

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEMİ ANA MAKİNESİ ARIZA OLUŞUMUNA ETKİ EDEN NEDENSEL
FAKTÖRLERİN BAYES AĞI İLE İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Emre ÖZAYDIN

MART 2025
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GEMİ ANA MAKİNESİ ARIZA OLUŞUMUNA ETKİ EDEN NEDENSEL
FAKTÖRLERİN BAYES AĞI İLE İNCELENMESİ**

Emre ÖZAYDIN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.02.2025
Tezin Savunma Tarihi : 18.03.2025**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. İsmail ALTIN

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Gemi Ana Makinesi Arıza Oluşumuna Etki Eden Nedensel Faktörlerin Bayes Ağı ile İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. İsmail ALTIN’a teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen KTÜ Sürmene Abdullah Kanca Meslek Yüksekokulundaki tüm değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Meryem ÖZAYDIN’a, babam Hanifi ÖZAYDIN’a, eşim Saime ÖZAYDIN’a ve oğlum Ömer’e ithaf ediyorum.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Emre ÖZAYDIN

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Gemi Ana Makinesi Arıza Oluşumuna Etki Eden Nedensel Faktörlerin Bayes Ağı İle İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. İsmail ALTIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri ve örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/03/2025

Emre ÖZAYDIN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Denizcilik Sektöründe Enerji Dönüşümü ve Alternatif Yakıtlar	5
1.3. Küresel Motorlu Gemi Filo Gelişim Süreçleri	8
1.4. İki Zamanlı Gemi Ana Makine Gelişim Süreci.....	11
1.5. Gemi Ana Makine Arızalarının Nedensel İlişkisi	17
1.6. Arıza Analiz, Tahmin Yöntemleri.....	21
1.6.1. Model Tabanlı Yöntemler	23
1.6.2. Veri Tabanlı Yöntemler	24
1.6.3. Bilgi Tabanlı Yöntemler	26
1.6.4. Hibrit Yöntemler	27
1.7. Bayes Yaklaşımı ile Klasik Yaklaşımın Kıyaslanması	28
1.8. Literatür Araştırması	30
1.8.1. Gemi Makine Arızaları	30
1.8.2. Gemi Makine Operasyonlarında İnsan Güvenirlik Analizi	42
1.9. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı	46
1.9.1. Tez Çalışmasının Amacı	46
1.9.2. Tez Çalışmasının Kapsamı.....	47
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	48
2.1. Giriş.....	48
2.2. Yöntem	49
2.2.1. Bayes Teoremi	49

2.2.2.	Bayes Ağları.....	51
2.2.3.	Bayes Ağının Oluşturulma Süreci ve Analizi	54
2.2.4.	Bayes Ağ Geçerlilik Analizlerinin Yapılması.....	56
2.2.5.	Bulanık Bayes Ağları	56
2.2.6.	İnsan Faktörü Analiz ve Sınıflandırma Sistemi	61
2.2.7.	Bayes Ağ Modelin Niteliksel Kısımının Oluşturulması	65
2.2.8.	Bayes Ağının Niceliksel Kısımının Oluşturulması	78
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	100
3.1.	Giriş	100
3.2.	Hassasiyet Analizi Bulguları	100
4.	SONUÇLAR.....	138
5.	ÖNERİLER.....	142
6.	KAYNAKLAR	145
7.	EKLER.....	175
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

GEMİ ANA MAKİNESİ ARIZA OLUŞUMUNA ETKİ EDEN NEDENSEL FAKTÖRLERİN BAYES AĞI İLE İNCELENMESİ

Emre ÖZAYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalında
Danışman: Doç. Dr. İsmail ALTIN
2025, 175 Sayfa, 1 Sayfa Ek

Bu çalışmada, gemi ana makinesi arıza oluşumuna etki eden nedensel faktörlerin Bayes Ağı ile incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 2000-2024 yılları arasında gemi ana makine kaynaklı 89 adet kaza raporu incelenmiştir. Kaza raporları, uzman görüşleri ve yazın taraması doğrultusunda gemi ana makine arızalarına neden olan arıza değişkenleri, birbiri ile olan ilişkisi tanımlanarak Bayes Ağı oluşturulmuştur. Makine dairesi personeli kaynaklı uygunsuzluklar HFACS çatısı altında sınıflandırılmıştır. Koşullu olasılık ve marjinal olasılık değerleri 7 uzmandan elde edilen görüşmeler neticesinde elde edilmiş ve her bir değişkenin koşullu olasılıkları hesaplanmıştır. Bayes Ağ modelinin geçerliliğinin ispatlanması amacıyla aksiyon 1-2-3 testleri gerçekleştirilmiş ve ardından hassasiyet analizleri uygulanmıştır. Hassasiyet analizi sonuçlarına göre gemi ana makinesi %60 olasılıksal değişim ile güç düşüşü ve %41 olasılıksal değişim ile güç kaybı yaşamaktadır. Güç düşüşüne sırasıyla egzoz ve emme hava parametreleri, soğutma suyu parametreleri ve yağ parametreleri etkili olmuştur. Egzoz ve emme hava parametrelerine en fazla etkiyi, ana makine yapısal uygunsuzlukları göstermektedir. Ana makine yapısal uygunsuzlukları, çoğunlukla bakım uygunsuzlukları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bakım uygunsuzluklarının başlıca nedensel faktörü ise, makine dairesi personelinden kaynaklanan uygunsuzluklardır.

Anahtar Kelimeler: Gemi Ana Makine Arızaları, Bayes Ağları, Bulanık Mantık, HFACS

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF CAUSAL FACTORS AFFECTING MARINE MAIN ENGINE FAILURE OCCURRENCE WITH BAYESIAN NETWORK

Emre ÖZAYDIN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Maritime Transportation and Management Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. İsmail ALTIN
2025, 175 Pages, 1 Pages Appendix

This study aims to examine the causal factors affecting the failure of the marine main engine using a Bayesian Network. A total of 89 accident reports related to marine main engine failures between 2000 and 2024 were analyzed in the scope of the study. Based on expert opinions and literature review, the failure variables causing main engine failures were defined along with their interrelationships, and a Bayesian Network was established. The inappropriate actions of the engine room personnel were classified under the HFACS framework. Conditional and marginal probability values were derived from interviews with 7 experts, and the conditional probabilities of each variable were calculated. To validate the Bayesian network model, axiom 1-2-3 tests were conducted, followed by sensitivity analyses. According to the results of the sensitivity analysis, the ship's main engine experiences a slow down with a 60% probabilistic change and a shut down with a 41% probabilistic change. The factors affecting slow down include exhaust and intake air parameters, cooling water parameters, and lubricating oil parameters, in that order. The structural inadequacies of the main engine have the greatest impact on exhaust and intake air parameters. These structural inadequacies of the main engine mostly arise due to maintenance inadequacies. The primary causal factor of maintenance inadequacies is the inappropriate actions of the engine room personnel

Key Words: Marine Engine, Bayesian Networks, Fuzzy Logic, HFACS

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. 1987-2022 yılları arası dünya gemi filo değişimi	2
Şekil 2. Yıllara göre gemi kaza sayılarının değişimi.....	3
Şekil 3. 100 GT üstü dünya filo ve ticaret gelişimi	9
Şekil 4. İki zamanlı ve dört zamanlı ana makinelerin gemi türüne göre dağılımı.....	11
Şekil 5. Gemi ana makine karakteristik özelliklerinin gelişimi	15
Şekil 6. MAN B&W'a ait akıllı ana makine şeması	17
Şekil 7. Gemi ana makine arıza nedenleri	20
Şekil 8. Gemi ana makine donanımsal arıza oranı	20
Şekil 9. Arıza teşhis ve tespit yöntemleri ile ilgili akademik çalışmaların yıllara dağılımı.....	22
Şekil 10. Çalışmanın akış diyagramı	48
Şekil 11. Bayes ağ örneği	52
Şekil 12. Üçgensel üyelik fonksiyonu	58
Şekil 13. Reason'un İsviçre Peyniri modeli	62
Şekil 14. HFACS Yapısı.....	63
Şekil 15. Bayes ağının grafiksel gösterimi	75
Şekil 16. Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluğun İnsan Faktörleri Analizi ve Sınıflandırma Sistemi ile modellenmesi	76
Şekil 17. Bulanık küme teorisinin aşamaları	78
Şekil 18. Güç düşüşü düğüm örneği.....	78
Şekil 19. Genie programı güç düşüşü düğümü için oluşturulan koşullu olasılık tablosunun kesiti.....	88
Şekil 20. Bayes Ağı Olasılık Değerleri	90
Şekil 21. Genie programı güç düşüşü düğümü için olasılık değerinin kesiti	91
Şekil 22. Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalarının aksiyon 2 testi	97
Şekil 23. Güç düşüşü aksiyon 2 testi	97
Şekil 24. Güç kaybı aksiyon 2 testi	98
Şekil 25. Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalarının hassasiyet analizi.....	103
Şekil 26. Güç düşüşü hassasiyet analizi	103
Şekil 27. Genel hassasiyet analizi.....	105

Şekil 28. Güç kaybı hassasiyet analizi	115
Şekil 29. Güç kaybı diğer faktörler hassasiyet analizi	115
Şekil 30. Ana makine yapısal uygunsuzluk hassasiyet analizi.....	118
Şekil 31. Akışkan kaynaklı uygunsuzluk hassasiyet analizi	122
Şekil 32. Bakım uygunsuzluğu hassasiyet analizi	122
Şekil 33. Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk hassasiyet analizi	124
Şekil 34. Hata hassasiyet analizi	124
Şekil 35. İhlal hassasiyet analizi.....	125
Şekil 36. Makine dairesi personeli göreve hazır olma hassasiyet analizi.....	126
Şekil 37. Makine dairesi fiziksel çevre hassasiyet analizi.....	127
Şekil 38. Uygunsuz personel donatımı hassasiyet analizi	128
Şekil 39. Uygunsuz planlanmış operasyon hassasiyet analizi.....	129
Şekil 40. Yedek parça uygunsuzlukları hassasiyet analizi	135

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Alternatif yakıtların karşılaştırılması.....	7
Tablo 2. 2002 yılı dünya gemi filo sayısı, ana makine sayısı ve toplam güç oranları.....	10
Tablo 3. Üçgen bulanık sayı değer karşılıkları	58
Tablo 4. Kaza veri tabanlarından elde edilen ana makine kaynaklı kazalar	66
Tablo 5. MAN B&W 6S50MC-C makine bilgileri	67
Tablo 6. MAN B&W 6S50MC-C limit değerleri	67
Tablo 7. Güç düşüş gereksinimleri	68
Tablo 8. Güç kayıp gereksinimleri.....	68
Tablo 9. Değişkenlerin tanımlanması	69
Tablo 10. Uzman ağırlık katsayısı	79
Tablo 11. Uzman değerlendirmenin ağırlıklandırmaya göre etki derecesi	79
Tablo 12. Güç düşüşü düğüm örneği için uzmanların görüşleri	80
Tablo 13. Güç düşüşü düğümü için uzman görüşleri bulanıklaştırma aşaması	81
Tablo 14. Güç düşüşü düğümü için uzman görüşleri benzerlik derecesi.....	83
Tablo 15. Güç düşüşü düğümü için uzman görüşleri ortalama anlaşma derecesi	84
Tablo 16. Güç düşüşü düğümü için uzman görüşleri göreceli uyum derecesi	85
Tablo 17. Güç düşüşü düğümü için uzman fikir birliği	86
Tablo 18. Güç düşüşü düğümü için uzman toplu görüş birliği.....	87
Tablo 19. Güç düşüşü düğümü için durulaştırma aşaması.....	88
Tablo 20. Marjinal olasılıkların uzman değerlendirmesi ile elde edilmesi.....	89
Tablo 21. Güç düşüşü ve nedensel faktörlerin olasılık değeri	92
Tablo 22. Aksiyom 1 test sonuçları	95
Tablo 23. Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar aksiyom 3 testi.....	98
Tablo 24. Güç düşüşü aksiyom 3 testi	99
Tablo 25. Güç kaybı aksiyom 3 testi	99
Tablo 26. Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar hassasiyet analizi.....	100

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA	: Ortalama anlaşma derecesi
ABS	: Amerikan Denizcilik Bürosu (American Bureau of Shipping)
AI	: Yapay zeka (Artificial Intelligence)
ANN	: Yapay sinir ağı (Artificial Neural Network)
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process)
AA	: Ortalama anlaşma derecesi
ATSB	: Avustralya Taşıma Güvenliği Bürosu (Australian Transport Safety Bureau)
AMSA	: Avustralya Denizcilik Güvenliği Otoritesi (Australian Maritime Safety Authority)
BN	: Bayes Ağı (Bayesian Network)
BV	: Fransız Klas Kuruluşu (Bureau Veritas)
B&W	: Burmeister&Wain
CC	: Konsensus sayısı
CCS	: Çin Sınıflama Kurumu (China Classification Society)
CoA	: Alanın merkezi
CIMAC	: Uluslararası İçten Yanmalı Motorlar Komitesi
CREAM	: Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemi (Cognitive Reliability and Error Analysis Method)
DBN	: Bulanık Bayes Ağları
DMAIB	: Danimarka Kaza Soruşturma Kurulu (Danish Maritime Accident Investigation Board)
D-S	: Demster Shefer
DSB	: Hollanda Güvenlik Kurulu
DWT	: Dedveyt Ton
ECA	: Emisyon kontrol alanı (Emission Control Area)
EIF	: Hata etkileyen faktör
EEDI	: Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (Energy Efficiency Design Index)
ELM	: Aşırı Öğrenme Makinesi (Extreme Learning Machine)
EEMD	: Topluluk Empirik Mod Decomposition (Ensemble Empirical Mode Decomposition)

EGR	: Egzoz gazı resirkülasyonu (Exhaust Gas Recirculation)
EMSA	: Avrupa Deniz Emniyeti Ajansı (European Maritime Safety Agency)
EPC	: Hata üreten koşul
EU-OSHA	: Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı
FBN	: Bulanık Bayes Ağı (Fuzzy Bayesian Network)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FMEA	: Hata Türleri ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effects Analysis)
FMECA	: Hata Türleri, Etkileri ve Kritiklik Analizi (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis)
FTA	: Hata Ağaçları Analizi (Fault Tree Analysis)
GA	: Genetik Algoritma
GL	: Alman Sınıflandırma Kurumu (Germanischer Lloyd)
GT	: Gross Ton
H	: Makul yüksek (High)
HBI	: Hiyerarşik Bayesci Çıkarım
HEART	: İnsan Hatası Değerlendirmesi Analizi Yöntemi (Human Error Assessment and Reduction Technique)
HEP	: İnsan hatası olasılığı
HRA	: İnsan güvenilirlik analizi (Human Reliability Analysis)
HFACS	: İnsan Faktörleri Analizi ve Sınıflandırma Sistemi (Human Factor Analysis and Classification System)
GISIS	: Küresel Bütünleşik Taşımacılık Bilgi Sistemi (Global Integrated Shipping Information System)
IACS	: Uluslararası Klaslama Kuruluşları Birliği (International Association of Classification Societies)
ICA	: Bağımsız Bileşen Analizi (Independent Component Analysis)
IoT	: Nesnelerin interneti (Internet of Things)
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization)
ISM	: Uluslararası Emniyetli Yönetim Kodu (International Safety Management)
IUMI	: Uluslararası Deniz Sigortası Birliği (International Union of Marine Insurance)
JTSB	: Japonya Taşıma Güvenliği Kurulu (Japan Transport Safety Board)
KAİK	: Kaza Araştırma ve İnceleme Kurulu
KR	: Kore Sınıflandırma Kuruluşu (Korean Register)

L	: Düşük (Low)
LNG	: Sıvılaştırılmış doğal gaz (Liquefied Natural Gas)
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı (Liquefied Petroleum Gas)
LSTM	: Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory)
M	: Orta (Medium)
MARS	: Deniz Kazası Bildirimi ve Güvenlik Sistemi (Marine Accident Reporting and Safety System)
MARPOL	: Denizlerin Gemilerden Kirlenmesinin Önlemesi Uluslararası Sözleşmesi (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)
MAIB	: Deniz Kazaları Araştırma Bölümü (Marine Accident Investigation Branch)
MEP	: Ortalama etkili basınç (Mean Effective Pressure)
MH	: Çok yüksek (Medium High)
ML	: Makul düşük (Medium Low)
MLC	: Deniz İşçileri Sözleşmesi (Maritime Labour Convention)
MMOHRA	: Gemi Bakım ve Operasyonları İnsan Güvenirlik Analizi
MSIU	: Malta Deniz Güvenliği Araştırma Birimi (Marine Safety Investigation Unit)
MT	: Denizde Emniyet Araştırma Birimi
NK	: Japon Sınıflandırma Kuruluşu (Japan Marine Inspection Association)
NTSB	: Ulusal Taşıma Güvenliği Kurulu (National Transportation Safety Board)
OREDA	: Offshore Reliability Data
PDF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function)
PCA	: Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis)
PM	: Partikül Madde Emisyonu (Particulate Matter)
$\tilde{R}_{AG}$	: Uzman kararlarının toplam sonucu
RA	: Değişken anlaşma sayısı
$\tilde{R}$	: Uzman görüşü
RBD	: Güvenirlik Blok Diyagramları
RINA	: İtalyan Sınıflandırma Kuruluşu
RPN	: Risk öncelik numarası
SCR	: Seçici katalitik indirgeme (Selective Catalytic Reduction)
SOHRA	: Gemi Operasyonları İnsan Güvenirlik Analizi
SOLAS	: Uluslararası Denizde Can Emniyeti Sözleşmesi (International Convention for the Safety of Life at Sea)

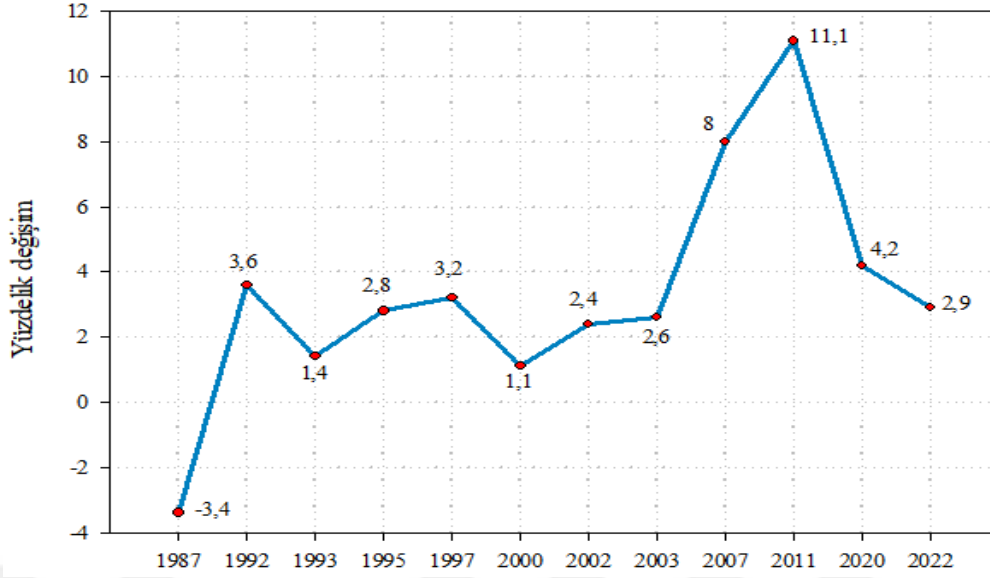
SSO	: Örnek Boyutu Optimizasyonu (Sample Size Optimization)
STCW	: Gemi Adamlarının Eğitim, Belgelendirme ve Vardiya Standartları Hakkında Uluslararası Sözleşmesi (Standards of Training Certification and Watchkeeping)
S_{UV}	: Anlaşma derecesi
SVM	: Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine)
TBN	: Toplam baz numarası (Total base number)
THERP	: İnsan hata oranı tahmini tekniği (Technique for Human Error Rate Prediction)
UNCTAD	: Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı (The United Nations Conference on Trade and Development)
XRF	: X-Işını Floresansı (X-ray Fluoresans)
VH	: Çok yüksek (Very High)
VLSFO	: Very low sulphur fuel oil
VL	: Çok düşük (Low)
VVL	: Çok çok düşük (Very very low)
VVH	: Çok çok yüksek (Very very high)
YSA	: Yapay sinir ağları

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Deniz taşımacılığı, küresel ticaretin önemli unsurlarından biridir. Dünyadaki ticari faaliyetlerin büyük bir kısmını, ekonomik ve güvenilir bir şekilde deniz yoluyla gerçekleştirilmektedir (Sun vd., 2024; Youssef vd., 2024). Mevcut küresel ticaretin %80'inden fazlası, deniz taşımacılığıyla yapılmakta ve lojistik ağının küreselleşmesine olan katkısı gün geçtikçe artmaktadır (Sun vd., 2024; Partene vd., 2023; Chen vd., 2019; Eleftheriou vd., 2018). Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı'nın (UNCTAD) projeksiyonlarına göre, 2029 yılına kadar yıllık ortalama deniz ticareti hacminin %2,4 oranında büyümesi beklenmektedir (UNCTAD, 2024). Deniz taşımacılığı sistemi, gemilerden, bu gemilerin uğradığı limanlardan, dağıtım merkezlerinden pazarlara kadar olan taşıma altyapısından oluşan bir ağıdır ve birçok ürün için deniz yoluyla yapılan ticaretin doğrudan bir alternatifi bulunmamaktadır (Corbett ve Winebrake, 2008).

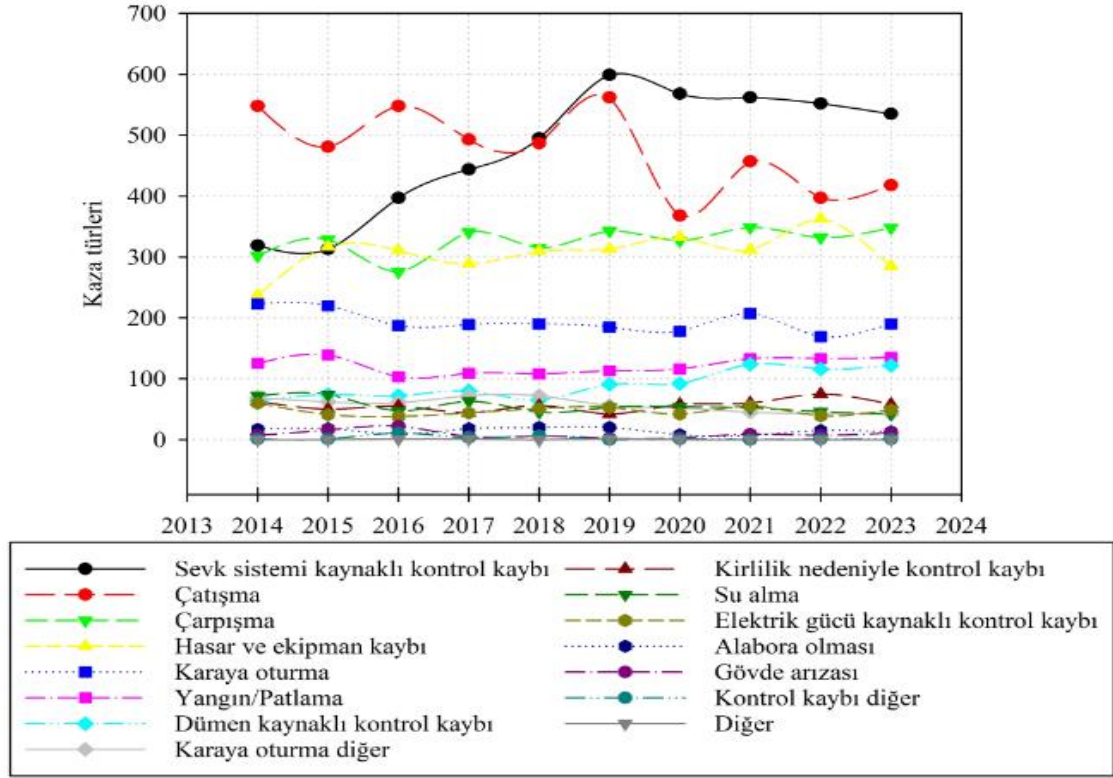
Denizde bağımsız olarak hareket eden karmaşık sistemlere sahip olan gemiler, tedarik zincirinin en önemli bileşenleridir (Raptodimos ve Lazakis, 2017). 2022'nin başlarında, deniz ticaret filosunun toplamda 100 GT ve üzeri 102.899 gemiden oluştuğu, bu gemilerin toplam kapasitesinin ise 2.199.107 DWT olduğu kaydedilmiştir. 2022 Ocak ayına kadar geçen 12 aylık dönemde, DWT açısından küresel ticaret filosu Şekil 1'de gösterildiği gibi %2,9 oranında büyümüştür (UNCTAD, 2022). Gelişen deniz ticaretinin ve artan gemi sayısının denizcilik kazalarına büyük katkısı nedeniyle gemilerin güvenilir işletimi konusu daha önemli hale gelmiştir (Wang vd., 2021). IMO'ya göre deniz taşımacılığı, dünyanın en büyük uluslararası endüstrilerinden biri olmakla birlikte, en tehlikeli sektörlerinden de biridir (Zhuang vd., 2020, URL-1, 2024). Güvenlik; farklı alanlarda her zaman kritik ve sıklıkla incelenen bir konudur çünkü sonuçları, mal varlıkları, çevre ve insan hayatı için son derece yıkıcı olabilmektedir (Yu vd., 2022; Ceylan vd., 2022). Aynı zamanda güvenlik, sürdürülebilir denizcilik yollarından biri olarak kabul edilmektedir (Zincir ve Deniz, 2018). Denizcilik literatüründe en çok çalışılan konulardan biri deniz emniyeti ve güvenliği olmuştur (Xu vd., 2023; Cao vd., 2023). Güvenlik bilinci ve güvenliğin geliştirilmesi IMO ve üye devletler, klas kuruluşları ve sektör paydaşların sorumluluğunda bulunmaktadır (Zhuang vd., 2020).



Şekil 1. 1987-2022 yılları arası dünya gemi filo değişimi (UNCTAD, 2022)

Deniz güvenliği, deniz kaza araştırmalarından elde edilen dersler doğrultusunda, SOLAS, STCW, MARPOL, ISM Kodu ve MLC gibi düzenleyici yasal çerçeveler ile zaman içinde gelişmiştir (Kaptan, 2019; Dikis ve Lazakis, 2019). Deniz güvenliğini iyileştirmek için önemli çabalar sarf edilse de deniz kazalarının sayısı hala büyük bir sorundur (Chuku vd., 2023; Adumene vd., 2022; Uyanık vd., 2021). Aynı zamanda, denizcilik teknolojisindeki ve otomasyon sistemlerindeki hızlı gelişmeler, operasyonel verimliliği artışına rağmen, gemi kazalarının sayısındaki beklenen azalma sağlanamamış, felaketlere yol açan kazalar hala devam etmektedir (Bayazit vd., 2020; Corovic ve Djurovic, 2013; Ugurlu vd., 2013). Deniz kaza istatistikleri, incelenen kaza sayısının kabul edilebilir bir seviyenin oldukça üstünde olduğunu göstermektedir. Avrupa Deniz Güvenliği Ajansı, yıllık kaza istatistiklerinde, 2014 ile 2020 yılları arasında 22.532 deniz kazasının meydana geldiği belirtilmiştir (EMSA, 2021). Günümüzde deniz kazalarına yol açan birçok faktör vardır. Birçok gemi kaza araştırmaları kaza türlerine ve gemi çeşitlerine veya bölgelere göre değerlendirmeleri yapılmıştır (Kandemir, 2021). Ayrıca bilimsel araştırmalarda gemi kazaları genellikle çatışma, oturma, batma ve yangın gibi durumlarla ele alınmaktadır (Platis vd., 2024; Cao vd., 2023). 2023 yılına ait deniz kazaları ve olaylar ile ilgili rapor incelendiğinde, sevk sistemi kaynaklı kontrol kaybı en sık meydana gelen durum olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 2’de gemi kaza oranları gösterilmiştir (EMSA, 2024). Ayrıca, gemi sevk sistemindeki arızalar neticesinde, karaya oturma, temas, çarpışma ve yangın gibi daha ciddi felaketler meydana gelebilir. Öte yandan, geminin sevk sistemi arızası, doğrudan

geminin ana makinesi ile bağlantılıdır. Ana makine arızalarının bu kazaların olası kök nedeni olabileceği göz ardı edilmemelidir (Japan P&I Club, 2017).



Şekil 2. Yıllara göre gemi kaza sayılarının değişimi (EMSA, 2024)

Küresel kargo taşımacılığının ana araçları olarak dünya genelinde dökme yük gemileri, ham petrol tankerleri, kimyasal tankerler, LNG gemileri ve mega konteyner gemileri uluslararası ticarete önemli bir rol oynamaktadır. Gemiler güverte, yük ve makine bölümlerine sahip karmaşık mühendislik yapılarıdır (Ceylan vd., 2022). Bir geminin makine dairesi, diğer gemi bölümlerinden kritik bir fark taşır. Çünkü bu alan, geminin ana işlevlerini sürdürebilmesi için gerekli olan temel sistemlerin yönetildiği yerdir. Jeneratörler, kazanlar, tatlı su üretim sistemleri, yağ-yakıt ayrıştırıcıları, atık su arıtma sistemleri ve ana makineler gibi mekanik, hidrolik, pnömatik ve elektronik sistemleri içermektedir. Ayrıca, bu ekipmanlar, yakıt, basınçlı hava, yağ, deniz suyu, tatlı su ve buhar gibi yardımcı sistemler aracılığıyla birbirine entegre bir şekilde çalışır. Bu durum, makine dairesinin dinamik etkileşimler ve karmaşık operasyonel süreçler içeren bir sistem olmasını gerektirir. Bir geminin kalbi olarak kabul edilen makine dairesinin her parçanın etkin bir şekilde güvence altına alınması gereklidir. Çünkü bu sistemlerin verimliliği ve bakım durumu, geminin genel

operasyonel performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. (Zhang vd., 2023; Adumene ve Nitonye, 2018). Gemi ana makinesi, geminin fiili seyrinden sorumlu olması nedeniyle öncelikli güvenilir hale getirilmesi gereken bir ekipmandır (Vizentin vd., 2020; Vera-Garcia vd.,2019; Anantharaman vd.,2018; Xi vd., 2018). Aynı zamanda tasarımı, işletimi, bakımı bir çok parametreyi içermesi bakımından en karmaşık gemi bileşenidir (Awal vd., 2015; Laskowski vd., 2015; Krakowski vd., 2014). Gemi ana makine ve sistemlerinde oluşabilecek bir arıza gemi, yük, insan ve çevre için ciddi bir tehdit unsurudur (Carjova vd., 2021; Vizentin vd., 2020; Onwuegbuchunam, 2020; Saputra vd., 2018). Arızanın giderilme maliyeti, teslimat süresinde gecikmeler, geminin hizmet dışı kalma durumu hiçbir gemi sahibinin karşılayamayacağı maddi kayıplara neden olabilir (Raptodimos ve Lazakis, 2017, Mishra, 2017; Beiger,2011). Arızalar, denizcilik şirketlerinin itibar kaybına yol açabilir, aynı zamanda geminin bayrak ve liman devleti yetkilileri, kiracılar ve diğer denetçiler tarafından daha fazla denetim altına alınmasına neden olabilir (Knowles ve Baglee, 2012; Ibrion vd., 2021).

Uluslararası Denizcilik Örgütü kaza inceleme raporları, tüm deniz kazalarının yaklaşık dörtte birinin başlangıçta ana makine arızasından kaynaklandığını belirtmektedir (İslam, 2018). Deniz kazası soruşturması analizlerine göre de, makine arızalarının, Birleşik Krallık ticaret filosunda 100 GT üzerindeki gemi kazalarının yaklaşık %24'ünden sorumlu olduğunu göstermektedir (Douglas, 2007; Usman, 2021). Avrupa Deniz Güvenliği Ajansı (EMSA) 2017 raporuna göre 2011-2016 yılları arasında meydana gelen 16.539 kazada, 5.607 kişi yaralanmış, 600 denizcinin ölümü ve 253 geminin batması ile sonuçlanmıştır. Gemi kayıpların yüksek olması, denizcilikte güvenlik konusunun hâlâ büyük bir endişe kaynağı olduğunu ve bu alanda daha fazla araştırma yapılmasının gerektiğini göstermektedir (Kandemir, 2021). Bu kazaların %25'i sevk sistemi, elektrik güç kaybı, kontrol ve alarm sistemleri kaynaklı meydana gelmiştir. Geminin manevradan yoksun olması ağır hava koşullar altında ve dar kanallar, nehir geçişleri gibi kritik seyirlerde daha tehlikeli durumlara yol açacaktır (Vizentin vd., 2020; Awal vd.,2015; Anantharan vd., 2020). Uluslararası Deniz Sigortaları Birliği, (IUMI Facts and Figures Committee) 2015 raporunda, 2000-2014 yılları arasına meydana gelen gemi kayıplarının %35'inin makine arızası kaynaklı olduğunu bildirmesi EMSA raporunu destekler niteliktedir (Dikis ve Lazakis, 2019). Japon deniz sigorta raporuna göre gemi operasyonunu etkileyen makine hasarlarının %80'inden ana makine sorumludur (Prastya vd., 2020). İsveç kulübü deniz sigorta şirketinin araştırma raporuna göre, gemi makineleriyle ilgili sigorta taleplerinin maliyet oranı, 2010-2014 yılları

arasında %35 iken, 2015–2017 yılları arasında %37’lik artışla %48’e çıkmıştır. Özellikle, ana makine arızalarına ilişkin talepler, tüm makine taleplerinin %28’ini ve maliyetlerin %34’ünü oluşturmuştur. Ana makine taleplerinin ortalama maliyeti, 2015-2017 dönemi, 2010-2014 dönemine kıyasla %21 oranında artmış ve her bir talep için neredeyse maliyet 650.000 USD’ye ulaşmıştır. Bu rakamlar, ana makine acil arızalarının bir gemi işletmecisine getirdiği genel maliyetlerle karşılaştırıldığında yalnızca bir kısmını yansıtmaktadır (Usman, 2021).

1.2. Denizcilik Sektöründe Enerji Dönüşümü ve Alternatif Yakıtlar

Gemiler için enerji dönüşümleri, teknolojik gelişmelerle birlikte yıllar içinde büyük bir değişim geçirmiştir (Kirolianos ve Jeong, 2022). İnsan gücünden rüzgâr ile çalışan yelkenli gemilere geçişin ardından, deniz taşımacılığındaki ilk büyük enerji dönüşümü, yelkenden motorlu gemilere geçişle gerçekleşmiştir. Bu dönüşüm, sürekli rüzgarların olmadığı bölgelere de ticaret yollarının açılmasını mümkün kılarak, uluslararası sanayileşmenin ve küresel ticaretin temelleri atılmıştır (Corbett vd., 2010). İlk olarak, kömürle çalışan kazanlar kullanarak elde edilen buhar, pistonlu buhar makinelerine; ardından yüksek hızlı buhar türbinlerine geçiş yapmıştır (Çolak, 2023). Daha sonra, sektörün ilk alternatif yakıtı olarak nitelendirilen petrolün tanıtılması, deniz dizel motorlarının kullanımına olanak sağlamıştır. Maliyetleri düşürme, gemi performansını artırma, daha az insan gücüne gereksinim duyulması, yakıt almaksızın gidebileceği mesafenin artması ve hızlanma oranının yüksek olması gibi nedenler kömürden petrole geçiş sürecini desteklemiştir. Bu dönemde; bir yük gemisi, içten yanmalı tahrik sistemini benimseyerek yakıt tüketiminden %78 tasarruf, yük kapasitesinde %30 artış ve seyahat süresinde yaklaşık %50 azaltılabileceği ifade edilmiştir (McCarney, 2020; Corbett vd., 2010).

Deniz taşımacılığında enerji dönüşümü, uzun rotalar, yüksek güç yoğunluğu gereksinimleri, maliyetler, güvenlik, küresel erişim, depolama kapasitesi ve çevresel endişeler gibi faktörlerle şekillenmektedir. Sera gazı emisyonlarının iklim değişikliği üzerindeki ciddi etkilerinin ardından, deniz taşımacılığı sektörü çevresel düzenlemeler bakımından daha sıkı denetimlere tabi tutulmuştur (URL-2, 2024). Bu durum, ağır yakıt kullanımının sorgulanmasıyla güçlü bir yenilenme sürecine girmiştir (Zamboni vd., 2024). Deniz taşımacılığı sektörü, yılda 657 milyon ton emisyon üreterek, otomotiv endüstrisinden sonra ikinci en kirletici sektör konumundadır ve dünya çapındaki SO_x emisyonlarının

%6'ını, küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %3'ünü oluşturmaktadır (Sharples, 2019; Samosir vd., 2017). 2000 ile 2020 yılları arasında gemilerin NO_x ve SO_x emisyonlarının da yaklaşık %40 artışı göstermiştir (Polemis vd., 2023). Sonuç olarak, son yıllarda gemi ana makine tasarımcıları, zararlı kirlenici emisyonlarının en katı sınırlarıyla başa çıkmak zorunda kalmışlardır. Bu sınırlamalar, hava kirliliğini azaltmak ve insan sağlığı ile iklim değişikliği üzerindeki etkilerini en aza indirmek amacıyla ulusal ve uluslararası otoriteler tarafından getirilmiştir. IMO tarafından gemi emisyonlarıyla ilgili yürürlüğe giren başlıca düzenlemeler, Gemi Kirliğinden Korunma Uluslararası Sözleşmesi (MARPOL) EK VI düzenlemesi ile NO_x emisyonları sınırlarını belirleyen Madde 13'ü kapsamaktadır. Emisyon Kontrol Alanları içinde uygulanan en katı NO_x Aşama III emisyon sınırları (Tier III) ile Aşama I (Tier I) limitleri kıyaslandığında yaklaşık %80 oranında bir azalma sağlamaktadır (Deng vd., 2021). 2018 yılında, IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü), 2050 yılına kadar denizcilik sektöründen sera gazı emisyonlarını 2008 seviyelerine kıyasla %50 oranında azaltmak için uzun vadeli bir hedef açıklamıştır (Law vd., 2021). CO₂ emisyon hedeflerinde ise, 2030 yılına kadar en az %40, 2050 yılına kadar ise %70 oranında düşüş hedeflenmiştir (Curran vd., 2024). Ayrıca, MARPOL EK VI, madde 14 ile SO_x ve PM emisyonları sınırları ve gemilerin CO₂ emisyonları ile ilişkilendirilen Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI) üzerinden yapılan düzenlemeler bulunmaktadır (URL-3, 2024). 1 Ocak 2020'den itibaren denizcilik yakıtlarının kükürt içeriği %0,5 ile sınırlanmış, IMO'nun uyguladığı Emisyon Kontrol Alanları (ECA'lar) için bu sınır %0,1 olarak belirlenmiştir (Lion vd., 2020).

Gemi emisyonları ile ilgili yapılan düzenlemeler şu anda denizcilik sektöründeki tüm paydaşları sorumluluğundadır ve günümüzde tüm ihtiyaçlara uygun tek bir çözüm bulunmamaktadır. IMO tarafından belirlenen hedeflere ulaşılabilmesi için, farklı gemi türleri ve görevlerine yönelik özel gereksinimlere en uygun çözüm için önemli araştırmalara ihtiyaç vardır. Gemi emisyonların azaltmak için enerji verimliliğini, yenilebilir enerji kullanımı, yüksek verimli makineler, kükürt ve azot oksit azaltıcı teknolojiler, atık ısı geri kazanım sistemleri, hibrit veya elektrikli gemiler, dijitalleşme ile birlikte gemi idare ve yönlendirme teknolojileri gibi yöntemler bulunmaktadır. Denizcilik sektörü, birçok teknolojik seçeneğin güvenlik, teknik yeterlilik, ekonomik performans ve çevresel etki gibi temel kriterlere karşı değerlendirileceği bir geçiş sürecine girmiştir (Mccarney, 2020). Kısa dönem hedefleri için alternatif yakıtların kullanımı en umut verici çözüm olarak görülmektedir. CO₂ emisyonu azaltma hedefini karşılamak için, 2040'ların ortalarına kadar deniz motorlarının %50'sinin alternatif yakıtlarla çalışır hale gelmesi beklenmektedir

(Curran vd., 2024). Özellikle karbon salımı olmayan yakıtların (yeşil hidrojen ve amonyak gibi) kullanımı, deniz taşımacılığının tamamen karbon salımsız hale gelmesini sağlayabilecektir. Günümüzde gemilerin yaklaşık %98'i geleneksel yakıtlarla işletilmekte olup, ticari olarak kullanılabilir alternatif çözümler hâlâ sınırlıdır. Gemi siparişlerinin yaklaşık %21'inin alternatif yakıt kullanan gemilerden oluşması, bu yakıtlara yönelik artan ilgiyi göstermektedir. (Percic vd., 2023). Dünyada en fazla tartışılan alternatif yakıtlar arasında hidrojen, amonyak, metanol, etanol, LPG, dimetil eter ve biyoyakıtlar öne çıkmaktadır. 2018 yılında DNV.GL, geleneksel denizcilik yakıtların yerini alacak alternatif yakıtların etkilerini incelemiş ve LNG, LPG, metanol ve biyoyakıtları, emisyon limitlerini karşılayabilecek ve maliyet açısından da umut verici olarak belirlemiştir (URL-4). Ayrıca, LNG talebinin üssel bir artış göstereceği öngörülmüştür (Law vd.,2022). Başlangıçta bu motorlar, sıvılaştırılmış doğal gaz taşıyan gemilere kurulmuş, daha sonra LNG'nin düşük fiyatı ve atmosferde neredeyse sıfır zararlı kirleticiler olması nedeniyle, diğer gemi türlerinde de ilgiyi beraberinde getirmiştir (Polemis vd., 2023). Alternatif yakıtların her birinin kimyasal ve fiziksel özellikleri farklıdır (Rony vd., 2023). Tablo 1'de alternatif yakıtlar ile ilgili temel bilgilere yer verilmiştir. LPG ve metanol sadece belli bir sıcaklık ve

Tablo 1. Alternatif yakıtların karşılaştırılması (Rony vd., 2023)

Alternatif yakıt	Kimyasal formül	Yoğunluk (kg/m ³)	Setan sayısı (°C)	Kaynama noktası (°C)	Alt ısıt değeri (°C)	Tutuşma sıcaklığı (%vol)		Gemi ana makinesinde emisyon yoğunluğu			
						Min.	Maks.	CO ₂	SO _x	NO _x	PM
Amonyak	NH ₃	0,73	120*	-33	651	15	28				
Biyodizel	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	880**	50**	>180	261	0,6	7,5				
Etanol	C ₂ H ₅ OH	789	10	78	365	3,3	9				
F-T Dizel	C ₁₈ H ₃₆	778**	77**	>180	204	0,6	7,5				
Hidrojen	H ₂	0,09	>130*	-253	585	4	75				
Hidrojenize Bitkisel Yağı	C ₁₈ H ₃₆	780**	>70	>180	204	0,6	7,5				
Düşük Sülfürlü Ağır Yakıt	C ₁₈ H ₃₆	993**	>20	>180	210	0,6	7,5				
Deniz Dizel Yakıtı	C ₁₈ H ₃₆	819**	>35	>180	210	0,6	7,5				
Metanol	CH ₃ OH	792	<5	65	464	6,7	36				
Doğal Gaz	CH ₄	0,78	130*	-162	540	5	15				
Doğrudan Bitkisel Yağı	C ₁₈ H ₃₆	930**	38**	>180	424	0,6	7,5				

** : Ortalama Değer ; * : Oktan Sayısı; Kırmızı: Yüksek; Yeşil: Orta; Mavi: Düşük

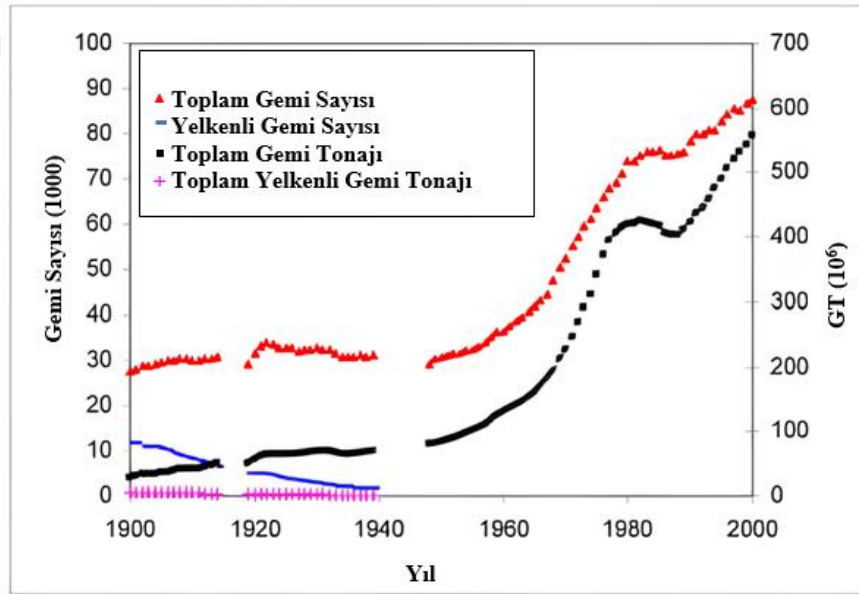
basınçta depolanabilir. Hidrojenin depolanması ve taşınması sıvılaştırılmış yakıtlara göre farklı bir altyapı gereksinimi vardır. Amonyak yanıcı ve zehirli bir gaz olması nedeniyle güvenlik tedbirleri daha katı olmalıdır. Bu farklılıklar gemi tasarımını, güvenliğini ve işletimini etkileyen önemli faktörlerdir. Her bir yakıt, kendine özgü zorluklar ve fırsatlar sunmaktadır.

1.3. Küresel Motorlu Gemi Filo Gelişim Süreçleri

Dizel motoru, ilk motorlu gemilerden bu yana ticari gemi segmentinde baskın bir güç kaynağı olarak modern deniz taşımacılığının gelişiminde belirleyici bir rol oynamıştır. (Novac, 2011). 1912 yılında inşa edilen Selenadia gemisi, ilk motorlu yük gemisi olarak tarihe geçmiştir (Polemis vd., 2023). Bu gemi, iki adet motorla donatılmış olup, önemli bir teknolojik yeniliği temsil etmektedir. Selandia ve diğer erken dönem dizel motorlu gemilerin performansı ve güvenle işletilmesi buhar makinelerinden motorlu gemilere geçmeye teşvik etmiştir. İki dünya savaşı arasında, motorlu gemi kullanım oranı %1,3'ten %25'e yükselmiştir (Novac, 2011). 1939 yılı itibarıyla, dünya çapındaki tersanelerde tamamlanan gemilerin yaklaşık %60'ı motorlu gemilerden oluşmakta olup, bu oran 1920'de yalnızca %4'dür. 1914 yılında, Dizel motorlarıyla donatılmış yalnızca 300'ün altında gemi bulunmaktaydı. Ancak, bu teknoloji hızla benimsenmiş ve 1920'ler itibarıyla, deniz taşımacılığında dizel motorlarının kullanımı önemli bir artış göstermiştir. On yıl sonra, yani 1924'te, bu sayı yaklaşık 2000 gemiye ulaşmıştır. 1940 yılına gelindiğinde ise, dünya genelinde yaklaşık 8000 gemi, denizcilik alanında dizel motorlarıyla işletilmeye başlanmıştır (Polemis vd., 2023; Griffiths, 1995). 1948 yılında, buharla çalışan gemiler, filodaki gemilerin %68'ini ve toplam tonajın %79'unu oluştururken, motorlu gemiler filonun %29'unu ve tonajın %20'sini, yelkenli gemiler ise filonun %4'ünü ve yalnızca %1'lik tonajını temsil etmekteydi. 1959 yılı itibarıyla motorlu gemiler, filonun %52'sini ve tonajın %39'unu, 1963 yılında ise filonun %69'u ve tonajın %49'unu oluşturmuştur. 1970 yılına gelindiğinde ise motorlu gemiler, hem gemi sayısı hem de yük tonajı açısından filoda hakimiyet kurmuş ve gemi sayısında %85, yük tonajında ise %64'lük bir paya sahip olmuştur. (Corbett vd., 2010). Zamanla ve teknolojinin gelişmesiyle, deniz motorları daha küçük boyutlara sahip olmuş, güç ve verimlilik artmıştır ve bu, gemilerin mimarisini köklü bir şekilde değiştirmiştir. Dünya genelindeki gemi filosu, 1870'lerden itibaren yelkenli teknelerden motorlu gemilere geçiş yaparak, bu dönüşümünü 1940'lara kadar tamamlamıştır. Kömürle çalışan buharlı gemiler,

1920'lere kadar yaygınken, sonrasında dizel motorlar ve petrol ile çalışan kazanlara geçişle birlikte yerini yavaşça petrol ürünlerine bırakmaya başlamıştır. Modern gemi ana makinelerine geçiş ise yavaş bir süreç olup 100 yılın üzerinde bir zamanı kapsamıştır. 1961'de hâlâ 10.000'den fazla buharlı gemi ve 3.536 buhar türbini motorlu gemi operasyonel durumda ve sayıca %36'sını kapsamaktaydı.

20. yüzyılda, okyanus geçişi yapan sivil dünya filosu önemli ölçüde artmış, 1980 yıllarında 72.000'den, 2000 yılı itibarıyla toplamda 88.000 gemiye ulaşmıştır. Bu dönemde brüt tonajdaki (GT) artış, 22 milyon GT'den 558 milyon GT'ye kadar yükselmiştir (Endresen vd., 2007). Şekil 3'te gemi sayısının yıllara göre dağılımı verilmiştir. Bu büyüme, yolcu ve yük taşımacılığına olan artan talep tarafından yönlendirilmiştir. 1920 yılında 300 milyon ton (MT) yük taşınırken, 2000 yılında bu rakam 5.400 milyon tona (MT) ulaşmıştır (Corbett vd., 2010). 2007 yılı itibarıyla, dünya ticaret filosu büyük ölçüde dizel motorlarla donatılmış olup, 100 GT ve üzeri tonajdaki gemiler arasında yaklaşık 96.000 gemi yer almaktadır. (Khondaker vd., 2016). 2024 yılı itibarıyla gemi sayısı 108.789 adet ve tonajı 2.353.899 DWT tonajına ulaşmıştır (UNCTAD, 2024).



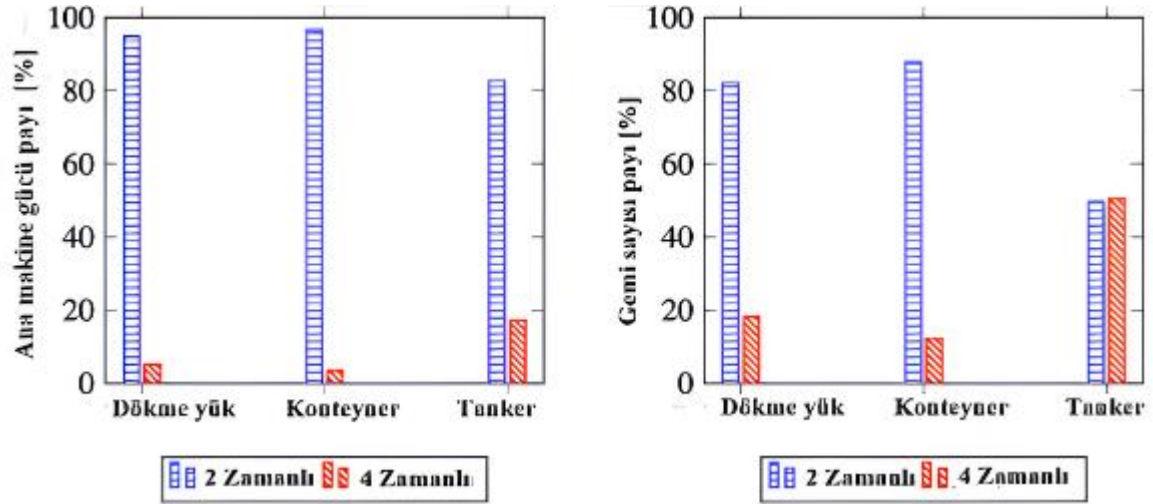
Şekil 3. 100 GT üstü dünya filo ve ticaret gelişimi (Endresen vd., 2007)

Bugün, ticari denizcilik sektöründe, kapasitesi 365.000 tona kadar ulaşabilen büyük kuru yük gemileri, 300.000 tona kadar taşıyabilen ham petrol tankerleri, 18.000 konteyner taşıma kapasitesine sahip konteyner gemileri bulunmaktadır (Anantharan vd., 2015). Bu gemiler, 4.000 kW ile 100.000 kW arasında değişen güç çıkışlarına sahip, yüksek kapasiteli

dizel tahrik motorlarıyla işletilmektedir (Doug, 2004). Günümüzde, gemilerin yaklaşık %98'i ana tahrik olarak dizel makine kullanmakta, bunların %85'inden fazlası doğrudan pervaneye bağlı iki zamanlı motorlardır (Gürgen, 2021; Matulic, 2020; Dere, 2015; Fonte vd., 2015). 2000 yıllarında bu oran kayıtlı filonun toplam kurulu gücü 109.000 MW olan ve yaklaşık 84.000 adet dört zamanlı motora; toplam kurulu gücü 164.000 MW olan ve yaklaşık 27.000 adet iki zamanlı motora sahipti. Bilinmeyen ve diğer ana motorlar için toplam kurulu gücün yaklaşık %2,5'ini oluşturuyordu (Corbett vd., 2010). Tablo 2'de 2002 yılı gemi filo sayısı ve ana makine sayısı ve toplam güç değerleri gösterilmiştir. Üçüncü IMO sera gazları çalışma raporuna göre dökme yük gemileri, tankerler, genel kargo gemileri ve hizmet gemileri toplam dünya filosunun yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır. Kurulu gücün yaklaşık %30'u ve operasyonel birim gemi sayısının %8,3'ü ile konteyner gemileri, kısmen düşük oranlara sahip olmasına rağmen önemli bir paya sahiptir. Dökme yük gemileri ve tankerler ise daha düşük tasarım hızlarına (<15 kn) ve yüksek ortalama ölü ağırlıklara (>70.000 T) sahip olup, ana makine kurulu güç açısından sırasıyla ikinci (%21,5) ve üçüncü (%20,1) sırada yer almaktadır. (Mondejar vd., 2018; Gürgen, 2021). Ana makine 2 zamanlı ve 4 zamanlı ana makinelerin gemi türüne göre dağılımı Şekil 4'te gösterildiği gibidir.

Tablo 2. 2002 yılı dünya gemi filo sayısı, ana makine sayısı ve toplam güç oranları (Corbett vd., 2010)

Gemi tipi	Gemi sayısı	Dünya filosundaki yüzdesi	Ana makine sayısı	Ana makine yüzdesi	Kurulu güç (MW)	Toplam güç yüzdesi
Ticari yük gemileri	43.852					
Konteyner gemileri	2.662	%2	2.755	%2	43.764	%10
Genel kargo gemileri	23.739	%22	31.331	%21	72.314	%16
Tanker gemileri	9.098	%8	10.258	%7	48.386	%11
Dökme yük gemileri	8.533	%8	8.781	%6	51.251	%11
Ticari yük taşımayan gemiler	44.808	-	15.646	-	19.523	-
Yolcu gemileri	8.370	%8	15.646	%10	19.523	%4
Balıkçı gemileri	23.371	%22	24.009	%16	18.474	%4
Kurtarma botları	9.348	%9	16.000	%11	16.116	%4
Diğer (Araştırma, Tedarik)	3.719	%3	7.500	%5	10.265	%2
Kayıtlı filonun toplamı	88.660	%82	116.280	%77	286.093	%62
Askeri gemiler	19.646	%18	34.633	%23	172.478	%38
Dünya filosu toplamı	108.306	%100	150.913	%100	452.571	%100



Şekil 4. İki zamanlı ve dört zamanlı ana makinelerin gemi türüne göre dağılımı (Mondejar vd., 2018)

Son yirmi yılda, iki zamanlı düşük hızlı makinelerin, dört zamanlı makinelere kıyasla genel olarak pazara hakim olma ana nedenleri, yüksek verim, yüksek güç yoğunluğu, büyük çaplı pervane uyumu, doğrudan pervaneye bağlanabilmesi ve bu sayede son derece pahalı olan dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaması olduğu söylenebilir (Gürgen, 2021; Vera-García vd., 2019). Mevcut LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) taşıyıcılarında bu dişli kutuları, toplam gemi maliyetinin üçte birini oluşturabilmektedir (Anantharan vd., 2015). Ayrıca düşük hız, büyük pervane çapı ile ilişkilidir ve bu da daha yüksek pervane verimliliği sağlamaktadır (Doug, 2004). Önümüzdeki birkaç on yıl daha, iki zamanlı deniz motorları, uluslararası deniz taşımacılığı için tahrik gücünün en büyük kısmını sağlamaya devam edeceği tahmin edilmektedir. (Curran vd., 2024).

1.4. İki Zamanlı Gemi Ana Makinesinin Gelişim Süreci

İyi geliştirilmiş teknoloji ve yüksek tahrik verimliliği sayesinde, iki zamanlı deniz motorları, okyanus yük gemilerinin ana tahrik motorları olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Sui vd., 2022). Deniz taşımacılığının küreselleşen ekonominin artan taşıma taleplerine yanıt verebilmek için yüksek güç üretme kapasitesine sahip 9 makine üreticisi güçlü ve güvenilir motorlar üretmek için gemi inşa pazarında son yüzyılda kıyasıya bir rekabet içinde olmuştur. Hatta 2. Dünya savaşı sırasında bile araştırma çalışmaları hız kesmeden devam etmiştir. Bu alanda en çok öne çıkan firmalar, Danimarka'nın Kopenhag şehrinden B&W, Almanya'nın Augsburg şehrinden MAN ve İsviçre'nin Winterthur

şehrinden Sulzer idi. Diğer rakipler ise İngiltere'nin Sunderland şehrinden Doxford, Hollanda'nın Hengelo şehrinden Stork, Amsterdam'dan Werkspoor, İsveç'in Göteborg şehrinden Götaverken, İtalya'nın Torino şehrinden Fiat ve Avrupa dışından Japonya'nın Nagasaki şehrinden Mitsubishi'dir (Doug, 2004). Ancak, düşük hızlı motor sektöründeki gelişim hızında rekabetçi kalabilmek için gerekli olan Ar-Ge, üretim ve yurtdışı altyapı yatırımları önemli bir maliyet oluşturmuş, uluslararası pazarda aktif kalan sadece üç tasarımcı/lisans sağlayıcı (MAN B&W, Mitsubishi ve Sulzer-Warstsila-WinGD) kalmıştır (Polemis vd., 2023). Bu öncü tasarımcılar, iki veya dört zamanlı, tek etkili-çift etkili ve farklı piston dizilişi sunan kendilerine özgü yaratıcılıklarını sergilemişlerdir.

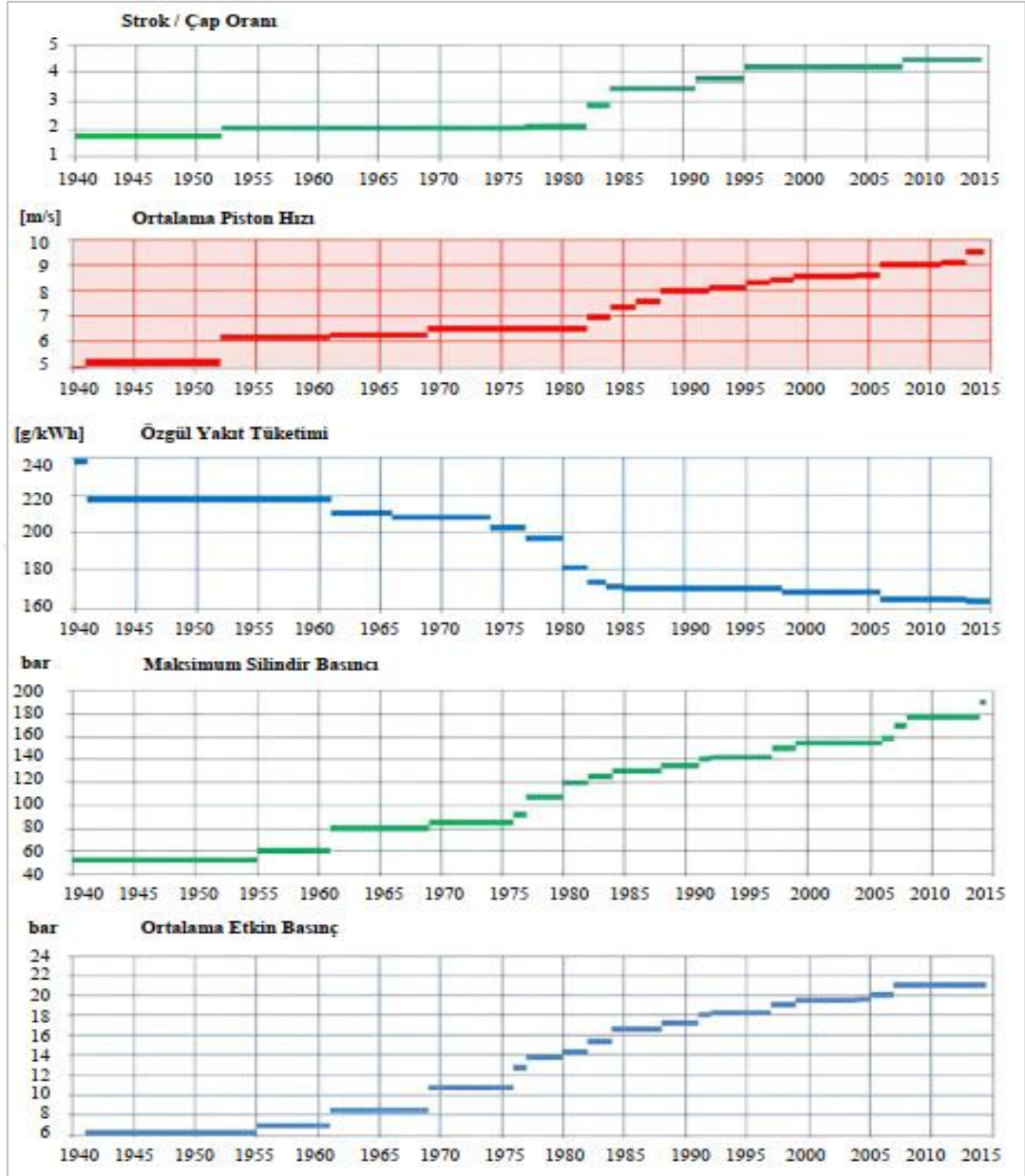
İki zamanlı gemi ana makinelerine olan pazar talebi, diğer segmentlerindeki motorlardan oldukça farklıdır. Motorların boyutu ve her yeni model için gerekli olan prototip yatırımı nedeniyle, prototip testleri genellikle lisansiyerin tesislerinde, bir müşteri motoru üzerinde yapılmaktadır. Deniz taşımacılığı işinin sürekli değişen doğası, düşük üretim ve motorların donatıldığı gemi çeşitliliği nedeniyle yüksek derecede özelleştirilmiş ürün haline gelmesine neden olmuştur (Kyrtatos vd., 2016). İki zamanlı motorların çok büyük boyutları nedeniyle, dayanıklılık testlerinin yapılması ve test yatağında arızaların tespit edilmesi mümkün olmamaktadır. Birçok gemi sahibi, motor tasarımcılarının test alanı olarak hareket etmektedir. Gemi dizel motorların pazar gereksinimi; motor gücü, motor hızı, beklenen ömür ve motor alanıdır. Diğer motor endüstrileri ile paylaşılan aynı derece de önemli gereksinimler ise, emisyonlar, yakıt ve yağ tüketimi, güvenilirlik, bakım kolaylığı ve üretim maliyetidir (Kyrtatos vd., 2016; Griffiths, 1997). Motor geliştirme sürecinde, motor tasarımcısı bu gereksinimler arasında denge kurmaya çalışır ve interaktif bir süreçtir. Son yüzyılda dizel motorlarının temel çalışma prensibi büyük ölçüde değişmemiş olsa da, motor teknolojisinin gelişimi önemli iyileştirmelere sahne olmuştur. Her gemi motor üreticisi tarafından iki zamanlı ana makinelerdeki beklentilerin karşılanması, sorunların giderilmesi ve rekabet edebilmek için birçok yeni tasarım ve iyileştirmeler uygulamıştır. Zaman içerisinde gerçekleştirilen önemli gelişmeler iki zamanlı çevrime geçiş, farklı süpürme sistemlerinin uygulanması, turboşarjın entegrasyonu, pervane ile doğrudan bağlantının benimsenmesi, artan güç ve termal yük nedeniyle soğutma verimliliğinin artırılması, geliştirilmiş enjeksiyon sistemleri ile yanma sürecinin optimizasyonu, düşük devir sayısı, yüksek yanma basıncı, düşük yağ-yakıt tüketimi, yüksek piston hızına sahip işletme koşulları ve yüksek strok/çap oranı gibi yapısal modifikasyonlar olarak sıralanabilir. Arıza ve farklı

çalışma koşullarında esneklik ve optimizasyon sunan akıllı makineler ile gelişimini sürdürmektedir.

Gemilerin hızının ve boyutunun artırılmasıyla, ton başına maliyetlerinin düşürülmesi ve yatırılan sermaye üzerinde daha fazla kazanç elde etme düşüncesi gemi ana makinelerinin daha güçlü olmasını zorunlu kılmıştır (Yellowley ve Collin vd., 1962). Bu sebeple motor gücünün artırılması ve motor boyutunun ve ağırlığının azaltılması için önemli bir faktör olan turboşarj uygulaması son yüzyılın en önemli motor iyileştirmelerinden biri olduğu söylenebilir. Turboşarjın mucidi olarak kabul edilen İsviçreli mühendis Alfred Büchi tarafından 1905 yılında patentin alınmasından yaklaşık 50 yıl sonra büyük iki zamanlı deniz motorlarına verimli bir şekilde uygulanabilmiştir (Hartman, 2011). Dört zamanlı motorların turboşarjlar ile donatılması 1930'ların ortasında pazarda iyi bir kabul görmüş ve bu dönemde iki zamanlı motor üreticilerin rekabet edebilmek ve uygun süpürmeyi sağlamak için çeşitli yollarla basınç artırma teknolojilerini benimsemiştir. Krank milinden tahrik edilen hava pompaları, kroset kollarıyla tahrik edilen pompalar, bağımsız tahrikli pompalar, piston eteğinin pompa işlevi görmesi olarak sıralanabilir (Griffiths, 1997). İki zamanlı motorlarda ayrı bir egzoz ve hava alma strokları olmaması; bunun yerine, sadece alt ölü nokta etrafında egzoz gazlarını dışarı atmak ve silindiri taze hava ile doldurmak için kısa bir süre olması nedeniyle iki zamanlı motorlarda turboşarj uygulamasının daha karmaşık bir hal aldığı söylenebilir (Dere, 2015; Dragsted, 2013). Aynı zamanda motor üretici firmalarının benimsediği farklı süpürme yöntemleri olması nedeniyle de turboşarj tasarım açısından herkes için ortak bir çözüm bulmak kolay olmamıştır (Doug, 2004). Bu dönemde B&W, Doxford, Götaverken, Mitsubishi, Stork ve Werkspoor doğru akımlı (uniflow) süpürme prensibini benimserken, Fiat ve Sulzer çapraz enine süpürme (cross scavenging) kullanmış, MAN ise dönüşlü akımlı süpürme (loop scavenging) sistemini tercih etmiştir (Dragsted, 2013). Çapraz enine süpürme ve dönüşlü akımlı süpürme yöntemlerinde silindir gömleğinde özel portların kesilmesi pahalı bir işlem olmasının yanında egzoz valfini ve ona bağlı ağır dişlileri ortadan kaldırması bu yöntemlerin benimsenmesine haklı bir gerekçe sunmuştur (Doug, 2004). Buna karşın, uzun stroklu motorlara geçiş sürecinde süpürme verimliliği açısından yetersiz kalan çapraz enine süpürme ve dönüşlü akımlı süpürme yöntemlerine büyük bir baskı oluşturmuştur (Dragsted, 2013; Hageman vd., 2015). Gelişim, elektronik gemi dizel motorların üretimine kadar motor tasarımcılarını iki zamanlı, krosetli, doğru akımlı süpürme sistemi, hidrolik aktüatörlü egzoz valfi, yağ ile soğutulan piston, sürekli

basıncılı turboşarj sistemi gibi ortak bir temel felsefeye dayalı olarak hareket etmelerini sağlamıştır.

Son yüzyılda gemi motor geliştirme süreci, daha düşük dönüş hızları, daha yüksek maksimum yanma basınçları ve daha iyi yakıt ekonomisine de odaklanmıştır. Gazın daha fazla genişlemesine olanak tanıyarak daha yüksek yakıt verimliliği elde edilme yaklaşımı, daha uzun bir piston stroku ve daha düşük dönüş hızını gerektirmiştir (Griffiths, 1997). Daha yavaş dönüş ile birlikte pervane verimliliği de artırmıştır (Kyrtatos, 2016). Ortalama piston hızı ve etkin basıncı koruyarak motor devir sayısının azaltılmasıyla verimliliği artırma düşüncesi uzun yıllar kabul görmüştür (Doug, 2004). Gerekli düşük devir ve ulaşılabilir maksimum piston hızı sınırlamaları nedeniyle, deniz motorları çok yüksek bir strok çap oranına sahiptir. Motor yerleşimi için ana parametrelerden biri olan strok çap oranı, motor karakteristik diyagramı ve motorun ana boyutlarını belirleyen temel parametredir (Kyrtatos vd., 2016). Son yüzyılda, tahrik verimliliğini optimize etmek, pervane hızlarını minimize ederken, strok çap oranları ve ortalama piston hızında ciddi bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu artış, belirli bir strok çap oranının üzerine çıkıldığında, artan süpürme gereksinimi, segmanlardaki sürtünme nedeniyle yüksek yüzey alanına bağlı olarak ısı kayıpları artırdığı ve bunun sonucunda artan özgül yakıt tüketimi (SFC) ile ilişkilidir. Artan özgül yakıt tüketimi, son 60 yılda gözlemlenen maksimum silindir basıncı (MCP) ve ortalama etkin basınç (MEP) artışıyla büyük ölçüde telafi edilmiştir (Anantaharan vd., 2020). Modern süper uzun stroklu motorlar için strok/çap oranı 4.2'ye kadar çıkabilmektedir (Doug, 2004). Bu oran, 1915 yıllarına kıyasla yaklaşık iki kattan daha fazla artmıştır. Ortalama piston hızı 5 m/s'lerden 9,8 m/s'lere; özgül yakıt tüketimi 240 g/kWh'lardan 160 g/kWh'lara; maksimum silindir basıncı 50 barlardan 180 barlara; ortalama efektif basınç 6 barlardan 20 barlara çıkmıştır (Şekil 5, Dragsted, 2013). Böylelikle motor verimliliği, 1975'te %35-40 civarından iken, günümüzde %50'nin üzerine yükselmiştir (Corbett, 2004). Aynı zamanda, pervane verimliliği, motor hızlarının %40'tan fazla bir oranda azaltılması sayesinde önemli ölçüde geliştirilmiş ve artık 55 dev/dak kadar düşük hızlara inmiştir. Çap boyutları 260 mm ile 1080 mm arasında, silindir sayıları ise 4 ile 14 arasında değişen düşük devirli iki zamanlı motorlar, farklı gemi türleri ve ihtiyaçlara göre çeşitli seçenekler sunmuştur. MAN B&W'nin 1990 yıllarında tanıttığı 12 silindirli, 68.640 kW güç sağlayan K98MC modeli, 1970'lerde buna karşılık gelen 12 silindirli B&W K98GF modelinin yalnızca 36.800 kW gücünü sağlaması bu dönemdeki ilerlemeyi gözler önüne sermektedir.



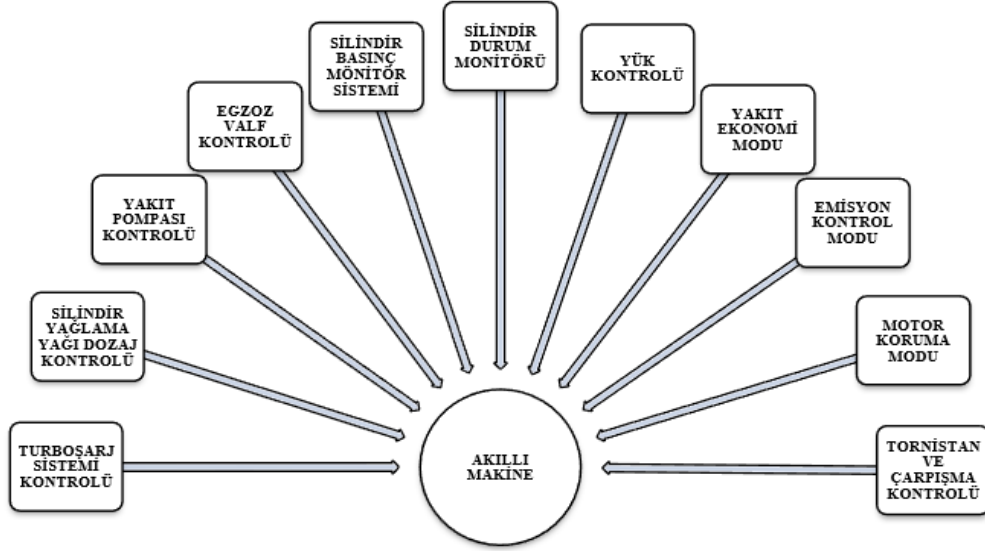
Şekil 5. Gemi ana makine karakteristik özelliklerinin gelişimi

Son yıllarda içten yanmalı makinelerin gelişimindeki temel hedef, giderek daha sıkı hale gelen emisyon düzenlemelerine uyum sağlamaktır (Nahim vd., 2015). Bu amaca ulaşmanın yöntemlerinden biri ise makinelerin tasarımında elektronik kontrol sistemlerinin kullanılmasıdır (Polemis vd., 2023). Elektronik kontrollü makineler, ilk dizel motorun keşfi, daha sonra turboşarj ile donatılması gibi tarihsel bir olay ve adım olarak görülebilir. Motorun NO_x emisyonlarını azaltmak amacıyla emülsife yakıt, emme manifolduna su fumigasyonu, suyu silindir içerisine direkt püskürtme, buhar enjeksiyonu, ortak hatlı yakıt sistemi, miller çevrimi, egzoz gazları geri dolaşımı (EGR), seçici katalitik indirgeme (SCR) gibi çeşitli

teknolojiler ve yöntemler kullanılmıştır (Kökkülünk, 2012). Elektronik kontrollü enjeksiyon sistemlerinin geliştirilmesi, çoklu enjeksiyonlar, enjeksiyon zamanlamalarının ve enjekte edilen yakıt miktarlarının hassas bir şekilde kontrol edilmesini mümkün kılmıştır. Ancak yakıt enjeksiyon optimizasyonunun, NO_x emisyonlarını azaltma kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle (Tier III) limitlerine ulaşmak için yeterli olmamaktadır. Yakıt enjeksiyon optimizasyonu, Miller döngüsü ve ıslak yanma, egzoz gazı geri dönüşümü (EGR) gibi tek bir teknolojinin NO_x emisyonlarını azaltma potansiyeli sınırlı olduğundan, bu teknolojilerin birleşik uygulanması hususunda önemli araştırmalar yapılmıştır.

Endüstri 4.0 ile birlikte; dijitalleşme, otomasyon, yapay zeka (AI), nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve diğer ileri teknolojilerin üretim süreçlerine entegrasyonunu gemi ana makinelerinin tasarımı, üretimi, işletilmesi, bakım ve yedek parça süreçlerinin planlamasında köklü yenilikler getirmiştir. Dijital ikiz teknolojisi ile birlikte, gemi ana makinelerinin tasarım aşamasında model tabanlı simülasyonlar aracılığıyla sanal bir kopyasını oluşturulmakta, gerçek zamanlı verilerle gemi motorunun performansı, yakıt tüketimi, yanma kalitesi, egzoz emisyonları gibi birçok parametre izlenilebilmektedir. Aynı zamanda gelişmiş sensörler, makine öğrenimi, yapay zeka algoritmaları ile gemi makineleri daha akıllı hale gelmiştir. Şekil 6'da MAN B&W akıllı makinesinin şeması gösterilmiştir. Böylelikle işletme parametreleri sürekli izlenip gerektiğinde insan müdahalesi olmadan yakıt enjeksiyon, egzoz valf sistemlerinin zamanlaması, silindir yağ dozaj miktarı, soğutma yük ayarlamaları ve turboşarj valf kontrollerinin yapılmasına imkan sağlamıştır (Doug, 2004; Polemis vd., 2023). Motorun genel durumunu takip etmek amacıyla bir durum izleme sistemi kullanılmakta ve böylece motor performansı korunup işletim parametreleri belirlenen sınırlarda tutulabilmektedir. Sistemin her bir silindire özel enjeksiyon miktarına ve enjeksiyon zamanlamasına karar vermesi tüm silindirlerde aynı yük ve aynı ateşleme basıncı (P_{max}) elde edilebilmesinin yanında arıza durumunda belirli bir silindirin yükü ve maksimum basınç değerlerinin azaltılabilmesini sağlamıştır. Sıkıştırma sonu basınçları veya egzoz gaz sıcaklık verileri değerlendirilerek egzoz valf kaçakları, segman veya silindir gömleği aşınma durumları tespit edilebilmiştir. Silindir yağlaması makine yük artışına paralel olarak veya silindir gömleği aşınması vb. arıza durumlarında silindir yağ dozaj miktarı düzenlenebilmektedir. Turboşarj sistemi kontrolünde değişken geometriye sahip turboşarjlar ile hava basıncının kontrol edilmesi veya sistemde yer alan by-pass valfi, cut off valf ve seçici katalitik indirgeme sistem valflerinin kumandası otomatik yapılabilmektedir. Bir diğer yeni özellik ise yük bağımlı silindir soğutma sistemidir. Bu sistem, motor yükü ne

olursa olsun, silindir gömleği sıcaklıklarının çiy noktasının altına düşmesini engellemek için tasarlanmıştır. Arızaların tahminlenebildiği, bakım süreçlerinin planlandığı, yedek parça yönetiminin düzenlendiği ve bu sistemlerin makine dairesi diğer ekipmanlara entegre edilerek akıllı makine dairesi sürecine girmiştir.



Şekil 6. MAN B&W'a ait akıllı ana makine şeması (Doug, 2004)

1.5. Gemi Ana Makinesi Arızalarının Nedensel İlişkisi

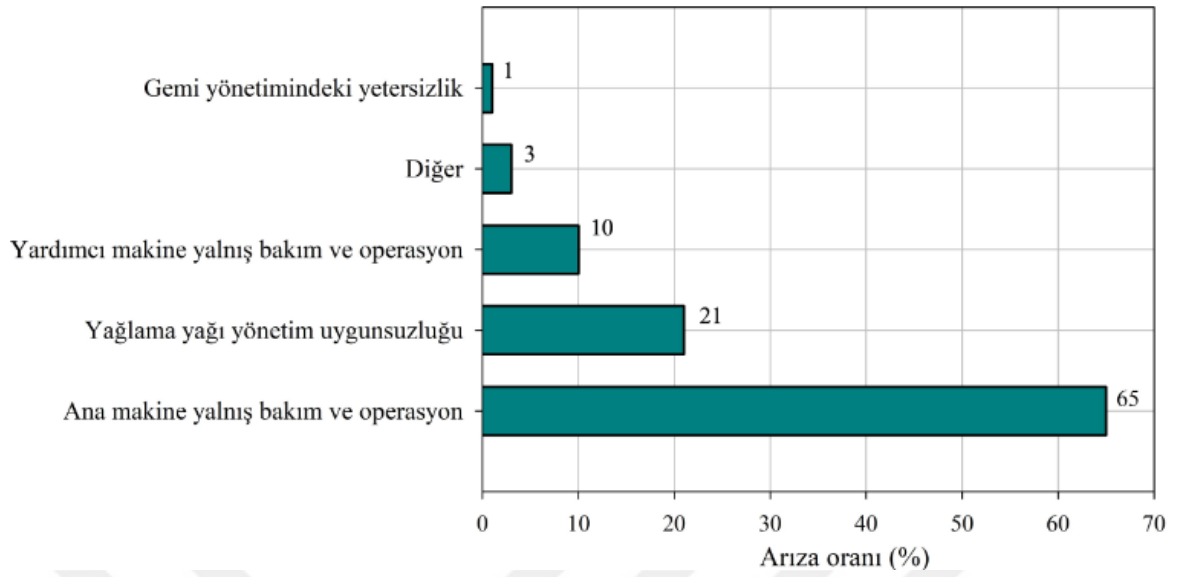
Gemi ana makinesi birbiri ile bütünleşik çalışan; soğutma sistemi, yağlama sistemi, yakıt sistemi, hava sistemleri, motor bloğu ve bileşenleri, silindir bloğu ve elemanları gibi altı alt sistemin varlığından dolayı oldukça karmaşık bir sistemdir (Dayi vd., 2018; Brocken, 2016; Khorasani, 2015; Krakowski, 2014, Khelil vd., 2012; Zhu vd., 2023). Ana makinenin güvenilirliği de bu yardımcı sistemlerin güvenilirliğine bağlıdır (Vizentin vd., 2020; Anantharaman vd., 2018; Çiçek vd., 2010; Banks vd., 2001). Son yıllarda teknolojinin hızlı bir şekilde ilerlemesi, dizel motorların çalışma performansını sürekli olarak iyileştirme çabalarını desteklemiş ve bu süreç, insan, makine ve yazılım etkileşimlerinin giderek artmasına, dolayısıyla sosyo-teknik sistemlerin daha karmaşık bir hal almasına neden olmuştur (Ceylan vd., 2022; Xu vd., 2022; Matulic., 2020). Motor içindeki yardımcı sistemlerin birbiriyle olan bağımlılığı göz önüne alındığında, bir parçada meydana gelen bir arıza, zincirleme bir etki yaparak diğer parçaları da etkileyebilmektedir (Youssef vd., 2024; Zhu vd., 2023). Örneğin, iki zamanlı bir ana makinede süpürme işlemi, kısa zaman periyodunda atmosferik basınçlar altında gerçekleştirilemeyeceği için turboşarj sistemi, iki

zamanlı makineler için elzem bir ekipman haline gelir (Vizentin vd., 2020; Zhu vd., 2020; Heim vd., 2002). Bu sistemde meydana gelecek bir arıza ana makinenin çalışma koşullarına doğrudan etkileyecektir (Lei vd., 2021; Hountalas, 2000). Bu nedenle herhangi bir yardımcı sistemde meydana gelen arıza bütün sistemi etkileyebilecek kadar birbirine bağımlıdır. Arızalar tek tek parçalarda, tüm makinede veya tüm sürecin kendisinde meydana gelebilir (Taleb-Berrouane vd., 2020; Mishra, 2017). Ayrıca arızalar ve belirtileri arasındaki ilişkinin iyi ifade edilmesi gerekir. Bir arızanın birkaç belirtisi olabilir veya bir belirtiyeye birden fazla sebep de olabilir. Bu sebep sonuç ilişkileri genellikle belirsizdir (Khelil vd., 2012). Ana makinenin çalışması sırasında bir bileşenin performansındaki bozulmanın ya da arızanın tüm sistemi etkilemesinden kaynaklı arıza tespiti oldukça karmaşık ve zorlu bir süreç haline gelebilmektedir. Bu karmaşıklık, bir arıza kaynağının birden fazla arıza belirtisiyle ilişkilendirilebilmesinin yanı sıra, aynı arıza belirtisinin birden fazla kaynağa işaret etmesi olasılığından kaynaklanmaktadır. Bu durum, motor arızasının kök nedenini bulmayı zorlaştırmaktadır. Örneğin, motorun yüksek egzoz sıcaklığının nedeni, yanma/egzoz sistemindeki bir elemanın arızası olabileceği gibi, görevini yerine getiremeyen bir soğutma sistemi elemanının arızasından da kaynaklanabilir. Sonuç olarak, arızanın kaynağı ile arızanın kendisi arasında basit bir birebir ilişki kurmak mümkün olmamaktadır (Xu vd., 2022)

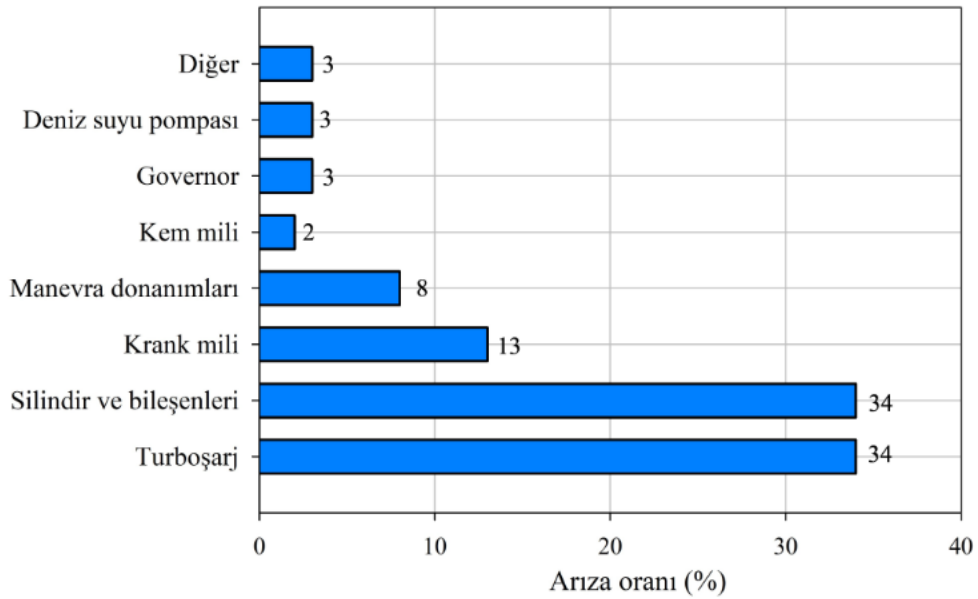
Gemi ana makine arızaları, belirli işlevsel parametrelerin kabul edilebilir çalışma değerlerinin dışına çıkması, performansının düşmesi veya ani durması olarak tanımlanabilir. Çoğu güvenlik sistemi de, motorun güç düşüşü veya güç kaybına odaklanmıştır (Matulic, 2020). Araştırmalar, dizel motor sistem arızalarının doğrusal olmadığını ve kontrol edilemeyen birçok faktörden kaynaklandığını göstermektedir. (Zhu vd., 2023; Mishra vd., 2017). Gemi dizel motorları yüksek ısı ve mekanik streslere maruz kalmaktadır (Osung vd., 2021; Abdulhamid ve Bhanuprakash, 2014) Deniz sistemlerinin bozulma davranışı, operasyon profiline ve çalışma ortamlarına bağlıdır. Yüksek derecede korozyif ortam makine elemanlarının hizmet ömrüne olumsuz etkilemektedir (Smolenska ve Konczewicz, 2010; Schlager vd., 2002; Qixian vd., 2000). Aynı zamanda kötü tasarım ve hatası, orijinal yedek parçaların kullanılmaması, yanlış montaj, düşük kaliteli yağ veya yakıt, bakım eksikliği, uzun çalışma saatleri, makine yaşı, kötü hava koşulları, yüksek titreşim gibi birçok faktör ana makinenin arızalanmasında etkili olabilmektedir (Zhuang, 2020; Göksu, 2020; Mishra, 2017; Cai vd., 2017). Gemi ana makineleri, silindir gömleği-segman veya yataklar gibi birçok tribolojik sistemden oluşur ve motor arızalarının yaklaşık %50'si bu sürtünme

çiftlerinin aşınmasından kaynaklanmaktadır (Xu vd., 2020). Motor bileşenleri farklı hızlarda aşınır ve aşınma sonucu diğer motor parçalarına ciddi zarar verebilecek arızalara yol açmadan önce değiştirilmesi gerekir (Griffiths, 1997). Birçok yazar tarafından da en fazla arıza nedeninin aşınma olduğu vurgulanmıştır (Dayi vd., 2018; Biswas vd., 2013; Giorgio vd., 2007; Gadow vd., 2003). IMO'nun 2020 yılı sonrası yakıt sülfüründeki değişikliği nedeniyle piston segmanlarındaki kırılmalar, silindir gömleği, yakıt pompası, enjektör ve egzoz valf aşınmalarında artışa neden olduğu görüşü hakimdir. Birçok yazar düşük sülfürlü yakıtın daha kaliteli bir yakıt olmasını beklerken arızalardaki artışına neyin sebep olduğunu sorgulamıştır (URL-5, 2024). Bazı yazarlar iç ve dış denetimlerde eksikliklerin arızaları tetiklediğini belirtmiştir (Zhuang, 2020). İsveç sigorta şirketinin 2018 raporuna göre de arıza nedenleri yanlış bakım veya onarım, yanlış yağlama ve yakıt yönetimi kaynaklıdır. Japon sigorta şirketinin 2017 yılındaki raporunda yanlış bakım ve yağlama hatalarına ek olarak yardımcı sistemlerin bakımındaki uygunsuzluklar, yetersiz yönetim de etkili olduğu vurgulanmıştır (Şekil 7). Japonya kara sularında gemi operasyonunu etkileyecek arızalar en fazla turboşarj ve silindir bileşenlerinde meydana gelmiştir ve bunların %70'i insan kaynaklıdır (Şekil 8). Tasarım, kurulum, işletim, bakımında insan faktörü makine yaşam döngüsünde çok önemli bir rol oynamaktadır (Dhillon ve Liu, 2006). Bu durum, makine güvenilirliğinde insan hatasının makine arızalarına etkisine olan ilgiyi de beraberinde getirmiştir (Kandemir ve Çelik; 2021; Demirel, 2021; İslam vd., 2020; Kandemir ve Çelik, 2019; İslam vd., 2017; Akyüz vd., 2016; Noroozi vd., 2013).

Makinedeki herhangi bir arıza meydana geldiğinde, bu arızanın henüz başlangıç aşamasındayken tespit edilip, hızlı bir şekilde giderilmesi önemlidir. Ancak yalnızca arızanın onarılması tek başına yeterli ve etkili bir çözüm sağlamaz. Arızanın temel sebebinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve bu sebebe yönelik gerekli önlemlerin alınması, arızanın tekrarlanmaması için kritik bir adımdır. Bu nedenle, arızanın kaynağına inerek, onu tetikleyen faktörlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Makinenin yaşayabileceği herhangi bir basit bir arıza dahi önceden kestirilip önlem alınmadığında bir başka arızaya neden olur ve tamiri mümkün olmayan hasarlara ve yüksek bakım maliyetine yol açabilir (Özsoysal, 2008). Becker ve Poste (2006), 5000 \$'lık bir rulmanın değiştirilmemesi sonucu kreynde toplam arıza maliyetinin 220.000 \$'a çıkabildiğini ve erken ve doğru arıza tespitlerinin önemini vurgulamıştır (Dikkis ve Lazakis, 2019).



Şekil 7. Gemi ana makinesinin arıza nedenleri (Japan P&I Club, 2017)



Şekil 8. Gemi ana makinesinin donanımsal arıza oranları (Japan P&I Club, 2017)

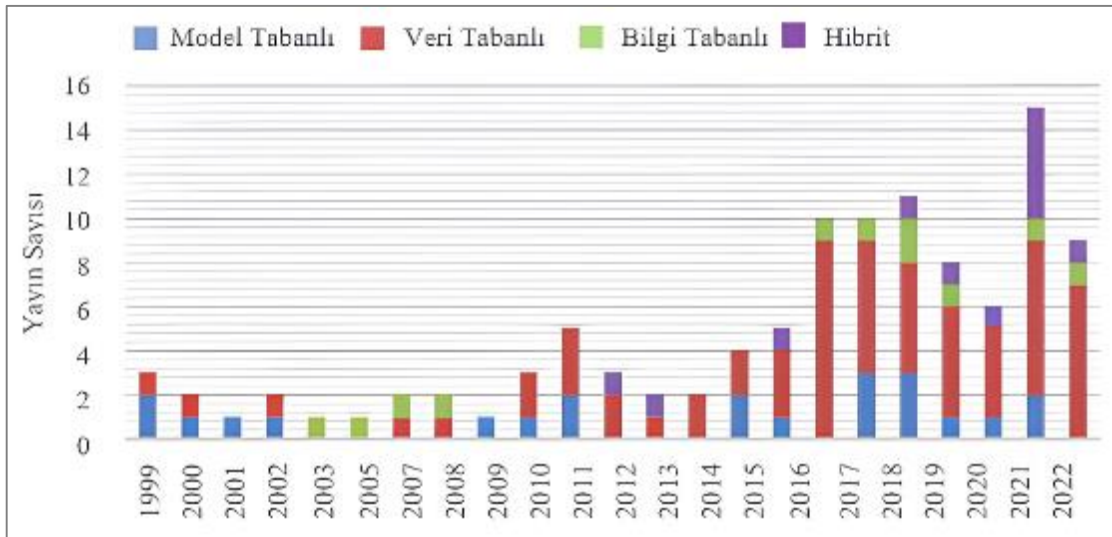
ISM Kodunun 10. Bölümünde, arızaların tespiti, çözümü ve bakımı, nakliye şirketleri sorumlu tutulurken, bunun nasıl yapılacağı belirli kurallarla sınırlı değildir. Makine sistemlerinin bakımı gemide çalışan personel, tersane veya taşeron hizmet sağlayan bakım ekibi tarafından yapılabilir (Göksu ve Enginer, 2020). Gemi ana makinesi gibi karmaşık, hataya açık olan sistemlerde, sistemin çalışır kılınması için yoğun bir çaba gösterilmesi gerekmektedir (Grządziela, 2011; Tzannatos ve Kokotos, 2009). Gemi ana makine işletiminde risk ve belirsizlik altında karar verme, makine ekibinin her zaman karşılaştığı

zorluklardan olmuştur. (Dikis ve Lazakis, 2019). Makinelerin uygun koşullarda çalıştırılması, arıza teşhisi ve ekipmanların bakım-onarımını personel, zaman ve teknik kaynakları dikkate alarak yapması gerekmektedir (Stanivuk vd., 2022). Bu yağlama yağ seviyesinin kontrolü, filtrelerin temizlenmesi, yakıtın bir tanktan diğerine transferinden daha fazlasını içerir (Brocken, 2016). Tespiti zor olan veya nadiren meydana gelen arızaları tespit etmek için de yüksek düzeyde beceri ve tecrübe gereklidir. Bu nedenle yeni arıza tespiti ve teşhisi yaklaşımlarını geliştirmek son yıllarda önemli bir araştırma konusu olmuştur (Atoui vd., 2019; Jun ve Kim., 2017; Liu vd., 2015; Lampis and Andrews, 2009).

1.6. Arıza Analiz ve Tahmin Yöntemleri

Denizcilik sektörü, giderek artan otomasyon, karmaşıklık, birbirine bağımlılık yönünde ilerlemektedir (Lv., 2024; Xu vd., 2022). Bu nedenle, sistem güvenilirliğini incelemek, bu sistemlerin tutarlı ve hatasız bir şekilde performans sergilemesini sağlamak açısından son derece önemlidir (Zio vd., 2022). Sistem güvenilirliğini artırmak amacıyla, arıza tespit, analiz ve teşhisi yöntemleri yaygın olarak kullanılır. Arıza teşhisi, tespit edilen arızaların türünü, boyutunu, yerini ve zamanını belirlemeyi gerektiren ciddi bir süreçtir (Dikis ve Lazakis, 2019). Ancak, bu süreç zaman zaman karmaşık hale gelebilir, çünkü arıza analizi için farklı disiplinler devreye girer ve bir dizi inceleme, gözlem ve laboratuvar analiz yöntemleri de uygulanabilir. Arıza tahmini, bir arızanın meydana gelip gelmeyeceğini belirleme ve ne kadar olası olduğunu tahmin etme görevini üstlenir. Arıza teşhisinin ana amacı ise bir arızanın tespiti, tanımlanması ve kontrol dışı davranışın kökeni hakkında bilgi edinme sürecini kapsar (Dash vd., 2024; Mishra vd., 2017). Arıza teşhis ve analiz, arıza meydana geldikten sonra yapılan bir olay analizidir; arıza tahmini ise olay öncesi bir analizdir. Bu sebeple geçmiş arıza teşhis ve analiz verileri arıza tahminlerinde değerli bilgiler sunar ve birbirini tamamlayan süreçlerdir. Arıza tahminleri, ana makinenin sağlık durumu noktasında önemli bir rol oynar ve modern öngörücü bakımın ayrılmaz bir parçası olup hedefe yönelik bakım için doğru tahminler sağlamada kullanılır (Kobbacy 2008; Mohanty 2021; Karatug ve Arslanoglu, 2022; Karvelis vd., 2021). Ayrıca, arızaların zamanında tespiti, daha büyük arızaların ve yüksek maliyetli hasarların önlenmesine olanak tanır ve operasyonel sürekliliğin sağlanmasına katkıda bulunur (Şahin vd., 2022). Sınırlı deneysel koşullar, veri eksikliği, karmaşık yapısal modeller ve insan faktörü dikkate alındığında bu belirsizlikler geleneksel yöntemlerle güvenilirlik analizlerinin yapılması gereksinimleri

karşılayamamaktadır (Song vd., 2019). Bu amaçla literatürde birçok yeni metodoloji araştırması mevcuttur (Xu vd., 2022; Stoumpos ve Theotokatos, 2021; Wang vd., 2021; Matulic vd., 2020; Dikis ve Lazakis, 2019; Kandemir vd., 2019; Xi vd., 2018; İslam vd., 2017; Cheliotis vd., 2022). Belirli bir arıza tespiti yöntemi seçilirken arıza türleri, süreç yapısı, süreç dinamiği, süreç karmaşıklığı, veri miktarı ve sürecin kural tabanlı olarak tanımlanabilirliği gibi dikkate alınması gereken bir dizi faktör vardır (Miljkovic, 2011). Arıza tespiti ve teşhisi temel olarak; model tabanlı, bilgi tabanlı yöntem, veri odaklı yöntem ve hibrit yöntemler olmak üzere 4 ana grupta değerlendirilebilir (Lv vd., 2024; Dash vd., 2024; Sun vd., 2024; Youssef vd., 2024; Zhang vd., 2022; Cheliotis vd., 2022; Coraddu vd., 2021; Skliros vd., 2018; Jardine vd., 2006). Lv vd. (2024) bibliyometrik çalışmaları Şekil 9'da gösterildiği gibidir. Toplamda incelenen 113 adet makalenin %58'i veri odaklı, %21'i model tabanlı, %11'i hibrit yöntemler, %10'u bilgi tabanlı modellerdir. İlk yıllarda model tabanlı yaklaşımlar baskınken, son dönemde veri odaklı ve hibrit metodolojilere olan eğilim belirgin bir şekilde artmıştır. Bunun sebebi, denizcilik endüstrisinin teknolojik ilerlemeler ile veri elde edilebilirliği etkili olmuştur. Geleneksel modellerin gemi ana makinesinin beklenen davranışını temsil eden statik bir model olması ve değişiklikleri etkin bir şekilde yakalayamaması en önemli sınırlarıdır. Gelecekteki arıza teşhis yöntemleri güncellemeler yapabilen yapay zeka modellerin geliştirilmesine doğru evrilmektedir (Lv vd., 2024).



Şekil 9. Arıza teşhis ve tespit yöntemleri ile ilgili akademik çalışmaların yıllara göre dağılımı (Lv vd., 2024)

1.6.1. Model Tabanlı Yöntemler

Arıza tahmininde en geleneksel yaklaşım model tabanlı yöntemlerdir. Bu yöntemler, motorun çalışma süreçlerini, arıza mekanizmalarına dayalı matematiksel modeller oluşturularak geliştirilir ve performansı kullanılan modelin doğruluğuna büyük ölçüde bağlıdır (Zhang vd., 2022; Jardine vd.,2006; Skliros vd., 2018; Sun vd., 2024). Modelden elde edilen çıkış değeri ile sistemden izlenen değer karşılaştırılarak sistemin operasyonel durumu tespit edilir (Sun vd., 2024; Miljkovic, 2011; Matulic, 2020). Bu modellerdeki herhangi bir sapma; potansiyel bir arızaya işaret eder (Lv vd., 2024; Skliros vd., 2018).

Yaygın model tabanlı yöntemler arasında parametre tahmin yöntemleri, bağ grafikleri (Bond grafik), parite alanı (Parity space), hata ağaçları, durum tahmin yöntemleri ve eşdeğer uzay yöntemleri yer alır (Youssef vd., 2024; Matulic, 2020; Odendaal ve Jones, 2014). Aynı zamanda dizel motorlarının fiziksel özelliklerini içeren modeller, termodinamik prensiplere dayalı olarak geliştirilmiştir. Örneğin, AVLBoost tabanlı bir boyutsal termodinamik model dizel motor hatalarının semptomlarını belirleyebilir. Xu vd. (2022) gemi ana makineleri için tek boyutlu bir termodinamik model, AVL Boost yazılımı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan termoekonomik arıza teşhis yöntemi arızanın yerini tam olarak belirleyemese de arızalı bileşenlerin arama aralığını daraltmak için kullanılabilmektedir. Hu vd. (2021) iki zamanlı bir gemi ana makinesini MATLAB/Simulink'te bir turboşarj ve gaz değişim sisteminin termodinamik simülasyon modeli oluşturulmuş ve normal koşullar altında motorun deneysel sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Rubio vd. (2018) tek boyutlu termodinamik model ile arıza simülatörü oluşturmuştur. Kang vd. (2022), silindir gömleğinin ömrünü tahmin etmek için Weiner sürecine dayalı doğrusal olmayan bir bozunma modeli geliştirmiş ve faydalı ömrün olasılık yoğunluk fonksiyonunu (PDF) türeterek bilinmeyen parametreleri tahmin etmek için maksimum olasılık tahmin yöntemini kullanmıştır.

Fiziksel model tabanlı hata teşhis yöntemleri, son yirmi yılda, özellikle gemi ana makinelerinin yapısal karmaşıklığıyla ilgili önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bu yöntemler birkaç önemli avantaj ve dezavantaja sahiptir (Sun vd., 2024; Jardine vd.,2006; Youssef vd., 2024). Model tabanlı yaklaşımlar, özellikle bol miktarda verinin kolayca erişilebilir olmadığı durumlarda avantajlı bir seçenek olarak öne çıkar. Bu yaklaşımlar, geminin ana motorunun modellenmesi yoluyla, deniz motorunun yapısı ve operasyonel süreçlerine dair derin bir anlayış sağlar. Ayrıca, sistemin dinamik özellikler gösterdiği ve bireysel bileşenlerin bozulmasını yöneten fiziksel özelliklerin iyi anlaşıldığı, iyi tanımlanmış mekanik yapılar

için uygun bir yöntemdir. Ancak, bu yaklaşımın pratik uygulamaları bazı zorluklar ve sınırlamalarla karşılaşmaktadır. Öncelikle, karmaşık gemi ana makineleri için doğru modeller geliştirmek oldukça zor bir iştir. Bu motorların farklı işletim koşullarına ve bozulma faktörlerine bağlı olarak değişkenlik göstermesi, tamamen doğru modellerin oluşturulmasını neredeyse imkansız hale getirir. Ayrıca, karmaşık modellerin simülasyon ve teşhis süreçlerinde önemli hesaplama kaynakları gerektirmesi, gerçek zamanlı uygulamalar için zorluklara neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, yapılan çabalara rağmen; modeller, gemi ana makinesinin doğasında bulunan karmaşıklıklar nedeniyle hala belirsizlikler içerebilir. Bu belirsizlikler, hata tespiti ve teşhisinin güvenilirliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Aşınma gibi arızalarda, arızanın özellikleri ile arıza modları arasındaki karmaşık doğrusal olmayan ilişki, doğru fiziksel modellerle ifade edilmesi zor olabilmektedir. (Xu vd., 2020). Model belirli motor konfigürasyonlarına özelleştirilmiş olduğundan, farklı gemiler veya motorlar için genellenebilirlikleri sınırlı kalmaktadır.

1.6.2. Veri Tabanlı Yöntemler

Veri tabanlı arıza tespit ve teşhis yöntemleri, sistemin işletme verilerinin analizi üzerine temellendirilmiştir. Bu yöntemler, sistemin doğrusal bir analitik modeline ihtiyaç duymaksızın, doğrudan sistemden elde edilen geçmiş verilere dayanarak arıza tespiti ve teşhisi gerçekleştirir. Bu özellik, analitik modellerin kurulmasının zor veya imkansız olduğu gerçek dünya uygulamaları için oldukça uygundur. Veri tabanlı yöntemlerin uygulanma süreci, temel olarak dört aşamadan oluşmaktadır: İlk aşama, geçmiş verilerle bir veritabanı oluşturmayı, ikinci aşama veri hazırlama veya veri işleme süreci olarak adlandırılan veri hatalarının tespiti ve faydalı verinin elde edilme sürecini, üçüncü aşama geçmiş verilere dayalı bir eğitim modeli geliştirmeyi; son aşama ise, gerçek zamanlı verilere dayalı olarak arıza teşhisi yapmayı kapsamaktadır (Jardine vd., 2006). Teknolojinin gelişimiyle birlikte, gemilerin alarm ve izleme sistemlerinden üretilen veri miktarı hızla artmaktadır (Rødseth vd., 2016). Bu veriler, gemi personeline makine ve ilgili ekipmanların güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak amacıyla temel alarm bilgilerini sağlamanın yanında daha fazla bilgi sunmaktadır. Ancak, bu veriler insan operatörlerinin kavrayamayacağı kadar fazla bilgi içerdiği için, verilerin hızlı ve doğru bir şekilde işlenmesi, kullanılabilir bilgiye dönüştürülmesi gerekmektedir (Vorkapic vd., 2020).

Veriye dayalı yöntemlerle yapılan analizler, makine öğrenmesi algoritmaları ve istatistiksel algoritmalara dayanır (Skliros vd., 2018). Bunlar genellikle, temel bileşenler analizi (PCA) ve bağımsız bileşenler analizi (ICA), Dempster Shafer (D-S) algoritmaları, Bayes Ağları gibi istatistiksel analizler; destek vektör makinesi (SVM), topluluk öğrenmesi, yapay sinir ağları (ANN), genetik algoritma (GA), aşırı öğrenme makinesi (ELM) gibi makine öğrenmesi yöntemleri içerir (Youssef vd., 2024; Lv., 2024; Zhang vd., 2022; Skliros vd., 2018). Bu yöntemler, uzman deneyimi ve bilgisini kullanmak yerine, teşhis bilgisini uyumlu bir şekilde öğrenir ve ölçüm parametreleri ile ana makine sağlık durumu arasındaki ilişki kurar. Göksu ve Enginer (2020), gemi ana makinesinin kritik 9 sistemin, 220 adet arıza geçmiş kayıtlarını kullanarak yapay sinir ağları ile modellenmiş ve yaklaşan arızaların tahminlemesi yapmıştır. Benzer şekilde, Raptodimos ve Lazakis (2017) deniz ana motorlarının gelecekteki performans parametre değerlerini tahmin etmek için yapay sinir ağları modeli geliştirmiş ve bu model, gemi işletmeciliğinde durum tabanlı bakım (CBM) için bir tahmin modeli sunmuştur. Başurko ve Uriondo, (2015) termokopullar, basınç sensörleri, tork ölçer ve yakıt akış ölçerden elde edilen 1000 saatlik çalışma verileri arıza ve motor performansını modellemek için yapay sinir ağları kullanmışlardır. Hou vd. (2020) gemi ana makinesinin akaryakıt besleme sistemi arıza veri kümelerinin yüksek boyutlu ve dengesiz olması nedeniyle hesaplama karmaşıklığını azaltmak için, temel bileşen analizi (PCA) kullanılarak düşük boyuta dönüştürülmüştür. Jiang vd. (2017) D-S kanıt teorisini belirsizliği modellemek için kullanmışlardır. Zhong vd. (2019), farklı sensörlerden elde edilen arıza verilerini öğrenmek için Destek Vektör Makineleri (SVM) ve D-S teorisini kullanarak daha doğru teşhis sonuçları elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Emovon (2016), Dempster Shafer Teorisini, uzmanlardan gelen farklı arıza modu derecelendirmelerinin birleştirilmesinde kullanmışlardır.

Veri tabanlı yöntemlerin başlıca avantajları, öznel düşüncelerden veya insan deneyimlerinden ziyade somut verilere dayanmalarıdır. Bu özellik, veri odaklı yaklaşımın daha doğru ve verimli arıza tespiti ve teşhisi sağlamasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, veri tabanlı yöntemler, sensör verileri, günlük verileri ve tarihsel kayıtlar gibi farklı kaynaklardan gelen verilerin aynı anda değerlendirilmesine olanak tanır. Bu sayede, arızaların temel nedenlerinin birden fazla etkeninin dikkate alınarak belirlenmesi sağlanabilir. Her yöntemde olduğu gibi bu yöntemlerin de bazı eksiklikleri de vardır. Öncelikle, veri tabanlı yöntemler yüksek kaliteli ve ilgili verilere büyük ölçüde bağımlıdır. Verilerin yetersiz, gürültülü veya mevcut olmadığı durumlarda, bu yöntemler etkili bir şekilde çalışamayabilir. Ayrıca,

verilerdeki aykırı değerler veya anomaliler yanlış arıza tespiti ve teşhisine yol açabilir. Bu nedenle, veri kalitesinin sağlanması ve anomali yönetiminin etkin bir şekilde yapılması, veri tabanlı arıza teşhis sistemlerinin güvenilirliği için kritik bir öneme sahiptir. Veri odaklı yöntemlerin bir diğer zorluğu ise, etkili bir arıza izleme modeli eğitmek için normal ve arızalı verilerden oluşan geniş veri kümeleri gerektirmesidir. Ancak, tüm arıza türleri için yeterli veri toplamak çoğu zaman zor olabilmektedir. Ayrıca, bazı veri tabanlı modeller, özellikle derin öğrenme algoritmaları, genellikle "kara kutu" olarak kabul edilir. Bu durum, tahminlerinin ardındaki mantığın açıklanmasını veya yorumlanmasını güçleştirir ve şeffaflık eksikliği, güvenlik kritik uygulamalarda, örneğin deniz motorları gibi sistemlerde bir dezavantaj oluşturabilmektedir.

1.6.3. Bilgi Tabanlı Yöntemler

Bilgi tabanlı arıza teşhis yöntemleri, uzman seviyesindeki teşhis bilgilerini kullanarak arıza durumunun tanımlanmasını sağlayan yöntemlerdir. Uzmanlık ve deneyimin mevcut olduğu, ancak sistemin fiziksel özelliklerini derinlemesine anlamının mevcut olmadığı veya çok pahalı olduğu durumlar için geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Miljkovic, 2011). Uzmanların bilgisini kullanarak bir çıkarım motoru oluşturur ve arıza örüntüsü tanıma işlemini gerçekleştirir. Bu sebeple uzman bilgisine yüksek oranda bağımlıdır ve uzman bilgisinin doğruluğu doğrudan teşhis sonuçlarını etkiler. Dahası, modelin kendi kendine öğrenme yeteneği yoktur ve yalnızca mevcut sorunları çözebilir. Bilgi tabanlı arıza teşhisi modelleri, kural tabanlı akıl yürütme, bulanık mantık tabanlı akıl yürütme ve vaka tabanlı akıl yürütme olarak sınıflandırılabilir (Youssef vd., 2024; Zhang vd., 2022; Skliros vd., 2018). Kural tabanlı akıl yürütme, bir sistem arızası meydana geldiğinde, çıkarım motoru bilgi tabanına karşı bir kural eşleştirme işlemi yapar ve ardından kural koşulları aracılığıyla hedef sistemin arıza durumu tanımlanır (Lv., 2024; Sun vd., 2024). Kurallar, bir uzman ya da uzman grubunun bilgilerine dayanarak türetilebilir (Skliros vd., 2018). Ayrıca kurallar, sınıflandırma kuruluşunun işletim gereksinimlerine ve düzenlemelerine dayanarak da oluşturulabilir. Gemi ana makinesi gibi sistemlerde karmaşıklığın arttığı sistemlerde kural sayısının çok fazla olması nedeniyle akıl yürütme verimliliği önemli ölçüde azalmasına neden olabilmektedir (Zhang vd., 2022). Xu vd. (2020) İnanç kuralı çıkarım yöntemini kullanarak gemi ana makinesinin arıza teşhisi ve tahminlemesini yapmışlardır. Ayrıca, Radica (2008), gemi ana makine verimliliğini artırmak ve teşhisi desteklemek için EKSE

uzman sistemini; Gharib vd. (2022) tarafından gemi ana makinelerinin arıza tespiti için yeni bir uzman sistemi tanıtılmışlardır.

Bulanık mantık tabanlı akıl yürütme, çıkarım için bulanık mantık kullanarak belirsiz ve sayısal olmayan bilgilerin tanımlanmasını sağlar (Zhang vd., 2022). Bu yöntem kesin değerlerin yerine, değerlerin belli bir aralıkta olduğu, doğru veya yanlış yerine ne kadar doğru ne kadar yanlış olduğunu belirlemeye çalışır. Arıza tespiti sisteminin çıktısı arıza var veya arıza yok yerine, sistemin arıza şiddeti sunulabildiğini savunur (Miljkovic, 2011). En güncel eğilim, bulanık mantığın başlangıç aşaması olarak arıza modlarına ayrılmasında kullanılması ve ardından bir sınıflandırma algoritma (ANN, SVM vb.) aracılığıyla sistem parametrelerinin eğitildiği çalışmalardır (Sklinos vd., 2019)

Vaka tabanlı akıl yürütme, mevcut benzer vakalardan faydalanarak teknik sorunları çözmeyi hedefler. Vaka tabanlı akıl yürütme, benzer geçmiş vakalardan elde edilen verilerle ilk çözüm önerilir ve bu çözüm, yapılan düzenlemelerle nihai çözüm haline getirilir (Sklinos vd., 2019). Bu yöntem şu anda gemi çarpışmalarını engelleme ve gemi tasarımı gibi alanlarda geniş bir kullanım alanına sahipken, dizel motor arıza tespiti uygulamalarında henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır (Zhang vd., 2022).

Bilgi tabanlı yöntemler, gemi ana makinelerinin arıza teşhisinde bazı önemli avantajlar sunmaktadır (Sun vd., 2024). Bu yöntemler, sorunları hızlı bir şekilde tespit ederek bakım sürelerini kısaltmakta ve özellikle denizdeki acil durumlar gibi kritik anlarda doğru arıza tespiti yaparak operasyonel güvenliği artırmaktadır. Ayrıca, mevcut bilgi ve uzmanlıkları değerlendirerek, geniş veri toplama veya yüksek maliyetli sensörler kullanmadan çözüm önerileri sunarak maliyetleri azaltmaya katkı sağlar. Bilgi tabanlı sistemler, elde edilen yeni bilgi ve deneyimlerle sürekli olarak iyileştirilebilmekte ve böylece teşhis doğruluğu artırılmaktadır. Ancak, uzman bilgisinin mevcudiyeti, bilgi tabanındaki potansiyel önyargılar ve karmaşık veya yeni arızaları ele alma konusundaki sınırlamalar, bilgi tabanlı yöntemlerin etkinliğini sınırlayabilir. Bu nedenle, bu sistemlerin diğer yöntemlerle, özellikle veri tabanlı yaklaşımlarla birleştirilmesi, genellikle daha sağlam ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

1.6.4. Hibrit Yöntemler

Her arıza teşhis yönteminin diğerlerine kıyasla avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu nedenle birden fazla arıza teşhis yönteminin birleştirilmesinin temel amacı, her birinin

tamamlayıcı güçlü yönlerini kullanmaktır. Yaygın bir uygulama, geleneksel sinyal işleme tekniklerini, makine öğrenimi gibi ileri yaklaşımlarla birleştirmeyi içerir (Lv vd., 2024). Veri odaklı yöntemlerin büyük veri setlerini işleme konusundaki uyarlanabilirliği, bunların derin öğrenme ve yapay zeka teknikleriyle entegrasyonu için uygun bir zemin hazırlamaktadır. Yan vd. (2022) topluluk Ampirik Mod Ayırışımı (EEMD), Otoregresif model (AR modeli) ve korelasyon katsayısı yönteminin kombinasyonuna dayalı bir arıza teşhis yöntemi önermiştir. Abaei vd. (2022) makine bileşenlerdeki arızaları modellemek için bir Rastgele İşlem Ağacı (Random Process Tree) kullanılırken, süreçteki bilinmeyen parametrelerin tahminini kolaylaştırmak için Hiyerarşik Bayesian Çıkarımı benimsemişlerdir. Velasco-Gallego ve Lazakis (2022) birinci dereceden Markov zincirini, 16 makine öğrenimi ve zaman serisi tahmin modelinin karşılaştırmalı bir metodolojisine dayanan çok değişkenli bir değerlendirme (MICE) yaklaşımı sunulmuştur. Guerrero vd. (2019) ise, iki zamanlı düşük hızdaki gemi ana makineleri için doğrusal olmayan bir tork modelini oluşturarak, bunları yanma ile ilgili anormallikleri tespit etmek ve ölçmek için yapay sinir ağları kullanmışlardır. Bu ve benzeri yöntemlerin birleşimi, arıza teşhis sistemlerinin genel dayanıklılığını ve doğruluğunu artırarak, çeşitli arıza senaryolarını etkili bir şekilde ele almasını sağlar. Hibrit yaklaşımlar, özellikle gemi ana makineleri gibi alanlarda karmaşık zorlukları çözmede önemli bir rol oynamaktadır (Lv vd., 2024).

1.7. Bayes Yaklaşımı ile Klasik Yaklaşımın Kıyaslanması

İstatistik biliminde Klasik ve Bayes olarak bilinen iki temel yaklaşım bulunmaktadır (Glickman ve van Dyk, 2007; Çıkmak, 2020). Bayes yaklaşımının klasik yaklaşıma kıyasla birçok farklılıkları bulunmasının yanında Bayes yaklaşımının birçok üstünlüğün olduğunu söylenebilmektedir (Saçıldı, 2011). Klasik yaklaşım tümdengelim yöntemlerin uygulaması varken, Bayes yaklaşımında tümevarım yöntemi kabul görmüştür (Ekici, 2009). Klasik görüş, olasılığın nesnellik yaklaşımını kabul eder ve tekrarlı denemelerle belirlenen frekans değerleriyle yanıtlama ilkesi esas alınarak sıfır olasılığına ulaşılmasına dair bir değerlendirme yapar (Çıkmak, 2020). Bayesçi yaklaşımda ise tümevarım yöntemiyle olasılığın öznel bir tanımı benimsenmekte olup, doğrulama ilkesi çerçevesinde bir olasılığın ulaşılmasıyla ilgili bir değerlendirme kabul edilmektedir (Tıraşoğlu, 2016). Bayes yaklaşımında, her türlü belirsizlik olasılık değeriyle temsil edilmelidir. Klasik yaklaşım, belirsizliğe frekanslara odaklanarak belirsizliği kabul etme ya da reddetme

yönünde bir tutum sergilemektedir (Ekici, 2009). Bayes yaklaşım, öncelikle belirsizliği kabul eder ve doğruluğun mutlak bir şekilde doğru, yanlışın ise tamamen yanlış olamayacağı durumların varlığını kabul etmektedir. Belirsizlikle üstesinden gelmesinde Bayes yaklaşımın önemi tartışılmazdır.

Yöntem ve analiz açısından da her iki yaklaşımda temel farklılıklar bulunmaktadır. Bayes yaklaşımında parametre son dağılımın aritmetik ortalaması olup, tesadüfi değişken oldukları varsayılmaktadır. Klasik yaklaşımda parametre denemeler sonucunda elde edilen sabit bir değer kabul edilmekte ve tesadüfi değildir. Bu nedenle olasılık ifadesi parametreler için kullanılmamaktadır (Saçıld, 2011; Uladi, 2022; Karagöz, 2004). Bir diğer kavram farkı güven aralığıdır. Klasik görüşte güven aralığı, belirli bir güven seviyesinde gerçek değer yer aldığı aralığı tanımlar ve hipotez testlerinde, parametrelerin bu aralık içinde olması beklenir. Oysa Bayes yaklaşımında son dağılımın ortalaması içermesi nedeniyle güven aralığı ifadesi yerine “ güvenilir aralık veya Bayes aralığı” gibi kavramlar tercih edilmektedir. Hipotezlerin olasılıkları hesaplandıktan sonra, son olasılığı en yüksek olan hipotez kabul edilmektedir. Bu sebeple hipotez test edilmemekte, hipotez karşılaştırılmaktadır. (Carlin ve Louis, 2000; Ekici, 2005)

Klasik yaklaşım bir ana kütleden çekilen örneklemin verisine dayanarak ana kütleye ait ilişki değerlendirilmektedir. Bayes yaklaşımda örneklem bilgisinin yeterli olmadığı kabul görüp önsel bilgi de kullanılmaktadır. Bu önsel bilgi daha önceki çalışmalardan elde edilen bir veri veya uzman görüşü olabilmektedir. Önsellerin değerlendirmeye dahil edilmesi, Bayes yaklaşımının özne bir model olarak eleştirilmesine neden olmuştur; ancak geleneksel yaklaşımlarda kullanılan tüm istatistiksel modellerde de özne tercihlerin söz konusu olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Saçıld, 2011). Bayesçi olmayan bilim adamı Freedman’ın “verilerden çıkarsama yapıldığında, en muhafazakar klasik istatistikçinin bile, bazı varsayımları ve özne bilgileri kullanmak zorunda kalacaktır” ifadesi ön bilginin önemini göstermektedir (Çıkmak, 2020). Bazı çalışmalarda da önsel bilgi kullanılmasıyla Bayes yaklaşımın daha doğru sonuçlara ulaşabildiği vurgulanmıştır (Uludağ, 2013). Aynı zamanda, birçok alanda ve günlük yaşantıda bir önermedeki karar alıcılara gereksinim duyulabilmektedir. Karmaşık ilişkilere sahip problemler nedensellik ilişkileri çok boyutlu olabilmektedir. Bu durumlarda önsel bilgi kullanılması sürece değer kazandırmaktadır. Önsel değerlendirmelerin dahil edilmesiyle bu tür durumlar sürecin daha sistematik ve kurallı değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Bayes yaklaşımı, özne yargıyı yok saymanın hiçbir fayda sağlamayacağına inanmaktadır ve bu nedenle daha kapsamlı bir bakış

açısını benimsemektedir. Akar ve Gündoğdu (2013) Bayes teorimini herhangi bir problemin modelini oluştururken evrensel doğrular ve gözlemleri kullanarak sonuçları üretmesi olarak tanımlamıştır. Aynı zamanda, örneklemeden elde edilen kanıtlar, öznel veri ile birleştirilerek örneklem büyüklüğü azaltılabilmektedir. Örneklem büyüklüğü için bir kısıt bulunmamaktadır (Gündoğdu, 2016). Klasik yaklaşımın gerektirdiği örneklem büyüklüğünden daha küçük örneklemlemlerle, çok daha yüksek güven aralığında değerlendirme yapmak mümkün olabilmektedir (Uludağ, 2013; Abdolmohammadi, 1987; Batenburg ve Kriens, 1989; Sorensen 1969). Örneklem boyutunun az olduğu alanlarda veya büyük maliyet ve zaman gerektiren alanların analizlerinde Bayes yaklaşımı bu yönüyle de üstünlük sağlamaktadır.

1.8. Literatür Araştırması

Sunulan tez çalışmasında, literatür araştırması; iki zamanlı kroshetli gemi ana makinesinden meydana gelen arızalar ile ilgili çalışmalar ve gemi makine operasyonlarında insan güvenirlilik analizinin yapıldığı çalışmalar olmak üzere iki ana başlık altında gerçekleştirilmiştir.

1.8.1. Gemi Makine Arızaları

Livanos vd. (2003); çalışmalarında, iki zamanlı gemi ana makinesi emme mahali yangınları incelemişlerdir. Emme mahal çamur (sludge) birikintilerinin fiziksel özellikleri belirlemek amacıyla gemilerden numune örnekler toplanarak analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, tutuşma noktası 120°C ile 160°C arasında ve ısı değeri ortalama 10.090 cal/g olarak hesaplamışlardır. Temizleme hava alıcısındaki çamurun bileşimi değişken olduğundan, çamurun yanma hızı olarak, eşdeğer dizel yakıtın yanma hızını dikkate almışlardır. Makine ve turboşarj üreticilerinden elde edilen veriler doğrultusunda daha önce oluşturdukları ana makine performans tahmin kodunu, emme mahali yangınlarının simüle edilebilmesi için geliştirmişlerdir. Ayrıca, kompresörün dinamik davranışını tahmin edebilen bir kompresör modelini koda entegre etmişlerdir. Böylelikle turboşarj kompresöründe akışın tersine dönmesine yol açan şiddetli bir yangın durumunun da dahil olduğu emme mahal yangınlarının simülasyonlarını yapabilmişlerdir.

Giorgio vd. (2007); çalışmalarında, iki zamanlı bir gemi ana makinesinde silindir gömleği aşınma arızasını incelemişlerdir. Silindir gömleği güvenilirliğinin tahmin etmek ve

koşul bazlı bakım faaliyetleri planlamak için bir kümülatif hasar modeli geliştirmişlerdir. Aşınma verilerini 1996-2004 yılları arasında Grimaldi Grubu'na ait iki zamanlı gemi ana makinesi silindir gömlek ölçümlerinden elde etmişlerdir. Veri seti, inceleme anındaki silindir kapağının yaşını ve aşınma miktarını içermektedir. Önerilen model ile aşınma tahminlerine dayanarak silindir gömlek bakım planlamasının yapılabildiği böylelikle bakım maliyetlerinin azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Bocchetti vd. (2009); çalışmalarında, ana makine silindir gömleğine ait aşınma ve termal çatlak arızaları için risk temelli model geliştirmişlerdir. Aşınma arızasına ilişkin verileri 1994-2007 yılları arasında SULZER RTA 58 gemi ana makinelerinden alınan silindir gömleği ölçümlerine dayanmaktadır. Termal yorgunluk ile ilgili veri elde edilememesi nedeniyle arıza modellemesinde Weibul Dağılımını kullanmışlardır. Aşınma ve termal çatlak modelleriyle silindir gömleği güvenilirliği, arıza oranları ve ortalama kalan ömürlerini hesaplamışlardır.

Çiçek ve Çelik (2013); gemi ana makinesi karter patlama arızasını Arıza Modları ve Etki Analizi (FMEA) yöntemiyle incelemişlerdir. Risk öncelik numarası (RPN) yüksek değere sahip bileşenler arasında piston, yağ sis dedektörü, salmastra kutusu ve enjektör yer almaktadır. Çalışma, piston alev yüzeyindeki aşırı aşınmanın, karter patlamasının başlıca arıza nedeni olduğunu ortaya koymuştur. Ticari gemilerde pistonların bakım aralıklarının, duruma dayalı analizlere göre tekrardan değerlendirilmesi gerektiğini ve motor performansını sürekli izleyen ek sistemlerin entegre edilmesinin faydalı olacağını önermişlerdir.

Krakowski (2014); çalışmasında, vibrasyon, akustik emisyon, endoskopi ve egzoz gaz analizi gibi teşhis yöntemlerinin hangi ana makine arızalarında kullanılabileceğinin açıklamasını yapmıştır. Ancak, bu yöntemlerin soğutma sistemi arızalarının tespitinde kullanılmadığını vurgulamış ve soğutma sistemi arıza nedenlerini incelemiştir. En sık karşılaşılan arızaların, makine soğutma su kanallarının tıkanması, çatlaklar ve üç yönlü valf aktüatörünün arızalanması olduğu belirtmiştir. Soğutma sistemi arızalarının teşhisi için sıcaklık, basınç değişimlerinin izlenerek arıza teşhisinde bulunan Veri Trend, SEDS, CC-10, CocoS-EDS gibi teşhis sistemlerini tavsiye etmiştir.

Dikis vd. (2014); çalışmalarında, gemi ana makine bakım ve teşhis yöntemlerini incelemişler ve Olasılıksal Çok Bileşenli Durum İzleme modeli geliştirmişlerdir. Ana makineyi ve alt sistemlerini Bayes Ağları ile modelleyerek, OREDA veri tabanından elde ettikleri verilerle arıza olasılıklarını hesaplamışlardır. Bu hesaplamalar sonucunda, ana

makine iç donanımları için %1,7509, ana makine dış donanımları için %0,5919, soğutma sistemi için %0,5639, ilk hareket sistemi için %0,2848, kontrol sistemi için %0,1881 ve ana makinenin genel arıza olasılığı için %0,5874 değerlerini bulmuşlardır.

Allal vd. (2017); çalışmalarında, otonom gemilerin güvenilir çalışabilmesi için yağlama yağı sistemini incelemişlerdir. Öncelikle 120 gemiye yapılan ziyaretler ile planlı bakım sistemi (PMS), arıza kayıtları, yağ analiz raporları, işletme prosedür ve gemilerin devre çizimleri gibi verileri toplamışlardır. Elde edilen bu veriler ile hata ağacı analizi (FTA) ve hata modları ve etkileri analizi (FMEA) kullanılarak yağlama yağı arızalarının kök nedenleri ve kritik bileşenler belirlemişlerdir. Analiz sonuçları ve gemi mürettebat geri bildirimleri doğrultusunda, güvenilirliğin iyileştirilmesi için uygun tasarım önerileri geliştirmişlerdir. Bu önerilerden biri yağlama yağ devresinin yedeklenmesidir. Çünkü iki pompa olmasına rağmen boru hattındaki bir kaçak güvenilirliği azaltacaktır. Diğer öneriler yağlama yağı soğutucusunun, üç yollu sıcaklık kontrol valfinin ve filtre grubunun yedeklenmesidir. Yeni tasarım ile birlikte arıza oranlarının ve ortalama duruş süresinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Ta vd. (2017); çalışmalarında, makine dairesi kazaların %41.6'sı, deniz kazalarının da %76.8'i ana makine kaynaklı olduğuna vurgu yapmışlardır. Bu sebeple gemi ana makine güvenilirliğini analiz etmek amacıyla Hata Ağacı Analizi kullanmışlar ve 500-1000-1500 saatlik çalışma sonrası arıza olasılıkları hesaplamışlardır. Krank mili ve biyel kolu arızaları en yüksek olasılığa sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Moon vd. (2018); çalışmalarında, krank pimi yatağındaki aşınma arızalarını incelemek için sayısal bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritma ile üç farklı boşluk (240 μm , 200 μm ve 160 μm) ve üç farklı yağ sıcaklığı (40 $^{\circ}\text{C}$, 50 $^{\circ}\text{C}$ ve 60 $^{\circ}\text{C}$) için yağ basıncı ve yağ film kalınlığını hesaplamışlardır. Sonuçlar, maksimum film basıncının boşluk ve yağlama sıcaklığı azaldıkça düştüğünü, film kalınlığının ise boşluk ve yağlama sıcaklığı azaldıkça arttığını göstermiştir. Yağlama yağı sıcaklığının film basıncı ve film kalınlığı üzerindeki etkisinin, boşluktan daha büyük olmuştur.

Lazakis vd. (2018); çalışmalarında, gemi ana makinesi kritik bileşenler hata ağacı yöntemi (FTA) ve Arıza Sebepleri ve Etkileri (FMEA) yöntemleri kullanılarak belirlemişlerdir. Yöntemler de daha önce yapılan çalışmalar, INCASS AB projesi çıktıları ve uzman görüşlerini dikkate almışlardır. Belirlemiş oldukları kritik gemi ana makine elemanı silindir ve piston bileşenleridir ve arıza olma durumlarında etkileyecek fiziksel parametrelerden biri egzoz gaz sıcaklığıdır. Bu sebeple, Panamax bir gemiden elde edilen

30 saatlik egzoz gaz sıcaklık verileri yapay sinir ağı ile modellenerek toplamda 40 saatlik bir tahminini yapmışlardır.

Aziz vd. (2019); çalışmasında, gemiler için en tehlikeli durumları yangın/patlama, ana makine arızası, elektrik kesintisi ve manevra sistem arızaları olarak belirlemişlerdir. Bu dört duruma ait risk modellemesi için Hata Ağacı Analizi (FTA) ve Olay Ağacı (Event Tree) tabanlı papyon analizi (Bow-tie) yöntemlerini kullanmışlardır. Gemilerin bakım ve kaza kayıtlarından elde edilen 383 olay verisiyle, arızaların sıklığı, arıza oranları ve güvenilirlikleri hesaplamışlardır. Hesaplamalar neticesinde, ana makine arızası 6,96/yıl, elektrik arızası 5,78/yıl, manevra arızası 3,59/yıl ve yangın/patlama arızası ise 0,95/yıl olarak belirlemişlerdir.

Chybowski vd. (2019); çalışmalarında, bir dökme yük gemisine ait yardımcı sistem arızalarını incelemişlerdir. Gözlemlenen arızaların %49'u yorgunluk aşınmasından, %32'si mekanik veya termal yüklerden, %23'ü sürtünme sonucu meydana gelen aşınmalardan, %5'i korozyon kaynaklı aşınmalardan meydana geldiğini belirlemişlerdir. Aynı zamanda arızaların %33'ü pompalardan, %24'ü boru ve valflerden, %14'ü kontrol sistemlerinde oluşmuştur. İnsan hataları, arızaların %19'unun doğrudan sebebi olmuştur. Arızaların %33'ü 1000 saatlik çalışma sonrası meydana gelmiştir.

Ezeoye ve Orangian (2019); çalışmalarında, yüksek gaz basıncı ve sıcaklığının iki zamanlı gemi ana makine pistonu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, strese bağlı piston hasarlarının mekanik, termal stres veya her ikisinin bir kombinasyonunun baskın bir rol oynadığı belirtilmiştir. Dikkate aldıkları simülasyon parametreleri piston malzemesi, yanma sıcaklığı ve yanma basıncıdır ve Autodesk Inventor yazılımı kullanılarak modellenmişlerdir. Pistona etki eden mekanik gerilimlerin hesaplamak için sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanmışlardır. Pistonu, geleneksel piston malzemesinden farklı malzemeler kullanılarak yeniden tasarlamışlardır. Ayrıca pistona etki eden gerilimler azaltılarak ve soğutma boşlukları eklenerek optimize etmişlerdir. Analizde kullanılan ve kıyaslaması yapılan malzemeler orijinal malzeme olan dövme çelik ve yeni tasarlanan alüminyum alaşım, ısıya dayanıklı çelik malzemeleridir. Isıya dayanıklı çeliğin diğerlerine kıyasla daha yüksek mukavemete sahip olduğu hesaplamışlardır.

Fangyu vd. (2019); MAN 6S35 ME-B9 elektronik kontrollü iki zamanlı gemi ana makinesi gerçek parametrelere dayanarak tek boyutlu modeli GT-Power yazılımında modellenmişlerdir. Silindir gömleği soğutmasında yetersizlik, kompresör arızası, hava soğutucusu hava ve su tarafındaki kirlilik, hava filtresi kirliliği, egzoz mahal kirliliği,

enjektör arızası, erken ve geç yakıt enjeksiyonu gibi arızaların etkileri analiz etmişlerdir. Aynı zamanda yüksek/düşük ortam sıcaklıklarının makine fiziksel parametrelerine etkisini incelemişlerdir.

Vukičević vd. (2019); çalışmalarında, gemi ana makinesinde yakıtların ince katalizör taneciklerinin aşındırıcı etkilerine karşı alınabilecek önlemleri incelemişlerdir. Verileri, bir Aframax tankerindeki düşük hızlı Wärtsilä RTA makinesinden elde etmişlerdir. Analiz, yakıt özelliklerini, piston segmanlarının kontrolü ve silindir gömlek aşınma oranının ölçülmesi de dahil olmak üzere makinenin periyodik muayenelerini kapsamaktadır. Piston segmanlarının kimyasal özelliklerini, kaplama kalınlıklarını ve mikro sertliklerini belirlemek için kimyasal analizlerini yapmışlardır. Yakıtın yanma odasına püskürtmeden önce alınabilecek bir dizi önleyici tedbirin yanı sıra, segman malzemesinin seçimi aşınma oranını büyük ölçüde etkilediğini belirlemişlerdir. Aşınma oranı aynı zamanda yakıttaki ince katalizör taneciklerine de bağlıdır. GGV tipi piston segmanının abrasif aşınmaya karşı dirençli olduğu laboratuvar analizleri ile tespit etmişlerdir.

Knezevic vd. (2020); iki zamanlı gemi ana makinesi turboşarj arıza nedenleri hata ağacı yöntemi (FTA) ile belirlemişlerdir. Belirlenen arıza nedenleri hava filtresi tıkanması, kompresör ve türbin kirliliği, hava kuler su ve hava kısımlarındaki kirlenmedir. Daha sonra her bir arıza Wartsila-Transas 5000 simülatöründe simüle edilerek turboşarj verimliliğine, ana makine performansına ve makine işletme parametrelerine etkisini incelemişlerdir.

Hou vd. (2020); yakıtın basıncı, sıcaklığı ve debisi gibi fiziksel parametreleri dikkate alarak 10 farklı arıza türünü incelemişlerdir. Arıza veri kümesinin yüksek boyutlu ve dengesiz yapısı nedeniyle, temel bileşen analizi (PCA) kullanarak düşük boyuta dönüştürmüşlerdir. Boyutu azaltılmış veriler, destek vektör makinesi (SVM) ile eğitilmiş ve modelin doğruluğunu artırmak amacıyla örnek boyutu optimizasyonu (SSO) uygulamışlardır. Örnek boyutu optimizasyonu ile arıza tahminleme doğruluğunda yaklaşık %3 oranında bir iyileşme sağlanmıştır.

Bejger ve Drzewieniecki (2020); çalışmalarında, IMO 2020 kükürt sınırlarına uyum kapsamında gemi ana makinesi yakıt pompalarındaki arıza oranlarının arttığını vurgulamışlardır. Bu sebeple, yakıt pompalarındaki aşınma seviyelerini tahmin etmek amacıyla akustik emisyon sinyal analizi kullanmışlardır. Akustik emisyon ölçümleri, iki zamanlı kroshetli gemi ana makinesine sahip iki gemide üç yıl boyunca gerçekleştirmişlerdir. Ölçümler sonucunda erken aşama aşınma belirtileri tespit edilebilmiştir.

Göksu ve Enginer (2020); çalışmalarında, konteynır gemisinden elde ettikleri 10 yıllık planlı bakım sistem (PMS) kayıtları inceleyerek gemi ana makine 220 adet arıza verisi 9 sistem ve 47 bileşen olarak sınıflandırmışlardır. Kaydedilen arıza verilerini kullanarak gemi ana makine donanımlarının öngörülen arızalanma süresini tahmin etmek amacıyla yapay sinir ağları (YSA) ile modellemişlerdir. Modelin hata oranı %2 olarak hesaplamışlardır.

Qi vd. (2020); çalışmalarında, mevcut gemi ana makine arıza teşhis yöntemlerinin model karmaşıklığı, büyük miktarda hesaplamalar nedeniyle gerçek zamanlı arıza teşhisini gerçekleştirememesine vurgu yapmışlardır. Bu sebeple gemi ana makine arızalarının tespiti için basit ve pratik bir yaklaşım önermişlerdir. Ana makine çalışma koşullarına göre değişen her bir parametrenin uyum Denklemi ve eşik aralığını belirlemişlerdir. Anlık parametreler eşik aralığını aşarsa, bu anormal bir durumdur. Önerilen yöntem, MAN B&W 6S42 ana makinesi ile donatılmış bir gemiden elde edilen 15.800 veri ile test edilerek doğrulamışlardır.

Matulic vd. (2020); çalışmalarında, gemi ana makine optimizasyonu ve arıza teşhisinde kullanmak amacıyla AVL'nin gerçek zamanlı yazılım platformu Cruise M kullanılarak fiziksel bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, silindir, turboşarj ve hava soğutucusunu kapsamaktadır. Altı silindirli elektronik kontrollü bir gemi ana makinesinde doğrulamasını yapmışlar, simülasyon ölçüm verilerinin ortalama sapma değeri, makine yüküne bağlı olarak %1-7 arasında değiştiğini hesaplamışlardır.

Tsitsilonis vd. (2021); çalışmalarında, motor anlık torku, kolay bir şekilde elde edilerek ana makine arızalarını belirlenmesine imkan sağlayan kritik bir ölçüm olduğuna vurgu yapmışlardır. Bu doğrultuda, 2 zamanlı bir gemi ana makinesi anlık torkunu simüle etmek için termodinamik ve krank mil dinamiği modellerini kullanarak akıllı bir arıza teşhis modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modeli, gemi ana makinesindeki dört yaygın arıza için test etmişler ve arızaların doğru bir şekilde tahmin edilebildiğini bildirmişlerdir.

Yao vd. (2021); çalışmalarında, gemi ana makine soğutma sisteminin yaygın arızalarını derin inançlı sinir ağı (DBN) kullanılarak arıza teşhis modeli kurmuşlardır. Modelin eğitimi ve testi gemi ana makinesi deney verileri kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Deney süreci 1 yıl 10 ay sürmüş ve ortalama egzoz gaz sıcaklığı, egzoz gaz sıcaklıkları, soğutma suyu basıncı, deniz suyu basıncı, ortalama yağ basıncı, piston soğutma yağ basıncı ve makine yük durumu gibi parametreler kaydederek bir veri tabanı oluşturmuşlardır. Veri tabanından 200 normal durum, 200 deniz suyu pompa arızası, 200 deniz suyu boru kaçakları, 200 tatlı soğutma suyu kaçakları olmak üzere toplamda 800 veri, modeli geliştirmek için

kullanmışlardır. Model sonuçları, derin inanç sinir ağının gemi ana makine soğutma sisteminin arıza tahminlemesini etkili bir şekilde gerçekleştirebileceğini göstermektedir.

Wang vd. (2021); gemi makinesi için manifold öğrenimi ve izalasyon ormanı (iforest) dayalı bir akıllı arıza izleme yöntemi geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemi doğrulamak için 2 zamanlı bir gemi ana makinesini (7K98MC) Matlap/Simulink kullanarak modellemişlerdir. Modeli, kompresör verimi, soğutma verimi, yakıt enjeksiyon zamanı değiştirilerek modeli simüle etmişlerdir. Efektif güç, özgül yakıt tüketimi, hava yakıt karışımı, maksimum yanma sonu basıncı, maksimum sıkıştırma sonu basıncı, kompresör giriş-çıkış basıncı, ara soğutucu çıkış sıcaklığı, emme havası basıncı ve sıcaklığı, egzoz basınç ve sıcaklığı, türbin hızı ve türbin çıkış sıcaklığı kaydedilerek arıza veri kümesi oluşturmuşlardır. Toplamda 200 saatlik simülasyonun çalıştırılmasıyla normal ve arızalı koşullarda 700 veri elde etmişlerdir. Normal verilerin 200 adedi ile manifold öğrenimi ve izalasyon ormanı eğitilmiş, 500 adet (200 normal, 300 arızalı) veri ile de test etmişlerdir. Test sonuçlarına göre, %98,5 arıza tespit doğruluk oranına sahip olduğunu hesaplamışlardır.

Dong ve Nguyen (2021); çalışmalarında, iki zamanlı, düşük devirli bir gemi ana makinesi silindirlerinden yayılan akustik emisyon sinyal verilerini elde etmek için gerçek çalışma koşullarında deneysel bir yöntem uygulamışlardır. Ölçümler, makine çalışma modunda silindirin eksenel yönünde orta frekans (20–80 kHz) ve yüksek frekans (100–900 kHz) aralığındadır. Akustik emisyon sinyallerinin frekans aralığını düzenlemek için Fourier dönüşüm (FFT) algoritması kullanmışlardır. Ölçüm sonuçlarına göre, yanma süreçleri, sürtünme, aşınma ve egzoz valfi açıklığı tarafından üretilen akustik emisyon sinyaller ile kısmen tespit edebilmişlerdir. Sürtünme esnasında yayılan sinyaller, yüksek frekans aralığında belirgin olmadığını ve yanma işleminin, özellikle orta frekans aralığının eksenel yönünde akustik emisyon kaynakları üzerinde güçlü bir ilişkisi olduğu tespit etmişlerdir.

Hu vd. (2021); çalışmalarında, iki zamanlı ana makine için MATLAB/Simulink'te turboşarj ve egzoz gaz sistemi için bir termodinamik simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Gerçek gemi verileri ile doğruluğu sağlandıktan sonra (hata oranı %5) yüksek makine dairesi sıcaklığı, giriş filtresi tıkanması, ara soğutucu su tarafı kirlenmesi, yüksek soğutucu su sıcaklığı, emme mahalinin kirlenmesi, tıkalı türbin nozulu ve aşınmış turboşarj yatakları gibi arızaları simüle edebilmek için ilgili modeli geliştirmişlerdir. Ayrıca, değişken makine dairesi ve ara soğutucu sıcaklık etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla bir normalleştirme yöntemi önermişlerdir. Bu sayede ana makine, farklı çalışma koşullarında arızaların tespiti yapılabilmektedir.

Dionysiou vd. (2021); yolcu gemisi yağlama yağı sisteminin güvenilirliğini inceleyerek yeni bir tasarım tavsiyesinde bulunmuşlardır. PMS kayıtları, OREDA veri tabanı ve uzman bilgileri ile MADe yazılımını kullanarak arıza modeli geliştirmişlerdir. Kurulan arıza modeli Hata Ağacı Yöntemi (FTA) ile niteliksel açıdan doğrulamışlardır. Arıza Modları Etkileri ve Kritiklik Analizi (FMECA) ile yağlama yağı bileşenlerinin kritiklik derecesi, Güvenirlilik Blok Diyagramları (RBD) yöntemi ile güvenilirlik yüzdesi ve arıza olasılıkları hesaplamışlardır. Elde etmiş oldukları sonuçlara göre yağlama sistemindeki güvenilirliği en düşük ve en kritik bileşenler, manyetik filtre ve yağlama yağı pompasıdır. Yağlama yağı sisteminin güvenilirliğini artırmak amacıyla sisteme yedi sensör eklenmesini tavsiye etmişlerdir.

Varbanets vd. (2021); çalışmasında, iki zamanlı bir gemi ana makine turboşarjının anlık hız ve titreşim değerlerini, akustik sinyallerin analizine dayalı olarak tahmin etmişlerdir. Ölçüm verilerini, TCA 66 ve VTR 564 turboşarjları ile donatılmış gemi ana makinelerinden elde etmişlerdir. Yük altında yapılan ölçümler, yüksek duyarlılığa sahip EM-4015-BC marka mikrofon kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. VTR 564 turboşarjına sahip gemi ana makinesindeki ölçümler, egzoz manifoldu ve türbin kanat temizliği öncesi ve sonrası olmak üzere iki farklı durumda yapılmıştır. Yapılan analizler, toz, yağ ve karbon birikintilerinin gaz yolunu bozması sonucu titreşim değerlerinin arttığını ortaya koymuştur. Çalışmada, ana harmonik genliğinin ortalama spektrum seviyesinin iki ile üç katına çıkmasının, turboşarj rotor titreşimlerinin tehlikeli seviyelere ulaşabileceğine dikkat çekilmiştir. Ayrıca, ölçümler sırasında oluşan spektral sızıntıları ortadan kaldıran bir algoritma önerilmiş ve bu sayede akustik sinyallerin frekans ve genlik hesaplamaları daha doğru bir şekilde yapılabilmiştir.

Anantharan vd. (2021); çalışmalarında, turboşarj verimliliğini etkileyen iki arıza durumunu incelemişlerdir. Bu arızalar türbin giriş ızgara filtre kirliliği ve hava filtresi kirliliği olarak belirlenmiş ve Kongsberg simülatörü kullanarak simüle edilmiştir. Hava filtresi kirlendiğinde, hava basınç farkı %22 artmıştır. Filtre üzerindeki basınç farkı dışında diğer parametrelerde belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ancak türbin giriş ızgara filtresi kirlenince, hava debisinde %54, egzoz debisinde ise %31'lik bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum, egzoz gazı sıcaklığında %50'lik bir artışa yol açmış ve ana motor 11 dakika sonra güç düşüşü yaşamıştır. Egzoz mahalinin planlı bakım ve periyodik muayenesinin düzenli gerçekleştirilmesi gerektiğini önermişlerdir.

Drewing vd. (2021); her silindirdeki yanma verimliliği farklılıkları nedeniyle krank millerindeki anlık açıl ivmenin değişkenlik gösterebileceğine dikkat çekmişlerdir. Bu nedenle, yakıt sistemindeki arızaların açıl ivmeye olan etkisini araştırmak amacıyla bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde tıkanmış enjektör delikleri, yakıt debisinin azaltılması ve enjektör basıncının düşürülmesi gibi arızaları incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, anlık açıl ivmenin farklılık gösterdiğini ve bu tür ivme değişikliklerinin arıza tespiti için kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Olsson (2021); çalışmasında, yağlama yağı sistem arızalarını incelemiştir. İsveç sigorta firmasından elde ettiği son 11 yılda gerçekleşen 101 yağlama sistemi arızalarının kök nedenlerini analiz etmiştir. Analiz sonuçlarına göre, en yaygın yağlama arızalarının sırasıyla %18'i yağlama yağındaki su içeriği, %11'i hatalı yağlama yağı filtresi ve %10'u uygunsuz bakım prosedürleri olduğunu göstermektedir. Ayrıca, arızaların en sık meydana geldiği ana makine bileşeni yataklar olduğu belirlenmiştir. Haftalık su içeriği testlerinin yapılmasını, yedek filtrelerin düzenli olarak gemiye tedarik edilmesini ve çevrimiçi yağ izleme yöntemlerinin geliştirilmesini tavsiye etmiştir.

Popov vd. (2022); çalışmalarında, 66.640 çalışma saati sahip 8400 kW gemi ana makinesinin turboşarjında meydana gelen hasar nedeniyle vaka analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın ana amacı düşük turboşarj performansının akaryakıt tüketimine olan ilişkisinin belirlenmesi ve arıza nedenlerinin değerlendirilmesidir. Turboşarj hasarından bir ay önce ve turboşarjın bakımından sonra elde edilen veriler ile regresyon analizi gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, arızalı türbinin hızındaki değişiklik ile yakıt tüketimi arasında bir ilişki olmadığını belirlenmiştir. Toplanan bilgi ve verilere göre, turboşarj hasarı 3 olası nedenden kaynaklanmıştır: yanmamış yakıtın varlığı, yağlama yağının eksikliği, suyun varlığı. Bu nedenle, arıza şüphesi olması durumunda, sorumlu mühendislerin bakım programında belirtilen çalışma saatlerine bakmaksızın, üretici tarafından öngörülen uygun kontrolleri ve ölçümleri yapması gerektiği bildirilmiştir.

Kutay ve Kamal (2022); çalışmalarında, krank mili arızalarını Bulanık Bayes Ağları (FBN) ile incelemişlerdir. Koşullu olasılık tabloları, beş uzman görüşleri doğrultusunda Genie yazılımına aktarılmış ve krank arıza olasılığı %4 olarak hesaplamışlardır. Hassasiyet analizlerine göre gemi personel hataları %40,4 olasılıksal değişim ile en önemli nedensel faktör olarak tespit etmişlerdir. Gemi personeline düzenli eğitim programlarının düzenlenmesinin krank mili arızalarının azaltılmasında etkili olacağına vurgu yapmışlardır.

Ayrıca gemide krank mil bakımları planlanırken gerekli yedek parça ve bakım onarım aparatlarının bulundurulması ve yeterli zamanın ayrılmasının önemine dikkat çekmişlerdir.

Ceylan vd. (2022); çalışmalarında, geleneksel kaza analizi yöntemlerinin gemi ana makinesi gibi karmaşık sistemlerin neden olduğu kazaların nedenlerinin belirlenmesinde yetersiz kaldığına vurgu yapmışlardır. Bu doğrultuda STAMP ve kural tabanlı bulanık FMEA'ya dayalı yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem, 2010 yılında meydana gelen M/V Guron gemisi ana makine kaynaklı kaza örneğinde test etmişlerdir. Sonuçlara göre, M/V Guron olayının ana nedenleri %80'i insan faktörü, %13'ü donanım ve yazılım faktörü ve %7'si dış etkidir.

Velasco-Gallego ve Lazakis (2022); çalışmalarında, durum tabanlı bakım planlamalarında sensör verilerinin eksikliği nedeniyle çeşitli zorluklarla karşılaşıldığını belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, eksik verinin tamamlanması için birinci dereceden Markov zinciri, 16 makine öğrenimi ve zaman serisi tahmin modelinin karşılaştırmalı metodolojisine dayanan çok değişkenli bir değerlendirme yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, 6S50MC-C makinesiyle donatılmış bir gemiden elde edilen 4 fiziksel parametre (devir, güç, yakıt debisi ve emme havası sıcaklığı) ile test edilmiştir. Test sonuçları, daha önce geliştirilmiş bir eksik veri tamamlama yöntemi olan MICE ile karşılaştırılmış ve devir için %77, güç için %56, yakıt debisi için %21, emme havası sıcaklığı için ise %73 iyileşme gözlemlenmiştir.

Kang vd. (2022); çalışmalarında, silindir gömlek aşınmasını tahmin etmek ve kalan ömrünü hesaplamak amacıyla, Weiner sürecine dayalı doğrusal olmayan bir bozulma modeli oluşturmuşlardır. Silindir gömleği işletme sürecinde birçok operasyonel belirsizliklere maruz kaldığını ve diğer aşınma modellerinin çoğu, bir veya birkaç koşula odaklandığını bildirmişlerdir. Bu doğrultuda silindir gömleği kalan ömrünü tahmin etmek amacıyla çoklu belirsizlikleri kapsayan model geliştirilmiş ve model parametrelerini güncellemek için Bayes Yöntemi kullanmışlardır. Kurulan modelin doğrulanması amacıyla 1999-2006 yılları arasında toplanan silindir aşınma verilerini kullanmışlardır. Veriler, üç aynı gemiye ait iki zamanlı gemi ana makinesinden (SULZER RTA 58) elde etmişlerdir. Modelin hata oranı %5'in altında hesaplanmıştır.

BahooTorood vd. (2022); çalışmalarında, otonom dereceleri dikkate alınarak geleneksel gemilerin sağlık durumunu tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda makine öğrenim kullanılarak yapılandırdıkları Hiyerarşik Bayesci Çıkarım (HBI) tabanlı güvenilirlik modeli geliştirmişlerdir. Modelin doğruluğunu test etmek amacıyla üç Ro-Ro

gemisinden bakım kayıtları, alarm kayıtları ve gemi makine personeli ile görüşmeler ile veriler toplamışlardır. Otonom dereceleri (dört, üç, iki) sırasıyla insan müdahalesi olmadan 3, 17, 47 hafta süreyle çalışabileceklerini hesaplamışlardır.

Ceylan vd. (2022); denizcilik sektöründeki dijitalleşmenin artışıyla birlikte, gemilerdeki riskli operasyon ve arıza analizlerinde simülatör sistemlerinin kullanımının yaygınlaştığını ifade etmişlerdir. Makine simülatörlerinin akademik çalışmalarda kullanımının standardizasyonunu sağlamak ve belirsizlikleri ortadan kaldırmak amacıyla yeni bir metodoloji önermişlerdir. Metodolojinin etkinliğini kanıtlamak için, iki zamanlı bir MAN B&W 6S50 MC-C gemi ana makinesi turboşarj egzoz tarafı kirlenme arızasının risk değerlendirmesini FMEA yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. FMEA risk öncelik sayılarının belirlenmesinde, 5 denizcilik uzmanından alınan görüşler dikkate alınarak hesaplamışlardır. FMEA analiz sonuçlarının, önerilen metodolojiyle tutarlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Zhao vd. (2022); çalışmalarında, gemi ana makine termal arızalarını incelemişlerdir. 13 termal arıza ve 7 arıza parametresi belirleyerek termal arıza simülasyonu Matlab ve Simulink yazılımında, arıza tanısı da Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) yapay sinir ağ algoritması aracılığıyla geliştirmişlerdir. Sonuçlar, LSTM'nin diğer yapay sinir ağ algoritmaları ile karşılaştırıldığında zamana bağımlılık sorunun çözerek termal arızaların teşhisinde daha yüksek doğruluğa sahip olduğu belirlemişlerdir.

Xu vd. (2022); çalışmalarında, gemi ana makinesinin (6S50MC) AVL Boost yazılımı kullanılarak termodinamik modelini oluşturmuşlardır. Model gerçek gemi verileri ile karşılaştırılmış %100 ve %75 yük altında hata oranı %3'ten az olduğunu hesaplamışlardır. Daha sonra termodinamiğin ikinci yasası ekserji analizlerine dayalı olarak gemi ana makinesinin 6 yaygın arızaları için modeli geliştirmişlerdir. Bu arızalar, hava kompresör arızası, hava kuler arızası, emme hava mahali kaçağı, silindir arızaları, egzoz mahali kaçaqları ve türbin arızalarıdır. Oluşturulan termoeconomik teşhis modeli ile makinenin davranışları normal ve arızalı koşullarda tahmin etmişlerdir. Ayrıca modelin çiftli arıza durumlarında veya tekli arızaların birbirini etkilemesi durumlarında arıza yerini tam olarak belirleyemese de arızalı bileşenlerin arama aralığını daraltmak için kullanılabileceği belirtmişlerdir.

Cheliotis vd. (2022); çalışmalarında, kara kutu sinir ağları ve fizik tabanlı modeller kullanmadan gemi ana makine arıza nedenlerinin tespiti için Makine öğrenimi ve Bayes Ağlarını entegre ederek yeni bir model geliştirmişlerdir. Modeli test etmek amacıyla hava soğutucusu, emme ve egzoz gaz sistem arızalarını incelemişlerdir. 65.000 DWT kuru dökme

yük gemisine ait veri toplama sisteminden 25.627 adet veri örneği elde etmişlerdir. Model sonuçlarına göre egzoz gaz sıcaklığındaki anormal bir sapma değeri, emme ve egzoz sistemlerindeki bir arızadan kaynaklanma olasılığının daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Famakinwa ve Shibutani (2022); silindir gömlekleri ve segmanların aşınma arızalarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, 6UEC60LSA model gemi ana makinesine ait silindir yağ numunelerini XRF (X-ray Floresans) tekniği ile analiz etmişlerdir. Bu analiz, demir, çinko, gümüş, bakır, kalsiyum, vanadyum ve sülfür gibi elementlerin içeriklerini belirlemelerine olanak tanımıştır. Ayrıca, elde ettikleri analiz verileri ve fiziksel ölçümlerle hesapladıkları aşınma oranlarını göz önünde bulundurarak bir Gaussian grafiği modeli geliştirmişlerdir. Bu model, fiziksel ölçümler yapmadan silindir gömlekleri ve segmanlardaki aşınma nedenlerinin tespit edilmesine imkan sağlamıştır.

Wiaterek ve Chybowski (2022); 1972-2018 yılları arasında meydana gelen 102 karter patlamasını incelemişlerdir. Çalışmalarında, patlamaların ortaya çıktığı makinelerin türü, üretici firma, gemi yaşı, kaza şiddeti ve kaza yeri gibi faktörleri dikkate alarak istatistiksel bir analiz yapmışlardır. Elde ettikleri verilere göre, karter patlamalarının %31'inin kroshetli makinelerde, %61'inin ise trank pistonlu makinelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, patlamaların yarısından fazlasının 15 yaşından küçük gemilerde yaşandığı ve ölüm oranının yaklaşık %17 olduğunu hesaplamışlardır.

Ventikos vd. (2022); çalışmalarında, gemi ana makinesi yağlama sisteminin arıza olasılıklarını ve maliyet analizlerini yaparak en verimli yağlama yağı analiz aralığını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Arıza modelini oluşturmak için Bayes Ağı yöntemini kullanmışlardır. 31 gemiden elde edilen 352 yağ analiz raporu ve uzman görüşleri ile arıza olasılıklarını hesaplamışlardır. Maliyet analizi, uzman görüşlerinin yanı sıra fatura ve bakım sözleşmelerinden elde edilen verilerle, MATLAB ortamında geliştirilen bir kod aracılığıyla hesaplamışlardır. Sonuçlar, yağlama yağı analiz aralığı kısaldıkça arıza olasılığının azaldığını, ancak maliyetlerin arttığını ortaya koymuştur. Çalışma, optimum yağlama yağı analiz aralığını sırasıyla 2 aylık, 3 aylık, 1 aylık ve 4 aylık periyotlar olarak belirlemiştir.

Chybowski vd. (2023); yılında gemi ana makinesi turboşarj patlama arızalarını incelemişlerdir. 1977-2022 yılları arasında meydana gelen turboşarj patlama olaylarını gemi türü, makine yaşı, makine türü, makine devir sayısı, piston sıralanış şekli, makine gücü, silindir sayısı gibi değişkenler dikkate alınarak yıllara göre dağılımını yapmışlardır. Gemi türü ile meydana gelen patlama sayısı arasında anlamlı bir ilişkisi olmadığı hesaplamışlardır.

Patlama sayısının yarısından fazlası 15 yaşından küçük gemi makinelerinde gerçekleşmiştir. Tüm patlamaların %85'i, gemi ana makine üreticilerinin en büyük paya sahip dört tasarımcının makinelerinde meydana gelmiştir. Turboşarj patlama sıklığı, incelenen dönem boyunca sabit kalarak ortalama 0,93 patlama/yıl olarak gerçekleşmiştir. Dünya çapındaki gemi sayısı dikkate alındığında, belirli bir yılda belirli bir gemide patlama olasılığı en az $1,61 \times 10^{-7}$ olarak hesaplamışlardır.

1.8.2. Gemi Makine Operasyonlarında İnsan Güvenirlik Analizi

Uchida (2004); çalışmasında, gemi makine kaynaklı gemi kazaları ile ilgili verilerin yetersiz olduğuna dikkat çekmiştir. Bu doğrultuda, Japonya Deniz Kaza Araştırma raporlarından 1995-2003 yılları arasında gerçekleşmiş 173 gemi makine dairesi yönetimi ile ilgili kaza verisini insan hatası sınıflandırması dikkate alarak analiz etmiştir. Analiz sonuçlarına göre, eğitim öğretim ve çalışma ortam standartlarının iyileştirilmesi gerektiğini, makine dairesi kaynak yönetiminin makine yönetimine dahil edilmesini önermiştir.

Yang vd. (2013); çalışmalarında, insan hata analizlerinde güvenilir veri eksikliği nedeniyle deniz güvenliği değerlendirmelerinde büyük bir sorun oluşturduğunu vurgulamışlardır. Bu doğrultuda geleneksel Bilişsel Güvenilirlik ve Hata Analizi Yöntemini (CREAM) bulanık mantık ile genişleterek insan hata olasılıkları hesaplamışlar ve değişkenler arasındaki bağımlılığı modellemek için de Bayes yöntemi kullanmışlardır. Geliştirilen model, bir tanker gemisi yük pompasının arıza senaryosunda test edilerek, geleneksel CREAM yöntemine kıyasla daha tutarlı sonuçlar verdiğini doğrulamışlardır.

Akyüz vd. (2016); çalışmalarında, HEART yöntemindeki hata üreten koşullar değerlerini (EPC) bazı disiplinler için özel olarak tanımlanmış olsa da, denizcilik sektörü için bu değerlerin henüz güncellenmediğini vurgulamışlardır. Bu sebeple, Çoğunluk Kuralı, HEART, HFACS, AHP ve geçerlilik analizlerini içeren çok boyutlu bir yaklaşım kullanarak EPC değerlerini hesaplamışlardır. HFACS–EPC ilişki matrisi, denizcilik uzmanlarının görüşleri dikkate alınarak EPC'lerin ilgili HFACS alt seviyelerine dağıtılmasıyla oluşturulmuş ve EPC'leri çoğunluk kuralı ile seçimini yapmışlardır. AHP yöntemi ile her EPC'nin ilgili HFACS seviyeleri altındaki ağırlıkları belirlendikten sonra EPC etkilerini hesaplamışlardır. Hata üreten koşul değerleri 100 gemi kazasında test ederek doğrulamasını yapmışlardır.

İslam vd. (2017); çalışmalarında, geleneksel İnsan Hatası Değerlendirme ve Azaltma Tekniği (HEART), denizcilik sektörüne özgü geliştirilmemesi nedeniyle denizciliğe özgü operasyonların analiz edilmesinde yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, HEART yöntemi güncellenerek denizcilik sektörüne özgü insan hatalarını değerlendirmek ve nicelleştirmek amacıyla yeni bir metodoloji geliştirmişlerdir. Geliştirilen metodolojinin bir parçası olarak, İnsan Hatası Olasılığı (HEP) tahmini için Hata Üreten Koşul (EPC) ve Hata Etkileyen Faktör (EIF) tabloları güverte ve makine personellerine yapmış oldukları anket verileri dikkate alınarak tekrardan düzenlemişlerdir. Gemi ana makinesi turboşarjı ve bir açık deniz petrol ve gaz tesislerindeki yoğunlaştırıcı pompası bakım operasyonuna uygulayarak modeli test etmişlerdir. Kötü hava koşulları, yüksek çalışma ortamı sıcaklığı, gemi hareketi, gürültü ve titreşim, iş yükü ve stresin, insan hatası ve potansiyel kazaların olasılığını artırdığına vurgu yapmışlardır.

Allal vd. (2017); çalışmalarında, otonom gemi uygulamasının insan hatalarını azalttığı düşünülse de insan güvenilirliği açısından zayıf noktalarının olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bu zayıf noktalar, gemi limandayken yapılan bakım faaliyetlerinin yine bakım personelleri tarafından yapılması gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Bu doğrultuda deniz sandığı filtresi bakım adımları insan güvenilirliği kapsamında incelemek amacıyla İnsan Hatası Oranı Tahmini (THERP) yöntemini kullanmışlardır. Analiz sonuçlarına göre, standart bir bakım prosedürü oluşturulmasını ve kaçak tespit sensörlerinin, kızılötesi kameraların gemi makine dairesine entegre edilmesini önermişlerdir.

Akyüz vd. (2018); çalışmalarında, yakıt ikmal işlemlerinde insan faktörünün kontrolünün, gemi güvenliğini artırmak ve deniz çevre kirliliğini önlemek açısından kritik bir rol oynadığına dikkat çekmişlerdir. Bu doğrultuda yakıt ikmal esnasında insan hatalarını değerlendirmesi gemi personeline uygulamış oldukları anket verileri doğrultusunda Gemi Operasyonları İnsan Güvenilirlik Analizi (SOHRA) yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Pompa hızının yakıt ikmal başlangıcında düşük olduğundan emin olmak, pompa hızının doğrulanması, diğer yakıt tank doldurucu valflerinin kapalı olduğundan emin olmak en önemli insan hataları olduğunu tespit etmişlerdir.

Kandemir ve Çelik (2019); çalışmalarında, gemi makine sistemlerinde uygulanan planlı bakım sistemi (PMS) ve yeni bir bakım yaklaşımı olan Bakım-4.0 (Maintenance 4.0) SOHRA yöntemi kullanılarak insan hata olasılık değerleri hesaplayarak karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmanın ana amacı Bakım 4.0'ın insan güvenilirliğine olan katkısının belirlenmesidir. Bu doğrultuda gemi dizel jeneratörün bakım operasyonlarında senaryo

tabanlı bir insan hata olasılığı her iki bakım yöntemi için analiz etmişlerdir. Bakım 4.0'a geçiş ile birlikte insan hatalarının %83 bir azalma yaşanacağını ama sıfırlanmayacağı vurgu yapmışlardır.

İslam vd. (2019); çalışmalarında, İnsan Hatası Değerlendirme ve Azaltma Tekniğinin (HEART) insan hatası etki oranı değerlendirmeleri tek bir uzman yargısının dikkate alınmasının bir eksiklik olduğuna vurgu yapmışlardır. Bu doğrultuda, D-S kanıt teorisini ve geleneksel HEART yöntemlerinin entegre edildiği yeni bir hibrit yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem açık deniz petrol ve gaz tesislerinde kullanılan yoğunlaştırıcı pompa bakım faaliyetine uygulamışlardır. Genç operatör, kıdemli operatör ve denetçi olmak üzere farklı tecrübelerle sahip üç uzmandan bakım operasyonundaki insan hata etki oranların değerlendirmesi istenmiş ve D-S kanıt teorisi kullanılarak görüşler birleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre basınç testi ve izolasyon sızıntı testi en yüksek insan hata olasılığına sahip faaliyetler olduğu hesaplamışlardır.

Kandemir vd. (2019); çalışmalarında, Gemi Operasyonları İnsan Güvenirlik Analizi (SOHRA) yöntemini, gemi makine bakım faaliyetlerinde insan güvenirliliği analizini gerçekleştirmek amacıyla kullanmışlardır. Çalışmada, farklı işletim koşullarında beş gemiye ait yakıt seperatör bakımına ilişkin çeşitli senaryolar belirlenmiş ve bu senaryolar kapsamında seperatör bakım adımlarındaki insan hata olasılıkları hesaplamışlardır. Senaryoların çeşitliliği nedeniyle her geminin güvenlik açıkları farklılık göstermiş olup, bu doğrultuda her gemi için özel önerilerde bulunmuşlardır.

Bicen vd. (2020); çalışmalarında, ana makine krank mili bakım ve onarım sürecinde insan güvenirlilik değerlendirmesini yapmak amacıyla Gemi Operasyonları İnsan Güvenirlik Analizi (SOHRA) yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada bakım ve onarım alanının koşullarını, çalışanların niteliklerini, çalışma saatlerini, deneyimlerini, stres seviyelerini ve operasyonun planlanmasını göz önünde bulundurmuşlardır. Bakım operasyonu üç ana adıma ve 39 alt adıma ayırarak her adımda meydana gelebilecek insan hatası olasılıkları hesaplamışlardır. Analiz sonuçlarına göre, en yaygın sorunlar olarak güvensiz ekipman, zayıf geri bildirim, yetersiz kontrol ve personel bilgisizliğini tespit etmişlerdir.

İslam vd. (2020); çalışmalarında, gemi ana makinesinde yürütülen bakım operasyonlarında insan hatalarının analiz edilmesinin önemine vurgu yapmışlardır. Bu doğrultuda mevcut 12 insan hata analiz yöntemlerini değerlendirmesini yaparak karşılaştırmışlardır. Yeni bilgiler doğrultusunda olasılığı güncelleme yeteneği olan tek

yöntem Bayes Ağlarıdır ve gemi makine dairesi bakım faaliyetlerinde insan hata analiz çalışmalarında kullanılabileceğini önermişlerdir.

Kandemir ve Çelik (2021); çalışmalarında, Gemide Operasyonel İnsan Güvenilirliği Analizini (SOHRA) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemini kullanarak simülatör merkezlerindeki insan hatalarını değerlendirmişlerdir. Simülatör ortamında 28 gemi makineleri işletme mühendisliği bölümünü okuyan öğrenciler çeşitli hata üreten koşullar (EPC'ler) ile karşılaştırılmış ve belirli görevleri yerine getirme sürecindeki performanslarını gözlemlemişlerdir. Araştırma bulgularına göre, öğrenciler, güvenilirmez cihazlar, yetersiz kontrol, mekansal ve fonksiyonel uyumsuzluk ve egzersiz eksikliği ile karşılaştıklarında iyi bir performans sergilemişlerdir. Ayrıca, insan öğrencilerin çeşitli koşullara karşı gösterdiği tepkiler oldukça farklı olduğunu tespit etmişlerdir. İnsan güvenilirliği analizlerinin bireylerin özelliklerini dikkate alınarak geliştirilmesi gerektiğini önermişlerdir.

İslam vd. (2020); çalışmalarında, denizcilerin performansını etkileyen iç ve dış faktörleri göz önünde bulunduran bir insan hatası olasılık modeli geliştirmenin önemini vurgulamışlardır. Bu bağlamda, olasılık teorisi ve Bayes Ağları kullanarak bir model geliştirmişlerdir. Modelin geliştirilmesinde, 5 yıldan fazla deneyime sahip 200'den fazla denizcinin görüşlerine yer verilmiştir. Bayes Ağında, performansı etkileyen iç ve dış faktörler iki farklı kategoride ele alınmıştır. İç faktörler; eğitim, deneyim ve yorgunluk olarak belirlenirken, dış faktörler çevresel ve operasyonel koşullar olarak sınıflandırmışlardır. Çevresel faktörler; hava koşulları ve işyeri sıcaklığını, operasyonel faktörler ise gemi hareketi, iş yükü ve stres, gürültü ve titreşimi kapsamaktadır. Geliştirilen yöntem, deniz motoru soğutma suyu pompası (makine bölümü) ve ırgat (güverte bölümü) bakım faaliyetlerinde test edilerek, her iki bölümdeki insan hatası olasılıkları hesaplanmış ve karşılaştırmalarını yapmışlardır.

Kandemir ve Çelik (2021); çalışmalarında, İnsan Hata Değerlendirmesi ve Azaltma Tekniğindeki (HEART) hata üreten koşulların güncellenmesiyle geliştirilen Gemi Operasyonları İnsan Güvenirlik Analizinin (SOHRA) güverte ve makine operasyonları için farklı yaklaşım sunmadığına dikkat çekmişlerdir. Bu nedenle SOHRA'yı gemi makine dairesi bakım operasyonlarına özgü geliştirmişlerdir. Öncelikle Geleneksel İnsan Faktörü Analizi ve Sınıflandırma Sistemi (HFACS) çerçevesinde, 2008-2018 yılları arasında meydana gelen 70 gemi kazası analiz ederek 435 kaza nedeni belirlemişler ve bu veriler doğrultusunda makine bakım operasyonları için HFACS-MMO'yu uyarlamışlardır. HFACS-MMO seviyelerinin ağırlıklandırılmış değerleri kullanılarak Gemi Bakım ve Operasyonları

İnsan Güvenirlik Analizi (MMOHRA) yöntemini oluşturmuşlardır. Önerilen yöntem kargo dişli pompası bakım operasyonunda vaka çalışması yapmışlardır.

Demirel (2021); çalışmasında, insan hatasından kaynaklanan gemi ana makinesine ait 20 yaygın arızayı incelemişlerdir. İnsan hata olasılıkları 3 uzmanın görüşleri doğrultusunda Bilişsel Güvenilirlik Hata Analizi Yöntemi (CREAM) yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Analiz sonuçlarına göre turboşarj kirliliği ve yüksek basınç yakıt pompa arızası insan hatasının neden olduğu en kritik arızalar olarak belirlemişlerdir. En düşük etkiye sahip arızalar ise yakıt enjektör arızaları ve yetersiz hava girişidir.

Kandemir ve Çelik (2023); çalışmalarında, denizcilik ve açık deniz endüstrisinde insan güvenirliliği çalışmalarına (HRA) dair bibliyometrik bir araştırma yapmışlardır. Geçmiş çalışmalara önerilen HRA kavramları ve metodolojilerini incelemişler ve istatistiksel veriler sunmuşlardır. Denizcilik alanında yapılan çalışmalar tüm insan güvenirlilik çalışmalarının %7’i açık deniz endüstrisi ise %2’sini oluşturmaktadır. Ayrıca gelecekteki otonom gemiler, dijitalleşme gibi girişimler göz önünde bulunarak Denizcilik ve Açık Deniz İnsan Güvenirliliği Araştırma 2.0’yi (MOHR 2.0) önermişlerdir.

1.9. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

1.9.1. Tez Çalışmasının Amacı

Bu tez kapsamında, gemi ana makinesi arıza oluşumuna etki eden nedensel faktörlerin Bayes Ağı ile incelenmesi amaçlanmaktadır. Literatür taramaları incelendiğinde, çoğunlukla tek bir arıza veya yardımcı sistem üzerine yoğunlaşıldığı, birden fazla sistem veya bileşenin birlikte ele alındığı çalışmaların sınırlı sayıda rastlandığı görülmüştür. Ayrıca, arızaların birbiriyle olan ilişkilerinin incelendiği çalışmalar da genellikle sınırlıdır. Bir arıza başka bir arızanın nedeni olabilmektedir. Ana makine arızaları, tek bir arıza ile açıklanamayacak kadar karmaşık ve birbirine bağımlı bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, arızaların bütüncül bir yaklaşım çerçevesinde sistematik bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, ana makinenin güvenirliliğini etkileyen arızalar, daha kapsamlı bir bakış açısıyla ele alınarak arıza nedensellik örgüsü oluşturulup her bir arızanın bağımlı olasılıkları hesaplanıp arızalar arasındaki ilişkiler incelenecektir. Bu yanı ile çalışmamızın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. İncelenen yazın taramalarında, arızalara insan faktörünün etkisinin incelendiği çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. İnsan hatasının dikkate alındığı bazı

Çalışmalarda, yalnızca insan faktörüne odaklanması, diğ er olası nedenlerle ilişki kurma konusunda bir boşluk yaratmaktadır. Arızaların nedensel faktörlerinin analizinde insan faktörünün de göz önünde bulundurulması, mevcut arıza tahmin sistemlerine yeni bir boyut kazandıracaktır. 2020 yılı sonrası yakıt içeriğinin değışimi sonrası artış gösteren arıza nedenlerine ışık tutacak ve pandemi sürecinde yapılamayan veya ertelenen denetimlerin arızalara katkısının belirlenmesinde yararlı olacağı düşünölmektedir. Gemi ana makine güvenilirliğini dolayısıyla gemi güvenliğini etkileyen faktörler belirlenerek insansız gemi konusunda önemli bir adım olacaktır. Aynı zamanda küresel ticaretin sürdürülebilirliği ve denizcilik emniyetinin artırılması noktasında sektöre katkı sağlayacaktır.

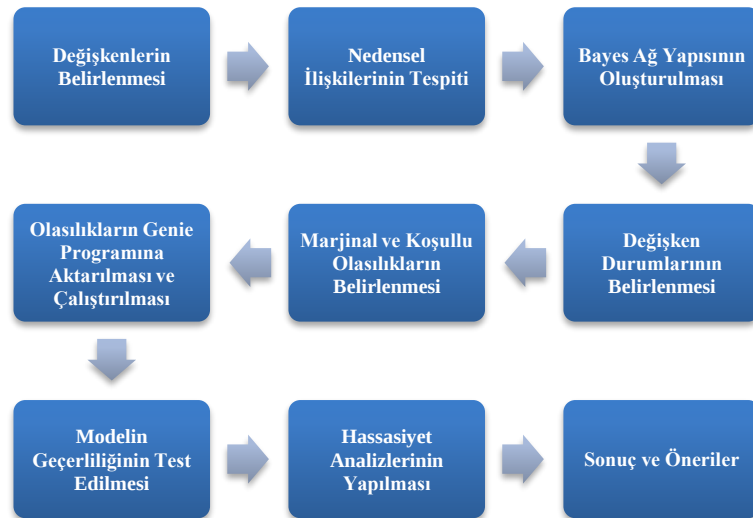
1.9.2. Tez Çalışmasının Kapsamı

Yapılan tez çalışmasında düşük devirli iki zamanlı krosheadli bir gemi ana makine arızaların nedensel faktörleri incelenmiştir. Çalışmada dikkate alınan ana makine MAN B&W 6S50MC-C'dir. Yazın taraması, kaza raporları ve uzmanlar tarafından arızaların belirlenmesi, arıza ilişkilerinin ve durum ifadelerinin tespiti yapıpı Bayes Ağ Modeli kurulmuştur. Kaza raporları elde edilen veriler 2000-2024 yıllarındaki kazaları kapsamaktadır. Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluklar HFACS çatısı altında yapılandırılmıştır. Koşullu olasılık ve marjinal olasılık değ erleri 7 uzman tarafından yapılan görüşmeler neticesinde elde edilmiştir. Uzman yargılarına dayalı koşullu ve marjinal olasılıkların belirlenmesindeki belirsizlikler Bulanık Küme Teorisi kullanılarak ortadan kaldırılmıştır. Koşullu olasılıkların hesaplanması, geçerlilik analizleri, hassasiyet analiz senaryolarının yapılmasında Genie programı kullanılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Gemilerde birçok sistem yedekli olarak tasarlanmış olmasına rağmen, ana makine için benzer bir yedekleme sistemine genellikle yer verilmemektedir. Bu nedenle, gemilerin her zaman çalışır durumda olması için özellikle sevk sisteminin güvenilir olması elzemdir. Bu çalışmada, gemi güvenilirliğini etkileyen ana makinede arıza oluşumuna etki eden nedensel faktörlerin Bayes Ağı ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu bölümde öncelikle çalışmada kullanılan Bayes teoremi, Bulanık küme teorisi ve aşamaları, insan faktörleri analiz ve sınıflandırma sistemi (HFACS) yöntemlerin açıklaması ve tanımlamaları yapılmıştır. Daha sonra gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza değişkenlerinin belirlenmesi, değişken durumlarının tespiti, makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzlukların HFACS çatısı altında sınıflandırılması yapılmış olup bu aşama çalışmanın nitel kısmını oluşturmaktadır. Koşullu olasılık verilerinin elde edilmesi aşamasında kullanılan uzman görüşlerinin bulanık mantık yaklaşımı ile tespiti ve Genie programına aktarılması çalışmanın nicel kısmıdır. Bayes Ağı'nın geçerliliğinin ispatlanması amacıyla aksiyom 1-2-3 testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalarına en fazla etkili olduğu düğümlerin tespiti için hassasiyet analizleri yapılmıştır. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 10. Çalışmanın akış diyagramı

2.2. Yöntem

2.2.1. Bayes Teoremi

Bayes Teoremi, bir olayın gerçekleşme durumunu olasılıksal hesaplamak için kullanılan bir teoremdir. Bu teorem, olayla ilgili önceki olasılık tahminlerinin, olayın gerçekleşmesiyle elde edilen yeni verilerle güncellenmesini sağlar. Sonuç olarak, elde edilen yeni bilgiler doğrultusunda, olayın gerçekleşme olasılığına dair daha doğru ve güncel bir tahmin yapılmış olur (Akıncı vd., 2014). Hayatımızın çeşitli aşamalarında belirsizlikler vardır ve bu belirsizlikler, tercih ve kararlarımızın belirlenmesinde hakim bir rol oynamaktadır. Bayes teoremin temeli de, herhangi bir önermedeki veya neden sonuç ilişkisinde her türlü belirsizlikle baş edebilmenin yolu olasılık kuramlarını kullanmaktır (Lindley., 1972; Ekici, 2009; Gündoğdu, 2016). Bayes kuramının 1763 yılında İngiltere’de yaşayan matematikçi, rahip Thomas Bayes tarafından oluşturulduğu kabul görmektedir. Thomas Bayes’in vefatından sonra arkadaşı Richard Price’in yazdığı “A Essay Towards Solving A Problem in The Doctrine of Chances” adlı makale ile ortaya çıkmıştır. (Saçıldı, 2011; Tıraşoğlu, 2016; Çıkmak, 2020). 18. yüzyılın sonlarında ortaya çıkmış olmasına rağmen, 20. yüzyılın ilk yarısına kadar bilimsel alanda yeterli ilgi ve kabul görmemiştir. Bunun nedeni, klasik yaklaşımların yaşadığı ilerlemenin gölgesinde kalmasıdır. Ancak klasik yaklaşımla çözülemeyen problemlerin çözümü veya ortaya çıkan problemlere karşı sağladığı avantajlar araştırmacıların ilgisini çekmiş birçok bilim dalında Bayesyen istatistik kullanılmaya başlanmıştır (Gündoğdu, 2016; Tıraşoğlu, 2016).

Bayes kuramı belirsizlik içeren olaylarda, gözlem ve var olan bilgilerden yararlanılarak bu olayın olasılıklarının belirlenmesi ve karar alıcıya en etkin karar almasına yardımcı olmaktır. Olasılık hesaplamaları koşullu olasılık olarak ifade edilen ve Bayes teoremine dayanan Bayes formülü ile yapılmaktadır. Yani, öncelikle koşullu olasılığın uygulanabileceği bir durumun mevcut olması gerekmektedir (Gündoğdu, 2016). B olayı bilinirse, A olayının olasılığı şu şekilde ifade edilir:

$$P(A|B) = P(A \cap B)/P(B) \quad (1)$$

Bu eşitliğin tersine de uygulanabilir. Yani A olayı gerçekleştiği bilindiğinde B olayının meydana gelme olasılığı:

$$P(B|A) = P(A \cap B)/P(A) \quad (2)$$

Her iki durum dikkate alındığında, ifadeler şu şekilde düzenlenir;

$$P(A|B) P(B) = P(A \cap B) = P(B|A) P(A) \quad (3)$$

$$P(A|B) P(B) = P(B|A) P(A) \quad (4)$$

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) P(A)}{P(B)} \quad (5)$$

Bu Denklem yazıldığında, Bayes teoreminin formülü türetilmiş olur ve bu formülde:

- $P(A)$ terimi A için marjinal olasılık veya önsel olasılık olarak ifade edilir. B olayına dair daha önce herhangi bir bilgi mevcut değildir.
- $P(A|B)$ terimi, B olayının gerçekleştiği durumda A'nın koşullu olasılığını ifade eder.
- $P(B|A)$ terimi A olayının gerçekleştiği durumda B'nin koşullu olasılığını ifade eder.
- $P(B)$ terimi B için marjinal olasılık veya önsel olasılık olarak ifade edilir. A olayına dair daha önce herhangi bir bilgi mevcut değildir.

Bayes kuramının genelleştirilmiş biçimini açıklamak amacıyla, $A_1, A_2, \dots, A_k$ gibi ayrık olaylardan meydana gelen bir örneklem uzayının kabul edildiği ve 4 numaralı Denklem üzerinde yapılan düzenlemede;

$$P(B) = (PA_1)P(B|A_1) + \dots (PA_k)P(B|A_k) = \sum_{j=1}^k P(A_j) P(B|A_j) \quad (6)$$

şekliyle yazılmaktadır. Bu koşulda, formül, örneklem uzayındaki A_i olayının olasılığını belirlemek için aşağıdaki gibi dönüşmekte olup ve Denklem 5'teki yerine konulduğunda:

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{\sum_{j=1}^k P(A_j)P(B|A_j)} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

elde edilir ve bu da Bayes teoremidir (Dünder, 2013; Uludağ, 2014; Çıkmak, 2020; Tıraşoğlu, 2016; Ekici, 2005, Gürsakar, 2007). Bazı kaynaklarda Bayes kuramındaki olasılık değeri sonuçlardan nedenlere doğru ilerlemeyi tanımlayan "tersine olasılık olarak

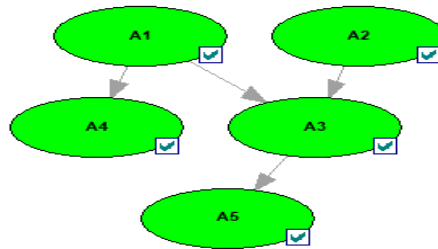
adlandırılmaktadır (Saçıldı, 2011). Veri toplanmadan önce, bir olayın meydana gelme olasılığı, önceden belirlenen olasılık veya önsel olasılık olarak tanımlanır. Önsel olasılık oluşturabilmek için geçmişte elde edilmiş veriler, uzman görüşü, araştırmacının tecrübesi veya kişisel sezgilerine dayanır ve yeni bilgiler ışığında, ilk tahmin edilen olasılıklar güncellenebilir (Avcı, 2012; Dunder, 2013). Bu önseller dikkate alınarak, olayın gerçekleşmesine dair elde edilen koşullu olasılık, nihai (sonsal) olasılık olarak tanımlanır. Bayes teoremi çerçevesinde gerçekleştirilen ardışık uygulamalar, sonsal dağılımın başlangıç aşaması olarak değerlendirilmesine olanak tanır (Çıkmak, 2020). Yani, bugünün sonsal dağılım olasılığı yarının önsel dağılım olasılığı olarak kullanılabilir (Tıraşoğlu, 2016).

2.2.2. Bayes Ağları

Günümüzde, birçok alandaki problemler, birbirleriyle etkileşim halinde olan çok sayıda değişkenin varlığını içermektedir. Bu değişkenlerin her birinin ayrı ayrı etkilerinin yanı sıra, aralarındaki ilişkilerin toplam etkilerinin de değerlendirilmesi önemlidir. Bu durum, söz konusu süreçlerin karmaşık bir yapıya bürünmesine ve dolayısıyla doğru çıkarımlar yapmanın güçleşmesine yol açmaktadır. (Gündoğdu, 2016). Bayes yaklaşımı ile oldukça karmaşık sistemlerin nedensellik ilişkileri değerlendirilebilmekte ve bir çıkarsama yapılabilmektedir. Bayes yaklaşımının en yaygın kullanılan yöntemlerinden biri “Bayes Ağları”dır ve bazen “Nedensellik Olasılık Ağları, Bayes Ağaçları, Olasılıksal Sebep-Sonuç Modelleri, Olasılıksal Etki Diyagramları” olarak da ifade edilebilmektedir (Altunay ve Yılmaz, 2023). Bayes Ağları, bilgi tabanlı sistemlerdeki belirsizlikleri analiz etmek için önemli bir yöntem olarak geliştirilmiş olup, ilk kez 1980'lerde istatistik ve yapay zekâ alanlarını birleştiren grafiksel bir model olarak tanıtılmıştır (Çıkmak, 2020). Veri madenciliğinin önemli sınıflandırma modellerinden olup olasılıksal uzman sistemlerin bir türüdür. Bayes Ağları, düğümler arasındaki ilişkileri ortaya koymak için diyagram temelli modellerden yararlanmaktadır (Altunay ve Yılmaz, 2023). Hem niteliksel hem de niceliksel bileşenlerden oluşan bir yapıya sahiptir. (Çıkmak, 2020; Şakar, 2017; Gaag, 1996). Her bir değişkenin bir düğüm olarak temsil edildiği ve aralarındaki yönlendirilmiş bağlantıların oklar oluşturduğu matematiksel bir grafik tabanlı modeldir (İslam vd., 2020). Değişkenler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ve ilişkilerin matematiksel yorumlanması için birçok istatistiksel testler bulunmaktadır. Ki-kare, korelasyon analizi, kontenjans katsayısı bunlara

örnek olarak verilebilir (Dünder, 2013). Ancak bu testlerde çok sayıda değişkenin bulunduğu bir örnekleme bağımsız ve bağımlı ilişkileri ve bunların nedensellik yönlerini belirlemek yetersiz kalabilmektedir. Değişken sayısı arttıkça yorumlama ve çıkarsama güçlüğüne neden olacaktır. Değişkenlerin olasılık verileri grafiksel gösterimi nedensellik ilişkisinin görsel olarak gözler önüne serilmesi daha basit anlaşılmasına, verilerin anlamlı ve etkili yorumlanmasına imkan sağlamaktadır (Altunay ve Yılmaz, 2023).

Düğüm, bir dizi rastgele değişkeni temsil eder ve düğümler arasındaki kenarlar, değişkenler arasındaki doğrudan bağımlılıkları ve ilişkisini gösterir (İslam vd., 2020). Aynı zamanda, bu bağlar koşullu bağımlılık ve koşullu bağımsızlık kavramları kullanılarak da açıklanabilir. İki değişken arasındaki bağlantı veya ok, koşullu bağımlılığı ifade ederken, bağlantı veya ok olmaması, değişkenler arasında koşullu bağımsızlık olduğunu gösterir (Çıkmak, 2020; Nadkarni ve Sgenoy, 2001). Bir düğümden diğer düğüme karşılık gelen yönlü okun başlangıç noktasındaki düğüme 'ebeveyn', bitiş noktasındaki düğüme ise 'çocuk' denir. Hiçbir ebeveyni olmayan ve kendisine herhangi bir ok yönlendirilmemiş düğümler 'kök düğüm' olarak adlandırılırken; herhangi bir çocuk düğümü bulunmayan ve kendisinden hiçbir ok çıkmayan düğümler ise 'yaprak düğüm' olarak tanımlanmaktadır (Şakar, 2017). Bağlar yönlü, yönsüz veya karma olabilmektedir. Yönsüz grafikler düğümler arasındaki okların yön belirtmediği grafiklerdir. İki düğüm arasında bir ilişkinin olduğunu gösterir ancak; hangi değişkenin hangisini etkilediği hakkında bir fikir vermez. Yönlü grafiklerde düğümler arasındaki oklar nedensellik ilişkisini ne yönlü olduğunu gösterir. A düğümünün B düğümünü etkilediği sonucuna varılabilir veya tam tersi durum içinde geçerlidir. Bir düğümden bir değişim gözlemlendiğinde diğer değişimde de bir değişim gözlenmesi beklenir. Bayes Ağları, değişkenlerin düğümler aracılığıyla temsil edildiği ve okların döngüsüz bir biçimde yönlendirildiği diyagramlar olarak tanımlanır. Bayes Ağı yapısında düğümler arasında herhangi bir döngünün olma durumu nedensellik ilişkisinin tespitinde karmaşıklığa neden olacaktır.



Şekil 11. Bayes ağ örneği

Şekil 11’de beş düğümden oluşan bir Bayes Ağı örneklendirilmiştir. A3, A4, A5 düğümleri çocuk düğümlerdir. A1, A4 ve A3’ün; A2, A3’ün; A3 ise A5’nin ebeveyn düğümleridir. A1 ve A2 düğümleri, ebeveyn düğüm olmalarının yanı sıra kök düğüm olarak da tanımlanır. A5 düğümü, hem çocuk düğümü hem de yaprak düğümü olarak tanımlanabilir (Çıkmak, 2020).

Bayes Ağının niceliksel kısmı, ağdaki her bir değişkenin koşullu olasılık dağılımları kullanılarak tanımlanmasıdır (Cenk, 2017; Çıkmak, 2020; İslam vd., 2020). Çocuk düğümlerinin aldığı değerler göz önünde bulundurularak, ebeveyn düğümler üzerinden koşullu olasılıklar hesaplanır ve her düğüm için bir koşullu olasılık tablosu sunulur. Grafikteki düğümler arasındaki ilişkilerin ortaya konulmasında, koşullu olasılık ilişkilerinin belirleyici bir rolü vardır.

Bayes kuramı her bilim dalında başarıyla uygulanmıştır (Gündoğdu, 2016). Bayes Ağları son zamanlarda tıp, finans, doğa bilimleri, psikoloji, hukuk, pazarlama, sosyal bilimler, siber güvenlik, gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bayes Ağları, eksik verilerle başa çıkmak için doğal bir yol sağlar, verileri alan bilgisiyle birleştirmeye olanak tanır ve değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri öğrenmeye yardımcı olur. Ayrıca, sorgulara hızlı yanıtlar verebilir (İslam vd., 2020). Birçok yazar, Bayes Ağları’nın etkin bir şekilde uygulanabilmesi için koşullu olasılıkların uzmanlardan alınacak görüşlerle belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Ha ve Seong, 2004). Çeşitli araştırmalarda, Bayes Ağı modelinin temel unsurlarından biri olan koşullu olasılık değerleri, uzmanlardan oluşan bir ekip tarafından tartışılarak belirlenmiştir ve bu süreç modelin başarısı için kritik bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır (Şakar, 2017; Senol ve Yasli, 2021; Aydın vd., 2024). Karmaşık sistemlerde, konuya dair derinlemesine bilgiye sahip uzmanların analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Altunay ve Yılmaz, 2023). Uzman, belirli bir alanda derinlemesine bilgi ve tecrübeye sahip olup, bu birikimiyle o alandaki sorunların çözümü için gereken teknik ve yöntemleri etkili bir şekilde kullanabilen kişidir (Saralioğlu, 2019). Karmaşık sistemlerin ve belirsizliklerin analiz edilmesinde yaygın olarak tercih edilen bir yöntem olan Bayes Ağları, gözlemsel veriler ile uzman görüşleri gibi çeşitli bilgi kaynaklarını birleştirerek etkin bir şekilde kullanılabilir (Çıkmak, 2020). Bayes Ağlarında yeni bilgi mevcut olduğunda olasılıkların güncelleme yeteneğine sahiptir (İslam vd., 2020). Olasılığın güncellenmesi, yeni bilgiler ışığında modeli yeniden analiz etmek için önemlidir (Çinicioğlu vd., 2013). Böylelikle güvenilirliği yüksek sonuçlar elde etme mümkün olabilmektedir.

2.2.3. Bayes Ağı'nın Oluşturulma Süreci ve Analizi

Bayes Ağ çatısının oluşturulması iki adım bulunmaktadır. İlk adım grafiksel Bayes Ağ yapısının oluşturulması, ardından düğümlerin koşullu olasılık tablolarına veri girişinin yapılması ve sonsal olasılık dağılımların hesaplanmasıdır (Şakar, 2017). Bayes Ağ yapısının inşa edilmesi, sırasıyla gerçekleştirilen beş aşamadan oluşmaktadır (Ogunsanya, 2012, Şakar, 2017; Çıkmak, 2020).

Problemin belirlenmesi; Çalışmanın ilk aşamasıdır ve çalışmanın amacı ışığında problemin tanımlanmasıdır. Bu aşamada çalışmanın sınırları, çevresi, verilerin elde edilme durumları, kapsam dışı durumların tespiti diğer adımların temelini oluşturacaktır (Bromley, 2005; Şakar, 2017; Çıkmak, 2020).

Değişkenlerin (Düğüm) tespiti; Bayes Ağ modelinde kullanılan değişkenlerin tespiti, ağın en zor ve en önemli kısmını oluşturmaktadır. Değişkenlerin tespiti ve nedensel ilişkisi, grafiksel yapının tanımlanmasıdır (Çıkmak, 2020). Problemin nedensel faktörlerin elde edilebilmesi için, konu ile ilgili literatür taraması, raporlar, veri tabanları ve uzman değerlendirmeleri derinlemesine incelenmesi gerekmektedir. Çalışma konusunun karmaşıklığı dikkate alınarak bu düğümlerin hangilerinin Bayes Ağında kullanılacağı belirlenmelidir. Bayes Ağı modelinde düğümler genellikle farklı şekilde ifade edilebilmektedir. Bunlardan ilki sonuç düğümüdür ve direk olarak karşılaşılan problemi ifade etmektedir. Hipotez değişkeni olarak da adlandırılmakta olup hedef düğümüdür. İkicisi gözlemlenebilen bilgi düğümleridir. Bunlar sonuç düğümüne kanıt sunan nedensel değişkenlerdir. Bir diğeri ara düğüm olup koşulu olasılık tablolarının basitleştirilmesi olarak sağlar (Jensen ve Nielsen, 2007). Bayes Ağında sonuç düğümlerinden başlayıp bu düğüme neden olan ana ve ara nedensel faktörlerin belirlenmesi Bayes Ağ yapısının oluşturulmasında kolaylık sağlayacaktır. (Korb ve Nickolson, 2010; Şakar, 2017). Uzman değerlendirmelerin alındığı durumlarda alan uzmanlarının en doğrusunu yapma eğilimi, ağ yapısının pratik olmayan çok sayıda değişken ve bağlantı ekleme istekleri olabilmektedir. Bu durum, ağda gereksiz düğümlerin ve oklarının oluşmasına ve Bayes Ağın çalıştırılmasında önemli zorluklarla karşılaşılmasına yol açabilir (Çıkmak, 2020). Ana amaç problemi en iyi şekilde temsil edecek düğümlerin tespitidir. Düğümlerin belirlemesi aşaması sonrasında düğümün değişkenin durumu olarak ifade edilen değerler belirlenmelidir. Bu değerler, aslında değişkenin "neyi temsil ettiği veya hangi değeri aldığı" sorularının yanıtlarını oluşturur. Bu, uygulayıcının tercihlerine veya düğümün özelliklerine bağlı olarak, niteliksel veya sayısal

değerler alabilir (Şakar, 2017). Düğümlerin fazla durumla belirlenmesi, düğümlerin sayısında olduğu gibi herhangi bir kısıtlama olmasa da koşullu olasılık tabloların oluşturulmasında karmaşık hale getirecektir. (Çıkmak, 2020). Durumlar boolean, düzenli ve integral değerler olmak üzere 3 çeşittir. Boolean değerler ikili değerler alan önermeleri temsil eder. Uygun/uygunsuz veya var/yok değerlendirmeleri örnek verilebilir. Düzenli Değerler; düşük, orta, yüksek gibi değerleri alması durumunda kullanılır. Integral değerler; tecrübe gibi 0-5; 5-10 yıl gibi aralıklarda herhangi bir değer alabilir (Hosseini ve Barker, 2016; Şakar, 2017; Çıkmak, 2020).

Bayes Ağının öğrenilmesi; Bayes Ağlarında olmazsa olmazlardan biri de öğrenme kısmıdır. Parametre öğrenme ve yapısal öğrenme olmak üzere iki ana aşamadan meydana gelmektedir. Yapısal aşama, Bayes Ağının diyagramsal yapısını oluşturmak için uygulanmaktadır. Çok değişkenli veri kümesinden faydalanan döngüsüz yönlü grafiği temsil eder (Dünder, 2013; Yılmaz, 2022). Gerçek veriye uygun olan Bayes Ağı seçimi yapılmalıdır. Ancak veri setindeki değişken sayısına bağlı olarak oldukça fazla ağ yapısı oluşabilmektedir. Bu durum Robinson tarafından 1977 yılında gerçekleştirilen çalışma da açıkça gösterilmiştir. Bayes Ağ sayısı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$f(n) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \frac{n!}{(n-i)!} 2^{i(n-i)} f(n-i) \quad (8)$$

Bu formüle göre düğüm sayısı 4 olma durumunda 543, düğüm sayısı 5 olma durumunda 29281 adet Bayes Ağı yapısı oluşabilmektedir. Düğüm sayısı arttıkça Bayes Ağ sayısı da önemli ölçüde artmaktadır. Bu durumda en iyi Bayes Ağını seçmek zaman alıcı olmaktadır. Kısıtlama tabanlı, skor tabanlı ve karma tabanlı algoritmalar bu işlemleri basitleştirmek için geliştirilmiştir. Bu işlemlerin haricinde uzman bilgisinden faydalanan da Bayes Ağ yapısı oluşturmak mümkündür (Dünder, 2013). Bayes öğrenmenin bir diğer kısmı parametre öğrenmedir. Önsel bilgilerden, verilerden veya bunların kombinasyonlarından modelden elde edilen olasılıkların belirlenme sürecidir. Olasılığa dayalı çıkarım olarak da bilinmekte olup Bayes Ağının nicel kısmıdır (Çıkmak, 2020). Koşullu olasılık tablolarındaki sayısal değerlerin elde edilmesi için kullanılan en yaygın uygulama istatistik bilgilerden elde edilen veriler, uzman görüşü alınması veya bunun kombinasyonu olabilmektedir.

2.2.4. Bayes Ağıının Geçerlilik Analizlerinin Yapılması

Modelin nasıl davrandığını test eden, senaryoların oluşturulabildiği doğrulama kısmıdır. Modelin iyileştirilmesi, yeniden tanımlanması ihtiyacı ortaya çıkabilir. Aksiyon 1-2-3 olmak üzere 3 çeşit analiz gerçekleştirilmektedir (Bayazit ve Kaptan, 2023, Senol ve Yasli, 2021; Aydın vd., 2024).

Aksiyom 1; Her bir arıza kategorisiyle bağlantılı olan ebeveyn düğümlerdeki değişikliklerin, çocuk düğümleri üzerindeki etkisi incelenmesidir. Her ebeveyn düğümün olasılıksal azalma çocuk düğümün olasılık değerin azalmasına, artması da çocuk düğümün olasılık değerinin artması beklenir.

Aksiyom 2; Arıza kategorisiyle bağlantılı ebeveyn düğüm olasılıklarındaki kademeli değişikliklerin, her bir arıza olasılığındaki değişimle tutarlılık gösterip göstermediği test edilmesidir.

Aksiyom 3; Olasılık değişkenlerinin birleşik etkilerinin, ebeveyn düğümlerinin bireysel etkilerinden daha büyük olup olmadığının test edilmesidir.

2.2.5. Bulanık Bayes Ağları

Bayes Ağıının temel parametreleri, ağda ele alınan olayların birbirlerine etkilerini temsil eden olasılık değerleridir. Zadeh (1965) tarafından önerilen bulanık küme teorisinin amacı, karar verme sürecinde dilsel değerleri kullanarak belirsizliği ele almak ve modellemektir. Bulanık mantık insan yargılarında belirsiz dilsel ifadelerin sayısal analizde kabul edilebilir bir şekilde kullanılmasına olanak sağlar. Böylelikle, olayların meydana gelme olasılığına ilişkin istatistiksel verilerin mevcut olmadığı ve konunun karmaşık olma durumlarında uygun stratejiler geliştirmesini sağlar. Risk ve karar analizlerinin vazgeçilmez olduğu birçok alanda bulanık mantık yoluyla uzman yargıları kullanılmıştır (Ren vd., 2007; Tang ve Liu, 2007; Guo vd., 2021; Senol ve Yasli, 2021; Aydın vd., 2024; Bayazit ve Kaptan, 2023).

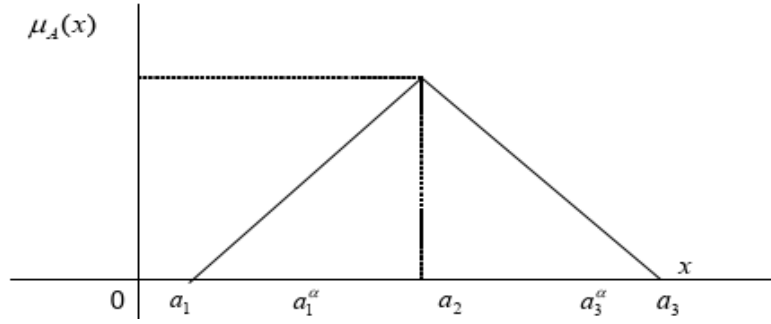
Uzman görüşüne dayalı olasılıkların elde edilmesi; Çalışmalarda, çok sayıda uzman görüşüne yer verilmesi zaman alıcıdır ve görüşler arasındaki çelişkiler çalışmanın tutarlılığını etkileyebilmektedir. Bu sebeple çalışmada 7 uzman belirlenmiştir. Aynı zamanda uzman görüşlerine başvurulacak uzmanlar homojen bir grup oluşturmayabilir. Bu durum uzman görüşlerinde farklılıklara neden olabilmektedir. Bu aşamada seçilen uzmanların eğitim düzeyleri, mesleki nitelikleri ve operasyonel deneyimleri gibi veriler

dikkate alınarak bir ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirilir. Değerlendirmelerdeki çeşitliliği gösterebilmek amacıyla, her uzmana 0 ile 5 arasında farklı bir puan atanır (Aydın vd., 2023; Sarılioğlu, 2019; Kutay ve Kamal, 2022; Hsu ve Chen, 1996). Uzmanların ağırlık puanlarının hesaplanmasında Denklem (9) kullanılabilir (Rajakarunakaran vd., 2015).

$$Uzman ağırlıklandırma faktörü (w_{\mu}) = \frac{Uzmanın ağırlıklandırma puanı}{Tüm uzmanların ağırlandırma puan toplamı} \quad (9)$$

Bulanıklaştırma aşaması; Bulanık üyelik, uzman değerlendirmesindeki belirsizliği 0 ile 1 arasında sayılar olarak temsil etmektedir (Bayazit ve Kaptan, 2023; Aydın vd., 2023;). Düğümlerin bağımlılığı dikkate alındığında, sayısal ölçeklerle kıyasla dilsel terimlerle ilişkiyi değerlendirmek daha kolaydır (Ren vd., 2009; Senol ve Yasli, 2021). Dilsel terimleri bulanık sayılara dönüştürmek için Chen ve Hwang (1992), bulanık verileri sistematik olarak farklı dönüşüm ölçeklerine göre puanlara dönüştürebilen sayısal bir yaklaşım geliştirmiştir. İnsan çalışma belleğinin kapasitesine dair yaygın bir tahmin, yaklaşık olarak yedi ($\pm$ iki) öge olduğudur. Bu durum, bireylerin doğru kararlar verebilmesi için dilsel terimlerin sayısının genellikle 5 ila 9 arasında olması gerektiği anlamına gelir (Huang vd., 2001; Sarılioğlu, 2019; Aydın vd., 2021; Nicolis and Tsuda, 1985). Bulanık üyelik fonksiyonlarını kullanarak belirsiz ve kesin olmayan dilsel terimleri uzman görüşüne göre çözmek için yamuk, üçgen, z-biçimli, sigmoid, s-biçimli, Π üyelik ve Gaussian bulanık fonksiyon çeşitleri bulunmaktadır (Ren vd., 2009; Kamal ve Kutay, 2021). Üçgen üyelik fonksiyonunun matematiksel olarak sade bir yapıya sahip olması uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Bu sebeple çalışmada hesap karmaşıklığını azaltmak amacıyla üçgen üyelik fonksiyonu, olasılık değerlerini belirlemek için kullanılmıştır.

Üçgen bulanık fonksiyon; Üçgen bulanık olasılık değerleri, (a_1, a_2, a_3) gibi değişkenlerden oluşan üçlü bir küme şeklinde ifade edilir. A bulanık sayı kümesi ve $X \in A$ olmak üzere, $\mu_A(X)$ A bulanık sayı kümesinin üyelik fonksiyonudur ve $R \rightarrow [0,1]$ aralındadır. A kümesinin $[a_1, a_3]$ aralığında olduğu düşünülürse $\mu_A(X)$ üyelik fonksiyonu Şekil 12 ve Denklem 10'da gösterildiği gibi hesaplanır. (Chen vd., 2022; Sarılioğlu, 2019; Senol ve Yasli, 2021).



Şekil 12. Üçgensel üyelik fonksiyonu

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ \frac{(x-a_1)}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{(a_3-x)}{a_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x \geq a_3 \end{cases} \quad (10)$$

Çalışmada sonuçların uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini sağlamak için dokuz dilsel terim seçilmiştir. Bulanık sayıların üyelik fonksiyonları ve bunlara karşılık gelen dilsel olasılık ifadeleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Üçgen bulanık sayı değer karşılıkları (Senol ve Yasli, 2021; Chen vd., 2022)

Dilsel Terim	Bulanık Sayılar		
	a_1	a_2	a_3
Çok çok düşük (VVL)	0	0	0.05
Çok düşük (VL)	0.01	0.1	0.20
Düşük (L)	0.05	0.2	0.35
Makul Düşük (ML)	0.2	0.35	0.5
Orta (M)	0.35	0.5	0.65
Makul Yüksek (H)	0.5	0.65	0.8
Yüksek (MH)	0.65	0.8	0.95
Çok yüksek (VH)	0.8	0.9	0.99
Çok Çok yüksek (VVH)	0.95	1	1

Çıkarım; Uzmanlar, sahip oldukları farklı deneyimler ve bilgi birikimleri nedeniyle farklı değerlendirmelerde bulunabilirler. Bu durumda, tüm değerlendirmelerin birleştirilmesi ve ortak bir kanaate varılması önemli bir adımdır. Bu sebeple, ortak bir görüş oluşturulabilmesi için, "M" uzmandan alınan "m" adet nicel veri birleştirilir. Hsu ve Chen (1996), heterojen ve homojen uzman gruplarının görüşlerini birleştirmek için bir algoritma geliştirmiştir. Her bir uzman $E_U(u = 1, 2, 3, \dots, M)$ gibi matematiksel olarak ifade edilmiştir.

Bir kişinin görüşünü, belirli bir çerçeve içinde önceden tanımlanmış dilsel ifadelerle dile getirdiği kabul edilmiştir. Bu durumda, E uzmanı, u ise; M sayıda uzmandan herhangi birini temsil etmektedir. Bu ilkeler doğrultusunda, $\tilde{A}_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13})$ ve $\tilde{A}_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23})$ üçgen bulanık sayı kümesini temsil etmektedir. Ardından, bu iki bulanık sayı kümesi arasındaki benzerlik derecesi, uygun bir benzerlik fonksiyonu aracılığıyla hesaplanabilir (Chen vd., 2022; Rajakarunakaran, 2015; Sarialioğlu, 2019; Yılmaztürk, 2023).

- $\tilde{R1}, \tilde{R2}$: Bir çift uzman görüşü,
 $S_{UV}(\tilde{R1}, \tilde{R2})$: İki farklı uzman görüşünün benzerlik derecesi (anlaşma derecesi),
 $S(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$: İki bulanık sayı kümesi arasındaki benzerlik derecesi,
 $AA(E_u)$: Uzmanların ortalama anlaşma derecesi,
 $RA(E_u)$: Uzmanların değişken anlaşma sayısı,
 $CC(E_u)$: Uzman Konsensus Katsayısı,
 $\tilde{R}_{AG}$: Uzman kararlarının toplam sonucu olarak ifade edilir.

Adım 1: $\tilde{A} = (a_{11}, a_{21}, a_{31})$ ve $\tilde{B} = (b_{11}, b_{21}, b_{31})$ bir çift uzmanın bulanık sayısını ifade eder. $S(\tilde{A}, \tilde{B})$, A ve B uzmanları arasındaki benzerliğin derecesini gösterir ve büyüklüğü onların ne ölçüde anlaştıklarını yansıtır. İki uzmanın yargıları arasındaki benzerlik derecesi;

$$S(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = 1 - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 |a_{1i} - a_{2i}| \quad (11)$$

Adım 2: Denklem 12, M sayıda uzmanın ortalama anlaşma (AA) derecesini hesaplamak için kullanılır.

$$AA(E_u) = \frac{1}{M-1 \sum_{U \neq V}^M S(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)} \quad (12)$$

Adım 3: Denklem 13, M sayıda uzmanın göreceli uyum (RA) derecesini hesaplamak için kullanılır.

$$RA(E_u) = \frac{AA(E_u)}{\sum_{u=1}^M AA(E_u)} \quad (13)$$

Adım 4: Denklem 14 uzmanın fikir birliği (konsensüs) katsayısını (CC) hesaplamak için kullanılır.

$$CC(E_U) = \beta \cdot \omega(E_U) + (1 - \beta) \cdot RA(E_U) \quad (14)$$

β ($0 \leq \beta \leq 1$) önerilen yöntemin gevşeme faktörüdür. $W(E_U)$ 'nin (uzman u'nun ağırlık faktörü) $RA(E_U)$ üzerindeki etkisini ifade eder. $\beta=0$ olduğunda uzmanın ağırlık katkı değeri göz ardı edilir ve uzmanlar arasında homojen bir dağılım mevcut olduğu anlaşılır. $\beta = 1$ olduğunda, uzman ağırlığının anlamlılığıyla aynı derecedeki fikir birliği katsayısına (CC) sahiptir. Çalışmamızda $\beta=0,5$ alınmıştır. Karar verici tarafından β 'ya uygun bir değer verilmesi önemlidir. (Qiao vd., 2020; Zarei vd., 2017; Şakar ve Zorba, 2017; Sarıalioğlu, 2019).

Adım 5: Son olarak Denklem 15 kullanılarak uzmanın toplu görüşü belirlenir.

$$\tilde{R}_{AG} = CC(E_1) \times \tilde{R}_1 + CC(E_2) \times \tilde{R}_2 + \dots + CC(E_M) \times \tilde{R}_M \quad (15)$$

Durulaştırma; Durulaştırma süreci, bulanık mantıkta daha net ve ölçülebilir sonuçlar elde etmek için uygulanır. Bu aşamaya kadar üretilen değerler bulanık sayılardan oluştuğu için durulaştırmaya ihtiyaç duyarlar. Bayes Ağındaki olasılıkları hesaplamak için bulanık sayıların kesin sayılara dönüştürülmesi gerekir (Sarıalioğlu vd., 2020). Literatürde önerilen birçok durulaştırma yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları alanın merkezi, ağırlıklı ortalama yöntemi, en büyük alanın merkezi, toplamaların merkezidir (Ross, 2005). Çalışmada, basitliği ve uygulanabilirliği nedeniyle her bir belirsizliğin bulanık olasılık değerleri, alanın merkezi (CoA) yöntemi kullanılarak hesaplanmakta ve Denklem 16 ve 17'de gösterilmektedir. (Sugeno, 1995).

$$X = \frac{\int \mu_i(X) dx}{\int \mu_i(X)} \quad (16)$$

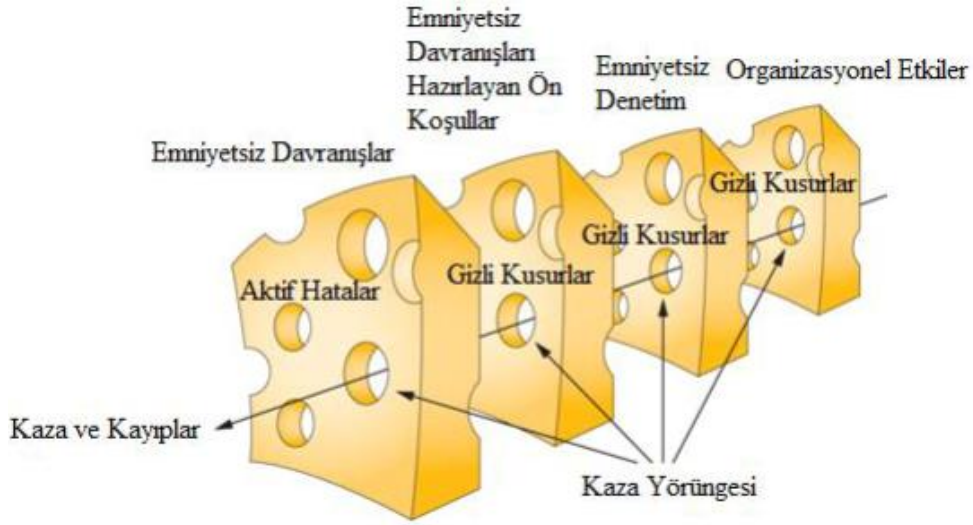
$\tilde{A} = (a_1 + a_2 + a_3)$ üçgen bulanık ifadeler için kullanıldığında Denklem;

$$X = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx} = \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \quad (17)$$

2.2.6. İnsan Faktörü Analiz ve Sınıflandırma Sistemi

İnsan Faktörü Analiz ve Sınıflandırma Sistemi (HFACS), insan hatalarını analiz etmek ve olaylara etki eden etkenleri belirlemek için geliştirilmiş bir analiz yöntemidir (Shappell ve Wiegmann, 2000; Sarılioğlu, 2019). HFACS, İsviçre peyniri modeline dayanmaktadır ve 300'ün üzerinde havacılık kazaları analiz edilerek geliştirilmiştir (Reason, 1990; Shappell ve Wiegmann, 2003). Kazalar, hem aktif hem de gizli hataların bir araya gelmesiyle oluşur. Aktif hatalar, kazaya doğrudan yol açan, genellikle olay anında meydana gelen hatalar veya ihmallerken, gizli hatalar ise daha derinlemesine yerleşmiş olan eksiklikler, uygunsuzluklar veya sistemsel kusurlardır (Reason, 2000). İsviçre peyniri yaklaşımında, organizasyonların başarısızlığa yol açabilecek zayıf noktaları, her bir insan faktörü seviyesi için bir İsviçre peyniri dilimindeki delikler olarak betimlenir. Başlangıçta havacılık sektörü için tasarlanmış olsa da, HFACS, tüm endüstrilere uyarlanabilir ve geliştirilebilir bir yapıya sahiptir. Bu sebeple, kara yolu taşımacılığı, demiryolu, madencilik, kimya, petrol, gaz endüstrisi, denizcilik gibi birçok sektörde geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Kandemir ve Çelik, 2021; Kaptan, 2019).

HFACS'ın temel yapısını oluşturan İsviçre Peynir Modeli, bir olayın veya kazanın meydana gelmesine yol açan faktörleri dört ana kategoriye ayırarak incelemektedir: kurumsal etkiler, emniyetsiz denetim, emniyetsiz eylemleri hazırlayan ön koşullar ve emniyetsiz eylemler. Şekil 13'te görüldüğü gibi, İsviçre Peynir Modeli, kazaların meydana gelmesinde, ilk üç seviyedeki eksikliklerin, dördüncü seviyede yer alan güvensiz davranışları tetikleyen etmenler olduğunu ve bu sürecin sonunda operatörlerin emniyetsiz eylemler gerçekleştirdiğini öne sürer (Sarılioğlu, 2019; Yıldız, 2016; Baber, 2007). Şekil 14'te 4 ana kategori ve 19 alt kategorisi gösterilmektedir.



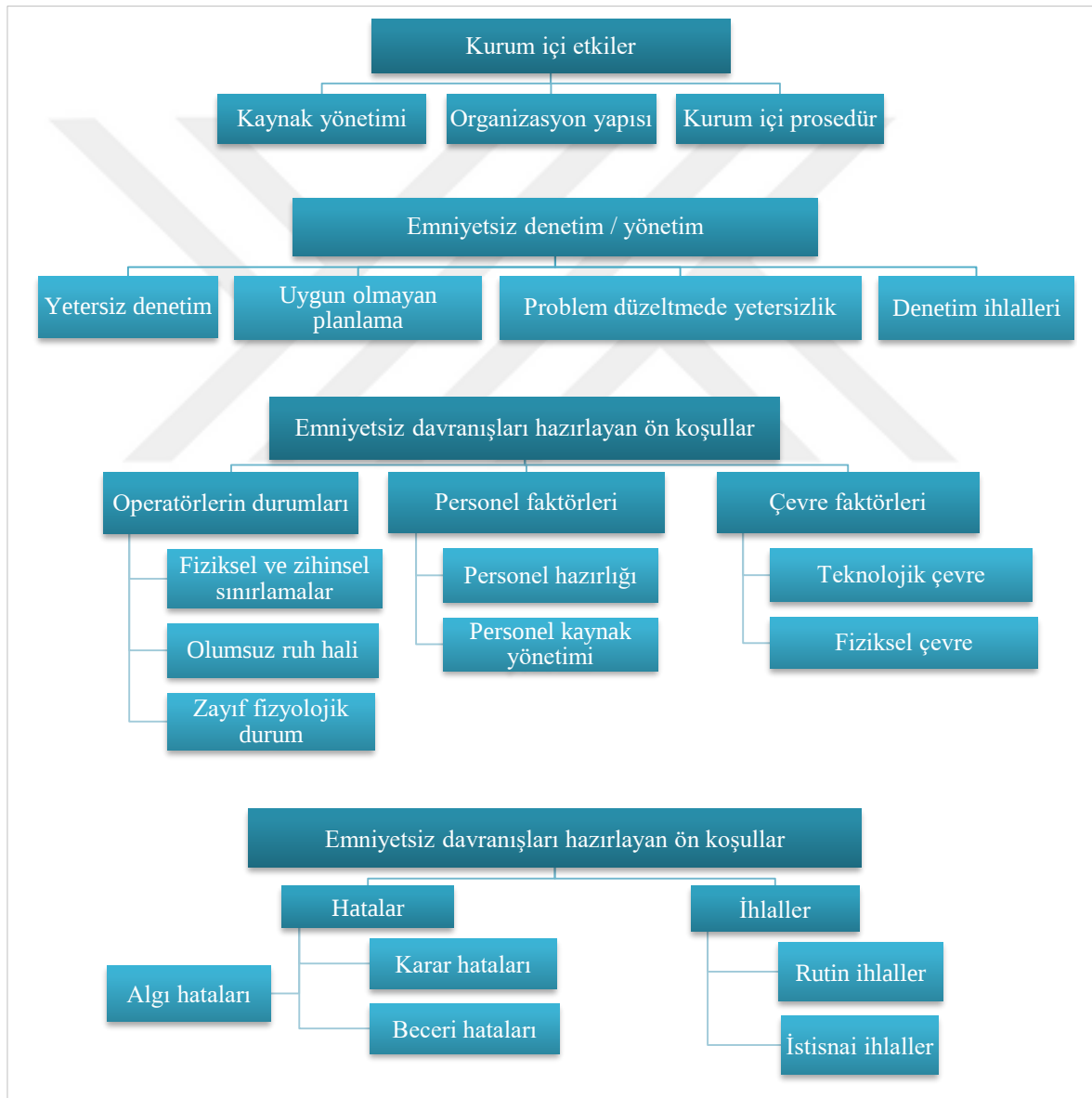
Şekil 13. Reason'un İsviçre Peyniri modeli (Reason, 1990)

HFACS modelinin birinci kategorisi, kurumsal etkilerle ilgili çeşitli değişkenleri kapsamaktadır. Kurumsal iklim, kaynak yönetimi ve kurumsal süreçler olmak üzere üç alt sınıfa ayrılmaktadır. Kaynak yönetimi, insan kaynakları ve ekipman ve tesis kaynağı uygunsuzluklarından oluşmaktadır. İnsan kaynakları, asgari personel donatımı, personel seçimi, ve personel eğitimini kapsar. Ekipman ve tesis kaynakları, yedek parça ve ekipman teminindeki uygunsuzluklar, yetersiz, hatalı, ergonomik olmayan tesis temini gibi durumları içermektedir. Kurumsal iklim, bir kurumun diğer kurumlardan ayıran çalışma atmosferini ifade eder. Kurum yapısı, kurum içi politikalar ve kurum kültürü bu başlık altında değerlendirilir. Kurumsal politikalar alkol ve uyuşturucu kullanımı, fazla mesai ve izinler, işe alma ve işten çıkarma, çalışanların terfi etme gibi kurumun resmi kararlarından oluşur. Kurum kültürü yazılı bir kaynağı olmadan kurumun değerleri, inançları ve geleneklerini kapsar. Kurumsal süreç, organizasyondaki operasyonları yöneten kurumsal alınmış kararları ifade eder ve kurumun kendisinden kaynaklı ihmallerdir.

HFACS ikinci kategorisi emniyetsiz yönetim ile ilişkili değişkenleri kapsamaktadır. Bilinen problemi düzeltmeme, uygun olmayan planlanmış iş, yönetim ihlalleri, yetersiz yönetim olmak üzere 4 alt sınıfta incelenmektedir.

- Uygun olmayan planlanan iş, personelin dinlenme saatleri dikkate almama, yeterliliğe sahip olmayan personeli görevlendirme ve risk analizlerinin yapılmaması gibi durumlarda açığa çıkar.

- Bilinen problemi düzeltmeme, çalışanlar arasında problemi, bakım aletleri veya yedek parçada eksiklik/uygunsuzluğu bilinmesine rağmen önlem alınmaması veya arıza analizi yapılmadan alarmların resetlenmesi süreçlerinde ortaya çıkar.
- Yetersiz denetim başmühendis emrinin kabul görmemesi, uygulanmaması gibi emir komuta zincirinde yetersizlik kaynaklıdır.
- Denetim ihlali ise başmühendisin kurallar ve düzenlemelerin bilerek dikkate almaması veya uygulamaması durumlarını ifade eder.



Şekil 14. HFACS yapısı

HFACS üçüncü kategorisi emniyetsiz davranışların ön koşulları olarak ifade edilen personelin durumu, personel faktörü ve çevresel faktörlerdir.

- Personel durumu, olumsuz zihinsel ve fiziksel kısıtlamalar olup kişinin performansını etkileyen stres, fiziksel yorgunluk, mental yorgunluk, uykusuzluk, alkol ve ilaç kullanımı gibi faktörlerden kaynaklı aşırı güven duygusu, kontrolsüz davranışlar, durumsal farkındalığın eksilmesi olarak değerlendirilebilir.
- Personel faktörü personel kaynak yönetimi ve kişisel hazırlık olmak üzere iki sınıfta değerlendirilmektedir. Kişinin yeterli dinlenmemesi, yapacağı iş ile ilgili yeterli eğitimin almaması, kişinin hazır bulunuşluğu, personelin iletişimi, koordine edilmesi, ekip iletişimi, liderlik gibi durumlarda yaşanan yetersizlik ve eksiklikler personel kaynak yönetimi uygunsuzlukları olduğu söylenebilir.
- Çevresel faktörler makine personelin standartlarını etkileyebilir. Fiziksel çevre ve teknolojik çevre olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Makine dairesinin yerleşim düzeni, sıcaklık, gürültü ve hava koşulları gibi makine dairesi çalışma ortamı fiziksel çevre başlığı altında değerlendirilir. Ana makine kontrol sistemi, alarmlar, sensörler ise teknolojik çevre kategorisi kapsamındadır.

HFACS dördüncü kategorisi, Emniyetsiz Davranışlar, makine dairesi personeli tarafından ana makine bakım veya ana makine operasyonları esnasında direk uygunsuzluğa neden olan davranışlardır. Hatalar ve ihlaller olmak üzere iki alt sınıfa bunlarda kendi içinde 5 alt kategoriye ayrılmıştır.

- Hatalar, kasıtsız yapılan eylemlerdir. Algı hataları, beceri hataları, karar hataları olmak üzere 3 alt kategoride incelenmektedir.
- Karar hataları, bakım esnasında uygulanan yöntem veya arıza tespiti adımlarının uygunsuz veya yetersiz olması nedeniyle oluşmaktadır. Kişi yanlış bir karar verse de bu durum genellikle affedilebilir hatalardır ve bilgi yetersizliği veya hatalı bir seçim yapmasından kaynaklı oluşmaktadır.
- Beceri hataları, filtre değişimi, yakıt transferlerinin yapılması, jeneratörlerin paralele alınması, pompaları yedeklenmesi gibi genellikle dış uyaranlara gerek kalmadan ve düşünülmeden yapılan hareketlerdir. Refleksif hareketlerimizle gerçekleşen davranışlar, genellikle dikkat dağınıklığı ve zihinsel sınırlamalardan büyük ölçüde etkilenir, bu da onları daha da karmaşık hale getirir. Hafıza kaynaklı uygunsuzluklarda bu tür hataları tetikleyebilmektedir. Kontrol listesindeki bir

adımın atlanması veya unutulması gibi hafıza kaynaklı hatalara örnek verilebilir. Tecrübe bu aşamada kritik rol oynamaktadır.

- Algı hataları, dışarıdan gelen uyarıcıların azalma veya değişme olması durumunda gerçekleşebilmektedir. Çevresel uygunsuzluktan kaynaklı duyuşal girdiler azaldığında ve bu girdilerin yanlış yorumlanması sonucu meydana gelmektedir. Teknolojik çevre altında değerlendirebileceğimiz alarm sisteminin aktif olmaması veya ölçüm aletlerinin kalibre edilmemesi nedeniyle ölçümün yanlış yorumlanması gibi durumlarda karşımıza çıkabilmektedir.
- İhlaller, nedenlerine bakıldığında rutin ve istisnai ihlal olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Rutin ihlaller yöneticilerin göz ardı etmesi nedeniyle alışkanlık haline gelen durumlardır. Kural ve prosedürlerin uyulmaması örnek verilebilir. Kuralların delinmesi olarak da ifade edilen rutin ihlaller emme mahali temizliğinin seyirde olunması nedeniyle yapılmaması örnek verilebilir. İstisnai ihlaller ise yöneticiler ve yetkili otorite tarafından onaylanmayan, affedilmeyen durumlardır. Bireyin kendine güveni nedeniyle bilinçli olarak kural ve prosedürlerin ihlal edilmesi gibi durumlardır. Ana makinenin soğuması beklemeden karter kapaklarının açılması bu tür ihlallere örnek verilebilir.

2.2.7. Bayes Ağ Modelin Niteliksel Kısımının Oluşturulması

Düğümelerin (Değişkenlerin) belirlenmesi; Niteliksel süreç Bayes Ağ modelinin düğümlerinin ve düğümler arasındaki nedensel ilişkinin belirlenmesiyle grafiksel ağ yapısının oluşturulmasıdır. Çalışmada; ATSB, NTSB, MAIB, GISIS, JTSB gibi kaza veri tabanlarından 2000-2024 tarihleri arasında gerçekleşen toplam 89 adet ana makine kaynaklı kaza verisi elde edilebilmiştir. Tablo 4, elde edilen kaza verilerinin veri tabanlarına göre dağılımını göstermektedir. Bu bağlamda çalışmanın niteliksel kısmı yazın taraması, kaza raporları, denizcilik firmaları raporları ve konunun uzmanlarıyla derinlemesine gerçekleştirilen görüşmeler neticesinde son halini almıştır. Arıza nedenlerin sayısının fazla olması ve bunların uzmanlar tarafından değerlendirilmesinde yaşanacak zorluklar nedeniyle değişkenlerde benzerlik gösterenler tek başlık altında birleştirilmiş veya kategorilendirilmiştir.

Nitel modelin oluşturulmasının ilk adımı değişkenlerin tespitidir ve problemin tanımlanması ve sınırlarının belirlenmesi ile başlamaktadır. Değişkenlerin belirlenmesi

aşamasında hedef düğüm yani sonuç düğümünden başlanarak genelden özele gidilmesi kolaylık sağlamaktadır (Şakar, 2017). Bu sebeple, gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar, bir geminin güç kaybı veya güç düşüşü çatısı altında değerlendirilmiştir. Bir ana makine de güç kaybı veya güç düşüşü ana makinenin otomasyon sistemi tarafından kontrol altına alınmıştır. Makinenin çalışma koşulları etkileyen değer, makine kullanım kılavuzunda belirtilen değer altında veya üstünde olma durumunda önce alarm verip makine personelinin uyaracaktır. Arızanın veya anormal durumun giderilmeme durumunda önce güç düşüşü yaşanacak ardından makine kendini korumak amacıyla tamamen durduracaktır. Ana makinenin hangi durumlarda alarm, güç düşüşü veya güç kaybı yaşayacağı Uluslararası Klaslama Kuruluşları Birliği (IACS) tarafından minimum standartları belirlenmiş bazı durumlar makine üretici firmanın tavsiyesi niteliğinde olup müşterinin tercihi bırakılmıştır. Bu sebeple ana makine üretici firma ve hatta model farklılıkları durumunda bile değişkenlik gösterebilmektedir. Bu sebeple çalışmada MAN B&W 6S50MC-C makine bilgileri dikkate alınmış, makine özellikleri ve alarm limit değerleri Tablo 5-6’da gösterilmiştir. Ana makinede güç düşüşüne ve güç kaybına neden olan güvenlik gereksinimleri Tablo 7-8’te gösterildiği gibidir. Çalışmada kullanılan değişkenler ve tanımları Tablo 9’da, Bayes Ağının grafiksel gösterimi Şekil 15’te gösterildiği gibidir.

Tablo 4. Kaza veri tabanlarından elde edilen ana makine kaynaklı kazalar

Veri taban adı	Ana makine kaynaklı kaza sayısı
Ulaştırma Emniyet Bürosu (ATSB)	14
Küresel Bütünleşik Taşımacılık Bilgi Sistemi (GISIS)	3
Deniz Kazaları Araştırma Ofisi (MAIB)	12
Ulaştırma Emniyet Dairesi (JTSA)	3
Deniz Kazaları İnceleme Kurulu (DMAIB)	1
Denizde Emniyet Araştırma Birimi (MSIU)	5
Ulusal Ulaşım Güvenlik Kurulu (NTSB)	14
Kaza Araştırma ve İnceleme Kurulu (KAIK)	1
DNV Raporu	6
Hollanda Güvenlik Kurulu (DSB)	1
Denizcilerin Uyarı ve Raporlama Sistemi (MARS)	29
Toplam	89

Tablo 5. MAN B&W 6S50MC-C makine bilgileri

Veri Açıklaması	Değer
Makine türü	İki zamanlı, direkt enjeksiyonlu
Silindir Sayısı	6, Sıralı
Silindir Çapı	500 mm
Strok	2000 mm
Ateşleme sırası	1-5-3-4-2-6
Maksimum sürekli güç (MCR)	9480 kW
Maksimum sürekli güç makine devri	127 rpm
Maksimum sürekli güç piston hızı	8,47 m/s
Maksimum ortalama efektif basınç	19 bar
Maksimum yanma basıncı	150 bar
Spesifik yakıt tüketimi	171 g/kWh, %100 yükte
Sıkıştırma oranı	17,2

Tablo 6. MAN B&W 6S50MC-C limit değerleri

Açıklama	Alarm limit değeri	Güç düşüşü limit değeri	Güç kaybı limit değeri
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı	85 C°	90 C°	-
Soğutma suyu giriş basıncı	2 bar	1,5 bar	1,0 bar
Egzoz gaz sıcaklığı	430 C°	450 C°	-
Egzoz gaz sıcaklık sapması	Egzoz gaz sıcaklık ortalaması ± 50 C°		
Emme mahal sıcaklık	55 C°	65 C°	-
Emme mahal sıcaklık (Yangın için)	80 C°	120 C°	-
Ana yağlama yağı giriş sıcaklığı	Düşük alarm: 35 C° Yüksek alarm: 55 C°	60 C°	-
Turboşarj yağ çıkış sıcaklığı	95 C°	110 C°	-
Piston soğutma yağ çıkış sıcaklığı	70 C°	75 C°	-
Ana yağlama yağı giriş basıncı	1,6 bar	1,4 bar	1,2 bar
Turboşarj yağlama yağı giriş basıncı	1,0 bar	0,9 bar	-
Yakıt giriş basıncı	Düşük basınç alarmı: 6,5 bar		
Srast yatak ped sıcaklığı	75 C°	80 C°	90 C°
Turboşarj egzoz giriş sıcaklığı	Maksimum 500 C°		
Overspeed	137,9 rpm		
Eksenel vibrasyon	2,51 mm/s	3,13 mm/s	-
Turboşarj devri	Maksimum 16000 rpm		
Silindir yağı giriş basıncı	Düşük basınç alarmı: 35 bar Yüksek basınç alarmı: 60 bar		
Silindir yağı sıcaklığı	Yüksek sıcaklık alarmı: 70 C°		
Hava kuleri soğutma suyu basıncı (Geleneksel soğutma için)	Düşük basınç alarmı: 1 bar Yüksek basınç alarmı: 3,5 bar		
Hava kuleri soğutma suyu basıncı (Merkezi soğutma için)	Düşük basınç alarmı: 1 bar Yüksek basınç alarmı: 5,5 bar		
Hava kuleri soğutma suyu sıcaklığı (Geleneksel ve merkezi soğutma için)	Yüksek sıcaklık alarmı: 40 C°		
İlk hareket havası	Düşük basınç alarmı: 15 bar		
Kontrol hava basıncı	Düşük basınç alarmı: 5,5 bar		
Turboşarj sonrası egzoz gaz sıcaklığı	Yüksek sıcaklık alarmı: 350 C°		

Tablo 7. Güç düşüş gereksinimleri

ABS	BV	CCS	DNV	GL	KR	LR	NK	RINA	RS	IACS	MAN	Sensör ve fonksiyonu	Güç düşüş tanımı
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	TE 8106 YH	Srast yatak ped sıcaklığı
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	PT 8108 YL	Ana makine yağ giriş basıncı
-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	TE 8112 YH	Ana makine yağ giriş sıcaklığı
+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	TE 8113 YH	Piston soğutma yağ çıkış sıcaklığı / silindir
+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	FS 8114 YL	Piston soğutma yağ çıkış akış ölçeri
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	TE 8123 YH	Ana yatak yağ çıkış sıcaklığı
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	XC 8126 YH	Yatak aşınması (K98MC6/7 ve tüm MC-C)
+	△	△	+	-	+	△	+	+	+	+	+	PT 8401 YL	Soğutma suyu giriş basıncı
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	PDT 8403 YL	Soğutma suyu basınç farkı
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	TE 8408 YH	Soğutma suyu çıkış sıcaklığı
-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	TE 8609 YH	Emme mahali sıcaklığı
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	TE 8610 YH	Emme mahal sıcaklığı (Yangın alarmı için)
-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	TC 8701 YH	Turboşarj öncesi egzoz gaz sıcaklığı
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	TC 8702 YH	Egzoz valf sonrası egzoz gaz sıcaklığı
-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	TC 8702 YH	Egzoz valf sonrası egzoz gaz sıcaklık sapması
+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	WT 8812 YH	Eksenel vibrasyon monitörü
+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	XS 8813 YH	Karter yağ sis yoğunluğu / silindir
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	XS/XT 8817 Y	Turboşarj aşırı hız

△ : Alternatiflerden biri tercih edilebilir. △ : Alternatif olarak düşük akış alarmı tercih edilebilir. +* : Alternatif olarak güç kayıp alarmı tercih edilebilir.

Tablo 8. Güç kaybı gereksinimleri

ABS	BV	CCS	DNV	GL	KR	NK	RINA	RS	IACS	MAN	Sensör ve fonksiyonu	Güç kaybı tanımı
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	PS/PT 8109 Z	Ana makine ve srast yatak yağ giriş basıncı
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	ZT 4020 Z	Ana makine aşırı hız
-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	TE/TS 8107 Z	Srast yatak ped sıcaklığı
-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	PS/PT 8402 Z	Soğutma suyu basıncı
-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	XS 8813 Z	Karter yağ sis yoğunluğu / silindir

△ : Alternatiflerden biri tercih edilebilir. △ : Alternatif olarak düşük akış alarmı tercih edilebilir. +* : Alternatif olarak güç düşüş alarmı tercih edilebilir.

Tablo 9. Değişkenlerin tanımlanması

Düğüm adı	Ebeveyn düğüm	Çocuk düğüm	Açıklama
• Eğitim ve aşinalık (ana ve yardımcı makinelere)	-	• Uygunsuz personel donatımı • Uygunsuz olarak planlanmış operasyon • Yetersiz denetim • Test ve kontroller	• Şirket içi eğitim eksikliği • Gemi içi eğitim eksikliği (oryantasyon) • Acil durum eğitimleri
• Şirket personel donatım kriteri	-	• Uygunsuz personel donatımı	• Minimum adam donatma • Personel değişimindeki kritik personel değişim sayısı
• Ekipman ve yedek parça temini	-	• Makine kullanım kılavuz/bakım aparat uygunsuzluğu • Yedek parça uygunsuzluğu	• Ekipman ve donanımların uygunsuz olma durumu • Ekipman ve donanımların eksik olma durumu • Orijinal olmayan yedek parça temini • Onarılmış yedek parça temini

Tablo 9'un devamı

• Prosedür	-	• Test ve kontroller • Uygunsuz olarak planlanmış operasyon	• ISM • PMS • Başmühendis talimatlar • Şirket talimatlar • Ana makine kullanım kılavuzları • SMS • Servis mektupları • Çalıştırma talimatları • Bakım talimatları • Uyuşturucu alkol politikası • Yetki dağılımı
• Yetersiz denetim	• Eğitim ve aşinalık	• Uygunsuz olarak planlanmış operasyon • Test ve kontroller • Makine dairesi personel yönetimi	• Başmühendis otorite eksikliği • Periyodik muayeneler yapılmama veya yanlış yapılma durumu • Görsel kontrollerdeki eksiklik • Operasyonun planlanmasındaki uygunsuzluk
• Uygunsuz personel donatımı	• Eğitim ve aşinalık • Şirket personel donatım kriterleri	• Makine personel hazır olma durumu • Makine dairesi personel yönetimi	• Personelin eğitim veya tecrübe eksikliği • Yetersiz personel sayısı
• Uygunsuz personel donatımı	• Eğitim ve aşinalık • Şirket personel donatım kriterleri	• Makine personel hazır olma durumu • Makine dairesi personel yönetimi	• Personelin eğitim veya tecrübe eksikliği • Yetersiz personel sayısı
• Uygunsuz personel donatımı	• Eğitim ve aşinalık • Şirket personel donatım kriterleri	• Makine personel hazır olma durumu • Makine dairesi personel yönetimi	• Personelin eğitim veya tecrübe eksikliği • Yetersiz personel sayısı
• Uygunsuz planlanan operasyon	• Prosedür • Yetersiz denetim • Eğitim ve aşinalık	• Hata • İhlal	• Arıza tespitinde hata • Risk değerlendirme eksikliği • Vardiya sistemindeki uygunsuzluklar • Dinlenme saatlerinde yapılan uygunsuzluklar • Kritik ekipman ve operasyon için deneyimsiz personel görevlendirme • Prosedürleri takip edilmemesi
• Test ve kontroller	• Prosedür • Yetersiz denetim • Eğitim ve aşinalık	• Makine dairesi teknolojik çevre	• İlgili ekipman bakım prosedür eksikliği • Test ve kontroller için prosedür hatası • PMS sistemindeki eksiklik • Test ve kontrol denetim eksikliği • Personel eğitim ve tecrübe durumu • Kalibrasyon yapılmama durumu • Test ve kontrollerin yapılmama veya eksik, yetersiz yapılma durumu • Makine parametre kayıtlarının tutulmaması

Tablo 9'un devamı

• Makine dairesi fiziksel çevre	• Sıcaklık • Gürültü • Hava koşulları • Makine dairesi yerleşim düzeni	• Makine personeli göreve hazır olma durumu	• Makine dairesi yerleşim ve düzeninin ergonomik olmama durumu • Hava koşullarının uygun olmama durumu • Gürültülü çalışma ortamı • Yüksek veya düşük sıcaklık çalışma ortamı
• Makine dairesi teknolojik çevre	• Test ve kontroller	• Hata • İhlal	• Sensör arızaları • Gösterge arızaları • Kart arızaları • Kablo kopuklukları • Alarmların iptal edilmesi • PMS sisteminin çalışmaması • Ölçüm aletlerinin kalibrasyonlarının durumu
• Makine dairesi personeli göreve hazır olma	• Uygunsuz personel donatımı • Makine dairesi fiziksel çevre • Personel zihinsel durum	• Hata • İhlal	• Personel fiziksel-zihinsel sıkıntılar (yorgunluk-dikkatsizlik-alkol-uykusuzluk-aşırı güven ve rahatlık-stress-hastalık-ilaç kullanımı-aşırı iş yükü-başka iş ile meşguliyet) • Makine dairesi çalışma ortamındaki uygunsuzluklar (sıcaklık-titreşim-ergonomik olmama durumu-gemi hareketi) • Personelin gemiye aşına olmaması • Personelin göreve hazır bulunuşluk eksikliği • Arızaya duyarsızlaşma
• Makine dairesi personel yönetimi	• Yetersiz denetim • Uygunsuz personel donatımı	• Hata • İhlal	• Personel yönetme/yönlendirme eksikliği • Operasyon yönetme hatası • Makine dairesi personel arası iletişim-koordinasyon eksikliği • Ekip ruhu
• Hata	• Makine dairesi teknolojik çevre • Makine dairesi personel yönetimi • Makine dairesi personeli göreve hazır olma • Uygunsuz olarak planlanmış operasyon	• Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk	• Personelin arızayı algılayamama durumu • Arıza yer tespitinde hata • Görsel kontrollerde arıza tespitini yapamama • Ana makine ekipman ve donanımları sökme ve montaj esnasında yapılan hatalar • Bakım alet ve ekipmanlarının kullanımındaki hatalar • Ölçüm alet ve ekipmanlarının kullanımındaki hatalar • Makine kullanım kılavuzu yorumlama hataları • Bakım alet ve ekipmanları unutma • Alınan ölçümlerin yanlış yorumlama • Kasıtsız ancak yetersiz bakım • Ana makine verilerini yanlış yorumlama • Yardımcı makine verilerini yanlış yorumlama • Operasyonel hatalar

Tablo 9'un devamı

• İhlal	• Makine dairesi teknolojik çevre • Makine dairesi personel yönetimi • Makine dairesi personeli göreve hazır olma • Uygunsuz olarak planlanmış operasyon	• Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk	• İlgili prosedürün ihlal edilmesi
• Makine kullanım kılavuz/bakım aparat uygunsuzluğu	• Ekipman ve yedek parça temini • Üretici eksiklikleri • Uygunsuz kıyı hizmetleri	• Bakım uygunsuzluğu	• Bakım aparatların eksik veya uygunsuz olması • Makine kullanım kılavuzu karmaşık, eksik veya olmama durumu
• Yedek parça uygunsuzluğu	• Ekipman ve yedek parça temini • Üretici eksiklikleri • Uygunsuz kıyı hizmetleri	• Bakım uygunsuzluğu	• Yedek parçanın olmama durumu • Orjinal yedek parça kullanılmama durumu • Kullanılmış yedek parça kullanımı • Yedek parçanın liman kaynaklı gemiye ulaştırılmaması • Yedek parça talebinin yapılmaması • Yedek parça talebinin yanlış yapılması
• Üretici eksiklikleri	-	• Makine kullanım kılavuz/bakım aparat uygunsuzluğu • Yedek parça uygunsuzluğu	• Üretici firma kaynaklı gemiye ulaştırılmama durumu
• Uygunsuz kıyı hizmetleri	-	• Makine kullanım kılavuz/bakım aparat uygunsuzluğu • Yedek parça uygunsuzluğu	• Liman kaynaklı gemiye ulaştırılmaması
• Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk	• Hata • İhlal	• Bakım uygunsuzluğu • İşletme uygunsuzluğu	• Bakım ve operasyonlarda makine personelinin hata ve ihlalleri
• Kısıtlı zaman	• Seyir planlaması • Hava koşulları	• Bakım uygunsuzluğu	• Bakım için yeterli sürenin olmaması ve bakımın yapılmama durumu • Bakım için yeterli sürenin olmama nedeniyle bakımda acele edilmesi • Bakımın kısıtlı zaman nedeniyle eksik yapılması
• Makine dairesi yerleşimi ve düzeni	-	• Makine dairesi fiziksel çevre	• Makine dairesi yerleşimin bakım / operasyon için ergonomik olmama durumu
• Gürültü	-	• Makine dairesi fiziksel çevre	• Makine dairesinin gürültülü olması
• Sıcaklık	-	• Makine dairesi fiziksel çevre	• Makine dairesinin sıcak olması
• Hava koşulları	-	• Kısıtlı zaman • Aşırı yükte çalışması • Düşük yükte çalışması • Vibrasyon	• Gemi hareketini olumsuz etkileyen hava koşulları
• Seyir planlaması	-	• Kısıtlı zaman • Aşırı yükte çalışması • Düşük yükte çalışması	• Kısa liman bekleme süresi • Hazır olda bekleme • Kurum talebi
• Makine yaşı	-	• Ana makine yapısal uygunsuzluk	• Makinenin çalışma saati-makine yaşı

Tablo 9'un devamı

• Dizayn hatası	-	• Ana makine yapısal uygunsuzluk	• Makine ekipman, donanım parçalarında ve devrelerinde yapılan üretici hataları • Üretici firma telebine uygun donatılmama durumu
• Bakım uygunsuzluğu	• Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk • Makine kullanım kılavuz / bakım aparat uygunsuzluğu • Yedek parça uygunsuzluğu • Kısıtlı zaman	• Ana makine yapısal uygunsuzlukana makine akışkan uygunsuzluğu	• Bakımın yanlış yapılma durumu • Bakımın yapılmama durumu • Bakımın eksik yapılma durumu
• İşletme hataları	• Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk	• Ana makine akışkan uygunsuzluğu • Ana makine çalışma koşullarındaki uygunsuzluk	• Makine çalışma koşullarını etkileyen operasyonel hataları • Makine manevra hazırlama süreci • Yardımcı donanımların (pompa, fan) yedeklenmemesi • Yardımcı donanımların manuelde bırakılması
• Akışkan karakteristiği	-	• Ana makine akışkan uygunsuzluğu	• Makine kullanım kılavuzunda göre akışkan talep edilmeme durumu • Akışkana özgü sorunlar • Yanlış akışkan kullanıma durumu
• Aşırı yükte çalışması	• Seyir planlaması • Hava koşulları	• Ana makine çalışma koşullarındaki uygunsuzluk	• Makinenin hava koşulları nedeniyle aşırı yükte çalışması • Seyir planlaması (yük anlaşması, korsan bölgesi vb.)
• Düşük yükte çalışması	• Seyir planlaması • Hava koşulları	• Ana makine çalışma koşullarındaki uygunsuzluk	• Makinenin kötü hava koşulları nedeniyle düşük yükte çalışması • Kurum talebi (slow steam, yük anlaşması, korsan bölgesi vb.)
• Gemi titreşimi	• Hava koşulları	• Ana makine çalışma koşulları	• Hava koşulları kaynaklı titreşim
• Ana makine yapısal uygunsuzluk	• Makine yaşı • Dizayn hatası • Bakım uygunsuzluğu • Ana makine akışkan uygunsuzluğu	• Kontrol sistemi arızalar • Soğutma suyu sıcaklığı • Soğutma suyu basıncı • Egzoz gaz sıcaklığı • Egzoz gaz sıcaklık sapması • Emme hava sıcaklığı • Yağ basıncı • Yağ sıcaklığı • Silindir yağ debisi • Piston soğutma yağ debisi • Tc devri • Srast yatak sıcaklığı • Eksenel vibrasyon • Ana makine devri • Yağ sis dedektörü • Yakıt beslemesi	• Ana makinenin mekaniksel donanımlarındaki arızalar (türbin parçalanması, segman kırılması, yatak aşınması, silindir gömlek aşınması vb.)

Tablo 9'un devamı

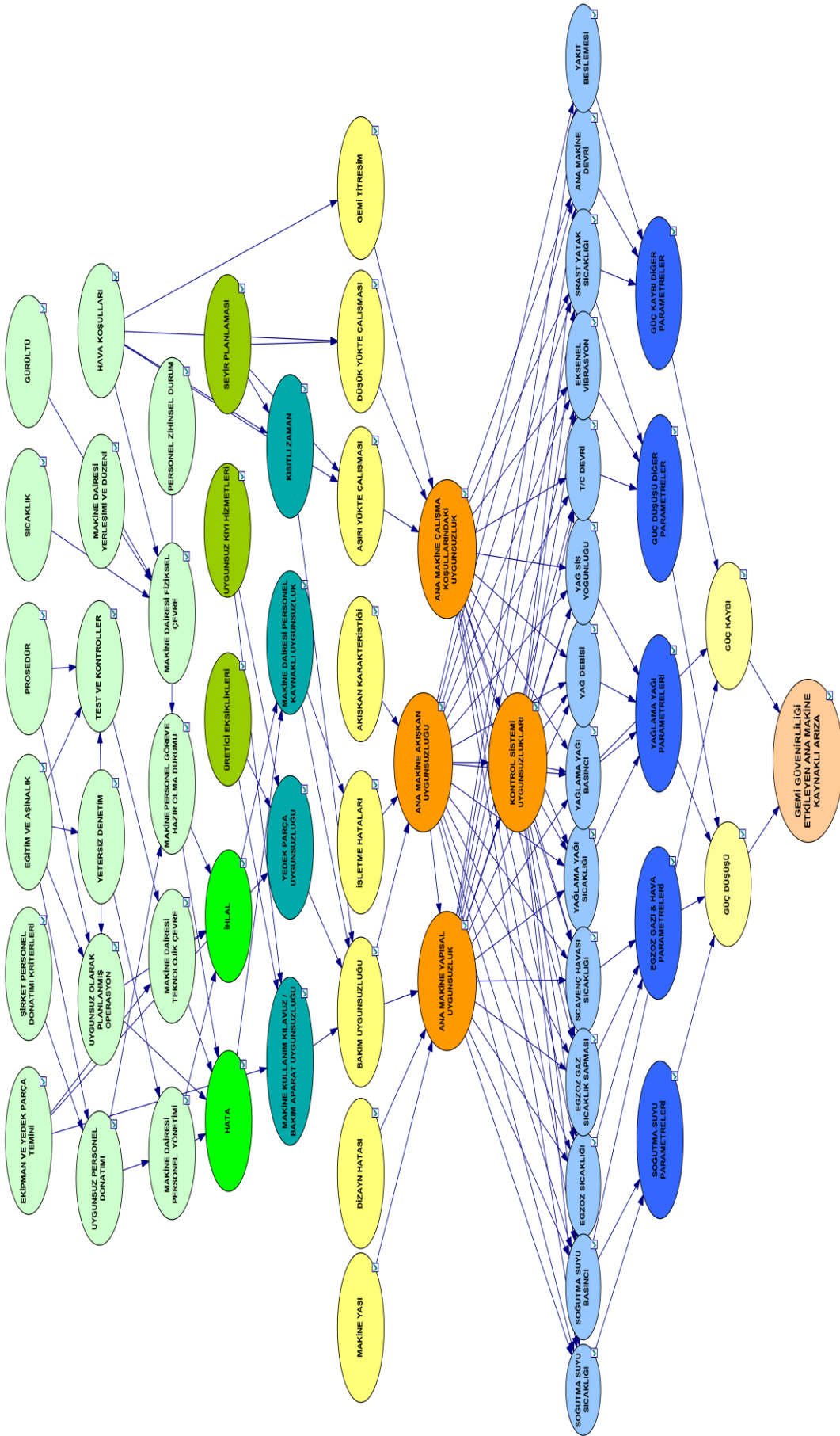
Ana makine akışkan uygunsuzluğu	- Bakım uygunsuzluğu - İşletme hataları - Akışkan karakteristiği	- Kontrol sistemi arızalar - Soğutma suyu sıcaklığı - Soğutma suyu basıncı - Egzoz gaz sıcaklığı - Egzoz gaz sıcaklık sapması - Emme hava sıcaklığı - Yağ basıncı - Yağ sıcaklığı - Silindir yağ debisi - Piston soğutma yağ debisi - T/C devri - Srast yatak sıcaklığı - Eksenel vibrasyon - Ana makine devri - Yağ sis dedektörü - Yakıt beslemesi	- Yağlama yağı, hava sistemi, yakıt, soğutma suyu ıslahında yapılan uygunsuzluklar - Uygun akışkan kullanılmama durumu
Ana makine çalışma koşulları	- Aşırı yükte çalışması - Düşük yükte çalışması - Gemi titreşim - İşletme hataları	- Kontrol sistemi arızalar - Soğutma suyu sıcaklığı - Soğutma suyu basıncı - Egzoz gaz sıcaklığı - Egzoz gaz sıcaklık sapması - Emme hava sıcaklığı - Yağ sıcaklığı - Silindir yağ debisi - Piston soğutma yağ debisi - T/C devri - Srast yatak sıcaklığı - Eksenel vibrasyon - Ana makine devri - Yağ sis dedektör	Ana makinenin aşırı yükte, düşük yükte ve titreşim altında çalışması
Kontrol sistemi arızaları	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları	- Soğutma suyu sıcaklığı - Soğutma suyu basıncı - Egzoz gaz sıcaklığı - Egzoz gaz sıcaklık sapması - Emme havası sıcaklığı - Yağ basıncı - Yağ sıcaklığı - Silindir yağ debisi - Piston soğutma yağ debisi - Tc devri - Srast yatak sıcaklığı - Eksenel vibrasyon - Ana makine devri - Yağ sis dedektör	- Kart arızaları - Sensör arızaları - Kablo bağlantı kopuklukları - Tıkanıklık - Kirletici içerik (yağ, nem vb.)
Soğutma suyu sıcaklığı	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	Soğutma suyu parametreleri	Soğutma su çıkış sıcaklığının yüksek olması
Soğutma suyu basıncı	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	- Soğutma suyu parametreleri - Güç kaybı	Soğutma su basıncının düşük olması

Tablo 9'un devamı

• Egzoz gaz sıcaklığı	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	• Egzoz gazı&hava parametreleri	• Egzoz gaz sıcaklığının yüksek olması
• Egzoz gaz sıcaklık sapması	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	• Egzoz gazı&hava parametreleri	• Silindirler arası egzoz gaz sıcaklık sapmasının yüksek olması
• Emme havası sıcaklığı	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	• Egzoz gazı&hava parametreleri	• Emme havası sıcaklığının yüksek olması
• Yağ basıncı	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Kontrol sistemi arızaları	- Yağlama yağı parametreleri - Güç kaybı	- Ana makine yağlama yağı giriş basıncının düşük olması - T/c yağlama yağı giriş basıncının düşük olması
• Yağ sıcaklığı	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	• Yağlama yağı parametreleri	- Yağlama yağı giriş sıcaklığı yüksek olması - Ana makine yağlama yağı çıkış sıcaklığı yüksek olması (ana yataklar) - Piston soğutma yağlama yağ dönüş sıcaklığı yüksek olması - T/C yağlama yağ çıkış sıcaklığı - Thrust yağlama yağı çıkış sıcaklığı
• Yağ debisi	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	• Yağlama yağı parametreleri	- Piston soğutma yağlama yağ debisi düşük olması - Silindir yağlama yağ debisi düşük olması
• Yağ sis yoğunluğu	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	• Yağlama yağı parametreleri	• Karter yağ yoğunluğunun yüksek olması
• T/C devri	- Ana makine yapısal uygunsuzluk - Ana makine akışkan uygunsuzluğu - Ana makine çalışma koşulları - Kontrol sistemi arızaları	• Güç düşüşü diğer parametreler	• T/C devrinin yüksek olması

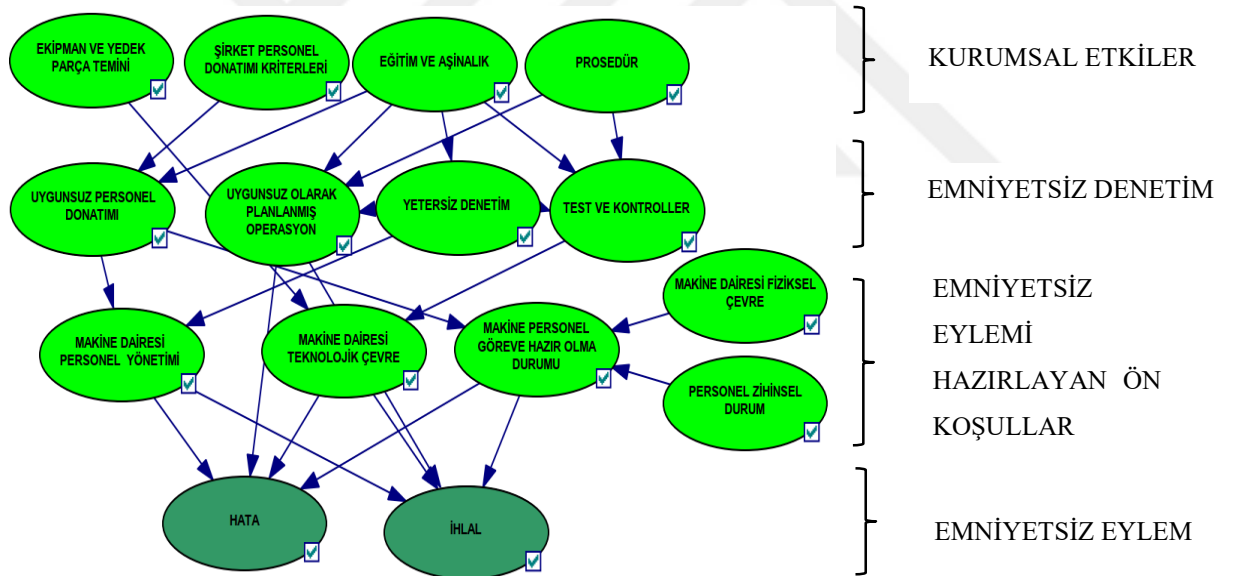
Tablo 9'un devamı

• Srast yatak sıcaklık	• Ana makine yapısal uygunsuzluk • Ana makine akışkan uygunsuzluğu • Ana makine çalışma koşulları • Kontrol sistemi arızaları	• Güç düşüşü diğer parametreler • Güç kaybı diğer parametreler	• Srast yatak sıcaklığının yüksek olması
• Eksenel vibrasyon	• Ana makine yapısal uygunsuzluk • Ana makine akışkan uygunsuzluğu • Ana makine çalışma koşulları • Kontrol sistemi arızaları	• Güç düşüşü diğer parametreler	• Eksenel vibrasyonun yüksek olması
• Ana makine devri	• Ana makine yapısal uygunsuzluk • Ana makine akışkan uygunsuzluğu • Ana makine çalışma koşulları • Kontrol sistemi arızaları	• Güç kaybı diğer parametreler	• Ana makine devrinin yüksek olması (overspeed)
• Yakıt beslemesi	• Ana makine yapısal uygunsuzluk • Ana makine akışkan uygunsuzluğu	• Güç kaybı diğer parametreler	• Yardımcı makineler kaynaklı yetersiz yakıt beslemesi • Çabuk kapama valf sisteminin aktif edilmesi • CO₂ valfinin aktif edilmesi • Elektrik kesintisi (black out) • Emergency stopun aktif edilmesi
• Soğutma suyu parametreleri	• Soğutma suyu sıcaklığı • Soğutma suyu basıncı	• Güç düşüşü	• Soğutma suyu sıcaklık ve basınç kaynaklı uygunsuzluk
• Egzoz gaz&emme havası parametreleri	• Egzoz gaz sıcaklığı • Egzoz gaz sıcaklık sapması • Emme havası sıcaklığı	• Güç düşüşü	• Egzoz gaz sıcaklık ve scavenç havası kaynaklı uygunsuzluk
• Yağlama yağı parametreleri	• Yağlama yağı sıcaklığı • Yağlama yağı basıncı • Silindir yağ debisi • Yağ sis yoğunluğu	• Güç düşüşü	• Yağlama yağ basınç, sıcaklık, sis yoğunluğu ve debi kaynaklı uygunsuzluk
• Güç düşüşü diğer parametreler	• Srast yatak sıcaklığı • Eksenel vibrasyon • T/C devri	• Güç düşüşü	• Diğer değişkenler
• Güç kaybı diğer parametreler	• Ana makine devri • Yakıt beslemesi • Srast yatak sıcaklığı	• Güç kaybı	• T/C devrinin yüksek olması • Ana makine devrinin yüksek olması • Yardımcı makineler kaynaklı yetersiz yakıt beslemesi • Çabuk kapama valf sisteminin aktif edilmesi • Co₂ release aktif edilmesi • Elektrik kesintisi (black out)
• Güç düşüşü	• Soğutma suyu parametreleri • Egzoz gazı&hava parametreleri • Yağlama yağı parametreleri • Güç kaybı diğer parametreler	• Gemi güvenliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar	• Makine devrinin pek ağır yola geçmesi
• Güç kaybı	• Diğer parametreler • Yağlama yağı basıncı • Soğutma suyu basıncı	• Gemi güvenliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar	• Makine yakıt beslemesinin kesilip durması
• Gemi güvenliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar	• Güç düşüşü • Güç kaybı	-	• Geminin seyir güvenliğini etkileyen ana makine kaynaklı durumlar



Şekil 15. Bayes Ağının grafiksel gösterimi

Makine personeli kaynaklı uygunsuzlukların insan faktörleri analizi ve sınıflandırma sistemi ile yapılandırılması; HFACS insan faktörü analizlerinde denizcilerin eylemlerini hiyerarşik bir yapıda temsil edilmesini sağlamaktadır. Ana makine operasyon ve bakım faaliyetleri makine dairesi personeli tarafından yapılması nedeniyle HFACS çatısı altında Bayes Ağı yapılandırılmıştır. Ekipman ve parça temini ve şirket personel kriteri, eğitim/aşinalık ve prosedür HFACS birinci kategorisindeki kurumsal etkilere aittir. Emniyetsiz denetim uygunsuz planlanmış operasyon, yetersiz denetim, test ve kontroller, uygunsuz personel donatımı ikinci kategori emniyetsiz denetim kapsamında değerlendirilmiştir. Makine dairesi personel yönetimi, makine dairesi personel göreve hazır olma, makine dairesi teknolojik çevre emniyetsiz eylemlerin önkoşullarıdır. Hata ve ihmal emniyetsiz eylemin kendisidir. Şekil 16’da gösterilen ve Bayes Ağı insan faktörünü ifade eden makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk düğümü nedensel değişkenleri HFACS kullanılarak sınıflandırılmış durumu gösterilmektedir.



Şekil 16. Makine dairesi personeli kaynaklı uygunsuzluğun İnsan Faktörleri Analizi ve Sınıflandırma Sistemi ile modellenmesi

Değişkenlerin (Düğümelerin) durum ifadelerinin belirlenmesi; Bayes Ağ modellerinde kullanılan değişkenlerin nedensel ilişkisinin koşullu olasılıklarla tespit edilebilmesi için durum ifadelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bayes Ağında değişkenlerin durumu “düşük/orta/yüksek”, “düşük/yüksek”, “bakımlı/bakımsız”, “evet/hayır”, “var/yok”, “uygun/uygunsuz”, “yeterli/yetersiz”, “alarm var/alarm yok” gibi ifadeler ile

kodlanabilmektedir. Modelde değişken sayısının artmasında olduğu gibi durum sayısının artması da koşullu olasılık tablolarının elde edilmesinde karışıklıklara neden olabilmektedir. Örneğin, bir değişkenin 4 adet ebeveyninin olduğu ve bu değişken durumunun 2 adet olduğu düşünülürse, koşullu olasılık tablosunda $2^4=16$ adet kombinasyon değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Düğümün durum sayısı üçe çıkması durumunda $3^4=81$ 'e yükselmektedir. Modelin karmaşık bir hal alması, uzmanlar tarafından yapılan değerlendirmelerin uzun sürmesine ve verilen cevapların tutarlılığını da etkileyebilmektedir. Bu nedenle değişkenlerin durumları anlaşılabilir, aynı zamanda kapsayıcı ve anlam belirsizliği yaşatmayacak şekilde ikili ifadelerden oluşmasına çalışılmıştır. Durumların belirlenmesinde değişkenin neyi temsil ettiği veya hangi değer aldığı göz önüne alınmıştır.

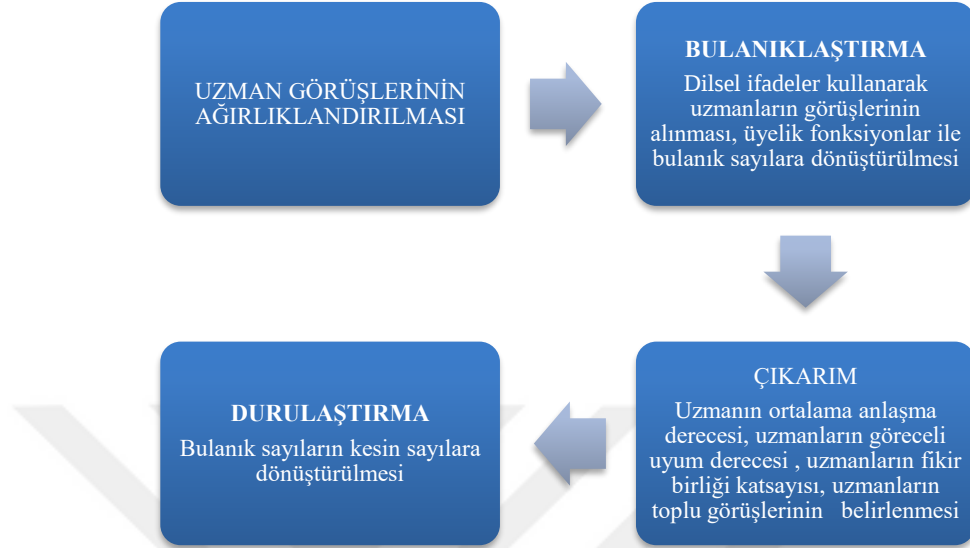
2.2.8. Bayes Ağının Niceliksel Kısımının Oluşturulması

Bayes Ağlarının niceliksel süreci, nitel aşamanın tamamlanmasından sonra gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızaların nedensel değişkenlerin birbiri ile olan ilişkilerinin sayısal olarak ifade edilmesidir. Bir diğer ifade ile ebeveyn ve çocuk düğümlerin birbiri ile olan bağımlılık ilişkilerinin koşullu olasılık dağılımları şekliyle bulunmasıdır. Herhangi bir ebeveyne sahip olmayan kök düğümler ise marjinal olasılık dağılımı bulunur.

Gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızaların nedensel değişkenlerin koşullu ve marjinal olasılık değerleri 7 uzman ile yapılan görüşmeler neticesinde elde edilmiştir. Seçilen uzmanlar düğümlerin ve ilişkilerinin değerlendirmesindeki aynı uzmanlar olması nedeniyle anlam kargaşasının önüne geçilmiştir. Uzmanlarla görüşmelerde daha önce hazırlanan sorular çerçevesinde değerlendirme yapmaları istenmiştir. Görüşmelere başlamadan konunun amacı, soruların içeriği, Bayes Ağ yapısı açıklanmış olup örnek bir uygulama yapılmıştır. Amaç yaşanmış tecrübelerinden faydalanmak olup uzmanların o arıza ile ilgili bir tecrübesinin olmama durumunda yorumlaması beklenmiştir.

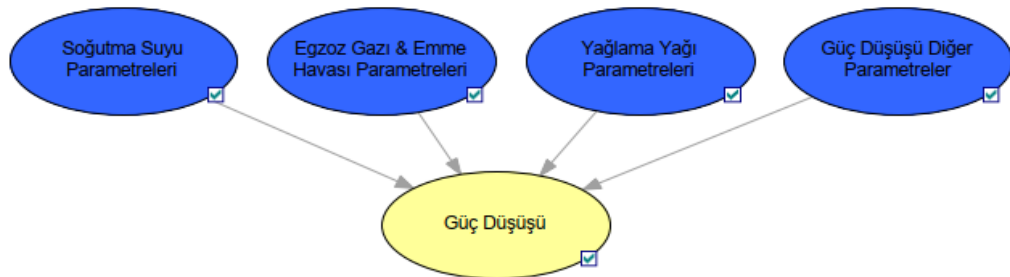
Uzman yargılarına dayalı koşullu olasılıkların belirlenmesindeki belirsizlikler bulanık küme teorisi kullanılarak ortadan kaldırılmıştır. Bulanık küme teoresinin Bayes Ağında kullanılması daha önce de açıklandığı gibi uzman görüşlerinin ağırlıklandırılması, bulanıklaştırma, çıkarım, durulaştırma aşamalarından oluşmaktadır. Bulanık Bayes Ağının aşamaları Şekil 17'de gösterildiği gibidir. Düğüm ve durum sayısının fazla olması nedeniyle hesaplamalardaki karışıklıkların önüne geçmek için excel dosyasında formüller tanımlanmış

ve bütün hesaplamalar burada yapılmıştır. Durulaştırma aşaması sonrası her bir düğüm için elde edilen koşullu olasılık değerleri Genie programına aktarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 17. Bulanık küme teorisinin aşamaları

Düğümün değerlendirilmesinde uzmanlardan görüş alınması, bu verilerin bulanıklaştırma aşamaları çalışmada kullanılan güç düşüşü düğümü ile örneklendirilmiş ve bulunan değerler Şekil 18’de gösterilmiştir. Bayes Ağında geminin güç düşüşü, soğutma suyu parametrelerindeki bir uygunsuzluk, egzoz gazı & emme havası parametrelerindeki bir uygunsuzluk, yağ parametrelerindeki bir uygunsuzluk ve güç düşüşü diğer parametre uygunsuzluğu olmak üzere 4 adet ebeveyni yani nedensel faktörleri bulunmaktadır. Her düğümün 2 durumu olduğu düşünüldüğünde toplam $2^4 = 16$ adet veri elde edilmesi beklenmektedir.



Şekil 18. Güç düşüşü düğüm örneği

Uzman görüşüne dayalı koşullu olasılık değerlerinin elde edilmesi; Çalışmada, görüşleri alınan uzmanlar heterojen bir gruptur. Aynı görev ve tecrübeye sahip olmayan uzmanların seçilmesi koşullu olasılık tablolarının elde edilmesinde farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Uzmanların mesleki nitelikleri, eğitim düzeyleri ve operasyonel deneyimleri dikkate alınarak bir ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirilmiş, Tablo 10'da uzman ağırlık katsayısı, Tablo 11'de uzmanların etki dereceleri gösterilmiştir. Uzmanların ağırlık puanlarının hesaplanmasında Denklem 9 kullanılmıştır.

Tablo 10. Uzman ağırlık katsayısı

Kriter	Sınıflandırma	Ağırlık Puanı
Profesyonel Pozisyon	Klas Denetçisi	4
	Enspektör	3
	Akademisyen	2
	Survey Uzmanı	1
Yeterlilik	Başmühendis	3
	İkinci Mühendis	2
	Üçüncü Mühendis	1
Tecrübe (Yıl)	>15	5
	10-15	4
	5-10	3
	3-5	2
	1-3	1

Tablo 11. Uzman değerlendirmenin ağırlıklandırmaya göre etki derecesi

Uzman No	Profesyonel Pozisyon	Yeterlilik	Tecrübe	Ağırlık Puanı			Toplam Puan	Ağırlık Faktörü
1	Gemi Survey Uzmanı	Başmühendis	>15	1	3	5	9	0,1363
2	Klas Denetçisi	Başmühendis	10-15	4	3	4	11	0,1666
3	Enspektör	Başmühendis	10-15	3	3	4	10	0,1515
4	Akademisyen	Başmühendis	10-15	2	3	5	10	0,1515
5	Akademisyen	Başmühendis	>15	2	3	5	10	0,1515
6	Akademisyen	İkinci Mühendis	10-15	2	2	4	8	0,1212
7	Akademisyen	İkinci Mühendis	10-15	2	2	4	8	0,1212
Toplam							1	

Bulanıklaştırma aşaması; Düğümlerin bağımlılığı dikkate alındığında, sayısal ölçeklerle kıyasla dilsel terimlerle ilişkiyi değerlendirmek daha kolaydır (Ren vd., 2009; Kaptan, 2022; Aydın vd., 2021). Bu çalışmada da düğümlerin olasılık değerlerini elde etmek için Denklem 10'da gösterilen üçgen bulanık fonksiyonu kullanılmıştır. Tablo 12'de güç düşüşü düğümünün uzmanlar tarafından elde edilen dilsel ifadeler, Tablo 13'de bulanıklaştırılmış hali gösterilmektedir.

Tablo 12. Güç düşüşü düğüm örneği için uzmanların görüşleri

Güç düşüşü	Soğutma Suyu p.	Egzoz gazı & hava p.	Yağlama yağı p.	Güç düşüşü diğer p.	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	Uzman 4	Uzman 5	Uzman 6	Uzman 7	Bulanık olasılık numarası
	+	+	+	-	H	H	M	M	MH	MH	H	1
	+	+	-	+	MH	H	M	M	MH	MH	H	2
	+	-	+	+	MH	M	ML	M	MH	MH	M	3
	-	+	+	+	MH	H	M	M	MH	M	MH	4
	+	+	-	-	M	MH	ML	L	M	M	MH	5
	+	-	-	+	M	ML	L	L	ML	M	ML	6
	-	-	+	+	L	L	L	ML	L	L	VL	7
	-	+	+	-	M	MH	ML	ML	M	ML	MH	8
	-	+	-	+	M	MH	ML	L	M	ML	MH	9
	+	-	+	-	M	ML	L	ML	ML	M	ML	10
	+	-	-	-	ML	L	VL	VL	L	ML	L	11
	-	+	-	-	ML	M	L	VL	ML	L	M	12
	-	-	+	-	VL	VL	VL	L	VL	VL	VVL	13
	-	-	-	+	VVL	VL	VL	VL	VL	VL	VVL	14
	+	+	+	+	VH	VH	MH	MH	H	H	VH	15
	-	-	-	-	VVL	VVL	VVL	VVL	VVL	VVL	VVL	16

Tablo 13. Güç düşüşü düğümü için uzman görüşleri bulanıklaştırma aşaması

Bulanık olasılık numarası	Uzman 1			Uzman 2			Uzman 3			Uzman 4			Uzman 5			Uzman 6			Uzman 7		
1	0,65	0,80	0,95	0,65	0,80	0,95	0,35	0,50	0,65	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80	0,50	0,65	0,80	0,65	0,80	0,95
2	0,50	0,65	0,80	0,65	0,80	0,95	0,35	0,50	0,65	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80	0,50	0,65	0,80	0,65	0,80	0,95
3	0,50	0,65	0,80	0,35	0,50	0,65	0,20	0,35	0,50	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80	0,50	0,65	0,80	0,35	0,50	0,65
4	0,50	0,65	0,80	0,65	0,80	0,95	0,35	0,50	0,65	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80
5	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80	0,20	0,35	0,50	0,05	0,20	0,35	0,35	0,50	0,65	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80
6	0,35	0,50	0,65	0,20	0,35	0,50	0,05	0,20	0,35	0,05	0,20	0,35	0,20	0,35	0,50	0,35	0,50	0,65	0,20	0,35	0,50
7	0,05	0,20	0,35	0,05	0,20	0,35	0,05	0,20	0,35	0,20	0,35	0,50	0,05	0,20	0,35	0,05	0,20	0,35	0,01	0,10	0,20
8	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80	0,20	0,35	0,50	0,20	0,35	0,50	0,35	0,50	0,65	0,20	0,35	0,50	0,50	0,65	0,80
9	0,35	0,50	0,65	0,50	0,65	0,80	0,20	0,35	0,50	0,05	0,20	0,35	0,35	0,50	0,65	0,20	0,35	0,50	0,50	0,65	0,80
10	0,35	0,50	0,65	0,20	0,35	0,50	0,05	0,20	0,35	0,20	0,35	0,50	0,20	0,35	0,50	0,35	0,50	0,65	0,20	0,35	0,50
11	0,20	0,35	0,50	0,05	0,20	0,35	0,01	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20	0,05	0,20	0,35	0,20	0,35	0,50	0,05	0,20	0,35
12	0,20	0,35	0,50	0,35	0,50	0,65	0,05	0,20	0,35	0,01	0,10	0,20	0,20	0,35	0,50	0,05	0,20	0,35	0,35	0,50	0,65
13	0,01	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20	0,05	0,20	0,35	0,01	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20	0,00	0,00	0,05
14	0,00	0,00	0,05	0,01	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20	0,00	0,00	0,05
15	0,80	0,90	0,99	0,80	0,90	0,99	0,50	0,65	0,80	0,50	0,65	0,80	0,65	0,80	0,95	0,65	0,80	0,95	0,80	0,90	0,99
16	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05

Çıkarım aşaması; Heterojen bir grupta, uzmanların mesleki deneyim, mesleki nitelikleri farklı olduğundan koşullu olasılık değerlerinin elde edilmesinde verilerin toplanması ve görüşlerin uzlaştırılması önemlidir. Hsu ve Chen (1996) tarafından uzman grupların değerlendirmesini birleştirmek için önermiş olduğu algoritma çalışmada kullanılmıştır. Bu algoritmalar iki uzmanın yargılarının benzerlik derecesi Denklem 11, belirli sayıdaki uzmanın ortalama anlaşma derecesi (AA) Denklem 12; belirli sayıdaki uzmanın göreceli uyum derecesi (RA) Denklem 13; uzmanların fikir birliği (konsensüs) katsayısı (CC) Denklem 14 kullanılarak hesaplanmıştır. Son olarak Denklem 15 kullanılarak uzmanların toplu görüşü (R_{AG}) belirlenmiştir. Güç düşüşü örneği için Tablo 14, 15, 16, 17-18'de gösterildiği gibidir.

Durulaştırma aşaması; Daha önceki işlemlerde elde edilen değerler bulanık sayılar şeklinde ifade edildiğinden, kesin sonuçlar elde etmek için bir durulama işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada alanın merkezi (CoA) yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve Denklem 16 kullanılmıştır. Güç düşüşü örneği için Tablo 18'de sunulduğu gibidir.

Tablo 14. Güç düşüşü düğümü için uzman görüşleri benzerlik derecesi

Bulanık olasılık numarası	S 1-2	S 1-3	S 1-4	S 1-5	S 1-6	S 1-7	S 2-3	S 2-4	S 2-5	S 2-6	S 2-7	S 3-4	S 3-5	S 3-6	S 3-7	S 4-5	S 4-6	S 4-7	S 5-6	S 5-7	S 6-7
1	1,0	0,7	0,7	0,9	0,9	1,0	0,7	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9
2	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,7	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9
3	0,9	0,7	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9
4	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	0,7	0,7	0,9	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9
5	0,9	0,9	0,7	1,0	1,0	0,9	0,7	0,6	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,6	1,0	0,9	0,9
6	0,9	0,7	0,7	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	0,7	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9
7	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9
8	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,7	0,7	0,9	0,7	1,0	1,0	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	0,9	0,7
9	0,9	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9	0,7	0,6	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9	1,0	0,7	0,7	0,9	0,6	0,9	0,9	0,7
10	0,9	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9
11	0,9	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9
12	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9	0,7	0,6	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9	1,0	0,7	0,8	0,9	0,6	0,9	0,9	0,7
13	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9
14	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9
15	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9
16	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Tablo 15. Güç düşüşü düğümü için uzman görüşleri ortalama anlaşma derecesi

Bulanık olasılık Numarası	AA (E1)	AA (E2)	AA (E3)	AA (E4)	AA (E5)	AA (E6)	AA (E7)
1	0,56667	0,56667	0,53333	0,53333	0,58333	0,58333	0,56667
2	0,60000	0,55000	0,55000	0,55000	0,60000	0,60000	0,55000
3	0,58333	0,60000	0,51667	0,60000	0,58333	0,58333	0,60000
4	0,60000	0,51667	0,58333	0,58333	0,60000	0,58333	0,60000
5	0,58333	0,53333	0,53333	0,45000	0,58333	0,58333	0,53333
6	0,55000	0,60000	0,55000	0,55000	0,60000	0,55000	0,60000
7	0,63926	0,63926	0,63926	0,55593	0,63926	0,63926	0,58556
8	0,58333	0,53333	0,56667	0,56667	0,58333	0,56667	0,53333
9	0,56667	0,51667	0,55000	0,46667	0,56667	0,55000	0,51667
10	0,56667	0,61667	0,53333	0,61667	0,61667	0,56667	0,61667
11	0,56185	0,61185	0,57963	0,57963	0,61185	0,56185	0,61185
12	0,57259	0,52259	0,55593	0,50222	0,57259	0,55593	0,52259
13	0,64630	0,64630	0,64630	0,59259	0,64630	0,64630	0,59815
14	0,61852	0,64741	0,64741	0,64741	0,64741	0,64741	0,61852
15	0,59037	0,59037	0,55111	0,55111	0,60111	0,60111	0,59037
16	0,66667	0,66667	0,66667	0,66667	0,66667	0,66667	0,66667

Tablo 16. Güç düşüşü düğümü için uzman görüşleri göreceli uyum derecesi

Bulanık olasılık numarası	RA(E1)	RA(E2)	RA(E3)	RA(E4)	RA(E5)	RA(E6)	RA(E7)
1	0,14407	0,14407	0,13559	0,13559	0,14831	0,14831	0,14407
2	0,15000	0,13750	0,13750	0,13750	0,15000	0,15000	0,13750
3	0,14344	0,14754	0,12705	0,14754	0,14344	0,14344	0,14754
4	0,14754	0,12705	0,14344	0,14344	0,14754	0,14344	0,14754
5	0,15351	0,14035	0,14035	0,11842	0,15351	0,15351	0,14035
6	0,13750	0,15000	0,13750	0,13750	0,15000	0,13750	0,15000
7	0,14737	0,14737	0,14737	0,12816	0,14737	0,14737	0,13499
8	0,14831	0,13559	0,14407	0,14407	0,14831	0,14407	0,13559
9	0,15179	0,13839	0,14732	0,12500	0,15179	0,14732	0,13839
10	0,13710	0,14919	0,12903	0,14919	0,14919	0,13710	0,14919
11	0,13642	0,14856	0,14074	0,14074	0,14856	0,13642	0,14856
12	0,15051	0,13736	0,14613	0,13201	0,15051	0,14613	0,13736
13	0,14615	0,14615	0,14615	0,13400	0,14615	0,14615	0,13526
14	0,13825	0,14470	0,14470	0,14470	0,14470	0,14470	0,13825
15	0,14486	0,14486	0,13522	0,13522	0,14749	0,14749	0,14486
16	0,14286	0,14286	0,14286	0,14286	0,14286	0,14286	0,14286

Tablo 17. Güç düşüşü düğümü için uzman fikir birliği

Bulanık olasılık numarası	CC(E1)	CC(E2)	CC(E3)	CC(E4)	CC(E5)	CC(E6)	CC(E7)
1	0,14962	0,14100	0,12814	0,12814	0,15174	0,14312	0,15824
2	0,15259	0,13772	0,12909	0,12909	0,15259	0,14397	0,15496
3	0,14931	0,14274	0,12387	0,13412	0,14931	0,14069	0,15998
4	0,15136	0,13249	0,13207	0,13207	0,15136	0,14069	0,15998
5	0,15434	0,13914	0,13052	0,11956	0,15434	0,14572	0,15638
6	0,14634	0,14397	0,12909	0,12909	0,15259	0,13772	0,16121
7	0,15127	0,14265	0,13403	0,12442	0,15127	0,14265	0,15370
8	0,15174	0,13676	0,13238	0,13238	0,15174	0,14100	0,15400
9	0,15348	0,13816	0,13401	0,12284	0,15348	0,14263	0,15540
10	0,14613	0,14356	0,12486	0,13494	0,15218	0,13751	0,16080
11	0,14580	0,14325	0,13071	0,13071	0,15187	0,13718	0,16049
12	0,15284	0,13765	0,13341	0,12635	0,15284	0,14203	0,15489
13	0,15066	0,14204	0,13342	0,12735	0,15066	0,14204	0,15384
14	0,14671	0,14132	0,13270	0,13270	0,14994	0,14132	0,15533
15	0,15001	0,14139	0,12796	0,12796	0,15133	0,14271	0,15864
16	0,14901	0,14039	0,13177	0,13177	0,14901	0,14039	0,15764

Tablo 18. Güç düşüşü düğümü için uzman toplu görüş birliği

Bulanık olasılık numarası	Uzman görüşlerinin toplu sonucu		
1	0,52889	0,67889	0,82889
2	0,50517	0,65517	0,80517
3	0,39731	0,54731	0,69731
4	0,45915	0,60915	0,75915
5	0,33888	0,48888	0,63888
6	0,20388	0,35388	0,50388
7	0,06252	0,20329	0,34561
8	0,33275	0,48275	0,63275
9	0,31569	0,46569	0,61569
10	0,22382	0,37382	0,52382
11	0,08199	0,21630	0,35323
12	0,17856	0,32098	0,46466
13	0,01356	0,09735	0,19603
14	0,00698	0,06980	0,15469
15	0,67912	0,80662	0,92961
16	0,00000	0,00000	0,05000

Marjinal ve koşullu olasılık tablolarının oluşturulması; Önceki bölümlerde açıklandığı gibi uzman görüşlerinin bulanık sayılardan kesin sayılara dönüşümü gerçekleştirildikten sonraki aşama bu verilerin koşullu olasılık tablolarına yerleştirilmesidir. Güç düşüşü değişkeninin durulaştırma aşaması sonrası elde edilen veriler Tablo 19'da; çalışmada kullanılan Genie yazılımı koşullu olasılık tablosuna girişmiş hali Şekil 19'da gösterildiği gibidir.

Tablo 19. Güç düşüşü düğümü için durulaştırma aşaması

Bulanık olasık numarası	Olasılık değeri
1	0,678886616
2	0,655172414
3	0,547314867
4	0,60915065
5	0,488883848
6	0,35387931
7	0,203805822
8	0,482751315
9	0,465686576
10	0,373818131
11	0,217174605
12	0,321398848
13	0,10231098
14	0,077156695
15	0,805117199
16	0,016666667

Node properties: GÜÇ DÜŞÜŞÜ

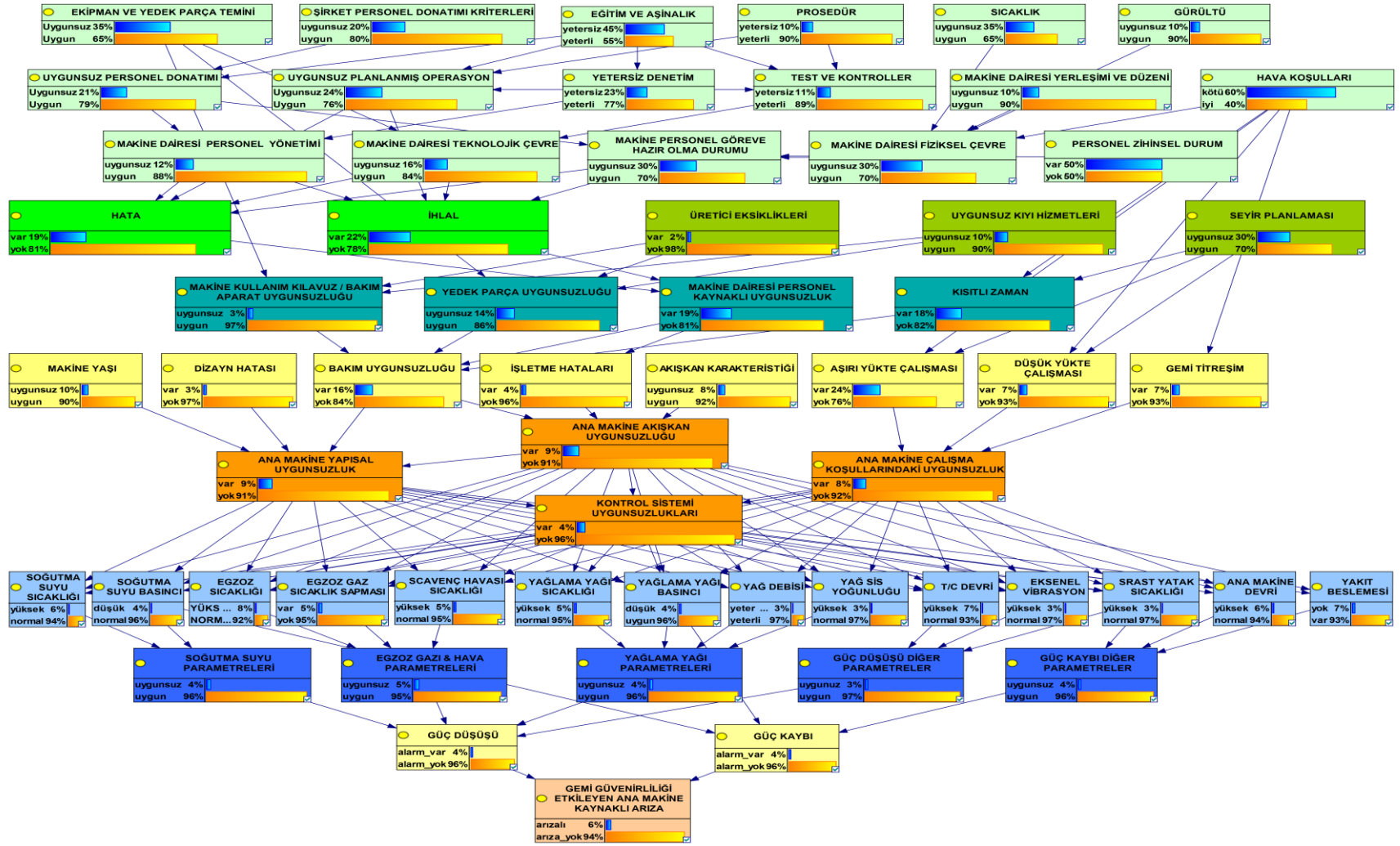
General	Definition	Format	User properties	Value
SOĞUTMA SU... EGZÖZ GAZI & GÜÇ DÜŞÜŞÜ... YAGLAMA YA... ► alarm_var alarm_yok				
uygunsuz uygunsuz uygun uygunsuz uygun uygunsuz uygun uygunsuz uygun uygunsuz uygun uygunsuz uygun uygunsuz uygun uygunsuz uygun				
0.805117 0.655172 0.678887 0.488884 0.547315 0.353879 0.373818 0.217175 0.609151 0.465687 0.482751 0.321399 0.203806 0.016667 0.102311 0.016667				
0.194883 0.344828 0.321113 0.511116 0.452685 0.646121 0.626182 0.782825 0.390849 0.534313 0.517249 0.678601 0.796194 0.983333 0.897689 0.983333				

Şekil 19. Genie programı güç düşüşü düğümü için oluşturulan koşullu olasılık tablosunun kesiti

Marjinal olasılıklar kök düğüm olması nedeniyle herhangi bir ebeveyne sahip değildir. Bu sebeple marjinal olasılık içeren düğümler için ayrı bir Tablo 20’de gösterildiği gibi uzmanların görüşüne başvurulmuş ve elde edilen veriler koşullu olasılık tablosunda olduğu gibi Genie programına girişi tamamlanmıştır. Koşullu olasılık ve marjinal olasılık verilerin Genie yazılımına giriş yapılması ve çalıştırılması sonrası elde edilen olasılık değerlerinin hesaplanmış hali Şekil 20’de gösterildiği gibidir.

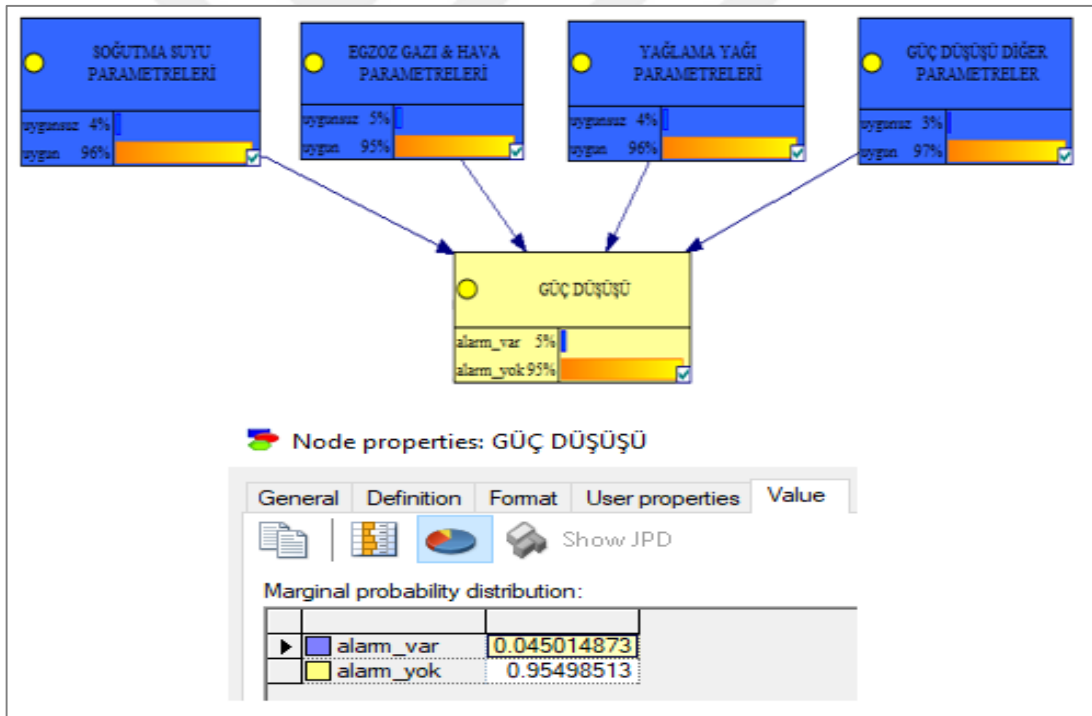
Tablo 20. Marjinal olasılıkların uzman değerlendirmesi ile elde edilmesi

Düğüm adı	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	Uzman 4	Uzman 5	Uzman 6	Uzman 7	Bulanık olasılık değerleri
Makine yaşı	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL	0,103333
Dizayn hatası	VL	VVL	VVL	VVL	VVL	VVL	VVL	0,029188
Akışkan karakteristiği	L	VL	VVL	VL	VVL	VVL	VL	0,0807
Ekipman ve yedek parça	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	0,35
Şirket personel donatım kriteri	ML	MH	L	VL	VL	VVL	VL	0,203879131
Eğitim ve aşinalık	MH	ML	M	ML	M	ML	M	0,459151
Prosedür	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL	0,103333333
Sıcaklık	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	0,35
Gürültü	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL	0,103333333
Personel zihinsel durum	M	ML	MH	ML	M	M	MH	0,502586
Makine dairesi yerleşim ve düzeni	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL	0,103333333
Hava koşulları	MH	MH	MH	MH	MH	M	M	0,60653183
Seyir planlaması	M	M	L	L	L	ML	L	0,304522209
Üretici eksiklikleri	VVL	VVL	VVL	VVL	VVL	VVL	VVL	0,016666667
Uygunsuz kıyı hizmetleri	VL	VL	VVL	VVL	VVL	M	VVL	0,09815716



Şekil 20. Bayes Ağı Olasılık Değerleri

Koşullu olasılık hesaplamalarına örnek uygulama; Gemi ana makinesi gibi karmaşık modellerin el ile olasılıkların hesaplanması, çıkarımların yapılabilmesi oldukça zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle, Bayes Ağlarının grafiklendirilmesi ve olasılıklara dayalı tahminlerin yapılabilmesi için Bayes teorem algoritmaları ile geliştirilen Genie yazılımı kullanılmıştır. Genie yazılımı Pittsburg Üniversitesi Karar Sistemleri laboratuvarı tarafından geliştirilmiştir ve akademik çalışmalarda kısıtlamasız tam erişim sağlamaktadır. Karar analizlerinin yapılması, olasılıkların hesaplanması ve ağılı olayların grafiksel temsili için kullanılmaktadır. Bayes ağlarında fazla düğüm sayısı ve çıkarım eklenmesi, hesaplamaların karmaşıklığını büyük ölçüde artırır ve Genie, bu karmaşık sistemlerin analiz edilmesini sağlar. Ayrıca, grafiksel arayüz, ağı görsel olarak anlaşılmasını kolaylaştırır. Güç düşüşü düğümü için Genie yazılımındaki hesaplanmış kesiti Şekil 21’de, nedensel değişkenlerin olasılık değerleri Tablo 21’de gösterildiği gibidir.



Şekil 21. Güç düşüşü düğümü için Genie programında oluşturulan koşullu olasılık kesiti

Tablo 21. Güç düşüşü nedensel faktörlerinin olasılık değeri

Güç düşüşü (alarm_var)	Güç düşüşü (alarm_yok)	Soğutma suyu parametreleri	Egzoz gazı & emme havası parametreleri	Yağlama yağı parametreleri	Güç düşüşü diğer parametreleri
0,805117199	0,194882801	Uygunsuz	Uygunsuz	Uygunsuz	Uygunsuz
0,678886616	0,321113384	Uygunsuz	Uygunsuz	Uygunsuz	Uygun
0,655172414	0,344827586	Uygunsuz	Uygunsuz	Uygun	Uygunsuz
0,547314867	0,452685133	Uygunsuz	Uygun	Uygunsuz	Uygunsuz
0,60915065	0,39084935	Uygun	Uygunsuz	Uygunsuz	Uygunsuz
0,465686576	0,534313424	Uygun	Uygunsuz	Uygun	Uygunsuz
0,373818131	0,626181869	Uygunsuz	Uygun	Uygunsuz	Uygun
0,35387931	0,64612069	Uygunsuz	Uygun	Uygun	Uygunsuz
0,488883848	0,511116152	Uygunsuz	Uygunsuz	Uygun	Uygun
0,465686576	0,534313424	Uygun	Uygunsuz	Uygunsuz	Uygun
0,203805822	0,796194178	Uygun	Uygun	Uygunsuz	Uygunsuz
0,217174605	0,782825395	Uygunsuz	Uygun	Uygun	Uygun
0,321398848	0,678601152	Uygun	Uygunsuz	Uygun	Uygun
0,10231098	0,89768902	Uygun	Uygun	Uygunsuz	Uygun
0,016666667	0,983333333	Uygun	Uygun	Uygun	Uygunsuz
0,016666667	0,983333333	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun

$$\begin{aligned}
P(\text{Güç düşüşü} = \text{alarm_var}) = & \left[P \left((\text{Güç düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri} = \right. \right. \\
& \text{uygunsuz, egzoz_gazı\&emme_parametreleri} = \text{uygunsuz, yağlama_yağı_parametreleri} = \\
& \left. \left. \text{uygunsuz, güç düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygunsuz}) \right) \right] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri} = \\
& \text{uygunsuz}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri} = \text{uygunsuz}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri} = \text{uygunsuz}) \times P(\text{güç düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygunsuz}) \\
& + \left[P \left((\text{Güç düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri} = \right. \right. \\
& \text{uygunsuz, egzoz_gazı\&emme_parametreleri} = \text{uygunsuz, yağlama_yağı_parametreleri} = \\
& \left. \left. \text{uygunsuz, güç düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygun}) \right) \right] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri} = \\
& \text{uygunsuz}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri} = \text{uygunsuz}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri} = \text{uygunsuz}) \times P(\text{güç düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygun}) \\
& + \left[P \left((\text{Güç düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri} = \right. \right. \\
& \text{uygunsuz, egzoz_gazı\&emme_parametreleri} = \text{uygunsuz, yağlama_yağı_parametreleri} = \\
& \left. \left. \text{uygun, güç düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygunsuz}) \right) \right] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri} = \\
& \text{uygunsuz}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri} = \text{uygunsuz}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri} = \text{uygun}) \times P(\text{güç düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygunsuz}) \\
& + \left[P \left((\text{Güç düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri} = \right. \right. \\
& \text{uygunsuz, egzoz_gazı\&emme_parametreleri} = \text{uygun, yağlama_yağı_parametreleri} = \\
& \left. \left. \text{uygunsuz, güç düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygunsuz}) \right) \right] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri} = \\
& \text{uygunsuz}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri} = \text{uygun}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri} = \text{uygunsuz}) \times P(\text{güç düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygunsuz}) \\
& + \left[P \left((\text{Güç düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri} = \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{uygun, egzoz_gazı\&emme_parametreleri = uygunsuz, yağlama_yağı_parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz, güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygunsuz}} \Big] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri =} \\
& \text{uygun}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri = uygunsuz}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri = uygunsuz}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygun}) \\
& + \Big[P \Big((\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri =} \\
& \text{uygun, egzoz_gazı\&emme_parametreleri = uygunsuz, yağlama_yağı_parametreleri =} \\
& \text{uygun, güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygunsuz}) \Big] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri =} \\
& \text{uygun}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri = uygunsuz}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri = uygun}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygunsuz}) \\
& + \Big[P \Big((\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz, egzoz_gazı\&emme_parametreleri = uygun, yağlama_yağı_parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz, güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygun}) \Big] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri = uygun}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri = uygunsuz}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygun}) \\
& + \Big[P \Big((\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz, egzoz_gazı\&emme_parametreleri = uygun, yağlama_yağı_parametreleri =} \\
& \text{uygun, güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygunsuz}) \Big] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri = uygun}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri = uygun}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygunsuz}) \\
& + \Big[P \Big((\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz, egzoz_gazı\&emme_parametreleri = uygunsuz, yağlama_yağı_parametreleri =} \\
& \text{uygun, güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygun}) \Big] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri = uygunsuz}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri = uygun}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygun}) \\
& + \Big[P \Big((\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri =} \\
& \text{uygun, egzoz_gazı\&emme_parametreleri = uygun, yağlama_yağı_parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz, güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygunsuz}) \Big] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri =} \\
& \text{uygun}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri = uygun}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri = uygunsuz}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygunsuz}) \\
& + \Big[P \Big((\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri =} \\
& \text{uygunsuz, egzoz_gazı\&emme_parametreleri = uygun, yağlama_yağı_parametreleri =} \\
& \text{uygun, güç_düşüşü_diğer_parametreler = uygun}) \Big] \times P(\text{soğutma suyu parametreleri =} \\
& \text{uygun}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri = uygunsuz}) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri} = \text{uygun}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygun}) \\
& + \left[P \left(\left(\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri} = \right. \right. \right. \\
& \text{uygun, egzoz_gazı\&emme_parametreleri} = \text{uygun, yağlama_yağı_parametreleri} = \\
& \text{uygunsuz, güç_düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygun} \left. \right) \right] \times P(\text{soğutma_suyu_parametreleri} = \\
& \text{uygun}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri} = \text{uygun}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri} = \text{uygunsuz}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygun}) \\
& + \left[P \left(\left(\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri} = \right. \right. \right. \\
& \text{uygun, egzoz_gazı\&emme_parametreleri} = \text{uygun, yağlama_yağı_parametreleri} = \\
& \text{uygun, güç_düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygunsuz} \left. \right) \right] \times P(\text{soğutma_suyu_parametreleri} = \\
& \text{uygun}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri} = \text{uygun}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri} = \text{uygun}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygunsuz}) \\
& + \left[P \left(\left(\text{Güç_düşüşü} = \text{alarm_var} \mid \text{soğutma_suyu_parametreleri} = \right. \right. \right. \\
& \text{uygun, egzoz_gazı\&emme_parametreleri} = \text{uygun, yağlama_yağı_parametreleri} = \\
& \text{uygun, güç_düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygun} \left. \right) \right] \times P(\text{soğutma_suyu_parametreleri} = \\
& \text{uygun}) \times P(\text{egzoz_gazı \&emme_havası_parametreleri} = \text{uygun}) \times \\
& P(\text{yağlama_yağı_parametreleri} = \text{uygun}) \times P(\text{güç_düşüşü_diğer_parametreler} = \text{uygun})
\end{aligned}$$

Güç düşüşü alarm olma durum olasılığı=

$$\begin{aligned}
& (0,805117199 \times 0,037597263 \times 0,053995428 \times 0,040278746 \times 0,028246998) + (0,67888661601 \\
& 4027 \times 0,037597263 \times 0,053995428 \times 0,040278746 \times 0,971753002) + (0,655172413793103 \times 0,0 \\
& 37597263 \times 0,053995428 \times 0,959721254 \times 0,028246998) + (0,547314867156586 \times 0,03759726 \\
& 3 \times 0,946004572 \times 0,040278746 \times 0,028246998) + (0,609150650084794 \times 0,962402737 \times 0,0539 \\
& 95428 \times 0,040278746 \times 0,028246998) + (0,46568657635468 \times 0,962402737 \times 0,053995428 \times 0,9 \\
& 59721254 \times 0,028246998) + (0,373818131256952 \times 0,037597263 \times 0,946004572 \times 0,04027874 \\
& 6 \times 0,971753002) + (0,353879310344828 \times 0,037597263 \times 0,946004572 \times 0,959721254 \times 0,0282 \\
& 46998) + (0,488883847549909 \times 0,037597263 \times 0,053995428 \times 0,959721254 \times 0,971753002) + (\\
& 0,46568657635468 \times 0,962402737 \times 0,053995428 \times 0,040278746 \times 0,971753002) + (0,2038058 \\
& 22498587 \times 0,962402737 \times 0,946004572 \times 0,040278746 \times 0,028246998) + (0,21717460514347 \\
& 1 \times 0,037597263 \times 0,946004572 \times 0,959721254 \times 0,971753002) + (0,32139884788914 \times 0,96240 \\
& 2737 \times 0,053995428 \times 0,959721254 \times 0,971753002) + (0,102310980188298 \times 0,962402737 \times 0,9 \\
& 46004572 \times 0,040278746 \times 0,971753002) + (0,016666666666667 \times 0,962402737 \times 0,9460045 \\
& 72 \times 0,959721254 \times 0,028246998) + (0,016666666666667 \times 0,962402737 \times 0,946004572 \times 0,95 \\
& 9721254 \times 0,971753002)
\end{aligned}$$

Güç düşüşü alarm olma durumu olasılığı $\cong 0,045$

Güç düşüşü alarm olmama durumu olasılığı $\cong 1 - 0,045$

$$\cong 0,955$$

Bayes modelinin doğrulanması; Çalışmada oluşturulan Bayes Ağın geçerliliğinin ispatı için 3 adet aksiyom testi uygulanmıştır.

Aksiyom 1: Her arıza kategorisi ile ilişkili ebeveyn düğümlerdeki değişimin çocuk düğümlerine etkisi gözlemlenmiştir. Örneğin; gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza, ebeveyn düğümleri güç düşüşü ve güç kaybı arızasıdır. Güç düşüşünün arızasının olma durumunda, gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza olasılığı %6'dan %63'e yükselir. Eğer güç düşüşü arızasının olmama durumunda gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza olasılığı %3'e düşer. Benzer şekilde güç kaybı arızası olması durumunda gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza %44'e yükselirken olmama durumunda %4'e düşmektedir. Bayes Ağında bulunan bütün düğümler için bu test gerçekleştirilir (Tablo 22).

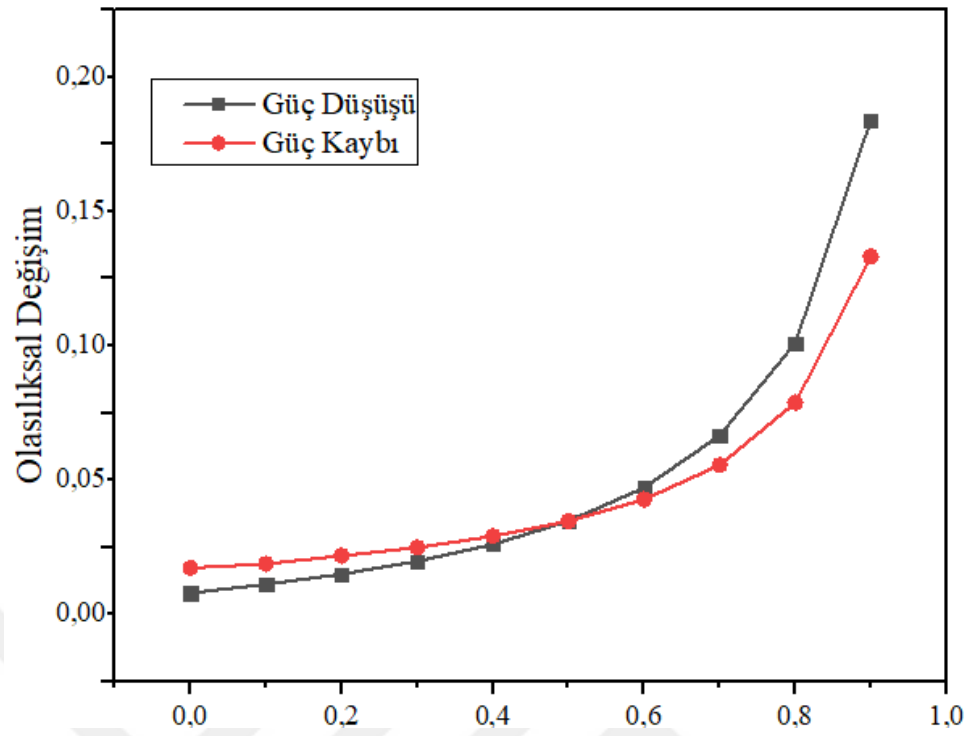
Tablo 22. Aksiyom 1 test sonuçları

Durum	Güç düşüşü (%)	Gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar (%)	Durum	Güç kaybı diğer parametreler (%)	Güç kaybı (%)
Normal	5	6	Normal	4	4,3
Kötü	100	63	Kötü	100	9
İyi	0	3	İyi	0	4,1
Durum	Güç kaybı (%)	Gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar (%)	Durum	Soğutma suyu sıcaklığı (%)	Soğutma suyu parametreleri (%)
Normal	4	6	Normal	6	4
Kötü	100	44	Kötü	100	29
İyi	0	4	İyi	0	2
Durum	Soğutma suyu parametreleri (%)	Güç düşüşü (%)	Durum	Soğutma suyu basıncı (%)	Soğutma suyu parametreleri (%)
Normal	4	5	Normal	4	4
Kötü	100	26	Kötü	100	24
İyi	0	4	İyi	0	3
Durum	Egzoz gazı ve hava parametreleri (%)	Güç düşüşü (%)	Durum	Egzoz gazı sıcaklığı (%)	Egzoz gazı ve emme hava parametreleri (%)
Normal	5	5	Normal	8	5
Kötü	100	35	Kötü	100	35
İyi	0	3	İyi	0	3
Durum	Yağlama yağı parametreleri (%)	Güç düşüşü (%)	Durum	Egzoz gazı sıcaklık sapması (%)	Egzoz gazı ve emme hava parametreleri (%)
Normal	4	5	Normal	5	5
Kötü	100	16	Kötü	100	31
İyi	0	4	İyi	0	4

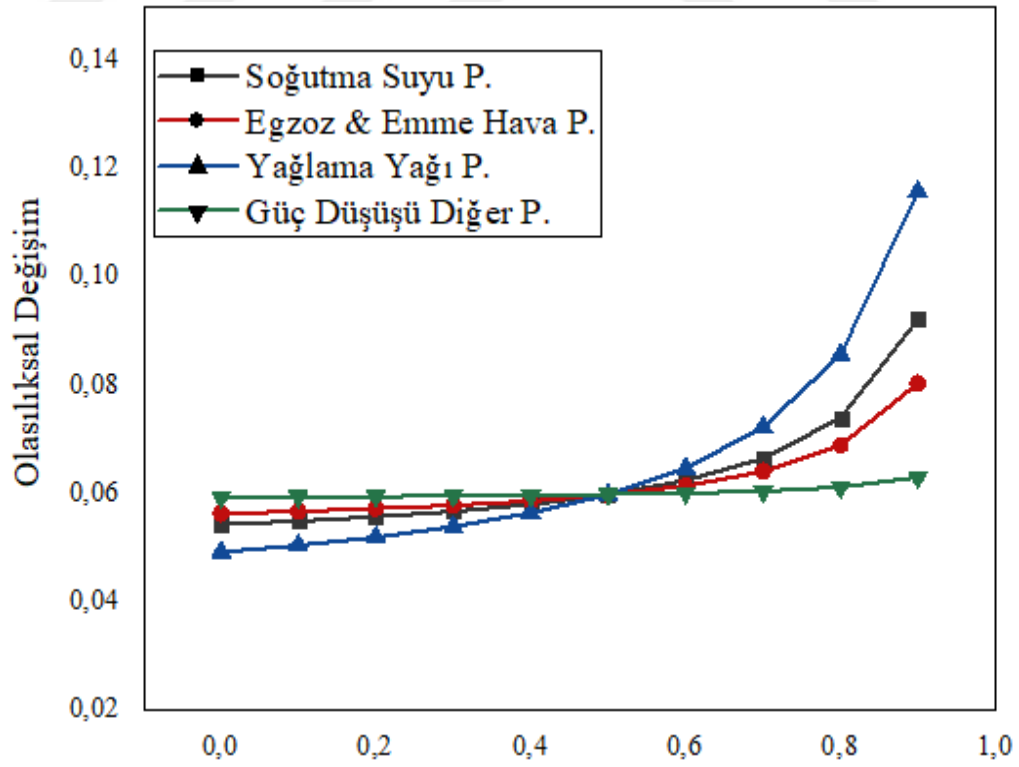
Tablo 22'nin devamı

Durum	Güç düşüşü diğer parametreler (%)	Güç düşüşü (%)	Durum	Scavenç sıcaklığı (%)	Egzoz gazı ve emme hava parametreleri (%)
Normal	3	5	Normal	5	5
Kötü	100	12	Kötü	100	27
İyi	0	4	İyi	0	4
Durum	Yağ yağı sıcaklığı (%)	Yağlama yağı parametreleri (%)	Durum	Srast ped sıcaklığı (%)	Güç düşüşü diğer parametreler (%)
Normal	5	4	Normal	3	3
Kötü	100	24	Kötü	100	4
İyi	0	3	İyi	0	2,8
Durum	Yağlama yağı basıncı (%)	Yağlama yağı parametreleri (%)	Durum	Srast ped sıcaklığı (%)	Güç kaybı diğer parametreler (%)
Normal	4	4	Normal	3	4
Kötü	100	26	Kötü	100	5
İyi	0	3	İyi	0	3,6
Durum	Yağ debisi (%)	Yağlama yağı Parametreleri (%)	Durum	Ana makine devri (%)	Güç kaybı diğer parametreler (%)
Normal	3	4	Normal	6	4
Kötü	100	15	Kötü	100	17
İyi	0	3,6	İyi	0	3
Durum	Yağ sis yoğunluğu (%)	Yağlama yağı Parametreleri (%)	Durum	Yakıt beslemesi (%)	Güç kaybı diğer parametreler (%)
Normal	3	4	Normal	7	4
Kötü	100	10	Kötü	100	17
İyi	0	3,7	İyi	0	3
Durum	T/C devri (%)	Güç düşüşü diğer parametreler (%)	Durum	Eksenel vibrasyon (%)	Güç düşüşü diğer parametreler (%)
Normal	7	3	Normal	3	3
Kötü	100	17	Kötü	100	6
İyi	0	2	İyi	0	2,7

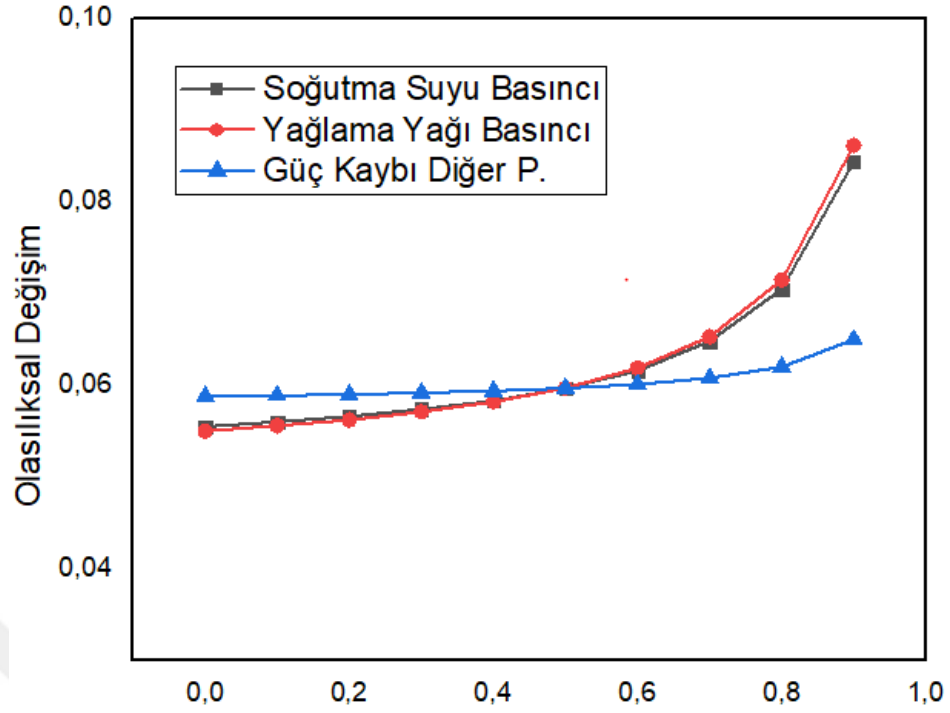
Aksiyom 2 Testi: Aksiyom 2 testinin geçerliliğinin ispatı için örnek olarak gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza düğümü seçilmiştir. Düğümün ebeveyn düğümleri güç düşüşü ve güç kaybı düğmeleridir. Bu düğümlerin birbirinden bağımsız olarak aşamalı bir şekilde artırılması (%10, %20, %30,.....%100) çocuk düğümlerinin olasılıklarının da aynı oranda artmasına yol açmıştır. Bu durum, ebeveyn düğümlerinin olasılık dağılımlarındaki kademeli, değişikliklerin, çocuk düğümler üzerindeki etkisinin sürekli olarak istikrarlı olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 22, 23 ve 24).



Şekil 22. Gemi güvenirligini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar aksiyom 2 testi



Şekil 23. Güç düşüşü aksiyom 2 testi



Şekil 24. Güç kaybı aksiyom 2 testi

Aksiyom 3 testi: Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza, düğümü ön koşulları güç düşüşü ve güç kaybı düğümleridir. “Güç_kaybı=alarm_var”, “Güç_azalması=alarm_var” tek tek girildiğinde “Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza=arızalı” olasılık değeri sırasıyla %62,5, %44’tür. Birlikte girildiğinde “Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza=arızalı” olasılığı %100 olmaktadır. Tablo 23, 24 ve 25’de güç düşüşü ve güç kaybı aksiyom 3 test sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlar aksiyom 3 testi için tutarlı olup Bayes Ağının diğer düğümleri içinde uygulanmıştır.

Tablo 23. Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar aksiyom 3 testi

Güç düşüşü	Güç kaybı	Gemi güvenilirliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar
0.046	0.044	0.061
1	0.044	0.625
0.045	1	0.44
1	1	1

Tablo 24. Güç düşüşü aksiyom 3 testi

Soğutma suyu parametreler	Egzoz ve emme havası parametreleri	Yağlama yağı parametreleri	Güç düşüşü diğer parametreleri	Güç düşüşü
0.038	0.054	0.039	0.028	0.046
1	0.054	0.039	0.028	0.26
0.038	1	0.039	0.028	0.35
0.038	0.054	1	0.028	0.16
0.038	0.054	0.039	1	0.12
1	1	1	1	0.81

Tablo 25. Güç kaybı aksiyom 3 testi

Soğutma suyu basıncı	Yağlama yağı basıncı	Güç kaybı diğer parametreler	Güç kaybı
0,036	0,049	0,036	0,044
1	0,049	0,036	0,219
0,036	1	0,036	0,229
0,036	0,049	1	0,0962
1	1	1	0,540

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Giriş

Arıza modellemeleri, risk analizi veya kaza analizleri gibi çalışmaların bir parçası olarak gerçekleştirilen hassasiyet analizinin amacı, sistemin performansını etkileyebilecek olası değişikliklerin sonuçlara olan yansımalarını gözlemlemektir. Önlem amacıyla alınan çözümlerin sisteme faydasını ortaya koyar veya olumsuzluk durumu en yüksek düzeye ulaşırsa, sisteme vereceği potansiyel zararın tahmin edilmesine katkı sağlar. Başka bir ifadeyle sistemin girdilerinde gerçekleştirilen değişikliklerin çıktılar üzerindeki etkilerini belirler. Diğer düğümler sabit tutulmak şartıyla, hassasiyet analizi uygulanan düğümün olasılığı, en iyi önsel olasılık (%0) ile en kötü sonsal olasılık (%100) şeklinde uygulanıp her bir düğüm için analiz gerçekleştirilmiştir

3.2. Hassasiyet Analizi Bulguları

Bayes Ağında gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arıza sonuç düğüm olup çalışmanın problemini temsil etmektedir. Tablo 26’da hassasiyet analiz sonuçları gösterilmektedir. Arıza ağ çatısı genelden özele doğru olması nedeniyle olasılıksal değişiminde bu yönde düşmesi beklenen bir durumdur. Yani, hedef düğüme yakın değişkenlerin olasılık değişimleri her zaman daha yüksektir. Bu sebeple çocuk düğüme en fazla etkiye sahip ebeveyn düğümün tespit edilmesi amacıyla her bir ebeveyn düğüm için hassasiyet analizleri de uygulanmış ve çeşitli grafiklerle verilmiştir.

Tablo 26. Gemi güvenirliliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar hassasiyet analizi

Düğüm Adı	Önsel olasılık	%0	%100	Olasılık
Güç düşüşü	6	3	63	60
Güç kaybı	5	4	45	41
Soğutma suyu parametreler	4	5,5	19,9	14,4
Egzoz ve Emme parametreleri	5	5,0	24,5	19,5
Yağ parametreleri	4	5,7	14,6	8,9
Güç düşüşü diğer parametreler	3	6,0	7,8	1,8
Güç kaybı diğer parametreler	4	5,9	8,5	2,6
Soğutma suyu sıcaklığı	6	5,7	11,8	6,1
Soğutma suyu basıncı	4	5,3	16,4	11,1
Egzoz gaz sıcaklığı	8	4,9	11,7	6,8

Tablo 26'nın devamı

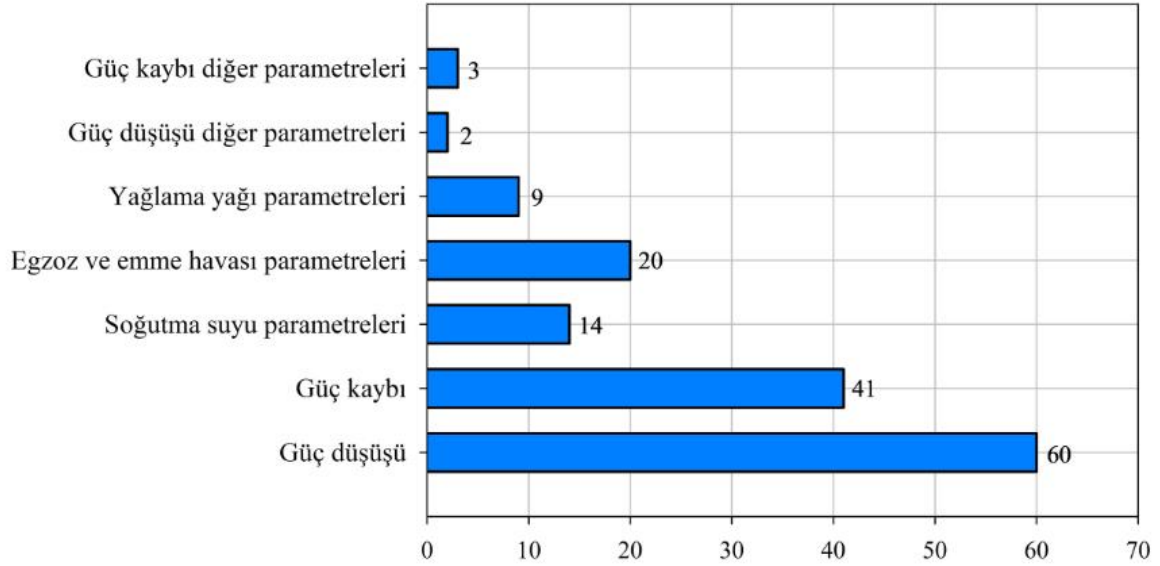
Düğüm Adı	Önsel	%0	%100	Olasılık
Egzoz sıcaklık sapması	5	5,9	12,9	7
Scavenç sıcaklığı	5	5,7	12,2	6,5
Yağlama yağ sıcaklığı	5	5,7	11,2	5,5
Yağ yağ basıncı	5	5,5	16,7	11,2
Yağ debisi	3	6,0	8,8	2,8
Yağ sis yoğunluğu	3	6,0	8,4	2,4
T/C devri	7	5,9	7,8	1,9
Eksenel vibrasyon	3	6,0	7,8	1,8
Srast ped sıcaklığı	3	6,0	8,5	2,5
Ana makine devri	6	6,0	6,9	0,9
Yakıt beslemesi	7	5,9	8,0	2,1
Ana makine yapısal uygunsuzluklar	9	5,4	12,2	6,8
Akışkan uygunsuzlukları	9	5,4	12,4	7,0
Ana makine çalışma koşul uygunsuzluk	8	5,9	7,5	1,6
Kontrol sistemi uygunsuzlukları	4	5,8	10,3	4,5
Makine yaşı	10	6,0	6,7	0,7
Dizayn hatası	3	6,0	6,3	0,3
Bakım uygunsuzlukları	16	5,4	9,4	4,0
İşletme hataları	4	6,0	7,3	1,3
Akışkan karakteristiği	8	6,0	6,5	0,5
Aşırı yükte çalışma	24	5,9	6,4	0,5
Düşük yükte çalışma	7	6,0	6,3	0,3
Gemi titreşim	7	6,0	6,2	0,2
Makine kullanım kılavuzu/bakım aparat uygunsuzluğu	3	6,0	6,4	0,4
Yedek parça uygunsuzluğu	14	5,9	6,9	1
Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk	19	5,7	7,2	1,5
Kısıtlı zaman	18	5,9	6,6	0,7
Hata	19	5,9	6,7	0,8
İhlal	22	5,9	6,5	0,6
Makine personeli göreve hazır olma durumu	30	5,9	6,3	0,4
Makine dairesi personel yönetimi	12	6,0	6,3	0,3
Makine dairesi teknolojik çevre	16	6,0	6,3	0,3
Uygunsuz personel donatımı	21	6,0	6,2	0,2
Uygunsuz planlanmış operasyon	24	5,9	6,3	0,4
Yetersiz denetim	23	6,0	6,2	0,2
Test ve kontroller	11	6,0	6,2	0,2
Makine dairesi fiziksel çevre	30	6,0	6,1	0,1
Personel Zihinsel Durum	50	6,0	6,1	0,1
Ekipman ve yedek parça temini	35	5,9	6,3	0,4
Şirket personel donatım kriteri	20	6,08	6,09	0,01
Eğitim ve tecrübe	45	5,99	6,18	0,19
Prosedür	10	6,07	6,14	0,07
Sıcaklık	35	6,08	6,09	0,01
Gürültü	10	6,08	6,09	0,01
Makine dairesi yerleşim düzeni	10	6,083	6,089	0,006
Hava koşullar	60	5,95	6,16	0,21
Üretici eksiklikleri	2	6,08	6,14	0,06
Uygunsuz kıyı hizmetleri	10	6,07	6,16	0,07
Seyir planlaması	30	6,01	6,24	0,23

Yapılan çalışmada gemi güvenliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar, geminin güç düşüşü ve güç kaybı nedensel faktörleri ile ilişkilendirilmiştir. Her iki durumda gemi güvenliğini olumsuz etkilenecektir. Özellikle kritik gemi manevra hareketlerinin yapıldığı

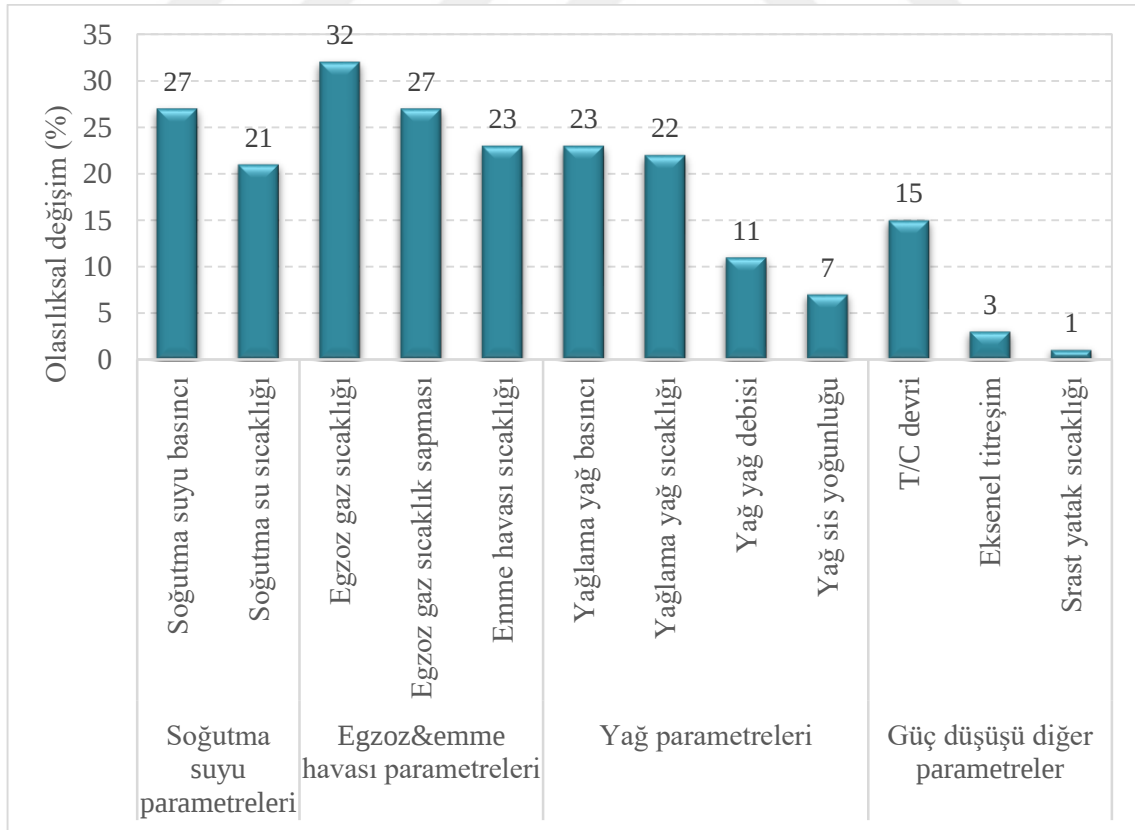
durumlarda daha ağır sonuçlarla karşı karşıya kalılabilmektedir. Endüstri 3.0 ile birlikte bilişim ve otomasyonun gemi ana makinesinde kullanımının yaygınlaşması, insansız ana ve yardımcı makinelerin çalışma sürekliliğinin sağlanması ve verilerin izlenebilir olmasına imkan sağlamıştır. Otomasyon sisteminde gemi ana makinesi verileri ile ilgili bir uygunsuzluk olma durumunda sistem kendini korumak, gemi makine personelinin uyarmak ve gerekli önleyici faaliyetin yapılması amacıyla pek ağır yola (dead slow) geçiş yapacaktır. Yani geminin gücünde bir düşüş yaşanacaktır. Önlem alınmama durumu veya arızanın giderek şiddetini artırması durumunda ana makine güç kaybı yaşayacaktır (Matulic vd., 2020; Martinovic vd., 2011). Japon P&I Kulübü'nün 1995-2014 yılları arasında yayımladığı rapor, ana makine dairesinde meydana gelen hasarların gemi operasyonlarını etkileyerek iki temel sonuca yol açtığını ortaya koymaktadır: römorkaj ihtiyacı ve gemi hızının 7 knot'ın altına düşmesi (URL-6, 2024). Raporda dikkat çeken bir diğer önemli unsur, gemi hızında düşüş (7 knot'ın altına düşme) ile ilgili hasar oranlarının genel olarak yüksek seviyelerde seyretmesidir. Yıllar boyunca bu tür hasarların oranının diğerlerine kıyasla daha belirgin olduğu ve neredeyse tüm yıllarda sabit veya yüksek kaldığı görülmektedir. Bu durum, hız azalmasıyla sonuçlanan arızaların gemi operasyonlarını daha fazla etkilediğini göstermektedir. Chang ve Park (2019) yapmış oldukları hasar ve can kaybı modelinin sonuçlarında, hız düşüşünün gemi hasarlarını artırdığını ve her kazada daha fazla can kaybına yol açtığını belirlenmiştir. Benzer şekilde, Bayes Ağı hassasiyet analizi değerlendirildiğinde güç düşüşü ve güç kaybı etki derecesi sırasıyla %60 ve %41 olarak belirlenmiştir (Şekil 25). Güç düşüşünden sonra güç kaybının yaşanma durumu düşünüldüğünde güç azalma olasılığının daha yüksek çıkacağı beklenebilir. Bir filtrenin kirlenmesi durumu gibi zamana bağlı uygunsuzluklarda gemi güç kaybı engellenebilir. Yedek filtrenin devreye alınması veya hazır konumda bekletilen diğer yağlama yağı pompası sisteme dahil edilmesi geçici yağlama yağ basınç düşüşünü tolere edecektir.

Bir geminin güç düşüşü soğutma suyu parametrelerindeki bir uygunsuzluk, egzoz ve hava parametrelerindeki bir uygunsuzluk, yağlama yağı sistemindeki bir uygunsuzluk ve güç kaybına neden olan diğer faktörlerden kaynaklı olabilir. Hassasiyet analizine göre güç düşüşünü etkileyen değişkenlerin etki büyüklükleri ve sıralamaları Şekil 26'da gösterilmektedir. Bayes Ağına göre, geminin güç düşüşüne en fazla etkiye sahip değişken %20'lik bir etki ile egzoz ve emme havası parametreleri olmuştur. Egzoz gaz ve hava parametrelerindeki uygunsuzluk en fazla egzoz gaz sıcaklığının yüksekliği (%32) nedeniyle

ortaya çıkmakta, bu durumu %27 olasılıksal değişim ile egzoz gazı sıcaklık sapması, %23 olasılıksal değişim ile emme havası sıcaklığı takip etmektedir.



Şekil 25. Gemi güvenliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızalar hassasiyet analizi



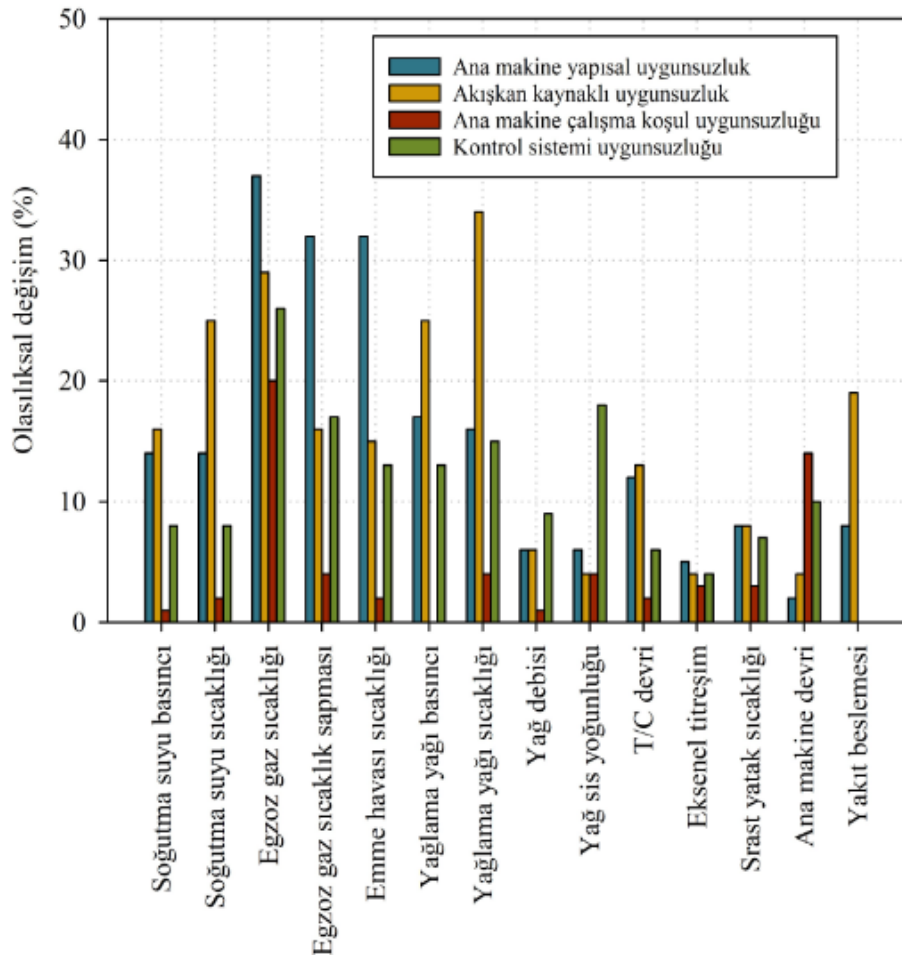
Şekil 26. Güç düşüşü hassasiyet analizi

Egzoz gazı ile ilişkili değişkenler, yanmanın kalitesi ve makinenin genel performansı hakkında kritik bilgiler sunmaktadır. Egzoz gazı sıcaklık limitinin aşılması motor bileşenlerinin daha yüksek ısı yük altına girmesine ve makine elemanlarının ömrünü kısaltabilir. Egzoz gazı sıcaklığının yükselmesi, ana makine ekipmanlarındaki yapısal kusurlar, yanma için gerekli hava-yakıt dengesizliğinden kaynaklanan akışkan sorunları, geminin aşırı yük altında çalışmasından doğan işletme koşulları ve kontrol sistemindeki bir arıza veya hatalı okumadan kaynaklanabilir. Oturma, çatışma veya gemi gövdesinin kirlenmesi vb. durumlar egzoz gaz sıcaklıklarını artıran diğer nedenler olduğu söylenebilir. Ancak çalışma, ana makine kaynaklı arızalar olması nedeniyle değerlendirilmeye alınmamıştır.

Modelde yapısal uygunsuzlukların Şekil 27’de gösterildiği gibi egzoz gazı sıcaklığının yüksek çıkmasında %37, egzoz gazı sıcaklık sapmasında %32 ve emme mahali sıcaklığının yüksek çıkmasında %32 oranında etkili olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yapısal uygunsuzlukların en önemli nedensel faktörler arasında yer aldığını göstermektedir. Yapısal uygunsuzluklar egzoz gaz sıcaklık ve sapması için değerlendirildiğinde ana makinenin güç üretiminde kritik rol oynayan yanma odası bileşenleri (piston, egzoz valfi, segman, silindir gömleği, enjektör) ve turboşarj kaynaklı arızalar nedeniyle açığa çıkmaktadır (Rubio vd., 2018). Kırılma, çatlama, aşınma, tıkanma ve kirlenme genellikle bu süreçlerin temel gelişim biçimleridir. P&I Kurumu’nun yayımlamış olduğu raporda 1995-2014 yılları arasında meydana gelen arızaların donanımsal bazda incelendiğinde, %50’sinin turboşarj ve silindir grubu gibi yanma odası bileşenlerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Aynı yıllar arasında Japonya kıyı yük gemileri için değerlendirildiğinde bu oran %70’dir. Knezević vd. (2020), Hu vd. (2021), Rubio vd. (2018) termodinamik arıza teşhis çalışmalarındaki bulgular ana makine yapısal uygunsuzlukların egzoz gaz sıcaklıklarına etkisini açıkça göstermektedir.

Hava filtresi ve kompresör kanatlarındaki kirlenme genellikle yakıt ve yağ buharları, yük kalıntıları ve makine dairesinden gelen tozdan kaynaklanmaktadır. Bu durum, turboşarjın hava tarafında akış direncinin artmasına neden olur ve sonuç olarak yanma süreci için sağlanan hava miktarını ve turboşarjın genel verimliliğini azaltır. Silindirlere sağlanan yetersiz hava ile yanma süreci düzgün gerçekleşmez ve aynı zamanda yakıt tüketiminde artışa yol açar. Her silindire sağlanan hava miktarı azaldıkça, artan yakıt enjeksiyonu egzoz gazı sıcaklıklarının yükselmesine neden olur ve bu durum sonunda yüksek egzoz gazı sıcaklığı alarminin aktif hale gelmesine ve ana makinenin güç düşüş çalışma modunun devreye girmesine yol açar. Hava filtresindeki %40’lık bir kirlenme egzoz gazı sıcaklığını

226°C arttırmaktadır. Benzer şekilde, hava soğutucusunun su ve hava taraflarındaki %50'lik oranında kirlenmelerin, sırasıyla 57°C ve 170°C'lik ortalama egzoz gaz sıcaklık artışlarına neden olmaktadır. Turboşarj bileşenleri üzerindeki kirlenmelerin de motorun genel termal dengesini bozduğu görülmektedir. Türbin tarafındaki %90'lık kirlenme, egzoz gazı sıcaklığında 100 °C'lik bir artışa neden olurken, kompresör tarafındaki aynı oranlardaki kirlenmenin etkisinin daha sınırlı olduğu (10°C'lik bir artış) belirtilmiştir.



Şekil 27. Genel hassasiyet analizleri

Yüksek scavenç hava sıcaklığının başlıca yapısal uygunsuzluk nedeni hava soğutucusudur (Rubio vd., 2018). Özellikle geleneksel soğutma sistemine sahip gemilerde, su tarafının deniz suyu ile soğutulması sürecinde sıkça tıkanma olayları gözlemlenmektedir. Hava soğutucusundaki soğutma suyu borusunun tıkanması ve kireçlenmesi, hava soğutucusunun verimliliğini düşürür ve emilen hava sıcaklığının artmasına neden olur (Zhu vd., 2023; Patil vd., 2024). Hava tarafında ise, makine daire havasının yağ ve yakıt buharı

içermesi, kirlenmenin başlıca nedenidir. Knezevic vd., (2020) hava soğutucundaki su tarafındaki %50'lik bir kirlenme temiz bir hava soğutucuna kıyasla emme mahalindeki hava sıcaklığını yaklaşık 37 °C'den 117 °C'ye çıkarabildiği raporlanmıştır. Aynı çalışmada hava tarafındaki kirlenme emme mahalinde hava sıcaklık değerinde düşüşe, kompresör kanatlarındaki bir %90'lık bir kirlenme 4 °C'lik bir sıcaklık artışına neden olmaktadır. Ayrıca, emme mahalinde meydana gelen yangın, emme havası sıcaklığının artışını tetikleyen bir diğer yapısal uygunsuzluk kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Örneğin, 2017 yılında M/V Sagan gemisinde piston segmanlarının kırılması sonucunda bir emme mahali yangını meydana gelmiş ve gemi güç düşüşüne yaşamış ve neticesinde gemi kayalıklara oturmuştur (URL-7, 2024).

Egzoz gaz ve emme havası parametrelerinde en fazla etkili olan ikinci değişken akışkan kaynaklı uygunsuzluklardır. Bayes Ağı hassasiyet analizine göre akışkan kaynaklı uygunsuzluk yüksek egzoz gaz sıcaklığı için %29, egzoz gaz sıcaklık sapması için %16, emme sıcaklık için %16 olasılıksal bir değişime sahip olduğu bulunmuştur. Yanma sürecinin verimli gerçekleşebilmesi için hava ve yakıtın uygun koşullar altında sağlanması gerekmektedir (Li ve Lu, 2017). Emme havası veya yakıtın fiziksel parametreleri yanma için ideal değerlerde olmadığında, eksik yanma meydana gelir ve ard yanma oluşur. Ard yanma sonucu üretilen ısı enerjisinin krank mekanizmasına aktarılmadığı düşünüldüğünde, bu enerji yüksek egzoz gaz sıcaklığı olarak ortaya çıkacaktır (Lalic, 2016). Yakıtın bütün silindirler için ortak bir akışkan olduğu düşünüldüğünde uygunsuzluk durumunda bütün silindirlerin egzoz gaz sıcaklıkları artması beklenir. Bu durum, egzoz gaz sıcaklık değerinin egzoz gaz sıcaklık sapmasından olasılıksal kıyasla daha yüksek çıkmasının temel nedeni olarak değerlendirilmektedir. Yakıt uygunsuzlukları yakıtı özgü sorunlar ve yakıt ıslah yöntemlerindeki eksikliklerinden kaynaklanabilmektedir.

Emme havasının kalitesi, emme havası sıcaklık ve basıncının uygun değerde olmasına bağlıdır. Emme havası sıcaklığını etkileyen akışkan kaynaklı uygunsuzluk, soğutma suyu sıcaklığının ve makine dairesi hava sıcaklığına yüksek olmasıdır (Hu vd., 2021). Gemiler, kıştan yaz ve arktik bölgelerden tropikal alanlara dünyanın farklı bölgelerinde değişken iklim koşullarına maruz kalmaktadır. (Heywood, 2018). Bu nedenle, ana makine soğutma suyu ve makine dairesi sıcaklıkları, geminin seyir bölgesine bağlı olarak değişkenlik gösterir (Stanivuk vd., 2021; Heywood, 2018). Özellikle sıcak iklimlerde faaliyet gösteren gemiler açısından, emme havası sıcaklığının kritik bir parametre olduğu söylenebilir.

Kontrol sistemi uygunsuzluklarının, gemi ana makinesi egzoz gazı & emme havası parametrelerinde etkisi; egzoz gaz sıcaklığı için %27, egzoz gaz sıcaklık saptması için %17 ve emme havası sıcaklığı için %13 oranlarında hesaplanmıştır. Gemi ana makinesi sıcaklıkları genellikle termokupl ile ölçülmektedir, ancak uzun süreli kullanım sonrasında yüksek sıcaklık, ölçüm noktalarındaki kirlenme gibi faktörler nedeniyle ölçüm saptmaları ortaya çıkabilmektedir (Korczewski, 2015). Yüksek titreşimler hassas ekipmanlarda hasar riski potansiyelini de artırmaktadır. Aynı zamanda yoğunlaşma ve yüksek nem riski taşıyan bir çalışma ortamı bu ekipmanlarda kimyasal korozyona neden olmaktadır (Taylor, 1987). Bağlantı noktalarındaki gevşemeler, kablolardaki kopukluklar veya kart arızaları da egzoz gazı sıcaklık alarmını tetikleyebilen diğer önemli nedenler arasında yer almaktadır. Bayes Ağı hassasiyet analiz sonuçları dikkate alındığında, egzoz gazının doğası gereği yüksek sıcaklık ve yakıt kalıntılarına maruz kalmasından dolayı bu sistemlerde oluşan arızaların daha sık meydana gelmesi beklenebilir.

Çalışma koşullarındaki uygunsuzluk egzoz gaz sıcaklığının artışında yapısal, akışkan ve kontrol sistemi uygunsuzluklardan sonra en az etkili bir düğüm olmasına rağmen, %21'luk olasılıksal değişim ile dikkate değer bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, egzoz gaz sıcaklığı saptması ve emme havası sıcaklıklarına olan etkisi sırasıyla %4 ve %2 gibi nispeten düşük oranlarda kalmaktadır. Bu sonuçlar, çalışma koşullarının en çok egzoz gaz sıcaklığı üzerinde etkili olduğunu, ancak genel performans üzerindeki etkisinin diğer parametrelere göre sınırlı kaldığını göstermektedir.

Bayes Ağına göre, güç düşüşünde etkili ikinci nedensel faktör %14 olasılık değişimi ile soğutma suyu parametreleri olmuştur. Gemi ana makinelerin yanma sürecinde, enerjinin yalnızca %30'u kullanılabilir enerjiye dönüştürülmektedir. Egzoz gazları enerjinin %35'lik kısmını oluştururken geri kalan %35'lik enerji makine bünyesinde kalmaktadır. Makinenin uzun vadeli performansını ve bileşenlerinin ömrünü koruyabilmek için, bu %35'lik ısınnın makine normal çalışma sıcaklığına düşürülmesi kritik bir öneme sahiptir (MAN, 2020; Stanivuk vd., 2021; Pambudi vd., 2021). Optimum soğutma performansını elde etmek için giriş soğutma sıvısının sıcaklığı ve soğutma sıvısının kütleli akış hızı çok önemli bir rol oynamaktadır (Hendre vd., 2023). Soğutma suyu parametrelerine yönelik gerçekleştirilen hassasiyet analizinde, en yüksek etkinin %27 olasılıkla soğutma suyu sıcaklığındaki uygunsuzluktan kaynaklandığı, bunu %21 olasılıkla soğutma suyu basıncının izlediği görülmüştür. Daya ve Lazakis 2023 yılındaki çalışmalarında, soğutma sistemini en düşük kullanılabilirliğe sahip bir alt sistem olarak belirlemiştir. Yapılan hassasiyet analizine göre,

akışkan kaynaklı uygunsuzluklar soğutma suyu sıcaklığı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu (%25), soğutma suyu basıncını da önemli ölçüde etkilediğini (%16) ortaya koymaktadır. Yapısal uygunsuzluklar hem soğutma suyu sıcaklığı hem de soğutma suyu basıncı üzerinde %14'lük benzer etkiler göstermektedir. Kontrol sistemi açısından soğutma suyu sıcaklığı ve basıncına %8'lik etki oranıyla daha düşük bir öneme sahiptir. Çalışma koşulları soğutma suyu sıcaklığına ve basıncına %1'lik düşük bir olasılıksal değişim ile etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Gemi makine dairesindeki soğutma sistemi, deniz suyu ve tatlı su olmak üzere iki ayrı sistemden oluşmaktadır (Stanivuk vd., 2021; Siswantero vd., 2020). Merkezi soğutma sistemine sahip gemilerde, tatlı su soğutma sistemi genellikle yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık devresi olarak ikiye ayrılır (Ceylan vd., 2022). Genel olarak soğutma suyu sistemi, filtre, pompa, ısı değiştirici, termostatik valf, boru ve bağlantı elemanları gibi bileşenlerden oluşmaktadır (Allal vd., 2017; Anantharan, 2020). Bu bileşenlerde meydana gelebilecek operasyonel hatalar veya yapısal arızalar, ana makine tatlı su soğutma sistemi için akışkan kaynaklı uygunsuzluklara yol açabilir. 2009 yılında Thames Fischer tanker gemisinde ısı değiştiricisi deniz suyu filtresinin tıkanması, 2007 yılı Audacity gemisi soğutucunun delinmesi ve 2018 yılında Bulk India gemisinde termostatın arızalanarak ana makinenin durmasına yol açması ve ardından gelişen kaza, yardımcı sistemlerdeki yapısal arızaların denizcilik operasyonlarında kritik sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir (URL 8 ve URL-9, 2024; ATSB, 2018). Ayrıca, 2009 yılında Moondance gemisinde soğutma sistemindeki bir valfin açılmasının unutulması sonucu meydana gelen kaza, operasyonel hataların da ciddi sonuçlara neden olabilmektedir (MAIB, 2009).

Ana makinelerde meydana gelen yapısal uygunsuzluklar, gemi operasyonlarını ciddi şekilde tehlikeye atan önemli soğutma suyu sorunlarına yol açabilmektedir. Silindir gömleğinde oluşan çatlaklar, silindir blok ile kaver arasındaki sızdırmazlık elemanlarında görülen yıpranmalar, soğutma suyu kanalındaki tıkanmalar ve korozyona bağlı kirlenmeler, kaver çatlakları motorun soğutma verimliliğini doğrudan etkileyen temel yapısal unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Bu tür yapısal sorunlar, motorun termal dengesini bozarak ciddi operasyonel kayıplara ve hatta kazalara neden olabilir. 2004 yılında Selendang gemisi 3 nolu silindir gömlek çatlaması ve 2012 yılında FR8 PRIDE 5 nolu silindir gömlek çatlaması sonucu düşük soğutma suyu basınç alarmını tetiklemiştir (NTSB, 2012; NTSB, 2004). 2016 yılında Nenita gemisinde yaşanan kaver çatlaması, 2020 yılında Stara Plania gemisi liner çatlaması yüksek soğutma suyuna neden olmuştur (NTSB, 2016; MSIU, 2021). Her iki

durumda da ana makine güç düşüşü yaşamış ve kazalar yaşanmıştır. Aynı zamanda MARS 2011'deki raporunda soğutma suyu hattındaki tıkanmaları, MARS 201856 ve MARS 201914'da kaver çatlamaları sonrası yaşanan kazalara dikkat çekmiştir (URL-10 ve URL-11, 2024). Yanma odası bileşenlerindeki arızalar, yanma verimliliğinde düşüşe ve buna bağlı olarak egzoz gazı sıcaklığının artışına neden olabilir (Ünver vd., 2019). Bu durum, uzun süreli operasyonlarda soğutma sisteminin etkinliğinin azalmasına ve soğutma suyu sıcaklığının yükselmesine yol açabilmektedir. Yüksek soğutma suyu sıcaklığının bir diğer nedeni ana makine çalışma koşullarındaki uygunsuzluklardır. Olumsuz hava koşullarına sık sık maruz kalınması, motor bileşenleri için aşırı yüklenmelere ve ana makinenin ısınmasına neden olabilir (URL-12, 2024). Geminin ayrıca her bir limana planlanan varış zamanını belirten bir takvimi vardır. Varış zamanındaki herhangi bir gecikme, gemi işletmecisine ekonomik kayıplar veya cezai yükümlülükler olarak yansır (Kian vd., 2019). Donatan ile kiracı arasında imzalanan taşıma sözleşmesine (charter party) göre belirlenen gemi hızının sağlanabilmesi için kaptan ve başmühendis, ana makinenin nominal yükünün üzerinde çalışmasını talep edebilir. Bu durumda ana makinenin aşırı ısınmasını ve soğutma suyu sıcaklıklarında bir artışı tetikleyebilmektedir (Anantharan vd., 2020)

2009-2020 yılları arasında İsveç Sigorta Kurumu'nun gemi gövdesi ve makine sigortası kapsamında sigorta talepleri üzerindeki istatistiksel analizler, belirsiz hasar nedenlerinin ardından en sık rastlanan arıza sebebinin yağlama yağı uygunsuzlukları olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür arızalar, gemi gövdesi ve makine sigorta taleplerinin %13'ünü oluşturarak önemli bir paya sahiptir ve aynı zamanda yağlama hatalarına ilişkin talepler, makine ve ekipman arızaları arasında en yüksek maliyetli olanlar olarak kaydedilmiştir (The Swedish Club, 2020a). İsveç Kulübü'nün bu bulgularının aksine, Bayes Ağı kullanılarak yapılan güç düşüşü hassasiyet analizinde, %9 olasılık değişim ile yağlama yağı parametrelerindeki uygunsuzluklar, üçüncü nedensel değişken olarak belirlenmiştir. Uzman görüşlerine göre, bir geminin ana makinesinde meydana gelen arızalar, kalıcı hasara yol açması, gemi personeli tarafından onarımının mümkün olmaması, operasyonel kesintilere neden olması ya da bir kazaya sebebiyet vermesi durumunda sigorta talebi yapılmaktadır. Bununla birlikte, rutin bakım ile giderilebilen veya geminin yedekli sistemlerinden dolayı tolere edilebilen arızalar genellikle sigorta taleplerine yansıtılmamaktadır. Olsson (2021) yaptığı çalışmada da daha az ciddi ve maliyetli arızaların genellikle sigorta tarafından talep edilmediği bildirilmiştir. Bunun nedeni, sigorta

poliçesindeki muafiyet tutarıdır ve bu tutarın genellikle 100.000 ABD Doları civarında olduğu belirtilmiştir.

Hassasiyet analizine göre, yağlama yağı uygunsuzlukları içerisinde en kritik değişken %23 olasılık değişimi ile yağ basıncıdır. Yağ basıncı, %26 olasılık değişimi ile akışkan kaynaklı uygunsuzluklarla güçlü bir ilişki göstermektedir. Ayrıca, ana makinenin yapısal sorunları %17; kontrol sistemi %13'lük etki oranına sahiptir. Yağlama yağı sistemi; filtre, pompa, basınç kontrol valfi, sıcaklık kontrol valfi, soğutucu, seperatör, şoklu filtre ve bağlantı elemanlarından oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir (Anantharan vd., 2014). Bu bileşenlerdeki tıkanmalar ve kaçaklar yağlama yağı sisteminde basınç düşüşüne neden olacaktır. Yaşanan çeşitli arıza örnekleri bu sistemin kritik önemini de ortaya koymaktadır. Bright Field gemisinde, yağlama yağı pompasındaki titreşim ve ardından meydana gelen arıza, yedekte bulunan pompanın pano hatası nedeniyle devreye girmemesi ve Harmonic Progress gemisinde makine dairesinin su alması, yağlama yağı pompasının devre dışı kalması yağlama yağ basınçlarının düşmesine ve ardından ana makine güç kayıpları yaşanmıştır (NTSB, 1996; URL-13, 2024). Benzer şekilde, MARS 201511 raporunda basınç kontrol valfinin arızalanması; ATSB 229 raporunda metal parçacıkları nedeniyle filtrenin tıkanması; MARS 201318 raporunda yağlama sistemindeki arıza nedeniyle; DNV No. 4 raporunda, yağlama yağı kirliliğinin filtre ve soğutucunun tıkanmasına yol açarak güç kaybına ve sonrasında kazalara neden olmuştur (URL-14 ve URL-15, 2024; ATSB, 2006;). Guron gemisinde, 2019 yılında yaşanan bir olayda yağlama yağı filtresinin hatalı montajı, düşük yağlama yağı basıncına yol açmış ve bunun sonucunda yetersiz yağlama nedeniyle krank milinde geri dönüşü olmayan bir hasar meydana gelmiştir (URL-16, 2024). Olsson (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, yağlama yağı sisteminde en sık karşılaşılan ikinci arıza sebebi olarak %13,3 oranında yağlama yağı filtresi arızası tespit edilmiştir. Ayrıca, Mulyatno vd. (2022) ve Dionysiou vd. (2021) yaptıkları çalışmalarda ise yağlama yağı sistemindeki en düşük güvenilirliğe sahip bileşenlerin yağ filtresi ve yağ pompası olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bakım sırasında motorlar ve filtreler üzerinde gerçekleştirilen bakım faaliyetlerinde unutulmuş bez parçaları veya conta kalıntıları gibi kirlenici içerikler, motor yağ geçiş yollarını tıkaması yağlama yağının yetersizliğine neden olabilmektedir. Bu kirlenici içerikler genellikle filtre bakım işlemleri sırasında meydana gelmektedir (Olsson, 2021). Bu bulgular, yağlama yağı yardımcı sistemlerde meydana gelen yapısal arızaların yağ akış hızını ve dolayısıyla basınç düşüşlerine neden olabileceği, sistemin genel performansını olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Düşük yağlama yağı basıncına yol açan bir diğer önemli etken, ana makinedeki yapısal uygunsuzluklardır. Yataklar veya diğer ekipmanlarda aşınma sonucu dökülen metal parçaları veya bakım veya temizlik işlemleri sonrası unutulmuş bez parçalarının karter filtresini tıkanmasına neden olabilmektedir. Aynı zamanda karter yağ seviyesinin kritik düzeyin altına düşmesi gibi durumlar, düşük yağlama yağı basıncına neden olan ana makine kaynaklı yapısal sorunlar olarak değerlendirilebilir. Özellikle denizde sert hava koşulları sırasında, yağ pompasının emiş kaybına uğraması, ana makinenin yağlama sistemini olumsuz etkileyebilir. Bu gibi zorlu koşullarda, tüm makinelerde yağ seviyesinin optimum düzeyde tutulması güçleşebilir ve hatalı yağ seviyesi alarmı vererek çalışan makinenin durmasına, dolayısıyla ciddi riskler oluşturabilecek tehlikeli durumlara yol açabilir (Anantharan vd., 2020). Viking Sky gemisinde 2019 yılında yaşanan olayda, düşük yağ seviyesi ve kötü hava koşulları nedeniyle yağ pompasının emiş yapamaması sonucu yağlama yağı basıncında ciddi bir düşüş meydana gelmiş ve gemi güç kaybı yaşamıştır (ATSB, 2019). Bu kaza da 1374 yolcu taşıyan geminin bu olayla birlikte ciddi bir felakete dönüşmesine çok yaklaşmıştır. Kontrol sistemindeki arızalar elektriksel veya kart arızalarının yanında genellikle tıkanma, kirlenme ve kırılmalar sonucu sistemin hatalı alarm vermesi sonucu meydana gelebilmektedir. MSC Katie gemisinde yağlama yağı basınç göstergesine giden borudaki tıkanma nedeniyle gemi güç kaybı yaşamıştır. Bu tür boruların periyodik kontrolü ile ilgili motor üreticisinin herhangi bir talimatı veya önerisi yoktur ve gemilerde bu tür kontrollerin yapılması standart bir uygulama değildir. (ATSB, 1998).

Yüksek yağlama yağı sıcaklığı, %21 olasılık değişimiyle yağlama yağı uygunsuzluklarında ikinci en önemli nedensel faktör olarak öne çıkmaktadır. Yüksek yağ sıcaklığını, %31'lük bir etki ile akışkan kaynaklı uygunsuzluklar tetiklemekte, ana makine yapısal uygunsuzluklar ve kontrol sistemi uygunsuzluklar ise %15 oranında eşit derecede bir etki göstermektedir. Buna karşılık, çalışma koşullarındaki uygunsuzlukların etkisi %4 ile en düşük seviyede kalmaktadır. Akışkan kaynaklı uygunsuzluk en önemli nedeni yağ soğutucusu etkinliğinin azalması ile ilişkilidir. OREDA veritabanı göre, ana makine yağlama yağı soğutucusu, en yüksek arıza oranına sahip bileşenlerden biridir (Eriksen vd., 2021). Merkezi soğutma sisteminde LT (düşük sıcaklık) soğutma suyunun ıslahı büyük önem taşırken, deniz suyunda bulunan tuz ve kirlenici diğer içeriklerin hem geleneksel hem de merkezi soğutma sistem verimliliğine olumsuz etkisi de dikkate alınmalıdır. Gemilerin farklı iklimsel bölgelerde çalıştığı düşünüldüğünde deniz suyu sıcaklığı da kritik bir değer olarak karşımıza çıkmaktadır. Bakım esnasında unutulmuş parçalar yağ soğutucu kanalların

tıkanmasına neden olan bir diğer etkidir. Aynı zamanda sıcaklık kontrol valfindeki tutması ve bu valfin hareketini kumanda eden kontrol havasındaki uygunsuzluklar yağlama yağı sıcaklığını direk etki edecektir.

Yüksek yağlama yağı sıcaklığı, ayrıca ana makine yapısal kusurlarından kaynaklanan bir sorundur. Ana makine hareketli parçaları arasındaki sürtünme kuvvetinin artması, yataklar ve piston-silindir bileşenleri gibi kritik unsurların doğru çalışmaması durumunda belirginleşir. Ana makine yanma verimliliğinin düşmesi veya kötü hava koşulları gibi faktörler nedeniyle yüklü çalışması ana makine sıcaklıklarının artmasına yol açar. Motorun işleyişi sırasında, yağlama yağının temel görevlerinden biri de motor bileşenlerinin soğutulmasıdır. Ancak, ana makine sıcaklıklarındaki artışlar uzun vadede yağlama yağı sıcaklığını da etkileyecektir.

Yağlama yağı hassasiyet analizine göre üçüncü nedensel değişken %11 olasılıksal değişim ile yağ sis yoğunluğu dikkate değer olduğu, yağ debisi uygunsuzlukların ise %7 oran ile daha düşük öneme sahip olduğu bulunmuştur. Yağ sis dedektörleri, yağ sisinin veya buharının yoğunluğunu algılamak için genellikle optik veya elektronik sensörler kullanılır (Hu vd., 2020). Dedektör, belirli bir eşik değerinin üzerine çıkan buhar içeriğini algıladığında alarm vererek karter patlamasını engellemek amacıyla bir ön uyarı sistemi şekliyle çalışmaktadır (Smith ve Midgte, 2001; Ünver vd., 2019). Yağ sis yoğunluğu alarmı en sık %18 etki ile kontrol sistemi arızaları kaynaklı meydana gelmektedir. Kaza raporlarında incelendiğinde de en sık yağ sis dedektöründeki arıza nedeni hatalı ölçümlerdir. Finnreel gemisi 2001 yılında, Damgracht gemisi 2022 yılında yağ sis dedektörünün hatalı ölçümü sonrası güç kaybı yaşanmıştır. Aynı zamanda MARS 202002 gemisi yağ sis dedektör bir somunun gevşemesi kaynaklı hatalı ölçmesi, MARS 201746 yağ sis dedektör ölçüm aralığının 1 sn gibi kısa bir süreye ayarlı olması, MARS 201622 raporlarında hatalı ölçümler nedeniyle güç kayıpları yaşamıştır (URL-17-18 ve 19, 2024). Raporlarda yağ sis dedektör ölçümlerinde hatalı olmasının yüksek nem nedeniyle olabileceği üzerinde durulmaktadır. Özellikle yüksek nem içeren bölgelerde çalışan gemilerin limanlarda bakım için makinenin soğutulması yağ sis dedektör su varlığına ve hatalı ölçümlere neden olabilmektedir. (NTSB,2022; URL-19, 2024). Yağ sis dedektörü alarmının tetiklemesi ana makine yapısal kusur açısından değerlendirildiğinde hareketli parçaların almış olduğu hasarlar ve bu bileşenlerin sürtünmeye maruz kalması sonrası yağ sıcaklığının artması ve buharlaşması sonrası meydana gelmektedir. MARS 201434 raporunda önce yağ sis dedektörü alarmı ardından yağ basıncı alarmının vermesi ve geminin kritik bir manevrada

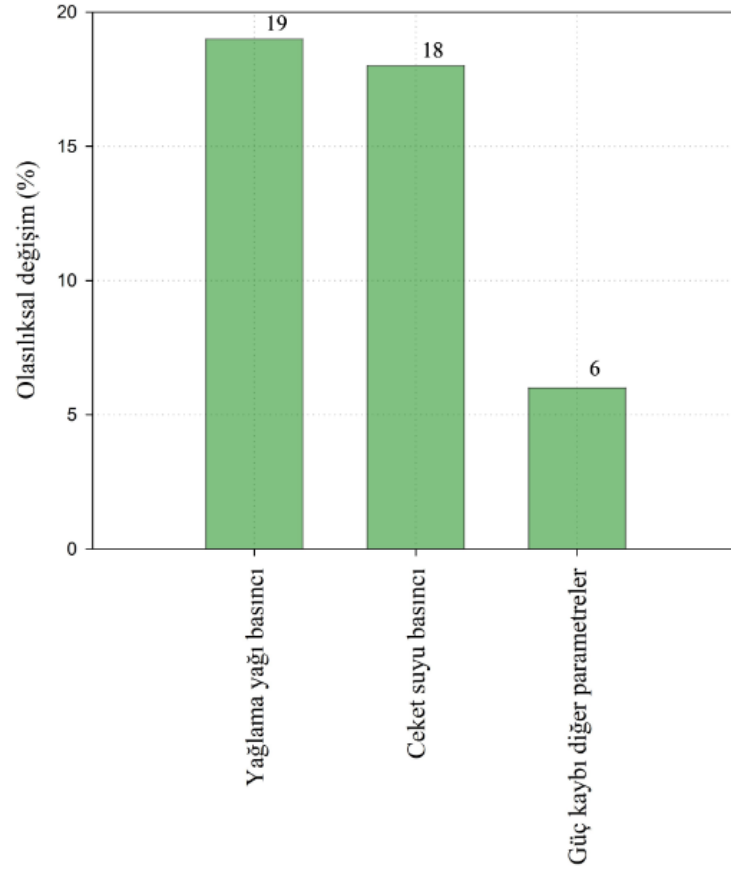
olması nedeniyle müdahale edilememesi sonucu ana yatakların aşınmasına ve geminin 40 gün çalışamamasına neden olmuştur (URL-20, 2024). Ana makine yağ debisi kaynaklı uygunsuzluk piston soğutma yağ dönüş debisindeki bir düşüş kaynaklı oluşmaktadır. Piston soğutma yağ akışındaki uygunsuzluklar sırasıyla %9 kontrol sistemi, %7 ana makine yapısal kusurlar, %5 akışkan kaynaklı arızalar, %1 oran ile çalışma koşulları etkili olurken ana makinenin genel performansı üzerindeki etkisi zayıftır.

Bayes Ağı güç düşüşü nedensel faktörlerinden turboşarj devri, eksenel vibrasyon ve srast yatak ped sıcaklığı “diğer faktörler” başlığı altında değerlendirilmiştir. Turboşarj devri %15’lik bir olasılıksal değişim ile yüksek düzeyde etkili olduğu; eksenel vibrasyon ve srast yatak ped sıcaklığı sırasıyla %3 ve %1’lik etki oranlarıyla düşük öneme sahip değişken olarak hesaplanmıştır. Turboşarj devri hassasiyet analizine göre % 13’lik etki ile akışkan kaynaklı uygunsuzluk, %12’lik etki ile ana makine yapısal uygunsuzluklardır. Kontrol sistem uygunsuzlukları ve ana makine çalışma koşulları sırasıyla %6, %2’lik oran ile önem düzeyleri düşüktür. Turboşarj patlamalarının ana nedeni aşırı hızda çalışmadır (Schieman, 2010; Chybowski vd., 2023). Turboşarj devrinin artma nedenlerinden biri pistondaki bir çatlak veya delinme kaynaklı piston soğutma yağının yanma mahaline ve ardından egzoz stroku esnasında egzoz valfi aracılığıyla egzoz manifolduna taşınmasıdır. Egzoz manifoldunda biriken yağın kendiliğinden tutuşması turboşarja devrinin artmasına neden olabilmektedir (Babrauskas, 2023). Bir diğer neden emme mahalinde meydana gelen bir yangındır. Bu durum, emme mahalindeki yangın nedeniyle silindirlere verilen hava miktarının azalmasıyla oksijen yetersizliğine yol açar. Bu durum, ana makine hızının düşmesine neden olur. Bu gibi durumlarda kontrol sistemi güç kaybını telafi etmek için yakıt miktarını artırır. Artan yakıt ve azalan oksijen durumunda, yanmamış yakıt egzoz manifolduna birikir. Biriken yakıtın tutuşması, turboşarjın aşırı hızlanmasına neden olur (Chybowski vd., 2023). Benzer bir durum, süpürme sistemi bileşenlerinin, özellikle hava filtreleri, soğutucuların temizliği ve emme mahaline ve süpürme portlarına yeterli özen gösterilmemesi sonucu biriken karbon kalıntıları nedeniyle olabilmektedir. 2002 yılında Goliath gemisi 1 ay ara ile iki kez turboşarjında patlama gerçekleşmiştir. Segmanlardaki kaçak nedeniyle emme mahalini kirletmesi, yanma verimini etkilemesi ve yanmamış yakıtın egzoz manifoldunda yanması sonrası meydana gelen yüksek enerji turboşarjın kritik hız sınırını aşmasına ve parçalanmasına neden olmuştur (ATSB, 2002; ATSB,2003)

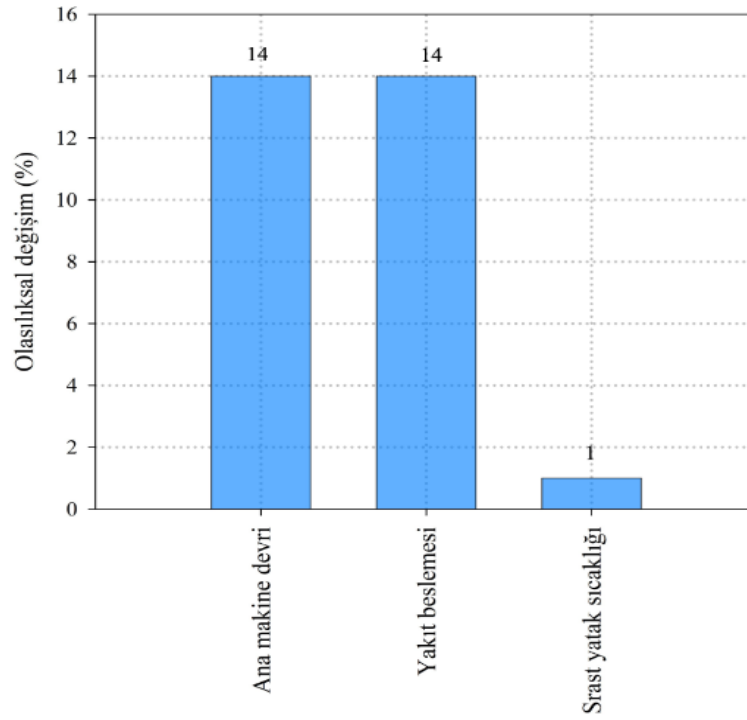
Gemi güç kaybı, yağlama yağı basıncı, soğutma suyu basıncı ve diğer faktörlerdeki uygunsuzluklar nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bayes Ağı hassasiyet analizine göre, düşük

yağlama yağı basıncı %19, düşük soğutma suyu basıncı %18 ve diğer faktörler %6 oranında güç kaybına neden olan olasılıksal değişimlere sahiptir (Şekil 28). Düşük yağlama basıncı ve düşük soğutma suyu, ana makine güç düşüşü nedensel faktörlerle benzer bir durum sebebiyle açığa çıkacaktır. Güç kaybı diğer faktörler ana makine devri ve yakıt beslemesi uygunsuzlukları %14'lik etki ile eşit yüksek öneme sahip olup eksenel vibrasyon %1 etki oranı ile düşük öneme sahiptir. Özellikle kötü hava koşulları, belli bir süre pervanenin suyun dışında kalmasına neden olur. Bu durum, pervanenin etrafındaki dirençteki azalmaya yol açar ve pervanenin aşırı hızlanmasına ve ana motorda yük dalgalanmasına sebep olur (Anantharan vd., 2020). Bir gemi ana makinesi, hareketli parçaların merkezci ve merkezkaç kuvvetleriyle ilişkili mekanik gerilimlere belirli bir çalışma aralığında dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Merkezci kuvvet, dönüş hızının karesi ile doğru orantılıdır ve hız arttıkça gerilim hızla artar. Operasyonel hızın artmasıyla oluşan gerilimler, mekanik bağlantıların dayanıklılığını aşar ve makineye ekta yük bindirir. Bu durum, hareketli parçaların kırılmasına veya ana makinenin hasar görmesine yol açabilir. DNV No. 3/01 raporunda aşırı hızlanma nedeniyle krank kesmesini yaşandığı bildirilmiştir. Aşırı hızlanma bu nedenle ciddi bir güvenlik tehlikesidir ve ölümcül sonuçlar doğurabilecek bir duruma yol açabilir. Bu sebeple ana makine kritik devrin üzerine çıktığında motor kendini korumak amacıyla ilk tepkisi governor kontrolünde yakıt pompası aracılığıyla beslenen yakıt miktarını azaltmasıdır. Yeterli olmadığı durumda makine güç kaybı yaşayacaktır. Ana makine devri hassasiyet analizinde de ana makinenin çalışma koşulları %14 en yüksek etkiye sahip değişken olarak belirlenmiştir. Kontrol sistemi %10 etki ile sınırlı bir etki, akışkan kaynaklı uygunsuzluk (%4), ana makine yapısal uygunsuzluklar (%2) olarak düşük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 29). Saga Sky gemisi 2016 yılında kaza öncesi kötü hava koşulları nedeniyle ana makinenin aşırı hızlanması nedeniyle güç kaybı yaşamıştır (MAIB, 2018). Aynı şekilde Patriot gemisi, kötü hava koşulları nedeniyle önlem olarak devir düşürmelerine rağmen aşırı hızdan güç kaybı yaşanmıştır (NTSB, 1995).

Yakıt beslemesindeki uygunsuzluk hasasiyet analizine göre, akışkan kaynaklı uygunsuzluk %21 yüksek öneme sahip, yapısal uygunsuzluk %7 etki ile daha düşük öneme sahip olduğu hesaplanmıştır. Düşük yakıt tedariki motor arızasının doğrudan nedenidir (Anantharan vd., 2020). Akışkan kaynaklı uygunsuzluklar yakıt yardımcı sistemlerindeki yapısal uygunsuzluklar, operasyonel eksiklikler kaynaklı oluşabilmektedir. Yardımcı yakıt sistemi pompa, akış ölçer, vizkozite ölçer, filtre elemanları, ısıtıcı, valfler, boru ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır (İslam vd., 2019). Bu sistemlerde oluşan kaçaklar, tıkanmalar



Şekil 28. Güç kaybı hassasiyet analizi



Şekil 29. Güç kaybı diğer faktörler hassasiyet analizi

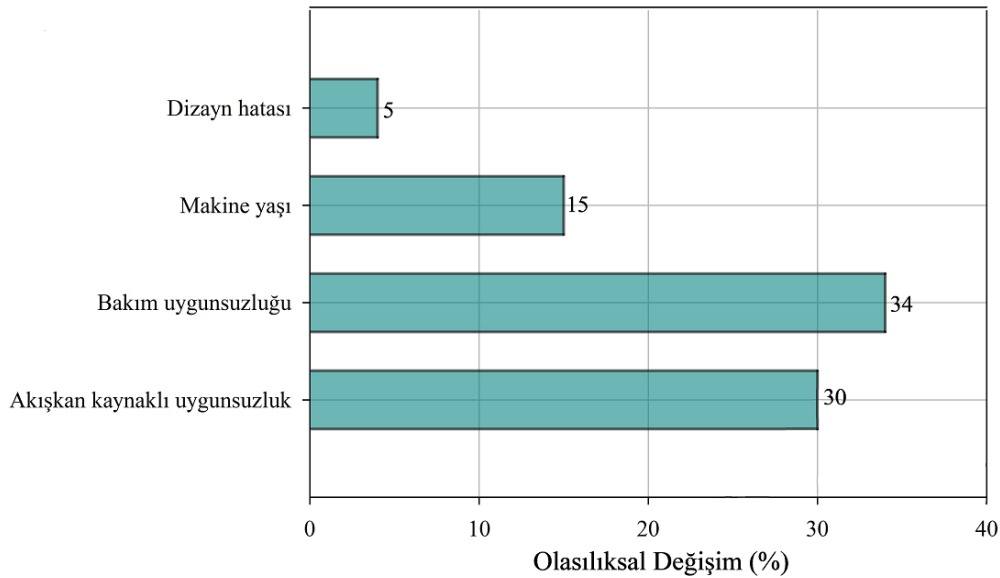
ve aşınmalar ana makine yakıt beslemesinde akışkan kaynaklı sorun olarak karşımıza çıkacaktır. B OCEANIA gemisi 2011 yılında yakıt pompasının arıza yapması ve diğer pompanın panodan yedeklenmemesi sonrası ana makinenin güç kaybına ve ardından geminin batmasına neden olmuştur (MSIU, 2012). DNV No:5 raporunda akış ölçerin tıkanması nedeniyle güç kaybı yaşamıştır. Operasyonel eksiklikler, yanlışlıkla çabuk kapama valfinin aktif hale getirilmesi ve CO₂ tüplerini tetikleyen pano kapağının açılması veya yanlış valf operasyonu kaynaklı olabilmektedir. Kaza raporları incelendiğinde de bu sistemlerin aktif hale getirilmesi sonrası ana makinede güç kaybı yaşandığı görülmektedir. Bu sistemler genellikle makine dairesi yangın gibi acil durumlarda aktif hale getirilen sistemlerdir. Bu sistemlerin devreye sokulması gerçek bir olay durumunda olabildiği gibi, test aşamasında sistemin eski konumunda getirilmemesi veya sistemin çalışması hakkında bilgisi olmayan gemi adamlarının yapmış olduğu hatalardan kaynaklı olabilmektedir. MARS 201160 raporunda sistemin çabuk kapama valfinin test sonrası tekrar kurulmaması, MARS 201311 CO₂ sisteminin yanlışlıkla aktif hale gelmesi sonrası gemi güç kaybı yaşanmıştır (URL-21 ve URL-22, 2024). 2007 yılında Figaro gemisinde güç kaybının titreşim ve vibrasyon nedeniyle CO₂'nin aktif hale gelmesi veya son test sürecinde kapağının kapatılmasının unutulması gibi nedenlere dayandırılmıştır (MAIB, 2015). Aynı zamanda makine dairesi yangın nedeniyle 2005 yılında Opal Naree CO₂ sistemin aktif hale gelmesi 2008 yılında Chemical Master gemisinde çabuk kapama valflerinin aktifleştirilmesi sonrası yetersiz yakıt beslemesi nedeniyle ana makine güç kayıpları yaşanmıştır (ATSB, 2006; MSIU, 2022).

Ana makine yapısal uygunsuzlukları, ana makine eleman ve bileşenlerinde meydana gelen aşınma, yıpranma, delinme, kırılma, tıkanma, sızdırma gibi fiziksel ve işlevsel bozulmaları kapsamaktadır. Bu kapsamda, çeşitli arızalar örnek olarak verilebilir: piston delinmesi, segman aşınması, kırılması veya tutması, enjektörün zamanlamasında yaşanan sorunlar (erken veya geç açma), enjektör memelerindeki tıkanmalar, silindir gömleğindeki aşınmalar, turboşarjın türbin ve kompresör kanatlarında meydana gelen kirlenmeler, egzoz valflerinin aşınması ve valf yuvalarındaki tıkanmalar, emme mahallinde oluşan kirlenmeler, hava soğutucu su ve hava tarafında görülen tıkanmalar-kirlenmeler, turboşarj hava filtresindeki tıkanıklıklar, yakıt pompası arızaları, silindir yağlama sistemindeki sorunlar ve yataklarda meydana gelen aşınmalar. Bu arızalar, genel arıza türleri olarak değerlendirilmiştir; ancak her bir bileşenin kendine özgü arıza durumları da söz konusudur. Şekil 30'da gösterildiği gibi ana makine yapısal uygunsuzluklara yönelik yapılan hassasiyet

analizine göre, bakım uygunsuzlukları %34 oranıyla en yüksek paya sahipken, akışkan kaynaklı uygunsuzluklar %30, makine yaşı %15 ve dizayn hataları %5 oranında olasılıksal değişim göstermektedir. Avustralya Denizcilik Güvenliği Otoritesi'nin (AMSA) yayımlamış olduğu raporda 2019 sonrası bakım ile ilgili eksikliklerin sayısında kademeli bir artış gözlenmektedir (AMSA, 2019). 2023 yılında gemilerin alıkonulma nedenlerinin %35,6'sı, 2022 yılında ise %35,4'ünün bakım sorunlarından kaynaklanmaktadır (AMSA, 2024). SOLAS Bölüm II-1'de gemilerin yapısal, mekanik ve elektriksel gerekliliklerine uygun olarak bakımının yapılmasını zorunlu kılar. Aynı zamanda geminin ve ekipmanların bakımı, ISM Kodunun 10.1 maddenin bir gereğidir ve 10.2 maddesi ayrıca şirketin uyumsuzluklarının raporlanması ve uygun eylemlerin alınmasını sağlanmasını öngörmektedir. Ocean Ranger gemisinin 2011 yılında yaşanan emme mahali yangını ve ardından turboşarjın parçalanması, bakım prosedürlerinin yetersizliğine işaret etmektedir (MSIU, 2012). Yangının temel nedeni olarak, emme mahallinin temizliğinin üretici firma tavsiyelerine uygun olarak planlı bakıma tabi tutulmaması belirtilmiştir. Okoh ve Haugen (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, 80 kazanın yetersiz bakım ve tutumları sonucu gerçekleştiği saptanmıştır. Pillay ve Wang (2003) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, balıkçılık gemilerindeki kazaların %50'sinden fazlası, bakım eksikliği nedeniyle meydana geldiği düşünülen ana makine arızalarına dayanmaktadır.

Ana makine yapısal uygunsuzluklara neden olan ikinci en önemli değişken akışkan kaynaklı uygunsuzluklardır. Akışkan kaynaklı uygunsuzluk yağlama yağı, yakıt, soğutma suyu, yanma havası, silindir yağında meydana gelen kirlilik, bozulma nedeniyle oluşabilmektedir. Yağlama yağındaki uygunsuzluklar katı veya sıvı kirleticiler, yağın deforme olması, yanlış yağ tercihi, operasyonel hatalardan kaynaklı olabilmektedir. Olsson (2021) çalışmasında yağlama sistemindeki en önemli arıza nedeni yağlama yağındaki su varlığıdır. Yağlama yağında bulunan su içeriği, viskoziteyi artırır, oksidasyonu hızlandırır, korozyonu tetikler ve yağlayıcının yük taşıma kapasitesini azaltarak aşınma arızalarına yol açar (Ventikos vd., 2022). Aynı zamanda belirli filtre tasarımlarının, yağlayıcıda su bulunduğunda temizleme verimliliği azaldığı belirtilmektedir (CIMAC, 2008). Yağ su ile kirlendiğinde, yağ filmi gücü zayıflar. Bu durum, bileşenlerin sürtünme sonucu aşınma süreçlerine daha duyarlı hale gelmesine neden olur. Lunt (2011), %0,1 su içeriğinin beklenen yatak ömrünü %75 oranında azaltabileceğini bildirmiştir. Zhao vd. (2020)'de su içeriği ile sürtünme katsayısının arttığını belirtmektedir. Yüksek nem, motor karterinde suyun yoğunlaşmasından neden olabilir ve bu durum, yağlama yağını kirlitebilir. Aynı şekilde, iç

soğutma suyu sızıntıları ile de kirlenebilmektedir (Jao ve Verhelst, 2013). Olsson (2021) çalışmasında seperatör bakımlarının eksik olması, tıkanmış hava soğutucusu tahliye borularının ihmal edilmiş bakımından kaynaklanmaktadır. MARS 202010 raporunda seperatör arızası nedeniyle yağlama yağına su kirliliği yaşanabileceği bildirilmiştir (URL-23, 2024). DNV No.5 raporunda 2006 yılında deniz suyu hattında kaçak makine dairesinin su birikintisine neden olmuştur. Bu su birikintisi kartere girerek yağı kirletmiştir. Karterin temizlenmesi ve yağın yenilenmesi nedeniyle gemi 24 saat sürüklenmiştir. Yağ kulerlerinde delinmeler yağlama yağ basıncının su basıncından daha yüksek olması nedeniyle su ile kirlenme olasılığı düşüktür. Ancak sistem çalışmadığı durumlarda tam tersi bir durum ile karşılaşılabilir. Su varlığı, ayrıca mikroorganizma büyümesine olanak tanır; bu da bakterilerin yağı parçalayarak asitler oluşturmasıyla oksidasyon oranını artırabilir (Wright, 2008). Yağlarda kullanılan birçok katkı maddesi suya duyarlıdır ve su ile temas ettiğinde çözünmeyen tortu oluşturur. Bu maddeler ana makine ve yağlama sistemi içinde dolaşırken, yataklara giden yağ akışı kısıtlanabilir ve tıkanmalara neden olabilir. Bu tıkanıklıklardan biri de piston soğutma nozullarında gerçekleşmesidir. Soğutulmayan piston, yüksek termal gerilmelere maruz kalmakta, deforme ve delinme olasılığı da artmaktadır.



Şekil 30. Ana makine yapısal uygunsuzluk hassasiyet analizi

Su kirliliğinin yanında farklı yağların karıştırılması veya yakıt ile kirlenme yağlama yağı uygunsuzlukları olarak karşımıza çıkabilmektedir. Maersk Tacoma gemisi 2001 yılında salmastra kutusundan gelen kirli yağ kartere transfer edilmesi, filtrenin çalışmaması sonrası

ana yataklar aşınmıştır (ATSB, 2005). MSC Rachele gemisi 2022 yılında yağa yakıtın karışması sonrası karter patlaması gerçekleşmiştir (GISIS, 2022). Yağın elemental analizinde Vanadyum ve Nikel varlığı yakıt kirliliğinin bir göstergesidir. Çünkü bu elementler deniz ağır yakıt içeriğinde yüksek oranda bulunmaktadır. Salmastra kutusundaki sızıntılar, sistem yağının yakıt ile kirliliğinin başlıca nedeni olmakla birlikte, aynı zamanda sistem yağının silindir yağı ile kirlenmesine de yol açabilmektedir. Silindir yağının vizkozitesi yağlama yağından fazla olması nedeniyle, kirlenme durumunda sistem yağı vizkozitesi de artacaktır (CIMAC, 2011). Ana makine bileşenleri arızalandıkça veya aşırı aşınma meydana geldikçe, metal parçacıkları ve kırıntıları yağlama yağına karışır. Bu parçalar, makine içinde yağlama yağı aracılığıyla dolaşırken diğer makine bileşenlerine hasar verebilir. Ayrıca, bu parçalar diğer bileşenler için yağlama yağı beslemesini engelleyebilmektedir.

İkinci akışkan yakıttaki kirlenme veya yakıtın karakteristik sorunlarıdır. Yanma odasındaki korozyon aşınması genellikle soğuk korozyon, sıcak korozyon olarak adlandırılır (CIMAC, 2017). Ağır yakıtların içeriğinde bulunan vanadyum ve nikel yüksek sıcaklıklarda, yüksek sıcaklık korozyonuna nedenidir. Geleneksel olarak, denizcilik endüstrisinde yüksek sülfür konsantrasyonuna sahip ağır fuel oil'ler kullanılmaktadır (Jao ve Verhelst, 2013). Sülfür içeren deniz yakıtlarının yanması sırasında sülfür, su ile reaksiyona girer ve silindir kaplaması duvarlarında sülfürik asit olarak yoğunlaşır ve soğuk korozyona neden olur. Soğuk korozyon olasılığını etkileyen çeşitli faktörler vardır. Öncelikle, yakıtlardaki sülfür içeriği, silindir duvarlarında yoğunlaşabilecek sülfürik asit miktarını belirler. Sülfürik asitlerin yoğunlaşması, yoğunlaşma noktası altında gerçekleşir, bu nedenle yoğunlaşma hızı, silindir duvarı sıcaklığına bağlıdır. Son olarak, silindir yağının alkaliliği, asitleri nötralize etme yeteneğini belirler. Eğer yağın TBN (Total base number) değeri çok düşükse veya yeterli yağ tedarik edilmezse, bu soğuk korozyona yol açabilir. Bir motorun çalışma parametrelerini değiştirmek, yanma odasındaki korozyon seviyesini de etkileyebilir. Bu duruma, yavaş seyir (slow steam) uygulaması örnek gösterilebilir. Bach ve Lubricators (2016) çalışmalarında gemilerin azaltılmış hız ve makine yüklerinde işletilmesi, soğuk korozyondan kaynaklanan aşınma artışına neden olduğunu bildirmişlerdir. Soğuk korozyonu önlemek için, doğru miktarda ve TBN değerinde silindir yağı sağlamak önemlidir (CIMAC, 2017).

Sülfür emisyonlarıyla ilgili çevresel kaygıların ardından, deniz yakıtlarının sülfür içeriği IMO tarafından uygulanan düzenlemelerle adım adım sınırlanmıştır. 2012 yılında,

sülfür limiti %4,5'ten %3,5'e düşürülmüştür. Bu limit, 1 Ocak 2020 tarihinden itibaren daha da kısıtlanarak %0,5'e indirilmiştir (Fanø, 2019). Küresel sülfür emisyonlarıyla ilgili düzenlemelere ek olarak, daha kısıtlayıcı yerel düzenlemeler de dünyanın belirli bölgelerinde yakıtların sülfür içeriğini daha da sınırlamaktadır. VLSFO yakıtları, farklı türlerin bir karışımını içermesinden dolayı birçok sorunu beraberinden getirmiştir. Yakıt kalitesi ve vizkozitesi bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Özellikle yakıt vizkozitesinin düşük olması son zamanlardaki yakıt pompa aşınmalarının en önemli sebebi gösterilmektedir. Birçok uluslararası raporda da bu durum vurgulanmıştır (JHC, 2013; IUMI, 2016; UK P&I Club, 2017). Pride of kent gemisi 2017 yılında düşük sülfürlü yakıt kullanımı nedeniyle yakıt pompalarının aşındığı raporlanmıştır (MAIB, 2017). Yakıtların birbiri ile olan uyumsuzlukları nedeniyle karıştırılması asfalt oluşumu hızlandıracak; yeteri kadar ısıtılmadığında da donacaktır. MARS 201226 yakıtın uygun sıcaklıkta ısıtılmaması sonrası asfalt oluşumuna ve donmasına neden olmuş ve filtrenin kirlenmesi sonrası makine güç kaybı yaşamıştır (URL-24, 2024). Düşük sülfürlü yakıtların katalitik rafinasyon sürecinde açığa çıkan, alüminyum-silikat karışımlarından oluşan ve oldukça sert cat fines parçacıkları bulunabilmektedir (Morton vd., 2013). Yakıt ayırıcıların yakıttaki alümina ve silika içeriğini temizleme kapasitesi çok zayıftır. Bunlar silindir gömleği, segman, piston ve egzoz valfinde ciddi aşınmaların nedeni olabilmektedir. Cat fines parçacıkları yakıtın içeriğinde olabildiği gibi taşınan yükün yakıtı kirletmesi veya emme havasını kirletmesi nedeniyle de yanma odası bileşenlerine zarar verebilmektedir. 2020 DNV NO.1 kaza raporunda segman kırılma nedeni daha önce taşınmış olan alümina yükün havalandırma borusundan yakıt tankına girdiği ve segmanlara zarar verdiği tespit edilmiştir. Yanma odası bileşenlerinin aşınması silindir yağında bulunan kirlenici parçacıkların varlığından kaynaklanabilir. (Olsson, 2021)

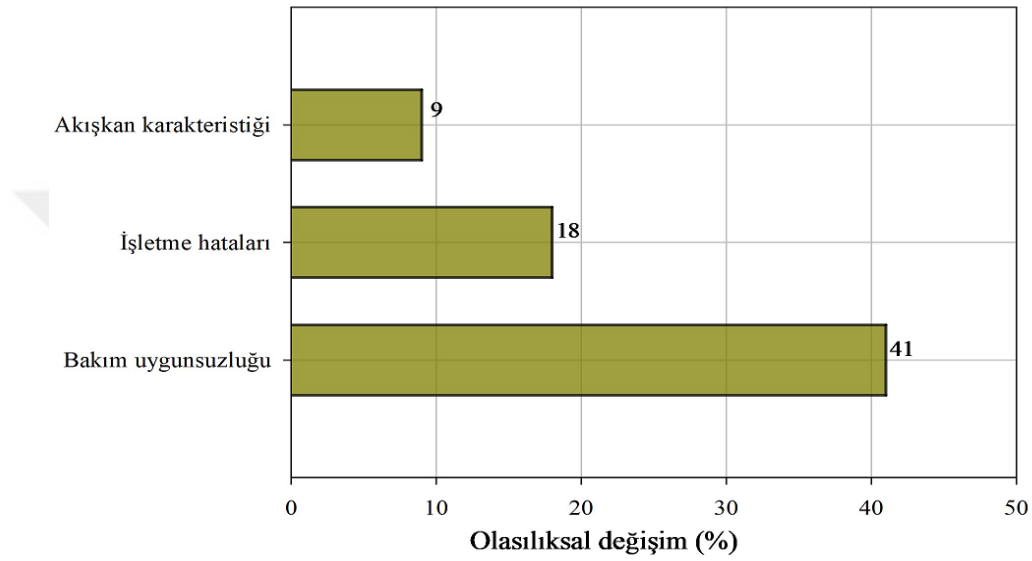
Yakıt ile ilgili bir diğer durum su varlığıdır. Standartlara göre 0.01 su varlığı kabul edilebilir bir değerdir. Jia de ve Braer gemileri, MDO tank havalandırmasından deniz suyunu girmesi sonrası makine devreye alınamamış güç kayıpları yaşanmıştır (JTSB, 2021; URL-25, 2024). Soğutma suyu açısından değerlendirildiğinde ıslah edilmeme durumunda soğutma kanallarında oluşan kışır ve katı parçacıklar soğutma etkinliğinin azalmasına neden olacaktır. Bu durumda motorun yüksek sıcaklıkta çalışmasına ve kaver, silindir gömleği çatlamalarına neden olabilmektedir. Bu durum ana makine soğutma hattındaki o-ringlerden kaynaklanan sızıntılar ile de ilişkilidir. Isı transferinin azalmasına sebep olan yoğun birikintiler, sıcaklıkların artmasına, yerel kaynamalara neden olur. Bu koşullar altında o-

ringler ömrü kısalmır ve deformasyona uğrayarak esnekliklerini kaybederler (URL-26, 2024). Aynı zamanda motorun sıcak çalışması silindir gömleğindeki sıcaklığın artmasına ve yağ filminin kırılmasına neden olabilir. Bu durum silindir gömleğindeki aşınmayı hızlandıracaktır.

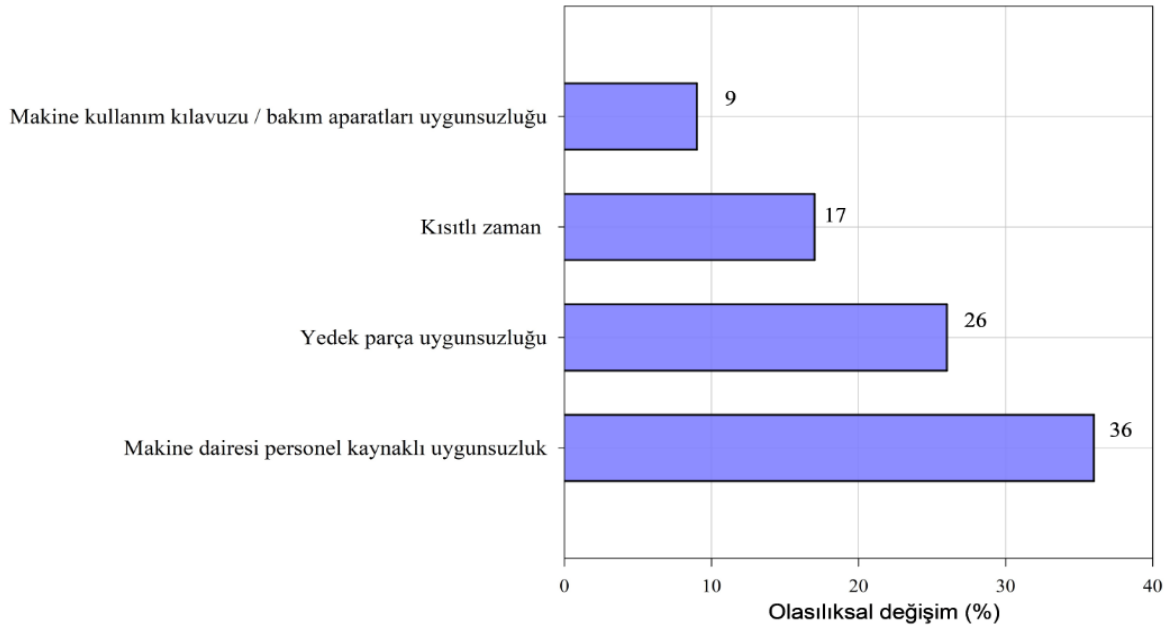
Hassasiyet analizinde yapısal uygunsuzlukların nedensel faktörlerden makine yaşı, üçüncü etkili bir değişken olduğu bulunmuştur. Temel varsayım, her ekipmanın veya makinenin kullanım süresi boyunca yaşlandıkça bir miktar bozulma yaşayacağıdır. Dolayısıyla, bir noktada zaman ve kullanım nedeniyle arızalanması kaçınılmazdır (Jimenez vd., 2020). Chybowski vd. (2019) çalışmalarında ise arızaların %33'ü ilk 1000 saat çalışma sonrası meydana gelmiştir. Havacılık endüstrisinden yapılan bir çalışmada, tüm arızaların %89'unun yaşla ilgili olmadığını bildirilmiştir (Nowlan ve Heap, 1978). Siswantoro vd. (2020) yılındaki çalışmasında da arızaların %11 yaşa bağlı olduğunu %89 rastgele oluştuğunu bildirilmektedir. ABD Donanması MSP çalışmasına göre rastgele arızaların oranı %77 iken, ABD Donanması denizaltıları üzerine yapılan SUBMEPP çalışmasına göre bu oran %71'e ulaşmaktadır. MSP ve SUBMEPP çalışmaları deniz araçları üzerinde yapılan bir analiz olması nedeniyle denizcilik endüstrisinde de bu oran çok farklı değildir (Jimenez vd., 2020). Yapısal uygunsuzluklarda en az etkili değişken dizayn hatalarıdır. MARS 200943 raporunda, ana makine egzoz hattındaki civatalar kopması sonucu orijinal yedekler ile değiştirilmiş ancak tekrar kopmuştur (URL-27, 2024). Yapılan analizlerde civataların üretiminde kusurlu olduğu sonucuna varıldı. M/V Vitaspirit gemisi 2018 yılında 3 nolu silindirde soğutma suyu kaçağı meydana gelmiş ancak ana makine çıkışında herhangi bir valf montajı yapılmadığından kaçak izole edilememiş ve kaza yaşanmıştır (KAİK, 2019)

Bakım uygunsuzluğu ana makine yapısal uygunsuzluklarda olduğu gibi akışkan kaynaklı uygunsuzluklar için de en fazla etkiye sahip değişkendir (Şekil 31). 1988'de Piper Alpha petrol platformunda yaşanan trajik kaza, bakım sırasında meydana gelen bir dizi hata ile sonuçlanmış ve 167 can kaybı ile 4 milyar dolardan fazla maliyete yol açmıştır (URL-28, 2024). Avustralya Deniz Güvenliği Otoritesi yakın zamanda yayımladığı "2024/8 Planlı Bakım" konulu Deniz Duyurusu ile planlı bakımın gemilerin güvenli ve verimli işletilmesindeki kritik rolünü vurgulamıştır (AMSA, 2024). Limanda veya demirde yapılan bakım çalışmaları, arızaların denizde tehlikeli durumlarla karşılaşmanın önlenmesine yardımcı olabilir. Son dönemdeki kazalar, etkili bakım eksikliğinin ciddi sonuçlar doğurabileceğini ve bu durumun gemilerin güvenliği ve işletmesi için büyük riskler oluşturabileceğini göstermektedir. Olsson (2021) çalışmasında yağlama sistemindeki

arızaların %64'ü bakım eksikliği veya bakımın yapılmamasından kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Bakım uygunsuzluğu Bayes Ağı hassasiyet analizinde makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluklar Şekil 32'de gösterildiği gibi %36 ile en fazla etkiye sahip olup, yedek parça uygunsuzluğu %26, kısıtlı zaman %17'lik bir etkiye sahiptir. Makine kullanım kılavuz veya aparat uygunsuzluğu %9 olasılıksal değişim ile diğer değişkenlere kıyasla en az etkili düğümdür.



Şekil 31. Akışkan kaynaklı uygunsuzluk hassasiyet analizi

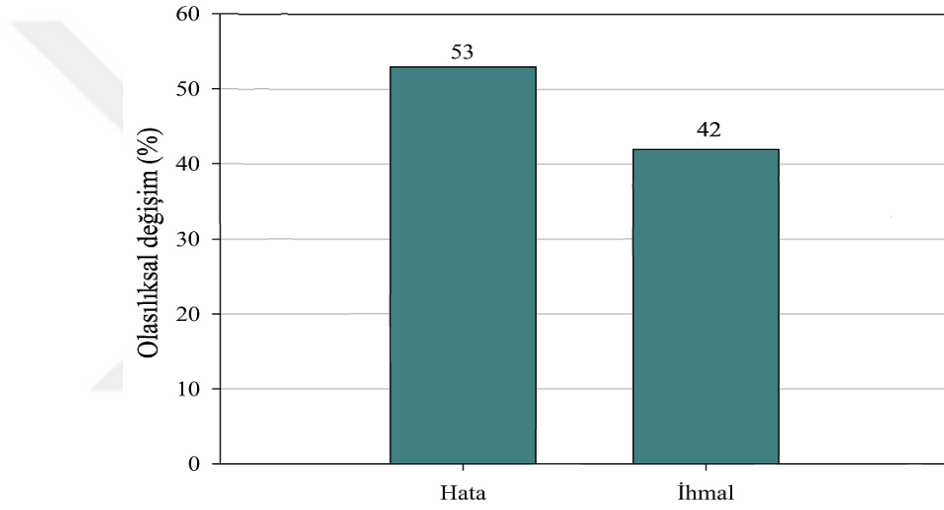


Şekil 32. Bakım uygunsuzluğu hassasiyet analizi

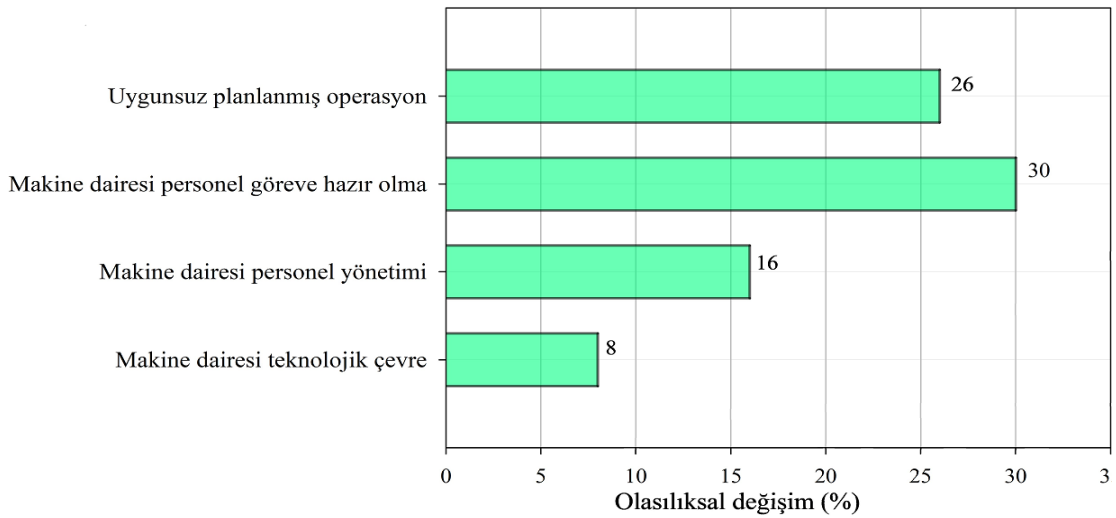
Makine dairesi personeline bağılı uygunsuzluklar, çoğunlukla insan hatası veya ihmali sonucunda meydana gelmekte olup, Şekil 33'te gösterildiğı gibi hassasiyet analizine göre sırasıyla %53 ve %42 oranlarında olasılıksal değışim göstermektedir. Aynı zamanda HFACS yapısının emniyetsiz eylem katmanını temsil etmektedir. Hatalar, bilinçsiz gerçekleştirilen eylemler olup ihlaller ise kural ve yönetmeliklerin bilerek göz ardı edildiğı davranışlardır (Kaptan, 2019). Gemilerin operasyonel faaliyetlerinde bakım, en kritik işlemlerden biridir ve bakım işlemleri tamamen insanlara bağımlıdır (İslam vd., 2017). Gemideki bakım işlemlerinin çoğı zorlu çalışma koşullarında gerçekleştirilmesi, insanların hata ve ihmallerini kaçınılmaz kılmaktadır. Küresel olarak deniz operasyonlarındaki insan hatası deniz kazalarının %75-96'sından sorumludur (Williams, 1996; Youngberg ve Hatlie, 2004; Gatfield ve IEng, 2006; İslam vd., 2018a). Birleşik Krallık merkezli sigorta şirketine göre (UK P&I), insan hatasından kaynaklanan kazalar, denizcilik endüstrisine yılda yaklaşık 541 milyon dolar maliyet getirmektedir (Dhillon, 2007; Ung vd., 2006; İslam vd., 2018). İnsan hatalarının en yaygın olarak bakım operasyonları esnasında meydana geldiğı gözlemlenmektedir. (Hemmatian vd., 2014). Dünya genelinde Macondo ve Buncefield gibi büyük kazalardaki bakım sırasında insan hatası birçok raporda örnek olarak gösterilmeye devam etmektedir (Wilkinson, 2012; Aldrich vd., 2015; Singh ve Gulijk, 2023; Hutchinson vd., 2024). Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliğı Ajansı (EU-OSHA) verilerine göre, Avrupa'daki tüm ölümcül iş kazalarının %10 ile %15'inin bakım işlemleriyle ilişkili olduğı görülmektedir (URL-29, 2024). Bir diğerk çalışmada M/V Guron gemisi ana makine kaynaklı kazanın incelenmesinde insan hatası %80 oranında hesaplanmıştır (Ceylan vd., 2022). Denizcilik, güvenlik açısından kritik bir endüstridir ve deniz operasyonlarındaki insan hata ve ihmallerin ağır sonuçları olabilmektedir. Hata ve ihmaller bir kazaya, can kaybı ve yaralanmalara yanında, gecikmiş operasyonlar nedeniyle önemli ekonomik etkileri olabilir (Pennie ve vd., 2007).

Bayes Ağında makine dairesi personelinin hata ve ihmali, makine personeli göreve hazır olma durumu, makine dairesi personel yönetimi, makine dairesi teknolojik çevre ve uygunsuz planlanmış operasyonlar olmak üzere 4 düğüm altında değerlendirmeye alınmıştır. Makine dairesi personeli göreve hazır olma durumu hata hassasiyet analizine göre %30 etki ile en önemli değışken, ihlal hassasiyet analizinde %25 etkiye sahip olduğı bulunmuştur (Şekil 34-35). Gemi makine personelinin göreve hazır olması, fiziksel ve zihinsel bir kısıtlamanın olmama durumuna, bakımı yapacak personelin eğitim durumu, gemiye ve arızaya aşinalık durumuna bağılıdır. Gemi makine personeli, performanslarını

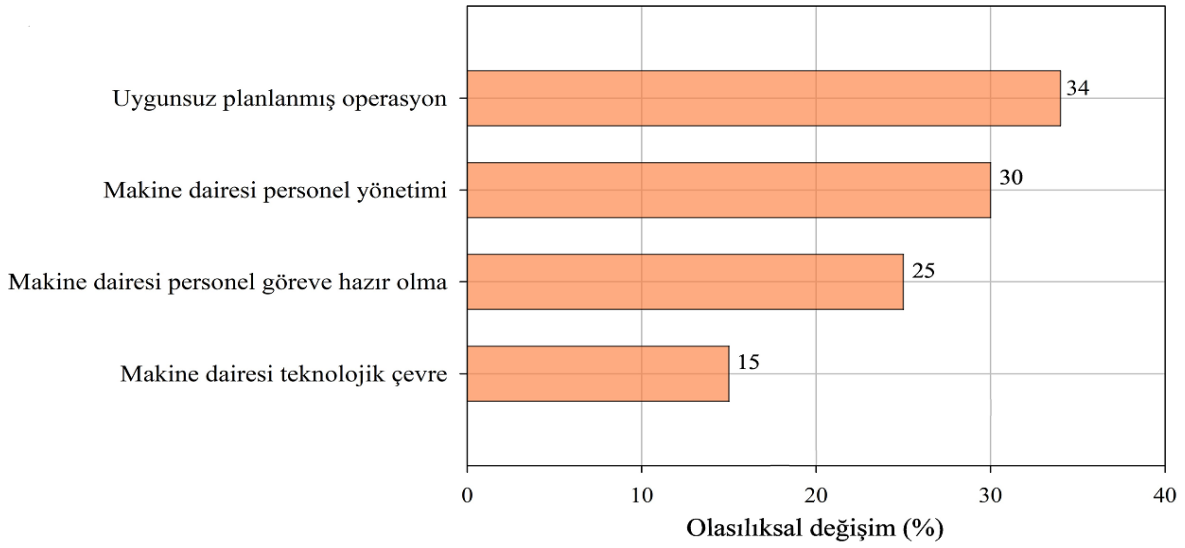
etkileyebilecek birçok iç ve dış çevresel faktörlere maruz kalabilmektedir. Aydınlatma, sıcaklık, dar alan, nem ve gürültü gibi genellikle zorlu koşullarda çalışmaktadır. Bu nedenle, gemi makine personeli çalışma ortamı ideal değildir ve çevresel faktörlere duyarlıdır. Özellikle kötü hava koşullarında geminin doğası gereği sürekli hareket ettiği düşünüldüğünde ana makine bakımları riskli olabilmektedir. Bir diğer faktör zaman baskısı, bakım çalışmalarında önemli bir sorundur. Ana makinenin arızalanma süreci geminin manevradan yoksun olmasına neden olur ve mümkün olan en kısa sürede yeniden başlatılması gerekir. Bu durum, gemi makine personelinin güvenli bir şekilde çalışmak yerine hızlı bir şekilde çalışmaya zorlar.



Şekil 33. Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluk hassasiyet analizi



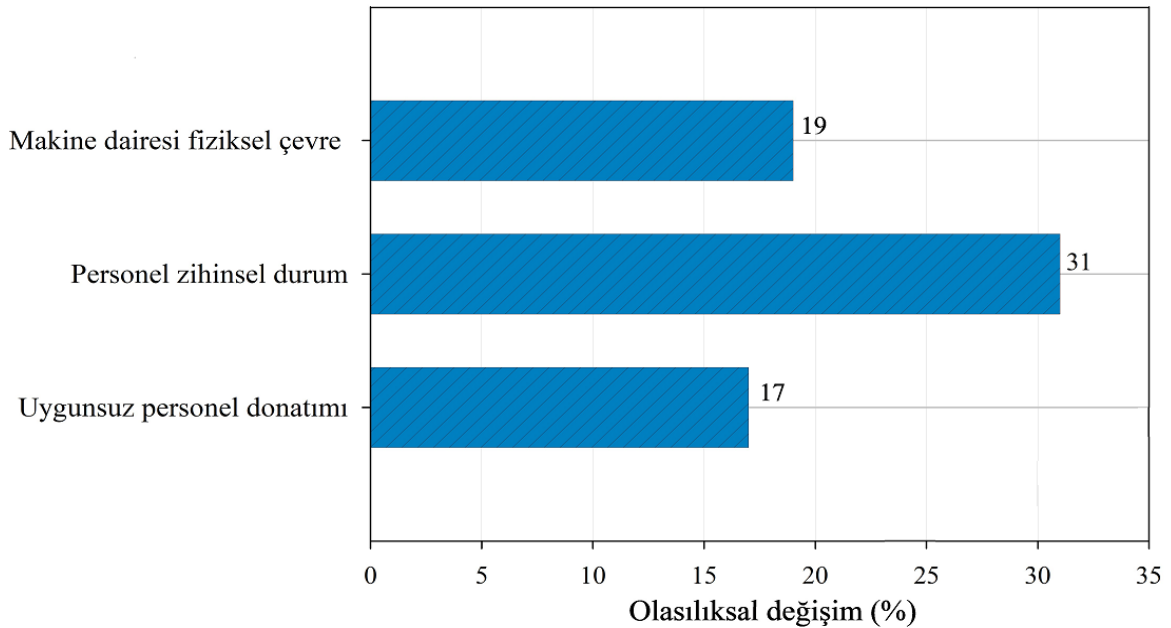
Şekil 34. Hata hassasiyet analizi



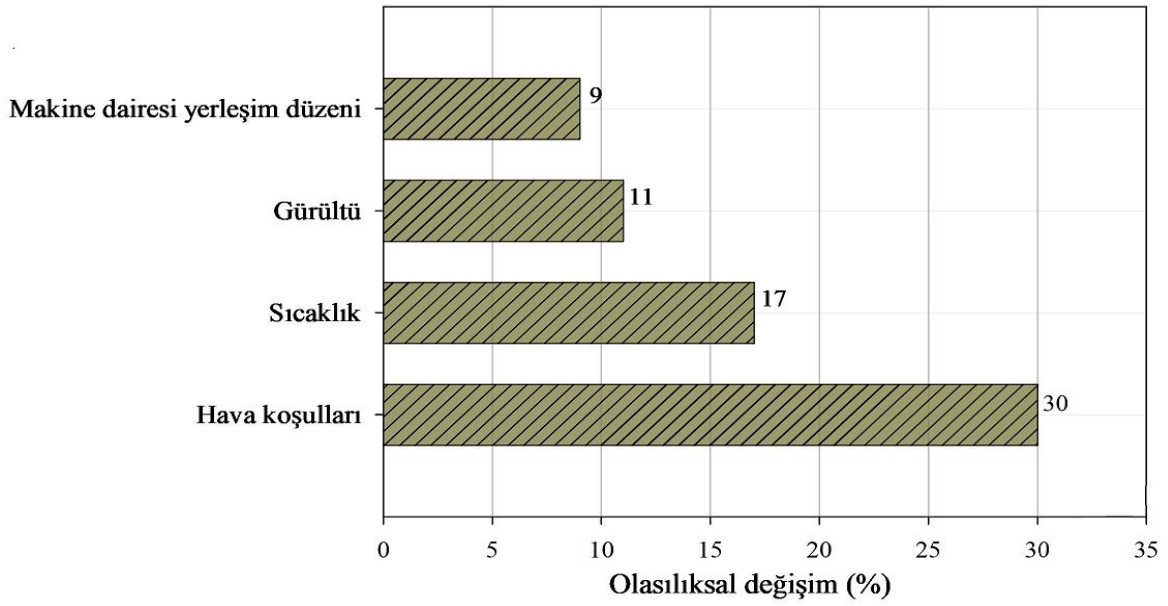
Şekil 35. İhlal hassasiyet analizi

Son zamanlarda denizciler arasında zihinsel sağlık da, artan bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Denizdeki zihinsel sağlık sorunlarına dair raporlar yaygınlaşmış ve veriler, denizciliğin intihar riski yüksek bir meslek olduğunu göstermektedir. Sosyal izolasyon, uzun çalışma saatleri, ticari baskılar denizcilerin zayıf zihinsel sağlığına katkıda bulunabilecek bazı faktörlerdir. Aynı zamanda personelin yaşayabileceği iş yükü, stres, dikkatsizlik, uykusuzluk, alkol veya ilaç kullanımı gibi nedenlerden dolayı yaşayabileceği zihinsel kısıtlamalar da bulunmaktadır. 2015 yılında Uluslararası Taşımacılık İşçileri Federasyonu (ITF), farklı ülkelerden 600'den fazla denizci ile bir araştırma gerçekleştirmiştir. Araştırmada, birçok denizcinin gemideyken sık sık veya bazen kaygılı, umutsuz veya depresif hissettiği bulunmuştur. Önemli sayıda denizcinin depresyonda olan veya intihar düşüncesi taşıyan iş arkadaşlarını bildiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar zihinsel sağlık sorunlarının ciddiyetini ortaya koymakta ve ciddi bir endişe kaynağıdır (Rafael ve Martin, 2019). Ayrıca yorgunluk, deniz ortamında denizcilerin güvenliği ve sağlığı, operasyonel güvenlik açısından önemli etkiler ve sonuçlar doğurabilmektedir. Denizcilik sektörünün zorlu doğası, denizcilerin uzun ve düzensiz saatlerde çalışmasını gerektirebilir. Denizciler, genellikle evlerinden uzak bir şekilde haftalarca veya aylarca, değişken hava koşullarına maruz kalan bir gemide yaşayıp çalışmak zorunda kalabilirler. Gemi, denizcilerin hem çalışma yeri hem de evi olduğundan, iş, eğlence ve dinlenme arasında net bir ayrım olmayabilir. Bu durum, zihinsel ve duygusal iyilik halini etkileyebilir. Zihinsel kısıtlamalar, arızanın yorumlanmasında, makine parçalarının sökümü veya montajında zarar görmesine,

makine içerisinde bez veya bakım aletlerinin unutulmasına, hatalı montajlara, prosedürlerin unutulmasına, iş kazalarına neden olabilmektedir. Göreve hazır olma hassasiyet analizinde zihinsel kısıtlamalar %31, fiziksel çevre %19 ve uygunsuz personel donatımı %17 olasılıksal bir değişime sahiptir (Şekil 36). İslam vd., 2018 yılında yapmış olduğu çalışmada da iş yükü ve stres en önemli birinci değişken, gemi hareketi ikinci değişken olarak tespit edilmiştir. Makine personelinin iş yükünün planlanması genellikle zordur çünkü ani ekipman arızalarına hızlı bir şekilde yanıt vermeleri beklenir. Aşırı iş yükü ve stres makine personelinin durumsal farkındalığı azaltarak bakım operasyondaki performansını olumsuz etkilemektedir (Cummings ve Guerlain, 2003; İslam vd., 2018). Çalışmada da Bayes Ağı zihinsel kısıtlama düğümü altında değerlendirilmiştir. Fiziksel çalışmalarını zorlaştıran bir çalışma ortamında makine personelinin performansları kısıtlanabilmektedir (Lundh vd., 2011). Makine dairesi fiziksel çevre hassasiyet analizinde en etkili düğüm %30'lük etki ile hava koşulları en önemli değişken olarak hesaplanmıştır. Şekil 37'de gösterildiği gibi sıcaklık %17'lik; gürültü %11'lik; makine dairesi yerleşim düzeni %9'luk olasılıksal değişimlere sahiptir. Fırtına ve dalgalı deniz gibi kötü hava koşulları geminin devrilme ve yalpa yapmasına ve gemi hareketini olumsuz etkilemektedir. Kötü hava koşulları nedeniyle 1994 yılında Baltık Denizi'nde bir yolcu feribotunun batması ve 852 yolcu ve denizcinin hayatını kaybetmesi; hava koşulları değişkeninin kazalara etkisini göstermektedir (Langewiesche, 2010).



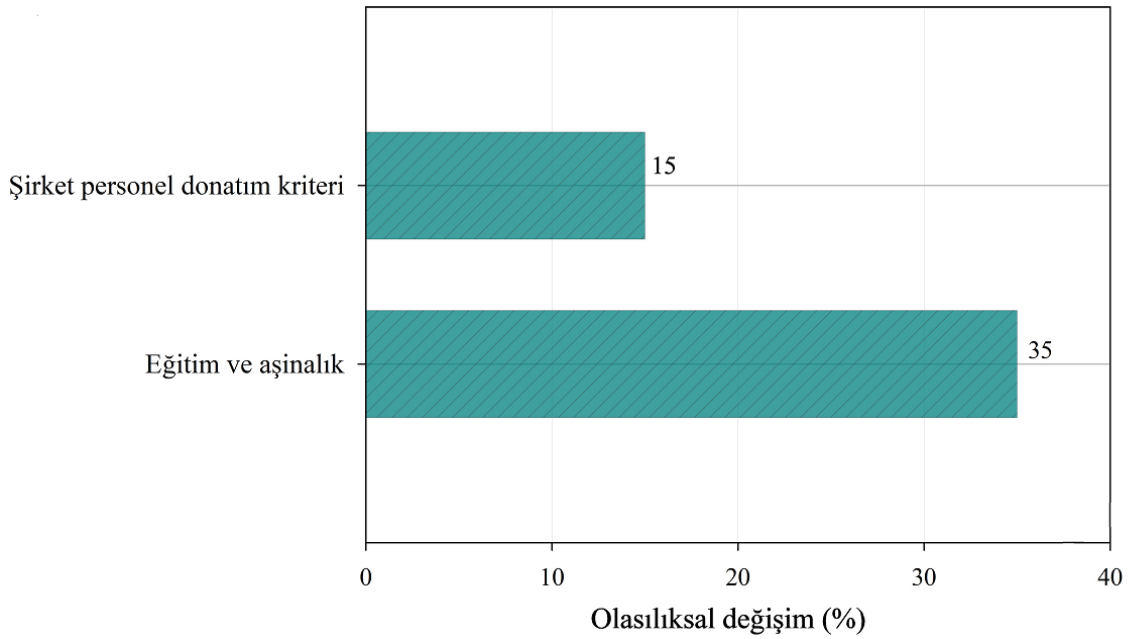
Şekil 36. Makine dairesi personeli göreve hazır olma hassasiyet analizi



Şekil 37. Makine dairesi fiziksel çevre hassasiyet analizi

Göreve hazır olmanın bir diğer ebeveyn değişkeni uygunsuz personel donatımıdır. Uygunsuz personel donatımı şirket personel donatım kriteri ve eğitim ve aşinalık ile ilişkilidir. Şekil 38’de gösterdiği gibi hassasiyet analizinde eğitim ve aşinalık % 35 olasılık değişimi ile kritik bir öneme sahiptir. Embrey vd. (1984) ve Noroozi vd. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda, eğitimin deniz bakım faaliyetlerinde performans üzerinde etkili en önemli faktörlerden biri olduğu belirtilmiştir (Islam, 2017). Gemi Adamlarının Eğitim, Belgelendirme ve Vardiya Tutma Standartları sözleşmesi (STCW), denizcilerin sorumluluklarını yerine getirebilmeleri için zorunlu bir standart belirlemiştir. Ancak, STCW’de belirlenen eğitim standartları asgari şartlar olarak kabul edilmekte olup eğitim yetersizliği, deniz operasyonlarındaki insan hatalarının nedenlerinden biri olarak görülmektedir (Squire, 2005). Bu açıdan, eğitim gemileri ve simülatör eğitim merkezleri, denizcilerin eğitiminde hayati bir rol oynamaktadır. Eğitim gemisinde yapılan eğitimler sayesinde, denizciler gemide çalışmanın önemini kavrayabilir ve gemi operasyonlarını gözlemleyebilir. Simülatör merkezinde arıza senaryo eğitimleri sayesinde gerçek deniz koşullarında özellikle geminin kararması veya kötü hava koşullarında ana makinenin güç kaybı veya güç düşüşü gibi durumlarda arızanın tanımlanması ve tespitinde tecrübe kazanabilmektedir. Arızanın yorumlanması ve anlamlandırılmasının yanında stres ve kriz yönetimi de önemli bir kazanç olarak görülebilir. Çünkü birçok deniz kazası panik ortamında alınan kritik kararlar ile karşı karşıyadır. Onaylı bir eğitim programından teorik eğitimini

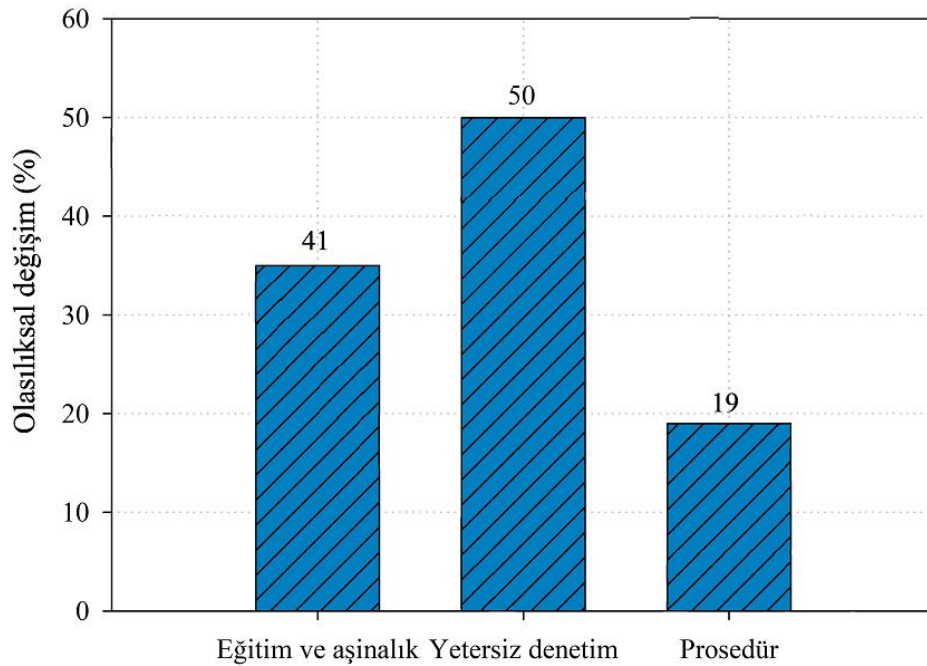
alan birçok yeni denizci, pratik becerilerden yoksun olduğu ve bu durum deniz operasyonlarında insan hatasına neden olduğu vurgulanmaktadır (Phil Deegan, 2011; İslam vd.,2018). Pratik beceri ve deneyim, geçmiş yaşanmışlıklar ve gözlem yoluyla elde edilir. Araştırmalar, deneyimin olaylar sırasında mantıksal süreçlerin bir sonucu olarak bile inşa edilebileceğini ortaya koymuştur (URL-30, 2024). Makine personeli, bir gemiden diğerine geçiş yaptığında, yeni geminin donanım yapısı veya ana makine ile ilgili farklar konusunda bilgi ve deneyim eksiklikleri yaşayabilmektedir. Özellikle teknolojik gelişim ile birlikte gemiler sürekli yenilenebilmekte; geçmiş tecrübeler ve bilgilerinde güncellenme ihtiyacı doğabilmektedir. Savannah Express gemisinin başmühendisi, elektronik kontrollü ana makine ile ilgili ilk deneyimini yaşarken karşılaştığı zorluklar, şirket içi eğitimlerin güncel konulara odaklanmasının önemini gözler önüne sermektedir (URL-31, 2024).



Şekil 38. Uygunsuz personel donatımı hassasiyet analizi

Hata hassasiyet analizinde %26'lık olasılıksal değişim ile ikinci önemli değişken, ihlal hassasiyet analizinde %34'lük olasılıksal değişim ile en önemli değişken uygunsuz planlanan operasyondur. Operasyonun planlanması, planlama yapacak personelin eğitim ve tecrübesine, prosedürlerin takibi ve operasyonun denetlenmesi ile ilişkilidir. Planlanmanın ilk adımı arıza tespiti veya bakımı yapılacak ekipmanın karar verilmesidir. Uygunsuzluk durumu HFACS emniyetsiz denetim katmanında yer alan problemin çözümünde yetersizlik olarak da ifade edilebilir. Alarmların sorgulanmadan onaylanması, gemilerde sıkça

karşılaşılan önemli uygunsuzluklardan biridir. Oysa her alarmin çalmasının ardında belirli bir sebep bulunmaktadır ve bu sebebin doğru bir şekilde analiz edilmesi büyük önem taşır. Alarmin doğru şekilde değerlendirilmesi, arızanın tanımlanmasında yol gösterici bir rol oynayacaktır. Aynı zamanda, motor çalışırken yapılan hata teşhisi, mürettebatın tecrübesine bağlıdır ve bu durum hatalı düzeltici işlemlere yol açabilir. Bakım operasyonunun planlanması hassasiyet analizinde %50'lik olasılık değişim ile yetersiz denetim, %41'lik olasılık değişim ile eğitim ve aşinalık, %19'lık olasılıksal değişim ile prosedür kaynaklı uygunsuzluklar neden olmaktadır (Şekil 39). Ana makinenin bakım veya arızanın giderilmesi süreçlerinde başmühendis ve ikinci mühendis kritik öneme sahip kişilerdir ve yönetici vasfındadırlar. Bu personeller sorumluluğunda ana makinenin işletilmesi ve bakım onarım süreçlerinde üretici firma ve şirket prosedürlerine uyumlu olarak planlanmasının yanında makine personelinin doğru bir şekilde yönlendirilmesinden de sorumludur. Bu tür kritik pozisyonlarda görev tanımlarına uygun hareket etmemeleri veya göreve uygun olmamaları, sorumluluğu altında bulunan ekibin koordinasyonunda hata ve makine dairesinde yürütülen bakım operasyonlarının yetersiz ve uygunsuz yapılmasına sebep olabilir (Sarıaloğlu, 2019). Aynı zamanda arızanın tanımlanması, risk değerlendirmesinin gerçekleştirilmesi ve kullanılacak yedek parçaların seçimi gibi karar verme süreçleri bulunmaktadır.



Şekil 39. Uygunsuz planlanmış operasyon hassasiyet analizi

Gemi personelinin ana makine bakım işlerini yürütmesi, genellikle rutin bir faaliyet olarak değerlendirilse de, üretici firma gereksinimlerini karşılamak için gerekli yetkinlik ve ekipmanların sağlanması esastır. Bu bağlamda, bakım operasyonlarının veya arızaların giderilmesi süreçlerinin belirli standartlarda tamamlanabilmesi için yeterli denetim düzeyinin sağlanması büyük bir önem arz etmektedir. Yetersiz denetim, bakım kalitesinin düşmesine ve potansiyel güvenlik risklerinin artmasına yol açabileceğinden, süreçlerin sistematik bir şekilde izlenmesi ve yönetilmesi gereklidir. Bu, hem ekipman güvenilirliğini artıracak hem de bakım süreçlerinin etkinliğini destekleyecektir. Denetimin ve kontrol süreçleri etkin bir şekilde çalışmadığı veya yetersiz kaldığında, güvenliği tehlikeye atabilecek davranışlar belirlenip önlemler alınamaz (Saralioğlu, 2019). Dolayısıyla, bakım ve ana makine operasyonlarında uygunsuzluklar için elverişli şartlar sağlanmış olur. Denetim aynı zamanda, kötü çalışma uygulamalarını düzeltme ve iyi uygulamaları teşvik etme konusunda önemli bir rol oynayacaktır. Etkili bir liderlik yaklaşımının deniz güvenliği açısından taşıdığı önemin, Saetrevik ve Hystad (2017) tarafından gerçekleştirilen araştırmada da net bir şekilde vurgulandığı görülmektedir. Gemi makine personeli uzmanlık ve deneyimleri, bakım işlemlerinin etkinliği ve güvenliği açısından hayati bir rol oynamaktadır. Personelin teknik olarak yetkin olmadığı görevleri yerine getirmesi istenildiğinde sorunlar ortaya çıkabilir.

Uygunsuz planlanmış operasyonlara etki eden bir diğer durum bakım öncesi gerekli risk değerlendirmesinin yapılmamasıdır. Risk değerlendirmenin yapılmaması sonucu başka arızaların tetiklenmesi birçok kaza raporunda görülmektedir. MARS 201858 raporunda belirtildiği gibi emme mahal temizliğinde yanıcı ürünler kullanılması sonrası yaşanan emme mahal yangını bir risk değerlendirmenin yapılmadığının göstergesidir (URL-32, 2024). Maersk Tacoma gemisinde salmastra kutusu drain tankında bulunan kirli yağın kartere alınması ana yatakların aşınmasına neden olması bir diğer risk değerlendirmenin yapılmadığı uygulama olduğunu söyleyebiliriz (URL-33, 2024). Risk değerlendirmenin yapılmaması, üretici firma gereksinimlerinin atlanması, çalışma saatlerinin dikkate alınmadan bakım planlanması prosedür uygunsuzluk kaynaklıdır. AMSA, 2019-2021 döneminde gemi içi çalışma ve dinlenme saatlerine ilişkin kayıtlar ilgili 392 eksiklik bildirilmiştir (URL-34, 2024). Bakım prosedürlerinin rolü, gemi makine personeline görevleri doğru bir şekilde yerine getirmeleri için yeterli bilgi sağlamasıdır. Kontrol listelerinin doğru şekilde takip edilmesi, görünür hataları azaltırken, kötü yapılandırılmış

prosedürler ise aksine olumsuz sonuçlara yol açabilir (Russ vd., 2013). Lundh vd. (2011), mühendislerin her zaman standart prosedürleri takip etmediklerini, hatta bu prosedürler mevcut olsa bile bazen göz ardı ettiklerini belirtmişlerdir. Personelin bakım prosedürlerini izlememesi genellikle, prosedürlerin güncel olmaması, pratik olmaması veya çok zaman alıcı olması gibi nedenlere dayanmaktadır. Makine personeli resmi olmayan uygulamalar ve kestirme yollar geliştirmesi bakımın daha hızlı gerçekleştiği düşünülse de, bu durum güvenlikten ödün verilmesi anlamına gelir. Geçmişte başarılı olmuş bir eylem için, aynı şekilde sorunsuz bir şekilde tekrar edeceği beklentisi oluşabilir ve zamanla normal olarak algılanan süreçlere dönüşebilmektedir. Bu sebeple prosedürlerin, görevlerin nasıl yerine getirildiği ile uyumlu hale getirilmesi ve mümkün olduğunca denizcilerin bu süreçlerin geliştirilmesine dahil edilmesi önemlidir. Dennis Hendris gemisi 2014 yılında krank pin yatakların, MARS 201914 raporunda kaver civatalarının yanlış tork ile sıkılması üretici firmanın gereksinimlerinin karşılanmadığı için prosedür kaynaklı uygunsuzluklar olduğu söylenebilir (URL-35 ve 36, 2024). Enterprise gemisi 2006 yılında üretici firmanın önermiş olduğu çalışma süresi 20.000 saat olmasına rağmen yağlama yağ pompasının herhangi bir bakım yapılmaksızın 30.751 saate kadar çalıştırılmış olması ve yağlama yağ otomatik filtre bakımı ve çalıştırılması ile ilgili herhangi bir dökümanın olmaması bir diğer prosedür ihlaline örnek verilebilir (URL-37, 2024). Klaipeda gemisi de 2018 yılında ana makine arıza nedeniyle güç kaybı yaşamış ve römorkör hizmeti alınarak yedeklenmiştir. Geminin geçmiş bakım kayıtları incelendiğinde bir dizi prosedür ihlalinin olduğu açıktır. Gemi kaza öncesi ana makine bakımı için bir bakım onarım firması ile anlaşmış ve bakımları yapılmıştır. Şirketin ISM’inde zorunlu olmasında rağmen bakım şirketi yeterlilik sorgulaması ve taraflar arasında bir sözleşme yapılmamıştır. Piston bakımı yapılırken üretici firma gereksinimleri takip edilmemesi bir diğer prosedür ihmali olduğu söylenebilir. Tamir firmasının silindir bloku hakkında denizcilik firmasına üretici firma tavsiyesi alınması gerektiği bildirilmesine rağmen silindir gömlekler dış yüzeyi işlenerek montajı yapılmıştır. Burada denizcilik firmasının bilgisi olması, üretici firma ile iletişime geçmemesi, şirket içi alınan bir karar ile onarımın yapılmasının tercih etmesi bir diğer ihlaldir. ISM Kodu’nun 10.1. maddesi, şirketin geminin, ilgili kurallar ve yönetmeliklerin hükümlerine uygun olarak bakımının yapılmasını sağlamak için prosedürler oluşturması gerektiğini belirtmektedir. Sınıflandırma kuruluşu kuralları ise, şirketin herhangi bir hasar, kusur veya kural ihlali durumunda, denetçi tarafından yapılacak denetim sırasında bunların bildirilmesini sağlaması gerektiğini öngörmektedir. Bu nedenle, denizcilik işletmecisi, revizyon sırasında tespit edilen silindir

bloğunun durumu ve silindir gömleklerin onarılması hakkında sınıflandırma kuruluşu denetçisine bildirmekle yükümlü olmasına rağmen aynı yıl içinde yapılan denetlemede herhangi bir bilgi paylaşımı yapılmaması bir diğer ihlal olduğu söylenebilir (URL-38, 2024).

İhlal hassasiyet analizinde makine dairesi personel yönetimi %30, hata hassasiyet analizinde %16 etkili olduğu bulunmuştur. Makine dairesinde yapılan bakım ve faaliyetleri ekip işi olması nedeniyle personel yönetimi kritik olabilmektedir. Personelin iletişimi, koordine edilmesi, teşvik edilmesi, yönlendirilmesi ve bilgi akışındaki uygunsuzluklar bakım sürecini etkileyebilmektedir. Doğası gereği karmaşık ve zorlu olan denizcilik ortamı, genellikle mürettebat üyeleri arasında yüksek düzeyde takım çalışması, koordinasyon ve iletişim gerektirmektedir. Aynı zamanda kritik pozisyonundaki yöneticilerin liderlik ve yönetim becerileri ekip iletişimini de etkilemektedir (Tusher vd., 2024). Çoğu arızanın kök nedeni, bir dereceye kadar ekip ihmalinden kaynaklanmaktadır. Vardiyalı çalışma, gemi makine dairesinde operasyonlarının bir parçasıdır ve bakım görevleri tek bir vardiya da tamamlanmayabilir. Makine personeli ayrıldıklarında, görevlerini bir sonraki vardiyadaki personele devretmekte ve bu süreçte gerekli bilgileri sağlamaları gerekmektedir. Bilgilerin etkili ve doğru bir şekilde aktarılması, işin durumu hakkında yanlış anlamalar veya varsayımları önlemek için önemlidir ve bakım sürecini etkileyebilmektedir. Hata oranını azaltmak için vardiya tesliminde yeterli zaman tanınmalı ve vardiya geçişlerindeki iletişim eksiklikleri engellenmelidir. Bakım esnasında yeterli iletişimin olmaması, gerekli önlemlerin alındığı durumlarda bile bakım sürecini etkileyebilmektedir. MARS 200653 raporunda bildirilen ve seyir esnasında yapılan bir rutin bakım işlemi buna örnek verilebilir (URL-39, 2024). Elektrik zabitanın makine dairesi fanlarının bakımlarını yapmak amacıyla stop etmesi sonucu makine dairesi basıncı ani bir şekilde düşmüş ve bu durum; makinenin öksürmesi (surge), makine dairesindeki tankların gösterge camlarından yakıt, yağ ve su kaçaklarına, makine dairesi kapısını uzun bir süre açılmamasına, insineratör kapağının açılması ve kül ve kurumun makine dairesine dağılmasına neden olmuştur. Bakım öncesi elektrik zabiti havalandırma için güverteye açılan su geçirmez kaportalardan birini açık bırakmıştır. Ancak makineye yağmur suyunun sıçraması nedeniyle bakım sürecini bilmeyen bir personel tarafından kapatılmıştır. Bu durum etkili bir iletişim olmaması nedeniyle, risklerin doğru bir şekilde değerlendirildiği, uygun önlemlerin alındığı ancak iyi niyetli ve bilgisi olmayan bir ekip üyesi tarafından önlemlerin bozulduğu görülmektedir. Bir diğer durum olan makine jurnal kayıtlarındaki eksiklikler, denizcilik operasyonları açısından ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Geçmişte yaşanan arızaların veya gerçekleştirilen bakım

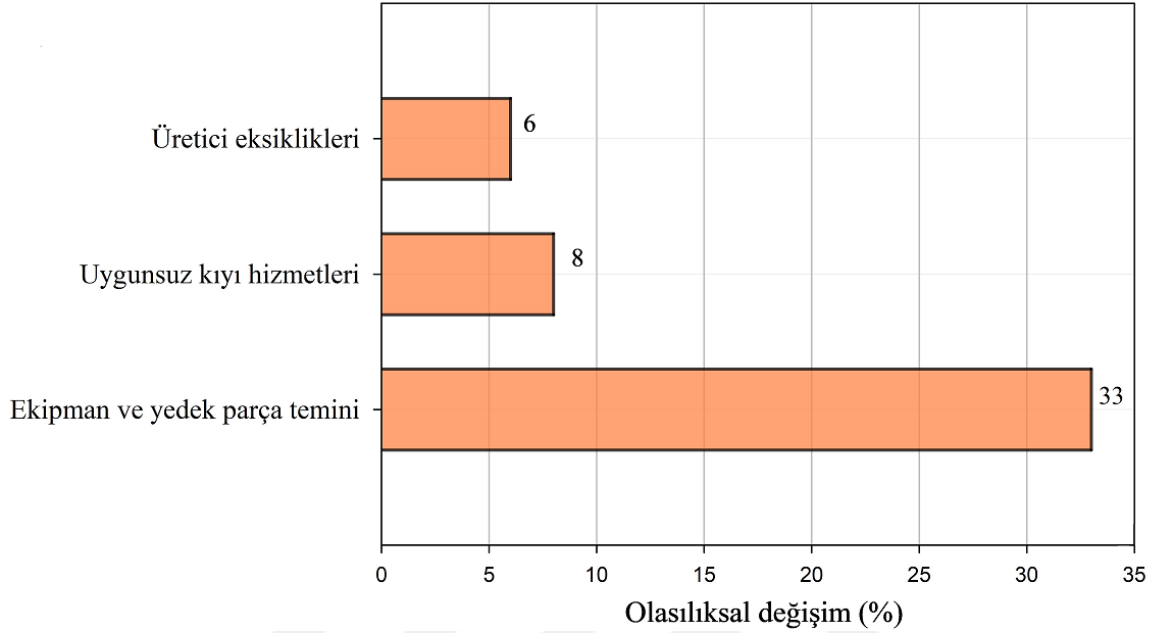
faaliyetlerinin kaydedilmemesi, yeni katılan personelin geminin geçmişi hakkında yeterli bilgiye ulaşmasını engelleyerek operasyonel riskleri artırabilir. Ana makinenin geçmişi hakkında bilgi eksikliği, arızaların önceden tahmin edilmesi ve dolayısıyla önleyici bakım stratejilerinin etkin bir şekilde uygulanması açısından kritik bir zorluk oluşturur. Kayıtların sistematik bir şekilde tutulması, bilgi akışını sağlamanın yanı sıra, personelin bilgi düzeyini artırarak karar alma süreçlerini destekler. Bilgi aktarımında yaşanan bir diğer durum personel değişimlerindeki devir teslim sürecidir. Yetersiz devir teslim süreci, mürettebatı büyük bir baskı altında bırakmakta ve kritik kontrolleri ve doğrulamaları tamamlamak için az veya hiç zaman kalmamaktadır. Bu, zaman kısıtlamaları nedeniyle bakımda boşluklara yol açabilir. Savannah Express gemisi başmühendisi devir teslimin yapılmaması nedeniyle gemi güç kaybı engellenememiştir (URL-31, 2024).

Makine dairesi teknolojik çevre arızanın tespitinde bize rehberlik etmektedir. İhlal ve hata hassasiyet analizlerinde sırasıyla %15 ve %8 olasılıksal değişime sahip olduğu hesaplanmış olup diğer değişkenlere kıyasla etkisi sınırlıdır. Alarm kayıt cihazlarının çalışmaması, alarm güvenlik korumaların iptal edilmesi ve unutulması, sensörlerdeki hatalı ölçümler, kart arızaları gibi kontrol sistem arızalarının giderilmeme durumları ve alarmların sebebi analiz edilmeden onaylanması makine dairesindeki teknolojik çevre hususunda uygunsuzluklar olarak karşımıza çıkmaktadır. Makine jurnaline yazılmasına rağmen, yağlama yağı otomatik filtrenin günde 609 kez geri yıkama yapması ve alarmları önemsenmemiş olması geminin 13 gün hizmet dışı kalması ve yaklaşık 700.000 dolarlık bir bakım maliyetine neden olması alarmların gerçek nedeni analiz edilmemesinin gemi güvenirliliği açısından ciddi sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir (URL-40, 2024). Benzer ihlaller diğer birçok kaza raporlarında da görülebilmektedir. Aynı zamanda bakımda kullanılan tork anahtarların ve ölçüm aletlerinin kalibre edilmeme durumu bakımı doğrudan etkileyecektir. Gemi ana makine birçok otomatik sistemle donatılmıştır. Otomasyon güvenlik açısından kritik olsa da, gerektiğinde insan müdahalesinin mümkün olabilmesi de aynı derecede önemlidir. Geminin daha ciddi bir riske girmemesi adına, bazı arızalar bilinçli olarak güvenlik korumaları iptal edilebilmektedir. MARS 201434 raporunda yağ sis dedektör ve ardından düşük yağ basıncı alarmları vermesi sonrası, alarmların güvenlik korumaları iptal edilmiştir (URL-20, 2024). Kaptan makine durmasının riskli olması nedeniyle 2 saat daha seyre devam etmiştir. Gemi ana makinesi yataklar ve krank milinde arızalar meydana gelmiş gemi 40 gün gemi çalışamaz hale gelmiştir. Arızaların giderilme ve bekleme süresinin maliyeti 1 milyon dolardır. Ana makine arızasında alınacak acil eylem,

hasarın niteliğine ve geminin mevcut durumuna bağlıdır (Griffiths, 1997). Alarmin iptal edilmemesi durumunda, güç kaybı yaşanması ve geminin manevra kabiliyetini yitirmesi, diğer gemiler, çevre ve insan açısından daha büyük bir risk oluşturma potansiyeli taşıma ihtimalinden bu karar alındığı açıktır. Benzer durum, arızalı sensörlerin ve yedeğinin gemide bulunmaması durumunda güvenlik engelinin iptal edilmesidir. Burada kritik olan iptal edilen alarmların kayıt altına alınması ve ilk limanda ihtiyaç duyulan yedek malzeme isteğinin yapılmasıdır.

Bakım uygunsuzluğunda ikinci önemli değişken %26 olasılıksal değişim ile yedek parça uygunsuzluğudur. Yedek parça uygunsuzlukları orijinal olmaması, onarılmış ürün kullanılması, yedek parça talebinin karşılanmaması gibi durumlar ekipman ve yedek parça temini değişkeni ile; gönderilen ürünün lojistik kaynaklı yaşamış olduğu olumsuzluklar uygunsuz kıyı hizmetleri düğümü ile; talep edilen ürünün üretici kaynaklı yaşanan sorunlar üretici eksiklikleri değişkeni ile ilişkilendirilmiştir. Yedek parça hassasiyet analizinde de en fazla etkiye sahip değişken %33'lik olasılıksal değişim ile ekipman ve yedek parça teminidir. Uygunsuz kıyı hizmetleri %8, üretici eksiklikleri %6 etki oranları ile daha sınırlı bir etkiye sahiptir (Şekil 40). Gemiler, onarım tesislerinden ve yedek parça depolarından izole edilmiş olarak rastgele değişen çevre koşullarında çalışmaktadır (Eruguz vd., 2017). Gemi ana makinesi uzun ömürlü ve verimli çalışmasını sağlamak için yedek parça lojistiği kritik öneme sahiptir. Yedek parça talebi başmühendis tarafından önceden belirlenen stok eşiğinin altına düşmesi durumunda, belirlenen bir bakımdan önce ya da olağanüstü bir hasar nedeniyle yapılabilir. İyi bir yedek parça politikası, gemi ana makine operasyonlarında olası bir arızaya karşı bir eylem planı belirlemeli ve bu durum, kullanılan ekipmanın durumu ve uygulanan bakım politikasıyla da ilişkilidir (İlgin ve Tunali, 2007). Ana makine parçaları genellikle pahalıdır, bu yüzden gemi sahipleri genellikle gemi güvenilirliğini etkilemeyecek şekilde yedek parça stoklar. Aynı zamanda fazla yedek parça depolamak, parça veya ekipmanın bozulmasına veya depolama sorunlarına neden olabilir (Kian vd., 2019). Bunun yerine, yedek parçalar ihtiyaç duyulduğunda sipariş edilir. Başmühendis tarafından yapılan talep şirket teknik departmanı onayı alındıktan sonra satın alma departmanına iletilir. Burada satın alma, teklif talep etme, teklif alma, tedarikçi seçme, sipariş gibi aşamalarından geçmektedir. Talep edilen yedek parça seçilen tedarikçinin envanterinde stokta yoksa, bunun bölgesel depodan veya son olarak üretici firmadan talep edilmesi gerekir. Üretici firmanın stoğunda da yoksa üretilcektir (Kostidi ve Nikitakoz, 2017). Gemi bu süreçte hareket

halindedir ve yedek parça yalnızca belirtilen rotada henüz ziyaret edilmemiş limanlardan birine teslim edilecektir.



Şekil 40. Yedek parça uygunsuzlukları hassasiyet analizi

Geçmişte, yedek parça temininde yaşanan sorunlar nedeniyle birçok kaza raporlanmıştır. Sagan gemisi 2017 yılında segman yedek parçasının yetersiz olması sonucu kayalıklara oturmuştur. Savannah Express 2005 yılında elektronik kontrollü bir makine de bulunan 4 sensörün 3'ü arıza yapmış gemi bunları talep etmiştir (URL-41, 2024). Zamanında tedarikin yapılmaması ve son sensörün de arızalanması sonucunda güç kaybı yaşanmıştır. Maersk Tacoma gemisi 2001 yılında otomatik şoklu filtre ile ilgili yedek parça istediğinde bulunmuş ancak tedarik edilmemiştir (URL-33, 2024). Yeterli temizlemenin olmaması nedeniyle ana yataklarda ciddi bir aşınma meydana gelmiştir. President Eisenhower gemisi 2021 yılında yakıt dönüş hattının bakımı esnasında orijinal parça kullanılmaması sonrası makine dairesinde yangın çıkmış şirkete 8,22 milyon dolarlık bir masrafa neden olmuştur (URL-42, 2024). Benzer şekilde MARS 201305 raporunda tersanede yakıt emiş hattı sızdırmazlık elemanı kullanılmış parça takılması sonrası makine dairesinde yangın çıkmıştır (URL-43, 2024). MARS 200412 raporunda geminin satılma sürecinde olması nedeniyle şirket yedek parça gönderiminde isteksiz olması sonucunda kaza yaşanmıştır (URL-44, 2024). Bulk India gemisi 2018 yılında acil durum jeneratörü fan kayışı hasarlı olması gemiye tedarikinin sağlanmaması nedeniyle gemi kararması sonrası devreye alınamamıştır (URL-

45, 2024). Bu örnekler, doğru yedek parça temini ve yönetimi geminin güvenliği, ana makinenin operasyonel verimliliği ve bakım süreçlerinin etkin bir şekilde yürütülmesi açısından kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Yedek parça yönetimi, sadece gemi bakımının sürekliliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda potansiyel arızaların önceden tahmin edilmesi ve zamanında müdahale edilmesi için stratejik bir rol oynamaktadır. Bakım operasyonunu etkileyen bir diğer durum kısıtlı zaman ve makine kullanım kılavuzu/bakım aparat uygunsuzluklarıdır. Hassasiyet analizi sonucuna göre de sırasıyla %17 ve %9 etkilidir. Kısıtlı zaman seyir esnasında hava koşulları nedeniyle bakımların ertelenmesi veya seyirde olunması nedeniyle ana makineye müdahale edilememesi durumunda gerçekleşmektedir. Limanda ise seyir planlaması nedeniyle manevraya hazır konumda beklenmesi ana makine bakım operasyonlarında ertelenebilmektedir. Makine kullanım kılavuzu/bakım aparat uygunsuzlukları bakım operasyonlarına etkisi diğer değişkenlere kıyasla düşük olmasına rağmen gemi güvenilirliğini etkileyebilmektedir. Clonlee gemisi 2011 yılında üretici firma kullanım kılavuz eksiklikleri nedeniyle geminin kararması sonucu gemi güç kaybı yaşaması buna örnek verilebilir (URL-46, 2024).

4. SONUÇLAR

Bu çalışma da gemi güvenliğini etkileyen ana makine kaynaklı arızaların nedensel faktörlerinin Bayes Ağı ile belirlenmesi amaçlanmıştır. ATSB, NTSB, MAIB, GISIS, JTSC gibi kaza veri tabanlarından 2000-2024 tarihleri arasında gerçekleşen toplam 89 adet ana makine kaynaklı kaza verisi elde edilmiştir. Yazın taraması, kaza raporları, denizcilik firmaları raporları ve konunun uzmanlarıyla derinlemesine yapılan görüşmeler neticesinde toplam 60 değişken ve bu değişkenler arasında toplam 139 adet nedensel ilişki belirlenerek Bayes Ağ oluşturulmuştur. Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluklar HFACS çatısı altında yapılandırılmıştır. Toplamda 469 adet koşullu ve marjinal olasılık değerleri 7 uzman tarafından yapılan görüşmelere neticesinde elde edilmiştir. Uzman yargılarına dayalı koşullu olasılıkların belirlenmesindeki belirsizlikler bulanık küme teorisi kullanılarak ortadan kaldırılmıştır. Olasılık değerleri Genie adlı programa girişi yapıldıktan sonra aksiyon 1-2-3 testleri ile model doğrulanmış, Bayes Ağ modeli çalıştırılarak olasılık değerleri hesaplanmıştır. Diğer düğümler sabit tutulmak şartıyla, hassasiyet analizi uygulanan düğüm en iyi ve en kötü senaryolar yapılarak simüle edilmiş, olasılıksal değişimleri hesaplanmıştır. Bayes Ağı hassasiyet analizi sonuçlarına göre;

- Gemi güvenliği etkileyen ana makine kaynaklı arızalardan güç düşüşü %60, güç kaybı %41 olasılıksal değişim hesaplanmış ve böylelikle; güç düşüşü yaşanma olasılığı, güç kaybı olasılığından yaklaşık %46 daha büyük olduğu tespit edilmiştir.
- Güç düşüşü egzoz ve hava parametreleri, soğutma suyu parametreleri, yağ parametreleri ve diğer faktörler ile ilişkilendirilmiştir. En fazla etkiye sahip nedensel değişken %20'lik olasılıksal değişim ile egzoz & hava parametreleri hesaplanmış; soğutma suyu parametrelerinden %42, yağlama yağı parametrelerinden %122, diğer parametrelerden %900 daha büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.
- Güç kaybı yağlama yağı basıncı, soğutma suyu basıncı ve diğer parametreler ile ilişkilendirilmiştir. En fazla etkiye sahip değişken %19'luk olasılıksal değişim ile yağlama yağı basıncı hesaplanmış; soğutma suyu basıncından yaklaşık %6, diğer parametrelerden %217 daha büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

- Egzoz ve hava parametrelerine en fazla etkiye sahip değişken %32'lik olasılıksal değişim ile egzoz gaz sıcaklığı hesaplanmış; egzoz gaz sıcaklık sapmasından yaklaşık %19, emme hava sıcaklığından %39 daha büyük etkiye sahiptir.
- Soğutma suyu parametreleri en fazla etkiye sahip düğüm %27'lik olasılıksal değişim ile soğutma suyu sıcaklığı hesaplanmış ve soğutma suyu basıncından yaklaşık %29 daha fazla yaşanma olasılığı vardır.
- Yağlama yağı parametrelerinden en fazla etkiye sahip değişken %23 olasılıksal değişim ile yağlama yağı basıncı hesaplanmış; yağlama yağ sıcaklığından %5, yağ debisinden %109, yağ sis yoğunluğundan %228 daha büyük bir etkiye sahiptir.
- Güç düşüşü diğer parametreler %15 olasılıksal değişim ile turboşarj aşırı hızlanması en fazla etkili düğüm olarak hesaplanmış; eksenel vibrasyon düğümünden %400, yakıt beslemesinde yetersizlikten %1400 daha büyük bir etkiye sahiptir.
- Güç kaybı diğer parametrelere ana makine yüksek devri ve yetersiz yakıt beslemesi %14'lük olasılıksal değişim ile aynı etkiye sahip olduğu bulunmuş; sırt yatak sıcaklığından %1300 daha yüksek yaşanma olasılıklarına sahiptir.
- Egzoz gaz sıcaklığına en fazla etkiye sahip değişken %37'lik olasılıksal değişim ile ana makine yapısal uygunsuzluklar hesaplanmış; akışkan kaynaklı uygunsuzluklardan %32, ana makine çalışma koşullarından %94, kontrol sistemi uygunsuzluklarından %42 daha büyük etkiye sahiptir.
- Soğutma suyu sıcaklığı en fazla etkiye sahip değişken %25 olasılıksal değişim ile akışkan kaynaklı uygunsuzluk olarak hesaplanmış; ana makine yapısal uygunsuzluklardan %78, ana makine çalışma koşullarından %733, kontrol sistemi uygunsuzluklarından %127 daha büyük etkiye sahiptir.
- Yağlama yağı basıncına en fazla etkili düğüm %22'lik olasılıksal değişim ile akışkan kaynaklı uygunsuzluklar hesaplanmış olup ana makine yapısal uygunsuzluklardan ve kontrol sistemi uygunsuzluklarından %100'lük daha büyük etkiye sahiptir.
- Turboşarj aşırı hızlanmasına en fazla etkiye sahip değişken %13'lük olasılıksal değişim ile akışkan kaynaklı uygunsuzluklar olduğu hesaplanmış olup ana makine yapısal uygunsuzluklardan %18, kontrol sistemi uygunsuzluklarından %160, ana makine çalışma koşullarından %1200 daha büyük etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

- Ana makine yüksek devri en fazla etkili düğüm %14'lük olasılıksal değişim ile ana makine çalışma koşullarındaki uygunsuzluk hesaplanmış; kontrol sistemi uygunsuzluklarından %56 daha büyük bir etkiye sahiptir.
- Yetersiz yakıt beslemesi en fazla etkili düğüm %18'lik olasılıksal değişim ile akışkan kaynaklı uygunsuzluk olduğu hesaplanmış, ana makine yapısal uygunsuzluklardan %157 daha yüksek bir etkiye sahiptir.
- Ana makine yapısal uygunsuzluğa en fazla etkili düğüm %34 olasılıksal değişim ile bakım uygunsuzluğudur; akışkan kaynaklı uygunsuzluklardan %13, makine yaşından %126, dizayn hatasından %580 daha büyük bir etkiye sahiptir.
- Ana makine akışkan kaynaklı uygunsuzluğa en fazla etkili düğüm %42 olasılıksal değişim ile bakım uygunsuzluğudur; işletme hatalarından %128, akışkan karakteristik uygunsuzluklardan %356 kat daha büyük etkiye sahiptir.
- Bakım uygunsuzluğuna en fazla etkili düğüm %36'lik olasılıksal değişim ile makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluklardan kaynaklı olduğu hesaplanmış; yedek parça uygunsuzluklarından %38, kısıtlı zamandan %112, makine kullanım kılavuz/bakım aparatları uygunsuzluklarından %300 daha etkilidir.
- Yedek parça uygunsuzluğuna en fazla etkili düğüm %33'lük olasılıksal değişim ile ekipman ve yedek parça temini olarak hesaplanmış; uygunsuz kıyı hizmetlerinden %313, üretici eksikliklerinden %450 daha büyüktür.
- Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluklara en fazla etkili düğüm %53'lik olasılıksal değişim ile hata olduğu bulunmuş, ihlalden %26 daha büyük etkiye sahiptir.
- Hataya en fazla etkili düğüm %30'luk olasılıksal değişim ile makine dairesi personeli göreve hazır olma düğümüdür; uygunsuz planlanmış operasyondan %15, makine dairesi personel yönetiminden %87, makine dairesi teknolojik çevreden %275 daha büyük etkiye sahiptir.
- İhlale en fazla etkili düğüm %34'lük olasılıksal değişim ile uygunsuz planlanmış operasyondur; makine dairesi personeli göreve hazır olma %36, makine dairesi personel yönetiminden %13, makine dairesi teknolojik çevreden %127 daha büyük etkiye sahiptir.
- Makine dairesi personel göreve hazır olma düğümüne en fazla etkili düğüm %31'lik olasılıksal değişim ile personel zihinsel durumdur ve makine dairesi fiziksel çevreden %63, uygunsuz personel donatımından %82 daha büyük etkiye sahiptir.

- Uygunsuz planlanmış operasyon düğümüne en fazla etkili düğüm %50'lik olasılıksal değişim ile yetersiz denetim olduğu hesaplanmış; eğitim ve aşinalıktan %22, prosedürden %163 daha büyük bir etkiye sahiptir.
- Makine dairesi fiziksel çevreye en fazla etkili düğüm %30'luk olasılıksal değişim ile hava koşulları hesaplanmış; makine dairesi sıcaklığından %76, makine dairesi gürültüsünden %173, makine dairesi yerleşim düzeninden %233 daha büyük öneme sahiptir.



5. ÖNERİLER

Günümüzde çoğu gemi geleneksel makineler ile donatılsa da teknolojik gelişim ile birlikte akıllı makineler geleceğin makineleri olarak gelişimini sürdürmektedir. Geleneksel makinelerden akıllı makinelere geçiş, arıza teşhis ve tahminlemesi, bakım yönetimi, yedek parça yönetimi, emisyon kontrolü, verimlilik, yakıt tüketimi ve insansız gemiler için bir gerekliliktir.

- Çalışmada kritik bir değişken olarak bulunan egzoz gaz sıcaklık uygunsuzluğu yanma verimliliğinden, makine yükünden, çevresel koşullarından veya soğutma sisteminden kaynaklı olabilmektedir. Yakıt püskürtme basıncı, zamanlaması, sıkıştırma basıncı, maksimum basınç değerleri, emme havası sıcaklık ve basınç değerleri, makine yükü, hava koşulları gibi veriler dikkate alınarak arızanın düzeyi ve konumu hakkında anlamlı öngörüler elde edilebilir.
- Her silindir egzoz gaz hattı için emisyon ölçüm sistemleri ile donatılarak diğer sensör verileri ile birlikte değerlendirilip yanma verimliliği hakkında önemli düzeyde bilgi elde edilebilir. Yanma verimliliğinin tek silindirden mi yoksa genel bir arızadan mı olduğunun tespiti akıllı makineler ile karar verilip insan müdahalesi olmadan silindir düzeyinde veya sistemsel otonom müdahaleler yapılabilir. Örneğin tek silindir de olma durumunda yakıt enjeksiyonunu azaltan, hava yakıt oranını optimize eden sistemlerle düzenlenebilir. Egzoz gazı geri dönüşüm sistemleri ile maksimum yanma sıcaklığı; değişken açılı turboşarjlar ile emme hava basıncı yüke bağımlı olarak düzenlenebilir.
- Çalışmada da kritik bir değişken olan soğutma suyu basınçları ana makine ve yardımcı sistemlerde donatılan sensörlerden elde edilen ölçümler dikkate alınarak ana makine yapısal bir kusurdan mı yoksa yardımcı sistemler kaynaklı akışkan uygunsuzluğundan mı olduğu belirlenebilir. Böylelikle arıza yerinin tahmin edilme sürecinde makine personelinin daha hızlı ve etkin kararlar alması sağlanabilir. Soğutma suyu dışında diğer sistemler içinde bu tahminleme genişletilerek akıllı makine süreci gelişimine katkı sunulabilir.
- Çalışmada kontrol sistemi arızaları makinenin genel performansında önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle yağ sis yoğunluğu kaynaklı birçok kaza raporu da mevcuttur. Nemli hava koşulların hakim olduğu bölgelerde makine

bakımları sonrası yağ sis dedektöründe nem içeriği kaynaklı sensör arızalarının önlemek amacıyla planlı bakım ve kalibrasyon prosedürlerinin uygulanması kritik öneme sahiptir.

- Makine dairesi personel kaynaklı uygunsuzluklar için önemli bir değişken olarak bulunan personel zihinsel durumu kontrol altına almak için; denizcilik ders müfredatlarına ve şirket içi eğitimlere mental sağlık eğitimlerinin eklenmesi gerekmektedir.
- Çalışmada kritik bir değişken olarak tespit edilen yedek parça uygunsuzlukları üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin gelişimi ile üretim sürecinin hızlanması ve maliyetlerin düşürülmesi yoluyla etkili bir çözüm olabileceği öngörülmektedir.
- Teknolojik gelişim ile birlikte gemiler sürekli yenilenmekte; geçmiş tecrübeler ve bilgilerinde güncellenme ihtiyacı doğabilmektedir. Şuan aktif olarak birçok gemi makine personeli geleneksel makineler ile ilgili almış oldukları eğitimler ve denizde kazanmış oldukları tecrübelerle çalışma hayatına devam etmektedir. Teknolojik gelişmelere daha iyi adapte olunması açısından STCW sözleşmesi kapsamında eğitimlerin yenilenme periyodu tekrar düzenlenmesi gerekmektedir.
- Kaza raporlarında arıza yapan bileşen yedekli ise veya bir kazaya neden olmadıysa bildirimleri yapılmamaktadır. Aynı zamanda bu kaza raporlarının nedensel faktörleri ile ilgili bilgiler ayrıntılı yer almadığı görülmüştür. Sigorta firmalarına gemi manevradan yoksun kalmadıysa, bir kaza yaşanmadıysa veya sigorta talebi 100.000 doların altındaysa talepler yapılmamaktadır. Denizcilik şirketlerinin ramak kala olay raporları ve arıza raporlar tutulsa da bunları paylaşmak konusunda istekli olmadıkları görülmüştür. Bu sebeple veriler ana makine kaynaklı kaza raporları, yazın taraması, sigorta firmaları yayınlamış olduğu raporlar ve uzman görüşleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Denizcilik şirketlerinin raporlarından elde edilen gerçek veriler ile Bayes Ağı güncellenebilir, yapılan çalışma ile karşılaştırması yapılabilir. Bayes Ağının güncellenebilir özelliği bu hususta bir avantaj sunmaktadır.
- Çalışmada nedensel faktörler donanım bazda (enjektör, piston, egzoz valfi vb.) incelenmemiştir. Çalışmada yapılan ve pilot Bayes Ağında ilgili düzenlemeler yapıldıktan sonra nihai Bayes Ağ modeli oluşturulmuştur. Pilot Bayes Ağ çalışmasındaki her bileşenin arıza nedensel ilişkisi yaklaşık 500 adet düğüm ile oluşturulmuştur. Ancak koşullu olasılık sorularının çok fazla olması uzman

görüşlerindeki tutarlılığı bozma endişesinden nedensel faktörler sınıflandırılarak kategorilendirilmiştir. Donanımsal açıdan yeni Bayes Ağları kurularak nedensel ilişkiler irdelenebilir. Donanımsal bazda incelenen çalışmalara arıza maliyet analizleri de eklenebilir.

- Çalışma iki zamanlı krosshedli sabit turboşarj basınçlı, yağ ile soğutulan bir piston, doğru akımlı bir süpürmeye sahip temel bir dizel motor felsefesine sahip bir ana makinenin arıza olasılığı değerlendirilmiştir. Seçici katalitik indirgeme, sülfür azaltma teknolojileri (scrubber) gibi emisyon azaltım teknolojilerin günümüzde birçok gemide donatılmıştır. Bu sistemlerin de dahil edilerek değerlendirildiği bir çalışma yapılabilir. Böylelikle bu sistemlerin ana makine arızalarına ilişkisi tespit edilebilir.
- Kritik bakım operasyonlarının gerçekleştirildiği süreçlerde, risk değerlendirmesinin sistematik bir şekilde yapılması büyük önem taşıdığı bulunmuştur. Bu bağlamda, denizcilik şirket yöneticilerinin, bakım operasyonlarının etkinliğini ve güvenliğini artırmak amacıyla risk değerlendirmesi süreçlerinin teşvik edilmesi gerekmektedir. Yöneticiler, risklerin önceden belirlenmesi ve uygun önleyici tedbirlerin alınması için organizasyonel düzeyde stratejiler geliştirmeli, bu süreçlerin düzenli olarak izlenmesini ve iyileştirilmesini sağlamalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Abaei, M. M., Hekkenberg, R., BahooToroody, A., Banda, O. V., & Van Gelder, P. (2022). A probabilistic model to evaluate the resilience of unattended machinery plants in autonomous ships. *Reliability Engineering & System Safety*, 219, 108176.
- Abdulhamid, J., & Bhanuprakash, T. V. K. (2013). Thermal modelling of a marine diesel engine piston. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(1).
- Abdolmohammadi, M. (1987). Bayesian inference in auditing: Evidence on the most appropriate assessment techniques. *Accounting and Business Research*, 17(68), 291–300.
- Adumene, S., Afenyo, M., Salehi, V., & William, P. (2022). An adaptive model for human factors assessment in maritime operations. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 89, 103293.
- Adumene, S., & Nitonye, S. (2018). Application of probabilistic model for marine steam system failure analysis under uncertainty. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 8(2), 21–29.
- Akar, M., & Gündoğdu, S. (2014). The usage of Bayes theory in fisheries sciences. *Journal of Fisheries Sciences*, 8(1), 8–16.
- Akıncı, H., Özalp, A. Y., Özalp, M., Kılıçer, S. T., Kılıçoğlu, C., & Everan, E. (2014). Bayes olasılık teoremi kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi. *Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu*, 14–17 Ekim, İstanbul.
- Akyüz, E., Çelik, M., & Cebi, S. (2016). A phase of comprehensive research to determine marine-specific EPC values in human error assessment and reduction techniques. *Safety Science*, 87, 63–75.
- Akyuz, E., Celik, M., Akgun, I., & Cicek, K. (2018). Prediction of human error probabilities in a critical marine engineering operation on-board chemical tanker ship: The case of ship bunkering. *Safety science*, 110, 102-109.
- Kandemir, Ç., Çelik, M., Akyuz, E., & Aydin, O. (2019). Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations on-board ships: the case of HFO purifier overhauling. *Applied ocean research*, 88, 317-325.
- Aldrich, M., Ramsden, M., Steer, R., & Hamilton, I. (2015). Golden rules to improve process safety behaviour. *In SPE Annual Caspian Technical Conference*.
- Allal, A. A., Mansouri, K., Youssfi, M., & Qbadou, M. (2017). Toward a reliable sea water central cooling system for a safe operation of autonomous ships. *In Proceedings of the International Conference on Recent Innovation in Engineering and Technology, Berlin, Germany*, 15-16.

- Allal, A. A., Mansouri, K., Youssfi, M., & Qbadou, M. (2017). Toward a reliable main engine lubricating oil system for a safe operation of autonomous ships. *In 2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, 91–399.
- Allal, A. A., Mansouri, K., Qbadou, M., & Youssfi, M. (2017). Task human reliability analysis for a safe operation of autonomous ship. *In 2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety*, 74–81.
- Altunay, S., & Yılmaz, H. (2023). Covid-19 verileri için Bayes Ağları ile makine öğrenmesi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 9, 1.
- AMSA. (2019). Maritime safety awareness bulletin, 9. <https://www.amsa.gov.au/sites/default/files/amsa282-maritime-safety-awareness-bulletin-issue9-march2019.pdf>
- AMSA. (2024). Maritime safety awareness bulletin, 20. <https://www.amsa.gov.au/sites/default/files/maritime-safety-awareness-bulletin-20.pdf>
- AMSA. (2024). Planned maintenance on ships. <https://www.amsa.gov.au/about/regulations-and-standards#317>
- Anantharaman, M., Khan, F., Garaniya, V., & Lewarn, B. (2018). Reliability assessment of main engine subsystems considering turbocharger failure as a case study. *Transnav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 12, 2.
- Anantharaman, M., Khan, F., Garaniya, V., & Lewarn, B. (2014). A step-by-step approach for evaluating the reliability of the main engine lube oil system for a ship's propulsion system. *Transnav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 8, 3, 367–371.
- Anantharaman, M., Khan, F., Garaniya, V., & Lewarn, B. (2015). Reliability of fuel oil system components versus main propulsion engine: An impact assessment study.
- Anantharaman, M. P. (2019). Development of a condition-based maintenance model for a vessel's main propulsion engine. University of Tasmania, Doctoral dissertation.
- Anantharaman, M., Islam, R., Sardar, A., Garaniya, V., & Khan, F. (2021). Impact of defective turbocharging system on the safety and reliability of large marine diesel engines. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15(1).
- Anantharaman, M., Islam, R., Khan, F., Garaniya, V., & Lewarn, B. (2020). Emergency preparedness for management of main propulsion engine failure on a bulker during harsh weather at sea. *Safety in Extreme Environments*, 2, 103–111.
- Anantharaman, M., Garaniya, V., Khan, F., & Lewarn, B. (2015). Marine engines and their impact on the economy, technical efficiency, and environment. *Marine Engineering*, 50(3), 360–367.

- Anantharaman, M., Khan, F., Garaniya, V., & Lewarn, B. (2014). A step-by-step approach for evaluating the reliability of the main engine lube oil system for a ship's propulsion system. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 8(3), 367–371.
- Anantharaman, M. (2013). Using reliability block diagrams and fault tree circuits to develop a condition-based maintenance model for a vessel's main propulsion system and related subsystems. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 7, 3.
- Atoui, M. A., Cohen, A., Verron, S., & Kobi, A. (2019). A single Bayesian network classifier for monitoring with unknown classes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85, 681–690.
- ATSB. (2023, Eylül 17). Marine occurrence investigation, report no. 341-MO-2018-004: https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/5778599/mo-2018-004_final.pdf.
- ATSB. (2023, Eylül 17). Marine occurrence investigation, report no. 229: https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/1363090/mair229_001.pdf.
- ATSB. (2023, Eylül 17). Marine occurrence investigation, report no. ME-2019-005: https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2019/mair/me-2019-005.
- ATSB. (2023, Eylül 17). Marine occurrence investigation, report no. 134: https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/1998/mair/mair134.
- ATSB. (2023, Eylül 17). Marine occurrence investigation, report no. 191: https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2003/mair/mair191.
- ATSB. (2023, Kasım 22). Marine occurrence investigation, report no. 186: https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2002/mair/mair186.
- ATSB. (2023, Kasım 22). Marine occurrence investigation, report no. 218: https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2005/mair/mair218.
- ATSB. 2023, Kasım 22). Marine occurrence investigation, report no. 171: https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2001/mair/mair171.
- Avcı, E. (2012). Bayesci sağkalım analizi ve meme kanseri verileri üzerine bir uygulama, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Awal, Z. I., & Hasegawa, K. (2015). Analysis of ship accidents due to marine engine failure—Application of logic programming technique (LPT). *Marine Engineering*, 50(6), 744–751.
- Aydın, M., Akyüz, E., & Boustras, G. (2024). A holistic safety assessment for cargo holds and decks fire & explosion risks under fuzzy Bayesian network approach. *Safety Science*, 176, 106555.

- Aziz, A., Ahmed, S., Khan, F., Stack, C., & Lind, A. (2019). Operational risk assessment model for marine vessels. *Reliability Engineering & System Safety*, 185, 348–361.
- Baber, E. (2007). İnsan faktörü analizi ve sınıflandırma sistemi (HFACS) ve kara havacılık kazalarına uygulanabilirliği. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Babrauskas, V. (2003). Ignition handbook. Society of Fire Protection Engineers: Gaithersburg, MD, USA.
- BahooToroody, A., Abaei, M. M., Banda, O. V., Kujala, P., De Carlo, F., & Abbassi, R. (2022). Prognostic health management of repairable ship systems through different autonomy degrees: From current condition to fully autonomous ship. *Reliability Engineering & System Safety*, 221, 108355.
- Banks, J., Hines, J., Lebold, M., Campbell, R., Begg, C., & Byington, C. (2001). Failure modes and predictive diagnostics considerations for diesel engines. In *Proceedings of the 55th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, 2-5.
- Bayazit, O., Toz, A. C., & Buber, M. (2020). Spatial distribution analysis of ship accidents in the Çanakkale Strait. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 62, 9–17.
- Bayazit, O., & Kaptan, M. (2023). Evaluation of the risk of pollution caused by ship operations through bow-tie-based fuzzy Bayesian network. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135386.
- Batenburg, V. C. P., & Kriens, J. (1989). Bayesian discovery sampling: A simple model of Bayesian inference in auditing. *Journal of the Royal Statistical Society*, 38(4), 227–233.
- Becker, E., & Poste, P. (2006). Keeping the blades turning: Condition monitoring of wind turbine gears. *Refocus*, 7, 26–32.
- Bejger, A., & Drzewieniecki, J. B. (2019). The use of acoustic emission to diagnose fuel injection pumps of marine diesel engines. *Energies*, 12, 4, 4661.
- Bejger, A., & Drzewieniecki, J. B. (2020). A new method of identifying the limit condition of injection pump wear in self-ignition engines. *Energies*, 13, 7, 1601.
- Beiger, A. (2011). Analysis of damage of selected elements of the injection system of marine diesel engines. *Journal of Polish CIMAC*, 6, 2, 23–30.
- Bicen, S., Kandemir, C., & Celik, M. (2021). A human reliability analysis to crankshaft overhauling in dry-docking of a general cargo ship. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 235, 1, 93–109.
- Biswas, P. V., Ahn, J. H., & Lee, H. R. (2013). Monitoring of bearing wear in a marine engine by change of piston position—Effect of wear and inertia. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14, 10, 1697–1701.

- Bocchetti, D., Giorgio, M., Guida, M., & Pulcini, G. (2009). A competing risk model for the reliability of cylinder liners in marine diesel engines. *Reliability Engineering & System Safety*, 94, 8, 1299–1307.
- Brocken, E. M. (2016). Improving the reliability of ship machinery: A step towards unmanned shipping. Delft University of Technology, Master's thesis, Netherlands
- Bromley, J. (2005). Guidelines for the use of Bayesian networks as a participatory tool for water resource management. *Management of the Environment and Resources using Integrated Techniques (MERIT)*.
- Cai, C., Weng, X., & Zhang, C. (2017). A novel approach for marine diesel engine fault diagnosis. *Cluster Computing*, 20, 2, 1691–1702.
- Carjova, K., Priednieks, V., Klaucans, R., Irbe, I., & Urbahs, A. (2021). Fractographic study of marine diesel engine connecting rod stud bolt crack. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 58, 4, 28–42.
- Carlin, B. P., & Louis, T. A. (1997). Bayes and empirical Bayes methods for data analysis. USA: CRC Press LLC.
- Ceylan, B. O., Karatuğ, Ç., Ejder, E., Uyanık, T., & Arslanoğlu, Y. (2022). Risk assessment of sea chest fouling on the ship machinery systems by using both FMEA method and ERS process. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 1–20.
- Ceylan, B. O., Karatuğ, Ç., & Arslanoğlu, Y. (2022). A novel methodology for the use of engine simulators as a tool in academic studies. *Journal of Marine Science and Technology*, 1, 13.
- Ceylan, B. O., Akyuz, E., & Arslanoğlu, Y. (2022). Modified quantitative systems theoretic accident model and processes (STAMP) analysis: A catastrophic ship engine failure case. *Ocean Engineering*, 253, 111187.
- Chang, Y. T., & Park, H. (2019). The impact of vessel speed reduction on port accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 123, 422–432.
- Cheliotis, M., Lazakis, I., & Cheliotis, A. (2022). Bayesian and machine learning-based fault detection and diagnostics for marine applications. *Ships and Offshore Structures*, 1–13.
- Chen, P., Zhang, Z., Huang, Y., Dai, L., & Hu, H. (2022). Risk assessment of marine accidents with fuzzy Bayesian networks and causal analysis. *Ocean & Coastal Management*, 228, 106323.
- Chen, J., Bian, W., Wan, Z., Yang, Z., Zheng, H., & Wang, P. (2019). Identifying factors influencing total-loss marine accidents in the world: Analysis and evaluation based on ship types and sea regions. *Ocean Engineering*, 191, 106495.
- Chen, S. J., & Hwang, C. L. (1992). Fuzzy multiple attribute decision making methods. In *Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications*, 289-486. Springer Berlin Heidelberg.

- Chuku, A. J., Adumene, S., Orji, C. U., Johnson, K. T., & Nitonye, S. (2023). Dynamic failure analysis of ship energy systems using an adaptive machine learning formalism. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, 2, 4, 312–321.
- Chybowski, L., Jakubowski, A., & Żółkiewski, S. (2023). Analysis of the relationship between selected ship and propulsion system characteristics and the risk of main engine turbocharger explosion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 2, 360.
- Cicek, K., & Celik, M. (2013). Application of failure modes and effects analysis to main engine crankcase explosion failure on-board ship. *Safety Science*, 51, 1, 6–10.
- Cicek, K., Turan, H. H., Topcu, Y. I., & Searsan, M. N. (2010). Risk-based preventive maintenance planning using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for marine engine systems. In 2010 *Second International Conference on Engineering System Management and Applications*, 1–6.
- Coraddu, A., Kalikatzarakis, M., Theotokatos, G., Geertsma, R., & Oneto, L. (2021). Physical and data-driven models hybridization for modelling the dynamic state of a four-stroke marine diesel engine. In *Engine Modeling and Simulation*, 145–193.
- Coraddu, A., Oneto, L., Cipollini, F., Kalikatzarakis, M., Meijn, G. J., & Geertsma, R. (2022). Physical, data-driven and hybrid approaches to model engine exhaust gas temperatures in operational conditions. *Ships and Offshore Structures*, 17, 6, 1360–1381.
- Corbett, J. J., & Winebrake, J. (2008, November). The impacts of globalization on international maritime transport activity: Past trends and future perspectives. In *Global Forum on Transport and Environment in a Globalizing World, Guadalajara, Mexico*.
- Corbett, J. J., Winebrake, J., Endresen, Ø., Eide, M., Dalsøren, S., Isaksen, I. S., & Sørgård, E. (2010). International maritime shipping: The impact of globalisation on activity levels. In *Globalisation, Transport and the Environment*, 55–79.
- Ćorović, B. M., & Djurović, P. (2013). Research of marine accidents through the prism of human factors. *Promet – Traffic & Transportation*, 25, 4, 369–377.
- Curran, S., Onorati, A., Payri, R., Agarwal, A. K., Arcoumanis, C., Bae, C., ... & Wermuth, N. (2024). The future of ship engines: Renewable fuels and enabling technologies for decarbonization. *International Journal of Engine Research*, 25, 1, 85–110.
- CIMAC. (2008). Guidelines for the lubrication of medium-speed diesel engines. *The International Council on Combustion Engines*, 29.
- CIMAC. (2011). Used engine oil analysis - User interpretation guide. *The International Council on Combustion Engines*, 30.
- CIMAC. (2017). CIMAC Guideline: Cold corrosion in marine two stroke. *The International Council on Combustion Engines*, 11, 1–36.

- Cummings, M. L., & Guerlain, S. (2003). The tactical Tomahawk conundrum: Designing decision support systems for revolutionary domains. *In Systems, Man, and Cybernetics, IEEE International Conference on*, 1583–1588. IEEE.
- Çıkmak, S. (2020). Tedarik zinciri risklerinin ve risk azaltma stratejilerinin Bayes Ağlarıyla modellenmesi. Sakarya Üniversitesi, İşletme Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
- Çinicioğlu, E., Atalay, M., & Yorulmaz, H. (2013). Trafik kazaları analizi için Bayes Ağları modeli. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 6, 2.
- Çolak, K. (2023). Gemi ana makine ön ısıtmasında dizel jeneratör egzoz gazları kullanımının enerji tasarrufuna etkisinin termodinamik analizi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Dash, B. M., Bouamama, B. O., Boukerdja, M., & Pekpe, K. M. (2024). Bond Graph-CNN based hybrid fault diagnosis with minimum labeled data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 131, 107734.
- Daya, A. A., & Lazakis, I. (2023). Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance. *Ocean Engineering*, 272, 113766.
- Dayi, W., Zhe, H., & Yanyan, L. (2018). Study on the wear failure rule of marine diesel engine based on MCMC method. *In 2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, 593–596.
- Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: A review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51, 3, 229–240.
- Demirel, H. (2021). An evaluation of human error probabilities for critical failures in auxiliary systems of marine diesel engines. *Journal of Marine Science and Application*, 20, 1, 128–137.
- Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C., & Chen, Z. (2021). A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. *Science of the Total Environment*, 766, 144319.
- Dere, Ç. (2015). İki zamanlı bir gemi dizel ana makinesi'nin modeli ve simülasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri, Doktora Tezi, Enstitüsü.
- Dhillon, B. S., & Liu, Y. (2006). Human error in maintenance: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12, 1, 21-36.
- Dhillon, B. S. (2007). Human reliability and error in transportation systems. *Springer Science & Business Media*.
- Dikis, K., & Lazakis, I. (2019). Dynamic predictive reliability assessment of ship systems. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*.
- Dikis, K., Lazakis, I., & Turan, O. (2014). Probabilistic risk assessment of condition monitoring of marine diesel engines. ICMT.

- Dionysiou, K., Bolbot, V., & Theotokatos, G. (2022). A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 236, 1, 228–244.
- Dong, X. T., & Nguyen, M. H. (2021). Acoustic emission investigation on an electronically controlled two-stroke low-speed marine diesel engine: In axial and vertical directions. *Acoustics Australia*, 49, 53–67.
- Douglas, R. M. (2007). Monitoring of the piston ring-pack and cylinder liner interface in diesel engines through acoustic emission measurements. Heriot-Watt University, PhD thesis.
- Doug, W. (2004). *Pounder's marine diesel engines and gas turbines*. Elsevier UK.
- Dünder, E. (2013). Bayesci ağlarda öğrenme algoritmalarının karşılaştırılması. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Dragsted, J. (2013). The first 50 years of turbocharged 2-stroke, crosshead, marine diesel engines. CIMAC, Frankfurt.
- Drewing, S., Abramczyk, N., & Żuk, D. (2021). Analysis of changes in the angular velocity of the crankshaft of the marine engine for diagnosing the wear and location of the failure of the fuel injection system. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 25, 1, 72–76.
- Ekici, O. (2009). İstatistikte Bayesyen ve klasik yaklaşımın kavramsal farklılıkları. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12, 21, 89–101.
- Eleftheriou, A., Kouvaris, K., Karvelis, P., & Stylios, C. (2018). Micro climate prediction utilizing machine learning approaches. In *2018 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters*, 197–200.
- Emovon, I. (2016). Failure mode and effects analysis of ship systems using an integrated Dempster Shafer theory and Electre method. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 10, 1, 45–60.
- EMSA. (2017). *European Maritime Safety Agency Reports 2017*.
- EMSA. (2021). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2021*.
- EMSA. (2024). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024*.
- Embrey, D. E., Humphreys, P., Rosa, E. A., Kirwan, B., Rea, K., & SLIMMA, U. (1984). An approach to assessing human error probabilities using structured expert judgment. *NUREG/CR*, 3518, 1.
- Endresen, Ø., Sörgård, E., Behrens, H. L., Brett, P. O., & Isaksen, I. S. (2007). A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112, 12.

- Eriksen, S., Utne, I. B., & Lützen, M. (2021). An RCM approach for assessing reliability challenges and maintenance needs of unmanned cargo ships. *Reliability Engineering & System Safety*, 210, 107550.
- Eruguz, A. S., Tan, T., & van Houtum, G. J. (2017). A survey of maintenance and service logistics management: Classification and research agenda from a maritime sector perspective. *Computers & Operations Research*, 85, 184–205.
- Ezeoye, I. S., & Orangian, M. (2019). Design and optimisation of marine two-stroke diesel engine piston. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 3(4).
- Fangyu, L., Yihuai, H., Xin, W., & Jiawei, J. (2019). Performance fault simulation and analysis of marine two-stroke diesel engine. *Chinese Journal of Ship Research*, 14, 1, 41–46.
- Fanø, J. J. (2019). Enforcement of the 2020 sulphur limit for marine fuels: Restrictions and possibilities for port States to impose fines under UNCLOS. Review of European, *Comparative & International Environmental Law*, 28, 3, 278–288.
- Famakinwa, A., & Shibutani, T. (2022). Condition-based monitoring for marine engine maintenance by analyzing drain cylinder oil sample. *Tribology Online*, 17, 2, 71–77.
- Fonte, M., Duarte, P., Anes, V., Freitas, M., & Reis, L. (2015). On the assessment of fatigue life of marine diesel engine crankshafts. *Engineering Failure Analysis*, 56, 51–57.
- Gaag, L. C. V. D. (1996). Bayesian belief networks: Odds and ends. *Computer Journal*, 39, 2, 97–113.
- Gadow, R., López, D., & Pérez, J. (2003). Thermal spraying: Functional coatings for high performance heavy diesel engines. In *European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy, European PM Conference Proceedings*, 3, 1.
- Gatfield, D., & Ieng, A. (2006). Using simulation to determine a framework for the objective assessment of competence in maritime crisis management. *International Simulation and Gaming Yearbook-New Series*, 14, 44.
- Gharib, H., & Kovács, G. (2022). Development of a new expert system for diagnosing marine diesel engines based on real-time diagnostic parameters. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 68, 10, 642–653.
- Göksu, B., & Erginer, K. (2020). Prediction of ship main engine failures by artificial neural networks. *Journal of ETA Maritime Science*, 8, 2.
- GISIS. (2023). Marine casualties and incidents, Report No, R-002-2023-DIAM. <https://gisis.imo.org/Public/Default.aspx>, 17 Şubat 2024.
- Giorgio, M., Guida, M., & Pulcini, G. (2007). A wear model for assessing the reliability of cylinder liners in marine diesel engines. *IEEE Transactions on reliability*, 56, 1, 158–166.

- Glickman, M. E., & Van Dyk, D. A. (2007). Basic Bayesian methods. *Topics in Biostatistics*, 319-338.
- Griffiths, D. (1997). British marine industry and the diesel engine. *The Northern Mariner/Le Marin Du Nord*, 7, 3, 11-40.
- Grządziela, A. (2011). Diagnosis of gas turbine engines rotors system in nonstationary states. *Polish Cimac*, 103.
- Guo, X., Ji, J., Khan, F., Ding, L., & Tong, Q. (2021). A novel fuzzy dynamic Bayesian network for dynamic risk assessment and uncertainty propagation quantification in uncertainty environments. *Safety Science*, 141, 105285.
- Guerrero, D. P., & Jiménez-Espadafor, F. J. (2019). Torsional system dynamics of low speed diesel engines based on instantaneous torque: Application to engine diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 858-878.
- Gündoğdu, S. (2016). Balıklarda büyüme parametrelerinin Bayesyen istatistiksel yöntemle tahmini. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana.
- Gürgen, M. (2021). Yapay zeka yaklaşımları ile gemi ana makinesinin belirlenmesi ve optimum organik rankine çevrimli atık ısı geri kazanım sisteminin kurulması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Gürsakal, N. (2007). Betimsel istatistik, Minitab SPSS Statistica Excel uygulamalı. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti.
- Ha, J. S., & Seong, P. H. (2004). A method for risk-informed safety significance categorization using the analytic hierarchy process and Bayesian belief networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 83, 1, 1-15.
- Hartman, J. (2011). Supercharging performance handbook. MotorBooks International, China.
- Heim, K. (2002). Existing and future demands on the turbocharging of modern large two-stroke diesel engines. *In 8th Supercharging Conference, Dresden*, 1-2.
- Hemmatian, B., Abdolhamidzadeh, B., Darbra, R. M., & Casal, J. (2014). The significance of domino effect in chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 29, 30-38.
- Hendre, O., Kale, P., Gore, R., & Pardeshi, N. (2023). Numerical study of water cooling jacket of a diesel engine using coupled field analysis. *Materials Today: Proceedings*, 77, 739-747.
- Heywood, J. B. (2018). Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill Education.
- Hosseini, S., & Barker, K. (2016). A Bayesian network model for resilience-based supplier selection. *International Journal of Production Economics*, 180, 68-87.

- Hountalas, D. T. (2000). Prediction of marine diesel engine performance under fault conditions. *Applied Thermal Engineering*, 20, 18, 1753-1783.
- Hou, L., Zhang, J., & Du, B. (2020). A fault diagnosis model of marine diesel engine fuel oil supply system using PCA and optimized SVM. *Journal of Physics: Conference Series*, 1576, 1, 012045.
- Hsu, H. M., & Chen, C. T. (1996). Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 79, 3, 279-285.
- Huang, D., Chen, T., & Wang, M. J. J. (2001). A fuzzy set approach for event tree analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 118, 1, 153-165.
- Hu, J., Ren, F., & Fu, C. (2020). Failure analysis of marine engine crankshaft. In 2020 *International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*, 432-435.
- Hu, Y., Wang, M., Zeng, C., & Jiang, J. (2021). Performance failure simulation and characteristic analysis of marine diesel engine turbocharging and gas-exchange system under different running conditions. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 45, 4, 140-153.
- Hutchinson, B., Dekker, S., & Rae, A. (2024). How audits fail according to accident investigations: A counterfactual logic analysis. *Process Safety Progress*.
- Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5, 4, 358-386.
- Jao, T. C., & Verhelst, A. (2013). Marine engine oils. In *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA.
- Japan, P&I. Club. (2017). Thinking prevention of engine trouble: <https://www.piclub.or.jp/en/lossprevention/guide>
- Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 7, 1483-1510.
- Jiang, W., Hu, W., & Xie, C. (2017). A new engine fault diagnosis method based on multi-sensor data fusion. *Applied Sciences*, 7, 3, 280.
- Jun, H. B., & Kim, D. (2017). A Bayesian network-based approach for fault analysis. *Expert Systems with Applications*, 81, 332-348.
- Ibrion, M., Paltrinieri, N., & Nejad, A. R. (2021). Learning from failures in cruise ship industry: The blackout of Viking Sky in Hustadvika, Norway. *Engineering Failure Analysis*, 125, 105355.

- Ilgin, M. A., & Tunali, S. (2007). Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34, 594-604.
- Islam, R., Anantharaman, M., Khan, F., & Garaniya, V. (2020). A review of human error in marine engine maintenance. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 14, 1.
- Islam, R., Anantharaman, M., Khan, F., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2020). A hybrid human reliability assessment technique for the maintenance operations of marine and offshore systems. *Process Safety Progress*, 39, e12118.
- Islam, R., Khan, F., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2018). Human error probability assessment during maintenance activities of marine systems. *Safety and Health at Work*, 9, 1, 42-52.
- Islam, R., Khan, F., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2018a). Human error assessment during maintenance operations of marine systems—What are the effective environmental factors? *Safety Science*, 107, 85-98.
- Islam, T. M., Anantharaman, M., Khan, F., & Garaniya, V. (2019). Reliability assessment of a main propulsion engine fuel oil system—What are the failure-prone components? *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 13, 2.
- Islam, R., Abbassi, R., Garaniya, V., & Khan, F. (2017). Development of a human reliability assessment technique for the maintenance procedures of marine and offshore operations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50, 416-428.
- Islam, R., Yu, H., Abbassi, R., Garaniya, V., & Khan, F. (2017). Development of a monograph for human error likelihood assessment in marine operations. *Safety Science*, 91, 33-39.
- Islam, T. M. R. (2017). Human reliability assessments for the maintenance operation of marine systems. University of Tasmania, National Centre for Maritime Engineering and Hydrodynamics, PhD thesis, Australian Maritime College.
- International Maritime Organization. (2002). Introduction to IMO: <http://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx>
- IMO. (1997). International safety management (ISM) code/guidelines on implementation of the ISM code, London.
- IUMI. (2016). Position paper of the International Union of Marine Insurance (IUMI): Catalytic fines and engine damage. <https://iumi.com/opinions/position-papers>, 17 Ocak 2023.
- Jensen, F. V., & Nielsen, T. D. (2007). Bayesian networks and decision graphs (2nd ed.). New York: Springer.

- JHC. (2013). Marine engine damage due to catalytic fines in fuel. London: https://iumi.com/images/documents/JHC_Catfines_Pack.pdf, 16 Aralık 2023.
- JTSB, Japan Transportation Safety Board. (2021). Marine accident investigation, report no: MA2021-2: <https://www.iims.org.uk/wp-content/uploads/2021/02/JTSB-Marine-accident-investigation-report-MA2021-2.pdf>, 23 Nisan 2024.
- KAIK, Kaza İnceleme Raporları. (2019). İstanbul Boğazı ciddi deniz kazası nihai inceleme raporu, kaza rapor no, DNZ- 3/2019: <https://ulasimemniyeti.uab.gov.tr/uploads/pages/deniz/vitaspirit-kaza-inceleme-raporu-30-ekim-vers2.pdf>, 22 Nisan 2023.
- Kamiński, P. (2011). Computer-aided system to allotment of the operating tasks in the ship engine room. *Journal of Polish CIMAC*, 6, 3, 49-56.
- Kandemir, C., & Celik, M. (2023). A systematic literature review and future insights on maritime and offshore human reliability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 237, 1, 3-19.
- Kandemir, C., & Celik, M. (2021). Determining the error-producing conditions in marine engineering maintenance and operations through HFACS-MMO. *Reliability Engineering & System Safety*, 206, 107308.
- Kandemir, C., & Celik, M. (2021). A human reliability assessment of marine engineering students through engine room simulator technology. *Simulation & Gaming*, 52, 5, 635-649.
- Kandemir, C. (2021). A rule-based human reliability assessment to enhance ship auxiliary machinery maintenance operations. Istanbul Technical University, Department of Maritime Transportation Engineering Graduate Programme, PhD thesis, İstanbul.
- Kandemir, C., & Celik, M. (2020). A human reliability assessment of marine auxiliary machinery maintenance operations under ship PMS and maintenance 4.0 concepts. *Cognition, Technology & Work*, 22, 3, 473-487.
- Kandemir, C., & Celik, M. (2019). A human reliability assessment of marine auxiliary machinery maintenance operations under ship PMS and maintenance 4.0 concepts. *Cognition, Technology & Work*, 1-15.
- Kandemir, C., Celik, M., Akyuz, E., & Aydin, O. (2019). Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations on-board ships: The case of HFO purifier overhauling. *Applied Ocean Research*, 88, 317-325.
- Kang, J., Lu, Y., Zhao, B., Luo, H., Meng, J., & Zhang, Y. (2022). Remaining useful life prediction of cylinder liner based on nonlinear degradation model. *Eksploracja i Niezawodność*, 24, 1.
- Kaptan, M. (2019). Teknolojinin gemi kazalarının oluşumundaki yeri ve öneminin analizi. Karadeniz Technical University, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.

- Karatuğ, Ç., & Arslanoğlu, Y. (2022). Importance of early fault diagnosis for marine diesel engines: A case study on efficiency management and environment. *Ships and Offshore Structures*, 17, 2, 472-480.
- Karagöz, K. (2004). Öngörü ve zaman serileri analizinde Bayesyen yaklaşım. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Karvelis, P., Georgoulas, G., Kappatos, V., & Stylios, C. (2021). Deep machine learning for structural health monitoring on ship hulls using acoustic emission method. *Ships and Offshore Structures*, 16, 4, 440-448.
- Khelil, Y., Graton, G., Djeziri, M., Ouladsine, M., & Outbib, R. (2012). Fault detection and isolation in marine diesel engines: A generic methodology. *IFAC Proceedings*, 45, 20, 964-969.
- Khondaker, A. N., Rahman, S. M., Khan, R. A., Malik, K., & Muhyedeen, M. A. R. (2016). Management of greenhouse gas emissions from maritime operations—challenges and mitigation opportunities. *International Journal of Global Warming*, 9, 3, 306-336.
- Kian, R., Bektaş, T., & Ouelhadj, D. (2019). Optimal spare parts management for vessel maintenance scheduling. *Annals of Operations Research*, 272, 323-353.
- Kirolivanos, G. L., & Jeong, B. (2022). Comparative reliability analysis and enhancement of marine dual-fuel engines. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 6, 1, 1-23.
- Knežević, V., Orović, J., Stazić, L., & Čulin, J. (2020). Fault tree analysis and failure diagnosis of marine diesel engine turbocharger system. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 12, 1004.
- Knowles, M., & Baglee, D. (2012). Condition management of marine lube oil and the role of intelligent sensor systems in diagnostics. *Journal of Physics: Conference Series*, 364, 012007.
- Kobbacy, K. A. (2008). Artificial intelligence in maintenance. In *Complex System Maintenance Handbook*, s. 209-231.
- Korb, K. B., & Nicholson, A. E. (2010). *Bayesian Artificial Intelligence*. CRC Press.
- Korczewski, Z. (2015). Exhaust gas temperature measurements in diagnostics of turbocharged marine internal combustion engines Part I: Standard measurements. *Polish Maritime Research*, 22, 1, 47-54.
- Kostidi, E., & Nikitakos, N. (2017). Exploring the potential of 3D printing of the spare parts supply chain in the maritime industry. *In Safety of Sea Transportation*, 171-178.
- Kökkülünk, A. (2012). Su buharı enjeksiyonlu bir dizel motorunda egzoz gazları geri dolaşımının (EGR) performans ve emisyonlara etkilerinin incelenmesi. Yıldız Teknik University, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Krakovski, R. (2014). Diagnosis modern systems of marine diesel engine. *Journal of Kones*, 21.
- Kutay, Ş., & Kamal, B. (2022). Assessment of marine diesel engine crankshaft damages. *Ships and Offshore Structures*, 17, 9, 2130-2139.
- Kyrtatos, A., Spahni, M., Hensel, S., Züger, R., & Sudwoj, G. (2016, June). The development of the modern low-speed two-stroke marine diesel engine. In *International Council on Combustion Engines (CIMAC) Congress*, 120.
- Kyrtatos, N. P. (2016). Chapter XXX: Slow-speed two-stroke engines. In *Handbook of Marine and Offshore Engineering*.
- Lalić, B., Radica, G., & Račić, N. (2016). Analysis of exhaust gas emission in the marine two-stroke slow-speed diesel engine. *Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development*, 67, 3, 17-35.
- Lampis, M., & Andrews, J. (2009). Introducing dynamics in a fault diagnostic application using Bayesian belief networks. In *2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, 186-190.
- Langewiesche, W. (2010). *The outlaw sea: A world of freedom, chaos, and crime*. North Point Press.
- Laskowski, R. (2015). Fault tree analysis as a tool for modelling the marine main engine reliability structure. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 41, 113, 71-77.
- Lazakis, I., Raptodimos, Y., & Varelas, T. (2018). Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, 152, 404-415.
- Law, L. C., Foscoli, B., Mastorakos, E., & Evans, S. (2021). A comparison of alternative fuels for shipping in terms of lifecycle energy and cost. *Energies*, 14, 24, 8502.
- Law, L. C., Mastorakos, E., & Evans, S. (2022). Estimates of the decarbonization potential of alternative fuels for shipping as a function of vessel type, cargo, and voyage. *Energies*, 15, 20, 7468.
- Lefkowitz, R. Y., & Slade, M. D. (2019). Seafarer mental health study. *ITF Seafarers Trust & Yale University: ITF House*, 49-60.
- Lei, L., Ding, M. Z., Hu, H. W., Gao, Y. X., Xiong, H. L., & Wang, W. (2021). Structural strength and reliability analysis of important parts of marine diesel engine turbocharger. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Li, Z., & Lu, B. (2017). Analysis and treatment of high exhaust temperature of marine generator. In *2017 International Conference on Computational Science and Engineering*, 165-168, Atlantis Press.

- Lion, S., Vlaskos, I., & Taccani, R. (2020). A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine diesel engines and their potential for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 207, 112553.
- Lindley, D. V. (1972). Bayesian statistics: A review. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, London, UK.
- Liu, Z., Liu, Y., Cai, B., & Zheng, C. (2015). An approach for developing diagnostic Bayesian network based on operation procedures. *Expert Systems with Applications*, 42, 4, 1917-1926.
- Livanos, A. G., Theotokatos, G., & Kyrtatos, N. P. (2003). Simulation of large marine two-stroke diesel engine operation during fire in the scavenging air receiver. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2, 2, 9-16.
- Lundh, M., Lützhöft, M., Rydstedt, L., & Dahlman, J. (2011). Working conditions in the engine department—A qualitative study among engine room personnel on board Swedish merchant ships. *Applied Ergonomics*, 42, 2, 384-390.
- Lunt, S. (2011). Recent developments in online oil condition monitoring sensors and alignment with ASTM methods and practices. *Journal of ASTM International*, 8, 7, 1-15.
- Bach, M., & Lubricators, H. J. (2016). Lubtronic SIP promise remarkably low wear rates with low CLO consumption. In *28th CIMAC World Congress. CIMAC International Council on Combustion Engines*.
- Lv, Y., Yang, X., Li, Y., Liu, J., & Li, S. (2024). Fault detection and diagnosis of marine diesel engines: A systematic review. *Ocean Engineering*, 294, 116798.
- MAIB. (2009). Accident Reporting and Investigation, report no: 5/2009: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6ff840f0b6024400005f/MoondanceReport.pdf>, 18 Eylül 2023.
- MAIB. (2018). Accident Reporting and Investigation, report no: 3/2018: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5aa2aa56ed915d4f595c5232/MAIBInvReport03_2018.pdf, 18 Eylül 2023.
- MAIB. (2008). Accident Reporting and Investigation, report no: 14/2008: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c7012ed915d4c10000069/FigaroReport.pdf>, 18 Eylül 2023.
- MAIB. (2019). Accident Reporting and Investigation, report no: 3/2019: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5c6b9e6f40f0b61a1dbf749c/2019_-_3_-_PrideOfKentReport.pdf, 18 Eylül 2023.
- MAN. (2020). Diesel & Turbo, MAN B&W service experience letter 2006-2016. 2450 Copenhagen SV, Denmark.
- Matulić, N., Radica, G., & Nižetić, S. (2020). Engine model for onboard marine engine failure simulation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141, 1, 119-130.

- McCarney, J. (2020). Evolution in the engine room: A review of technologies to deliver decarbonised, sustainable shipping: Technology options for the shipping sector to meet international ship emissions limits. *Johnson Matthey Technology Review*, 64, 3, 374-392.
- Miljković, D. (2011). Fault detection methods: A literature survey. In *2011 Proceedings of the 34th International Convention MIPRO*, 750-755.
- Mishra, C. S., Ali, F., Adam, S., Tesfariam, A., Yemane, A., Amanuel, H., ... & Alem, Y. (2017). Study of the causes of engine failure in ships and maintenance required to prevent engine failure. *International Journal of Contemporary Research and Review*, 8, 7, 20218-20241.
- Mohanty, S., Paul, S., & Hazra, S. (2021). Artificial neural network coupled condition monitoring for advanced fault diagnosis of engine.
- Mondejar, M. E., Andreasen, J. G., Pierobon, L., Larsen, U., Thern, M., & Haglind, F. (2018). A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 126-151.
- Moon, S. M., Cho, Y. J., & Kim, T. W. (2018). Evaluation of lubrication performance of crank pin bearing in a marine diesel engine. *Friction*, 6, 4, 464-471.
- Morton, T. D., Jackson, L., Prince, A. S., & Russell, P. A. (2013). Motor engineering knowledge for marine engineers. Adlard's Coles Nautical.
- MSIU. (2020). Marine safety investigation, report no: 01/2021: https://msiu.gov.mt/wp-content/uploads/2022/11/PDF-Accidents_and_Incidents_2020-MV_Stara_Planina_Final_Safety_Investigation_Report.pdf, 21 Ocak 2024.
- MSIU. (2012). Marine safety investigation report no: 06/2012: https://msiu.gov.mt/wp-content/uploads/2022/11/PDF-Accidents_and_Incidents_2011-MV_B_Oceania_Safety_Investigation_Report_Final.pdf, 21 Ocak 2024.
- MSIU. (2022). Marine safety investigation report no: 20/2022: https://msiu.gov.mt/wp-content/uploads/2023/01/PDF-Accidents_and_Incidents_2021-MT_Chemical_Master_Final_Safety_Investigation_Report.pdf, 21 Ocak 2024.
- MSIU. (2012). Marine safety investigation report no. 09/2012: https://msiu.gov.mt/wp-content/uploads/2022/11/PDF-Accidents_and_Incidents_2011-MV_Ocean_Ranger_Simplified_Final_Safety_Investigation_Report.pdf, 21 Ocak 2024.
- Mulyatno, I. P., Mursid, O., Yudo, H., & Nurhumairoh, S. (2022). Maintenance analysis based on reliability of main engine lubrication system with Markov method. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 7, 4.
- Murawski, L., & Dereszewski, M. (2020). Theoretical and practical backgrounds of monitoring system of ship power transmission systems' torsional vibration. *Journal of Marine Science and Technology*, 25, 1, 272-284.

- Nahim, H. M., Younes, R., Nohra, C., & Ouladsine, M. (2015). Complete modeling for systems of a marine diesel engine. *Journal of Marine Science and Application*, 14, 93-104.
- Nadkarni, S., & Shenoy, P. P. (2001). A Bayesian network approach to making inferences in causal maps. *European Journal of Operational Research*, 128, 3, 479-498.
- Nicolis, J. S., & Tsuda, I. (1985). Chaotic dynamics of information processing: The "magic number seven plus-minus two" revisited. *Bulletin of Mathematical Biology*, 47, 3, 343-365.
- Noroozi, A., Khakzad, N., Khan, F., MacKinnon, S., & Abbassi, R. (2013). The role of human error in risk analysis: Application to pre-and post-maintenance procedures of process facilities. *Reliability Engineering & System Safety*, 119, 251-258.
- Novac, G. (2011). The construction types evolution of internal combustion marine engines.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). Reliability-centered maintenance: <https://www.omdec.com/wikifiles/nowlanHeap.pdf>
- NTSB. (2013, Eylül 17). Marine accident brief No. DCA-12-LM-017: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/MAB1313.pdf>
- NTSB. (2018, Eylül 17). Marine accident brief No. DCA17FM003: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/MAB1801.pdf>
- NTSB. (2006, Eylül 17). Marine accident brief No. DCA-05-MM-008: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/MAB0601.pdf>
- NTSB. (1998, Eylül 17). Marine accident report No. MAR-98/01: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/MAR9801.pdf>
- NTSB. (2023, Eylül 17). Marine accident report No. MIR-23-16: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/MIR2316.pdf>
- NTSB. (1997, Eylül 17). Marine incident summary report No. MAR-97/01: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/MAR9701S.pdf>
- Odendaal, H. M., & Jones, T. (2014). Actuator fault detection and isolation: An optimised parity space approach. *Control Engineering Practice*, 26, 222-232.
- Ogunsanya, O. V. (2012). Decision support using Bayesian networks for clinical decision making. Queen Mary University, Doctoral dissertation, London.
- Okoh, P., & Haugen, S. (2014). A study of maintenance-related major accident cases in the 21st century. *Process Safety and Environmental Protection*, 92, 4, 346-356.
- Olander, P., Eskildsen, S. S., Fogh, J. W., Hollman, P., & Jacobson, S. (2015). Testing scuffing resistance of materials for marine 2-stroke engines–Difficulties with lab scale testing of a complex phenomenon. *Wear*, 340, 9-18.

- Olsson, A. (2021). Lubrication failure: An analysis of lubrication failure insurance claims in main and auxiliary engines. Chalmers University of Technology, Department of Mechanics and Maritime Sciences, Master's thesis, Gothenburg, Sweden.
- Onwuegbuchunam, D. E., Ogwude, I. C., Igboanusi, C. C., Okeke, K. O., & Azian, N. N. (2020). Propulsion shaft and gearbox failure in marine vessels: A duration model analysis. *Journal of Transportation Technologies*, 10, 4, 291.
- Osung, E. E., Tamunodukobipi, D. T., & Douglas, I. E. (2021). Thermal stress analysis and performance optimisation of marine diesel engine piston. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 3, 7, 3585-3596.
- Özsoysal, O. A. (2008). Gemi Diesel Motorları Arıza ve Nedenleri. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Pambudi, D. S. A., Angga, A. T. N., Utomo, A. P., Ahmad, M. M., Tiwana, M. Z. A., & Ravi, A. M. (2021). Main engine water cooling failure monitoring and detection on ships using interface Modbus communication. *Applied Technology and Computing Science Journal*, 4, 2, 91-101.
- Partene, G. C., Simion, D., Nicolae, F., Cotorcea, A., Purcărea, A., & Volintiru, O. N. (2023). Importance of the maritime industry, evolution and statistics. Scientific Bulletin 'Mircea cel Batran' Naval Academy, 26, 1.
- Patil, C., Theotokatos, G., & Tsitsilonis, K. (2025). Data-driven model for marine engine fault diagnosis using in-cylinder pressure signals. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 24, 1, 70-82.
- Pennie, D., Brook-Carter, N., & Gibson, W. (2007). Human factors guidance for maintenance. In *Human factors in ship design, safety and operation conference*, 1-10, The Royal Institution of Naval Architects.
- Perčić, M., Vladimir, N., Koričan, M., Jovanović, I., & Haramina, T. (2023). Alternative fuels for the marine sector and their applicability for purse seiners in a life-cycle framework. *Applied Sciences*, 13, 24, 13068.
- Deegan, P. (2011). A remarkable lack of practical skills something we all need to address. Alert! The International Maritime Human Element Bulletin, The Nautical Institute; Lloyd's Register of Shipping.
- Prastya, D. E., Pitana, T., Zaman, M. B., & Siswantoro, N. (2020). Main engine performance evaluation with forecasting assessment based on condition monitoring data in exhaust gas temperature. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 5, 2.
- Polemis, D., & Boviatsis, M. (2023). Legal and policy issues while evaluating the sustainability of a floating storage regasification unit: The case of Alexandroupoli Greece. *Sustainability*, 15, 5, 4660.
- Popov, D. (2022). Study of the effects on engine fuel consumption generated by turbocharger performance. *Trans Motauto World*, 7, 3, 132-135.

- Qi, Z., Qi, Y., & Hu, G. (2020). A practical approach to detect faults of marine diesel engine. *Journal of Computer and Communications*, 8, 8, 12-21.
- Qi, Z., Qi, Y., & Hu, G. (2020). Research on fault prediction for marine diesel engines. *Journal of Computer and Communications*, 8, 8, 36-44.
- Qiao, W., Liu, Y., Ma, X., & Liu, Y. (2020). Human factors analysis for maritime accidents based on a dynamic fuzzy Bayesian network. *Risk Analysis*, 40, 5, 957–980.
- Qixian, S., & Yan, S. (2000). Development of laser cladding Stellite F alloy on valve face. *FISITA World Automotive Congress, Seoul, June, 12-15, 2000*, Seoul, Korea.
- Rajakarunakaran, S., Kumar, A. M., & Prabhu, V. A. (2015). Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 33, 109-123.
- Radica, G. (2008). Expert system for diagnosis and optimisation of marine diesel engines. *Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu*, 50, 2, 105-116.
- Raptodimos, Y., & Lazakis, I. (2017, January). Fault tree analysis and artificial neural network modelling for establishing a predictive ship machinery maintenance methodology. In *Smart Ship Technology 2017*. Royal Institution of Naval Architects.
- Reason, J. (2000). Human error: Models and management. *British Medical Journal*, 172, 393-396.
- Reason, J. (1990). *Human Error*, Cambridge university press, United States.
- Ren, J., Wang, J., Jenkinson, I., Xu, D. L., & Yang, J. B. (2007). A Bayesian network approach for offshore risk analysis through linguistic variables. *China Ocean Engineering*, 21, 3, 371.
- Ren, J., Jenkinson, I., Wang, J., Xu, D., & Yang, J. (2009). An offshore risk analysis method using fuzzy Bayesian network. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 131, 4.
- Rødseth, Ø., Perera, L. P., & Mo, B. (2016). Big data in shipping – Challenges and opportunities. In *Proceedings of the 15th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, 361–373.
- Robinson, R. W. (1977). Counting unlabeled acyclic digraphs. In *Combinatorial Mathematics V: Proceedings of the Fifth Australian Conference*, 28-43, Springer Berlin Heidelberg.
- Rony, Z. I., Mofijur, M., Hasan, M. M., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., Ahmed, S. F., ... & Show, P. L. (2023). Alternative fuels to reduce greenhouse gas emissions from marine transport and promote UN sustainable development goals. *Fuel*, 338, 127220.
- Ross, T. J. (2005). *Fuzzy logic with engineering applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons Ltd.

- Rubio, J. A. P., Vera-García, F., Grau, J. H., Cámara, J. M., & Hernandez, D. A. (2018). Marine diesel engine failure simulator based on thermodynamic model. *Applied Thermal Engineering*, 144, 982-995.
- Russ, S., Rout, S., Sevdalis, N., Moorthy, K., Darzi, A., & Vincent, C. (2013). Do safety checklists improve teamwork and communication in the operating room? A systematic review. *Annals of Surgery*, 258, 6, 856-871.
- Saçıldı, İ. S. (2011). Gelişmiş ve Gelişmekte Olan Piyasalarda Hisse Senedi Getiri Volatilitelerinin Bayes Yaklaşımı ile Analizi. Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Sætrevik, B., & Hystad, S. W. (2017). Situation awareness as a determinant for unsafe actions and subjective risk assessment on offshore attendant vessels. *Safety Science*, 93, 214–221.
- Saputra, R. S. H., Priharanto, Y. E., & Abrori, M. Z. L. (2018). Failure mode and effect analysis (FMEA) applied for risk assessment of fuel oil system on diesel engine of fishing vessel. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13, 21.
- Sarıalioğlu, S. (2019). Gemi Maine Dairesi Yangınlarının İnsan Faktörü Analiz Sınıflandırma Sistemi ve Bulanık Hata Ağacı Yöntemler ile Analizi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Samosir, D. H., Markert, M., & Busse, W. (2017). The technical and business analysis of using shore power connection in the port of Hamburg. *Jurnal Teknik ITS*, 5, 2.
- Schlager, D., Theiler, C., & Kohn, H. (2002). Protection against high temperature corrosion with laser welded claddings, applied and tested on exhaust valve discs of large diesel engines burning heavy fuel oil. *Materials and Corrosion*, 53, 103-110.
- Schieman, J. (2010). Operating turbochargers—Collection of articles by Johan Schieman published in Turbo Magazine 1992-1996. ABB Turbo Systems.
- Senol, Y. E., & Yasli, F. (2021). A risk analysis study for chemical cargo tank cleaning process using fuzzy Bayesian network. *Ocean Engineering*, 235, 109360.
- Shappel, S. A., & Wiegmann, D. A. (2000). The Human Factors Analysis and Classification System-HFACS. *US Federal Aviation Administration*, 1050-8414, 1-19.
- Shappell, S. A., & Wiegmann, D. A. (2003). A human error analysis of general aviation controlled flight into terrain accidents occurring between 1990-1998. *FAA - Federal Aviation Administration*.
- Sharples, J. (2019). LNG supply chains and the development of LNG as a shipping fuel in Northern Europe. *In The Oxford Institute for Energy Studies*.
- Singh, P., & van Gulijk, C. (2023). Digital safety delivery: How a safety management system looks different from a data perspective. *In Reliability Engineering and Computational Intelligence for Complex Systems: Design, Analysis and Evaluation*, 145-157.

- Siswantoro, N., Priyanta, D., & Zaman, M. B. (2020). Failure Mode and Effect Criticality Analysis (FMECA) fuzzy to evaluate critical level on main engine supporting system. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 557, 1, 012036.
- Skliros, C., Miguez, M. E., Fakhre, A., & Jennions, I. (2018). A review of model-based and data-driven methods targeting hardware systems diagnostics.
- Smith, B. J., & Aimarest, M. (2001). Oil mist detection as an aid to monitoring an engine's condition. *QMI Multiplex*, 1-18.
- Smolenska, H., & Konczewicz, W. (2010). Failure analysis of the exhaust valve face in diesel marine engine. *Advances in Materials Science*, 10, 2, 11.
- Song, Y., Mi, J., Cheng, Y., Bai, L., & Wang, X. (2019). Application of discrete-time Bayesian network on reliability analysis of uncertain system with common cause failure. *Quality and Reliability Engineering International*, 35, 4, 1025-1045.
- Sorensen, J. E. (1969). Bayesian analysis in auditing. *The Accounting Review*, 44, 3, 555-561.
- Squire, D. (2005). Competent people make the difference. Alert! :The International Maritime Human Element Bulletin. The Nautical Institute (Great Britain); Lloyd's Register of Shipping, London.
- Stanivuk, T., Vidović, F., Stazić, L., & Damjanić, D. (2022). Marine propulsion engines maintenance system creation, case study. *Zbornik Veleučilišta u Rijeci*, 10, 1, 439-450.
- Stoumpos, S., & Theotokatos, G. (2022). A novel methodology for marine dual fuel engines sensors diagnostics and health management. *International Journal of Engine Research*, 23, 6, 974-994.
- Sun, J., Ren, H., Duan, Y., Yang, X., Wang, D., & Tang, H. (2024). Fusion of multi-layer attention mechanisms and CNN-LSTM for fault prediction in marine diesel engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 6, 990.
- Sugeno, M. (1995). Toward intelligent computing. In *Future Directions of Fuzzy Theory and Systems*, 10-18, World Scientific.
- Sui, C., de Vos, P., Stapersma, D., Visser, K., Hopman, H., & Ding, Y. (2022). Mean value first principle engine model for predicting dynamic behaviour of two-stroke marine diesel engine in various ship propulsion operations. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, 100432.
- Şahin, T., Imrak, C. E., Cakir, A., & Candaş, A. (2022). Evolved model for early fault detection and health tracking in marine diesel engine by means of machine learning techniques. *Pomorstvo*, 36, 1, 95-104.
- Şakar, C. (2017). Petrol/kimyasal tankerlerde tehlikeli yük operasyonlarında emniyet ve risk değerlendirmesi: Olasılıksal ilişki analizleri. Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.

- 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, 396-413.
- The Swedish Club. (2018). Main engine damage study: https://www.swedishclub.com/media_upload/files/Loss%20Prevention/Main%20Engine%20Damage/TSC-main-engine-WEB2020.pdf . 18 Haziran 2023.
- The Swedish Club. (2021). Engine damage: https://www.swedishclub.com/media_upload/files/Publications/Loss%20Prevention/TSCEngineDamage2021-WEB.pdf. 18 Haziran 2023.
- Taleb-Berrouane, M., Khan, F., & Amyotte, P. (2020). Bayesian stochastic Petri nets (BSPN)—A new modelling tool for dynamic safety and reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106587.
- Ta, T. V., Vu, N. H., Triet, M. A., Thien, D. M., & Cang, V. T. (2017). Assessment of marine propulsion system reliability based on fault tree analysis. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 2, 4, 55-61.
- Tang, H., & Liu, S. (2007). Basic theory of fuzzy Bayesian networks and its application in machinery fault diagnosis. In *Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 4, 132-137.
- Taylor, D. A. (1987). Marine control practice. Butterworth-Heinemann, Hong Kong.
- Tıraşoğlu, B. Y. (2016). Birim kök testlerine Bayesyen yaklaşım: G20 ülkelerinde satınalma gücü paritesi teorisinin sınanması. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Tsitsilonis, K. M., Theotokatos, G., & Habens, M. (2020). A modelling approach for predicting marine engines shaft dynamics. Institute of Marine Engineering, *Science and Technology*.
- Tsitsilonis, K. M., & Theotokatos, G. (2022). A novel method for in-cylinder pressure prediction using the engine instantaneous crankshaft torque. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 236, 1, 131-149.
- Tsitsilonis, K., Theotokatos, G., & Coventry, A. (2021). Development of an intelligent marine engines health assessment system based on digital twins and data-driven models. In *Annual Conference of Marine Technology*, 33-46.
- Tzannatos, E., & Kokotos, D. (2009). Analysis of accidents in Greek shipping during the pre- and post-ISM period. *Marine Policy*, 33, 4, 679-684.
- Tusher, H. M., Nazir, S., Mallam, S., Yang, Z., Asgher, U., & Rusli, R. (2024). Exploring the effects of automation malfunction on team communication and coordination in ships' engine rooms. *Process Safety Progress*, 43, S50-S62.
- Uchida, M. (2004). Analysis of human error in Marine Engine Management. *Advances in International Maritime Research. Proceedings of Annual General Assembly*, 5, 85-93.

- Ugurlu, O., Yildirim, U., & Yukseyildiz, E. (2013). Marine accident analysis with GIS. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 3, 1-2, 21–39.
- UK P&I Club. (2017). Reducing the risk of serious engine damage caused by catalytic fines: <https://www.ukpandi.com/news-and-resources/news/article/bulletins/2017/reducing-the-risk-of-serious-engine-damage-caused-by-catalytic-fines/>. 18 Haziran 2023.
- Uladi, Ş. U. (2022). Bayesyen zaman serilerinin teorik açıdan irdelenmesi ve örnek bir uygulama. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora tezi Osmaniye.
- Uludağ, S. (2013). Denetçi yargısının nesnelleştirilmesinde Bayes yaklaşımı ve bir uygulama. Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- UNCTAD. (2024). Review of maritime transport. United Nations Publications.
- UNCTAD. (2022). Review of maritime transport. United Nations Publications.
- URL-1. (2024, Mart 24). Maritime Safety: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/Default.aspx>
- URL-2. (2024, Mart 24). IMO2020 Report: <https://www.readkong.com/page/imo2020-report-new-2020-sulphur-regulations-for-global-8001941>
- URL-3. (2024, Mart 28). Improving the energy efficiency of ships: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx>
- URL-4. (2024, Eylül 12). Alternative fuels: the options: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/alternative-fuels/>
- URL-5. (2024, Kasım 18). IS VLSFO damaging your engine?: <https://innospec.com/wp-content/uploads/2020/10/Marine-technical-bulletin-Enhance-VLSFO-Quality.pdf>
- URL-6. (2024, Eylül 11). P&I Loss Prevention Bulletin, No. 38 To prevent engine accidents: <https://www.piclub.or.jp/lossprevention/guide>
- URL-7. (2024, Eylül 22). Marine Accident Investigation Report: https://jtsb.mlit.go.jp/eng-mar_report/2018/2017tk0006e.pdf
- URL-8. (2024, Eylül 22). Main engine failure on oil tanker Thames Fisher: <https://www.gov.uk/maib-reports/main-engine-failure-on-board-oil-tanker-thames-fisher-in-southampton-water-england#contents>
- URL-9. (2024, Eylül 22). Failure of main engine on product tanker Audacity and subsequent parting of tow rope from tug Red Wolf with 1 person injured: <https://www.gov.uk/maib-reports/parting-of-tow-rope-on-product-tanker-audacity-while-under-tow-by-tug-red-wolf-east-of-flamborough-head-scotland-with-1-person-injured>

- URL-10. (2024, Eylül 22). 201856 Loss of power and inadequate communication contributes to grounding: <https://www.nautinst.org/resources-page/201856-loss-of-power-and-inadequate-communication-contributes-to-grounding.html>
- URL-11. (2024, Eylül 22). 201914 Emergency slowdown override to the rescue: <https://www.nautinst.org/resources-page/201914-emergency-slowdown-override-to-the-rescue.html>
- URL-12. (2024, Eylül 24). Adverse Weather Condition functionality and minimum propulsion power: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/adverse-weather-condition-functionality-and-minimum-propulsion-power.pdf?sfvrsn=6b5c8ca9_16
- URL-13. (2024, Aralık 18). A leaking water ballast line, and crew's unfamiliarity with the on board ballast system, disabled bulk carrier in the Coral Sea: https://www.atsb.gov.au/media/2005/release/2005_11.
- URL-14. (2024, Aralık 18). 201511 A small defect leads to a large collision: <https://www.nautinst.org/resources-page/201511-a-small-defect-leads-to-a-large-collision.html>
- URL-15. (2024, Aralık 18). 201318 Buoy fouled after loss of propulsion: <https://www.nautinst.org/resources-page/201318-buoy-fouled-after-loss-of-propulsion.html>
- URL-16. (2024, Ocak 13). Safety investigation report: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2020/02/Transport-Malta-MV-Guroni-Final-Safety-Investigation-Report-2020_02.pdf
- URL-17. (2024, Ocak 13). 202002 Quick action helps avoid grounding: <https://www.nautinst.org/resources-page/202002-quick-action-helps-avoid-grounding.html>
- URL-18. (2024, Ocak 13). 201746 Automatic shutdown of main engine: <https://www.nautinst.org/resources-page/201746-automatic-shutdown-of-main-engine.html>
- URL-19. (2024, Ocak 13). 201622 Unnecessary engine shut-down causes trouble: <https://www.nautinst.org/resources-page/201622-unnecessary-engine-shut-down-causes-trouble.html>
- URL-20. (2024, Ocak 13). 201434 Costly mis-communication: <https://www.nautinst.org/resources-page/201434-costly-mis-communication.html>
- URL-21. (2024, Ocak 13). 201160 Testing of quick-closing valves (QCV) caused blackout in TSS: <https://www.nautinst.org/resources-page/201160-testing-of-quick-closing-valves-qcv-caused-blackout-in-tss.html>
- URL-22. (2024, Ocak 13). 201311 Inadequate maintenance caused partial release of bulk carbon dioxide: <https://www.nautinst.org/resources-page/201311-inadequate-maintenance-caused-partial-release-of-bulk-carbon-dioxide.html>

- URL-23. (2024, Ocak 13). 202010 Planned maintenance interval revised: <https://www.nautinst.org/resources-page/202010-planned-maintenance-interval-revised.html>
- URL-24. (2024, Ocak 13). 201226 Flocculation of high asphaltene fuel oil due to overheating: <https://www.nautinst.org/resources-page/201226-flocculation-of-high-asphaltene-fuel-oil-due-to-overheating.html>
- URL-25. (2024, Şubat 17). Report of the chief inspector of marine accidents into the engine failure and subsequent grounding of the motor tanker Braer: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/54c11606e5274a15b3000015/MAIBReport_Braer-1993.pdf
- URL-26. (2024, Şubat 17). MAN Diesel & Turbo Service Letter SL2014-584/LRA: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2014-584.pdf?sfvrsn=6073155a_4
- URL-27. (2024, Şubat 17). 200943 Exhaust manifold bolts sheared off: <https://www.nautinst.org/resources-page/200943-exhaust-manifold-bolts-sheared-off.html>
- URL-28. (2024, Şubat 17). July 6, 1988: The Piper Alpha Disaster: <https://maritime-executive.com/article/july-6-1988-the-piper-alpha-disaster>
- URL-29. (2024, Şubat 17). Maintenance and Occupational Safety and Health: a statistical Picture: <https://osha.europa.eu/en/publications/maintenance-and-occupational-safety-and-health-statistical-picture>
- URL-30. (2024, Mart 22). Marine Safety Investigation Report, Investigation into the collision and subsequent foundering of the B Oceania: https://msiu.gov.mt/wp-content/uploads/2022/11/PDF-Accidents_and_Incidents_2011-MV_B_Oceania_Safety_Investigation_Report_Final.pdf
- URL-31. (2024, Mart 22). Engine failure on container vessel Savannah Express and subsequent contact with linkspan: <https://www.gov.uk/maib-reports/engine-failure-on-container-vessel-savannah-express-and-its-subsequent-contact-with-a-linkspan-at-southampton-docks-england>
- URL-32. (2024, Mart 22). Scavenging space explosion: <https://www.nautinst.org/resources-page/201858-scavenging-space-explosion.html>
- URL-33. (2024, Mart 22). Marine Safety Investigation No. 171, Independent investigation into the equipment failure aboard the Hong Kong flag container vessel: https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/24966/mair171_001.pdf
- URL-34. (2024, Haziran 02). AMSA Inspection Data: <https://www.amsa.gov.au/amsa-inspection-data>
- URL-35. (2024 Ocak 08). Engine Room Fire on Board Towing Vessel Dennis Hendrix: <https://www.nts.gov.investigations/AccidentReports/Reports/MAB1522.pdf>

- URL-36. (2024 Ocak 08). Emergency slowdown override to the rescue: <https://www.nautinst.org/resources-page/201914-emergency-slowdown-override-to-the-rescue.html>
- URL-37. (2024 Ocak 08). The merchant shipping act 1894 MV Herald of Free Enterprise: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/54c1704ce5274a15b6000025/FormalInvestigation_HeraldofFreeEnterprise-MSA1894.pdf
- URL-38. (2024 Aralık 03). Serious accident with Lithuanian flag general cargo ship Klaipeda: <https://tm.lrv.lt/uploads/tm/documents/files/dokumentai/TAITS%20dokumentai/2019-07-26%20KLAIPEDA%20safety%20investigation%20report.pdf>
- URL-39. (2024 Nisan 07). Engine room depressurised: <https://www.nautinst.org/resources-page/200653-engine-room-depressurised.html>
- URL-40. (2024 Nisan 07). Case study: Machinery failure caused by lubrication contamination: <https://safety4sea.com/case-study-machinery-failure-caused-by-lubrication-contamination/>
- URL-41. (2024 Nisan 07). Marine Accident Investigation Report: https://jtsb.mlit.go.jp/eng-mar_report/2018/2017tk0006e.pdf
- URL-42. (2024 Nisan 07). Engine Room Fire aboard Containership President Eisenhower: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/MIR2215.pdf>
- URL-43. (2024 Nisan 07). Fuel leakage from main engine fuel pump: <https://www.nautinst.org/resources-page/201305-fuel-leakage-from-main-engine-fuel-pump.html>
- URL-44. (2024 Mart 01). Repairing a Gasket: <https://www.nautinst.org/resources-page/200412-repairing-a-gasket.html>
- URL-45. (2024 Şubat 28). Grounding of bulk carrier Bulk India: https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2018/mair/341-mo-2018-004
- URL-46. (2024 Ekim 23). Report on the investigation of the electrical blackout and subsequent grounding of the feeder container vessel Clonlee: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6f9440f0b6024400002b/Clonlee.pdf>
- Ung, S., Williams, V., Chen, H., Bonsall, S., & Wang, J. (2006). Human error assessment and management in port operations using fuzzy AHP. *Marine Technology Society Journal*, 40, 73–86.
- Usman, M. (2021). Performance assessment modelling of a low-speed two-stroke marine engine. Liverpool John Moores University, Doctoral dissertation, United Kingdom.
- Uyanık, T., Karatug, Ç., Arslanoglu, Y. (2021). Machine learning-based visibility estimation to ensure safer navigation in the Strait of Istanbul. *Applied Ocean Research*, 112, 102693.

- Ünver, B., Gürgen, S., Şahin, B., & Altın, İ. (2019). Crankcase explosion for two-stroke marine diesel engine using fault tree analysis method in fuzzy environment. *Engineering Failure Analysis*, 97, 288–299.
- Varbanets, R., Fomin, O., Pištěk, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., ... & Kučera, P. (2021). Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 3, 321.
- Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). A novel framework for imputing large gaps of missing values from time series sensor data of marine machinery systems. *Ships and Offshore Structures*, 17, 8, 1802–1811.
- Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). Development of a time series imaging approach for fault classification of marine systems. *Ocean Engineering*, 263, Article 112297.
- Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). A real-time data-driven framework for the identification of steady states of marine machinery. *Applied Ocean Research*, 121, Article 103052.
- Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery. *Expert Systems with Applications*, Article 117634.
- Ventikos, N. P., Sotiralis, P., & Annetis, E. (2022). A combined risk-based and condition monitoring approach: Developing a dynamic model for the case of marine engine lubrication. *Transportation Safety and Environment*, 4, 3.
- Vera-García, F., Pagán Rubio, J. A., Hernandez Grau, J., & Albaladejo Hernandez, D. (2019). Improvements of a failure database for marine diesel engines using the RCM and simulations. *Energies*, 13, 1, 104.
- Vizentin, G., Vukelic, G., Murawski, L., Recho, N., & Orovic, J. (2020). Marine propulsion system failures-a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 9, 662.
- Vorkapić, A., Radonja, R., Babić, K., & Martinčić-Ipšić, S. (2020). Machine learning methods in monitoring operating behaviour of marine two-stroke diesel engine. *Transport*, 35, 5, 474–485.
- Vukičević, M., Račić, N., & Ivošević, Š. (2019). Piston ring material in a two-stroke engine which sustains wear due to catalyst fines. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 70, 2, 155–169.
- Wilkinson, P. (2012). Progress on process safety indicators—Necessary but not sufficient. Discuss. Pap., US Chem. Saf. Hazard Investig. Board, Noetic Risk Sol., Washington, DC.
- Wright, J. (2008). Water contamination of lube oils. *Machinery Lubrication*, 7, 11703–11710.
- Xi, W., Li, Z., Tian, Z., & Duan, Z. (2018). A feature extraction and visualization method for fault detection of marine diesel engines. *Measurement*, 116, 429–437.

- Xu, M., Ma, X., Zhao, Y., & Qiao, W. (2023). A systematic literature review of maritime transportation safety management. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 12, 2311.
- Xu, X., Zhao, Z., Xu, X., Yang, J., Chang, L., Yan, X., & Wang, G. (2020). Machine learning-based wear fault diagnosis for marine diesel engines by fusing multiple data-driven models. *Knowledge-Based Systems*, 190, 105324.
- Xu, N., Zhang, G., Yang, L., Shen, Z., Xu, M., & Chang, L. (2022). Research on thermoeconomic fault diagnosis for marine low-speed two-stroke diesel engines. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 19, 6, 5393-5408.
- Wang, R., Chen, H., & Guan, C. (2021). Condition monitoring method for marine engine room equipment based on machine learning. *Chinese Journal of Ship Research*, 16, 1.
- Wang, H., Liu, Z., Wang, X., Graham, T., & Wang, J. (2021). An analysis of factors affecting the severity of marine accidents. *Reliability Engineering & System Safety*, 210, 107513.
- Wang, J. (2003). Technology and safety of marine systems. Elsevier Science Ltd, Kidlington, UK.
- Wiaterek, D., & Chybowski, L. (2022). Assessing the topicality of the problem related to the explosion of crankcases in marine main propulsion engines (1972–2018). *Scientific Journal of Maritime University of Szczecin*, 71.
- Yan, G., Hu, Y., & Jiang, J. (2022). A novel fault diagnosis method for marine blower with vibration signals. *Polish Maritime Research*, 29, 2, 77-86.
- Yang, Z. L., Bonsall, S., Wall, A., Wang, J., & Usman, M. (2013). A modified CREAM to human reliability quantification in marine engineering. *Ocean engineering*, 58, 293-303.
- Yao, Q., Liu, Y., Guo, C., Ao, C., Guan, T., & Xu, Z. (2021). Research on fault warning of marine diesel engine cooling system based on deep belief network. *Journal of Physics: Conference Series*, 1750, 1, 012066.
- Yellowley, G., & Collin, L. T. (1962). The Götaverken diesel engine. *International Shipbuilding Progress*, 9, 94, 247-276.
- Yıldız, S. (2016). Yolcu gemisi kazalarında insan faktörü analizi. Karadeniz Technical University, Institute of Science, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Yılmaz, H. C. (2022). Machine learning with Bayesian networks for Covid-19 data. Hacettepe University, Department of Statistics, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Yılmaztürk, F. (2023). Sürmene tersanelerindeki iş kazalarının Bayes Ağıyla incelenmesi. Karadeniz Technical University, Institute of Science, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Youngberg, B. J., & Hatlie, M. J. (2004). The patient safety handbook. Jones & Bartlett Learning.

- Youssef, A., Noura, H., Amrani, A. E., Adel, E. M. E., & Ouladsine, M. (2024). A survey on data-driven fault diagnostic techniques for marine diesel engines. arXiv preprint arXiv:2404.10363.
- Yu, Y., Li, G., & Weng, J. (2022). A three-step methodology to complement underreporting maritime accident records. *Journal of Transportation Safety & Security*, 14, 9, 1451-1469.
- Zamboni, G., Scamardella, F., Gualeni, P., & Canepa, E. (2024). Comparative analysis among different alternative fuels for ship propulsion in a well-to-wake perspective. *Heliyon*, 10, 4.
- Zarei, E., Azadeh, A., Khakzad, N., Aliabadi, M. M., Mohammadfam, I. (2017). Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 830–840.
- Zhang, J., Jiang, J., Zhang, S., Zhang, P., Dong, J., & Sun, Z. (2023). A review of research on intelligent engine room systems. In *Advances in Machinery, Materials Science and Engineering Application IX*, 1003-1011.
- Zhang, P., Cao, L., Dong, F., Gao, Z., Zou, Y., Wang, K., & Sun, P. (2022). A study of hybrid predictions based on the synthesized health indicator for marine systems and their equipment failure. *Applied Sciences*, 12, 7, 3329.
- Zhang, P., Gao, Z., Cao, L., Dong, F., Zou, Y., Wang, K., ... & Sun, P. (2022). Marine systems and equipment prognostics and health management: A systematic review from health condition monitoring to maintenance strategy. *Machines*, 10, 2, 72.
- Zhang, H., Liang, G., Qiao, X., Lyu, Z., Li, L., Zhang, G., & Cui, Y. (2022). Experimental and numerical study of inelastic behavior based on simulated cylinder head specimen under thermal cycling conditions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44, 8, 1-16.
- Zhang, D., Hou, T., Yang, J., & Xiao, J. (2022). Study on marine diesel engine fault identification based on neural network. In *2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1474-1479.
- Zhao, Y., Wang, S., & Chen, N. (2022). Thermal fault diagnosis of marine diesel engine based on LSTM neural network algorithm. *Vibroengineering PROCEDIA*, 41, 198-203.
- Zhao, S., Tie, L., Guo, Z., & Li, J. (2020). Water deteriorates lubricating oils: Removal of water in lubricating oils using a robust superhydrophobic membrane. *Nanoscale*, 12, 21, 11703-11710.
- Zhong, G. Q., Wang, H. Y., Zheng, S., & Jia, B. Z. (2019). Research on fusion diagnosis method of thermal fault of marine diesel engine. In *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, 5371-5375. IEEE.

- Zhu, S., Ma, Z., Zhang, K., & Deng, K. (2020). Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. *Energy*, 210, 118558.
- Zhu, G., Huang, L., Yin, J., Gai, W., & Wei, L. (2023). Multiple faults diagnosis for ocean-going marine diesel engines based on different neural network algorithms. *Science Progress*, 106, 4, 00368504231212765.
- Zhuang, X. (2020). Analysis and countermeasures on ship failures during navigation in the CJK Fairway based on the FTA method.
- Zincir, B., & Deniz, C. (2018). Assessment of alternative fuels from the aspect of shipboard safety. *Journal of ETA Maritime Science*, 6, 3, 199-214.
- Zio, E. (2022). Prognostics and health management (PHM): Where are we and where do we (need to) go in theory and practice. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108119.

7. EKLER

EK 1. Tez Etik İzin Kurul Kararı

26.02.2025 12:05
E-26014373-050.01.04-625986
60102866



HİZMETE ÖZEL

T.C.

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Fen ve Mühendislik Bilimleri Etik Kurulu

Sayı : E-26014373-050.01.04-625986
Konu : FM Etik Kurul Kararı (Emre ÖZAYDIN)

26.02.2025

REKTÖRLÜK MAKAMINA
(Hukuk Müşavirliği)

İlgi : a) 28.01.2025 tarihli ve E-79969227-929-14224 sayılı yazı.
b) 25.02.2025 tarihli ve E-26014373-050.01.04-624211 sayılı yazı.

Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. İsmail ALTIN'ın, doktora öğrencisi Emre ÖZAYDIN'ın "Gemi Ana Makinesi Arıza Oluşumuna Etki Eden Nedensel Faktörlerin Bayes Ağı ile İncelenmesi" başlıklı doktora tezi kapsamında "Etik Kurul Belgesi" ile ilgili olarak kurulumuza yaptığı başvuru değerlendirilerek etik açıdan uygun bulunmuş ve sonucu İlgi (b)'de gönderilmiştir.

İlgili öğretim üyesi ve öğrencisinin bilgilendirilmesi hususunda gereğini arz ederim.

Prof. Dr. Tuncay BAYRAM
Başkan

Ek: İlgi (b) Yazı (2 Sayfa)



ÖZGEÇMİŞ

Emre ÖZAYDIN, İlköğrenimini Tınaz İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2005 yılında Kırıkkale Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2005-2010 öğretim yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 2010-2019 yıllarında çeşitli ticari gemiler ve araştırma gemilerinde görev yaptı. 2019 yılında “Balıkçı Gemilerinde Meydana Gelen Raporlanmamış Av Aracı Kaynaklı İş Kazaları” başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. 2019 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Abdullah Kanca Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce bilmektedir.