebilir. Görünüşte aynı olan risk öncelik sayıları nedeniyle hata türlerinin değerlendirmesinde yanılgılara düşülebilir.
- FMECA’da her üç parametreye atanabilecek skorlar hakkında yeterli matematiksel yorumlama yapılamamaktadır. Bu değerler 1 ve 5 arasında olabildiği gibi, 1 ve 10 aralığında da değişebilmektedir. 1-5 aralığını tercih etmek, riskler arasında etkili bir önceliklendirme ve ayırım yapmak istendiğinde efektif olmayabilir, dolayısıyla literatürde FMEA ve FMECA uygulamalarında yaygın bir biçimde kullanılan 1-10 aralığı tercih edilebilir. Ancak her iki seçenekte RPN’nin yorumlamasında zorluklar yaşanabilmektedir. 1-10 arası ölçek üzerinden örnek vermek gerekirse, bir hata türü için meydana gelme olasılığına 3, şiddete 4 ve tespit edilebilirlik durumuna 5 değeri atandığında RPN değeri 60 olacaktır. Buradan hareketle RPN’nin alabileceği değerlerin 0 ile 1000 aralığında olacağı anlaşılmaktadır. Ancak bu klasik yaklaşımda soru işareti oluşturabilecek durum, her bir parametreye atanan skorda çok küçük değişiklikler yapılsa bile RPN değerinde büyük değişimler olabilmesidir. Aynı örnek ele alınırsa, her bir parametrenin değeri sadece 1’er puan artırıldığında (4x5x6) RPN değeri 120’ye yani iki katına yükselecektir. Uzmanların sadece 1’er puan artırması genellikle riskin “az miktarda” yükseleceğine olan inancı belirtir, ancak bulunan RPN değeri riskin iki katına çıktığını ifade eder. Özetle, RPN’nin alabileceği değer aralığının çok geniş olması, kullanıcılara risk algısı konusunda kafa karışıklığı yaşatabilmektedir.
- Meydana gelme, şiddet ve tespit edilebilirlik parametreleri eşit önemde kabul edilmektedir. Ancak bu üç kavram aslında sistemden sisteme farklı yorumlanır. Bazı sistemlerdeki hatalı durumların meydana gelme olasılıkları

düşük olabilir, ancak gerçekleşmesi halinde sisteme, kullanıcılara ve çevreye büyük hasarlar verebilen, etki şiddeti yüksek olan olaylarla karşılaşılabilir. Düşük RPN değerli bir hata türünün kullanıcılar tarafından önemsenmemesi de olası bir durumdur. Benzer biçimde, özellikle şiddet parametresinin RPN değerine önemli ölçüde katkıda bulunduğu durumlarda (meydana gelme olasılığı 2, şiddet 8, ve tespit edilebilirliğin 2 puan olması sonucu RPN değerinin 1000 üzerinden 32 olarak hesaplanması) bilinçli veya farkında olmadan bu önemli perspektif kullanıcılar tarafından göz ardı edilebilir. Genel olarak sistemlerde şiddet parametresinin skorunu düşürmek (hata etkisinin şiddetini düşürmek) meydana gelme ve tespit edilebilirlik parametrelerine kıyasla daha zor olabileceği için bu ihmal daha büyük sorunlara yol açabilir. Dolayısıyla bu parametrelerin risk oluşuma olan katkılarını eşit kabul etmek emniyetin korunması ve finansal kaynakların verimli kullanımı açısından eksik ve yanlış kararlar alınmasına neden olabilir.

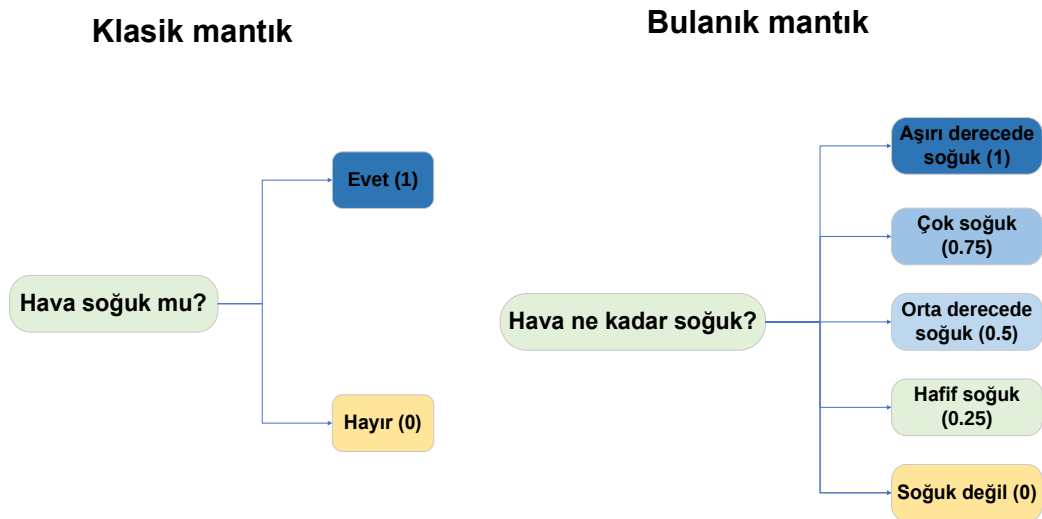
- Üç parametrenin birbirini etkileme durumları da klasik FMECA’da göz ardı edilen bir diğer durumdur. Bazı sistemlerde veya süreçlerde şiddetin ve tespit edilebilirliğin aynı anda yüksek puanlanmasına rağmen, meydana gelme olasılığının düşük olması nedeniyle RPN değeri de nispeten düşük olacaktır. Parametreler arasındaki göreceli kombinasyonun, riski farklı düzeyde etkileyebileceği unutulmamalıdır.
- Yöntemin bir diğer dezavantajı uzman yargılarının öznelliğidir. Üç parametrenin değerlendirilmesi aşamasında, dilsel ifadeler ve bunlara karşılık gelen sayısal değerler uzmanların görüşünü yeterince yansıtmayabilir. Sonuç olarak, farklı hata türleri arasındaki karşılaştırma istenildiği gibi gerçekleştirilemeyebilir.

Bu kısıtlar ve belirsizlikler literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından fark edilmiş olup, yöntemi geliştirebilmek adına farklı yaklaşımlar izlenmektedir (Gupta vd., 2021; Hassan vd., 2022; Li vd., 2022; Qin vd., 2020; Zhou & Thai, 2016). FMECA’nın belirli eksikliklerinden ötürü bu tez çalışmasında yöntemi desteklemek ve risk değerlendirmesinde daha güvenilir sonuçlar elde edebilmek adına bulanık mantık tekniğinden yararlanılmıştır.

4.2 Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Bulanık mantık teorisi 1965 yılında Zadeh tarafından literatüre tanıtılmış, sözel ifadeleri belli bir matematiksel altyapıda işleyerek sayısal ifadelere dönüştürebilen bir yaklaşımdır. Teorinin ana fikri bir problemi çözmeye çalışırken Boolean mantığı çerçevesinde 1 ve 0 düzeninde ifade edilen “evet/hayır”, “sıcak/soğuk”, “uzun/kısa”, “var/yok” gibi keskin yargıların yeterli olmayacağı; 1 ve 0 arasındaki değerlerin de yargıya varmada etkili olabileceğinin altını çizmektir (Zadeh, 1965). Klasik ve bulanık mantık arasındaki yaklaşım farkı üyelik dereceleri ile birlikte Şekil 4.1’de örneklenmiştir.

Bulanık mantık kullanım alanı tıbbi bilimler, robotik sistemler, kontrol sistemleri, yenilenebilir enerji sistemleri, denizcilik ve diğer birçok alana yayılan, araştırmacıların farklı tekniklerle de entegre ederek analizlerin kapsamını genişlettiği ve güvenilirliğini artırdığı kilit yöntemlerden biri olmuştur (Akyuz & Çelik, 2015; Castillo & Melin, 2014; İlbahar vd., 2022; Qureshi vd., 2018; Reddy vd., 2020; Suganthi vd., 2015). Bunun yanında bulanık mantık çok kriterli karar verme problemlerinde ve risk değerlendirmesi konularında da oldukça yaygın bir biçimde uygulanmaktadır (İlbahar vd., 2018; Palczewski & Saşabun, 2019). Güvenilirliğin ve nesnelliğin bir sembolü olan tarihsel/sayısal verilerin yetersiz olduğu durumlarda uzman görüşlerinden yararlanmak en etkili çözümlerden biridir. Bu görüşlerin değerlendirildiği süreçlerde belirsizliğin ve öznelliğin aşılabilmesi için bulanık mantık büyük kolaylıklar sağlayabilmektedir.



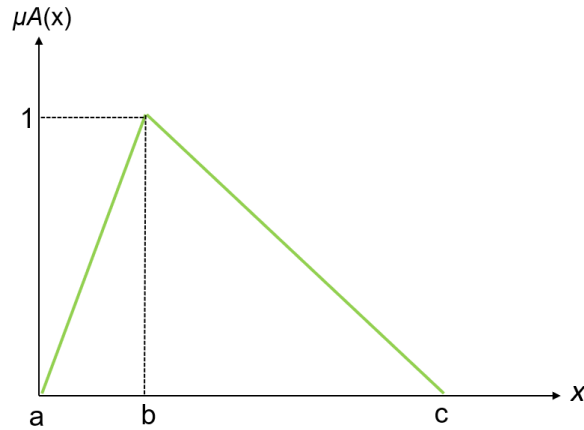
Şekil 4.1 Klasik mantık ve bulanık mantık yaklaşımları.

Bulanık mantık doğal dilsel ifadeleri işleyebilmek için değerleri 0 ile 1 aralığında değişen üyelik fonksiyonları oluşturmaktadır. Üyelik fonksiyonları "0" üye olmama, "1" tam üye olmayı temsil edecek şekilde, aradaki değerleri üçgen, yamuk, Gauss, sferik, heksagonal gibi farklı şekillerde işleyerek hesaplamaya dahil edebilmektedir (Kahraman & Çebi, 2023).

Bulanık mantığın üyelik fonksiyonlarına Şekil 4.2'deki üçgen (triangular) biçimli üyelik fonksiyonları örnek verilebilir. Şekilde görülen değerler arasındaki formülizasyon Denklem 4.2'de sunulmuştur.

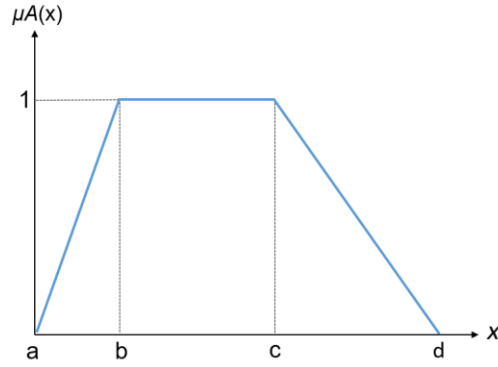
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x - a)/(b - a), & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b), & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (4.2)$$

Buna göre, A bulanık bir küme ve μ_A A'nın üyelik fonksiyonudur. $\mu_A(x)$ x değerinin A bulanık kümesine olan üyelik derecesini ifade eder. a, b, c üçlüsü düşükten yükseğe bu fonksiyonun alabileceği net değerleri (üyelik derecelerini) ifade eder (Madanda vd., 2023).



Şekil 4.2 Üçgen bulanık üyelik fonksiyonu.

Bir diğer örnek üyelik fonksiyonu biçimi Şekil 4.3'te sunulan yamuk (trapezoidal) biçimidir.



Şekil 4.3 Yamuk bulanık üyelik fonksiyonu.

Yine denklem 4.3'te belirtildiği üzere, A: bulanık bir küme, μ_A : A'nın üyelik fonksiyonu, $\mu_A(x)$: x'in A bulanık kümesine olan üyelik derecesi, (a, b, c, d): $\mu_A(x)$ fonksiyonun üyelik derecelerini ifade eder (Madanda vd., 2023).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x - a)/(b - a), & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ (d - x)/(d - c), & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (4.3)$$

4.2.1 Bulanık çıkarım sistemi (FIS) uygulaması

Bulanık mantıkta üyelik fonksiyonlarının temsil ettiği değerler kural tabanlı bir yaklaşımla şekillendirilebilmektedir. Bulanık çıkarım sistemi (FIS) yapısı bu yaklaşımın temelini oluşturur (Bai & Wang, 2006; Chanamool & Naenna, 2016). Uygulama adımları genel olarak şu şekilde açıklanabilir:

- Süreç ilk olarak dilsel ifadelerin veya terimlerin tanımlanmasıyla başlamaktadır. Bu ifadeler "çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek" gibi ifadeler olabilir.
- Her bir girdi değişkeni için üyelik fonksiyonları belirlenir. Bunun için üçgen, yamuk, Gauss gibi farklı şekiller seçilebilir.
- Bir sonraki aşamada kural yapısı oluşturulur. Bu aşama bulanık kontrol kuralları olarak da bilinir. Kural sayısı girdi değişkeni sayısı ve üyelik fonksiyonunda tanımlanan seviye sayısının üstel işlemi ile belirlenir.

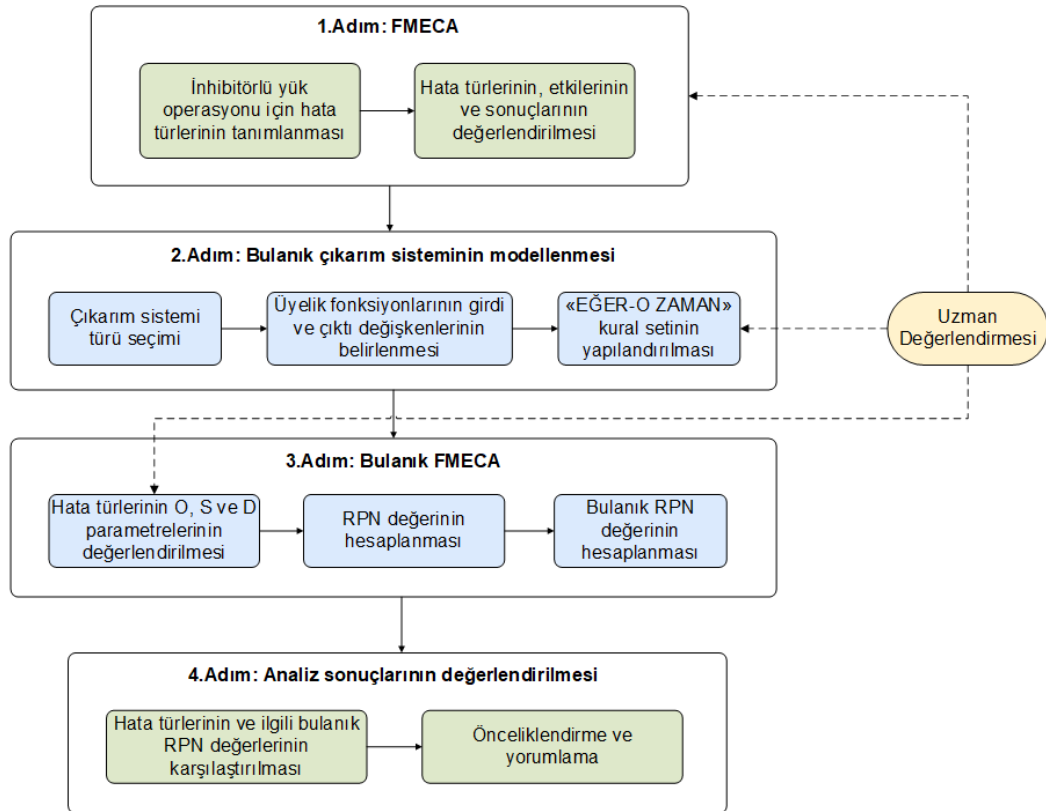
- Girdi değerleri üyelik fonksiyonları üzerinde işlenerek bulanıklaştırılır.
- Bulanık düzendeki girdi değerleri kural yapısının öngördüğü şekilde bulanık çıktılarına dönüştürülür (bulanık çıkarım).
- Son aşama olan durulaştırma işlemi sonrasında nihai çıktı değerleri elde edilir.

Bulanık mantık tekniğinin FIS üzerinden uygulanmasında kural yapısının oluşturulması oldukça kritik bir konudur, zira bu yapısı sonuçları doğrudan etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında FMECA'nın eksikliklerini ele almak ve sonuçların güvenilirliğini artırabilmek için bulanık mantıkta bir çıkarım sistemi modellemesi oluşturulmuştur.

4.3 Bulanık Ortamda Kural Tabanlı FMECA Yaklaşımı

FMECA'nın bölüm 4.1.3'te bahsedilen kısıtlarının olabildiğince azaltılabilmesi ve uygulamanın güvenilirliğinin artırılabilmesi için, FMECA tekniği FIS modeline entegre edilmiştir. Şekil 4.4 tez çalışmasında izlenen yöntemsel yaklaşımı sunmaktadır.



Şekil 4.4 Tezin yöntemsel yaklaşımı: bulanık ortamda kural tabanlı FMECA uygulaması.

Öncelikle kural yapısının araştırma konusu özelinde oluşturulması için uzmanlar ile birlikte inhibitörlü yük operasyonlarının risk değerlendirmesi için bir O, S ve D parametreleri üzerine bir değerlendirme yapılmıştır. Bu parametrelerin farklılaşan önem seviyeleri ve göreceli kombinasyonlarının risklere olan etkileri tartışılarak kural tabanı oluşturulmaya başlanmıştır. Denklem 4.4 taslak bir kural yapısını temsil etmektedir:

$$Kural_n = EĞER O "O_y" ve S "S_y" ve D "D_y" ise, O ZAMAN FRPN "FRPN_y" dir$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, 125 \quad (4.4)$$

Burada, Kural_n, n.kuralı, O_y, S_y ve D_y üç risk parametresi için devreye giren girdi bulanık küme setlerini, FRPN_y ise bu kural tarafından tahmin edilen çıktı değişkenini (risk öncelik sayısını) ifade etmektedir. Denklemde görüleceği üzere kural sayısı n toplamda 125'tir. Kural sayısı, oluşturulabilecek toplam kombinasyon sayısına göre belirlenmiştir. Nitekim O, S ve D olmak üzere 3 değişken bulunmaktadır ve bunlar için atanan üyelik fonksiyonları da 5 seviyeli (çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek) bir biçimde tasarlanmıştır (5³) (Ceylan, 2023; Chanamool & Naenna, 2016).

5. TANKERLERDE ÖZEL GEREKSİNİMLİ YÜK OPERASYONLARI ÜZERİNE RİSK DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde, özel gereksinimli bir yük kategorisi olarak reaksiyon tehlikesi olan yükler üzerine bir risk değerlendirmesi gerçekleştirilecektir. Kendi kendine reaksiyona girerek polimerleşen, dolayısıyla inhibitörlü bir şekilde operasyonu gerçekleştirilen “stiren monomer” yükü için bulanık ortamda kural tabanlı FMECA yaklaşımı ile bir uygulama yapılacaktır.

5.1 Stiren Monomer Karakteristiği ve Operasyonel Tehlikeleri

Stiren monomer sinamen, feniletilen ve vinil benzen olarak da bilip, başta plastik üretim endüstrisi olmak üzere, gıda tesisleri ve ambalajlama, izolasyon sistemleri, tıbbi ekipmanlar, otomotiv, elektronik gibi birçok alanda hammadde olarak kullanılan önemli bir kimyasaldır (Plastics Europe, 2022; Shell, 2023). Tankerler vasıtasıyla taşımacılığında can, mal ve çevre üzerinde tehlikeli olabilecek etkileri sebebiyle operasyonları karmaşık ve riskli olabilmektedir. Çizelge 5.1'de bu yükün temel özellikleri hakkında detaylar sunulmuştur (ILO & WHO, 2021; OSHA, 2022; Plastics Europe, 2022; Shell, 2023).

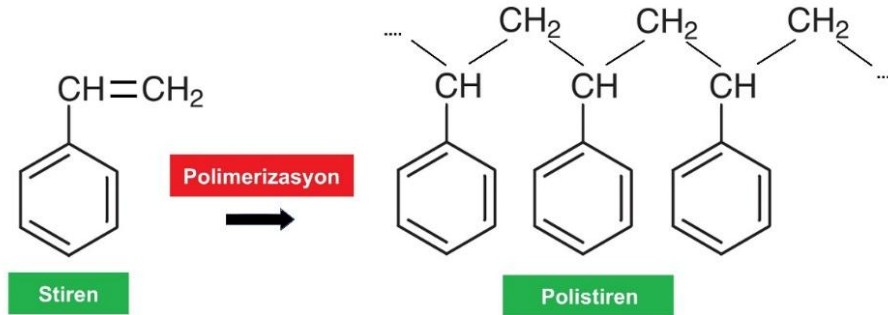
Çizelge 5.1 Stiren monomer yüküne dair temel bilgiler.

Özellik	Bilgi
Ticari adı	Styrene monomer
Diğer adlar	Vinylbenzene, ethenylbenzene, cinnamene, phenylethylene
Molekül formülü	C_8H_8
Fiziksel hali	Sıvı (yağimsı yapı)
Renk	Renksiz, eskiyen yüklerde hafif sarı renkli
Koku sınıfı/Koku eşiği	Aromatik hidrokarbon, tatlı/0.1 ppm
Moleküler ağırlık	104.14 g/mol
Özkütle	0.9059 (at 20°C, ASTM D4052)
Erime/Donma noktası	-31°C
Kaynama noktası	145°C (deniz seviyesi, 1013 hPa)

Çizelge 5.1 (devamı) Stiren monomer yüküne dair temel bilgiler.

Özellik	Bilgi
Parlama noktası	31°C (Abel)
Patlama sınırı	Alt değer: hacimce %0,9 - Üst değer: hacimce %6,8
Buhar basıncı	6.67 hPa (at 20°C)
Suya karışabilirlik	Negatif
Sudaki çözünürlük	300 mg/L
Mevcut tehlikeler	  
Yangın, reaksiyon ve sağlık tehlikeleri	

Stiren monomerin tehlikelilik özelliği başlıca polimerleşme reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Polimerizasyon, Şekil 5.2'de polistiren oluşumuyla örneklediği üzere, monomer yapıdaki basit moleküllerin birleşerek makromoleküle dönüştüğü bir kimyasal tepkimedir. Bu tepkimeler genellikle ısı, ışık veya bir katalizör tarafından tetiklenebilmektedir. Stirenin polimerizasyonu ekzotermik bir reaksiyon olduğu için ortam sıcaklığı da kademeli olarak yükselecektir. Yükselen ortam sıcaklığı nedeniyle maddenin polimerizasyonu da güçlenerek artacak, böylece kontrolsüz, kendi kendine devam eden bir hal alacaktır (Fayet vd., 2022).

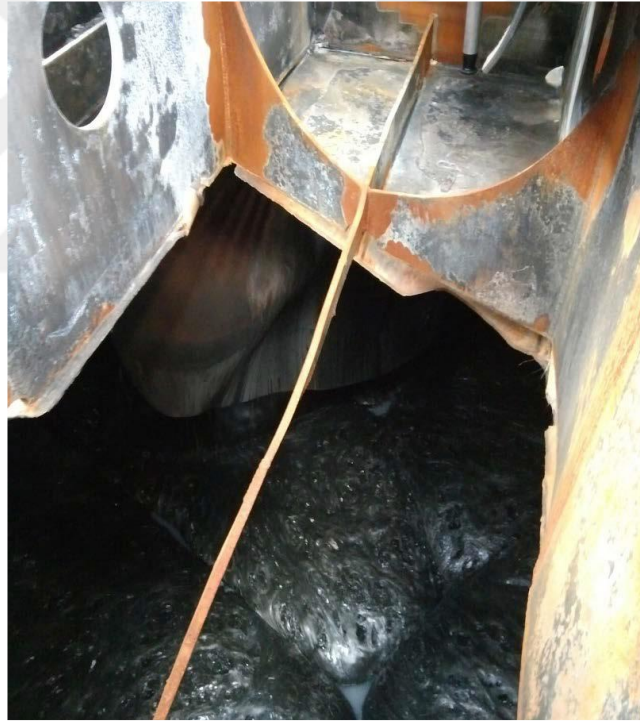


Şekil 5.1 Stiren monomer ve polimer yapısı.

Kendi kendine polimerizasyon özellikle karada üretim endüstrilerinde karşılaşılabilen ve süreçlerdeki hatalar nedeniyle gaz sızıntısı, patlama ve yangın gibi kazalara yol açabilen bir son derece kritik bir olaydır (Mihailidou, 2012; Saada, 2015; Zhao vd., 2020). Bu tehlikenin önlenmesi için stiren monomer tesislerde inhibitörlü koşullar altında işlenmektedir. Nitekim stiren işlenerek üretilen ve günlük hayatta kullanılan ürünler, bu maddenin kontrollü polimerizasyonu sağlanarak üretilmektedir.

Dolayısıyla inhibitör distilasyon, depolama ve taşıma aşamalarında tüm istenmeyen polimerleşmelerin önlenmesi için kullanılmaktadır. İnhibitörlerin endüstrilerdeki kullanım amacı kontrollü bir polimerizasyon sağlamak iken, deniz taşımacılığında bu durum kesinlikle istenmeyen ve olmaması gereken bir durumdur. Polimerleşme reaksiyonu tamamen engellenmeli, yük ile ilgili tüm operasyonlar bitene kadar da bu reaksiyona izin verilmemelidir.

Normal koşullarda şeffaf ve yağimsı ince bir sıvı olan stiren monomerin tank içerisindeki polimerleşme görüntüsü Şekil 5.2’de örneklenmiştir. Şekil, 2019 yılında Güney Kore’nin Ulsan limanında yük operasyonu yapan bir tanker gemisinde stirenin polimerleşmesi sonucu meydana gelen patlama/yangın kazasının resmi raporundan alıntılanmıştır. Söz konusu polimer yapısı, tankın yırtılması sebebiyle güverte üzerinden gözlemlenebilmektedir (MAIB, 2021).



Şekil 5.2 Stiren monomerin tank içerisindeki polimerizasyonu (MAIB, 2021).

Stiren monomerin tanker vasıtasıyla deniz taşımacılığında polimerleşmesinin önüne geçebilmek için inhibitör olarak 4-Tersiyer Butil Katekol (TBC) maddesi kullanılmaktadır (Plastics Europe, 2022). İnhibitör kullanımı boyunca birçok parametreye dikkat edilmesi gerekir. Örneğin TBC'nin oksijen bağımlı bir inhibitör olması, yük içindeki etkinliğinin ortam sıcaklığına bağlı olması, sağladığı korumanın belirli bir süre için geçerli olması gibi durumlar nedeniyle, sadece inhibitör eklemek

yükü korumak, dolayısıyla can, mal ve çevre emniyetini korumak için yeterli olmayabilir. Gemilerde operasyonel gerekliliklerin ve özenli kontrollerin sağlanması ve potansiyel risklerin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

5.2 FMECA Aşaması

Risk değerlendirmesine ilk etapta FMECA yöntemi ile başlangıç yapılmıştır. Bu kapsamda hata türleri belirlenmiş, uzman grubu oluşturulmuş ve hata türleri uzmanlarca O, S ve D parametreleri açısından değerlendirilmiştir.

5.2.1 Hata türlerinin belirlenmesi

Stiren monomer tankerlerde taşınırken içerisinde inhibitör eklenerek emniyetle taşınabilen bir yükür. Ancak yükün optimum düzeyde korunabilmesi için de inhibitör sürecinde dikkat edilmesi gereken birçok faktör mevcuttur. Bu faktörler kargonun yüklenmesi, seyir süresi boyunca izlenmesi, tahliyesi ve tank temizliği gibi aşamalarındaki işlemlerin de daha dikkatli bir biçimde yapılmasını gerektirir. Nitekim bu aşamalarda yürütölen işlerin/görevlerin zorluk ve risk derecesi, yükün türüne ve tehlikelilik durumuna göre azalacak veya artacaktır.

Stiren monomerin inhibitörlü yük operasyonu esnasındaki risklerin değerlendirilebilmesi için öncelikle bilinen kaza nedenleri ve potansiyel nedenler araştırılarak Çizelge 5.2’de ifade edilen toplam 24 hata türü (H) belirlenmiştir. Ayrıca Çizelge 5.3’te de sunulduğu üzere, literatürde stiren monomerin kimyasal özellikleri, uluslararası kılavuz ve kaynaklar, deniz kazası raporları ve uzman görüşlerinden yararlanılarak, her bir hata türünün neden, etki ve sonuçları tanımlanmıştır (CIAIM, 2016; IMO, 2020; LYB, 2019; MAIB, 2021; Ni vd., 2020; Plastics Europe, 2022; Url-4; Zhao vd., 2020).

Çizelge 5.2 Stiren monomer yükünün inhibitörlü operasyonuna ait hata türleri.

Kod	Hata türü
H01	Stiren monomerin ısıtmalı bir tanka bitişik veya yakın bir tanka yüklenmesi
H02	Kargo tankı içerisindeki yapısal kusur
H03	Stiren monomerin/inhibitörün kargo tank malzemesiyle uyumsuzluğu
H04	Kargo tankı içerisinde geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı
H05	Yükleme başlangıcında stiren monomerin yüksek hızda transferi
H06	İnhibitörün miktar bakımından yetersizliği
H07	Düşük kalite/yanlış inhibitörün eklenmesi

Çizelge 5.2 (devamı) Stiren monomer yükünün inhibitörlü operasyonuna ait hata türleri.

Kod	Hata türü
H08	İnhibitörün stiren monomer içerisinde homojen olmayan dağılımı
H09	Yük içerisinde çözünmüş oksijen konsantrasyonunun yetersizliği
H10	Çevre tankların inertlenmesi esnasında hatalı devre düzenlemesi
H11	Stiren monomer tanklarındaki ısıtma devrelerinin etkin durumda olması
H12	Stiren monomer için sıcaklık takibinde kusur/yetersizlik
H13	Kargo pompası koferdamında pörç yapılmaması/yetersiz pörç
H14	Süzdürme devrelerinin kusurlu/yetersiz temizliği (kullanılması halinde)
H15	Kapalı numune alım ekipmanının kullanımı esnasındaki hatalı uygulama
H16	Stiren monomer operasyonunda kişisel koruyucu ekipmanların kusuru/kusurlu kullanımı
H17	Stiren monomer tankının temizliğinde sıcak su uygulanması
H18	Kargo hortumlarında ve manifold parçalarında geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı
H19	Kargo numunesinin kusurlu saklanması
H20	Isıtma kontrol valfi arızası
H21	Kargo tankları içerisindeki pas oluşumları
H22	Kargo tanklarındaki sıcaklık göstergelerinin arızası
H23	İnert gaz sistemi arızası
H24	Basınç/vakum valflerinin arızası

Çizelge 5.3 Hata türlerinin nedenleri, etkileri ve sonuçları.

Kod	Neden	Etki	Sonuç
H01	• Stiren monomer ve gemideki diğer mevcut yükler hakkında yetersiz bilgi. • Isı transferi ihtimalinin göz ardı edilmesi.	• Isının iletimi etkisiyle stiren monomerin sıcaklığı yükselebilir.	• Polimerizasyon • İleri safhalarda patlama ve yangın
H02	• Tanklarda yanlış/eksik kaynak uygulaması. • Yükleme öncesi tank kondisyonunun kontrol edilmemesi.	• Bitişik tanktaki yük stiren tankına sızabilir. • İki farklı ürün birbiriyle reaksiyona girebilir.	• Kontaminasyon • Polimerizasyon
H03	• Geminin özellikleri hakkında yetersiz bilgi. • Uyumluluk kontrolünün ihmal edilmesi/yanlış kontrol.	• Uyumsuzluk sebebiyle reaksiyon gerçekleşebilir.	• Kontaminasyon • Polimerizasyon
H04	• Tankların uygunsuz temizliği. • Tankların temizlik denetiminin yetersiz denetimi/denetimsizliği.	• Kalıntılar ve stiren monomer reaksiyona girebilir.	• Kontaminasyon • Polimerizasyon
H05	• Stirenin tehlikelerine dair bilgi eksikliği. • Statik elektrik tehlikelerine karşı yetersiz hazırlık. • Gemi-terminal arası haberleşmede yetersizlik	• Emniyetli olmayan ortam koşullarında kargonun tanka çarpması nedeniyle yük türbülansı olması elektrostatik boşalmaya neden olabilir.	• Patlama ve yangın
H06	• Sefer süresinin uzaması. • Gemi rotası üzerindeki muhtemel hava ve deniz koşullarının dikkate alınmaması. • İnhibitör miktarının yanlış hesaplanması.	• İnhibitör konsantrasyon değerleri düşebilir. • İnhibitör kargonun tamamı için yeterli koruma sağlayamayabilir.	• Polimerizasyon • İleri safhalarda patlama ve yangın

Çizelge 5.3 (devamı) Hata türlerinin nedenleri, etkileri ve sonuçları.

Kod	Neden	Etki	Sonuç
H07	• Stiren monomerin yapısının ve taşıma gerekliliklerinin anlaşılmaması. • İnhibitörün saklama koşullarının uygunsuz olması.	• Yükün bir kısmı inhibitörle korunamayabilir ve yük reaksiyon verebilir.	• Polimerizasyon • İleri safhalarda patlama ve yangın
H08	• İnhibitörün uygunsuz tekniklerde eklenmesi. • Sefer süresinin uzaması nedeniyle inhibitörün tank dibine çökmesi.	• İnhibitörün lokal azlığı nedeniyle yük ısı uyarısına karşı korumasız kalabilir ve reaksiyon verebilir.	• Polimerizasyon
H09	• Stiren tankının sıcaklığını düşürmek için uygulanan yöntemlerin yetersizliği. • İnhibitörün oksijen bağımlılığı durumu ihmal edilerek tankların inertlenmesi.	• Düşük oksijen seviyesi nedeniyle inhibitörün etkinliği azalacaktır.	• Polimerizasyon • İleri safhalarda patlama ve yangın
H10	• Gemi devre şeması ve özellikleri hakkında bilgi eksikliği. • Personelin dikkatsizliği/Çoklu görevler	• Nitrojen stiren tankına servis edilebilir, azalan oksijen seviyesine bağlı olarak inhibitör etkinliği azalır.	• Polimerizasyon
H11	• Stirenin tehlikeleri hakkında bilgi eksikliği. • Devre testleri sonrası kontrol eksikliği/Dikkat dağınıklığı/Çoklu görevler	• Yükte sıcaklık artışı meydana gelebilir.	• Polimerizasyon • İleri safhalarda patlama ve yangın
H12	• Sıcaklık takibinde zaman aralıklarının uzun olması. • Sıcaklık alarmlarının hatalı ayarlanması. • Sesli alarmların dikkate alınmaması/Alarmların sessiz konuma getirilmesi.	• Yükte meydana gelen sıcaklık artışı fark edilmeyebilir.	• Polimerizasyon • İleri safhalarda patlama ve yangın

Çizelge 5.3 (devamı) Hata türlerinin nedenleri, etkileri ve sonuçları.

Kod	Neden	Etki	Sonuç
H13	• Yetersiz pörç/Pörç yapılmaması. • Kargo pompalarının pörç işlemlerinde zaman aralıklarının uzun olması.	• Farklı maddeler arasında reaksiyon gerçekleşebilir. • İnhibitör konsantrasyonunun azaldığı noktalarda stiren polimerleşmeye başlayabilir. • Çevresel faktörler nedeniyle kalıntı halindeki stirenin sıcaklığı yükselebilir.	• Kontaminasyon • Lokal polimerizasyon • Devre tıkanması, devre kaybı
H14	• Stiren monomerin yapısı hakkında bilgi eksikliği. • Süzdürme devrelerinin temizliği için geç kalınması.	• Çevresel faktörler nedeniyle kalıntı halindeki stirenin sıcaklığı yükselebilir.	• Lokal polimerizasyon • Devre tıkanması, devre kaybı
H15	• Ekipman içerisinde kalıntı ve kirlilik olması. • Ekipmanın hatalı kullanımı. • İşlem hakkındaki bilginin yetersizliği.	• Farklı maddeler arasında reaksiyon gerçekleşebilir. • Kalıntı halindeki stirenin sıcaklığı yükselebilir.	• Ekipman içerisinde kontaminasyon ve polimerizasyon
H16	• Stirenin tehlikeleri hakkında yetersiz bilgi. • Ekipmanların yetersiz sayıda veya kusurlu oluşu.	• Zehirleyici, tahriş edici vb. etkiler.	• Sağlık problemleri, yaralanma
H17	• Hatalı tank temizliği planı. • Stirenin taşıma gereklilikleri hakkında yetersiz bilgi.	• Tanklardaki stiren kalıntılarının sıcaklığı yükselebilir.	• Polimerizasyon
H18	• Kargo hortumlarının ve manifold parçalarının yetersiz temizlenmesi/Temizliğe tabi tutulmaması.	• Kalıntılar stiren ile reaksiyona girebilir. • Kalıntı halindeki stiren kendi kendine reaksiyona girebilir.	• Kontaminasyon • Polimerizasyon

Çizelge 5.3 (devamı) Hata türlerinin nedenleri, etkileri ve sonuçları.

Kod	Neden	Etki	Sonuç
H19	• Stiren monomer numunesinin malzeme ve renk açısından uyumsuz şişelerde saklanması. • Numunelerin ısı, ışık ve potansiyel reaktif diğer yük numuneleri açısından emniyetsiz bir ortamda saklanması.	• Ortamda olması muhtemel ısı etkisi nedeniyle numunelerin sıcaklığı yükselebilir. • Diğer numuneler ile stiren numuneleri arasında reaksiyon başlayabilir.	• Polimerizasyon
H20	• Kusurlu kullanım/Yetersiz bakım. • Yetersiz denetim.	• Isı etkisiyle yükün sıcaklığı yükselebilir.	• Polimerizasyon
H21	• Tank yapısının zamanla eskimesi/Korozyon. • Yetersiz bakım.	• Pas nedeniyle stiren monomer lokal reaksiyonlar başlatabilir.	• Polimerizasyon
H22	• Kusurlu sensörler, yazılım hataları. • Yetersiz bakım ve teknik destek.	• Stiren yükünün sıcaklık değişimleri uygun bir biçimde izlenemeyebilir.	• Polimerizasyon
H23	• Yük operasyonları öncesi kontrollerin ve bakımların yetersizliği.	• İnert gazı içerisindeki oksijen oranının doğru ve emniyetli bir şekilde ayarlanması mümkün olmayabilir. • İnhibitörün etkinliği azalır.	• Polimerizasyon
H24	• Basınç ve vakum valflerinin aktivasyon değerlerinin hatalı ayarlanması. • Valflerin zaman içerisinde yıpranması veya kirlenmesi.	• Valfler emniyetli aralıkta çalışmayabilir. • Tank içerisindeki basınç/vakum kontrolü kaybedilebilir.	• Tank yırtılması

5.2.2 Uzman grubunun oluşturulması

Bir kaza analizi veya risk değerlendirmesi gerçekleştirilmek istendiğinde, istatistiksel ve tarihsel detaylar gibi nicel verilerin varlığı sürece oldukça önemli katkı sağlamaktadır. Sistem veya süreçle ilgili birçok soru işareti ve kullanıcıların endişeleri, sayısal bilgilerle doğru ve tarafsız bir şekilde yanıtlanabilir. Ancak maliyet, zaman ve erişilebilirlik açısından nicel verilere ulaşabilmek bazı durumlarda zorlayıcı olabilmektedir. Bu tür kısıtlı koşullar altında değerlendirme yapabilmek için uzman görüşlerinden yararlanmak günümüzde popüler seçenekler arasındadır. Sistem veya süreçle ilgili riskleri ve istenmeyen durumları değerlendirmek ve karar verebilmek için bilgi ve tecrübe bakımından uygun kişilere danışmak oldukça çözüm odaklı ve kullanışlı bir yaklaşım olabilmektedir. Literatürde petrol, açık deniz, üretim sistemleri, denizcilik, askeriye, finans, tıp gibi çeşitli alanların risk analiz ve karar verme süreçlerine odaklanan birçok araştırma uzman görüşlerinin desteği ile yürütülmüştür (Arıcı vd., 2020; Díaz vd., 2022; Ung, 2019; Wagner, 2017; Wu vd., 2017; Yang & Wang, 2015; Yu vd., 2021).

Bu tez çalışmasında, hata türlerinin tanımlanması, kural yapısının oluşturulması, hata türlerinin O, S ve D parametreleri açısından değerlendirilmesi aşamaları olmak üzere temelde üç aşamada uzman desteğinden yararlanılmıştır. Mesleki yaşamları boyunca ağırlıklı olarak kimyasal tankerlerde çalışmış, söz konusu operasyonlara dair bilgi ve deneyime sahip 6 uzmandan çalışmada destek alınmıştır. Uzmanlar hakkında temel bilgiler Çizelge 5.4'te sunulmuştur.

Çizelge 5.4 Uzmanlara ait temel bilgiler.

Uzman	Yeterlik	Güncel Görevi
U1	Uzakyol 1. Zabit	Kimyasal tankerde 1.zabitlik
U2	Uzakyol Kaptanı	Kimyasal tankerde kaptanlık
U3	Uzakyol 1. Zabit	Kimyasal tankerde 1.zabitlik
U4	Uzakyol 1. Zabit	Kimyasal tankerde 1.zabitlik
U5	Uzakyol 1. Zabit	Petrol tankesinde 1.zabitlik
U6	Uzakyol 1. Zabit	Denizcilik Fakültesinde akademisyenlik

Konu itibarıyla uzman seçiminde hedef profil tankerlerde kargo operasyonları üzerine önemli tecrübeler edinmiş, inhibitörlü yüklerin operasyonuna dair bilgi ve tecrübesi olan denizcilerdir. Bu kapsamda uzman grubu 5'i uzakyol 1.zabiti ve 1 uzakyol kaptanından oluşmaktadır.

Uzman nitelikleri arasında önemli farklar olması durumunda analiz aşamasına gelindiğinde uzmanlar için ağırlık faktörlerinin kullanılması gerekmektedir (Li vd., 2022; Y. Zhou vd., 2016). Ancak bu tez çalışmasında yaşadıkları süreçler bakımından bilgi ve deneyim bakımından benzer seviyede olmaları ve deniz hizmet sürelerinin de yakınlığı sebebiyle uzman görüşleri eşit düzeyli olarak ele alınmıştır.

5.2.3 Hata türlerinin değerlendirilmesi

Uzmanlar 24 adet hata türünü meydana gelme, şiddet ve tespit edilebilirlik kavramları açısından yaptıkları değerlendirmede skor değerleri için bir önceki bölümde Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te sunulmuş olan ölçeklerden yararlanmışlardır. Uzmanların görüşleri Çizelge 5.5'te ifade edilmiştir.

Çizelge 5.5 Uzmanların hata türlerine dair değerlendirmeleri.

Uzman(U)	U1			U2			U3			U4			U5			U6		
Kod	O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D
H01	5	10	4	5	9	4	4	8	4	3	8	5	3	10	4	4	10	5
H02	1	7	6	2	9	6	2	7	6	2	7	6	2	7	6	2	8	7
H03	2	7	5	2	7	4	3	7	2	2	8	4	3	8	3	2	7	4
H04	5	7	7	5	7	6	4	6	6	5	7	8	5	7	6	5	7	6
H05	8	7	3	7	7	3	4	7	4	5	6	3	4	6	3	6	7	3
H06	5	8	7	4	8	7	5	9	6	4	7	6	4	9	6	4	8	7
H07	3	10	6	3	9	6	5	9	6	2	7	8	4	9	6	3	10	5
H08	4	6	5	4	7	5	5	7	6	3	5	6	4	6	6	4	5	5
H09	4	9	7	5	9	6	3	7	7	5	8	3	3	6	7	3	8	5
H10	6	7	5	5	7	6	5	8	5	5	6	4	4	7	6	4	8	5
H11	6	9	7	4	10	7	4	8	5	5	7	5	4	8	6	5	9	5
H12	4	9	5	5	8	4	4	9	3	5	8	3	4	10	3	3	8	4
H13	5	6	4	5	7	5	4	6	2	4	7	4	3	7	5	3	6	4
H14	2	5	2	3	5	3	2	5	2	2	6	2	5	6	5	5	6	5
H15	3	5	5	3	6	3	3	5	2	3	6	5	4	6	4	3	5	3
H16	4	9	2	4	7	2	6	7	3	5	6	2	3	9	2	3	9	2
H17	4	8	2	5	8	2	5	9	2	3	7	3	3	8	2	4	10	3
H18	4	5	6	4	5	4	3	6	5	3	6	4	3	6	5	4	5	4
H19	4	6	3	2	6	2	5	5	2	4	7	5	4	7	3	2	6	3
H20	3	6	6	3	6	5	3	6	4	3	6	4	3	7	4	3	6	5
H21	4	4	2	8	2	2	5	6	3	5	5	4	6	5	4	6	4	3
H22	2	8	3	1	7	3	2	7	4	2	8	3	2	7	4	1	7	2
H23	3	8	2	3	8	1	2	8	3	3	6	3	3	7	2	3	8	2
H24	6	6	2	4	5	2	5	8	2	4	6	2	4	5	2	5	6	3

5.3 Kural Tabanlı FMECA Uygulaması

FMECA yönteminin yönlendirdiği şekilde hata türleri tanımlanıp uzmanlarca değerlendirildikten sonra analize bulanık mantık ortamında devam edilmiştir. Bu

uygulama neticesinde klasik FMECA ile elde edilen RPN değerleri ile bulanık ortamda elde edilen F-RPN değerleri karşılaştırılacaktır.

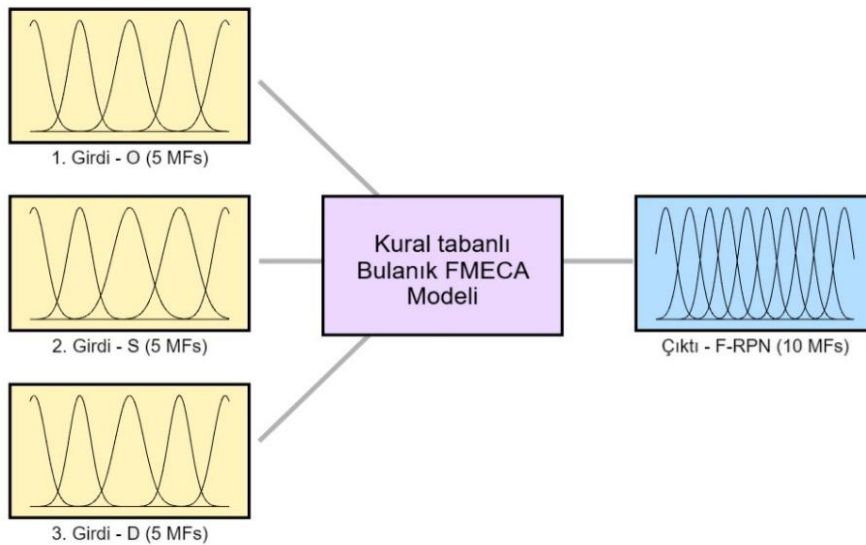
5.3.1 Bulanık çıkarım sisteminin modellenmesi

Bulanık çıkarım sisteminin modellenmesi, model seçimi, girdi ve çıktı değişkenleri için üyelik fonksiyonlarının tanımlanması, modelin çalıştırılarak F-RPN değerinin hesaplanması aşamalarını kapsamaktadır.

5.3.1.1 Model seçimi

Bulanık çıkarım sistemi modellenirken süreç ilk olarak bulanık mantıkta tanımlanmış olan modellerden birinin seçimiyle başlamaktadır. Literatürde sıklıkla kullanılan iki model Mamdani ve Sugeno modelleridir (Ng & Ölçer, 2012).

Bu tez çalışmasında, insan görüşlerine ait ifadeleri işleyebilme imkânı sunan sezgisel karakterdeki Mamdani modeli tercih edilmiştir. Mamdani modeli ayrıca yorumlanabilir bir kural yapısının oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı literatürde uzman sistemlerinin entegre edildiği ve karar verme uygulamalarının yapıldığı çalışmalarda sıklıkla tercih edilen bir modeldir (Almeida vd., 2023). Modelleme ve analiz için MATLAB 2022b uygulamasının bulanık mantık problemleri için geliştirilmiş Fuzzy Logic Designer aracı kullanılmış olup, Şekil 5.3'te ifade edilen model oluşturulmuştur.



Şekil 5.3 İnhibitörlü yük operasyonu için kural tabanlı bulanık FMECA modeli.

Model yapı itibariyle 3 girdi, 1 çıktı ve 125 kuralı içermekle beraber bulanıklaştırma ve durulaştırma işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için minimum girdi (minimum implication), maksimum toplama (maximum aggregation) ve ağırlık merkezi (centroid) teknikleri ile kurgulanmıştır.

5.3.1.2 Girdi ve çıktı üyelik fonksiyonlarının tanımlanması

Model seçimi yapıldıktan sonra, modele girdi ve çıktı olarak sunulacak değişkenler için üyelik fonksiyonlarının tanımlanması gerekmektedir.

Üyelik fonksiyonları bölüm 4.2’de tanımlandığı üzere, bulanık mantıkta matematiksel süreçleri şekillendiren kilit yapılardır. Bir değişkenlerin 0 ile 1 aralığındaki üyelik derecesinin tanımlanmasına yardımcı olur. Üçgen, yamuk, Gauss, sferik ve daha farklı biçimlerde de ifade edilebilmekte olup, her birinin matematiksel süreçlerinde farklılıklar bulunmaktadır.

Literatürde üçgen üyelik fonksiyonları hesaplama kolaylığından dolayı sıklıkla kullanılmaktadır (Chanamool & Naenna, 2016; Li vd., 2010), benzer bir biçimde yamuk üyelik fonksiyonları da birçok araştırmacı tarafından uygulanmaktadır (Aydın vd., 2021; Kahraman vd., 2018; Liu vd., 2022; Zhou vd., 2024).

Öte yandan tez kapsamında yapılan araştırmalarda Gauss üyelik fonksiyonunun da bulanık mantıkta oldukça dikkate değer bir biçimde yapılandırılmış ve üyelik fonksiyonlarını başarılı bir biçimde karakterize edebilen bir yaklaşım olduğu görülmüştür.

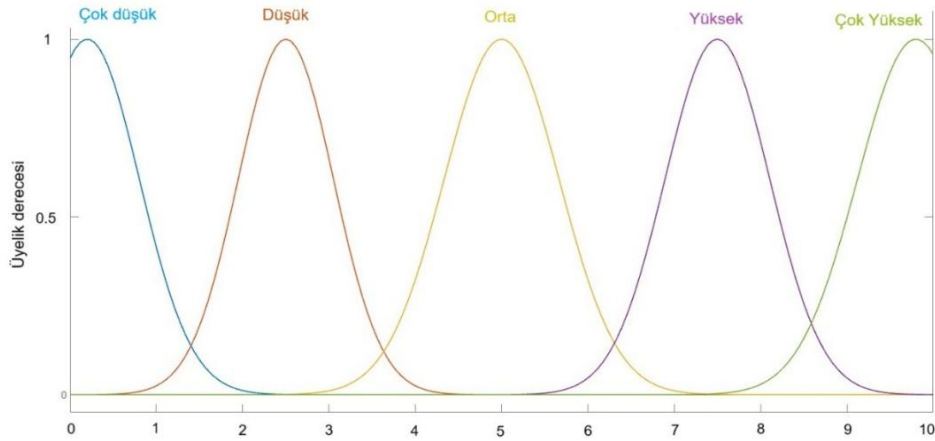
Denklem 5.1’de ifade edildiği üzere, Gauss üyelik fonksiyonunda m ortalama değeri, σ simgesi de standart sapmayı temsil etmektedir (Ahmed & Gu, 2020).

$$\mu_A(x) = e^{\frac{-(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

Literatürde çeşitli alanlarda kullanılan Gauss üyelik fonksiyonlarının (Elsayed, 2009; George vd., 2019), risk analizi çalışmalarında da uzman görüşlerini başarılı bir biçimde ortaya koyduğu dikkat çekmektedir (Ceylan, 2023; Pan vd., 2020; Renjith vd., 2018). Ayrıca, bazı çalışmalarda üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından daha kullanışlı olduğuna da değinilmektedir (Abdussamie vd., 2018; Ahmed & Gu, 2020). Matematiksel olarak bahsi geçen diğer üyelik fonksiyonlarına göre daha karmaşık olmasına rağmen Gauss yapısının özellikle FMEA ve FMECA çalışmalarında O, S ve

D parametrelerindeki küçük değişimlere karşı daha uyumlu tepki verdiği görülmüştür. Bu özelliğinden dolayı deniz taşımacılığı da dahil olmak üzere risk değerlendirmesi çalışmalarında kullanılabilecek uygun ve etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Abdussamie vd., 2018; Ahmed vd., 2022; Ahmed & Gu, 2020, Ceylan, 2023; Iliadis vd., 2010; Kumar Akula vd., 2022; Markowski & Mannan, 2008).

Bu kapsamda FMECA’da ele alınan O, S ve D parametreleri modele girdi değişkeni, RPN değeri ise çıktı değişkeni olarak tanımlanmıştır. Ancak anlam karışıklığı olmaması adına bu değer bulanık RPN yani F-RPN olarak isimlendirilmiştir. Girdi üyelik fonksiyonları Şekil 5.4’te ifade edildiği üzere 5 kademeli, çıktı üyelik fonksiyonları ise Şekil 5.5’te görülebileceği gibi çıktıların daha detaylı ve net dağılımını gösterebilmek adına 10 kademeli olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 5.4 Girdi değişkenleri için üyelik fonksiyonları.



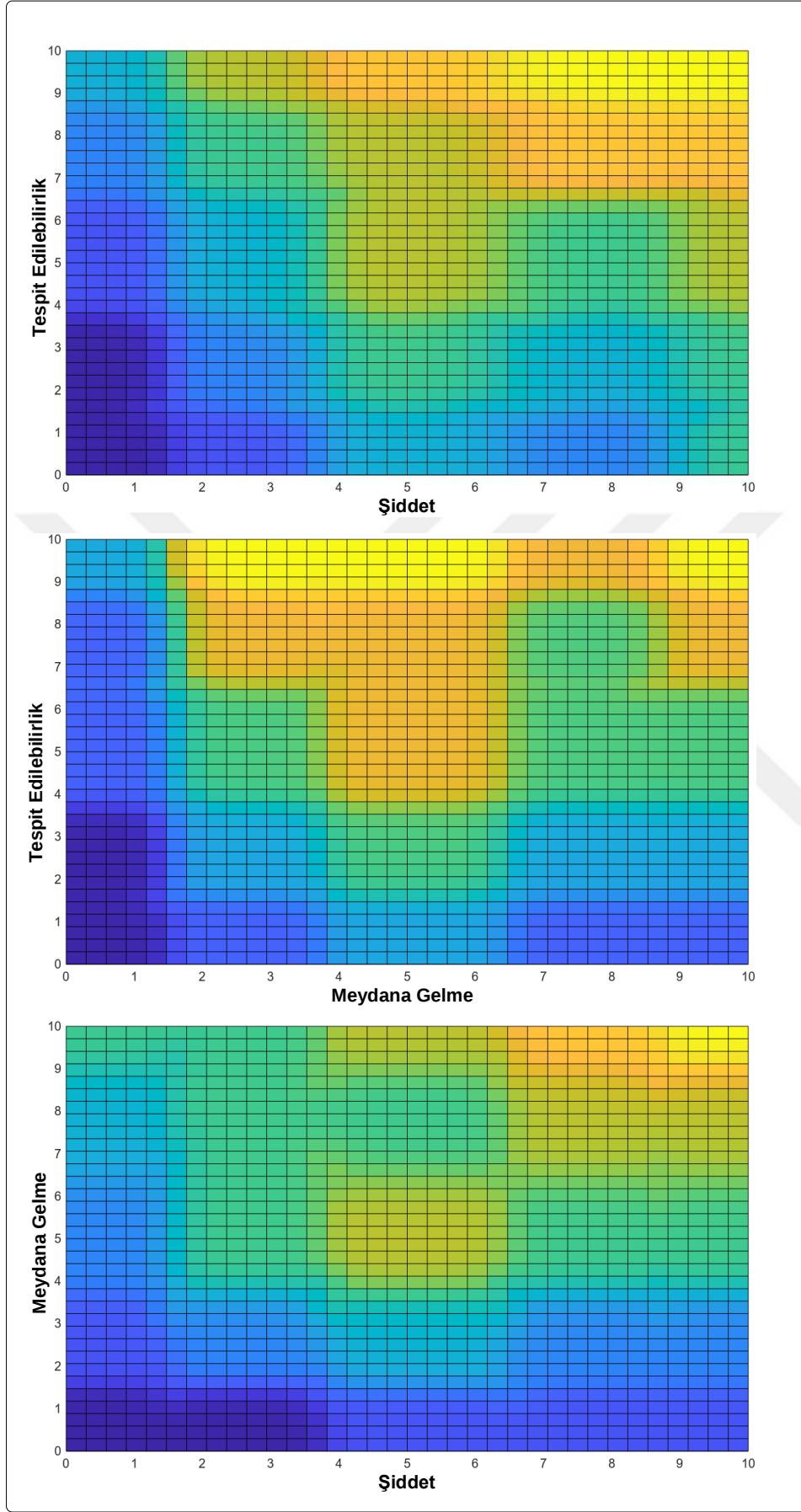
Şekil 5.5 Çıktı değişkeni için üyelik fonksiyonları.

5.3.1.3 Kural tabanının oluşturulması

Girdi ve çıktı değişkenleri için üyelik fonksiyonlarının tanımlanmasının ardından, modelin analizi yaparken baz alacağı kural tabanının oluşturulması gerekmektedir. Bu tez çalışmasının konusuna uygun olarak Bölüm 4.3'te ifade edildiği üzere, O, S ve D parametrelerinin göreceli kombinasyonlarının F-RPN'yi ne şekilde etkilediğini yansıtabilecek biçimde, uzmanların düşünceleri de dikkate alınarak toplam 125 adet kural oluşturulmuştur. Operasyonel riskler göz önünde bulundurularak hazırlanan kurallar arasından üç farklı kombinasyon örneği şu şekilde sıralanabilir:

- *EĞER* O “çok düşük” ve S “çok yüksek” ve D “çok düşük” ise, *O ZAMAN* F-RPN “yüksek düşük” tür.
- *EĞER* O “orta” ve S “yüksek” ve D “düşük” ise, *O ZAMAN* F-RPN “düşük orta” dır.
- *EĞER* O “çok yüksek” ve S “çok yüksek” ve D “yüksek” ise, *O ZAMAN* F-RPN “çok yüksek” tir.

Şekil 5.6 oluşturulan kural yapısının iki boyutlu görünümünü gösterirken, renk değişimleri O, S ve D parametrelerinin ikili kombinasyonlarının F-RPN üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Mavi renk F-RPN çıktısının düşüklüğünü, sarı renk ise yüksekliğini ifade etmektedir.



Şekil 5.6 Kural yapısının iki boyutlu yüzey görünümü.

5.3.1.4 Durulaştırma aşaması

Girdi ve çıktı üyelik fonksiyonlarının ve kural yapısının süreci sonucunda elde edilen çıktı halen dilsel biçimde olup belirsiz ve bulanık bir haldedir. Bulanık çıkarım olarak adlandırılan bu süreçten sonra, çıktıların anlamlı ve kullanılabilir hale getirilebilmesi için durulaştırma (defuzzification) işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Bai & Wang, 2006). Durulaştırma ile net bir F-RPN değeri elde edebilmek için literatürde kullanılan algoritmalar arasından yaygın kullanımı olduğu için merkez noktası/ağırlık merkezi olarak da bilinen centroid tekniği kullanılmıştır. Bu teknik için Denklem 5.2'deki formül kullanılmaktadır (Chanamool & Naenna, 2016; Mandal & Maiti, 2014).

$$ACentroid = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (5.2)$$

Denklemde, bulanık kümenin ağırlık merkezi A ile ifade edilir ve denge noktası x eksenini boyunca a-b noktaları aralığında belirlenmektedir.

5.3.2 F-RPN hesaplanması ve risklerin önceliklendirilmesi

Bulanık çıkarım sistemi içim model tamamlandıktan sonra modelin çalıştırılabilmesi için O, S ve D (girdi değişkenlerin) skorlarının sisteme tanıtılması gerekmektedir. Bunun için öncelikle bu skorların geometrik ortalamaları alınmıştır. Denklem 5.3, Denklem 5.4 ve Denklem 5.5 her bir değişkene uygulanan geometrik ortalama işlemlerini formüle etmektedir:

$$O_{ortalama} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (5.3)$$

$$S_{ortalama} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (5.4)$$

$$D_{ortalama} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (5.5)$$

Denklemlerde simgelenen n değeri uzman sayısını, x değeri ise bir uzman tarafından belli bir hata türünün tek bir değişkenine atanan skoru ifade etmektedir. Uzmanların atadığı skor değerlerinin çarpılması ve kök işlemi yapılması ile bir değişkenin geometrik ortalaması (nihai değeri) bulunur. Bu işlemler toplam 24 hata türünün O, S ve D değerleri için tek tek hesaplanır. Tüm nihai değerler bulanık ortamda kurulan modele tanıtılarak sistemin F-RPN çıkarımını yapması sağlanır.

Çizelge 5.6 tüm hata türleri için O, S ve D parametrelerinin geometrik ortalama değerlerini sunmaktadır. Ayrıca Denklem 4.1’de ifade edildiği üzere, bu değerlerin çarpılması sayesinde hesaplanan klasik RPN değerleri, bulanık ortamda kural tabanlı yaklaşım ile yapılan analiz sonucunda elde edilen F-RPN değerleri ve bunların hiyerarşik sıraları da çizelgede yer almaktadır.

Çizelge 5.6 Bulanık mantıkta kural tabanlı analiz sonucunda elde edilen F-RPN değerleri ve hiyerarşik sıralaması.

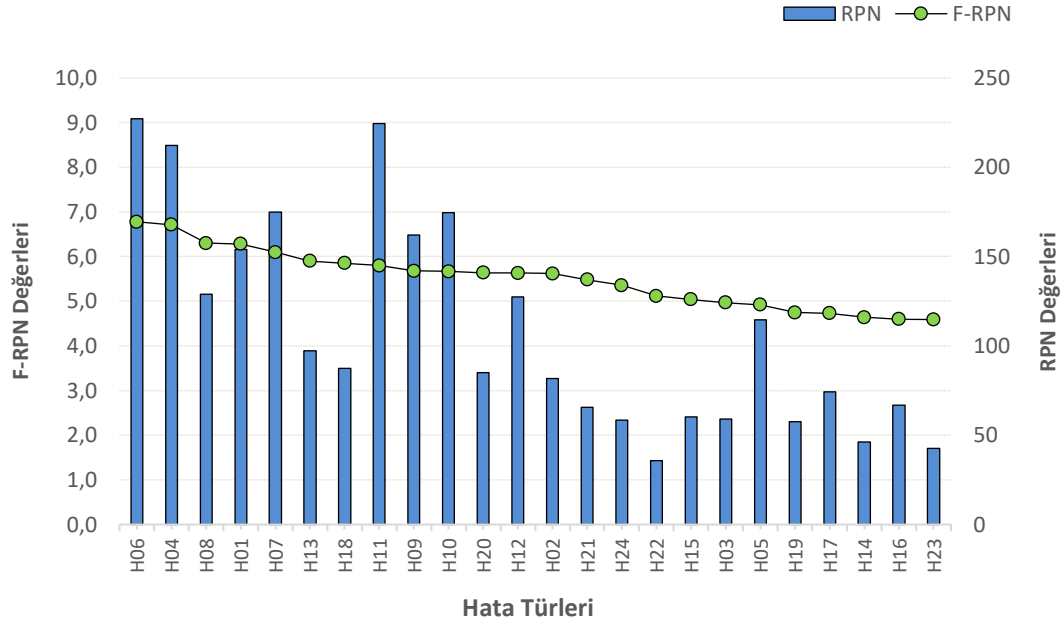
Hata Kodu	Ortalama Değerler			RPN	F-RPN	F-RPN Sıralaması
	O	S	D			
H01	3,91	9,12	4,31	153,87	6,28	4
H02	1,78	7,46	6,16	81,87	5,62	13
H03	2,29	7,32	3,53	59,07	4,97	18
H04	4,82	6,82	6,46	212,27	6,71	2
H05	5,47	6,65	3,15	114,54	4,92	19
H06	4,31	8,14	6,48	227,23	6,78	1
H07	3,20	8,94	6,11	174,84	6,10	5
H08	3,96	5,94	5,48	128,83	6,30	3
H09	3,73	7,76	5,60	162,11	5,68	9
H10	4,78	7,13	5,12	174,72	5,67	10
H11	4,61	8,45	5,77	224,50	5,80	8
H12	4,11	8,64	3,60	127,52	5,63	12
H13	3,91	6,48	3,84	97,39	5,90	6
H14	2,90	5,48	2,90	46,20	4,64	22
H15	3,15	5,48	3,49	60,12	5,04	17
H16	4,04	7,74	2,14	66,80	4,60	23
H17	3,91	8,28	2,29	74,22	4,73	21
H18	3,46	5,48	4,61	87,47	5,85	7
H19	3,30	6,13	2,85	57,62	4,75	20
H20	3,00	6,16	4,61	85,14	5,64	11
H21	5,54	4,11	2,88	65,59	5,48	14
H22	1,59	7,32	3,09	35,85	5,12	16
H23	2,80	7,46	2,04	42,65	4,59	24
H24	4,61	5,92	2,14	58,43	5,36	15

F-RPN değerlerinin hiyerarşik sıralaması kullanıcılara riskler hakkında önceliklendirmeye yardımcı olan bir göstergedir. Bu bağlamda Çizelge 5.7 stiren monomer yükü özelinde inhibitörlü yük operasyonlarında karşılaşılabilecek riskli durumların önceliklendirmesini yansıtmaktadır. Sonuçların değerlendirilmesine tezin bir sonraki bölümünde yer verilmiştir.

Çizelge 5.7 F-RPN değerlerine göre hata türlerinin önceliklendirilmesi.

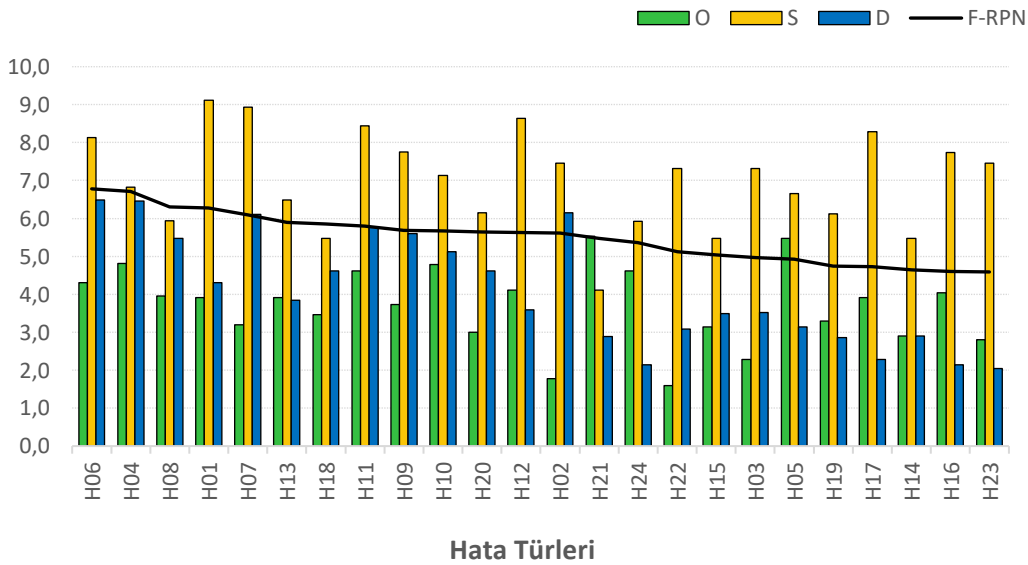
Öncelik	Kod	Hata Türü
1	H06	İnhibitörün miktar bakımından yetersizliği
2	H04	Kargo tankı içerisinde geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı
3	H08	İnhibitörün stiren monomer içerisinde homojen olmayan dağılımı
4	H01	Stiren monomerin ısıtmalı bir tanka bitişik veya yakın bir tanka yüklenmesi
5	H07	Düşük kalite/yanlış inhibitörün eklenmesi
6	H13	Kargo pompası koferdamında pörç yapılmaması/yetersiz pörç
7	H18	Kargo hortumlarında ve manifold parçalarında geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı
8	H11	Stiren monomer tanklarındaki ısıtma devrelerinin etkin durumda olması
9	H09	Yük içerisinde çözünmüş oksijen konsantrasyonunun yetersizliği
10	H10	Çevre tankların inertlenmesi esnasında hatalı devre düzenlemesi
11	H20	Isıtma kontrol valfi arızası
12	H12	Stiren monomer için sıcaklık takibinde kusur/yetersizlik
13	H02	Kargo tankı içerisindeki yapısal kusur
14	H21	Kargo tankları içerisindeki pas oluşumları
15	H24	Basınç/vakum valflerinin arızası
16	H22	Kargo tanklarındaki sıcaklık göstergelerinin arızası
17	H15	Kapalı numune alım ekipmanının kullanımı esnasındaki hatalı uygulama
18	H03	Stiren monomerin/inhibitörün kargo tank malzemesiyle uyumsuzluğu
19	H05	Yükleme başlangıcında stiren monomerin yüksek hızda transferi
20	H19	Kargo numunesinin kusurlu saklanması
21	H17	Stiren monomer tankının temizliğinde sıcak su uygulanması
22	H14	Süzdürme devrelerinin kusurlu/yetersiz temizliği (kullanılması halinde)
23	H16	Stiren monomer operasyonunda kişisel koruyucu ekipmanların kusuru/kusurlu kullanımı
24	H23	İnert gaz sistemi arızası

Şekil 5.7 klasik FMECA ve bulanık ortamda kural tabanlı FMECA uygulamalarının sonuçları arasındaki farkı yansıtmaktadır.



Şekil 5.7 Hata türlerinin RPN ve F-RPN değerlerinin karşılaştırılması.

Şekilde görülebileceği üzere, hata türlerine göre RPN ve F-RPN seviyeleri farklılaşmaktadır. Aslında yüksek risk teşkil edebilecekken klasik FMECA ile alt sıralara düşen hata türleri F-RPN ile yorumlandığında ön plana çıkabilecektir. Bu sayede analiz daha gerçekçi sonuçlar ortaya koyacaktır.



Şekil 5.8 Hata türlerine ait O, S ve D parametrelerinin ortalama değerleri ve F-RPN seviyeleri.

Şekil 5.8 uzmanların her bir hata türünün parametreleri için atadıkları ortalama değerleri ifade etmektedir. Şekle ayrıca tüm hata türleri için hesaplanan F-RPN değerleri de entegre edilmiştir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Stiren monomer yükü örneği üzerinden inhibitörlü yük operasyonu için uygulanan bulanık ortamda kural tabanlı FMECA analizi sonucunda, bulanık risk öncelik değerleri en yüksek hata türleri H06, H04, H08, H01, H07, H13, H18 ve H11 olarak bulunmuştur.

H06 “İnhibitörün miktar bakımından yetersizliği”, operasyonel risk analizinde 227.22 RPN ve 6.78 F-RPN değerleriyle en kritik hata türü olarak bulunmuştur. Hem klasik FMECA hem de kural tabanlı analiz sonucunda bu hata türü birinci önceliği elde etmiştir. Şekil 5.8’de görülebileceği üzere, uzmanlar tarafından yapılan skor atamalarında bu hata türü, şiddet ve tespit edilebilirlik parametrelerinde yüksek değerler almıştır, dolayısıyla klasik RPN hesabına göre yüksek bir skor elde etmesi doğaldır. Ayrıca bu öncelik, bulanık FMECA modelinde işletilen kural sisteminin de doğal bir yansıması olmuştur, nitekim kural yapısı şiddet parametresini öne çıkaracak şekilde hazırlanmıştır. Yüksek şiddet - yüksek tespit edilebilirlik kombinasyonu böylelikle en yüksek F-RPN değerini hesaplamıştır. H06, inhibitör kullanımıyla doğrudan ilgili olduğundan, operasyonel anlamda en kritik hata türüdür. Bu hata, yüke eklenmeden önce inhibitörün gerekli miktarının yanlış hesaplanmasından kaynaklanabilir. Geminin bulunduğu çevresel koşullar ve sefer süresi arasındaki ilişkinin muhakkak göz önünde bulundurulması gerekir. Rota üzerinde beklenen hava ve deniz suyu sıcaklıkları, stiren monomer yüklemesinden önce kontrol edilmeli ve inhibitör miktarı bu faktörler dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Temel olarak inhibitör hesabı, sefer boyunca karşılaşılabilecek maksimum sıcaklık değerine, sefer süresine ve sefer süresinin uzama ihtimaline (beklenmeyen olay faktörü) göre yapılmalıdır. Her koşulda yeterli olması niyetiyle inhibitörün fazla miktarda eklenmesi ise emniyetli bir çözüm olmayabilir. Fazla miktarda inhibitör katılmasının stirenin yük alıcıları için istenmeyen, kimyasal açıdan kullanışsız bir hammaddeye dönüşmesine neden olabileceği unutulmamalıdır (Plastics Europe, 2022). Ek bir çözüm olarak ihtiyaç duyulduğunda kullanılmak üzere gemide ek inhibitör bulundurulabilir. Fakat bu tedbir

ancak tüm ilgililerin resmi onayı mevcut ise ve gemide bu işlemi yapacak personel sürece dair bilgi sahibi ise gerçekleştirilmeli ve uygulanmalıdır.

En yüksek risk değerli ikinci hata türü H04 “Kargo tankı içerisinde geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı” dır. H04'ün F-RPN değeri 6.71 olup, ilk sıradaki hata türü ile arasında az bir değer farkı bulunmaktadır. Bu hata, tankların yanlış veya yetersiz temizlenmesi nedeniyle meydana gelebilirken; tankların yükleme öncesi temizlik denetiminin özenli bir biçimde yapılmaması da hatayı destekleyen bir diğer sebep olabilir. Kalıntı olarak nitelendirilen maddeler, tank içerisinde bir önceki yükten kalan atıklar, kullanılan temizlik maddeleri ve deniz suyuna bağlı tuz kalıntıları olabilmektedir (Şenol & Yaşlı, 2021). Bu yabancı maddeler sebebiyle stiren monomer kontamine olabildiği gibi reaksiyon da verebilir, dolayısıyla H04'ün şiddeti orta ile yüksek seviyeler arasında puanlanmıştır. Meydana gelme olasılığı orta, tespit edilebilirlik ise orta-yüksek bandında puanlanmıştır. Tank temizliği tankerlerde sık gerçekleştirilen ve çok aşamalı bir süreç olduğu için zorlu operasyonlardan biri olarak kabul edilir. Tankerlerin parsel yükler taşıyabilmesi sebebiyle, farklı yük taşımış tankların temizliğini aynı zamanda yapmak da bu zorluğu artıran bir diğer faktördür. Kalıntıları görsel olarak tespit etmek ve tankın her noktasının temizliğinden emin olmak mümkün olmayabilir, bu nedenle personelin bu hata türünün tespitinde başarısız olması olağan bir durumdur. H04'ün mümkün olduğunca önlenmesi için, potansiyel gecikmeler göz önünde bulundurmalı, gerekirse yeniden temizlik sürecine de zaman tanınmalı, dolayısıyla ilk tank temizleme işlemine en erken/uygun bir zamanda başlanmalıdır. Ayrıca temizlik yönteminin de doğru seçilmesi gerekmektedir (ChemServe, 2022). Temizlikten sonra tanklar uygun ışık kondisyonu eşliğinde görsel olarak incelenmeli, devamında çeşitli noktalardan alınan örnekler ile temizlik testleri (wall-wash test) uygulanmalıdır.

H08 “İnhibitörün stiren monomer içerisinde homojen olmayan dağılımı” 6.30'luk bir F-RPN değeri ile üçüncü sırada yer alan hata türü olmuştur. Klasik RPN değeri baz alınır ise bu hata türü öncelik bakımından daha geride kalacaktır, ancak tez çalışmasında uygulanan kural yapısı neticesinde, parametrelerin görece kombinasyonları öne çıktığı için yüksek F-RPN değeri ön plana çıkmıştır. Nitekim uzmanlar tarafından inhibitör süreçleri kritik bir konu olarak değerlendirildiği için öncelik sırasının uygun olduğu kanaatine varılmıştır. H08 inhibitörün tank içine yanlış bir biçimde eklenmesi veya sefer esnasında sırasında tank dibine çökmesi nedenlerinden kaynaklanabilmektedir.

Tanklardaki homojen olmayan inhibitör dağılımının, stiren yükünde lokal polimerleşmelerin başlaması ve yer yer sıcaklık anormalliklerine yol açması beklenmektedir. Bu da zaman geçtikçe daha büyük tehlikelere neden olabilir. H08'in önlenmesi için inhibitör yüke uygun tekniklerle karıştırılmalıdır. Ayrıca sefer süresine bağlı olarak, gemi tasarımı da elverişli ise yükün sirkülasyonu gerçekleştirilebilir (Plastics Europe, 2022). Yine de bu uygulama yalnızca şirket ve üçüncü tarafların resmi onayı doğrultusunda gerçekleştirilmelidir.

Öncelik bakımından dördüncü sırayı alan H01 “Stiren monomerin ısıtmalı bir tanka bitişik veya yakın bir tanka yüklenmesi” 6.28 F-RPN değeri ile ön plana çıkan kritik hatalardan biridir. Nitekim stiren monomerin sıcaklık artışına maruz kalması son derece tehlikeli olaylara neden olabilir. Öte yandan, H01'in yalnızca klasik RPN değeri dikkate alınsaydı bu hata türü yeterince ön plana çıkmayacağı için, temsil ettiği risk bir miktar göz ardı edilebilirdi. Ancak uzmanların bu hata türünün şiddet parametresine verdikleri değerlerin ortalaması, diğer tüm hata türlerinin üzerindedir. Bu durum risk bakımından oldukça yararlı ve kritik bir bakış açıdır. Modelde işletilen kural sisteminin şiddet parametresine verdiği önem sayesinde de H01 yüksek F-RPN değerli hata türlerinden biri olmuştur. Bu hata türü temel olarak stiren monomerin ve gemideki diğer yüklerin doğası hakkında bilgi eksikliğinden kaynaklanabilmektedir. H01 meydana geldiğinde, komşu tanklardan stiren tankına arasında kademe kademe ısı transferi gerçekleşir, buna bağlı olarak polimerleşme, kontrolsüz kendi kendine reaksiyonlar ve patlama gibi felaket boyutunda kazalar meydana gelebilir (MAIB, 2021). H01'in olabildiğince önlenmesi için tankların yüklemesi özellikle ısıtma gereksinimi olan kargolar da mevcut ise, bunun önemli bir tehdit olabileceği kabul edilerek ve tüm yüklerin gereksinimleri göz önünde bulundurularak planlanmalıdır. Stiren, hem yan yana komşuluk (bitişiklik) hem de köşeden komşuluk durumunda olduğu ısıtmalı tanklardan mümkün olduğunca en uzak noktalara tanklara yüklenmelidir. Çevre tanklarının sıcaklığı 35°C'den yüksek olmamalıdır, nitekim bunun için sektörde "en az bir tank" ayrımının bile yeterli bir tedbir olmayabileceği görülmüştür (MAIB, 2021). Ayrıca, güverte tankları yüklemeye elverişli olsa bile bu tanklara stiren monomer yüklenmesinden kaçınılmalıdır. Bu tanklar güverte üzerine konumlanmış olup tüm dış yüzeyleri hava ile temas halinde ve güneş ışığına direkt olarak maruz kalabilmektedir. Bu çevresel etkiler nedeniyle yük oldukça kısa süre içerisinde ısınıp reaksiyon verebilir (IMO, 2020).

H07 “Düşük kalite/yanlış inhibitörün eklenmesi” F-RPN değeri 6.10 olan ve öncelik bakımından üst sıralarda olan bir diğer hata türüdür. Şiddet parametresi uzmanlar tarafından yüksek değerle puanlanan hata modları arasında yer almaktadır. H07'nin nedenleri, stiren monomerin temel özelliklerinin ve ihtiyaç duyduğu inhibitörün (TBC) bilinmemesi veya inhibitörün depolama koşullarının uygunsuz olmasıdır. TBC'nin saklanması ve yük için hazırlanması esasında kıyı otoritelerinin sorumluluğundadır. H07 ve benzeri hataların önüne geçilmesi için, yükleme başlamadan önce, inhibitörün türü ve özellikleri, üretici bilgileri ve talimatları, sefer süresi, sıcaklık değerleri ve oksijen konsantrasyonu ile ilgili gereklilikler (inhibitörün etkinlik sınırları) bir sertifika ile belgelenmelidir (IMO, 2020). Ayrıca yükleme başladıktan sonra da gemi ve terminal tanklarından örnekler alınarak inhibitörlerin etkinliği ve kalitesi karşılaştırılarak gemide emniyetli bir şekilde taşınabileceği güvence altına alınabilir.

Bir diğer hata türü H13 “Kargo pompası koferdamında pörç yapılmaması/yetersiz pörç” 5.90'lık F-RPN değeriyle risk bakımından üst sıralardadır. Kargo pompası devrelerinde kalan eski yük kalıntıları yeni yükle karışıp yükün kalitesini bozabilir, yükler uyumsuz ise tepkime gerçekleşmesi de muhtemel sorunlar arasındadır. Dolayısı ile kargo pompası devrelerinde kalan sıvının pörç edilmesi (boşaltılması ve temizlenmesi) gerekmektedir. Benzer şekilde, stiren monomerin tahliyesinden sonra, pörç işleminin yapılmaması/yetersiz yapılması durumunda pompa devreleri tıkanabilir. Bu hata sebebiyle stirenin devrelerde polimerleşebileceği unutulmamalıdır. Söz konusu küçük yarıçaplı devrelerde donmuş stireni çözebilmek mümkün olmayabilir, buna bağlı olarak da devre kaybedilebilir. Kargo pompası ve bileşenlerinde meydana gelebilecek sorunlar, aynı zamanda bağlı olduğu kargo tankının da kullanılamamasına yol açabilmektedir. Bu hatadan kaçınmak için, pompaların koferdamları yük operasyonlarından hemen sonra ve sefer sırasında düzenli olarak kontrol edilmelidir (UK P&I Club, 2018), pörç işlemleri pompa üreticisinin talimatlarına uygun şekilde gerçekleştirilmelidir. Bu eylem aynı zamanda pompa sisteminde sızdıran conta gibi istenmeyen olayları erkenden tespit etmeye ve daha büyük arızaların önlenmesine de katkı sağlayabilir.

H18 “Kargo hortumlarında ve manifold parçalarında geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı” F-RPN değeri 5.85 olan bir başka hata türüdür. Yük hortumlarının ve manifold parçalarının temizlenmesi, temizlik operasyonunun aslında oldukça kritik

bir parçasıdır. Hem gemi personeli hem de sörveyler tarafından tankların temiz ve yüklemeye hazır olmasına büyük önem verilirken, yük hortumları ve manifold parçalarına gerekli dikkat verilemeyebilmektedir. H18 bu nedenle inhibitörlü yük operasyonları gerçekleştirilirken önemsenmeyen hatalardan biri olarak kabul edilebilir. Bu yanılığı destekler biçimde 87.47 olan klasik RPN değeri de H18'in risk öncelik değerini ne yazık ki azaltmaktadır. Bu hata türünün önemi ise bulanık kural tabanlı FMECA yaklaşımı sayesinde hesaplanan yüksek F-RPN değeri ile anlaşılmaktadır. H18 nedeniyle polimerleşme gibi istenmeyen sonuçlarla karşılaşılabilirdiğinden, uzmanlar hatanın şiddet parametresini yüksek puanlamışlardır. H18'i olabildiğince önlemek ve riskleri azaltabilmek için, yük operasyonlarında kullanılan tüm hortumlar ve manifold parçaları yükleme işlemi sonrasında işaretlenip diğerlerinden ayrılmalıdır. Tank temizliği sürecinde bu unsurlar gemi manifolduna bağlanmalı ve detaylı yıkamaya dahil edilmelidir. Özellikle temiz varsayılan bir manifold parçası stiren monomer transferinde kullanılacaksa, operasyon öncesinde iç yüzeyinden örnekler alınıp test edilerek temizlik durumları kontrol edilebilir.

Bir diğer hata türü H11 “Stiren monomer tanklarındaki ısıtma devrelerinin etkin durumda olması” olup, F-RPN değeri 5.80 olarak hesaplanmıştır. Uzmanlar tarafından şiddet parametresinin yüksek bir şekilde puanlandığı hata türlerinden biridir. Isıtma devreleri kargo tanklarının alt kısmında bulunan ve ısıtma gerektiren kargolar için uygun taşıma koşulları sağlayan sistemlerdir. Ancak stiren monomer ısıdan uzak tutulması gereken bir yük olduğu için bu devrelerin kapalı konumda olması gerekmektedir. Özellikle, gemide aynı anda farklı yükler de elleçleniyorsa ve bazı yüklerin ısıtma gereksinimi mevcut ise, bu hatanın tespiti için gemi personeli kusursuz bir kontrol sağlayamayabilir. Stiren yüklü tankların ısıtma devreleri aktive olduğunda yük ısınacak, yük içerisindeki inhibitörün ömrü hızla azalacak ve polimerleşme reaksiyonu tetiklenecektir (IMO, 2020; Plastics Europe, 2022). Yaşanabilecek olumsuzluklar düşünülerek H11'in gerçekleşme ihtimali küçümsenmemelidir. Bu hatadan kaynaklı risklerin önlenmesi adına, öncelikle kargo operasyonunda görevli tüm personelin yük özellikleri, yük & istifleneceği tank numarası ve devre planları ile ilgili detaylara hâkim olmalıdır. Yükleme işleminin başlamasından önce ısıtma devreleri için tam izolasyon sağlanmalıdır. Stiren monomer gibi hassas yükler elleçleneceği zaman ısı ile ilgili işlemlerin, doğru planlanmış inhibitörlü koruma süreci kadar önemli bir faktör olduğu unutulmamalıdır. Parsel yükler taşınacağı zaman

yüklerin tüm özellikleri, tehlikelilik durumları ve gereksinimleri birlikte ele alınmalı ve yükleme planı buna göre gerçekleştirilmelidir.

Bu hata türlerini takiben inhibitörlü yük operasyonlarında diğer hata türleri de dikkate değer olup, muhtemel nedenleri, etkileri ve sonuçları tartışılmalıdır. H09 “Yük içerisinde çözünmüş oksijen konsantrasyonunun yetersizliği” 5.68'lik bir F-RPN değeri ile önceliklendirilmiştir. Bu hata tankların inertlenmesinden kaynaklanabilir. Stiren monomer için kullanılan TBC oksijene bağımlı olduğundan etkin olabilmesi için yük içerisinde çözünmüş oksijene ihtiyaç duymaktadır. Öte yandan, kimyasal tankerlerde tehlikeli yükler elleçlenirken tanklarda yanıcı atmosferi önlemek ve aynı zamanda yükün saflığını bozmamak için nitrojen gazı kullanılmaktadır (Elidolu vd., 2024a). Ancak stiren monomerde istisnai durumlar söz konusudur. Stiren yapı itibarıyla yanıcı bir yük olmasına rağmen inertli kondisyonda taşınacak yüklerden biri olarak görülmemelidir. Normal koşullarda inertlemeye ihtiyaç duymadan tankların gaz fri bir biçimde yükleme yapılması yeterlidir. Sefer süresince sıcaklıklarda kritik artışlar meydana gelmezse ve diğer emniyet gereklilikleri de yerine getirilmiş ise, tank içerisinde yanıcı bir ortam oluşmayacaktır. Ancak özellikle sıcak iklimlerde, yükte kontrol edilemeyen sıcaklık artışları olduğunda inhibitör etkinliği azalacağı için tanka nitrojen verilmesi söz konusu olabilir. Ancak bu işlemde uygulanan teknik son derece önemlidir (Elidolu vd., 2024a). Nitrojenin tankın alt yüzeyinden verilerek yük içerisinde geçmesine müsaade etmek, inhibitörün ihtiyaç duyacağı çözünmüş oksijeni kademe kademe yok edeceği için, tehlikenin boyutu artacaktır. Dolayısıyla nitrojenin yük üzerindeki atmosfere sınırlı bir miktarda örtü şeklinde servis edilmesi daha emniyetli bir işlem olabilir. Ancak her türlü koşulda, tanktaki oksijen içeriği inhibitörün etkinlik sınırlarının altına (tavsiye edilen ortalama hacimde %4) düşmemelidir (Shell, 2023). Bu işlem acil bir durum gereksinimi olarak nitelendirilmeli, yalnızca şirket ve ilgili taraflarla resmi istişare eşliğinde gerçekleştirilmelidir. Buna ek olarak, sıcak iklimlerde stiren tanklarının sıcaklığını azaltmak için güverteyi su ile soğutmak da belli ölçüde faydalı bir çözüm olabilir.

Bir diğer hata türü 5.63 F-RPN değeri ile H12 “Stiren monomer için sıcaklık takibinde kusur/yetersizlik” tir. Seyir süresi boyunca stiren monomerin sıcaklık değişimleri kritik olaylara neden olabileceğinden, uzmanlar bu hatanın gerçekleşmesi halindeki şiddetini yüksek bir puanla değerlendirmişlerdir. Yüklemeden tahliye anına kadar sıcaklık takibinin yapılması gemi personelinin son derece önemli bir sorumluluğudur.

Bu hata ancak gemi personelinin yük ve kargo takip sistemlerinin kullanımı konusuna dair bilgi eksikliklerinin giderilmesiyle önlenabilir. Sistemin alarm ayarlaması, ses uyarıları da dahil olmak üzere doğru kullanılması ve verilerin doğru bir biçimde yorumlanması gerekmektedir. Ayrıca stiren yüklü tanklara ek olarak komşu ve köşe tankların durumunu da düzenli ve sık aralıklarla kontrol etmek sefer boyunca kazaların önlenmesine yardımcı olabilir (MAIB, 2021). Öncelik bakımından H12 ile benzer bir biçimde orta seviyelerde olan H02 “Kargo tankı içerisindeki yapısal kusur” da stiren tankında komşu tanklardan yük karışması nedeniyle kontaminasyon gibi istenmeyen durumlara yol açabilir (CIAIM, 2016). Uzmanlar O parametresini düşük puanlamış olsalar bile, şiddetine dair endişe ve tespit edilmenin zorluğu dolayısıyla riskin orta düzeyde önceliklendirilmiştir. Bu riskin önlenmesi için yükleme yapılmadan önce tüm tanklar herhangi bir çatlaklık vb. kusurları tespit etmek için kontrol edilmelidir. H24 “Basınç/vakum valflerinin arızası” da 5.36 F-RPN değerine sahip, öncelik derecesi çok yüksek olmasa da değinmeye değer bir hata türü olabilir. Uzmanlar bu hatanın şiddet parametresini orta-yüksek düzeyde puanlamışlardır. Basınç/vakum (PV) valfleri yük operasyonlarında son derece kritik bir işleve sahiptir, tank içerisindeki atmosfer basınç dengesi bu sistem ile sağlanır. Ancak inhibitörlü yükler elleçlenirken, yük buharında inhibitör bulunmaması nedeniyle havalandırma devrelerinde ve alev tutucularda polimerleşebileceği unutulmamalıdır. Ayrıca denizin durumu dolayısıyla seyir esnasında sallanma sebebiyle yükün az miktarlarda bu devrelere çıkması da söz konusu olabilir. Bu bölgelerde kalan yükte inhibitör ekinliği zaman içerisinde azalacağından dolayı yükün polimerleşmesi de olası bir durumdur. Söz konusu riskleri mümkün olduğunca önleyebilmek için PV devreleri tıkanıklığa karşı operasyonlar öncesinde test edilmeli, emniyetli şekilde çalışmayan PV devrelerinin bakımı yapılmadan operasyona başlanmamalıdır.

Stiren monomer gemi personelinin belirli süreçlerde maruz kalabileceği ve sağlık açısından olumsuz etkileri olabilen bir kimyasaldır (OSHA, 2022). Personelin yük ile temas edebileceği muhtemel durumlar yük numunelerinin alınması ve kargo pompalarının pörç işlemleri gibi süreçlerdir. Bu tür temaslardan mümkün olduğunca kaçınmak için numune işlemleri kapalı bir şekilde gerçekleştirilir. Ayrıca kişisel koruyucu ekipmanların doğru şekilde kullanılması sağlıkla ilgili tehlikelerin önlenmesine yardımcı olabilir. Yeterli kişisel korunma sağlanamadığında yüke maruz kalınması sonucu stiren monomer göz, cilt ve solunum yolları üzerinde toksik ve tahriş

edici etkiler bırakabilir (Shell, 2023). Bu durum analiz esnasında H16 “Stiren monomer operasyonunda kişisel koruyucu ekipmanların kusuru/kusurlu kullanımı” hata türü ile temsil edilmiştir. H16, kişisel koruyucu ekipmanların nicelik bakımından eksikliği veya kusurlu oluşu nedeniyle gerçekleşebilmektedir. Kural tabanlı bulanık FMECA analizinde uzmanlar H16'nın meydana gelme ve tespit oranlarını düşük seviyelerde değerlendirdikleri için öncelik değeri düşük seviyelerde hesaplanmıştır. Uzmanlar, inhibitörlü operasyonel süreçlerdeki hata türlerine kıyasla H16'dan kaçınmanın daha kolay olduğu kanısında olsalar da stiren monomerin sağlık tehlikelerini vurgulamak şiddet faktörü) konusunda hemfikir olmuşlardır. Kargo operasyonlarında görev alacak tüm personelin yükün sağlık tehlikelerine karşı bilgilendirilmesi, koruyucu ekipman kullanımı konusunda eğitilmesi, gemide yeterli miktarda ve fonksiyonelliğini koruyan ekipmanların bulundurulması risklerin önlenmesinde uygulanabilecek tedbirler arasındadır.

Çizelge 6.1’de F-RPN değerlerine göre risk bakımından yüksek öncelikli hata türleri için uygulanabilecek risk kontrol seçeneklerine yer verilmiştir.

Çizelge 6.1 Hata türleri için uygulanabilecek risk kontrol seçeneklerinin değerlendirilmesi.

Kod	Hata Türü	Risk kontrol seçenekleri
H06	Inhibitörün miktar bakımından yetersizliği	• Sefer süresinin dikkate alınması, sefer süresinin uzama ihtimaline karşı inhibitör hesabına dikkat edilmesi. • Gemi rotası boyunca hava durumu ve deniz sıcaklığı tahminlerine dair bilgi alınması. • Şirket ve yük ilgililerinin onayı dahilinde gemide fazladan inhibitör madde bulundurulması, gemide inhibitör için emniyetli saklama koşullarının sağlanması ve personelin sürece dair eğitilmesi.
H04	Kargo tankı içerisinde geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı	• Tank temizliğine uygun bir zamanlama ile başlanması. • Doğru tank temizliği yönteminin uygulanması. • Tankların uygun aydınlatma koşulları eşliğinde görsel denetimi. • Tank içerisinde çeşitli bölgelerden alınan örneklerin temizlik açısından wall-wash testleri ile kontrol edilmesi.

Çizelge 6.1 (devamı) Hata türleri için uygulanabilecek risk kontrol seçeneklerinin değerlendirilmesi.

Kod	Hata Türü	Risk kontrol seçenekleri
H08	İnhibitörün stiren monomer içerisinde homojen olmayan dağılımı	• İnhibitörün üretici firma önerilerine uygun tekniklerle ve resmi gözetim altında yüke karıştırılması. • Sorumlu personelin inhibitör eklenmesi sürecine dair eğitilmesi. • Gerekli resmi onay dahilinde ve hava koşullarının elverişli olması durumunda, inhibitörün batma durumuna karşı yükün sirküle edilmesi.
H01	Stiren monomerin ısıtmalı bir tanka bitişik veya yakın bir tanka yüklenmesi	• Sefer süresini ve çevresel koşulları dikkate alarak, stiren monomerin ısıtmalı yüklerden mümkün olduğunca uzak tanklara istiflenmesi. • Emniyet bilgi formları ve uluslararası gereklilikler incelenerek stiren monomer ve gemideki diğer yükler hakkında bilgi edinilmesi. • Personelin eğitilmesi, toplantılarda sektörel kazalara dair bilgilendirici paylaşımların yapılması.
H07	Düşük kalite/yanlış inhibitörün eklenmesi	• İnhibitörün kıyı otoritelerince, üretici firmasının tavsiyelerine uygun olarak sıcaklık, nemlilik ve ışıklandırma koşullarında saklanması. • İnhibitör etkinliğinin ve yükün polimer kontrolünün yapılması için gemiden ve terminalden örnekler alınması ve analiz edilmesi.
H13	Kargo pompası koferdamında pörç yapılmaması/yetersiz pörç	• Yük operasyonları sonrasında ve seyir esnasında düzenli aralıklar kargo pompalarının pörç edilmesi. • Gerektiğinde teknik destek sağlanabilmesi için pörç işlemlerine dair şirkete raporlama yapılması.
H18	Kargo hortumlarında ve manifold parçalarında geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı	• Manifold parçalarının operasyon esnasında markalanması, kullanılmayan ekipmanlardan ayrımının yapılması. • Doğru tank temizliği yöntemleri kullanılarak, temizlik sürecine kargo hortumlarının ve manifold parçalarının da dahil edilmesi. • Mevcut test setleri aracılığıyla söz konusu parçaların temizliğinin test edilmesi.
H11	Stiren monomer tanklarındaki ısıtma devrelerinin etkin durumda olması	• Körleme ile tam izolasyonun sağlanması. • Limanda stiren monomer yüklemesi öncesinde her bir tanktaki ısıtma devrelerinin kontrol edilmesi ve konumlarının doğrulanması.

Çizelge 6.1 (devamı) Hata türleri için uygulanabilecek risk kontrol seçeneklerinin değerlendirilmesi.

Kod	Hata Türü	Risk kontrol seçenekleri
H09	Yük içerisinde çözünmüş oksijen konsantrasyonunun yetersizliği	• Sıcak iklimlerde birincil emniyet uygulaması olarak şirket onayı eşliğinde güvertenin soğutulması işlemleri. • Stiren içerisindeki oksijen içeriği dikkate alınarak, şirket onayı eşliğinde nitrojen örtüsü işleminin uygulanması.
H10	Çevre tankların inertlenmesi esnasında hatalı devre düzenlemesi	• Gemi özelliklerine dair (devreler dahil olmak üzere) personelin bilgilendirilmesi ve eğitimi. • Görevlerin planlanması, uygulamaların doğrulanması ve kontrol edilmesi.

7. SONUÇ

Günümüzde gemilerin emniyetli işletimi konusunda yapısal, teknik ve emniyet gereksinimlerini tanımlayan uluslararası kurallar yürürlükte olsa da seyir, manevra ve yük operasyonları gibi süreçlerde çatışma, çatma, patlama ve yangın gibi kazalar meydana gelebilmektedir. Tüm gemi tiplerinde bu kazalar görülebilen, tankerlerde gerçekleşmesi durumunda etkileri daha büyük çaplı olayların meydana gelebildiği görülmüştür. Birçok can kaybıyla sonuçlanan, mal kayıplarına ve büyük çevre kirliliklerine neden olan kazalar neticesinde, zaman içerisinde denizcilik sektöründe risk analizine verilen önem artmış, çeşitli gemi operasyonlarına dair risklerin değerlendirmesi konusunda ilgili otoriteler ve denizciler teşvik edilmeye başlanmıştır.

Yük operasyonları tankerlerde kaza riski taşıyan önemli süreçler arasında yer almaktadır. Taşınan yüklerin yangınlık, patlayıcılık, aşındırıcılık, zehirleyicilik gibi karakteristikleri nedeniyle gemi bünyesinde insan sağlığı başta olmak üzere birçok unsur bu tehlikelere maruz kalabilmektedir. Bu tehlikeli özelliklerden biri olarak reaktivite, emniyetsiz koşullar altında yürütülen yük operasyonlarında son derece yıkıcı sonuçlara sebep olabilmektedir. Reaktif yükler su, hava ve farklı yükler ile tepkime verebildiği gibi, bu reaksiyonu kendi kendilerine de başlatabilmektedirler. Kendi kendine reaksiyon, aynı zamanda polimerleşme olarak da bilinip yük operasyonları esnasında yükün inhibitör adı verilen reaksiyon önleyici maddeler eşliğinde taşınmasını gerektirir. Esasında bir emniyet önlemi olarak kabul edilen inhibitörlü yük operasyonlarının kendi içerisinde açığa çıkarılmayı ve analiz edilmeyi gerektiren çok sayıda risk faktörü bulunmaktadır. Bu amaçla bu tez çalışması, kendi kendine reaksiyona giren ve inhibitör gereksinimi olan yüklerin operasyonel riskleri üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışma kapsamında günümüz kimya ve plastik endüstrilerinin temel hammaddelerinden biri olan stiren monomer yükü üzerinden bir risk değerlendirmesi uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Stiren monomerin yükleme, seyir gereklilikleri, tahliye ve tank temizleme süreçleri dikkate alınarak operasyonda tehlikeli olabilecek durumların incelenmesi yapılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak uluslararası kurallar ve kılavuzlar, bilimsel çalışmalar ve kaza

raporları incelenmiş, süreçle ilgili bilgi ve tecrübe sahibi uzmanlardan destek alınmıştır. Araştırmanın ve analizin güvenilir bilimsel bir yöntem çatısı altında gerçekleştirilmesi için literatür taraması yapılmış, çeşitli sektörlerin risk analizi uygulamalarında kullanışlı bir yöntem olan FMECA yönteminde karar kılınmıştır. İlk etapta stiren monomer yük operasyonunda karşılaşılabilecek 24 adet hata türü tanımlanmıştır. İkinci aşamada bu hatalar denizcilik uzmanları tarafından meydana gelme, şiddet ve tespit edilebilirlik parametreleri açısından değerlendirilmiş ve riskleri önceliklendirmeye yardımcı olan RPN değerleri hesaplanmıştır. Ancak RPN hesabı literatürde birtakım eksik yanları olan bir matematiksel işlem olarak görülebilmektedir. FMECA'nın klasik yaklaşımıyla hesaplanan RPN'de risk parametrelerini eşit önemde kabul etmek kullanıcıları yanlış yönlendirebilmekte, asıl gerekli hata türleri için önlemler alınmasını geciktirebilmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında risk analizini desteklemek ve sonuçların güvenilirliğine katkıda bulunmak için FMECA yöntemi bulanık ortamda kural tabanlı bir yaklaşımla entegre edilerek uygulanmıştır.

Uygulama için MATLAB 2022b yazılımı kullanılarak bir bulanık çıkarım sistemi modellenmesi yapılmıştır. Modelde FMECA'da kullanılan O, S, D parametreleri girdi değişkenleri, RPN ise çıktı değişkeni olarak tanımlanmıştır. Bu değişkenleri temsil etmesi için literatürde risk analizi uygulamalarında başarılı sonuçlar verdiği ispatlanan Gauss üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir. Ayrıca uzman görüşleri ile birlikte EĞER-O ZAMAN biçim yapısı kullanılarak 125 adet kural oluşturulmuştur. Kural tabanlı çıkarım modeli tasarımı, bu tez çalışmasının en önemli kısımlarından biri olup yöntemle özgünlük katmaktadır. Nitekim kural yapısı inhibitörlü yük operasyonları risklerinin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi için uzmanlar ile birlikte kurgulanmıştır. O, S ve D parametrelerinin her bir farklı kombinasyonu üzerinde düşünülerek, bu bileşimlerin RPN üzerindeki etkileri şekillendirilmiştir. Özellikle şiddet parametresi söz konusu süreçler için kritik bir gösterge olduğundan, kural yapısında buna dikkat edilerek operasyonel risklerin daha net ve gerçekçi bir şekilde analiz edilmesi sağlanmıştır.

Analizde risk öncelik değerleri bulanık ortamda hesaplandığından bulgular F-RPN değerleri baz alınarak yorumlanmıştır. Buna göre en yüksek öncelikli hata türleri 6.78 F-RPN değeri ile “İnhibitörün miktar bakımından yetersizliği”, 6.71 ile “Kargo tankı içerisinde geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı”, 6.30 değeri ile “İnhibitörün

stiren monomer içerisinde homojen olmayan dağılımı” ve dördüncü sırada 6.28’lik F-RPN değeri ile “Stiren monomerin ısıtılmalı bir tanka bitişik veya yakın bir tanka yüklenmesi” hataları olmuştur. Bu hatalar temel olarak inhibitör kullanımının kalitesi, miktarı ve stiren monomer içindeki dağılımı ile ilgilidir. Buna ek olarak ısı etkisi ve tanklarda önceki yüke veya yabancı maddelere ait kalıntıların varlığı da kritik hatalar arasında yer almıştır. Bu hatalar yük operasyonunu ciddi şekilde tehlikeye atabilen, polimerleşmeyi hızlandıran, patlama ve yangın gibi büyük kazalara neden olabilen risk faktörleridir. Analizde ek olarak “Kargo pompası koferdamında pörç yapılmaması/yetersiz pörç” hatasının 5.90’lık bir F-RPN değeri ile dikkat gerektiren hata türlerinden biri olduğu görülmüştür. Söz konusu küçük devrelerde stirenin polimerleşme riski olması, buna bağlı olarak da devre kaybı gibi geri döndürülemez sonuçlarla karşılaşılması muhtemeldir. Benzer şekilde, 5.85 F-RPN değerli “Kargo hortumlarında ve manifold parçalarında geçmiş yük/tank temizliği maddesi kalıntısı” yük operasyonları esnasında kontaminasyona ve polimerleşmeye neden olabilecek diğer bir hata türü olduğu görülmüştür.

Analize göre, bazı hata türlerinde RPN ve F-RPN sıralamalarının farklı olduğu görülebilmektedir. Bu durum esasında tez çalışmasında amacına uygun ve gerçekçi bir analiz yapıldığını göstermektedir. Tezde uygulanan kural tabanlı yaklaşım, risk parametrelerinin önemini yorumlayarak risklerin önceliklendirmesinde farklı ve özgün bir bakış açısı sağlamıştır. Bu nedenle, klasik bir biçimde hesaplanan RPN yerine F-RPN’yi dikkate almak, risklerin daha güvenilir bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Tez çalışmasında belirlenen hata türlerinin önceliklendirilmesine ek olarak, yüksek risk değerli hatalar için uygulanabilecek risk kontrol seçenekleri önerilmiştir. Stiren monomerin deniz yoluyla emniyetli taşınabilmesi amacıyla uygulanabilecek emniyet tedbirleri her bir hata türünün gerçekleşme nedeni, etkisi ve sonuçları ile birlikte tartışılarak yorumlanmıştır. Bu nedenle tezde uygulanan modelin ve analiz sonuçlarının, denizcilik endüstrisinde emniyet anlayışına ve uygulamalarına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Tezin konusu itibarıyla tehlikeli yük operasyonlarına odaklanan bu analiz örnek teşkil edecek şekilde, modelin denizcilik şirketleri, güverte zabitleri ve zabit adayları tarafından olumlu bir şekilde yorumlanması amaçlanmaktadır. Nitekim modelde oluşturulan kural yapısı, riski oluşturan temel unsurların farklı önem seviyelerine sahip olması gerektiği fikriyle

oluşturulmuştur. Özellikle tankerlerdeki tehlikeli yük operasyonlarının karmaşıklığı ve meydana gelebilecek kazaların yıkıcı etkileri hatırlandığında, şiddet parametresinin daha fazla dikkate değer bir risk bileşeni olduğu anlaşılabacaktır. Bu hususu dikkate alarak kurgulanan model sayesinde önemli risklerin göz ardı edilmesi önlenilecek, risklerin kontrolü için ayrılan finansal kaynaklar boşa çıkmayacaktır. Dolayısıyla tezde uygulanan yöntem stiren monomer ve benzeri kritik yüklerin operasyonel sürecinde uygulanabilecek ve kullanışlı sonuçlar ortaya koyabilecektir.

Tez aynı zamanda akademik literatüre de önemli katkılar sağlamaktadır. Yapılan literatür araştırmasına göre, stiren monomer ve benzeri tehlikeli kimyasallara dair çalışmalar çoğunlukla kimya ve biyoloji alanlarında yoğunlaşmakta olup, bu tür maddelerin tankerler vasıtasıyla deniz taşımacılığı risklerinin incelenmesi, literatürde denizcilik gibi çok yönlü endüstriler için faydalı bir perspektif sağlayacaktır. Literatür taraması devamında, denizcilik alanında yapılmış risk değerlendirmesi çalışmalarında ise yük operasyonlarına dair yayınların azlığı dikkat çekerken, var olan çalışmaların yükün türüne ve özel gereksinimli operasyonlara odaklanmadığı görülmüştür. Özellikle kendi kendine reaksiyon veren stiren monomer gibi yükler için inhibitörlü yük operasyonları ile ilgili çalışmalara rastlanmamıştır. Bu bağlamda tezin hem denizcilik endüstrisine hem de denizcilik literatürüne değerli katkılar sunması, okuyucuların tehlikeli ve özel gereksinimli yük işlemlerine dair emniyet farkındalığını artırması hedeflenmektedir.

Tezde uygulanan çalışmanın faydaları ve literatüre olan katkılarının yanında birtakım eksiklikleri ve geliştirilmeye açık yönleri mevcuttur. İnhibitörlü yük işlemleri ile ilgili tehlike arz eden durumlar detaylı bir araştırma ile belirlenmiş olsa da farklı gemilerde farklı yapı özellikleri olması dolayısıyla bu tehlikelerin nicelik bakımından çeşitlendirilmesi mümkün olabilir. Ayrıca uygun insan güvenilirliği analiz yöntemleri ile birlikte insan faktörünün operasyonlardaki etkisi üzerine ek çalışmalar yürütülebilir. Bunun yanında söz konusu süreçlerde bilgi ve tecrübesinden yararlanan uzmanların sayısının artırılması ile modele daha fazla girdi eklenmesi, elde edilen F-RPN değerlerinin optimum seviyelere ulaştırılması da sağlanabilecektir. Tezde görüşleri alınan uzmanlar deniz tecrübesi ve konu ile ilgili benzer seviyedeki bilgi ve deneyimleri sebebiyle eşit önemde kabul edilmiştir. Uzman sayısının artırılması ve tecrübe seviyesinin farklılaşması durumunda, uzmanlar için önem ağırlıkları uygulanması mümkün olabilir. İlerleyen süreçte tezde kullanılan modelin farklı tehlike

kategorilerindeki yükler için de entegre edilmesi ve söz konusu yönler açısından geliştirilmesi hedeflenmektedir.





KAYNAKLAR

- Abdel-Basset, M., & Mohamed, R.** (2020). A novel plithogenic TOPSIS- CRITIC model for sustainable supply chain risk management. *Journal of Cleaner Production*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119586>
- Abdussamie, N., Zaghwan, A., Daboos, M., Elferjani, I., Mehanna, A., Su, W.,** (2018). Operational risk assessment of offshore transport barges. *Ocean Eng.* 156, 333–346. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.006>.
- Abrishami, S., Khakzad, N., Hosseini, S. M., & van Gelder, P.** (2020). BN-SLIM: A Bayesian Network methodology for human reliability assessment based on Success Likelihood Index Method (SLIM). *Reliability Engineering and System Safety*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106647>
- ABS** (2020). *Guidance Notes on Risk Assessment Applications for the Marine and Offshore Industries*. American Bureau of Shipping. New York, USA.
- Ahmed, S., & Gu, X. C.** (2020). Accident-based FMECA study of Marine boiler for risk prioritization using fuzzy expert system. *Results in Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100123>
- Ahn, S. Il, Kurt, R. E., & Akyuz, E.** (2022). Application of a SPAR-H based framework to assess human reliability during emergency response drill for man overboard on ships. *Ocean Engineering*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111089>
- Ahn, Y. J., Yu, Y. U., & Kim, J. K.** (2021). Accident Cause Factor of Fires and Explosions in Tankers Using Fault Tree Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 844. <https://doi.org/10.3390/jmse9080844>
- Akyuz, E.** (2015). Quantification of human error probability towards the gas inerting process on-board crude oil tankers. *Safety Science*, 80, 77–86. [10.1016/j.ssci.2015.07.018](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.018).
- Akyuz, E., & Celik, E.** (2015). A fuzzy DEMATEL method to evaluate critical operational hazards during gas freeing process in crude oil tankers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 38, 243–253. [10.1016/j.jlp.2015.10.006](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.10.006).
- Akyuz, E., & Celik, M.** (2015). A methodological extension to human reliability analysis for cargo tank cleaning operation on board chemical tanker ships. *Safety Science*, 75, 146–155. [10.1016/j.ssci.2015.02.008](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.008).

- Akyuz, E., & Celik, M.** (2016). A hybrid human error probability determination approach: The case of cargo loading operation in oil / chemical tanker ship. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43, 424–431. 10.1016/j.jlp.2016.06.020.
- Almeida, R.S., Vasconcelos da Silva, F., Vianna, S.S.V.** (2023) Combining the bow-tie method and fuzzy logic using Mamdani inference model. *Process Saf. Environ. Protect.* 169, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.005>
- Arici, S. S., Akyuz, E., & Arslan, O.** (2020). Application of fuzzy bow-tie risk analysis to maritime transportation: The case of ship collision during the STS operation. *Ocean Engineering*, 217(March). 10.1016/j.oceaneng.2020.107960.
- Arslan, O.** (2008). Quantitative evaluation of precautions on chemical tanker operations. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol 87-2, 113–120. 10.1016/j.psep.2008.06.006
- Aydin, M., Camliyurt, G., Akyuz, E., & Arslan, O.** (2021a). Human and Ecological Risk Assessment: An International Analyzing human error contributions to maritime environmental risk in oil / chemical tanker ship. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 27(7), 1838–1859. 10.1080/10807039.2021.1910011
- Aydin, M., Arici, S. S., Akyuz, E., & Arslan, O.** (2021b). A probabilistic risk assessment for asphyxiation during gas inerting process in chemical tanker ship. *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 532–542. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.038>
- Baalisampang, T., Abbassi, R., Garaniya, V., Khan, F., & Dadashzadeh, M.** (2018). Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation. *Ocean Engineering*, 158(April), 350–366. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.022>
- Bai, Y., Wang, D.** (2006). Fundamentals of Fuzzy Logic Control — Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications. In: Bai, Y., Zhuang, H., Wang, D. (eds) *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications. Advances in Industrial Control.* Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-469-4_2
- Balaraju, J., Raj, M.G., Murthy, C.S.** (2019). Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine—A case study. *Journal of Sustainable Mining* 18 (4), 257–268.
- BASF** (2024). *Caustic Soda 25% safety data sheet.* ID no. 30154808/SDS_GEN_00/EN. BASF SE, Germany.
- Bolbot, V., Theotokatos, G., Boulougouris, E., Vassalos, D.** (2020). A novel cyber-risk assessment method for ship systems, *Safety Science*, Volume 131, p. 104908, doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104908.
- Carl Roth** (2024). *Sulphuric acid Safety data sheet.* Article number: 4623, version: 6.1 (en). Carl Roth GmbH + Co. KG, Germany.

- Castillo, O., & Melin, P.** (2014). A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control. *Information Sciences*, 279, 615–631. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.015>
- Ceylan, B. O.** (2023) Shipboard compressor system risk analysis by using rule-based fuzzy FMEA for preventing major marine accidents, *Ocean Engineering*, 272, 113888, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113888>.
- Chanamool, N., & Naenna, T.** (2016). Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department. *Applied Soft Computing Journal*, 43, 441–453. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.01.007>
- Chemserve** (2022). *Dr. Verwey's Tank Cleaning Guide*, 11th edition. ChemServe GmbH.
- Chowdhury, N., Katsikas, S., Gkioulos, V.** (2022). Modeling effective cybersecurity training frameworks: A delphi method-based study, *Computers & Security*, Volume 113, p.102551, doi.org/10.1016/j.cose.2021.102551.
- CIAIM** (2016). *Structural fault in M/CV Stolt Bobcat cargo tanks at Barcelona Port on 7 August 2015*. Comisión Permanente de Investigación de Accidentes e Incidentes Marítimos, Centro de Publicaciones Secreteria General Tecnica Ministerio de Fomento, CIAIM Report-12/2016, Spain.
- Díaz, H., Loughney, S., Wang, J., & Guedes Soares, C.** (2022). Comparison of multicriteria analysis techniques for decision making on floating offshore wind farms site selection. *Ocean Engineering*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110751>
- Di Nardo M., Murino T., Osteria G., Santillo L.C.** (2022). A New Hybrid Dynamic FMECA with Decision-Making Methodology: A Case Study in an Agri-Food Company. *Applied System Innovation*. Vol 5(3):45. doi.org/10.3390/asi5030045
- 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 (2022), p. 105917, [10.1016/j.engfailanal.2021.105917](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105917)
- Elidolu G., Sezer S.I., Akyuz E., Arslan O., Arslanoglu Y.** (2023). Operational risk assessment of ballasting and de-ballasting on-board tanker ship under FMECA extended evidential reasoning (ER) and rule-based Bayesian network (RBN) approach. *Reliab Eng Syst Saf* 2023;231:108975. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108975>.
- Elidolu, G. Arslanoğlu, Y., Teixeira, Â. P.** (2024a). Advances in Maritime Technology and Engineering. Carlos Guedes Soares, Tiago A. Santos (Eds.) CRC Press. *Evaluation of technical and safety aspects of nitrogen use onboard tanker ships* (1st Ed., p.5). Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003508762-32>

- Elidolu, G., Teixeira, Â. P., & Arslanoğlu, Y.** (2024b). A risk assessment of inhibited cargo operations in maritime transportation: a case of handling styrene monomer. *Ocean Engineering*, 312, 119049. 10.1016/j.oceaneng.2024.119049.
- Elsayed, T.** (2009). Fuzzy inference system for the risk assessment of liquefied natural gas carriers during loading/offloading at terminals. *Appl. Ocean Res.* 31 (3), 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2009.08.004>.
- EMSA** (2023). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023*. European Maritime Safety Agency. Lizbon, Portekiz.
- Equasis** (2022). *The 2022 World Merchant Fleet Statistics from Equasis*. The Equasis Quality Shipping Information System.
- Fayet, G., Rotureau, P., & Vicot, P.** (2022). On the Hazard Investigation of Polymerizing Substances through Experimental Methods and Theoretical Chemistry. *Chemical Engineering Transactions*, 90, 367–372. <https://doi.org/10.3303/CET2290062>
- Ferdous, R., Khan, F., Sadiq, R., Amyotte, P., & Veitch, B.** (2013). Analyzing system safety and risks under uncertainty using a bow-tie diagram: An innovative approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(1–2), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.08.010>
- Geisbush, J. and Ariaratnam, S.T.** (2023). Reliability centered maintenance (RCM): literature review of current industry state of practice, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 29 No. 2, pp. 313-337. <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2021-0018>
- George, J.J., Renjith, V.R., George, P., George, A.S.,** (2019). Application of fuzzy failure mode effect and criticality analysis on unloading facility of LNG terminal. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 61, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.06.009>.
- Godina, R., Silva, B. G. R., & Espadinha-Cruz, P.** (2021). A DMAIC integrated fuzzy fmea model: A case study in the automotive industry. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/app11083726>
- Goerlandt, F., & Montewka, J.** (2015). A framework for risk analysis of maritime transportation systems: A case study for oil spill from tankers in a ship – ship collision. *Safety Science*, 76, 42–66. 10.1016/j.ssci.2015.02.009.
- Gupta, G., Ghasemian, H., & Janvekar, A. A.** (2021). A novel failure mode effect and criticality analysis (FMECA) using fuzzy rule-based method: A case study of industrial centrifugal pump. *Engineering Failure Analysis*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105305>
- Hassan, S., Wang, J., Kontovas, C., & Bashir, M.** (2022). Modified FMEA hazard identification for cross-country petroleum pipeline using Fuzzy Rule Base and approximate reasoning. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104616>
- Hsu, W., Lian, S., & Huang, S.** (2017). Risk Assessment of Operational Safety for Oil Tankers - A Revised Risk Matrix. *Journal of Navigation*, 2017, 775–788. 10.1017/S0373463316000941.

- ICS (2002). *Tanker Safety Guide Chemicals*. 3rd edition. The International Chamber of Shipping, Londra, Birleşik Krallık.
- ICS, OCIMF, IAPH (2020). *International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ISGOTT)*. Sixth edition. International Chamber of Shipping, Oil Companies International Marine Forum, International Association of Ports and Harbors.
- IEC ve ISO (2019). *International Standart: Risk management - Risk assessment techniques*. International Electrotechnical Commission, International Organization for Standardization. IEC 31010:2019-06(en-fr). Cenevre, İsviçre.
- İlbahar, E., Kahraman, C., & Cebi, S. (2022). Risk assessment of renewable energy investments: A modified failure mode and effect analysis based on prospect theory and intuitionistic fuzzy AHP. *Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121907>
- İlbahar, E., Karışan, A., Cebi, S., & Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. *Safety Science*, 103, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.025>
- Iliadis, L., Skopianos, S., Tachos, S., Spartalis, S. (2010). *A fuzzy inference system using Gaussian distribution curves for forest fire risk estimation*. In: Papadopoulos, H., Andreou, A.S., Bramer, M. (Eds.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2010. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16239-8_49 vol. 339.
- ILO & WHO (2021). *International Chemical Safety Cards, 0073: Styrene*. International Labour Organization and World Health Organization, prepared with the support of the European Commission. (Erişim adresi: https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0073&p_version=2&p_lang=en)
- IMO (2022). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*, Consolidated Edition 2022. International Maritime Organization. Londra, Birleşik Krallık.
- IMO (2020). *International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk (IBC)*. 2020 Edition. International Maritime Organization. Londra, Birleşik Krallık.
- IMO (2018). *Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) For Use in the IMO Rule-Making Process*. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. 9 April 2018. International Maritime Organization. Londra, Birleşik Krallık.
- ISO (2018). *Risk management - Guidelines*, ISO 31000:2018 (en). International Organization for Standardization. Cenevre, İsviçre.
- Kahraman, C., Cebi, S., Onar, S.C., Oztaysi, B., (2018) A novel trapezoidal intuitionistic fuzzy information axiom approach: an application to multicriteria landfill site selection. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 67, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.09.009>.

- Kahraman, C., & Cebi, S (Editörler)** (2023). *Analytic Hierarchy Process with Fuzzy Sets Extensions Applications and Discussions*. Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol 428. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-39438-6>
- Karatuğ, Ç.** (2023). *Gemi Makine Dairesi Bakım İşlemlerinin Verimlilik Analizi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Kumar Akula, S., Salehfar, H., Behzadirafi, S.** (2022). Comparison of traditional and fuzzy failure mode and effects analysis for smart grid electrical distribution systems. *2022 North American Power Symposium, NAPS 2022*. <https://doi.org/10.1109/NAPS 56150.2022.10012165>.
- Li, D.F., Nan, J.X., Zhang, M.J.** (2010). A ranking method of triangular intuitionistic fuzzy numbers and application to decision making. *Int. J. Comput. Intell. Syst.* 3 (5), 522–530. <https://doi.org/10.1080/18756891.2010.9727719>
- Li, S. & Liu, Y.** (2022). Risk assessment of inland water oil tankers waiting for lockage. *Proc. SPIE 12249, 2nd International Conference on Internet of Things and Smart City (IoTSC 2022)*, 1224935 (8 May 2022); [10.1117/12.2636710](https://doi.org/10.1117/12.2636710).
- Li, H., Teixeira, A. P., & Guedes Soares, C.** (2022). An Improved Failure Mode and Effect Analysis of Floating Offshore Wind Turbines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/jmse10111616>
- Lilli, G., Sanavia, M., Oboe, R., Vianello, C., Manzolaro, M., De Ruvo, P. L., & Andrighetto, A.** (2024). A semi-quantitative risk assessment of remote handling operations on the SPES Front-End based on HAZOP-LOPA. *Reliability Engineering and System Safety*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109609>
- Liu, P., Wu, Y., Li, Y., Wu, X.** (2024). An improved FMEA method based on the expert trust network for maritime transportation risk management, *Expert Systems with Applications*, Volume 238, Part A, p. 121705, doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121705.
- Lu, L., Liang, W., Zhang, L., Zhang, H., Lu, Z., & Shan, J.** (2015). A comprehensive risk evaluation method for natural gas pipelines by combining a risk matrix with a bow-tie model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 25, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.04.029>
- LYB** (2019). *Global Product Strategy (GPS) Safety Summary Styrene Monomer*. Lyondell Basell Industries.
- Lyon, Bruce K., and Georgi Popov.** (2020). The Power of What If: Assessing and Understanding Risk. *Prof. Safety* 65, p. 36–43.

- Madanda, V. C., Sengani, F., & Mulenga, F.** (2023). Applications of Fuzzy Theory-Based Approaches in Tunnelling Geomechanics: a State-of-the-Art Review. In *Mining, Metallurgy and Exploration* (Vol. 40, Issue 3, pp. 819–837). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00767-5>
- MAIB** (2021). *Report on the investigation of the cargo tank explosion and fire on board the chemical tanker Stolt Groenland Ulsan, Republic of Korea 28 September 2019*. UK Marine Accident Investigation Branch on behalf of the Cayman Islands Government. Serious Marine Casualty, Report No 9/2021, July 2021.
- Mandal, S., & Maiti, J.** (2014). Risk analysis using FMEA: Fuzzy similarity value and possibility theory based approach. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3527–3537. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.058>
- Markowski, A. S., & Mannan, M. S.** (2008). Fuzzy risk matrix. *Journal of Hazardous Materials*, 159(1), 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.055>
- Mihailidou, E. K., Antoniadis, K. D., Assael, M. J.** (2012). The 319 major industrial accidents since 1917. *Int. Rev. Chem. Eng.* 2012, 4, 529– 540.
- Ng, A.K., & Olçer, A.I.** (2012). A new human comfort model onboard a vessel based on Sugeno type fuzzy inference system. *Ocean Eng.* 55, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.07.023>.
- Ni, L., Cui, J., Jiang, J., Pan, Y., Wu, H., Shu, C. M., Wang, Z., Mou, S., & Shi, N.** (2020). Runaway inhibition of styrene polymerization: A simulation study by chaos divergence theory. *Process Safety and Environmental Protection*, 135, 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.015>
- NIOSH** (2007). *NIOSH pocket guide to chemical hazards*. DHHS publication. National Institute for Occupational Safety and Health. Personal author: Michael Barsan. September 2007. (Erişim adresi: https://stacks.cdc.gov/view/cdc/21265/cdc_21265_DS1.pdf)
- OCIMF** (2017). *Inert Gas Systems. The use of inert gas for the carriage of flammable cargoes*. First edition. The Oil Companies International Marine Forum. London: United Kingdom.
- OSHA** (2022). *Styrene (Vinyl Benzene; Phenylethylene)* Occupational Chemical Database. U.S. Department of Labor Occupational Safety & Health Administration.
- Paciarotti, C., Mazzuto, G., & D’Ettorre, D.** (2014). A revised FMEA application to the quality control management. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 31(7), 788–810. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-02-2013-0028>
- Palczewski, K., & Salabun, W.** (2019). The fuzzy TOPSIS applications in the last decade. *Procedia Computer Science*, 159, 2294–2303. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.404>

- Pan, Y., Zhang, L., Li, Z.W., Ding, L.** (2020). Improved fuzzy bayesian network-based risk analysis with interval-valued fuzzy sets and D-S evidence theory. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 28 (9), 2063–2077. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2019.2929024>.
- Park, B., Kim, Y., Lee, K., Paik, S., & Kang, C.** (2021). Risk assessment method combining independent protection layers (Ipl) of layer of protection analysis (lopa) and riskcurves software: Case study of hydrogen refueling stations in urban areas. *Energies*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/en14134043>
- Pillay A., Wang J.** (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 79, Issue 1, 2003, Pages 69-85. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00179-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00179-5).
- Plastics Europe** (2022). *Styrene Monomer: Safe Handling Guide*. PlasticsEurope & Styrene Producers Association (SPA) Member Companies.
- Qin, J., Xi, Y., & Pedrycz, W.** (2020). Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method. *Applied Soft Computing Journal*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106134>
- Qureshi, M. S., Swarnkar, P., & Gupta, S.** (2018). A supervisory on-line tuned fuzzy logic based sliding mode control for robotics: An application to surgical robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 109, 68–85. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.08.008>
- Ramos, M., & Maturana, M. C.** (2012). Application of Bayesian Belief networks to the human reliability analysis of an oil tanker operation focusing on collision accidents. *Reliability Engineering and System Safety*, 110, 89–109. [10.1016/j.res.2012.09.008](https://doi.org/10.1016/j.res.2012.09.008).
- Reddy, G.T., Reddy, M.P.K., Lakshmana, K.** (2020). Hybrid genetic algorithm and a fuzzy logic classifier for heart disease diagnosis. *Evol. Intel.* 13, 185–196. <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00327-1>
- Renjith, V.R., Jose kalathil, M., Kumar, P.H., Madhavan, D.** (2018). Fuzzy FMECA (failure mode effect and criticality analysis) of LNG storage facility. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 537–547. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.01.002>.
- Saada, R., Patel, D., & Saha, B.** (2015). Causes and consequences of thermal runaway incidents - Will they ever be avoided? *Process Safety and Environmental Protection*, 97, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.02.005>
- Sharma, K.D., Srivastava, S.** (2018). Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review. *J Adv Res Aeronaut Space Sci* 5 (1–2), 1–17.
- Sheehan, B., Murphy, F., Kia, A. N., & Kiely, R.** (2021). A quantitative bow-tie cyber risk classification and assessment framework. *Journal of Risk Research*, 24(12), 1619–1638. doi.org/10.1080/13669877.2021.1900337

- Shell** (2023). *Styrene Monomer Safety Data Sheet*, SDS Number: 800001004869, Version 3.3. Shell Chemicals Europe B.V
- Shi, C., Zhang, Y., Li, C., Li, P., & Zhu, H.** (2020). Using the Delphi Method to Identify Risk Factors Contributing to Adverse Events in Residential Aged Care Facilities. *Risk Management and Healthcare Policy*, 13, 523–537. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S243929>
- Signoret, JP., Leroy, A.** (2021). Preliminary Hazard Analysis (PHA). In: Reliability Assessment of Safety and Production Systems. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64708-7_8
- Suganthi, L., Iniyan, S., & Samuel, A. A.** (2015). Applications of fuzzy logic in renewable energy systems - A review. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 48, pp. 585–607). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.037>
- Şakar, C. & Zorba Y.** (2017). A study on safety and risk assessment of dangerous cargo operations in oil/chemical tankers. *Journal of ETA Maritime Science*, 5 (4) (2017), pp. 396-413
- Şenol, Y. E., & Yaşlı, F.** (2021). A risk analysis study for chemical cargo tank cleaning process using Fuzzy Bayesian Network. *Ocean Engineering*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109360>
- Thermo Fisher** (2024). *Toluene-2,4-diisocyanate, 80%, remainder 2,6-diisocyanate safety data sheet*. Rev number 3. Thermo Fisher Scientific Chemicals, Inc., Massachusetts, US.
- Uğurlu, Ö.** (2016). Analysis of fire and explosion accidents occurring in tankers transporting hazardous cargoes. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 55, 1–11. [10.1016/j.ergon.2016.06.006](https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.06.006).
- UK P&I Club** (2018). Tanker Matters A Focus on Some of the Issues Surrounding Tanker Fleets in the P&I World.
- UNCTAD** (2023). *Review of Maritime Transport*. United Nations Conference on Trade and Development. UNCTAD/RMT/2023. New York, Amerika Birleşik Devletleri.
- UNCTAD** (2022). *Review of Maritime Transport*. United Nations Conference on Trade and Development. UNCTAD/RMT/2022. New York, Amerika Birleşik Devletleri.
- Ung, S. T.** (2019). Evaluation of human error contribution to oil tanker collision using fault tree analysis and modified fuzzy Bayesian Network based CREAM. *Ocean Engineering*, 179, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.031>
- USCG** (1990). *Chemical Data Guide for Bulk Shipment by Water*. United States Coast Guard, US.
- Wagner, W. P.** (2017). Trends in expert system development: A longitudinal content analysis of over thirty years of expert system case studies. *Expert Systems with Applications*, 76, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.01.028>

- Wang, H., Luo, Y., Deng, B., Lin, J., & Li, X.** (2023). Doctor selection based on aspect-based sentiment analysis and neutrosophic TOPSIS method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106599>
- WHO** (2007). *International medical guide for ships: including the ship's medicine chest*. 3rd ed. World Health Organization.
- Willey, R., J., Carter, T., Price, J., Zhang, B.** (2020). Instruction of hazard analysis of methods for chemical process safety at the university level, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 63, p. 103961, doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103961.
- Wu, B., Yip, T. L., Yan, X., & Guedes Soares, C.** (2022). Review of techniques and challenges of human and organizational factors analysis in maritime transportation. *Reliability Engineering and System Safety* (Vol. 219). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108249>
- Wu, B., Yan, X., Wang, Y. and Guedes Soares, C.** (2017), An Evidential Reasoning-Based CREAM to Human Reliability Analysis in Maritime Accident Process. *Risk Analysis*, 37: 1936-1957. <https://doi.org/10.1111/risa.12757>
- Yang, Z., & Wang, J.** (2015). Use of fuzzy risk assessment in FMEA of offshore engineering systems. *Ocean Engineering*, 95, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.037>
- Yu, Q., Teixeira, Â. P., Liu, K., Rong, H., & Guedes Soares, C.** (2021). An integrated dynamic ship risk model based on Bayesian Networks and Evidential Reasoning. *Reliability Engineering and System Safety*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107993>
- Zadeh, L. A.** (1965). Fuzzy collection. *Inf. Control*, 8, 338-356.
- Zarei, E., Khan, F., & Abbassi, R.** (2021). Importance of human reliability in process operation: A critical analysis. *Reliability Engineering and System Safety* (Vol. 211). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107607>
- Zhang, J., Jin, M., Wan, C., Dong, Z., Wu, X.** (2023). A Bayesian network-based model for risk modeling and scenario deduction of collision accidents of inland intelligent ships, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 243 ,p. 109816, doi.org/10.1016/j.res.2023.109816.
- Zhang, R., Meng, H., Ge, J., Tan, H. A.** (2022). Method for Identifying the Key Performance Shaping Factors to Prevent Human Errors during Oil Tanker Offloading Work. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 688. [10.3390/jmse10050688](https://doi.org/10.3390/jmse10050688).
- Zhao, L., Shen, Y., Sun, Y., Mannan, M. S., & Akbulut, M.** (2020). Thermal hazards analysis of styrene in contact with impurities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104315>

- Zhou, Q., Li, H., Zeng, X., Li, L., Cui, S., Du, Z.** (2024). A quantitative safety assessment for offshore equipment evaluation using fuzzy FMECA: A case study of the hydraulic submersible pump system, *Ocean Engineering*, Volume 293, p. 116611, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116611.
- Zhou, Q., & Thai, V. V.** (2016). Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction. *Safety Science*, 83, 74–79. 10.1016/j.ssci.2015.11.013.
- Zhou, Y., Xia, J., Zhong, Y., & Pang, J.** (2016). An improved FMEA method based on the linguistic weighted geometric operator and fuzzy priority. *Quality Engineering*, 28(4), 491–498. https://doi.org/10.1080/08982112.2015.1132320
- Zhou, Q., Wong, Y. D., Loh, H. S., & Yuen, K. F.** (2019). ANFIS model for assessing nearmiss risk during tanker shipping voyages. *Maritime Policy and Management*, 46(4), 377–393. 10.1080/03088839.2019.1569765.
- Url-1** < <https://www.nautinst.org/resources-page/200759-unsafe-sampling-method.html>>, erişim tarihi 18.10.2024.
- Url-2** < https://www.draeger.com/tr_tr/Substances/704 >, erişim tarihi 16.11.2024.
- Url-3** < <https://www.ecfr.gov/current/title-46/chapter-I/subchapter-O/part-150>>, erişim tarihi 16.11.2024.
- Url-4** < <https://midsis.rempec.org/en/find-chemical/styrene-monomer-inhibited>>, erişim tarihi 02.04.2024.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Gizem ELİDOLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği (2015).
- **Yüksek Lisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı (2020).

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **Güverte Stajyeri**, DFDS Denizcilik ve Taşımacılık A.Ş., Chemfleet Shipping Management (2013-2015).
- **Uzakyol Vardiya Zabiti**, Chemfleet Shipping Management, (2016-2017).
- **Misafir Araştırmacı**, University of Lisbon, Instituto Superior Técnico/ Centre for Marine Technology and Ocean Engineering (CENTEC) (2024-2025).
- **Araştırma Görevlisi**, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü (2019-...).

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **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. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119049>
- **Elidolu, G.**, Arslanoğlu, Y., Teixeira, Â. P. (2024). Evaluation of technical and safety aspects of nitrogen use onboard tanker ships. *Advances in Maritime Technology and Engineering*, Edited By Carlos Guedes Soares, Tiago A. Santos, 1st Edition, CRC Press, p.5, London. <https://doi.org/10.1201/9781003508762-32>

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Makaleler

- Sezer, S. I., **Elidolu, G.**, Aydin, M., Ahn, S. Il, Akyuz, E., & Kurt, R. E. (2024). Analyzing human reliability for the operation of cargo oil pump using fuzzy CREAM extended Bayesian Network (BN). *Ocean Engineering*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117345>
- Tunçel, A. L., Sezer, S. I., **Elidolu, G.**, Uflaz, E., Akyuz, E., & Arslan, O. (2024). A rule-based Bayesian network modelling under evidential reasoning theory for risk analysis of anchoring operation in maritime transportation. *Ocean Engineering*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116521>
- **Elidolu, G.**, Sezer, S. I., Akyuz, E., Arslan, O., & Arslanoglu, Y. (2023). Operational risk assessment of ballasting and de-ballasting on-board tanker ship under FMECA extended Evidential Reasoning (ER) and Rule-based Bayesian Network (RBN) approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108975>
- Sezer, S. I., **Elidolu, G.**, Akyuz, E., & Arslan, O. (2023). An integrated risk assessment modelling for cargo manifold process on tanker ships under FMECA extended Dempster–Shafer theory and rule-based Bayesian network approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 340–352. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.024>
- **Elidolu, G.**, Il Ahn, S., Ilke Sezer, S., Emek Kurt, R., Akyuz, E., & Gardoni, P. (2023). Applying evidential reasoning extended SPAR-H modelling to analyse human reliability on crude oil tanker cargo operation. *Safety Science*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106169>
- Sezer, S. I., **Elidolu, G.**, Akyuz, E., & Arslan, O. (2023). A quantified risk analysis for oil spill during crude oil loading operation on tanker ship under improved Z-number based Bayesian Network approach. *Marine Pollution Bulletin*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115796>
- Ceylan, B. O., **Elidolu, G.**, Arslanoğlu, Y. (2023). A novel approach for the analysis of engineering complex system accidents: The casualty of the M/V Vitaspirit. *Ocean Engineering*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114217>
- **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. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113082>
- **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. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105917>

- Arslanoglu, B., **Elidolu, G.**, Uyanık, T. (2022). Application Of Machine Learning Methods For Prediction Of Seafarer Safety Perception, Vol. 164 No. A3 (2022). *Int. Journal of Mar. Eng.* <https://doi.org/10.5750/ijme.v164iA3.725>

Bildiriler

- Serçe, Ç., **Elidolu, G.**, Arslanoglu, Y. (2022). Evaluating the risks of marine turbocharger failure using fuzzy fault tree analysis method. 4th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech2022). 14-16 December, 2022. Ankara/Turkey.
- **Elidolu, G.**, Arslan, O., Akyuz, E., Arslanoglu, Y. (2021). Introducing a digital training system for safe Turkish Straits. 4th Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation (GMC'21), Turkey.
- **Elidolu, G.**, Atak, U., Destanoglu, O., Arslanoglu, Y. (2021). Mucilage-related risk assessment in the Marmara Sea using AHP-TOPSIS methods. 4th Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation (GMC'21), Turkey.
- **Elidolu, G.**, Uyanık, T., Karabıyık, P., Arslanoglu, Y. (2020). Hull cleaning effects on CO2 emissions estimation with machine learning methods. *5th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2020)* Antalya/Turkey.
- **Elidolu, G.**, Uyanık, T., Arslanoglu, Y. (2020). Seafarer personnel selection with Fuzzy AHP. *5th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2020)* Antalya/Turkey.
- **Elidolu, G.**, Uyanık, T., Arslanoglu, Y. (2019). Estimation of safe work behavior of seafarers using Artificial Neural Network. *4th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019)*, Antalya, Turkey.

Projeler

- TÜBİTAK 2214/A - Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Projesi. Gemilerde Tehlikeli Yük Operasyonları için Bir Risk Değerlendirmesi Yaklaşımı. 01/2024 - 01/2025. **Gizem Elidolu** (Bursiyer)
- TÜBİTAK 1001 - Müsilajın Gemi Makine Sistemleri Üzerindeki Etkileri ve Risk Analizi Değerlendirmesi Proje Yürütücüsü: Yasin Arslanoğlu Proje Ekibi: Özcan Arslan, Emre Akyüz, **Gizem Elidolu**, Özcan Durukan, Bulut Ozan Ceylan, Emir Ejder. 10/05/2022 -10/05/2025
- İTÜ BAP – Lisansüstü Tez Projesi. Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Yasin Arslanoğlu, Araştırmacı: **Gizem Elidolu**
- ERASMUS+ Development of Training System for Safe Turkish Straits (SAFESTRAITS). Yürütücü: Özcan Arslan. Araştırmacılar: Emre Akyüz, **Gizem Elidolu**. 01/06/2021 -31/05/2023

