

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GEMİLERDEN KAYNAKLI PETROL SIZINTILARININ RİSK ANALİZİ İSTANBUL BOĞAZI
G BÖLGESİ DEMİRLEME SAHASI UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

Songül SARIALIOĞLU

**ŞUBAT 2025
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GEMİLERDEN KAYNAKLI PETROL SIZINTILARININ RİSK ANALİZİ İSTANBUL
BOĞAZI G BÖLGESİ DEMİRLEME SAHASI UYGULAMASI**

Songül SARIALIOĞLU

ORCID : - - -

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 27 / 02 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ersan BAŞAR

ORCID : - - -

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Gemilerden Kaynaklı Petrol Sızıntılarının Risk Analizi İstanbul Boğazı G Bölgesi Demirleme Sahası Uygulaması” 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 danışmanım Sayın Prof. Dr. Ersan BAŞAR’a teşekkürlerimi ve minnetimi sunarım. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer öğretim üyeleri Sayın Prof. Dr. Ercan KÖSE’ye ve Sayın Doç. Dr. Umut YILDIRIM’a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması süresinde hiçbir yardımdan kaçınmayan ve daima yanımda olan değerli arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Arda TOYGAR’a, Arş. Gör. Dilek BALAMAN’a ve Sevinç KÖRÜKLÜ ’ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bu zorlu süreçte her an yanımda hissettiğim babam merhum Yılmaz SARIALIOĞLU’na, annem Havva SARIALIOĞLU ve kardeşlerim Yeşim SARIALIOĞLU ve Yasemin KALCIOĞLU’na teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Songül SARIALIOĞLU

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum Doktora Tezi olarak sunduğum “Gemilerden Kaynaklı Petrol Sızıntılarının Risk Analizi İstanbul Boğazı G Bölgesi Demirleme Sahası Uygulaması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ersan BAŞAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri kendim 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. 27.02.2025

Songül SARIALİOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Deniz Taşımacılığında Kaynaklı Kirliliğin Deniz Çevresine Etkileri.....	3
1.3. Gemi Kazaları Kaynaklı Deniz Kirliliği	5
1.4. Petrol Kirliliği ile Sonuçlanan Önemli Gemi Kazaları	8
1.4.1. Torrey Kanyon Tanker Kazası.....	8
1.4.2. Exxon Valdez Tanker Kazası.....	9
1.4.3. Independenta Tanker Kazası.....	10
1.4.4. Erika Tanker Kazası.....	12
1.4.5. Prestij Tanker Kazası	13
1.5. Gemilerden Kaynaklı Deniz Kirliliğinin Önlenmesi Hakkında Uluslararası Sözleşmeler	14
1.6. Petrolün Doğadaki Davranışları	19
1.6.1. Yayılma.....	20
1.6.2. Buharlaştırma.....	21
1.6.3. Doğal Dağılım.....	21
1.6.4. Emülsifikasyon.....	22
1.6.5. Çözünme	22
1.6.6. Fotooksidasyon	23
1.6.7. Sedimentasyon/Batma.....	23
1.6.8. Biyolojik Bozunma	24
1.7. Deniz Kirliliği Risk Analizi	24
1.8. Çalışmada Kullanılan Yöntemler	26

1.8.1. Bayes Ağı (BN).....	26
1.8.2. BN Yapı Öğrenimi: Ağaç Artırılmış Naif Bayes Ağı (TAN).....	29
1.8.3. BN Parametre Öğrenimi: Beklentiler-Maksimizasyon (E-M).....	30
1.8.4. Karışıklık Matrisi	32
1.8.5. Genel NOAA Operasyonel Modelleme Ortamı (GNOME) Modeli	34
1.9. Literatürdeki Çalışmalar.....	34
1.9.1. Deniz Kirliliği Risk Analizi Literatürü	35
1.9.2. Deniz Kirliliği Risk Analizinde Bayes Ağı Kullanımı	39
1.9.3. Ağaç Artırılmış Naif Bayes (TAN) Literatürü.....	42
1.9.4. GNOME Literatürü	44
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	47
2.1. Çalışmanın Kapsamı.....	47
2.2. Veri Setinin Oluşturulması.....	50
2.3. Ağaç Artırılmış Naif Bayes (TAN) Ağı'nın Oluşturulması.....	50
2.4. TAN Modelinin Doğrulanması ve Duyarlılık Analizi	54
2.4.1. Karışıklık Matrisi Kullanılarak Modelin Doğrulanması	55
2.4.2. Etkileme Gücü İşlevi ile REF'ler Arasındaki Korelasyonun Ölçülmesi	57
2.4.3. TAN Modeli Duyarlılık Analizi Uygulamaları.....	57
2.5. TAN Modeli Vaka Çalışması	59
2.6. GNOME Modelinin Oluşturulması	59
3. BULGULAR.....	62
3.1. Kirlilik Kazalarına Ait Genel Bulgular	62
3.2. TAN Analizine Ait Bulgular	65
3.2.1. TAN Güvenilirlik ve Doğruluk Analizi	65
3.2.2. TAN Modeli Hassasiyet Analizi Bulguları	66
3.2.3. TAN Modeli Vaka Çalışması Bulguları.....	74
3.3. GNOME Modeli Bulguları.....	75
4. İRDELEME	79
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
6. KAYNAKLAR	92
7. EKLER.....	115
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

GEMİLERDEN KAYNAKLI PETROL SIZINTILARININ RİSK ANALİZİ İSTANBUL BOĞAZI G BÖLGESİ DEMİRLEME SAHASI UYGULAMASI

Songül SARIALİOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ersan BAŞAR
2025, 114 Sayfa, 5 Ek Sayfa

Deniz yolu taşımacılığı, özellikle yük taşımacılığında tercih edilen en önemli yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Deniz taşımacılığı birçok farklı değişkeni bünyesinde barındırması nedeniyle kaza ve tehlikelere açık bir taşımacılık türüdür. Bu çalışmada, gemilerden kaynaklı petrol kirliliğinin etkili bir risk analizini gerçekleştirerek, kirliliğin oluşmasını önleyici adımların belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda kirlilikle sonuçlanan gemi kazaları incelenip, kirliliğe sebep olan risk faktörleri değerlendirilerek kaza analiz rehberinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Analizler Ağaç Artırılmış Naif Bayes Ağı (TAN) ile gerçekleştirilmiştir. TAN analiziyle belirlenen Risk Etki Faktörleri GNOME yazılımında senaryo oluşturulmasında kullanılmıştır. GNOME yazılımı ile İstanbul Boğazı Güney Girişi G Bölgesi Demirleme Sahası özelinde bir simülasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları deniz kazaları sonucu kirliliğin devam ettiğini göstermektedir. Bu nedenle kirlilikle sonuçlanan kazaların anlaşılması oldukça önemlidir. Bu çalışmanın en önemli çıktılarından biri yapılan simülasyon sonucunda petrol döküntüsünün 6 saat gibi kısa bir sürede karaya ulaşmaya başlamasıdır. Bu sonuç göstermektedir ki petrolün hareketinin anlaşılması doğrudan kirliliğe müdahale için önemli bir adımdır.

Anahtar Kelimeler: Kirlilik kazaları, Deniz kirliliği, Deniz kazası, Ağaç Artırılmış Naif Bayes Ağı, TAN, GNOME

PhD. Thesis

SUMMARY

RISK ANALYSIS OF OIL SPILLS FROM SHIPS APPLICATION TO THE ISTANBUL STRAIT G ANCHORAGE AREA

Songül SARIALIOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Maritime Transportation and Management Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Ersan BAŞAR
2025, 114 Pages, 5 Appendix Pages

Maritime transport, especially in cargo transportation, emerges as the most important method. Maritime transportation is a type of transportation that is open to accidents and dangers due to the many different variables it contains. In this study, it is aimed to carry out an effective risk analysis of oil pollution from ships and to determine the preventive steps against pollution. In this context, ship accidents resulting in pollution are examined, and risk factors leading to pollution are evaluated to create an accident analysis guide. The analyses were conducted using the Tree Augmented Naive Bayes (TAN) method. The risk impact factors identified through TAN analysis were utilized in scenario creation within the GNOME software. A simulation was conducted using the GNOME software specifically for the Anchorage Area G of the Southern Entrance of the Istanbul Strait. The results of the study indicate that pollution continues as a result of maritime accidents. Therefore, understanding the accidents that lead to pollution is of significant importance. One of the most important outcomes of this study is that the simulation showed that the oil spill began to reach the shore in a short period of approximately 6 hours. This result shows that understanding the movement of oil is an important step for direct intervention in pollution.

Key Words: Pollution accidents, Marine pollution, Marine accident, Ağaç Tree Augmented Naive Bayes, TAN, GNOME

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. 2014-2023 Yılları gemilerden kaynaklı kirlilik türleri.....	6
Şekil 2. Denize dökülen petrolün ayrışma süreçleri	20
Şekil 3. Deniz taşımacılığı risk değerlendirme çerçevesi.....	25
Şekil 4. Bayes ağı yapısı.....	27
Şekil 5. Çalışmanın akış şeması	49
Şekil 6. Çalışmanın TAN düğümleri şeması	54
Şekil 7. TAN modelinin doğrulanma ve duyarlılık analizi aşamaları	55
Şekil 8. İstanbul Boğazı Güney Girişi Demirleme Sahaları.....	60
Şekil 9. 1937-2023 yılları arası aylara göre ortalama rüzgâr hızı	61
Şekil 10. Sızıntıların kaza bölgesine göre dağılımları.....	62
Şekil 11. Sızıntıların gemi yaşına göre dağılım oranları	63
Şekil 12. Sızıntıların boyutlarına göre dağılım oranları	63
Şekil 13. Sızıntıların kaza türlerine göre dağılım oranları.....	64
Şekil 14. Sızıntıların gemi türlerine göre dağılım oranları.....	64
Şekil 15. TAN modelindeki REF'lerin etkileme gücü	66
Şekil 16. Petrol tankeri REF'inin olasılığının %100 olduğu durum	68
Şekil 17. Büyük sızıntı olasılığının %100 olduğu durum.....	75
Şekil 18. TAN modelinden elde edilen REF'ler.....	76
Şekil 19. Petrolün 1. saatte dağılımı	76
Şekil 20. Petrolün 3. saatte dağılımı	76
Şekil 21. Petrolün 6. saatte dağılımı	77
Şekil 22. Petrolün 10. saatte dağılımı	76
Şekil 23. Petrolün 18. saatte dağılımı.....	77
Şekil 24. Petrolün 24. saatte dağılımı	78

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Karışıklık Matrisi elemanları	32
Tablo 2. Veri setine dayalı Risk Etki Faktörleri.....	51
Tablo 3. Çalışmaya ait karışıklık matrisi.....	56
Tablo 4. 1937-2023 yılları arası ortalama rüzgâr hızı ve yönü	61
Tablo 5. Çalışmaya ait TAN modelinin doğruluk ve güvenilirliği.....	65
Tablo 6. Petrol sızıntısının diğer düğümlerle hassasiyet verileri.....	67
Tablo 7. Gemi tipi düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri.....	68
Tablo 8. Kaza türü düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri.....	70
Tablo 9. Gemi yaşı düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri.....	71
Tablo 10. Madde düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri	72
Tablo 11. Boy düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri.....	72
Tablo 12. Farklı kaza şiddet derecelerine göre önemli REF'lerin TRI değerleri.....	73

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ADIOS	: Petrol Sızıntıları için Otomatik Veri Sorgulama
ATSB	: Avustralya Taşıma Güvenliği Bürosu
AUC	: Eğrinin Altındaki Alan
BEA-MER	: Sivil Havacılık Emniyeti Soruşturma ve Analiz Bürosu
BMA	: Bahamalar Denizcilik Kurumu
BN	: Bayes Ağı
BSU	: Deniz Kazası Soruşturma Federal Bürosu
BUNKER	: Gemi Yakıtlarından Kaynaklanan Petrol Kirliliği Zararının Hukuki Sorumluluğu Hakkında Uluslararası Sözleşme
CBA	: Fayda/Maliyet Analizi
CEDRE	: Kaza Sonucu Su Kirliliği Üzerine Belgeleme, Araştırma ve Deney Merkezi
CLC	: Petrol Kirliliğinden Doğan Zararın Hukuki Sorumluluğu ile İlgili Uluslararası Sözleşme
CPT	: Koşullu Olasılık Tablosu
DBN	: Dinamik Bayes Ağı
DM	: Veri Madenciliği Yöntemleri
DT	: Karar Ağacı
DWT	: Dedveyt ton
E-M	: Beklenti-Maksimizasyon
EMSA	: Avrupa Deniz Emniyeti Ajansı
EMCIP	: Avrupa Deniz Zayiatı Bilgi Platformu
ERA	: Ekolojik Risk Değerlendirmesi
ETA	: Olay Ağacı Analizi
FBN	: Bulanık Bayes Ağı
FMEA	: Hata Türleri ve Etkileri Analizi
FN	: Yanlış Negatif
FP	: Yanlış Pozitif
FSA	: Resmi Emniyet Değerlendirmesi
FTA	: Hata Ağacı Analizi

FUND	: Petrol Kirliliği Zararının Tazmini için Uluslararası Fonun Kurulması ile İlgili Uluslararası Sözleşme
GISIS	: Küresel Bütünleşik Denizcilik Bilgi Sistemi
GIS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
GNOME	: Genel Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi Petrol Sızıntısı Modelleme Ortamı
GT	: Gros tonaj
HAZMAT	: Tehlikeli Maddeler Müdahale ve Değerlendirme Birimi
HMRAD	: Hava Durumu, Okyanus ve İklim Araştırma ve Uygulama Merkezi
HRI	: Yüksek Risk Etki Değeri
IAPH	: Uluslararası Limanlar Birliği
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
ITOPF	: Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu
JTSB	: Japonya Taşıma Güvenliği Kurulu
LRI	: Düşük Risk Etki Değeri
MAIB	: Deniz Kaza İnceleme Birimi
MARPOL	: Denizlerin Gemilerden Kirlenmesinin Önlemesi Uluslararası Sözleşmesi
MCIB	: Deniz Kaza Soruşturma Kurulu
MEB	: Münhasır Ekonomik Bölge
MI	: Karşılıklı Bilgi
ML	: Makine Öğrenimi
MSC	: Deniz Emniyeti Komitesi
NB	: Naif Bayes
NOAA	: Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi
NRC	: Ulusal Araştırma Konseyi
NTBS	: Ulusal Taşımacılık Emniyet Bürosu
OILMAP	: Petrol Modelleme Uygulama Paketi
OPA	: Petrol Kirliliği Yasası
OPRC	: Petrol Kirliliğine Karşı Hazırlıklı Olma, Müdahale ve İşbirliğine Dair Uluslararası Sözleşmesi
OSCAR	: Petrol Sızıntısı Acil Durum ve Müdahalesi
OSRA	: Deniz çevre etki analizi aracı olan Petrol Sızıntısı Risk Analizi
OSWP	: Petrol Sızıntısı Su Kirliliği
PPR	: Kirliliğine Hazırlık ve Müdahale
PRS	: Polonya Gemi Sicili

REF	: Riski Etkileyen Faktörler
REMPEC	: Akdeniz Denizi Bölgesel Deniz Kirliliği Acil Müdahale Merkezi
ROC	: Alıcı İşletme Karakteristiği Eğrisi
Ro-Ro	: Roll-on/ Roll-off Gemisi
SCHISM	: Yarı Örtük Çapraz Ölçekli Hidrobilim Entegre Sistem Modeli
SIMAP	: Dökülme Etkisi Modeli Uygulama Paketi
TAIC	: Taşıma Kazası İnceleme Komisyonu
TAN	: Ağaç Artırılmış Naif Bayes Ağı
TN	: Gerçek Negatif
TP	: Gerçek Pozitif
TRI	: Gerçek Risk Etkisi
UNCTAD	: Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı
USCG	: Birleşik Devletler Sahil Güvenliği
UNCLOS	: Deniz Kirliliği 1982 Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi
UNTS	: Birleşmiş Milletler Antlaşma Serisi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son yıllarda sıklıkla gündeme gelen sürdürülebilirlik uygulamaları birçok alanı etkisi altına almıştır. Ticaret, ekonomi, nüfus, çevre ve iklim alanlarındaki iyileştirmelerin sürdürülebilir olması oldukça önemli bir fenomendir. Günümüzde artan insan nüfusu özellikle gıdaya erişimde sorunları da beraberinde getirmektedir. İnsanların gıdaya ulaşması ve kaliteli beslenmesi için bütün kaynakların etkili ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılması oldukça önemlidir. Deniz çevresi de insanların beslenme ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir paya sahiptir. Deniz çevresinde oluşabilecek her türlü olumsuzluk deniz yaşamını ve ekosistemini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum insanların gıdaya erişimini zorlaştırıcı sonuçları ortaya çıkartmaktadır. Bu nedenle deniz taşımacılığının, deniz çevresi ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri araştırılmaktadır (Yang vd., 2011; McGenity vd., 2012; Sampson vd., 2016).

Deniz taşımacılığındaki artan yoğunlukla beraber artan deniz kazaları, ekonomik kayıplar, çeşitli çevre kirliliği ve yıkıcı sonuçlar doğurduğu için artan bir endişe haline gelmiştir (Uğurlu vd., 2015; Zhang & Ming Li, 2017; Yıldırım vd., 2019). Deniz kazalarının olumsuz etkilerinin yanı sıra deniz taşımacılığı, gemi operasyonunun bir yan ürünü olarak kirleticilerin salınması nedeniyle de çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Skjong & Soares, 2008). Deniz taşımacılığının en önemli bileşenlerinden biri olan gemiler deniz taşımacılığı kirliliğine de en çok katkıda bulunan bileşenlerden biridir (Radwan vd, 2019; Vaneekhaute & Fazli, 2020; Taljaard vd, 2021). Gemilerden kaynaklı petrol döküntülerinin neden olduğu deniz kirliliği, okyanustaki tüm kirleticilerin yaklaşık %12'sini oluşturan önemli bir sorundur (Zhong vd., 2023). Artan mevzuat ve çevre bilinci nedeniyle son yıllarda gemi kazalarında azalma olmasına rağmen, petrol döküntüleri hala meydana gelmektedir. Geçtiğimiz yıllarda, çeşitli boyutlardaki tankerlerin neden olduğu birçok petrol döküntü kirliliği meydana gelmiştir (Chen vd., 2019; Farzingohar vd., 2024). Bu dökülmelerin deniz ortamı üzerindeki etkisi, konuyla ilgili daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır (Kontovas vd., 2010).

Deniz ortamı petrol kirliliğine karşı oldukça hassastır (McGenity vd., 2012). Gemilerden kaynaklı petrol döküntüleri, günümüzde deniz kirliliğinin en önemli

nedenlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir gemi kazara veya kasıtlı olarak denize petrol dökülmesine neden olabilir. Kazara dökülme, bir gemi kazasından, gemiden gemiye transfer operasyonu sırasında, yakıt alımı sırasında veya yükleme boşaltma operasyonlarında meydana gelebilir. Kasıtlı dökülme ise operasyonel boşaltma olarak tanımlanabilir. Örnek olarak geminin kirli balastını, tank ya da ambar yıkaması sonucu oluşan kirletici madde-su karışımını denize boşaltması verilebilir. Özellikle sıvı yük taşımacılığı için kullanılan taşıma kapasitesi oldukça fazla olan tanker gemilerinin kazaları sonucu ortaya çıkan petrol sızıntılarından kaynaklanan deniz kirliliği ciddi boyutlara ulaşmakta ve büyük bir endişe kaynağı olmaktadır (Yip vd., 2011; Zhong vd., 2023).

Petrol, su yüzeyinin kirlenmesine, kıyı ekosistemleri üzerinde uzun vadeli yıkıcı etkilere ve ekolojik kayıplara neden olmaktadır (Yang vd., 2011; Asif vd., 2022). Ayrıca petrolün kimyasal bileşenleri ise akut toksik etkilere yol açabilmektedir (Farrington, 2014). Bunun yanı sıra gemiler, kullandıkları yakıt nedeniyle (ağır fuel oil) Nitrojen ve Sülfür Oksit (NO_x-SO_x), Karbon Monoksit (CO), Uçucu Organik Bileşikler (VOC) ve Partikül Madde (PM) gibi önemli hava kirleticileri de yaymaktadırlar (Corbertt vd., 2007; Anderson & Bows, 2012; Radwan vd., 2019). Bunun yanı sıra deniz taşımacılığı küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %3'ünü oluşturmaktadır (Smith vd., 2014). Ayrıca deniz taşımacılığı tüm Avrupa Birliği CO₂ emisyonlarının %3-4'ünü yaymaktadır (Avrupa Komisyonu, 2023). Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı tarafından yayınlanan rapora göre, 2023 yılında, deniz taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonlarının on yıl öncesine kıyasla %20 oranında arttığı görülmüştür (UNCTAD, 2023).

Avrupa Deniz Emniyeti Ajansı (EMSA)'nın 2014-2023 yılları arasındaki istatistiklerine göre 26.595 (karaya oturma, çatma/çatışma, yangın vb.) deniz kazası gerçekleşmiş ve bu kazalara toplam 29.116 gemi karışmıştır. 2014-2023 yılları arasında meydana gelen deniz kazalarında toplam 200 gemi tamamen zayı olmuştur. Aynı araştırmanın sonucu olarak, deniz kazalarında 2014-2023 yılları arasında 7.604 kişi yaralanmış, 650 kişi de hayatını kaybetmiştir. Yayınlanan bu rapora göre belirtilen tarihler arasında 602 adet kirlilik olayı bildirilmiştir (EMSA, 2024). Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu (ITOPF) İstatistik Raporuna göre 2024 yılında 6 adet büyük ölçekli kirlilik (≥ 700 ton) ve 4 adet orta ölçekli kirlilik (7-700 ton) meydana gelmiştir (ITOPF, 2025). İncelenen bu veriler deniz kazalarının olumsuz etkilerini açıkça göstermektedir. Kirlilik kazaları sonucu ödenen tazminat ücretleri bu kazaların maddi boyutlarına örnek gösterilebilir. Uluslararası Petrol Kirliliği Tazminat Fonları (1971/1992 IOPC FUND)

1978'de kurulduklarından bu yana, 156 kirlilik olayıyla ilgilenmiş ve 31 Aralık 2022 tarihi itibarıyla yaklaşık 752 milyon İngiliz sterlini (£) ödemiştir (IOPC, 2022).

1.2. Deniz Taşımacılığında Kaynaklı Kirliliğin Deniz Çevresine Etkileri

Deniz kirliliği 1982 Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi (UNCLOS), 1.1.(4) maddesinde “insan tarafından doğrudan veya dolaylı olarak, haliçler de dahil olmak üzere deniz ortamına, canlı kaynaklara ve deniz yaşamına zarar veren, insan sağlığını tehlike atan, balıkçılık ve denizin diğer meşru kullanımları da dahil olmak üzere deniz faaliyetlerine engel olan, deniz suyunun kalitesini bozan ve olanaklarının azalmasına neden olan, zararlı etkilere yol açan veya açması muhtemel maddelerin ve enerjinin deniz ortamına girmesi” şeklinde tanımlanmıştır. Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşmesi (MARPOL)’de deniz kirliliğini UNCLOS ile benzer şekilde tanımlamıştır. Farklı olarak deniz kirliliğini yalnızca gemilerden yapılan deşarjlar olarak ele almaktadır.

Gemilerden kaynaklanan kirlilik önemli bir çevre sorunudur (Gibson vd., 2019). Deniz taşımacılığı en çevreci taşıma şekli olmasına rağmen, gemiler deniz ortamı üzerindeki olumsuz çevresel etkilerle ilişkilidir (Brynolf vd., 2016; Gibson vd., 2019). Deniz ortamlarındaki petrol sızıntılarının yaban hayatı, balıkçılık, kıyı habitatları ve insan faaliyetleri üzerinde önemli etkileri ve yıllara yayılan sonuçları olabilmektedir (Carracedo vd., 2006). Petrol sızıntılarıyla birlikte başlıca kirleticiler arasında, evsel atık sular, çöp atıkları ve hava kirletici gazlar sayılabilir. İstatistiklere göre denize boşaltılan atığın %11’i deniz taşımacılığı kaynaklıdır ve gemi atıkları, gemi kaynaklı kirliliğin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır (Sherrington vd., 2016; To & Kato, 2017).

Gemilerin çevre üzerindeki olumsuz etkileri, gemilerin rutin operasyonlarından kaynaklanan petrol sızıntıları (Talley, 2003; ITOFF, 2022), hava kirliliği, sera gazı emisyonları (Crist, 2009; Eyring vd., 2010), gövdeye yapışık yabancı türlerin taşınması ve balast suyu tahliyesi (Chan vd., 2015; Andersson vd., 2016), pis su, kargo kalıntıları, çöpler (Pettipas vd., 2016; Vaneeckhaute & Fazli, 2020), gemi yapımı, gemi söküm faaliyetleri ve deniz kazaları (batma, karaya oturma, çatma/çatışma, yangın/patlama vb.) sonucunda ortaya çıkmaktadır (Čulin & Bielić 2016; MacAskill vd., 2016). Ayrıca gemiler, zehirli boyalar kullanarak deniz ortamına zehirli kimyasalların salınmasına da sebep olabilirler (Talley, 2003; Ten Hallers-Tjabbes vd., 2003; Iduk & Samson, 2015).

Dünyadaki gemi sayısı arttıkça gemi atıklarının neden olduğu deniz çevresi kirliliği de artmaktadır (Vaneckhaute & Fazli, 2020). EMSA tarafından yayınlanan deniz emniyet raporuna göre gemi yakıtları, kargo artıkları, yağlama yağları ve hidrolik yağlar gibi diğer kirleticilerden kaynaklanan deniz kirliliği ise tüm kirliliklerin %63,1'ini oluşturmaktadır (EMSA, 2024). ITOPF'nin 2025 yılında yayınladığı istatistiklere göre 2024 yılında 2023 yılında olduğu gibi kirlilikle sonuçlanan 10 adet tanker kazası meydana gelmiştir (7 tondan fazla). 2014'ten 2023'e kadar geçen dönemde, 2018 yılında en fazla (24 adet) müdahale, 2016-2017 yıllarında ise en az (4 adet) müdahale olmak üzere toplam 115 petrol kirliliği müdahalesi rapor edilmiştir. 2010'larda 7 ton ve üzeri 63 sızıntı meydana gelmiş ve 164.000 ton petrol denize dökülmüştür. Dökülen bu petrol miktarının %91'inin sadece meydana gelen 10 kaza sonucu olduğu tespit edilmiştir. 2020 yılından bugüne kadar ise 7 ton ve üzeri 37 petrol sızıntı meydana gelmiş ve 38.000 ton petrolün deniz ortamına yayıldığı kaydedilmiştir (ITOPF, 2025).

Gemiler tarafından günlük olarak yaklaşık 8 tona kadar üretilen yağlı sintine suları deniz kirlitici atıklardandır (Butt, 2007). Yağlı sintine suyundaki yağ bir ayırıcı ile sudan ayrılır. Arındırılmış su denize basılırken yağ daha sonra kara tesisine verilmek üzere gemide saklanmaktadır. Yağlı sintine suyunun gerekli işlemler yapılmadan denize pompalanması ve yakıt ikmali sırasında oluşan küçük dökülmeler de önemli ölçüde kirliliğe sebep olabilmektedir (Encheva, 2015).

Deniz kirliliğinin kaynaklarından biri de çöpler ve katı atıklardır (Pettipas vd., 2016). Gemilerin neden olduğu çöp kirliliği okyanuslar üzerinde çevresel olumsuz etkilere sahiptir. IMO tarafından gemilerde oluşan atıkların yönetimi, depolanması ve atık tesisine verilmesi için çeşitli yöntemler kullanılır (De La Fayette, 2009). Bu nedenle atıkların gemilerde kategorilendirilmiş halde saklanmasını gerektiren atık yönetim planları, gemi kaynaklı tüm atık kategorilerini kapsar ve gemilerden kaynaklı atıkların çevresel etkilerini azaltmada etkilidir (Encheva, 2015). Birçok kullanım alanı olan plastik atıklar ise deniz kuşları, balıklar ve foklar gibi suda yaşayan canlılar tarafından yutulması nedeniyle deniz ekosistemi için tehlikeli bir hal almaktadır (Xanthos & Walker, 2017; John & Amedu, 2019). Diğer bir deyişle su kalitesinde meydana gelen değişiklikler deniz canlıları için felaket olabilir (Wang vd., 2005). Deniz canlıları hem dağıtımdaki sıvı atıklardan hem de yüzey alanını etkileyen katı ve plastik çöplerden zarar görebilmektedir (Başar vd., 2018). Kurallar çerçevesinde plastik atıkların denize atılması ve yakılması yasaklanmıştır. Bu nedenle plastik atıklar kıyı tesislerine verilmektedir (IMO, 2022a). Gemilerin denge unsuru olan balast tankları ile

taşıdıkları balast suları da deniz ekosisteminin bozulmasına neden olabilmektedir. Balast sularının farklı deniz alanlarından alınması ve arıtılmamış balast suyunun boşaltılması, biyolojik çeşitlilik için tehdit oluşturmaktadır (Anstey, 2008; Onwuegbuchunam vd., 2017). Gemi balast suları, suda yaşayan istilacı türlerin taşınmasına neden olan faktörlerden biri olarak gösterilmekte ve istilaların yaklaşık üçte biriyle ilişkili olduğu ifade edilmektedir (Davidson & Simkanin, 2012; Chan vd., 2015). İstilacı türlerden biri olarak kabul edilen Petekli Denizanası'nın (*Mnemiopsis leidyi*) Karadeniz ve Azak Deniz'ine girişinin, hamsi avcılığında yaklaşık 16,8 milyon Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Dolarına karşılık tahmini kayıpla önemli düşüslere neden olduğu düşünülmektedir (Chan vd., 2015).

Gemi sökümü, eski ve kullanılamayacak halde olan gemilerin yeniden kullanılmak amacıyla parçalara ayrılması ve yeniden işlenmesini içeren geri dönüşüm sürecidir (Kaiser, 2008). Gemi sökümünün ekonomik ve çevresel olarak özellikle atık yönetimi açısından avantajlı olduğu kabul edilmektedir. Buna rağmen gemi bünyesinde bulunan yağların, balast ve sintine sularının, tehlikeli kimyasalların salınması ve çevreye sızması nedeniyle gemi sökümünün çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkili olmaktadır (Sarraf vd., 2010). Bir gemi yerinde ne kadar uzun süre kalırsa, çevredeki deniz ortamlarına bulaşma riski o kadar artar. Ayrıca söküm sırasında biriken katı atıkların, plastiklerin ve hurda metal parçaların suya bırakılması balıklar, deniz kuşları ve diğer deniz canlıları için tehdit oluşturabilmektedir (Walker vd., 2019).

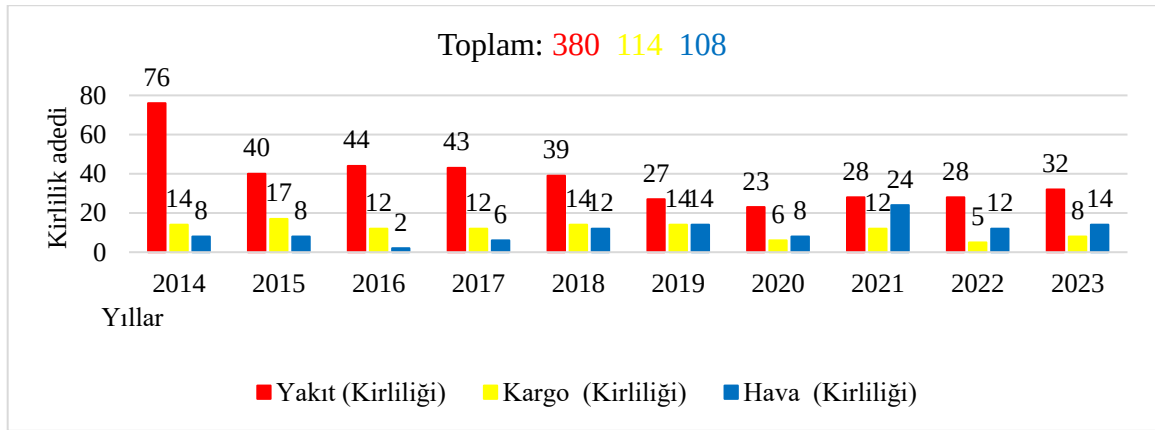
Gemi atıkları suyun kendi kendine temizlenmesini etkilerken su kalitesinin bozulmasına sebep olabilir ve suda yaşayan organizmaların hayatta kalmasını olumsuz yönde etkileyebilir (Zhang vd., 2021). Su ortamı üzerinde olumsuz etkilere sahip olan atıklar ekonomik açıdan değerlendirildiğinde ise deniz kirliliğinin yalnızca yaşam standartlarını etkilemediği, aynı zamanda balıkçılık veya turizm endüstrisi gibi insanlarla ilgili faaliyetlere de önemli ekonomik zararlar verdiği görülmektedir (Ventikos & Sotiropoulos, 2014).

1.3. Gemi Kazaları Kaynaklı Deniz Kirliliği

Petrol ürünlerinin tüketiminin küresel artışı petrol taşıyan gemilerin boyutlarında ve sayılarında artışı da beraberinde getirmiştir. Petrol ve türevlerinin taşınmasında kullanılan tankerlerin kazaları sonucunda meydana gelen kirlilik uluslararası alanda önemli bir endişe haline gelmiştir (Asif vd., 2022). Gemilerden kaynaklı petrol sızıntıları genellikle ciddi

miktarda maddi kayıp ve deniz yaşamının önemli ölçüde etkilenmesine neden olmaktadır (Daling vd., 2002).

Karaya oturma, çatma/çatışma, yangın/patlama ve benzeri deniz kazaları sonucunda gemilerle taşınan gemi yakıtları, petrol ve türevleri denize dökülmekte ve önemli çevresel hasarlara sebep olmaktadır (Bandara vd., 2011; Zhong vd., 2023). Gemilerden kaynaklanan en büyük petrol sızıntıları gemi kazalarına atfedilmektedir (Yip vd., 2011). Karaya oturma kazaları, en küçük gemi hasar maliyetlerine sebep olurken en büyük petrol-kargo sızıntısına yol açmaktadır (Talley, 1999). ITOPF veri tabanından elde edilen istatistiklere göre 1970-2024 yılları arasında tanker kazaları nedeniyle büyük miktarda petrol sızıntısına (700 tonun üzerinde) neden olan 477 kazanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu kazaların 148'i karaya oturma, 143'ü çatışma, 62'si tekne arızası, 52'si yangın ve patlama, 19'u ekipman arızası, 38'i diğer kazalar ve %14'ü bilinmeyen nedenlerden kaynaklanmıştır (ITOPF, 2025). EMSA deniz emniyet raporuna göre, 2014-2023 yılları arasında bildirilen kirlilik sayısında önemli bir düşüş kaydedilmiştir. 2014 yılında 98 vaka bildirilirken, 2022'de 38 vaka bildirilmiştir. En düşük kirlilik sayısının ise 2020'de, pandemi sırasında (37 vaka) gerçekleştiği görülmüştür. Bununla birlikte 2023 yılında 54 adet kirlilik vakası bildirilmiş ve önceki yıllara göre artış olduğu görülmüştür (Şekil, 1). Ayrıca bu dönem de yük gemilerinde 323 adet (%53,6), balıkçı gemilerinde 95 adet (%15,8), yolcu gemilerinde 81 adet (%13,5), kirlilik vakası tespit edilmiştir (EMSA, 2024).



Şekil 1. 2014-2023 Yılları gemilerden kaynaklı kirlilik türleri (EMSA, 2024).

Büyük petrol sızıntıları genellikle petrol tankerlerinin çatışması, karaya oturması veya ağır hava koşullarında yapısal bütünlüğün kaybolması ile ilişkilendirilir (Vanem vd., 2008). Gemilerden kaynaklı petrol sızıntılarının miktarı incelendiğinde toplam sızıntı miktarının

büyük oranını birkaç büyük ölçekli sızıntının oluşturduğu görülmektedir. Buna örnek olarak, ITOPF tarafından yayınlanan raporlar incelendiğinde 2022 yılında meydana gelen tanker kazalarında dökülen petrolün yaklaşık miktarı 15.000 tondur ve miktarın 14.000 tonu 3 büyük sızıntıda kaydedilmiştir. Aynı araştırmada, 2023 yılında ise gemilerden kaynaklı kirlilik değerinin 2.000 ton olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 1990-1999 yılları arasında 7 tonun üzerinde toplam değeri 1.140.000 ton olan 358 adet petrol sızıntısının gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu sızıntılar incelendiğinde ise sadece 10 adet kazanın 830.000 ton petrol sızıntısıyla sonuçlandığı görülmüştür (ITOPF, 2024).

Deniz kirliliği, özellikle gemilerden kaynaklanan petrol kirliliğinin etkileri geçmişte dramatik boyutlara ulaşmıştır. Meksika Körfezi'ndeki Deepwater Horizon patlamasından ve İspanya kıyılarında gerçekleşen Prestige petrol tanker kazasından sonra yaklaşık 63.000 ton ham petrol denize dökülmüştür (Crone & Tolstoy, 2010). Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından 2001 yılında, Exxon Valdez tanker kazası sonrası petrolle kirlenmiş deniz alanları üzerinde yapılan çalışma sonucunda bölgede hala petrolün varlığı tespit edilmiştir. Araştırma kapsamında incelenen 32 plajın 14 adedinde petrol kirliliğine rastlanmıştır (Short vd., 2006). Araştırma sonucu göstermiştir ki uzun süren kirlilikle mücadele ve temizleme çalışmalarına rağmen petrolle kirlenmiş kıyılar tamamen petrolden arındırılmayabilir. Deniz tabanına çöken toksik petrol bileşenleri zamanla ya da insan faaliyetleriyle çevreye salınabilir (Venosa vd., 2010). Ayrıca biyolojik olarak hassas bir deniz bölgesinde büyük miktarda ham petrol veya petrol ürünleri dökülmesinden kaynaklanan çevresel zararlar çok daha fazla olabilir (Olita vd., 2012). Bu nedenle kirliliğin önlenmesi ve kirlilikle mücadele hem kıyı devletleri için hem de uluslararası alanda yükselen bir trend haline gelmiştir. Günümüzde deniz emniyet ajansları tarafından yayınlanan raporlar dikkate alındığında, toplam petrol sızıntı sayısındaki uzun vadeli düşüşe rağmen, kirliliğin hala su yaşamına, deniz ekolojisine, kıyı altyapılarına ve ekonomiye zarar verdiği görülmektedir.

Exxon Valdez, Ixtoc I, Amoco Cadiz, Sanchi, Erika, Prestij ve Torry Canyon tanker kazaları oldukça büyük etkilerle sonuçlanmış kazalardır (Bragg vd., 1994). Dünya genelinde gerçekleşmiş büyük kirlilik sızıntıları gibi İstanbul Boğazı'nda da petrol sızıntı kazaları meydana gelmiştir. Oldukça büyük ve istenmeyen etkilere sahip bu kazaların kısa, orta ve uzun süreli etkileri gözlemlenmiştir (Yip vd., 2011; Zhong vd., 2023). Bu kazalardan en bilineni daha önce de bahsedilen Independenta tankeri ve Evriali gemisinin çatışmasıdır. Nassia tankeri ile Shipbroker gemisinin çatışması (1994 yılında), Volgoneft-139 tanker

kazasında geminin ikiye ayrılması (1999 yılında), Volgoneft-248 tankerinin karaya oturması (1999 yılında) da İstanbul Boğazı yakınlarında gerçekleşen ve kirlilikle sonuçlanan diğer deniz kazalarıdır. Öte yandan bu kazalar can kaybı, gemi toplam kayıpları, büyük çevre felaketleri ve çevre kirlilikleri gibi ciddi sonuçlara neden olmuştur.

1.4. Petrol Kirliliği ile Sonuçlanan Önemli Gemi Kazaları

Tanker kazaları sonucunda meydana gelen büyük petrol sızıntıları nadiren gerçekleşmelerine rağmen petrol sızıntısına karşı deniz ortamının korunması çeşitli paydaşlar için ana endişelerden biri haline gelmiştir (Dalton ve Jin, 2010). Petrol sızıntıları deniz ekosistemi üzerinde yıkıcı bir etkiye sahip olmakla birlikte, temizleme operasyonları nedeniyle yüksek mali giderlere sebep olmaktadır (Lecklin vd., 2011; Montewka vd., 2013). 1999'daki Erika kazası ve 2002'deki Prestige kazası gibi yakın tarihli bazı kazaların sonuçları hem finansal kayıp hem de çevreye verilen zararlar açısından oldukça önemlidir (ITOPF, 2022). Benzer şekilde 2006 yılında, Solar 1 tankeri kötü hava koşullarının etkisiyle batarak yaklaşık 800 ton ağır fuel oil'in denize dökülmesine neden olmuştur. Bu kaza Filipinler'in tarihindeki en kötü petrol sızıntılarından biridir. Hebei Spirit tankerinin 2007 yılında bir mavnayla çatışması sonucunda yaklaşık 10.000 ton petrol denize dökülmüş ve Güney Kore tarihindeki en kötü gemi kazası kaynaklı petrol sızıntılarından biri gerçekleşmiştir.

1.4.1. Torrey Kanyon Tanker Kazası

Torrey Kanyon kazası dünyanın ilk büyük tanker felaketi olarak anılmaktadır (Hall, 2007; Barkham, 2010). 18 Mart 1967 tarihinde, Basra Körfezi'nden Milford'a giderken, Lands End'in yaklaşık 11 mil güneybatısında, 119.000 ton ham petrol yüküyle Pollard Kayalığı'nda karaya oturmuştur. Gemi kaptanı, Milford Haven'daki yüksek su zamanından faydalanmak için Seven Stone ve Scilly Adaları arasında kestirme bir rota izlemeye karar vermiştir. Gemide Decca ekipmanı bulunmadığı için gemi kaptanının konumu yanlış değerlendirmesiyle gemi kuvvetli bir şekilde kayalıklara çarpmıştır. Çarpmanın etkisiyle geminin sancak tarafındaki altı tankın tamamı parçalanmış ve ilk saatlerde yaklaşık 20.000 ton petrolün denize dökülmüştür (Grill vd., 1967; Burrows vd., 1974). Torrey Kanyon kazası sonucunda taşınan ham petrolün neredeyse tamamı denize dökülmüştür (Wells, 2017).

Dökülmeyi azaltmak için çeşitli yöntemler denenmiştir. Bu yöntemlerden bazıları (kaygan tabakayı yakmak vb.) başarısız olmuştur. Hükümet yetkilileri tarafından gemiyi çekme veya gemi hala resifteyken petrolü pompalama seçenekleri değerlendirilmiş olup, daha sonra, kalan petrolü yakmak için geminin bombalanmasına karar verilmiştir (NOAA/HMRAD, 1992). Bu operasyon, kısmen başarılı olmasına rağmen kaçan petrol nedeniyle İngiltere'nin güneybatısındaki birçok yeri kirletmesine ve binlerce deniz kuşunun ölmesine engel olamamıştır. Sürüklenen petrol ve gelişigüzel kullanılan dağıtıcı maddeler nedeniyle, Channel Adaları ve Brittany kıyılarında da kirlenme meydana gelmiştir. Ayrıca hem denizde hem de sahillerde petrole toplam 10.000 ton dağıtıcı püskürtülmüş ve hem kendi içlerinde toksik olduğu hem de petrolü daha toksik hale getirdiği için su yaşamına verilen zararı hafifletmek yerine daha da şiddetlendirdiği görülmüştür (Jernelöv, 2010).

Torrey Kanyon sızıntısı nedeniyle 25.000'den fazla deniz kuşu ve çok sayıda deniz organizması zarar görmüştür. Ayrıca balıkların, kabukluların ve yumuşakçaların popülasyonlarına verilen hasarla ilgili herhangi bir ölçüm yapılmamasına rağmen balıkçılık üzerinde genel etkisi olduğu görülmüştür (Simpson, 1968). İlk tahminler, sahil boyunca türlerin hızlı bir şekilde iyileştiğini gösterirken, uzun vadeli çalışmalar sonucunda son derece yavaş bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Sadece hafif petrol sızıntısının gerçekleştiği kayalık alanların normale dönmesi yaklaşık 5-8 yıl sürerken, ağır ve tekrarlanan dağıtıcı uygulanan alanların iyileşmesinin 9-10 yıl sürdüğü ifade edilmiştir (Southward & Southward, 1978). Torrey Kanyonu sızıntısı ve diğerleri, tankerlerin neden olduğu çevresel riskler konusunda kamuoyunda endişe uyandırmış ve bu tür olaylara hazırlıklı olunmadığını göstermiştir (Wells, 2017).

1.4.2. Exxon Valdez Tanker Kazası

Exxon Valdez sızıntısı Amerika Birleşik Devletleri sularındaki en büyük tanker sızıntısı ve çevre felaketlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Carson vd., 2003; Yip vd., 2011). 24 Mart 1989'da Alaska, Valdez limanından 180.000 ton ham petrol yüküyle ayrılan Exxon Valdez Tankeri, önemli bir balıkçılık alanı olan Prince William Boğazı'nın yaklaşık 10 m derinliğinde bulunan Bligh Resifi'nde karaya oturmuştur. Bu kaza sonucunda geminin 11 kargo tankından 8 adeti sancak tarafından yırtılarak açılmıştır. Kargo tanklarının yanı sıra 3 adet balast tankı da zarar görmüştür (Skinner & Reilly 1989). Bu kaza, yaklaşık 37.000 ton ham petrolün denize dökülmesine, 7.000 km²'den fazla alanın petrol tabakasıyla

kaplanmasına, küçük adalar ve koylar da dahil olmak üzere 1.900 km'den fazla kıyı şeridinin kirlenmesine neden olmuştur (Bragg vd., 1994; Gill vd., 2012).

Bu kazanın en önemli sonuçlarından biri MARPOL Ek I kapsamında yapılan ‘‘çift cidar’’ değişikliği olmuştur. Bu değişiklik ile çift cidar, 6 Temmuz 1993'ten sonra inşa edilen 5.000 DWT ve daha büyük tankerler için zorunlu hale getirilmiştir (MARPOL Sözleşmesi, Kural 13F). Bunun yanı sıra, Exxon Valdez kazasının ardından ABD'de gemi kazasında meydana gelen petrol sızıntılarına yönelik kamuoyu endişesi, ABD Kongresi'nin 1990 Petrol Kirliliği Yasasını (OPA-90) kabul etmesiyle sonuçlanmıştır. Böylelikle, petrol taşımacılığı yapan tarafların olası petrol sızıntıları için hesap verebilirliği sağlanmıştır. Bu yasa çerçevesinde gemi sahibinin sorumluluğu, hangisi daha büyükse, 3.000 gros tonajın üzerindeki gemiler için 10 milyon ABD Doları veya gemi gros tonaj başına 1.200 ABD Doları olacak şekilde belirlenmiştir (Yip vd., 2011). OPA-90 aynı zamanda tanker gemileri için çift cidarlı tasarımın dünya çapında benimsenmesi için itici güç olmuştur (Kim, 2002).

Exxon Valdez sızıntısının hasarını olabildiğince hızlı ve verimli bir şekilde temizlemek için 11.000 kişi istihdam edilmiştir. Deniz canlılarını kurtarmak ve kıyıları temizlemek için on binlerce gönüllü ve yaklaşık 1.400 gemi, 85 helikopter kaynak olarak kullanılmıştır (Carpenter vd., 1991). Prince William Sound konumu ve ulaşım olanakları nedeniyle (yalnızca helikopter, uçak veya tekneyle erişilebilen), müdahale planlarını ve çalışmalarını zorlaştırmıştır. Temizleme operasyonları 1990 ve 1991 yaz aylarında da devam etmiştir. Bölge, somon, su samurları, foklar ve deniz kuşları için bir yaşam alanı olarak bilinmektedir. Exxon Valdez sızıntısının ilk zayıtının 250.000 deniz kuşu ve 4.400 su samuru olduğu tahmin edilmektedir (Spies vd., 1996). Yapılan araştırmalar ışığında, petrol sızıntısının Prince William Sound ekosistemi, gelgit bölgeleri, kumsallar ve yerel balıkçılık üzerindeki uzun vadeli etkileri belgelenmiştir (Willette, 1996; Peterson vd., 2003; Short vd., 2007; Knudsen, 2009; Rice, 2009). Petrol tankerinin karaya oturmasından 3 ay sonra, 1 Haziran 1989'da Exxon'un yaptığı harcamalar 135 milyon ABD Dolarını bulmuştur. 1 Temmuz 1989'da 300 milyon ABD Dolarına, 2006 yılının başında ise yaklaşık 2,5 milyar ABD Dolarına ulaşmıştır (CEDRE, 2023a).

1.4.3. Independenta Tanker Kazası

Independenta Tankeri taşıdığı 94.000 ton ham petrol yüküyle Libya'dan İstanbul'a doğru ilerlemekte, dökme yük gemisi Evrialy ise 7.400 ton çelik taşımaktaydı. 15 Kasım

1979 tarihinde iki gemi kötü hava koşullarının da etkisiyle İstanbul Boğazı'nın güney girişinde çatışmıştır. Çatışmanın ardından Independenta tankerinde patlama meydana gelmiş ve bu patlamanın da etkisiyle her iki gemi de yanmaya başlamıştır (NOAA/HMRAD, 1992). Evrialy gemisinde çıkan yangın aynı gün kontrol altına alınmış ve gemi karaya oturmuştur. Independenta tankeri ise Haydarpaşa Limanı'na yarım mil mesafede karaya oturmuş, daha sonra kırılarak ikiye ayrılmış ve geminin kış tarafı batmıştır. Bu durum geminin yükünün denize dökülmesine neden olmuştur. Geminin baş tarafı ise 14 Aralık tarihine kadar yanmaya devam etmiştir (Hooke, 1987).

Bahsedildiği üzere yangın, petrol sızıntısı, hava kirliliği ve patlama nedeniyle meydana gelen kazanın sonuçları oldukça yıkıcı olmuştur. Bu kaza sonucunda 42 mürettebat hayatını kaybetmiş, 27 gün süren büyük bir yangın meydana gelmiş ve etkisi uzun süre hissedilecek bir çevre felaketi gerçekleşmiştir. Taşıdığı 94.000 ton ham petrolün 64.000 tonunun denize döküldüğü 30.000 tonunun ise yandığı tahmin edilmektedir (Baykut vd., 1985). Ayrıca bu kaza, İstanbul'da deniz ve hava kirliliğine neden olan dünyanın en büyük 20 petrol sızıntısından biri olarak tarihteki yerini almıştır (Belenli, 2020).

Yaşanan kaza sonucu meydana gelen sızıntıya müdahale amacıyla Hükümet yetkilileri ITOPF'tan uzmanlık talep etmiş ve ITOPF personeli 17 Kasım'da olay yerine gelmiştir. Kirliliğe müdahale çalışmaları başlamasına rağmen ilk etapta tahmini 50 ton petrolün Haydarpaşa limanına ulaşması engellenememiştir (CEDRE, 2023b). İlk çalışmalarda suda çok az kirlilik tespit edilmiş ve ITOPF personeli 27 Kasım'da bölgeden ayrılmıştır. Dökülen petrolün kontrolünü sağlamak amacıyla Independenta tankerinin çevresine, İstanbul ve Haydarpaşa limanlarının koruması için hassas bölgelerin çevresine bariyerler yerleştirilmiştir. Türk donanma gemilerinden petrolün üzerine dispersanlar püskürtülmüştür. 6 Aralık'ta Independenta tankerinde meydana gelen patlamalar, ITOPF personelinin 10 Aralık'ta geri dönmesine neden olmuştur. Yangın kendi kendine söndükten sonra yapılan araştırmalar, gemiden başka sızıntı olmadığını ortaya çıkartmıştır. İstanbul Boğazı'nın güneydoğu kıyısı en yoğun petrole maruz kalan bölge olmuştur. Yaklaşık üç mil çapındaki deniz yatağı, kalın bir petrol tabakası ile kaplanmış (Baykut vd., 1985).

Independenta sızıntısının ardından yapılan geç müdahaleler, balıkçılık endüstrisinde önemli ölçüde ekonomik ve ekolojik hasara yol açmıştır (Doğan & Burak, 2007; Öztürk & Balcıoğlu, 2017). Uluslararası seyir kurallarını ihlal ederek, İstanbul'u tehlikeye atmak ve 42 kişinin ölümüne neden olmakla suçlanan, Evrialy'nin kaptanı da dahil olmak üzere toplam sekiz mürettebat tutuklanmıştır. İstanbul Boğazı çok yoğun bir su yoludur ve

Akdeniz ile Karadeniz arasında seyahat eden petrol tankerleri tarafından giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu yoğun nakliye trafiği, büyük petrol sızıntısı risklerini de beraberinde getirmektedir.

1.4.4. Erika Tanker Kazası

11 Aralık 1999 tarihinde, 31.000 ton ham petrol taşıyan petrol tankeri Erika Dunkirk'ten (Fransa) Livorno'ya (İtalya) seyri esnasında Biskay Körfezi yakınlarında ağır havaya maruz kalmış ve şiddetli fırtına nedeniyle ikiye ayrılmıştır (BEAMER, 2022). Ağır havadan etkilenen gemi önce ağır bir şekilde yatmaya başlamıştır. Gemi kaptanı öncelikle bir uyarı mesajı göndermiş, Fransız makamlarına durumun kontrol altında olduğunu ve düşük hızla Donges limanına gitmekte olduğunu bildirmiştir. Yapılan müdahaleler yetersiz kalmış ve ardından gemi, birkaç saat sonra kırılarak iki parçaya ayrılmıştır. Gemi, ikiye ayrıldığı yere oldukça yakın bir konumda Britanya'daki Pointe de Penmarc'h'ın yaklaşık 30 deniz mili güneyinde ve yaklaşık 120 metrelik suda batmıştır.

Fransız Gümrük ve Donanma uçakları tarafından gerçekleştirilen ilk hava araştırmaları sonucunda denizde biri 15 km uzunluğunda ve 3.000 ton olarak tahmin edilen kaygan tabakaların sürüklendiği tespit edilmiştir. Kıyıdaki petrolün ilk vakaları, kazadan 11 gün sonra, 23 Aralık'ta Güney Finistère'de gözlemlenmiştir. Sonraki günlerde kirlilik tespiti devam etmiş ve 25 Aralık'ta Groix ve Belle-Ile adalarını ve 27 Aralık'ta Noirmoutier adasının kuzeyindeki Vendée bölgesini etkilediği görülmüştür. Ağır hava koşulları ve kuvvetli gelgit nedeniyle kirlilik kıyıda çok etkili olmuş ve 10 metreyi aşan kayalıkların tepesine kadar ulaşmıştır (CEDRE, 2023c). 26 Aralık'ta, gemi battıktan 14 gün sonra, Lorient açıklarındaki Groix adası ciddi şekilde kirlilikten etkilenmiş ve kirliliğin büyük kısmı Loire Nehri'nin kuzey ve güney kıyılarına ulaşmıştır. 5 ila 30 cm kalınlığında ve birkaç metre genişliğinde viskoz bir petrol tabakası, kıyı şeridinin bazı kısımlarını kaplamıştır.

Kaza, balıkçılık sektörünü, turizm sektörünü ve bölgesel ekolojii ciddi şekilde etkilemiştir (EMSA, 2004). Kaza sonucunda 20.000 ton ham petrol denize dökülmüş ve petrolden etkilenen Fransız kıyılarının uzunluğu 250 deniz milini bulmuştur. Bu kaza Biskay Körfezi'nde kışlayan 80.000 ila 150.000 deniz kuşunun, binlerce deniz organizmasının ve diğer canlı hayvanların hayatını kaybetmesine neden olmuştur (Cadiou, vd., 2004).

7 Aralık 1999'da Fransa ve İspanya arasında karşılıklı yardım için imzalanan iki taraflı bir anlaşma olan Biskay Planı, bu kazanın ardından, 19 Aralık'ta saat 16.00'da

etkinleştirilmiştir. Bu kazanın ardından Avrupa Birliği'nin (AB) ‘‘Erika Yasama Paketleri’’ (Erika I-II-III), deniz emniyetini artırmayı ve böylece okyanuslara verilen çevresel zararı azaltmayı amaçlayan denizcilik yasaları kabul edilmiştir (Wene, 2005). AB deniz emniyetini ele alan ilk iki önlemi almaya Erika Tanker kazasıyla alsa da üçüncü paket, kısmen 2002 yılında Prestige petrol tankerinin İspanya ve Fransa kıyılarında batmasıyla ortaya çıkmıştır. Erika paketleri, mevcut mevzuatta yapılan değişiklikleri (Erika I), AB hukukundaki yenilikleri (Erika II) ve uluslararası standartları topluluk mevzuatı ile entegre etmeyi (Erika III) içermektedir. Yasalar, nakliye için belgelendirme gerekliliklerini güçlendirirken denetim ve doğrulama kontrollerini oluşturmaktadır. Ayrıca nakliye şirketlerinin sorumluluğunu arttırmaktadır. AB üye ülkelerinin uygun makamları tarafından, yeni veya güçlendirilmiş kontrol yöntemlerini kurmasını gerektirmektedir (Avrupa Komisyonu, 2022a).

Kazadan üç ay sonra, 21 Mart 2000'de Komisyon, bu tür kazaların tekrar meydana gelmesini önlemek için özel önlemlere yönelik bir dizi teklifle birlikte bir "Deniz yoluyla taşınan petrol ticaretinin güvenliğine ilişkin tebliğ"i kabul etmiştir (Erika I). Avrupa Konseyi, "ilk Erika paketinin" hızlı bir şekilde kabul edilmesi çağrısında bulunmuş ve Komisyonu, 21 Mart 2000'de sunulan üç yasa teklifini tamamlamak için mümkün olan en kısa sürede ikinci bir dizi önlem önermeye çağırmıştır. Avrupa sularının deniz kazaları riskine ve deniz kirliliğine karşı korunmasında kalıcı bir iyileştirme sağlanması amacıyla 6 Aralık 2000'de sunulmuştur (Erika II). Bir Direktif önerisi ve Yönetmelik için iki teklif içermektedir (Avrupa Komisyonu, 2022b).

1.4.5. Prestij Tanker Kazası

Prestige Tanker kazası, Dünya’da en büyük petrol kirliliğine ve maddi kayıplara neden olan kazaları arasında gösterilmektedir (Loureiro vd., 2006; Negro vd., 2007). 5 Kasım 2002’de Letonya, Ventspils’deki yük operasyonlarını tamamlayan Prestij Tankeri aynı gün 14:30 LT’da Cebelitak’a doğru hareket etmiştir. Deniz seyri esnasında ağır hava koşullarına maruz kalan petrol tankeri 13 Kasım 2002’de, güvertesine çarpan ağır dalgalar nedeniyle zarar görmüştür. Gemide meydana gelen hasar nedeniyle gemi sancak tarafına doğru yatmaya başlamış ilk olarak yatıklık 10°’lik bir açığa ulaşmış ve daha sonra 20°’ye kadar yükselmiştir. Hasarlanma sonucunda geminin ana makinesi durmuş ve gemi ağır hava koşulları nedeniyle yalpalamaya devam etmiştir. Gemi güvertesindeki ekipmanların zarar görmesi nedeniyle denize petrol sızmaya başlamıştır (BMA, 2002).

Prestij Petrol Tankeri, Finisterre Burnu'nun yaklaşık 27 deniz mili açıklarında yapısal hasar gördüğünde 76.972 ton ağır yakıt (HFO) taşımaktaydı. İlk kirliliğin görüldüğü bu konumdan sonra kurtarma operasyonları başlatılmasına rağmen hem olumsuz hava koşulları hem de geminin almış olduğu hasarlar nedeniyle gemi 19 Kasım saat 08:00 LT'da önce iki parçaya ayrılmış daha sonra da her iki parça üzerinde bulunan petrol yüküyle ayrı ayrı batmıştır (Loureiro vd., 2009). Galiçya'nın güney kıyısından yaklaşık 130 mil uzakta, 3.600 metre derinlikte batan tankerin ilk olarak 20.000 ton petrol sızıntısına neden olduğu belirtilmiştir. Meydana gelen kaza sonrasında 30 Kasım tarihinde kirlilik Finisterre Burnu kıyılarına kadar ulaşmıştır. Çevreye salınan toplam petrol miktarı bilinmemekle birlikte, deniz ortamına 60.000 tondan fazla ağır yakıt salındığı tahmin edilmektedir (Carracedo vd., 2006).

Prestij Tankeri kazası devam eden kötü hava koşullarının da etkisiyle denizde petrolün uzun süre kalmasına ve 6 ülkenin kıyılarının kirlenmesine neden olmuştur (Carro vd., 2008). Kötü hava koşulları, temizleme ekipmanı ve nitelikli personel eksikliği, etkilenen alanın genişliği etkili bir müdahale yapılmasını zorlaştırmış ve petrol sızıntısı devam etmiştir (Loureiro vd., 2006). Kaza sonucunda elde edilen verilere göre 1.140 adet petrol bulaşmış plaj, Fransa, İspanya ve Portekiz'de etkilenen 1.429 mil kıyı şeridi ve 115.000 ile 230.000 arasında etkilen kuş bulunmaktadır (CEDRE, 2023d). Ağır kıyı kirliliği nedeniyle Galiçya kıyılarının neredeyse tamamında yetkililer tarafından balık avlanması ve kabuklu deniz hayvanlarının çıkarılması yasaklanmıştır (Loureiro vd., 2006). Aralık 2004'te kıyıdaaki tüm temizlik işlemleri tamamlanmış ve Galiçya kıyılarından toplam 97.000 ton atık toplanmıştır. Ayrıca, 2004 yılının yaz aylarında tankerde kalan petrolün çıkarılması sağlanmıştır. Petrol sızıntısının etkilediği bölgelerde 2002–2004 yılları arasında yapılan operasyonların toplam maliyetlerinin 770,58 milyon Avro olduğu ifade edilmiştir (Loureiro vd., 2009). EMSA'nın kurulması Erika (1999) ve Prestige (2002) petrol sızıntısı kazalarının ardından 27 Haziran 2002 tarihinde gerçekleşmiştir.

1.5. Gemilerden Kaynaklı Deniz Kirliliğinin Önlenmesi Hususunda Uluslararası Sözleşmeler

IMO çatısı altında, deniz kazası sonrasında meydana gelebilecek kirliliği önleme, kirlilik ile mücadele ve müdahale amacıyla yürürlüğe konulmuş uluslararası sözleşmeler mevcuttur. Uluslararası düzeyde, gemilerden kaynaklı kirliliğin belirli yönlerini ele alan iki

temel sözleşme bulunmaktadır. Bunlar, MARPOL 73/78 ve UNCLOS sözleşmeleridir. Bu sözleşmeler haricinde gemilerden kaynaklı kirliliği odak notasına alan uluslararası sözleşmelerden bazıları, Petrol Kirliliği Zararlarının Hukuki Sorumluluğuna İlişkin Uluslararası Sözleşme (CLC 1969), Petrol Kirliliğine Karşı Hazırlıklı Olma, Müdahale ve İşbirliğine İlişkin Sözleşme (1990 OPRC), 1992 Petrol Kirliliği Zararları Nedeniyle Hukuki Sorumluluğa İlişkin Sözleşme (1992 Sorumluluk Sözleşmesi) ve 1992 Petrol Kirliliği Zararlarının Tazmini İçin Uluslararası Fon Kurulmasına İlişkin Sözleşmeleridir (1992 Fon Sözleşmesi) (Gulas vd., 2017). Uluslararası bu sözleşmeler yürürlükte olmasına ve taraf devletler tarafından uygulanmasına rağmen deniz kirliliği yeterli derecede önlenememektedir.

1967 yılında gerçekleşen Torrey Kanyonu kazasının ardından IMO, tanker kazalarını önlemek ve sonuçlarını en aza indirmek için MARPOL'ü uygulamaya koymuştur. MARPOL, 6 adet ekten oluşan ve gemilerden kaynaklı kirliliği sınıflandıran bir sözleşmedir (IMO, 2022b). Bu sözleşme gemi çöpleri, atık su, kimyasallar, paketlenmiş ürünler ve gemi yakıtlarından kaynaklanan hava kirliliği de kapsamaktadır. Ek I Petrolden Oluşan Kirilenmenin Önlenmesi İçin Kuralları içermektedir. Ek II Dökme Zehirli Sıvı Maddelerden Oluşan Kirilenmenin Kontrolü İçin Kuralları belirlemektedir. Ek III Paketlenmiş Olarak Taşınan Zehirli Sıvı Maddelerden Oluşan Kirilenmenin Kontrolü İçin Kurallar, Ek IV, Gemi Pis Sularından Oluşan Kirilenmenin Kontrolü İçin Kurallar, Ek V Gemilerden Atılan Çöplerden Kirilenmenin Önlenmesi İçin Kurallar ve Ek VI Gemi Baca Gazlarından Kirilenmenin Önlenmesi İçin Kuralları içermektedir. Ekler çerçevesinde özel alanlar belirlenmiş ve bu alanlar içerisinde zorunlu atık boşaltım kuralları uygulanmaktadır. MARPOL ve eklerinde gemilerden kaynaklanan kirliliğin ve deniz kirletici maddelerin sınırları açıkça çizilmiştir. Bu sözleşme gerekliliğini sağlamayan kasıtlı denize boşaltımların deniz kirliliği üzerindeki payı oldukça büyüktür (Butt, 2007).

UNCLOS, dünya üzerinde okyanusların ve denizlerin kullanımıyla ilgili kuralların belirlendiği, çevreye ve denize ait doğal kaynakların yönetimine ilişkin hak ve sorumlulukların tanımlandığı uluslararası bir sözleşmedir. 1982 yılında kabul edilmiş ve 1994 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu sözleşme deniz kirliliğinin hukuksal yükümlülükleri hakkında bağlayıcı unsurlar barındırmasının yanı sıra olası bir kirlilik durumuna hazır olmak amacıyla düzenlemeleri de içermektedir. UNCLOS, deniz kirliliği hakkında birçok konuyu kurallaştırmada ve kapsamaktadır. Sözleşme, ayrıca deniz hukukunun belirli alanlarının daha da geliştirilmesi için çerçeve sağlamaktadır (Falk & Elver, 1999). UNCLOS' tan önce,

kıyı devletinin seyirle ilgili yargı yetkisi yalnızca iki özel IMO aracıyla düzenlenmekteydi. Bunlar, Petrol Kirliliği Kazaları Durumlarında Açık Denizlere Müdahaleye İlişkin Sözleşme (1969) ve Petrol Dışındaki Maddelerle Kirlenme Durumlarında Açık Denizlere Müdahaleye İlişkin Protokol (1973)'dür. Bu sözleşmeler, kıyı devletinin kirlilik kazaları durumunda açık denizlere müdahale etme hakkını özel olarak düzenlemektedir. Bu sözleşmelerde yer alan temel ilkeler UNCLOS' un 221(1) maddesi ile kanunlaştırılmıştır (IMO, 2022c).

IMO tarafından hazırlanan ve 1969 yılında kabul edilen Petrol Kirliliği Kazalarında Açık Denizlerde Müdahaleye İlişkin Uluslararası Sözleşmesi (INTERVENTION 1969) 1975 yılında yürürlüğe girmiştir. Sözleşme, bir kıyı devletinin, bir deniz kazası nedeniyle, deniz ve kıyı şeridinde petrol kirliliği veya kirlilik tehdidinden kaynaklanan tehlikeyi önlemek, azaltmak veya ortadan kaldırmak için açık denizlerde gerekli olabilecek önlemleri almak ve halkın çıkarlarını korumak amacıyla kabul edilmiştir (IAPH, 2022). 1969 Müdahale Sözleşmesi, savaş gemileri, bir devletin sahip olduğu veya işlettiği ve hükümetin ticari olmayan hizmetinde kullanılan diğer gemiler hariç devletin sahip olduğu veya işlettiği tüm açık deniz gemilerine uygulanmaktadır. Sözleşmede izin verilenlerin ötesinde önlemler alan bir kıyı devleti, bu tür önlemlerden kaynaklanan her türlü zararı tazmin etmekle yükümlüdür. Bununla birlikte, acil alınması gereken önlemlerin olduğu durumlarda, kıyı devleti, önceden bildirimde bulunmadan ve ilgili taraflarla görüşme yapmadan durumun aciliyetinin gerektirdiği tedbirleri alabilmektedir (UNTS, 2022a). 1969 Müdahale Sözleşmesi, gemilerde taşınan ve sızıntılarının deniz ortamı için ciddi tehlike oluşturacağı, başta kimyasal maddeler olmak üzere diğer maddeleri de kapsama alacak şekilde genişletilmiştir. 1996 değişiklikleriyle yeni kriterlerin kabul edilmesinin ardından, 1973 Protokolüne ekli maddelerin listesi güncellenmiştir (IAPH, 2022).

Sivil Sorumluluk Sözleşmesi (CLC'69), IMO tarafından 29.11.1969 tarihinde kabul edilmiş ve 19.06.1975 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Bu Sözleşme, petrol taşıyan gemilerin karıştığı deniz kazalarından kaynaklanan petrol kirliliği hasarına maruz kalan kişilere yeterli tazminat sağlanmasını sağlamak için kabul edilmiştir (IMO, 2022d). Sözleşme armatörlerin petrol kirliliği hasarına ilişkin sorumluluklarını düzenleyerek gemi sahipleri için kusursuz sorumluluk ilkesini ortaya koyar ve zorunlu sorumluluk sigortası sistemi oluşturur. Armatör normal olarak sorumluluğunu gemisinin tonajına bağlı bir miktarla sınırlama hakkına sahiptir. Sözleşme gereğince 2.000 tondan fazla petrol taşıyan gemilerin petrol kirliliği hasarına ilişkin sigorta yaptırması zorunludur (IOPC, 2022). Tankerler, yaptırdıkları sigorta karşılında gemide sigorta kapsamını gösteren bir sertifika bulundurmalıdır. Sözleşmeye taraf

bir devletin bir limanına veya tesisine girerken veya çıkarken, sözleşmeye taraf olmayan bir devletin bayrağını taşıyan gemiler de böyle bir sertifika bulundurmamak zorundadırlar. Sözleşme, sözleşmeye taraf devletin topraklarında (karasuları dahil) meydana gelen petrol sızıntılarından kaynaklanan kirlilik hasarını kapsamaktadır (IOPC, 2018). 1992 Protokolü ile değiştirilen sözleşmenin yeni hali 30 Mayıs 1996 tarihinde yürürlüğe girmiştir. 1992 protokolü ile sözleşmenin kapsamı, bir taraf devletin münhasır ekonomik bölgesinde (MEB) veya eşdeğer alanında meydana gelen kirlilik hasarını kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Ayrıca, çevresel zarar tazminatı, kirlilik hasarının meydana geldiği ortamın eski haline getirilmesi için yapılan maliyetlerle sınırlı tutulmuştur. Bunun yanı sıra ciddi ve yakın bir kirlilik hasarı tehdidi olması koşuluyla, petrol sızıntısı gerçekleşmese bile önleyici tedbirler için yapılan harcamaların geri alınmasına olanak sağlamaktadır (REMPEC, 1998).

1989 yılında gerçekleşen ve ABD sularındaki en büyük çevre felaketlerinden biri olarak kabul edilen Exxon Valdez Tanker Sızıntısı yaklaşık 37.000 ton ham petrolün denize dökülmesine neden olmuştur (Carson vd., 2003; Gill vd., 2012). Bu kaza sonucunda uluslararası alanda petrol kirliliği hasarı büyük bir endişe haline gelmiştir. Temmuz 1989'da Paris'te düzenlenen bir konferansta IMO ve tarafları gemilerden kaynaklanan kirliliği önlemek için daha fazla önlem geliştirmeyi gündeme getirmişlerdir. Bu amaçla aynı yılın kasım ayında Petrol Kirliliğine Karşı Hazırlıklı Olma, Müdahale ve İş birliği Uluslararası Sözleşmesi (1990 OPRC) kabul edilmiş ve 13 Mayıs 1995 tarihinde yürürlüğe girmiştir (Kaya, 2016). Bu sözleşme, gemilerden kaynaklanan kirliliği önlemek için daha fazla önlem geliştirmek, büyük olaylarla veya olası deniz kirliliğiyle mücadelede uluslararası iş birliği için küresel bir çerçeve sağlamak amacıyla kabul edilmiştir. 1990 OPRC ile bir deniz kirliliği olayına hazırlık ve müdahalede uluslararası iş birliği ve karşılıklı yardımı kolaylaştırmak, devletlerinin petrol kirliliği acil durumlarıyla güvenilir bir şekilde başa çıkmaları ve yeterli kapasiteyi geliştirmeleri amaçlanmıştır. Sözleşme, taraf ülkelerin, kirlilik olaylarıyla başa çıkmak için ulusal ve uluslararası düzeyde iş birliği içinde önlemler almalarını teşvik etmektedir. Sözleşmenin tarafları, bir kirlilik acil durumunda başkalarına yardım etmekle yükümlüdür. Sözleşme, bir devletin sahip olduğu veya işlettiği, yalnızca hükümetin ticari olmayan hizmetinde kullanılan savaş gemileri, donanma yardımcı gemileri veya diğer gemileri kapsamamaktadır (UNTS, 2022b).

Ayrıca 2000 yılında Tehlikeli ve Zararlı Maddelerle Kirlenme Olaylarına Hazırlıklı Olma, Müdahale ve İş birliği Protokolü (OPRC-HNS Protokolü) kabul edilmiştir. Bu protokol 1990 OPRC'ye benzer uygulamaları takip etmektedir. OPRC-HNS Protokolü,

tehlikeli ve zararlı maddeler taşıyan gemilerin olası kirlilik olaylarına karşı hazırlık ve müdahale planlarının olmasını sağlamaktadır (IMO, 2023a).

1971 yılında Brüksel'de düzenlenen bir konferansta kabul edilen ve 1978 yılında yürürlüğe giren 1971 Petrol Kirliliği Zararının Tazmini İçin Bir Uluslararası Fonun Kurulması ile İlgili Uluslararası Sözleşme (FUND), 1969 CLC'nin tamamlayıcısı niteliğindedir. CLC'nin kapsamında mevcut olan sorumluluğu aşan zararlar ile ilgili olarak ikinci bir tazminat aşaması sağlamak amacıyla kurulmuştur (IMO, 2023b). Uluslararası Petrol Kirliliği Tazminat Fonları (IOPC Fonları), tankerlerden kalıcı petrol sızıntısı nedeniyle üye devletlerde meydana gelen petrol kirliliği hasarı için mali tazminat sağlamaktadır (IOPC, 2012a). Fon Sözleşmesi'nin temel amacı, 1969 CLC tarafından sağlanan korumanın yetersiz kaldığı durumlarda kirlilik zararını karşılamaktır. Ancak Fonun yükümlülükleri sınırlıdır. Meydana gelen olay başına parasal bir üst sınır uygulaması mevcuttur. Bununla birlikte, sorumlu armatörün bulunmaması veya sorumlu armatörün sorumluluğunu yerine getirememesi durumunda, Fonun ödenmesi gereken tazminat miktarının tamamını ödemesi gerekmektedir. Fonun tazminat ödeme yükümlülüğü, sözleşmeye taraf devletlerin karasuları da dahil olmak üzere topraklarında maruz kalınan kirlilik zararıyla sınırlıdır. Fon ayrıca, bir Akit Devlet tarafından kendi bölgesi dışında alınan önlemlere ilişkin olarak tazminat ödemekle de yükümlüdür (UNCTAD, 2012). Bunun yanı sıra Fon, kirlilik tehdidi altında olan, kirlilikten etkilenen ve buna karşı önlem almak isteyen taraf devletlere personel, malzeme, kredi olanakları gibi yardımlar sağlamaktadır. Erika ve Prestige olaylarının ardından, 1992 Fon Sözleşmesine İlişkin Protokol (Ek Fon Protokolü), 2003 yılında kabul edilmiştir. 1999'da Erika'nın da dahil olduğu büyük bir petrol kirliliği olayının yaşanmasıyla, tazminat miktarlarının daha da artırılması gereği ortaya çıkmıştır. 2000 Protokolü ile 1992 Sözleşmelerinde mevcut olan tazminat seviyeleri %50 oranında artırılmıştır (IMO, 2023b).

IMO tarafından 2001 yılında kabul edilen Gemi Yakıtlarından Kaynaklanan Petrol Kirliliği Zararının Hukuki Sorumluluğu Hakkında Uluslararası Sözleşme (BUNKER) 2008 yılında yürürlüğe girmiştir. Sözleşme, gemi sahiplerini, gemi yakıtlarından kaynaklanan petrol kirliliği zararından sorumlu kılmak ve böylelikle tazminatın mevcut olmasını sağlamak amacıyla kabul edilmiştir. Ayrıca, gemi yakıtlarının dökülmesi nedeniyle oluşan zararının tazminatını hızlı, yeterli ve etkili bir şekilde sağlamak için oluşturulmuştur (IMO, 2023c). Sözleşmenin amacı, bir taraf devlette gemi yakıtlarından kaynaklanan petrol kirliliği nedeniyle zarar görenlere tazminat ödenmesini sağlamaktır. Sözleşme, tüm açık deniz

gemilerini ve gemilerin yakıtlarından kaynaklanan kirliliği kapsamaktadır. Ayrıca armatörlerin sorumluluklarını karşılamaları için zorunlu sigorta sağlamaktadır. Bunker Sözleşmesi, petrol kirliliği hasarının sorumluluğunu, kirlletici petrolün döküldüğü veya boşaltıldığı geminin sahibine yüklemektedir. Petrol kirliliği hasarı, kirlenmenin neden olduğu kayıp veya hasarı, çevreyi eski haline getirmek için makul önlemleri ve daha fazla hasarı önlemek veya en aza indirmek için önleyici tedbirleri içerir. Taraf Devletler tarafından sigorta veya mali güvencenin yürürlükte olduğunu onaylayan sertifikalar sağlanır. Devlet tarafından verilen sertifika her zaman gemide taşınmalıdır (IOPC, 2012b).

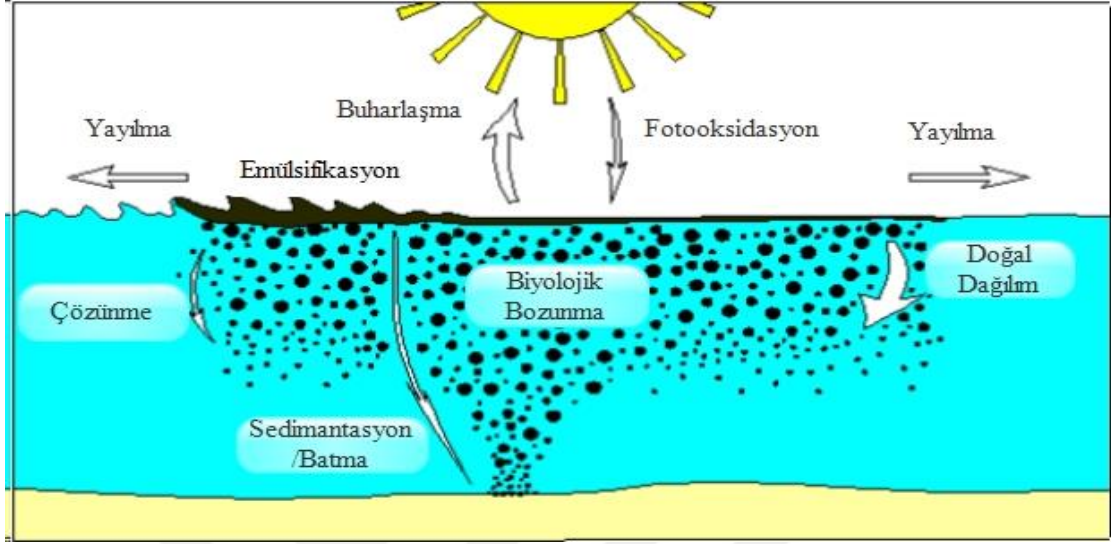
1.6. Petrolün Doğadaki Davranışları

Petrol, esas olarak hidrokarbonlardan oluşan petrol ürünlerini belirtmek için kullanılan genel bir terimdir (ITOPF, 2011). Ham petroller, propan ve benzen gibi çok uçucu, hafif malzemelerden bitümler, asfaltlar, reçineler ve mumlar gibi daha karmaşık ağır bileşiklere kadar değişen geniş bir hidrokarbon yelpazesinden oluşur.

Ham petrol veya ham petrol ürünlerinin deniz ortamına salınmasına neden olan bir petrol sızıntısının ardından, petrolü farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip maddelere dönüştürmek için ayrışma süreçleri başlamaktadır (Dubinsky vd., 2013). Yayılma, buharlaşma, dispersiyon, emülsifikasyon ve çözünme süreçleri dökülmenin başlangıcında bu sürecin en önemli aşamalarıdır (Lee vd., 2016). Petrolün suya doğal olarak dağılması gibi bazı işlemler, petrolün bir kısmının deniz yüzeyinden ayrılmasına neden olurken, buharlaşma veya petrol emülsiyonlarında su oluşumu gibi durumlar ise yüzeydeki petrolün deniz yüzeyinde daha kalıcı olmasına neden olmaktadır. Denizdeyken farklı yağların zaman içinde nasıl değiştiğini anlamak için, bu ayrışma süreçlerinin nasıl etkileşime girdiğini bilmek gerekir. Bunu tahmin etmek için yağ tipine göre bazı basit modeller geliştirilmiştir. Petrol ürünleri yoğunluklarına göre gruplara ayrılmıştır. Diğer bir deyişle daha düşük yoğunluğa sahip ürünler doğada daha az kalıcı olurlar (ITOPF, 2011).

Bir petrol tabakasının parçalanma ve dağılma şekli, büyük ölçüde yağın ne kadar kalıcı olduğuna bağlıdır. Gazyağı gibi hafif ürünler ve kalıcı olmayan yağlar hızla ve doğal bir şekilde buharlaşma ve dağılma eğilimindedirler. Buna karşılık, ham petrol gibi birçok kalıcı yağ daha yavaş parçalanır ve dağılırlar (Gros vd., 2014). Yağın yoğunluğu, viskozitesi ve akma noktası gibi fiziksel özelliklerinin tümü yağın doğadaki davranışını etkiler. Dökülen petrolün dağılması, petrolün miktarı ve türü, hava koşulları, petrolün denizde veya kıyıda

kalması gibi faktörlere bağlıdır. Denize dökülen petrolün ayrışma süreçleri Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Denize dökülen petrolün ayrışma süreçleri (Daling vd., 1990).

1.6.1. Yayılma

Petrolün dökülür dökülmez, deniz yüzeyine yayılması nedeniyle yayılma, dökülmenin en baskın süreci olarak kabul edilebilir (Sebastiao & Soares, 1995). Yayılmanın gerçekleşme hızı büyük ölçüde dökülen petrolün viskozitesine bağlıdır. Akışkan, düşük viskoziteye sahip ürünler, yüksek viskoziteye sahip olanlardan daha hızlı yayılma eğilimi gösterirler. Bununla birlikte, kaygan tabakalar hızla deniz yüzeyinde geniş alanları kapsayacak şekilde yayılırlar. Zaman içerisinde kaygan tabaka parçalanmaya başlar. Ayrıca bu tabaka rüzgâr, dalga hareketi ve akıntının da etkisiyle rüzgâr yönüne paralel dar bantlar veya yığınlar oluşturur.

Bununla birlikte, yayılma tipik olarak tekdüze değildir. Dökülme ilerledikçe genellikle yağsız su veya parlaklıkla ayrılan daha kalın yüzen petrol şeritleri gözlemlenir (Simecek-Beatty & Lehr 2007). Petrolün yayılma hızı ayrıca sıcaklık, gelgit akıntıları ve rüzgâr hızları gibi dış koşullara da bağlıdır. Bu koşullar ne kadar şiddetli olursa, petrolün yayılması ve parçalanması da o kadar hızlı olmaktadır.

1.6.2. Buharlaşma

Petrolün daha hafif bileşenleri uygun koşullar altında buharlaşarak atmosfere karışma eğilimi göstermektedir. Yüzey tabakasından buharlaşma, petrol ve türevleri için, bir petrol sızıntısının ilk saatlerinde en önemli kütle kaybı süreci olarak kabul edilir (Sebastiao & Soares, 1995). Daha hafif bileşenlerin buharlaşma oranı, ham petrolün kendisindeki daha hafif bileşenlerin yüzdesinden, yağ sıcaklığından, petrol kalınlığı ve alanından, rüzgâr ve dalga enerjisinin fiziksel kuvvetlerinden etkilenir.

Buharlaşma miktarı ve hızı, petrol türevinin uçuculuğuna bağlıdır. Yüksek oranda hafif ve uçucu bileşiklere sahip petrol türevi daha hızlı buharlaşma özelliğine sahiptir. Örneğin, benzin, kerosen ve mazot gibi hafif ürünler birkaç gün içinde neredeyse tamamen buharlaşma eğilimindeyken, ağır bir akaryakıttan çok az buharlaşma meydana gelmektedir (Fingas, 2015). Genel olarak, ılıman koşullarda, kaynama noktası 200C°'nin altında olan petrol bileşenleri ilk 24 saat içinde buharlaşma eğilimindedir. Dalgalı denizler, şiddetli rüzgarlar ve yüksek sıcaklıklar buharlaşma oranını arttırmaktadır (Gros vd., 2014). Birçok petrol sızıntısında, buharlaşma kütle dengesi açısından en önemli süreçtir. Dökülmeyi takip eden birkaç gün içinde, hafif ham petroller ilk hacimlerini %75 oranında, orta ham petroller ise %40 oranında kaybedebilirler. Buna karşılık, ağır petrol türevleri, dökülmeden sonraki birkaç gün içinde hacimlerinin yaklaşık %10'unu kaybederler (NRC, 2003).

1.6.3. Doğal Dağılım

Deniz yüzeyindeki dalgalar ve türbülans, petrol tabakalarının çeşitli boyutlarda parçalara damlacıklara ayrılmasına neden olabilir (Fingas, 2014). Daha küçük damlacıkların bir kısmı deniz suyunda askıda kalırken, daha büyük olanlar yüzeye geri çıkma eğiliminde olacak ve burada ya diğer damlacıklarla birleşerek bir kayganlığı yeniden oluşturabilecek ya da çok ince bir film oluşturacak şekilde yayılabileceklerdir. Dağılım, yağın parçalanmasına yardımcı olmak için diğer doğal süreçleri teşvik eder. Bir petrol sızıntısının dağılma hızı, dökülen petrolün tipine bağlıdır ve kalıcı olmayan petroller kalıcı petrollere göre daha hızlı dağılır (Gros vd., 2014).

Suda askıda kalan petrol, dağılma meydana gelmeden önce olduğundan daha büyük bir yüzey alanına sahiptir. Bu, çözünme, biyolojik bozunma ve çökelme gibi diğer doğal süreçlerin oluşmasını teşvik eder (Brakstad vd., 2015). Bir petrolün dağılma hızı, büyük

ölçüde petrolün doğasına ve deniz durumuna bağlıdır ve en hızlı şekilde, petrol hafif ve düşük viskoziteli ise ve deniz çok dalgalıysa gerçekleşir (Thorpe, 1995). Ayrıca kimyasal dağıtıcıların eklenmesi, bu doğal dağılım sürecini hızlandırabilir (King vd., 2015).

1.6.4. Emülsifikasyon

Bir emülsiyon, biri diğerinde (tipik olarak petrolde asılı deniz suyu) asılı kalan iki sıvı birleştiğinde oluşur. Emülsiyon, kalıcı yağlarda daha tipiktir ve daha fazla ayrışma sürecini geciktirir (Mishra & Kumar, 2015).

Petrolün emülsifikasyonu, deniz suyu damlacıklarının petrolde asılı hale geldiği süreçtir. Bu durum, deniz yüzeyindeki türbülansın teşvik ettiği fiziksel karışım ile gerçekleşir. Bu emülsiyonların oluşumunun, kirletici hacminin 3-4 kat artmasına neden olduğu görülmüştür (Lee vd., 2016). Bu süreç petrolün dağılmasını sağlayan diğer işlemleri yavaşlatır ve geciktirir. Emülsiyonlar, sakin koşullarda veya kıyı şeritlerinde karaya oturduklarında güneş ışığı ile temas ederek ısındıklarında tekrar petrol ve suya ayrılabilirler. Emülsiyonlar, ek ayrışma, oksidasyon veya donma-çözülme eylemi olmak üzere doğal süreçlerle tekrar yağ ve suya ayrılabilir (Fingas, 2014).

1.6.5. Çözünme

Dökülen petroldeki suda çözünür bileşikler, çevredeki suda çözünebilir. Bu, petrolün bileşimine ve durumuna bağlı olmakla birlikte en hızlı şekilde petrolün su sütununda ince bir şekilde dağıldığı durumlarda gerçekleşir (Lee vd., 2016). Deniz suyunda en fazla çözünen bileşenler, benzen ve tolüen gibi hafif aromatik hidrokarbon bileşikleridir. Bununla birlikte, bu bileşikler aynı zamanda, çözünmeden 10-100 kat daha hızlı olan buharlaşma yoluyla ilk kaybolanlardır (ITOPF, 2011). Genellikle çözünme, çözünen bileşenlerin çoğunun yüksek buhar basıncına sahip olması ve hızla buharlaşması nedeniyle su yüzeyine dökülen petrol için önemli bir mekanizma olarak görülmemektedir (French-McCay, 2004). Bununla birlikte, Deepwater Horizon, gibi atmosferden uzakta deniz dibinde meydana gelen sızıntılarda su altı salımlarından dolayı çözünme önemli bir hal almaktadır (Camilli vd., 2012).

Petrol, çözünmeyi daha az önemli süreçlerden biri haline getiren bu bileşiklerden sadece küçük miktarlarda içerir. Bu nedenle açık denizlerde meydana gelen çözünme

sonucunda ekosistem ve deniz yaşamının ciddi zararlarla karşı karşıya kalmadığı bilinmektedir (Fingas, 2013).

1.6.6. Fotooksidasyon

Bu süreç güneş ışığı tarafından teşvik edilir, ancak çok yavaştır. Oksidasyon, kalıcı yağlarda daha yaygındır (Lee vd., 2016). Petrol ve türevleri oksijenle kimyasal olarak reaksiyona girerek çözünür ürünlere ayrılır veya katran adı verilen kalıcı bileşikler oluşturur (Prince vd., 2003). Oksidasyonun derecesi, petrolün türüne ve güneş ışığına maruz kalma biçimine bağlıdır. Güneş tarafından desteklenen bu süreç çok yavaştır ve güçlü güneş ışığında bile ince yağ tabakaları günde %0,1'den fazla parçalanamaz (Lee vd., 2016).

Katran oluşumu, yüksek viskoziteli petrol türevlerinin veya emülsiyonların kalın katmanlarının oksidasyonundan kaynaklanır. Bu işlem, bir bütün olarak petrolün kalıcılığının artmasıyla sonuçlanan ağır bileşiklerden oluşan bir dış koruyucu kaplama oluşturur (ITOPF, 2011). Genellikle kıyı şeritlerinde bulunan ve daha yumuşak, daha az yıpranmış bir iç kısmı çevreleyen katı bir dış kabuğa sahip katran topları, bu sürecin tipik bir örneğidir.

1.6.7. Sedimentasyon/Batma

Sedimentle karışan ve tortuya yapışan petrole sedimentasyon denir ve katran toplarının oluşmasına neden olur (Lee vd., 2016). Deniz ortamında çok az petrol batmaktadır. Bu nedenle tortulaşma en çok yüzen petrol kıyıya ulaştığında, kum ve diğer tortularla karıştığında meydana gelir. Bu karışım daha sonra sahilden denize geri dönerse, tortu tarafından ağırlaştırıldığı için batabilir.

Bazı ağır rafine ürünlerin yoğunlukları birden fazladır ve bu nedenle suda batarlar. Çok az ham petrol, kalıntıları deniz ortamında batacak kadar yoğun veya yeterince havalıdır (Valentine vd., 2014). Batma genellikle tortu parçacıklarının veya organik maddenin petrole yapışması nedeniyle oluşur. Sığ sular genellikle askıda katı maddelerle yüklüdür ve çökme için elverişli koşullar sağlar (NRC, 2003).

1.6.8. Biyolojik Bozunma

Biyobozunma, deniz ortamına dökülen ve geri kazanılamayan petrolün büyük bir kısmının sonunda parçalanıp ortadan kaldırıldığı ana doğal süreçtir (Brakstad vd., 2015). Deniz suyu, petrolü bir enerji kaynağı olarak kullanabilen ve petrolü kısmen veya tamamen suda çözünür bileşiklere ve nihayetinde karbondioksit ve suya indirgeyebilen çok çeşitli mikroplar içerir. Pek çok mikrop türü mevcuttur ve her biri ham petroldeki belirli bir bileşik grubunu bozma eğilimindedir.

Bununla birlikte, petroldeki bazı bileşikler saldırıya karşı çok dirençlidir ve bozulmayabilir. Biyolojik bozunmanın etkinliğini etkileyen ana faktörler, sudaki besin seviyeleri (azot ve fosfor), sıcaklık ve mevcut oksijen seviyesidir (ITOPF, 2011). Biyobozunma oksijen gerektirdiğinden, petrolün kendisinde oksijen bulunmadığından bu işlem yalnızca yağ-su arayüzünde gerçekleşebilir. Doğal veya kimyasal dağılım yoluyla yağ damlacıklarının oluşturulması, petrolün yüzey alanını artırır ve biyolojik bozunmanın gerçekleşmesi için mevcut alanı artırır (Garret vd., 1998)

Bugün, gemilerle kargo veya yakıt olarak taşınan birçok petrol hem kalıcı hem de kalıcı olmayan petrolerin bir karışımını içerir. Bu, gemi kaynaklı petrol sızıntılarının davranışına ilişkin tahminleri karmaşık ve zorlu hale getiren bir değişkendir (ITOPF, 2022).

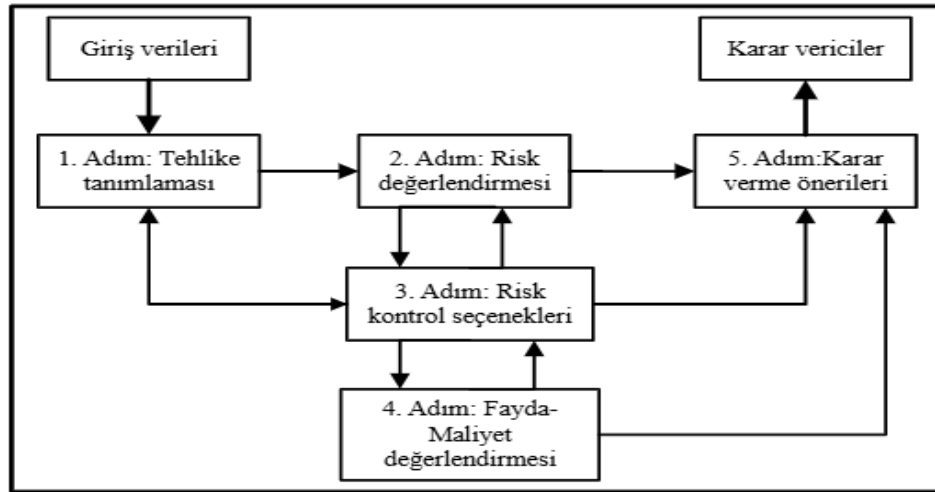
1.7. Deniz Kirliliği Risk Analizi

Büyük bir petrol kazasının dramatik sonuçlara neden olabileceği bilinen bir gerçektir (Liu vd., 2023). Petrol sızıntısına karşı hazırlıklı olmanın önemli bir unsuru, petrol kirliliğinden kaynaklanan hasara karşı savunmasız olduğu düşünülen deniz alanları için yapılan risk değerlendirmesidir (Amir-Heidari & Raie, 2019). Risklere katkıda bulunan nedenler; yüksek trafik yoğunluğu, kötü hava koşulları ve seyir engelleri, deniz koşulları, görüş mesafesi, insan hataları, bilinmeyen gemi arızaları olarak sıralanabilir. Bunlar, ayrı ayrı veya herhangi bir kombinasyon halinde meydana gelebilir ve sonuç olarak büyük bir petrol kirliliğine neden olabilirler (Zhang vd., 2006; Milan & Gomoiu, 2008).

Risk, ciddi çevre kirliliği oluşturabilecek tehlikenin tanımlamasıdır. Literatür incelendiğinde risk tanımlama aşamasında farklı tekniklerin kullanıldığı görülmüştür. Denizcilik alanında yaygın olarak kullanılan nicel yöntemler Hata Ağacı Analizi (FTA), Olay Ağacı Analizi (ETA), Bayes Ağları (BN), Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA)

olduğu görülmüştür (Eliopoulou vd., 2008). Risk yönetimi, yeterli seviyede emniyet sağlamayı amaçlayan emniyet çözümlerinin ve kontrollerin iş gerekçelerinin doğrulanması süreci olarak tanımlanabilir (Fowler & Sörgård, 2000). Bu süreç, riskleri önleme, kontrol etme ve azaltmaya yönelik önlemlerin benimsenmesiyle denizde risk azaltma ve emniyeti iyileştirme stratejilerini detaylandırmak için kullanılır (Carlig vd., 2008; Robu vd., 2008). Risk değerlendirmesi, tanınan ve belirlenen olası risklere göre yapılmıştır. Bunun yanı sıra risk yönetiminin ön koşullarını karşılayarak, riskin analiz edilmesine, azaltılmasına, izlenmesine ve denetlenmesine yönelik planlar yapılmasına olanak tanımaktadır (Buxa & Zec, 2005).

Deniz taşımacılığında risk değerlendirme yöntemleri temel olarak kaza sonucunda meydana gelen olayların gerçekleşme olasılığını ve bu olayların gerçekleşmesi durumunda sonuçlarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Fowler & Sörgård (2000), Friis-Hansen & Simonsen (2002), Montewka vd. (2012), tarafından çatma/çatışma olasılığı risk değerlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler, uygulandıkları deniz alanındaki kaza olasılığının alansal dağılımını sağlamanın yanı sıra, deniz alanındaki gemilerin karşılaşma koşullarını içeren bir dizi senaryo sunmaları sebebiyle, bir yere özgü sonuç değerlendirmesi arandığında önemlidir. Deniz taşımacılığı risk değerlendirmesine ilişkin örnek bir çerçeve Şekil 3'teki gibi özetlenebilir.



Şekil 3. Deniz taşımacılığı risk değerlendirme çerçevesi (PRS, 2022).

Deniz taşımacılığı risk değerlendirmesinde kazanın meydana gelmesi olasılığına niteliksel ve niceliksel açıdan yaklaşılabılır (Meel & Seider, 2008; Biksey vd., 2010). Nitel

yaklaşım, uzman deneyimlerine ve yargılarına dayanırken, nicel yaklaşım ulusal ve uluslararası veri tabanlarına, kaza geçmişi raporlarına ve istatistiklere dayanmaktadır (Zhang vd., 2006; Eliopoulou vd., 2008). Deniz faaliyetlerinde risk değerlendirmesi için kullanılan en yaygın yaklaşımlardan biri de risk matrisleridir. Risk matrislerinin uygulaması basittir ve anlaşılması kolaydır. Bir risk matrisi, olasılık ve sonucu (veya ciddiyet) boyutlarını içermektedir (Gasparotti, 2010).

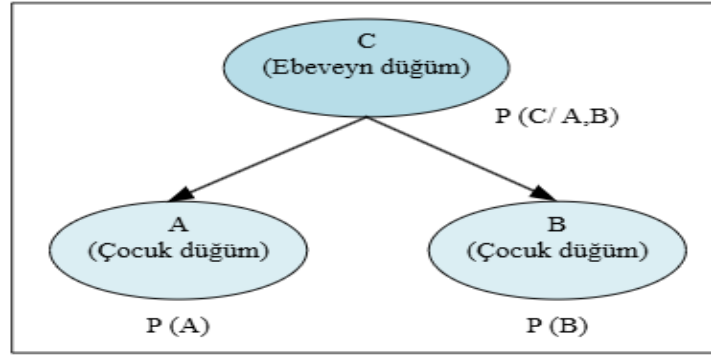
Belirli bir petrol sızıntısının riski, o senaryonun olasılığı ve sonuçlarının büyüklüğünün bir kombinasyonu ile ölçülebilir (Etkin vd., 2017). Son yıllarda, araştırmacılar tarafından petrol sızıntısı risk değerlendirmesi için farklı yöntemler önerilmiştir. Amir-Heidari & Raie (2019), enkazlardan kaynaklanan petrol sızıntılarının alansal ve stokastik risk değerlendirmesi için gelişmiş bir model önerdiler. Jiang vd. (2022), çoklu tehlike kaynaklarının etkisini göz önünde bulundurdular ve bulanık bir çıkarım sistemi geliştirmeye dayalı bir risk modeli oluşturdular. Helle vd. (2020), deniz kazalarından kaynaklanan petrol sızıntılarının Arktik ortamına oluşturduğu riski nicel olarak değerlendirmek için yeni bir olasılıksal yöntem önerdiler.

1.8. Çalışmada Kullanılan Yöntemler

1.8.1. Bayes Ağı (BN)

1973 yılında Thomas Bayes tarafından geliştirilen Bayes teoremi, öznel olasılık kavramından doğan bir koşullu olasılık yöntemidir (Bayes, 1970). Bayes ağı, bir dizi değişken arasındaki olasılıksal ilişkileri tanımlayan grafiksel bir modeldir (Pearl, 1986, 1988; McCarthy, 2007). Bayes teoremine dayanan Bayes yaklaşımı, araştırmacılar tarafından farklı sektörlerde, bilinmezlik içeren olayların modellenmesi, sonuç olayının gerçekleşmesiyle ilişkili olan durumların değerlendirilmesi ve ortaya çıkan sonuçların yorumlanması amaçlarıyla kullanılmıştır (Yang vd., 2008). Bayes Ağı; birbirleriyle koşulsal bağımlılıklara sahip değişkenler kümesinin ağ modeli şeklinde tanımlanmasıdır (Pristrom vd., 2016; Loughney & Wang, 2017). Bir Bayes ağı, düğümler ve oklar aracılığıyla değişkenler arasındaki olasılıkların gösterildiği grafiksel kısım ve düğümlere ait koşullu olasılık tabloları olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Temel soruna katkıda bulunan faktörler ‘‘Düğüm’’ olarak adlandırılmaktadır ve sonlu durum kümesine sahip değişkenleri temsil ederler. Düğümler özelliklerine göre ‘‘Ebeveyn Düğüm’’ (parent node) veya ‘‘Çocuk

Düğüm’’ (child node) olarak adlandırılırlar. Ebeveyn düğümler kendisinden oklar çıkan düğümler, çocuk düğümler ise kendisine yönelen oklar olan düğümler olarak tanımlanabilir. Bayes ağında yer alan ‘‘Kök Düğüm’’ (root düğüm) ise bir düğümün çocuk düğümü halinde olmayan kendi başına olan düğümlerdir (Şekil 4). Oklar ise değişkenler arasındaki olasılıksal bağımlılığı (nedensel ilişkiyi) temsil etmek amacıyla kullanılırlar. Yönlendirilmiş oklar doğrudan etkiyi göstererek, rastgele değişkenler arasındaki bağımsızlık varsayımlarının belirlenmesini sağlamaktadırlar (Rausand, 2011).



Şekil 4. Bayes ağı yapısı

Bayes ağlarında model kurulurken düğümler ve oklar arasındaki bağlantıların birden fazla tekrarlanmadığına, devamlı bir çember oluşmadığına dikkat edilmelidir (Loughney & Wang, 2017). Bayes yaklaşımı hem nitel hem de nicel özelliklere sahip bir yaklaşımdır. Düğümler arasındaki bağımlılık yapısı oluşturulan ağın nitel yaklaşımını göstermektedir (Trucco vd., 2008). Oluşturulan ağda yer alan düğümler arasındaki ilişkiler, her bir düğüme bağlı sayısal değerlerin belirlenmesini içeren ve Koşullu Olasılık Tablosunun (CPT) yer aldığı kısım ise yaklaşımın nicel özelliğini temsil etmektedir (Trucco vd., 2008).

Bayes ağının en önemli avantajlarından biri, modelin gerçek dünyayı yansıtacak şekilde güncellenebilmesi, diğer bir deyişle modelin değişik faktörlere kolay uyum sağlayabilmesidir. Bayes ağlarının en önemli özelliği, belirsizlik hakkında modelleme ve mantık kurma imkânı sağlamasıdır. Bayes teoreminin matematiksel ifadesi; A ve B gibi birbirine koşullu olasılık bağı ile bağlı iki farklı olay için B'nin bilinmesi koşuluyla A'nın gerçekleşme olasılığıdır (Matellini vd., 2013; Akhtar ve Utne, 2014; Pristrom vd., 2016).

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}, P(B) > 0 \quad (1)$$

A'nın bilinmesi koşuluyla B'nin olma olasılığı aşağıda verilen formülle ifade edilir.

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}, P(A) > 0 \quad (2)$$

B olayıyla kesişen ve karşılıklı birbirini engelleyen k tane A olayı olduğunu varsayarsak, B olayının bilinmesi koşuluyla A_i olayının olma olasılığı aşağıda verilen formül ile hesaplanabilir.

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i) P(B|A_i)}{P(B)}, i = 1, 2, 3, 4, \dots, k \quad (3)$$

$P(A_i|B)$: A_i olayının belirli bir “B” durumunda gerçekleşme olasılığıdır.

$P(A_i)$: A'nın belirli bir “i” durumunda gerçekleşme olasılığıdır.

$P(B|A_i)$: B durumunun A_i olayına göre koşullu olasılığıdır.

$P(B) = A_i$ olayının gerçekleşme olasılığını koşullu olarak etkileyen “B” durumunun tek başına görülme olasılığıdır.

B olayının birbirinden farklı tüm koşullara bağlı olarak görülme olasılığı diğer bir değişle ağırlık birleşik olasılık dağılımı formül 4 ile hesaplanabilir (Trucco vd., 2008).

$$\begin{aligned} P(B) &= P(A_1)P(B|A_1) + P(A_2)P(B|A_2) + \dots + P(A_x)P(B|A_x) \\ &= \sum_{j=1}^x P(A_j).P(B|A_j) \end{aligned} \quad (4)$$

$P(B|A_j)$: B durumunun A_j olayına göre koşullu olasılığıdır.

$P(A_j)$: A'nın belirli bir “j” durumunda gerçekleşme olasılığıdır.

x : A_j olaylarının sayısıdır.

Bayes ağı yapısı öğreniminde üç ana yaklaşım vardır: Veri birleştirme, uzman deneyimi ve veri güdümlü yaklaşımları. Veri birleştirme, uzman bilgisi ile veri makine öğreniminin birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Uzman deneyimi, kişisel neden-sonuç ilişkilerine dayalı BN yapıları oluşturmak için deneyimlerini ve uzmanlıklarını kullanan uzmanlara dayanmaktadır. Bununla birlikte, sübjektif kararlar belirsizlik ve yanlılığa neden olabilir (Jiang vd., 2020).

1.8.2. BN Yapı Öğrenimi: Ağaç Artırılmış Naif Bayes Ağı (TAN)

TAN, Friedman vd., tarafından önerilen Bayes ağı sınıflandırmasında yeni bir yaklaşımdır (Friedman vd., 1997). TAN modeli, Bayes ağının veriye dayalı yaklaşımları sınıfında yer almaktadır. TAN, bir sınıf değişkeninin kalan tüm özellik değişkenlerinin tek ebeveyni olduğu bir yapıdır. Sınıf değişkenine bağlı olarak aralarındaki olası bağımlılıkları hesaplamak amacıyla özellik değişkenleri arasına bağlantılar (oklar) ekler. Genel olarak, klasik Bayes ağı yapısı ile karşılaştırıldığında TAN yapısı karmaşık bağımlılık yapısının getirdiği üstel hesaplamayı kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda TAN daha iyi sınıflandırma sonuçları elde ederken değişkenler arasındaki bağımlılıklardan daha fazla faydalanmayı sağlamaktadır (Zhong vd., 2023). TAN öğrenimi, Riski Etkileyen Faktörler' in (REF) bağımlılıklarını temsil eden niteliksel bir Bayes ağı oluşturur. Klasik bir Bayes ağı ise sınıflandırma için en yüksek koşullu olasılığa sahip kategoriye seçer. TAN, Bayes ağının hesaplama basitliğini ve sağlamlığını korurken, Bayes ağından daha iyi performans gösterir ve diğer veri odaklı ağ oluşturma yöntemlerinden daha doğrudur (Fan vd., 2020).

Model yapı öğrenimi, değişkenler arasındaki bağımlılıkları ve ilişkileri belirleyerek ağın genel yapısının oluşturulması şeklinde tanımlanabilir. Modeli oluşturmak amacıyla veri seti (eğitim seti) seçilir. TAN yaklaşımında öncelikle ilgili düğümlerin koşullu olasılık değerlerini elde etmek için ilgili olay verileri içe aktarılır. Sonraki adımda veri setinden öğrenen makine öğrenimi algoritmaları aracılığıyla Bayes ağı yapıları oluşturulur. Daha sonra oluşturulan modelin test verileri üzerindeki performansı değerlendirilir (Sun & Sun, 2015). Bu aşamadan sonra değişkenlerin ana değişken üzerindeki etki derecesini analiz etmek için duyarlılık analizi gerçekleştirilir. Yapı öğrenimi, oluşturulan modelin belirli değişkenlere karşı hassasiyet derecesini belirlemek amacıyla duyarlılık analizin yapılmasını da kapsamaktadır. Oluşturulan TAN modelinde duyarlılık analizi modelin güvenilirliğini arttırmak, önemli değişkenleri belirlemek ve modelin performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmektedir.

TAN yapısını öğrenmek için değişkenler arasında koşullu karşılıklı bilgiyi kullanan Chow ve Liu tarafından önerilen genel prosedür takip edilmektedir. TAN öğrenimi için aşağıda verilen Eşitlik 5 kullanılır (Chow & Liu, 1968).

$$I_p(A_i; A_j | C) = \sum_{a_{ii}, a_{jj}, c} P(a_{ii}, a_{jj}, c) \log \frac{P(a_{ii}, a_{jj} | c_i)}{P(a_{ii} | c_i) P(a_{jj} | c_i)} \quad (5)$$

Eşitlik 5, iki değişken arasındaki koşullu karşılıklı bilginin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Fan vd., 2020).

I_p : A_i ve A_j arasındaki koşullu karşılıklı bilgi;

C : Sınıf değişkenidir.

A_i ve A_j : İki farklı değişkeni temsil etmektedir.

a_{ii} : Nitelik değişkeni, a_i ' nin i 'nci durumudur.

a_{ji} : Nitelik değişkeni, a_j değişkeninin i 'nci durumudur.

c_i : C sınıf değişkeninin i 'nci durumudur.

$P(a_{ii}, a_{ji}, c_i)$: Üçlü olasılık dağılımıdır.

$P(a_{ii}, a_{ji}|c_i)$: A_i ve A_j durumlarının C koşulunda birlikte gerçekleşme olasılığıdır.

$P(a_{ii}|c_i)$: A_i durumunun C koşulunda gerçekleşme olasılığıdır.

$P(a_{ji}|c_i)$: A_j durumunun C koşulunda gerçekleşme olasılığıdır. Eşitlik 5, C sınıf değişkeninin her bir değeri için A_i ve A_j arasındaki koşullu karşılıklı bilgiyi hesaplar ve bu değerlerin toplamı verir. Ayrıca iki rastgele değişken arasındaki bağımlılığın başka bir değişken tarafından (sınıf değişkeni) koşullandırıldığı durumunun hesaplanmasını sağlamaktadır. TAN yapısı oluşturulduktan ve model yapı öğrenimi tamamlandıktan sonra, ağ parametre öğreniminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Zou & Yue, 2017).

1.8.3. BN Parametre Öğrenimi: Beklentiler-Maksimizasyon (E-M)

BN yapısı oluşturulduktan sonra ağ parametre öğreniminin yürütülmesi gerekmektedir (Zou & Yue, 2017). Ağ parametre öğrenimi, Bayes ağındaki her düğümün diğer düğümlerin değerlerine bağlı olarak belirli olasılık dağılımlarının öğrenimi şeklinde tanımlanabilir. Klasik BN yaklaşımında ağ parametresini öğrenme, uzman bilgisi veya örnek veriler kullanılarak gerçekleştirilebilir (Li vd., 2023). Uzman bilgilerinin kullanılması ağın doğruluğunu etkileyebilir (Jiang & Lu, 2020). TAN yaklaşımında ise parametre öğrenimi makine öğrenimi algoritmaları ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada kullanılan Genie 5.0 akademik programı, parametre öğrenimi için E-M algoritmasını kullanmaktadır. E-M algoritması, parametre öğrenimi alanında çok değişkenli bir veri setinde kümelerin tanımlanması için yaygın olarak kullanılan metotlardan biridir (Kaptan & Bayazıt, 2024). E-M, eksik verilerle çalışırken bir modelin parametrelerini tahmin etmek için kullanılan doğrusal bir fonksiyondur ve temelde iki aşamadan oluşmaktadır (Lauritzen, 1995).

Birinci aşama, eksik olan verilerin beklenen değerinin tahmin edilmesi (beklenti) ve tahmini beklenen değerin maksimum olasılığının belirlenmesinden (maksimizasyon) oluşur. İkinci aşamada ise bulunan değer, orijinal verilerdeki eksik parametre için sonraki E-M tekrarlamasında kullanılır. Her yinelemede ilk olarak E-adımında her gözlemin herhangi bir bileşene ait olma olasılığı tahmin edilir. Daha sonra bu değerler kullanılarak M-adımında bileşenlerin parametre değerleri üretilir. Yineleme, maksimum yineleme sayısına veya kabul edilebilir bir hata oranına yaklaşıldığında durur. Beklentiler (E) adımında, D olayının veri kümesinde bulunan değişkenin bilinmeyen parametreleri, Θ 'yı hesaplamak için başlangıç değerinin beklenen yeterli istatistiği hesaplanmaktadır. Bu hesaplamadan sonra, Maksimizasyon (M), beklenen yeterli istatistikler altında parametrelerin log-olasılığını maksimize eder. Bu iki adım, bir durdurma kriteri karşılanana kadar yinelemeli olarak devam etmektedir. Parametrelerin log-olasılık fonksiyonu $l(\Theta)$, Θ ve veri kümesi $D=(c^1, \dots, c^N)$ 'nin hesaplanması için gerekli eşitlikler sırasıyla aşağıda verilmiştir (Kjaerulff & Madsen, 2008):

$$\begin{aligned}
 l(\Theta) &= \sum_{l=1}^N \log P(c^l | \Theta) = \sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^{|V|} \log P(X = x_i^l | pa(X_i) = x_{pa(X_i)}^l, \Theta_i, c^l) \\
 &= \sum_{i=1}^{|V|} l(\Theta_i)
 \end{aligned} \tag{6}$$

Eşitlikte 6, $l(\Theta_i) = \sum_{l=1}^N \log P(X = x_i^l | pa(X_i) = x_{pa(X_i)}^l, \Theta_i, c^l)$, (Θ^l) parametrelerinin bağımsız olduğunu ve $((x_i^l, x_{pa(X_i)}^l), D$ olayının l . Durumunda c^l 'de $((X_i, pa(X_i)))$ değerleri olduğunu varsayar.

Bayes ağları için, E adımı, beklenen sayıları hesaplamaktır. Bu hesaplama, mevcut parametre değerleri Θ ve gözlenen veriler D 'ye bağlı olarak V üzerindeki ortak bir dağılıma dayanmaktadır.

$$\mathbb{E}_{\Theta}(N_{ijk}) = \sum_{l=1}^N P(X_i = k, pa(X_i) = j | c^l, \Theta_i, G) \tag{7}$$

Burada N_{ijk} , $(X_i, pa(X_i)) = (k, j)$ için sayıdır ve c^l , D 'nin l . durumudur.

M adımı, tahmini yeterli istatistikleri, beklenen veri frekanslarını, tam bir veri tabanından elde edilen gerçek veri frekansları olarak yorumlayarak $\Theta_{i,j,k}$ 'nın yeni tahminleri olan $\Theta_{i,j,k}^*$ 'yı hesaplar.

$$\Theta_{ijk}^* = \frac{\mathbb{E}_{\Theta} (N_{ijk})}{\sum_{k=1}^{|X|} \mathbb{E}_{\Theta} (N_{ijk})} \quad (8)$$

Θ_{ijk}^* : Tahmin edilen parametre değeridir.

$\mathbb{E}_{\Theta} (N_{ijk})$: Θ parametresi altında (N_{ijk}) için beklenen değerdir.

$|X|$: X veri kümesinin boyutunu ifade eder.

k : Modeldeki farklı durumların indeksini temsil eder.

E-adımı ve M-adımı, $l(\Theta)$ yakınsayana kadar (veya yineleme sayısında bir sınıra ulaşılanaya kadar) yinelenir.

1.8.4. Karışıklık Matrisi

Karışıklık matrisi makine öğrenmesi ve istatistiksel sınıflandırma algoritmasının performansını ölçmeye yarayan bir araçtır (Sammur & Webb, 2011; Deng vd., 2016). Genel olarak, bir sınıflandırma sistemi tarafından verilen gerçek ve tahmin edilen sınıflandırmalar hakkında veri elde edilmesini sağlar (Deng vd., 2016). Modelin performansını ölçmek için dört temel özellikten faydalanır (Tablo 1).

Tablo 1. Karışıklık Matrisi elemanları

	Tahmini Pozitif	Tahmini Negatif
Gerçek Pozitif	TP	FN
Gerçek Negatif	FP	TN

1. Gerçek Pozitif (True Positive- TP): Ölçülen modelde doğru şekilde pozitif sınıfın tahmin edildiği durumları ifade etmektedir.

2. Gerçek Negatif (True Negative- TN): Ölçülen modelde doğru şekilde negatif sınıfın tahmin edildiği durumları ifade etmektedir.

3. Yanlış Pozitif (False Positive- FP): Ölçülen modelde yanlış bir şekilde pozitif sınıfın tahmin edildiği durumları ifade etmektedir.

4. Yanlış Negatif (False Negative- FN): Ölçülen modelde yanlış bir şekilde negatif sınıfın tahmin edildiği durumları ifade etmektedir.

Bu değerler kullanılarak bir modelin performans kalitesini ölçmeye olanak tanıyan Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F1-Skoru ve Özgüllük prosedürleri gerçekleştirilebilir (Gu vd., 2009).

Genel Doğruluk: Modelin doğru sınıflandırıldığının değerlendirilmesi amacıyla kullanılan yöntemdir. Eşitlik 9'da verildiği şekilde hesaplanır.

$$\text{Genel Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (9)$$

Kesinlik: Pozitif olan durumların tahmininde modelin ne kadar doğru çalıştığını gösterir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (10)$$

Duyarlılık: Modelin gerçek pozitif değerleri ne oranda doğru tahmin ettiğini gösterir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (11)$$

F1-Skoru: Kesinlik ve duyarlılık arasındaki dengeyi gösteren bir ölçümdür. 12 Numaralı eşitlikte verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{F1 Skoru} = \frac{2 * \text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (12)$$

Özgüllük: Modelin gerçek negatif değerleri ne oranda doğru tahmin ettiğini gösterir. Eşitlik 13'te gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\text{Özgüllük} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (13)$$

1.8.5. Genel NOAA Operasyonel Modelleme Ortamı (GNOME) Modeli

Genel NOAA Operasyonel Modelleme Ortamı (GNOME) modeli, sürekli akış alanlarındaki petrol sızıntılarının aşınma süreçlerini simüle etmek için NOAA tarafından geliştirilmiştir (Beegle-Krause, 1999). Model, sürekli sızıntı, ani gemi sızıntısı gibi kasıtlı veya kazayla meydana gelen farklı hacim ve koşullarda dizel, benzin gazyağı ve ham petrol gibi farklı sızıntı türlerinin simüle edebilmesini sağlamaktadır (Balogun vd., 2021). Bir petrol sızıntısı sırasında, yörüngeyi mevcut en iyi bilgilerle simüle eder, sızıntı boyunca farklı aralıklarla yörüngeyi düzeltirken temizleme çalışmalarını ve önleyici tedbirleri de yönlendirir (Duran vd, 2018). İki boyutlu (2B) bir model olarak kullanılan GNOME'nin, çeşitli deniz ve kıyı ortamlarındaki petrol sızıntısı yörüngelerini tahmin etmede başarılı olduğunu kanıtlamıştır (Beegle-Krause, 2001; Amir-Heidari & Raie, 2019; Makatounis vd., 2023).

GNOME, parçacıkları hareket ettirmek ve en iyi tahmini oluşturmak için rüzgarları ve akıntıları kullanmaktadır (Beegle-Krause, 1999; Başar vd., 2006; Duran vd, 2018). Model, petrolün kıyı şeridine yapışkanlığını deneysel olarak tanımlayan bir yeniden yüzdürme algoritması içermektedir (Zelenke vd., 2012). Hidrodinamik modellerle türetilen deniz akıntıları ve genellikle atmosferik modeller veya sabit verilerle hesaplanan rüzgâr özelliklerinin girişini gerektiren bir Eulerian/Lagrangian modelidir. Model, akıntılar, rüzgâr ve alt şebeke difüzyonu gibi faktörler tarafından yönlendirilen petrol parçacıklarının hareketini simüle etmek için Euler-Lagrangian Parçacık İzleme Yöntemini kullanmaktadır (Beegle-Krause, 1999; Beegle-Krause, 2001; Song vd., 2024). Diğer bir deyişle yayılma, buharlaşma, dispersiyon ve taşınımı içeren kırılma süreci sırasında petrol sızıntısının simülasyon davranışını sağlayan Lagrangian ayırık elemanına dayanmaktadır. GNOME'yi kullanmak için, petrol sızıntısı olayının özelliklerini ve varsayılan değerleriyle bir dizi parametrenin tanımlanması gerekmektedir. GNOME hesaplamaları, iki şekilde oluşturulabilen noktaların bir haritası olarak gösterilmektedir (Beegle-Krause, 2001).

1.9. Literatürdeki Çalışmalar

Denizcilik literatürü incelendiğinde deniz emniyeti alanında yapılan çok sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Deniz emniyetin farklı değişkenlerini içeren bu çalışmalar çoğunlukla insan unsuru, teknolojik gelişme, deniz kazaları, kirlilik, ekonomi ve deniz

çevresi alanlarında gerçekleştirilmiştir. Araştırmacıların temel amacı deniz taşımacılığında kabul edilebilir ve sürdürülebilir bir emniyet seviyesini sağlamaktır. Deniz taşımacılığının emniyet ve güvenlik seviyesini arttırmayı hedefleyen çok sayıda araştırma olmasına rağmen deniz taşımacılığı emniyetinde hala istenilen seviye sağlanamamıştır.

Bununla birlikte günümüzde deniz kazaları meydana gelmeye, insanlara, deniz çevresine ve ekonomiye zarar vermeye devam etmektedir. Bu çalışmada deniz çevresi ve ekosistem üzerinde olumsuz etkileri olan petrol sızıntıları konusu araştırılmıştır. Özellikle gemilerden kaynaklanan deniz kirliliğinin analizi ile ilgili literatürde bulunan çalışmaların bazılarını bu çalışmada geniş bir şekilde değinilmiştir.

1.9.1. Deniz Kirliliği Risk Analizi Literatürü

Petrol sızıntısı deniz kazasından veya gemi operasyonundan kaynaklanabilir. Tarihte meydana gelmiş en büyük petrol sızıntılarının deniz kazalarından kaynaklandığı görülmüştür (Lamine & Xiong, 2013). Bu alanda yapılan bazı çalışmalar, atmosferik ve hidrodinamik veri setlerini petrol sızıntısı ve risk modelleriyle birleştirmiştir (French vd., 1999; Abascal vd., 2010; Daniel vd., 2011). IMO (1995, 2003, 2018), tarafından sunulan risk analizi metoduyla çift cidarlı gemilerden oluşabilecek petrol sızıntısının performansını ölçmek amaçlanmıştır. Oluşturulan bu model, tek cidarlı gemilerde meydana gelen kazaların hasar derecesini ölçemediği ve gemi-gemi çatma/çatışmalarındaki belirli çatma/çatışma koşullarını açıklayamadığı için, deniz risk değerlendirmesindeki uygulanabilirliği sınırlıdır. Ancak çatma/çatışma koşulları petrol sızıntısı olasılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Goerlandt vd., 2012). Bununla birlikte, bu model olasılıklı regresyon tipi bir model kullanarak petrol sızıntısını tahmin etmek için kullanılmıştır (Montewka vd., 2010). Sınırlamalardan bazılarını hafifletmek için Van de Wiel & Van Dorp (2011), hasar kapsamının ve kaza sonucu petrol sızıntısının etki koşullarına bağlı olarak değerlendirilmesi için bir regresyon modeli sunmuştur.

IMO, deniz emniyetini artırmak amacıyla, risk analizi ve etkin bir risk yönetimi kullanarak Resmi Emniyet Değerlendirmesi (FSA) için yapılandırılmış ve sistematik bir metodoloji geliştirmiştir (DNV, 2002; IMO, 2002; Bâtrânca, 2007). FSA, önerilen düzenleyici önlemler için açık bir gerekçe olduğunu ileri sürerek, bu önlemlerin farklı seçeneklerinin karşılaştırılmasını ve böylelikle şeffaf bir karar alma sürecini sağlamaktadır

(IMO, 2002). Yöntem, proaktif olmayı ve ciddi bir kaza meydana gelmeden önce olası tehlikelerin dikkate alınmasını sağlar (Embankment, 2002; Quan-Gen vd., 2005).

Eliopoulou ve Papanikolaou, (2007), çalışmalarında, 1978-2003 yılları arasında gerçekleşen ve 80.000 DWT üzerindeki petrol tankerlerinde meydana gelen çok ciddi kaza boyutundaki kaza verilerinin ayrıntılı analizini yapmışlardır. Ayrıca çalışmalarında petrol kirliliğine sebep olan kazaları kirlilik boyutuyla dünya haritasında konumlandırarak, gridlendirmesini yapmışlar ve geniş petrol tankerlerinin sebep olduğu petrol kirliliği haritası oluşturmuşlardır.

Singran, (2013), petrol sızıntılarının etkilerine maruz kalabilecek risk bölgelerini, petrol sızıntısı kazalarının sıklığı, liman sayısı, yerel tekne sayısı, yabancı tekne sayısı ve önemli kaynakların varlığı gibi kritik değişkenlerin ortalama risk yüzdesine göre belirlemiştir. Ulusal ölçekte analiz edilen riskleri, simüle edilmiş petrol sızıntılarının sıklığına bağlı olarak belirlemiştir. Kıyı sularındaki petrol sızıntısı olaylarını ve etkilerini en aza indirmeyi amaçlayan çalışmada, etkili planların hazırlanmasına rehberlik etmek için çeşitli risk büyüklüklerine sahip dört bölgeyi haritalamıştır. Hazırlanan risk haritalarının, yerel ve bölgesel denizlerde taşımacılık ile ilgili düzenlemelerin iyileştirilmesinde kullanılmasını amaçlamıştır.

Yang vd., (2013), çalışmalarında deniz emniyet analizinin zorluklarını ve deniz taşımacılığındaki riskleri ölçmek için kullanılan farklı yaklaşımları değerlendirmişlerdir. FSA, yetersiz kaldığı kısımlar göz önüne alınarak incelenmiştir. FSA'nın deniz emniyeti ve korsanlık analizindeki olası uygulamaları ve denizde emniyet üzerindeki etkileri ele alınarak tartışılmıştır. Risk belirleme analizinin, denizde emniyet kültürünün reaktif bir yaklaşımdan proaktif yaklaşıma dönüşümünü nasıl kolaylaştırdığını göstermek üzere bazı yeni belirsizlik ve risk modelleme tekniklerini de ortaya koymuşlardır.

Chang vd., (2014), olası bir petrol sızıntısının sonuçlarını etkileyecek faktörleri sistematik olarak değerlendirmelerine yardımcı olmak için özet bir literatür taraması yapmışlardır. Geçmişte meydana gelmiş petrol sızıntısı felaketleriyle ilgili ampirik çalışmalara dayanarak, petrol sızıntısının kendisi, afet yönetimi, fiziksel deniz ortamı, deniz biyolojisi, insan sağlığı, ekonomi ve politika gibi alanlara odaklanmışlardır. Sonuçların ciddiyetini etkileyen önemli değişkenleri tanımlayarak bu değişkenler arasındaki etkileşimleri belirledikleri bir model oluşturdular. Modelin, petrol sızıntısı etkilerinin karmaşıklığını açıklığa kavuşturmak, petrol sızıntısı önleme ve müdahale senaryoları

geliştirmek ve potansiyel dökülme felaketlerine karşı savunmasızlıklarını anlamak ve azaltmak isteyen bölgelerdeki risk analizinde kullanılması amaçlanmıştır.

Kankara vd., (2016), Hindistan'ın Chennai kıyılarındaki kirlilik analizi için kıyı kaynak bilgi sistemi ve petrol sızıntısı yörünge modeli entegre ederek senaryo tabanlı bir risk değerlendirmesi gerçekleştirmişlerdir. Petrol sızıntısı ve yörünge modelleri, petrol sızıntılarından etkilenmesi muhtemel alanları hızlı ve etkili bir şekilde belirlemek için Coğrafi Bilgi Sistemlerini (GIS) kullanmışlardır. Bu alanda petrol kirliliğinin risk değerlendirmesi ve duyarlılık analizinin niteliksel ölçeklenmesi için uzman görüşlerine başvurmuşlardır. Dökülen petrolün analizi sonucunda, toplam petrol hacminin %55'inin su içerisinde kaldığını ve 800 metre kıyı şeridini etkilediğini tespit etmişlerdir.

Afenyo vd., (2017) çalışmalarında Arktik deniz ekosisteminin oluşturduğu ekolojik riski değerlendirebilen bir model geliştirmişlerdir. Önerilen bu modelle, kaza sonucu meydana gelen petrol salınımı riskini değerlendirmeyi ve Arktik deniz ekosistemleri için güvenliğin yönetimi hakkında etkili kararlar almayı amaçlamışlardır.

Başar vd., (2018), Karadeniz'de yapılması planlanan petrol kulelerinin kıyı bölgesi ve deniz ortamı için oluşturabileceği riskleri belirlemek amacıyla 10 farklı kaza senaryo oluşturmuşlardır. Çalışmanın amacı petrol arama çalışmaları ve petrol kuleleri sırasında bir alanla ilgili olası senaryoların değerlendirilmesiyle kıyı sistemindeki herhangi bir hasarı en aza indirmektir. Çalışmaları sonucunda olası bir kaza durumunda 2 adet acil müdahale bölgesi belirlenmiştir.

Yu vd., (2018), Çin'in Bohai bölgesinde 28 petrol platformu ve çok sayıda petrol boru hatları bulunması nedeniyle oluşabilecek petrol sızıntılarının analizi için varsayımsal bir petrol sızıntı simülasyonunu oluşturmuşlardır. Petrol sızıntısı yörüngeleri ve kıyı şeridi duyarlılık verilerinin kombinasyonuna bağlı olarak risk indeksi haritalandırılmasını gerçekleştirmişlerdir. Deniz çevre etki analizi aracı olan Petrol Sızıntısı Risk Analizi (OSRA) kullanarak bölgedeki petrol konsantrasyonu ve kirlilik etkisinin istatistiksel analiziyle risk indeksi tanımı ve hesaplamasını yapmışlardır. Çin Bohai Denizi'nin tamamında beş yüksek riskli alan tespit etmişler ve bu bölgelerde meydana gelebilecek petrol sızıntılarının risk değerlendirmesinin geliştirilmesine yardımcı olarak, acil durumlarda faydalı olacak bir yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır.

Zhang vd., (2018), çalışmalarında petrol sızıntısı olasılığı, tehlikenin sonuçları, petrolün özellikleri, hava koşullarına maruz kalma süreci ve operasyon verimliliği gibi faktörleri kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi amaçlamışlardır. Petrol sızıntılarının kapsamlı

analizi ve bölgesel acil durum kaynak tahsisi için yenilikçi bir risk tabanlı model geliştirdiler. Modelin kaynak verimliliğini arttırmada faydalı olduğu ve yüksek riskli alanlarda kapasite geliştirme programlarının planlanmasına katkıda bulunabileceğini ifade etmişlerdir.

Chiri vd., (2019), petrol sızıntısının gidişatına ilişkin orta-uzun vadeli olasılık tahminlerini incelemişlerdir. Veri madenciliği yöntemleri (DM), Lagrange simülasyonları ve istatistiksel modellemeyi birleştirerek, lojistik regresyon kullanarak rüzgâr ve akıntı modelleri geliştirmişlerdir. Sonuçlar, önerilen modelin özellikle büyük açık deniz petrol sızıntısı kazalarında etkili olacağını göstermiştir.

Goerlandt vd., (2019), kurumsal bağlamda Kirliliğine Hazırlık ve Müdahale (PPR) planlamasını desteklemek için, risk yönetimi sorularına yanıt sağlamaya yardımcı olabilecek çeşitli risk değerlendirme araçları ve tekniklerini içeren, OpenRisk Toolbox'ı geliştirmişlerdir. Bu yöntemin uygulanabilirliğini ve kullanılabilirliğini anlamak amacıyla bu araçlardan bazılarının test edildiği bir Çalıştay düzenleyerek, OpenRisk Toolbox'ı kullanıcı ve paydaş görüşlerini toplamış ve analiz etmişlerdir.

Jin vd., (2019), yaptıkları çalışmada petrol tankerlerinden kaynaklanan kirliliği önlemek amacıyla 1991- 2016 yılları arasında meydana gelmiş ham petrol tankeri kaza verilerini analiz etmişlerdir. Ortak kaza olasılıkları ve sonuçlarının risk değerlendirmesi için dört makine öğrenme yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçları, paydaşların kaza risk faktörlerini belirlemelerine, kaza riskini değerlendirmelerine ve kaza olasılıklarını azaltmaya yönelik önlemler almalarına yardımcı olarak deniz çevresinin korunmasına katkıda bulunabileceğini göstermiştir.

Xing ve Zhu, (2022) tarafından yapılan araştırmada Doğu Çin Denizi'nde meydana gelen Sanchi petrol sızıntısı kazası incelenmiştir. Kaza, dökülen petrol miktarı açısından, Çin'deki en büyük ve şu ana kadar dünyada gerçekleşmiş kirlilik kazaları arasında dokuzuncu sırada yer almıştır. Çalışmalarında Sanchi tanker kazası sonucunda Çin yasalarında meydana gelen hukuksal değişime odaklanmışlardır. Çalışma sonucunda Sanchi deniz kazasının gemi kaynaklı petrol kirliliği ile ilgili Çin yasalarını önemli ölçüde desteklediğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, Sanchi tankeri kazasından sonra açık deniz petrol sızıntısına acil müdahale konusunda kapasiteyi artırmak, petrol kirliliğiyle mücadele için uluslararası ve bölgesel iş birliğini teşvik etmek ve tanker petrol kirliliği için tazminat standartlarını yükseltmeyi tavsiye etmişlerdir.

1.9.2. Deniz Kirliliği Risk Analizinde Bayes Ağı Kullanımı

Denizcilik risk analizi yöntemleri arasında bulunan Bayes Ağı, son yıllarda REF'leri ve aralarındaki ilişkileri verimli bir şekilde tanımlamasından dolayı araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir (Li vd., 2023). Bayes Ağı, bir dizi değişken arasındaki olasılıksal ilişkileri tanımlayan grafiksel bir model olarak tanımlanmaktadır (Pearl, 1986, 1988; McCarthy, 2007). Kaza oluşumunu, bir ağ örgüsü şeklinde düğümler ve oklar kullanılarak modelleyebilmeye imkân tanımaktadır. Bu nedenle, petrol sızıntılarının risk değerlendirmesinde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Liu & Callies, 2020). Bunun yanı sıra Bayes Ağı literatürde çok sayıda çalışmada ve farklı sektörlerde kullanılmıştır (Yang vd., 2008; Zhang vd., 2013; Li vd., 2014; Çakır vd., 2021). Araştırmacılar tarafından BN, kimyasal dağıtıcıların kullanılmasının potansiyel faydalarının analizleri (Liu & Callies, 2019), ekolojik risk analizleri (Carriger & Barron, 2011; Jolma vd., 2014), maliyet-fayda analizleri (Montewka vd., 2013; Helle vd., 2015) ve kirlilik yollarının analizleri (Chrastansky & Callies, 2011) gibi petrol sızıntılarına odaklanan çalışmalarda da tercih edilmiştir. Li vd., (2014), yaptıkları çalışmada Lojistik Regresyon ve Bayes ağlarını denizde risk değerlendirmesine entegre etmeye yönelik bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışmada kurulan ağda yer alan düğümlerin olasılıklarının belirlenmesinde Binary Lojistik Regresyon kullanmışlardır. Böylelikle genellikle uzman görüşü kullanılan ve nispeten daha göreceli olan yöntemi, istatistiki bir yöntemle değiştirmişlerdir.

Davies ve Hope, (2015), Bayes Ağlarına (BN) dayalı bir Çevresel Karar Destek Sistemlerinin Belirlenmesi (EDSSs) yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntemin deniz kirliliği sonrasında acil durum planlarının yeniden değerlendirilmesi sağlayarak optimum müdahale stratejisinin benimsenmesine yardımcı olabileceğini ifade etmişlerdir. Yöntemin, acil durum planlamasının güçlü yanlarını koruduğunu ayrıca bir petrol sızıntısının anındaki durumsal gerçekliği yansıtmak için bir araç sağlayarak, kirlilikle müdahale aşamasında yöneticilerinin acil durum planlarında önerilen karar seçeneklerinin sonuçlarını tahmin etmelerine olanak tanıdığını belirtmişlerdir.

Helle vd., (2015), petrol sızıntısı yönetiminin Fayda/Maliyet Analizini (CBA) gerçekleştirmek amacıyla olasılıksal temelli bir Bayes Ağı modellemesi geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntemi Finlandiya Körfezi ve Baltık Denizi'nde gerçekleşen petrol sızıntılarının analizi için kullanmışlardır. Nedensel bir yapıya sahip olan model, açık denizde petrolle mücadele operasyonları, kıyı şeridinin temizlenmesi ve atık arıtma faaliyetlerinin

maliyetleri gibi çok sayıda faktörü kapsamaktadır. Çalışmanın sonucunda, maliyetlerin önleyici tedbirlerinin aranmasını teşvik ederek, maliyet analizine atık arıtma ve çevresel değerlerle ilgili maliyetlerin dahil edilmesinin önemini vurgulamışlardır.

Banda vd., (2016) FSA yöntemini ve Bayes ağlarını entegre ederek geliştirdikleri modelle, Finlandiya körfezinde kış aylarında meydana gelen çatma/çatışma kazalarının deniz kirliliği risklerini araştırmışlardır. Çalışmayla gemilerin bağımsız veya konvoy halinde seyirlerinin çevre kirliliği için yüksek risk taşıdığını tespit etmişlerdir. Her iki seyir durumunda yüksek personel performansına ihtiyaç duyulduğu özellikle insan-makine etkileşimi ve operasyonel yardımcılarının önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Arzaghi vd. (2018), çalışmalarında Arktik Okyanusu'ndaki petrol sızıntılarının Ekolojik Risk Değerlendirmesi (ERA) için olasılıksal bir metodoloji sunmuşlardır. Değişkenlerinin belirsizliğini hesaba katarak, dökülen petrolün akıbetini ve taşınmasını modellemişlerdir. Bu yaklaşımla, farklı ortamlarda kirleticilerin %95 Öngörülen Maruz Kalma Konsantrasyonunun (PEC95%) tahmin edilmesine yardımcı olmasını amaçlamışlardır. Dinamik Bayes Ağ'na (DBN) dayalı bir model geliştirilerek su topluluğuna yönelik ekolojik riski değerlendirmeyi hedeflemişlerdir. Model, mevsimsel değişikliklerin neden olduğu zamana göre değişken risk profilini analiz etmenin yanı sıra, girdi parametrelerinin oluşma olasılığının hesaplanmasını da sağlamaktadır.

Baksh vd., (2018) Kuzey denizi rotasında meydana gelecek çatışma ve karaya oturma kazalarının olasılıklarını araştırmak için risk modeli önermişlerdir. Model Bayes ağı kullanılarak geliştirilmiştir. Kaza risklerinin tahmini için tarihsel veriler ve uzman görüşüne başvurmuşlardır. Ayrıca model kuzey deniz rotasında seyreden petrol tankerinde örnek uygulaması gerçekleştirilmiştir. Model belirsizlik ve duyarlılık analizleri yapılarak kaza meydana gelen olayların meydana gelme olasılığında değişiklikler tespit etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda Doğu Sibirya denizinde karaya oturma ve çatma/çatışma kaza riskinin yüksek olduğunun tespit etmişlerdir. Tespitlerinde buz etkisinin kazalara baskın bir faktör olduğunu ve kazalara etkin faktörlerin sırasıyla dijital harita hatası, güncel konum hatası, uygun olmayan rota seçimi ve prosedür hatası olarak sıralamışlardır.

Lu vd., (2020) çalışmalarında etkin petrol sızıntısı geri kazanımını sağlamak için petrol sızıntısı kazalarının kritik yönlerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Finlandiya petrol sızıntısı müdahale ekibinin mekanik petrol sızıntısı geri kazanım sistemi için bir Bayes Ağı modeli geliştirmişlerdir. Bu modelle, temsili deniz buzu koşulları, gemi-gemi çatma/çatışmaları ve bunlarla ilişkili petrol sızıntısı, buz koşullarında petrolün dağılması, yayılması ve petrolün

geri kazanılması hakkındaki bilgileri birleştirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirilen yöntem, petrol döküntüsü müdahale sistemine uygulanarak kritik faktörleri belirlemişlerdir. Belirlenen en kritik sistem faktörlerinin çatma/çatışma yönü ile ilgili olduğunu tespit etmişlerdir.

Çakır vd. (2021), deniz kirliliğine neden olan gemi kazalarına dayalı verileri inceledikleri çalışmalarında olası gemi kazalarında petrol sızıntısının ciddiyetini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Amerika Birleşik Devletleri Sahil Güvenlik (USCG) veri tabanını kullanarak, 2002-2015 yıllarını kapsayan ve petrol sızıntısına yol açan toplam 1.468 gemi kazasını, Karar Ağacı (DT) ve Bayes Ağları kullanarak analiz etmişlerdir. Araştırmanın sonucunda, petrol sızıntısının şiddetini etkileyen en önemli faktörler “kaza tipi” ve “gemi tipi” olarak bulunmuştur. Petrol sızıntısının ciddiyetini tahmin etmeye yardımcı olacak ve petrol sızıntılarına yol açan gemi kazaları için önemli stratejilerin ve önlemlerin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamışlardır.

Kamal ve Kutay, (2021), yakıt operasyonlarından kaynaklanan petrol sızıntılarının nedensel analizi için Fuzzy-Bayes Ağı yaklaşımı yeni bir model sunmuşlardır. Geliştirdikleri modelle, niteliksel ve niceliksel olarak ortaya konan nedensel faktörler arasındaki olasılıksal ilişkileri incelemişlerdir. Sonuçların doğruluğunu artırmak için duyarlılık ve doğrulama analizleri yapmışlardır. Sonuç olarak, operasyonel ve mürettebat kaynaklı nedenlerin kirliliğin ortaya çıkmasına katkıda bulunan başlıca faktörler olduğunu tespit etmişlerdir.

Li vd., (2022) risk ve maliyeti dengeleyebilen, optimal bir karar vermeyi sağlayan, kaza öncesi risk yönetimini ve kaza sonrası acil müdahaleyi entegre eden Bayes Ağı ve Etki Diyagramına (ID) dayalı bir metot geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu metotla açık deniz petrol sızıntı kazasının gerçekleşme olasılığını ve sızıntının ekolojik etkilerin tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen bu metodun uygulaması göstermek amacıyla deniz altı petrol boru hattı sızıntısından kaynaklanan bir petrol sızıntısı kazasını vaka çalışması olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda geliştirilen bu metodun, açık deniz petrol sızıntısı kazalarının risk yönetimi ve acil durum müdahalesi için karar verme sürecini destekleyebileceğini ifade etmişlerdir.

Bayazıt ve Kaptan (2023), deniz kirliliğine yol açabilecek gemi operasyonlarını incelemişlerdir. Bu nedenle yük operasyonlarında mürettebat hatasından kaynaklanan petrol sızıntılarının arkasındaki nedensel faktörleri belirleyen yeni bir metot sunmuşlardır. Nitel ve nicel olarak ortaya çıkarılan nedensel unsurlar arasındaki olasılıksal korelasyonları analiz

etmek için Bulanık Bayes Ağı (FBN) yaklaşımını kullanılmışlardır. Çalışma sonucunda baca gazı emisyonlarına neden olan prosedürlerin yüksek riske sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

1.9.3. Ağaç Artırılmış Naif Bayes (TAN) Literatürü

Bayes yöntemleri, deniz risk değerlendirmelerinde uzmanların sübjektif yargılarına dayalı olarak birçok çalışmada kullanılmıştır (Li vd., 2021). Li vd., (2014), yaptıkları çalışmada uzman görüşü kullanılan klasik BN yönteminin nispeten göreceli olduğunu savunmuşlardır. Bununla birlikte, son yıllarda, deniz kazalarına katkıda bulunan faktörlerin analizinde, veriye dayalı Bayes yaklaşımlarının kullanılması popülerlik kazanmıştır (Meng vd., 2022). Fan vd. (2020), çalışmalarında, deniz kazalarındaki insan faktörlerini incelemek için TAN yöntemini kullanarak, gemi işletimi, yaş, seyir bölgesi ve durumu gibi temel risk faktörlerini belirlemişlerdir. Wang ve Yang (2018), nehirlerde ve kıyı sularında küçük boyutlu gemilerin karıştığı deniz kazalarını incelemek amacıyla TAN'ı kullanmışlar ve kaza şiddetini etkileyen önemli risk faktörlerini belirlemişlerdir.

Kelangath, vd., (2012) çalışmalarında risk analizinde veriye dayalı Bayes modellemesinin kullanımını tanıtmakta ve mevcut farklı veriye dayalı Bayes yöntemleriyle bir karşılaştırma yapmaktadırlar. Çalışmanın veri seti, Lloyds veri tabanından elde edilen 1997-2009 yılları arasında gerçekleşmiş deniz kazalarından oluşturulmuştur. Bu veri tabanından önemli etkili değişkenler gruplanır ve karşılık gelen değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren bir Bayes Ağı oluşturulur. Oluşturulan Bayes Ağı, veri tabanındaki değişkenler arasında var olan olasılıksal bağımlılıklar ve bu kazaların altında yatan nedenler hakkında bir fikir verir.

Triepels vd., (2015) deniz taşımacılığında belge sahtekarlığını değerlendirmiş ve taşımacılar için yanlış kodlama ve kaçakçılık tespit sistemi önermiştir. Çalışmalarında toplam 11.044 adet ithal konşimento Naif Bayes (NB) ve TAN ile analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda TAN'ın NB'den daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Abdolshah vd., (2017), ise konteyner güvenliği üzerinde kaçakçılık konusunu araştırmışlardır. Konteynerlerin X-Ray görüntüsü kullanılarak TAN'a dayalı yeni bir yaklaşım önerilmiş ve önerilen yaklaşımın, X-Ray görüntülerini sınıflandırmada zaman açısından verimli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yakın zamanda geliştirilen diğer yöntemlerle kıyaslandığında doğruluğu neredeyse %30 oranında artırdığını ileri sürmüşlerdir (Abdolshah vd., 2017).

Adedigba vd., (2018), TAN yöntemini kullanarak açık deniz sondaj operasyonlarının risk analizini incelemişlerdir. Test durumu, özel verilerden türetilen parametreler kullanılarak uygulanmış ve zamana bağlı risk modeli oluşturulmuştur. Sondaj operasyonlarının risk düzeyi dikkate alındığında modelin yüksek performans göstermesi önemli bir sonuç olarak değerlendirilebilir (Adedigba vd., 2018).

Sevgili vd., (2022), çalışmalarında, ABD Sahil Güvenliği (USCG) veri tabanından elde ettikleri 2080 deniz kaza raporunu inceleyerek tanker kazaları sonrasında petrol sızıntısı olup olmayacağını tahmin etmek için veri odaklı Bayes Ağı algoritmasına dayalı bir model geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda müdahale süresini azaltmak için bir kaza sonrasında petrol sızıntısı olup olmayacağını en kısa sürede tahmin etmenin karar alma makamları için özellikle yararlı olacağını ortaya koymuşlardır (Sevgili vd., 2022).

Zhong vd., (2023), araştırmalarında gemi kazası sonucunda oluşan kirliliğin temizlenme çalışmalarının etkinliğini etkileyen faktörleri belirlemek için veriye dayalı bir Bayes yaklaşımı kullanmışlardır. USCG'nin petrol sızıntısı kazalarına ilişkin kapsamlı bir tarihsel veri tabanı kullanılarak bir TAN analiz modeli oluşturulmuştur. Temizleme oranı ile etkileyen faktörler arasındaki ilişki araştırılmıştır (Zhong vd., 2023).

Yang vd., (2023), yaptıkları araştırmada kirliliği önlemede gemi performansını etkileyen temel risk değişkenlerinin etkisini belirlemek amacıyla TAN-BN modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada liman yetkililerine standart altı gemileri kısıtlama ve gemilerin kirlilik önleme performansını iyileştirme konusunda yardımcı olacak öneriler sunmayı amaçlamışlardır.

Gao vd., 2024, çalışmalarında deniz taşımacılığı konusunda zorlu koşullara sahip Manş Denizi'nde gerçekleşmiş kazaları analiz etmişlerdir. Kazaların nedensel mekanizmaları anlamak ve risk faktörlerini belirlemek için 2017-2022 arasında gerçekleşmiş 833 kazayı TAN metodunu kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışma, yönetim departmanlarına kaza önleme stratejileri geliştirmelerini ve Manş Denizi'nde seyir güvenliğini artırmaları için teorik rehberlik sunmaktadır.

Yang vd., (2024) çalışmalarında, geliştirilmiş bir Makine Öğrenimi (ML) tabanlı metodoloji kullanarak bir TAN modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri metotla denetim politikasının verimliliğini iyileştirmeyi ve alıkonma süresini azaltmayı amaçlamışlardır. 2015-2022 yılları arasında Paris Mamerendumunun yetki alanındaki alıkonma kayıtlarını inceleyerek gemi alıkonma süresini etkileyen risk değişkenleri ve eksiklik türleri belirlenmişlerdir. Çalışma sonucunda liman otoriteleri için politika çıkarımları ve

yönetimsel öneriler sunulmuştur. Önerilen modelin, rasyonel ve etkili denetim politikalarının geliştirilmesini desteklemesi amaçlanmıştır.

1.9.4. GNOME Literatürü

Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde özellikle gemilerden kaynaklı deniz kirliliği konusunda simülasyon modellerinin çok sayıda çalışmada kullanıldığı görülmektedir (Başar vd., 2006; Depellegrin & Pereira, 2016; Kankara vd., 2016; Bozkurtoğlu, 2017; Chiu vd., 2018; Gıug & Wş, 2018; Amir-Heidari & Raie, 2019; Nordam vd., 2019; Qiao vd., 2019). Petrol Sızıntısı Acil Durum ve Müdahalesi (OSCAR), Genel Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi Operasyonel Petrol Modelleme Ortamı (GNOME), Medslik-II, Dökülme Etkisi Modeli Uygulama Paketi (SIMAP), Petrol Modelleme Uygulama Paketi (OILMAP), Yarı Örtük Çapraz Ölçekli Hidrobilim Entegre Sistem Modeli (SCHISM) araştırmacılar tarafından kullanılan simülasyon uygulamaları arasında yer almaktadır (Balogun vd., 2021). GNOME, bir kirleticinin su kütlesi içinde veya üzerinde izleyebileceği olası yörüngeyi tahmin etmek için NOAA Müdahale ve Restorasyon Ofisi Acil Durum Müdahale Bölümü tarafından geliştirilen ve kullanılan modelleme aracıdır (Beegle-Krause, 1999). Yaklaşık 20 yıldır GNOME, petrol sızıntılarını, kimyasal sızıntıları, deniz enkazlarını ve daha fazlasını izlemek için endüstri, hükümet ve kuruluşlar adına acil müdahale ekipleri tarafından kullanılmaktadır (Duran vd., 2018).

Başar vd., (2006), İstanbul Boğazı'nda istatistiki kaza verileri kullanılarak dört riskli bölge belirlemişlerdir. Bu bölgelerde oluşabilecek 1.000 ton petrol sızıntısını birden fazla senaryoyla simülasyonda değerlendirmişlerdir. Her senaryoda meteorolojik koşulları (rüzgâr hızı ve yönü) etkin olarak almışlardır. GNOME simülasyon uygulamasını kullanarak petrolün yayılımını incelemişlerdir. Bunun sonucunda riskli alanları tespit ederek döküntülerin etkisini en aza indirmek için alınması gereken önlemleri belirlemişlerdir. Riskli alanlardaki (Anadolu Kavağı, Büyükdere, Çengelköy ve Haydarpaşa) etkiyi en aza indirmek için Haydarpaşa limanına ve Büyükdere'ye acil müdahale istasyonu kurulmasının yararlı olacağı belirtmişlerdir.

Başar, (2010), çalışmasında Marmara Denizi'nin riskli bölgesini belirleyerek bu bölgede oluşabilecek bir tanker kazasının simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Kaza sonrası petrol dökülmesinin simülasyonu GNOME yazılımı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ADIOS2 yazılımıyla dökülen petrol için aşınma hesaplamaları yapılmıştır. Farklı

senaryoların incelendiği simülasyon sonuçlarında, dökülmenin ilk üç simülasyonda kıyıya ulaşmadığını, dördüncü simülasyonda kıyıya ulaştığını tespit etmiştir.

Elizaryev vd. (2018), Exxon Valdez petrol sızıntısının yayılma yönünü, GNOME ve Tehlikeli Maddeler Müdahale ve Değerlendirme Birimi (HAZMAT) modeli olmak üzere iki farklı model kullanılarak analiz etmişlerdir. İki model tarafından elde ettikleri sonuçlardaki farklılıkların nedenleri hakkında sonuçlar çıkarmışlardır. Simülasyonun doğruluğunun, coğrafi ve meteorolojik verilerin girişi ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, modellenen acil durum olayının ayrışma sürecini tahmin etmek için Petrol Sızıntıları için Otomatik Veri Sorgulama (ADIOS) yazılımı kullanmışlardır. Su kütlesi içinde dağılan petrolün fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişimi etkileyen ana faktörlerin rüzgâr hızı ve yönü, su sıcaklığı ve dalga yüksekliği olduğu tespit etmişlerdir.

Balogun vd., (2021), Çalışmalarında Malezya, Kota Tinggi bölgesinde petrolün yörünge modelini tahmin etmek ve haritalamak için bir petrol sızıntısı çevresel güvenlik açığı modeli geliştirmişlerdir. Mevsimsel değişikliklerin kıyı kaynaklarının petrol sızıntısına karşı kırılganlığı üzerindeki etkisi incelenerek, üç iklim mevsimi boyunca (kuzeydoğu muson, güneybatı muson ve muson öncesi) etkilenen kıyı kaynaklarının miktarını tahmin edilerek modeli oluşturmuşlardır. GNOME modelini kullanarak orta ölçekli 12 adet petrol sızıntısı senaryosunu simüle etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, olası bir petrol sızıntısının en şiddetli etkilerinin güneybatı muson zamanında görülebileceğini ve bu zamanda kıyı şeridi kaynaklarının petrol sızıntısına karşı en savunmasız durumda olduğunu tespit etmişlerdir. İklimsel farklılıkların, kıyı kaynaklarının denizdeki petrol sızıntısına karşı savunmasızlığını önemli ölçüde etkilediği sonucunu ortaya koymuşlardır.

Keramea vd. (2021), çalışmalarında son teknolojiye sahip 18 adet petrol sızıntısı simülasyon modelini incelemişlerdir. Belirledikleri parametreler çerçevesinde değerlendikleri simülasyon modellerinin özelliklerini birbiriyle karşılaştırarak modellerin detaylı bir analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu inceleme sonucunda mevcut petrol sızıntısı modellerinin çoğunun, petrolün çözünmesi, foto oksidasyon ve biyolojik bozunma gibi önemli fiziksel süreçleri dikkate almadığını tespit etmişlerdir.

Elmahi vd., (2024), kış ve yaz aylarında iki varsayımsal senaryoyu simüle etmek için GNOME modelini kullanarak Sudan kıyısı boyunca petrol sızıntılarının olası sonuçlarını araştırmışlardır. Yaptıkları analizle rüzgârın, su akıntılarının ve sıcaklığın petrol sızıntısı yolları ve aşınma süreçleri üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymuşlardır. Her iki senaryoda da buharlaşma oranlarının %60'ı aştığını, dağılmanın ise daha az olduğunu tespit

etmişlerdir. Çalışmalarında Sudan kıyı bölgelerinde ve komşu adalarda potansiyel kirlilik etkilerini azaltmak için proaktif önlemler almanın acil ihtiyacını vurgulamışlardır.

Farzingohar vd., (2024), çalışmalarında İran'ın Qeshm ve Hormozgan bölgelerinde bulunan tanker terminallerinden kaynaklanan Petrol Sızıntısı Su Kirliliğinin (OSWP) oluşturduğu çok yönlü çevresel tehditleri ortaya çıkartmayı amaçlamışlardır. GNOME modelini kullanarak, 2022'ye kadar mevsimsel atmosferik ve okyanus verilerinden ekstrapole edilen çeşitli senaryoları araştırmışlardır. Özellikle rüzgâr ve akıntıların, OSWP'lerin nasıl belirlendiğini ve dağıtıldığını büyük ölçüde etkilediğini tespit etmişlerdir. Çalışmalarında OSWP'nin oluşturduğu yakın çevresel tehditlere ışık tutmakla birlikte, deniz ekosistemleri ve kıyı toplulukları üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak için alınacak önlemlere ve kapsamlı stratejilere olan kritik ihtiyacı da vurgulamışlardır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışmanın Kapsamı

Günümüzde deniz çevresinin korunması ve deniz kirliliği dünya gündeminde olan önemli bir tartışma alanıdır. Bununla birlikte gemilerden kaynaklı kirlilik çok sayıda araştırmacının dikkatini çekmiştir. Araştırmacılar tarafından kirliliğe neden olan maddeler ve kirliliğin farklı boyutları hakkında birçok çalışma literatüre kazandırılmıştır (Goerlandt & Montewka, 2015). Özellikle tankerlerden kaynaklı petrol kirliliği alanında yoğunlaşan araştırmalar dikkat çekicidir (Chiri vd., 2019; Goerlandt vd., 2019; Asif vd., 2022). Bunun yanı sıra deniz kirliliği yalnızca tanker kazalarından değil, diğer gemilerin (dökme yük, genel kargo, yolcu vb.) kazalarından da kaynaklanabilmektedir. Gemiler taşıdıkları yakıtlar nedeniyle de potansiyel kirletici olarak görülebilirler (Asif vd., 2022; Zhong vd., 2023). Bu nedenle bu çalışmada yalnız tankerlerden değil diğer gemilerden kaynaklanan deniz kirliliği kazaları da incelenmiştir.

Çalışma kapsamında 1990-2021 yılları arasında gerçekleşen ve kirlilik ile sonuçlanan 161 adet deniz kaza raporu analiz edilmiştir. Çalışmada deniz kazası sonrası oluşan kirlilik detaylı bir şekilde analiz edilerek, kirlilik oluşum sürecinde etkili olan değişkenler irdelenmiştir. Araştırmada hem nicel hem de nitel metotlar kullanılarak, kirliliğin etkileri ve boyutunun doğru ve eksiksiz olarak belirlenmesi amaçlanmıştır.

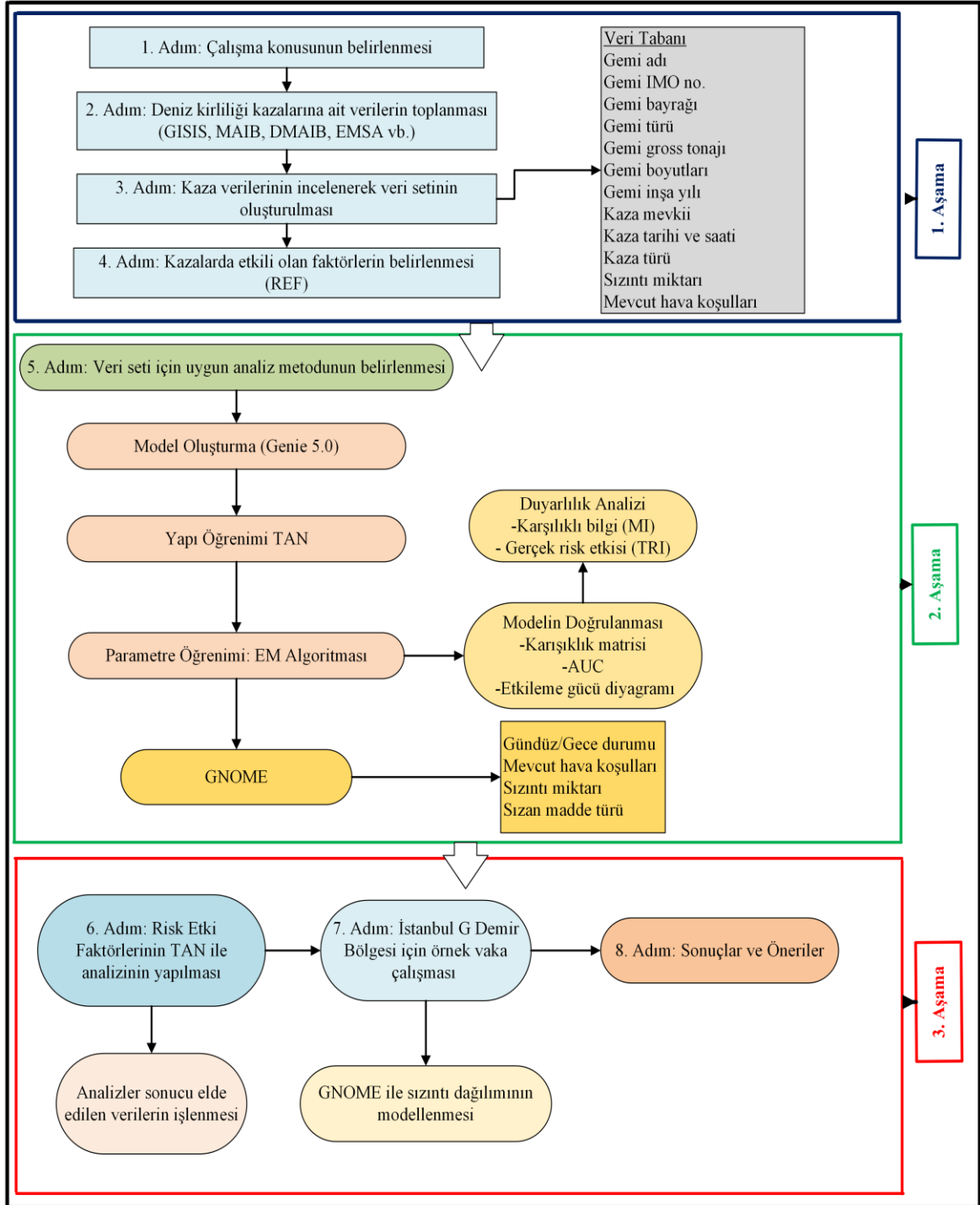
Bayes Ağı ile REF'ler arasındaki etkileşimin ortaya konulması amaçlanmış, oluşabilecek riskler ve etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Klasik Bayes Ağı'nda uzman görüşlerinin kullanılması nedeniyle objektif sonuçlar elde etmek oldukça zordur (Zhong vd., 2023). Bu nedenle çalışmada veriye dayalı bir yöntem olan TAN'ın kullanılmasına karar verilmiştir. TAN'nın oluşturulmasında hem modellemenin hem de matematiksel işlemlerin tutarlı ve hızlı bir şekilde yapılması amacıyla Bayes Fusion Genie 5.0 Akademik Bayes yazılımı kullanılmıştır (BayesFusion, 2024). Kaza veri setinde bulunan veriler programa doğrudan girilmiştir. Kurulan ağın güvenilirliği E-M Algoritmalarının yürütülmesiyle sağlanmıştır. Ağın güvenilirliği için karışıklık matrisi ve buna bağlı olan bazı prosedürler kullanılmıştır. Ek olarak kurulan ağın hassasiyet analizi de birden fazla yöntemin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Program kullanılarak farklı kaza senaryoları denenmiş

ve kirliliğin boyutları gözlemlenmiştir. Böylelikle kirlilik üzerindeki değişkenlerin sıralanması amaçlanmıştır.

TAN modeline dayalı kurulan kaza oluşum ağının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar İstanbul Boğazı Güney Girişi Demirleme Sahası G Bölgesi özelinde bir vaka çalışması için kullanılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar ışında gerekli olan veriler GNOME yazılımına girilmiş ve İstanbul Boğazı Güney Girişi G kirliliğinin ve boyutunun tahmin edilebilirliğini artırmak ve bölgede oluşabilecek kirlilikle mücadele adımlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Demirleme Sahası'nın petrol sızıntı haritası çıkarılmıştır. Literatürde özellikle İstanbul Boğazı özelinde yapılan benzer çalışmalar mevcuttur (Köse vd., 2003; Başar vd., 2006; Uğurlu vd., 2016). Buna rağmen G Demirleme Sahası'nın 5 Ocak 2023 tarihinde tehlikeli yük taşıyan gemilerin demirleme ve bekleme sahası olarak atanması nedeniyle bu bölge özelinde yapılan detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle çalışmada G demirleme bölgesinde meydana gelebilecek bir petrol kirliliği kazasının analizi yapılmıştır.

İstanbul Boğazı'ndan kuzeye hareket edecek ve kuzeyden gelip ikmal işlemlerini gerçekleştirecek tankerlerin bekleme sahası olan G bölgesi demirleme sahası yoğun gemi trafiğine maruz kalmaktadır. G demirleme bölgesinde meydana gelecek petrol sızıntılarının etkileri oldukça yıkıcı olabilir. Bu bölgede yapılacak petrol kirliliği analizi güncel risklerin saptanması, çağın getirmiş olduğu yenilikçi uygulamaları içine alan güncel tedbirlerin sunulması ve mevcut emniyet tedbirlerinin gözden geçirilmesi oldukça önemlidir. Volgoneft-248 tanker kazası, geçmişte bu bölge yakınlarında gerçekleşmiş ve çevre felaketiyle sonuçlanmıştır. Volgoneft-248 tankeri, 4.000 tondan fazla ağır yakıt (HFO) yüküyle 27 Aralık 1999 tarihinde İstanbul Boğazı'nı geçmiş ve yükünü etmek için Ambarlı açıklarına demirlemiştir. 29 Aralık 1999 tarihinde sabah saatlerinde 7/8 kuvvetindeki güney yönlü rüzgârların hâkim olduğu fırtına nedeniyle demir taramış ve karaya oturmuştur. Tankerin baş tarafı yaklaşık 30 metrelik derinlikte batarken kış kısmı ise İstanbul'un Menekşe kıyılarında karaya oturmuştur. Başlangıçta tankerden 1.300 ton petrol denize dökülmüştür. Bu sızıntı nedeniyle yaklaşık beş kilometrelik kıyı şeridi etkilenmiş, yollar, balıkçı barınakları ve kıyı yapıları da petrol kirliliğinden ciddi şekilde zarar görmüştür. Temizleme çalışmaların dört aydan fazla sürmüştür. Ayrıca batan pruva bölümünde kalan petrol 2000 yılının yazına kadar sızmaya ve denizi kirletmeye devam etmiştir (Otay & Yenigün, 2000).

Oluşturulan kaza ağı, ilgili değişiklikler yapılarak diğer deniz sahalarına da uyarlanabilir. Böylelikle daha tutarlı sonuçlarla bu bölgelerde oluşabilecek kirliliğin tahmini için kullanılabilir. Çalışma birbirini takip eden üç aşamadan oluşmaktadır. Çalışmanın aşamalarını takip edebilmek amacıyla akış şeması aşağıda verilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Çalışmanın akış şeması

2.2. Veri Setinin Oluşturulması

Çalışmanın veri seti oluşturulurken literatürde çok sayıda araştırmada kullanılan ve güvenilirliğini kanıtlamış ATSB, BMA, EMCIP, EMSA, JTSB ve MAIB gibi ulusal ve uluslararası kaza veri tabanlarından yararlanılmıştır. İlk aşama olan veri setinin oluşturulmasında, öncelikle GISIS kaza veri tabanı araştırma konusu ve zaman sınırlamasına bağlı olarak taranmış ve 4.318 kaza verisine ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra MAIB kaza veri tabanından 400 adet kaza raporu, ATSB'den 375 adet kaza raporu, MCIB'den 256 adet kaza raporu, EMCIP'den 191 adet kaza raporu, BSU'den 200 adet kaza raporu, TAIC'den 236 adet kaza raporu, BMA'dan 75 adet kaza raporu, JTBS'den 106 adet kaza raporu ve NTBS'den 380 adet kaza raporu elde edilmiştir. İncelenen bu kaza veri tabanlarından çalışmanın kapsamına uygun, deniz kirliliği ile ilişkili toplam 161 adet kaza raporuna ulaşılmıştır.

Her bir kaza raporu detaylı olarak incelenmiştir. Kaza raporlarından elde edilen veriler düzenlenerek Microsoft Excel tabanlı bir veri seti oluşturulmuştur. Kaza veri seti atmosferik ve meteorolojik bilgiler, kaza yeri, kaza zamanı gibi kirliliğin oluşumunu ve boyutunu etkileyen değişkenlerden oluşmaktadır. Ayrıca gemi boyutları, inşa yılı, gemi türü gibi kazada etkili olan demografik özellikleri de içermektedir.

2.3. Ağaç Artırılmış Naif Bayes (TAN) Ağı'nın Oluşturulması

Çalışmanın ikinci aşamasında veri setine uygun analiz metodu araştırılmış ve Bayes ağlarının kullanılması uygun görülmüştür. Bayes ağı kullanılan çalışmalar çoğunlukla veri toplama, değişken tanımlama, yapı öğrenme, model doğrulama ve duyarlılık analizi olmak üzere birkaç belirlenmiş adımla yürütülmektedir (Yang vd., 2021). Bu çalışmada da metodoloji bölümü benzer şekilde veri tabanı oluşturma, model oluşturma, model doğrulama ve model çıktısı olmak üzere birbirini takip eden adımlardan oluşmaktadır. BN yapısı öğrenimi, ağı oluşturmak amacıyla kullanılır.

Diğer veri odaklı yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, TAN modelinin BN yapı öğreniminde daha doğru sonuçlar ortaya koyduğu kanıtlanmıştır (Friedman vd., 1997). TAN yöntemi subjektif çıkarımlardan kaçınabilir, farklı REF'ler arasındaki nedenleri keşfedebilir ve risk tahmin doğruluğunu geliştirebilir (Li vd., 2023). TAN yapısında kullanılmak üzere belirlenen REF'ler deniz taşımacılığının emniyetini etkileyen faktörler olarak

tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, oluşturulan deniz kaza veri tabanına dayanarak, ilgili literatür ve IMO'nun mevcut deniz kazası kayıtları kullanılarak TAN analizinde kullanılacak REF'lerin belirlenmesi ve tanımlanması yapılmıştır. Daha sonra REF'ler, kaza türü, gemi tipi, gemi yaşı, gemi tonajı, gemi boyu, görüş, kaza zamanı, kaza bölgesi, kaza ayı, kirlilik boyutu ve kirliliğe sebep olan madde olarak sınıflandırılmıştır. TAN modelinde kullanılan bu değişkenlerin ve sınıf değişkeninin detayları aşağıdaki gibidir (Tablo 2).

Tablo 2. Veri setine dayalı Risk Etki Faktörleri

REF NO	Gemiyle İlgili Faktör (Düğüm)	REF Tanımı	Durum
1	Kirlilik boyutu	Küçük sızıntı (<7), Orta sızıntı (7<700), Büyük sızıntı (≥ 700)	1,2,3
2	Kaza türü	Çatma/Çatışma, Yangın/Patlama, Karaya Oturma, Batma ve diğer	1,2,3,4,5
3	Gemi tipi	Dökme yük, Genel kargo, Kimyasal tanker, Konteyner, Petrol tankeri, Ro-Ro, Yolcu ve diğer gemiler	1,2,3,4,5,6,7,8
4	Gemi yaşı	0-5, 6-10, 11-15, 16-20 ve >20	1,2,3,4,5
5	Gemi Boyutu	<5000, 5000-10.000, >10.000	1,2,3
6	Gemi Boyu	<100, 100-150, >150	1,2,3
7	Hava Durumu	Sakin, Orta, Ağır	1,2,3
8	Görüş	İyi, Orta, Kötü	1,2,3
9	Kaza zamanı	Gündüz, Gece	1,2
10	Kaza bölgesi	Açık deniz, Boğaz, Kanal, Kıyısız, Körfez, Liman	1,2,3,4,5,6
11	Ay	Ocak, şubat, mart, nisan, mayıs, haziran, temmuz, ağustos, eylül, ekim, kasım, aralık	1,2,3,4,5,6,7,8, 9,10,11,12
12	Kirletici madde	FO, DO, GO, Ham petrol, DO-FO	1,2,3,4,5

(1) Kirlilik Boyutu (sınıf değişkeni)

Dökülme miktarı, kaza sonucunda meydana gelen ve kirliliğe neden olan petrol sızıntısı miktarı olarak tanımlanmaktadır. Bu faktör bir sınıf değişkenidir. Bu değişkenin tanımlanmasında ITOPF sınıflandırması dikkate alınmıştır. Sınıflandırma küçük sızıntı (<7), orta sızıntı (7>700) ve büyük sızıntı (≥ 700) olmak üzere 3 duruma ayrılmıştır (ITOPF, 2024).

(2) Kaza Türü

Kaza türleri, EMSA gemi kazaları sınıflandırması dikkate alınarak toplam 5 ana kaza tipini (çatma/çatışma, yangın veya patlama, karaya oturma, batma ve diğer) ifade eden ana kategoriler halinde birleştirilmiştir (EMSA, 2023; Weng & Yang, 2015).

(3) Gemi Tipi

Bilindiği üzere gemi tipleri ayrıntılı olarak sınıflandırılmaktadır. Çalışmayı kolaylaştırmak açısından gemi tipleri, 8 sınıf altında (dökme yük, genel kargo, kimyasal tanker, konteyner, petrol tankeri, Ro-Ro, yolcu ve diğer gemiler) birleştirilmiştir (Ma vd., 2024; Zhang vd., 2013).

(4) Gemi Yaşı

Gemi yaşı, gemi kazalarının oluşumunu etkileyen önemli bir faktördür. Gemi ne kadar eskiyse, yapısal arıza nedeniyle (örneğin, dümen veya dümene bitişik parçalarda arıza) bir kazaya karışma olasılığı o kadar yüksek olduğu tespit edilmiştir (Papanikolaou & Eliopoulou, 2008). Literatürdeki benzer çalışmalar incelenerek gemi yaşları hesaplanmış ve 0-5, 6-10, 11-15, 16-20 ve 20'den büyük olarak sınıflandırılmıştır (Zhang vd., 2013; Fan vd., 2020).

(5) Gros Tonaj

Gros tonaj (GT), bir geminin iç hacmini temsil eden bir ölçü birimidir. Gemi boyutunu belirtmek için GT kullanılmış ve 5.000'den küçük, 5.000-10.000, 10.000'den büyük olmak üzere 3 kategoriye ayrılmıştır (Yıldız vd., 2022).

(6) Gemi Boyu

TAN Ağının oluşturulmasında kullanılan diğer bir değişken gemi boyudur. Bu değişken 100 metreden kısa, 100-150 metre arası ve 150 metreden uzun olacak şekilde 3 kategoriye ayrılmıştır (Yıldız vd., 2022).

(7) Hava Durumu

Yapılan literatür taramasında hava durumunun etkili bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak kirliliğin yayılmasında etkili olan bu faktör çalışma sınırlarında sakin, orta ve ağır olmak üzere 3 sınıfa ayrılmıştır. Bu ayrımada veri setinin oluşturulmasında kullanılan kaza raporları etkili olmuştur. Tayfunlar, ağır denizler, deniz buzu gibi benzer özelliklere sahip kötü deniz koşulları birleştirilmiştir (Ma vd., 2024).

(8) Görüş Durumu

Görüş durumunun kazalar üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. Kaza esnasında ve kaza sonrasında kirlilikle mücadele aşamasında görüş durumunun önemi dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada görüş durumu iyi, orta ve kötü olmak üzere 3 durum şeklinde incelenmiştir (Balmat vd., 2009).

(9) Kaza zamanı

Petrol sızıntısına neden olan kazanın meydana gelme zamanı, mevsimden bağımsız olarak gündüz (07:00/18:59) ve gece (19:00/06:59) olmak üzere iki duruma ayrıldı. Kazanın meydana gelme zamanı da diğer bazı çalışmalarda benzer şekilde tanımlanmıştır (Li vd., 2023).

(10) Ay

Kirlilik kazanın meydana geldiği ayı ifade etmektedir. 12 ayın her biri oluşturulan TAN modeline değişken olarak girilmiştir (Ma vd., 2024; Cao vd., 2023).

(11) Kaza Bölgesi

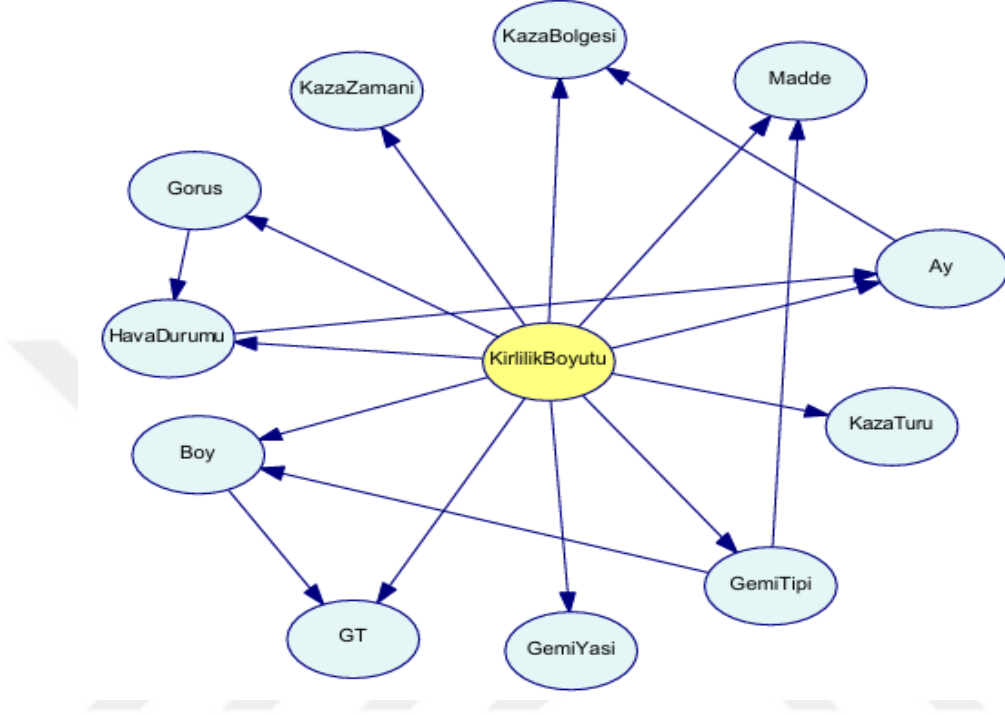
Kaza bölgesinin özellikleri, kazaların meydana gelmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Deniz kazalarının daha çok çatma/çatışma riskinin yüksek olduğu kıyı sularında gerçekleştiği görülmektedir (Chang & Park, 2019). Kazanın meydana geldiği yerdeki su yolunun türünü (Tuna Nehri, Panama kanalı, vb.) toplam 6 ana kategori (açık deniz, boğaz, kanal, kıyısız, körfez, liman) olacak şekilde sınıflandırılmıştır (Çakır vd., 2021). Açık deniz, 12 deniz mili ve daha uzak, kıyısız ise kıyıdan 12 deniz miline kadar olan mesafeler olarak tanımlanmaktadır (Ulusçu vd., 2009).

(12) Kirletici madde

Deniz kirliliğine yol açan maddeler olarak sadece rafine petrol ürünleri (motorin, fuel oil, benzin vb.) ve ham petrol çalışmaya dahil edilmiştir. Kimyasal, çöp, petrol dışı ürünler vb. döküntü türleri dikkate alınmamıştır. Diğerlerine göre çok daha büyük bir ticaret hacmine sahip oldukları için bu iki türe odaklanılmıştır (UNCTAD, 2020). Çalışmada kirletici maddeler FO, DO, GO, LO, Ham petrol ve DO-FO olarak sınıflandırılmıştır.

Yukarıda açıklanan ve Microsoft Excel’de düzenlenen değişkenler, Genie 5.0 akademik programında kullanılmak amacıyla CSV uzantısına çevrilmiştir. Düzenlenen bu dosyanın Genie 5.0 programına girilmesiyle TAN modeli oluşturulmuştur (Şekil 6). Öncelikle Sınıf Değişkeni (Ebeveyn Düğüm) olarak ‘‘Kirlilik Boyutu’’ belirlenmiş ve Eşitlik 5’e dayalı, Genie programındaki ‘‘yeni ağ öğrenme (learning new network)’’ fonksiyonu kullanılarak TAN geliştirilmiştir (Ma vd., 2024). Geliştirilen TAN, 17 kenarla birbirine bağlı 12 düğümden oluşmaktadır. Programa girilen REF’ler arasındaki çocuk-ebeveyn düğüm ve kenar ilişkileri Şekil 6’da gösterildiği gibidir. Böylelikle her REF’in sınıf değişkeniyle olan ilişkisi ve REF’ler arasındaki bağımlılıklar kullanılarak, sınıflandırma yapılırken olasılıklar hesaplanmıştır. Ayrıca REF’ler arasında ilişkiler bulunduğunda, bu ilişkiler doğrudan modele dahil edilmiştir. Bu durum, çalışmanın doğruluğunun artmasında

da etkilidir. Çalışma için TAN ağı oluşturulduktan sonra ağın uygunluğunu, doğruluğunu, güvenilirliğini ve tahmin performansını ölçmek amacıyla birbirinden farklı işlemler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Çalışmanın TAN düğümleri şeması

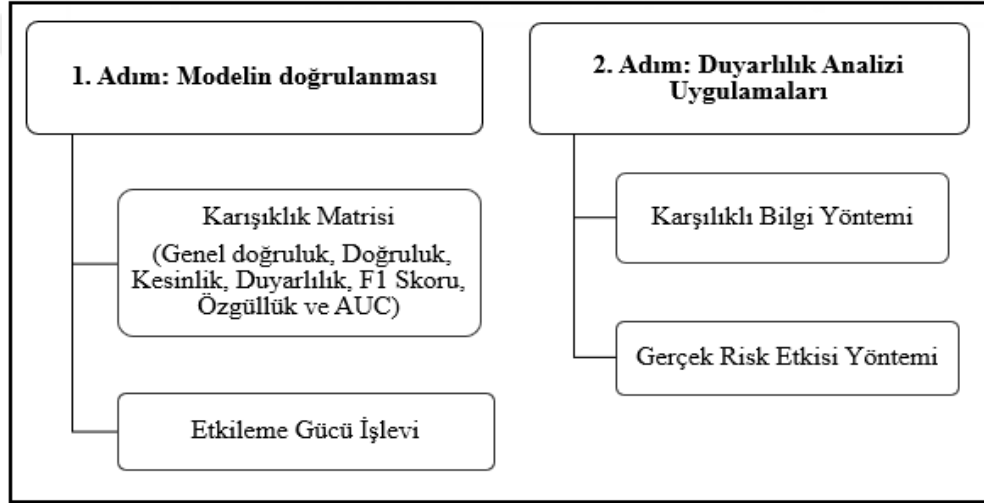
2.4. TAN Modelinin Doğrulanması ve Duyarlılık Analizi

Çalışmada oluşturulan TAN modelinin doğrulanması analiz sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği için oldukça önemlidir. Bu nedenle modelin doğruluğunu kanıtlamak için daha önce açıklanan ve literatürde sıklıkla kullanılan birkaç farklı yöntem tercih edilmiştir (Fan vd., 2020; Wang vd., 2022; Cao vd., 2023; Li vd., 2023; Ma vd., 2024). Bu yöntemler Karışıklık Matrisi, Etkileme Gücü İşlevi ve duyarlılık analizleridir. İlk olarak oluşturulan TAN modelinin doğruluğunu ölçmek amacıyla Karışıklık Matrisi ve Etkileme Gücü İşlevi analizleri gerçekleştirilmiştir. 2. Adımda ise Karşılıklı Bilgi ve Gerçek Risk Etkisi yöntemleri kullanılarak duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Karışıklık Matrisi birbirini takip eden bir dizi hesaplamadan oluşmaktadır. Hesaplamalar için kullanılacak bilgiler çalışma için oluşturulan TAN modeline özel ve doğrudan Genie 5.0 akademik yazılımının içerisinde elde edilmiştir (Tablo 3). Diğer bir

yöntem olan Etkileme Gücü Diyagramı ise REF'lerin birbirleri ve sınıf değişkeni arasındaki bağımlılığının anlaşılmasını sağlayan bir yöntemdir.

Duyarlılık analizi her bir REF'in sınıf değişkeni üzerindeki etki derecesini belirlemek için takip edilen prosedürlerdir. Bu çalışmada, duyarlılık analizi için Karşılıklı Bilgi (MI) ve Gerçek Risk Etkisi (TRI) yöntemleri kullanılmıştır. Karşılıklı Bilgi Yönteminde kullanılmak üzere gerekli veriler Norsys Netica 7.01 yazılımından elde edilmiştir. Gerçek Risk Etkisi ise yine her bir REF'in sınıf değişkeni üzerindeki gerçek risk etkisini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Cao vd., 2023; Li vd., 2023). TAN modelinin doğrulanma aşamaları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. TAN modelinin doğrulanma ve duyarlılık analizi aşamaları

2.4.1. Karışıklık Matrisi Kullanılarak Modelin Doğrulanması

Bu aşamada kurulan TAN'ın doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak adına belirli adımlar gerçekleştirilmiştir. Modelin doğrulanması için E-M algoritmaları kullanılmıştır. E-M algoritmaları düğüm değişkenleri arasındaki bağımlılık ilişkisini ve koşullu olasılığı belirlemek için Genie 5.0 programı tarafından yürütülür (Ma vd., 2024). Kurulan TAN'nın doğruluğunun sağlanması için çalışmanın veri seti IBM Statistical Package for the Social Sciences SPSS Modeler yazılımı kullanılarak farklı oranlarda (%60-40, %65-35, ..., %80-20 gibi) rastgele eğitim ve test veri dosyalarına ayrılmıştır (Hanninen, 2014; Çakır vd., 2021). Daha sonra, Genie 5.0 yazılımıyla bölünmüş her bir veri seti ile yapısal modeller

oluşturulmuştur. Her modele bir dizi performans testi uygulanmış ve en yüksek performans değerine sahip model belirlenmiştir.

Genel Doğruluk hesaplamaları bir modelin performansını ölçmek için birçok araştırmacı tarafından tercih edilen bir yöntemdir. Ancak tek başına yeterli görülmemesi nedeniyle tamamlayıcı hesaplamalar yapılmaktadır (Wang vd., 2022). Bu nedenle bu çalışmanın doğruluğu sağlamak için Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F1 Skoru ve Özgüllük prosedürleri gerçekleştirilmiştir (Kaptan & Bayazıt, 2024). Bu işlemlere ait eşitliklerde kullanılan veriler karışıklık matrisine dayanmaktadır. Ayrıca istatistikte kullanılan önemli bir değerlendirme yöntemi olan Eğrinin Altındaki Alan (AUC) yöntemi de modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak amacıyla kullanılmıştır (Cao vd., 2023). AUC değeri Alıcı İşletme Karakteristiği Eğrisi (ROC) ile birlikte kullanılır ve bu eğrinin altında kalan alanı temsil eder. AUC, homojen olmayan veri setlerinde ve model karşılaştırmalarında kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca modelin genel performansını ölçmek için sıklıkla kullanılır (Xiao vd., 2017). AUC değeri, 0 ile 1 arasında yer alan bir değeri temsil etmektedir. Bu değer 1'e yaklaşması modelin iyi derecede tahminler yaptığını ifade etmektedir (Wang & Yang, 2018). Tam tersi durum ise modelin iyileştirilmesi gerektiğini ifade eder. Modele ait AUC değerleri Genie programından elde edilmiştir.

Çalışmaya ait Karışıklık Matrisinden (Tablo 3) elde edilen veriler kullanılarak bu orana ait değerler hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar için daha önce verilen eşitlikler (Eşitlik: 9, 10, 11,12 ve 13) kullanılmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda çalışmada %75-25 oranıyla ayrılan eğitim ve test verilerinin en yüksek performans değerine sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada bu oranla oluşturulan TAN modeli kullanılmıştır. Böylelikle oluşturulan ağın güvenilir olduğu ispatlanarak çalışma için ağın uygunluğu doğrulanmıştır.

Tablo 3. Çalışmaya ait karışıklık matrisi

		Tahmin Edilen		
		Büyük sızıntı	Orta sızıntı	Küçük sızıntı
Gerçek	Büyük sızıntı	8	0	3
	Orta sızıntı	0	7	0
	Küçük sızıntı	2	1	12

2.4.2. Etkileme Gücü İşlevi ile REF'ler Arasındaki Korelasyonun Ölçülmesi

Etkileme gücü, iki ya da daha fazla değişken arasındaki ya da değişkenin sonuç üzerindeki etkisinin ölçülmesi olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle değişkenler arasındaki ilişkinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Ma vd., 2024). Etkileme Gücü Jensen-Shannon Ayrışması olarak da bilinen algoritmaya dayanmaktadır ve genellikle istatistiksel analizler ile ölçülmektedir (Menéndez vd., 1997). Geliştirilen TAN modelinde sınıf değişkeni, REF'ler ve farklı REF'ler arasındaki korelasyonun ölçülmesi ve gücünün tanımlanması amacıyla kullanılmıştır.

Bu çalışmada Genie yazılımındaki "Etkileme Gücü" işlevi kullanılmıştır. Doğrudan yazılımdan elde edilen diyagramda REF'ler arasındaki ilişki okların kalınlıkları ile gösterilmiştir. REF'ler arasındaki oklar ne kadar kalınsa aralarındaki korelasyon değeri de o kadar güçlüdür (Ma vd., 2024).

2.4.3. TAN Modeli Duyarlılık Analizi Uygulamaları

Duyarlılık analizi, değişkenlerin bağımlı oldukları sınıf değişkeni üzerindeki etkilerini göstermek için kullanılan önemli bir uygulamadır (Li vd., 2024). Bununla birlikte ilgili değişkenlerle ilişkili belirsizlikleri ölçmek ve modelin doğruluğunu test etmek amacıyla kullanılmaktadır (Li vd., 2023). Duyarlılık analizi, girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi anlamak, model tarafından üretilen ayrıntılı sonuçları incelemek için kullanılan yararlı bir araçtır (Wu vd., 2015).

Bu çalışmada, REF'lerin sınıf değişkeni üzerindeki etki derecesini belirlemek için Karşılıklı Bilgi (MI) ve Gerçek Risk Etkisi (TRI) yöntemleri kullanılmıştır (Alyami vd., 2019; Liang vd., 2022). Böylece çalışma modelinde yer alan düğümlerinden hangilerinin hedef düğüm üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ve aralarındaki bağımlılık ilişkisi ortaya çıkartılmıştır (Kamal & Çakır, 2022). Karşılıklı bilgi, iki rastgele değişken arasındaki karşılıklı bağımlılığı ve etki gücünü tespit etmeye yarayan bir yöntemdir (Wang & Yang, 2018). Diğer bir deyişle değişkenler arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Değişkenler arasındaki MI değeri ne kadar büyükse aradaki bağımlılık da o kadar büyüktür (Ma vd., 2024). Bu değer azaldıkça aradaki ilişki azalır ya da hiç yoktur (Yang vd., 2021). Karşılıklı Bilgi, duyarlılık analizi yöntemi olarak birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Fan vd.,

2022; Li vd., 2023; Kaptan & Bayazıt, 2024; Ma vd., 2024). Karşılıklı bilgi aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmaktadır (Cao vd., 2023).

$$I(C, s_i) = - \sum_{C,i} P(C, s_{ij}) \log_b \frac{P(C, s_{ij})}{P(C)P(s_{ij})} \quad (14)$$

Burada $I(C, s_i)$, sınıf değişkeni ile i 'inci değişken arasındaki karşılıklı bilgiyi ifade etmektedir. C ise sınıf değişkeni, $P(C, s_{ij})$, C ile s_i arasındaki olasılık dağılımını temsil etmektedir. S_i , i 'inci REF, s_{ij} ise i 'inci REF'in j 'inci durumudur. Bu çalışmada Karşılıklı Bilgi hesaplamaları için Norsys Netica 7.01 yazılımı kullanılmıştır. Çalışma için oluşturulan TAN modeli Netica 7.01 yazılımına birebir aktarılmış ve bu yazılımda "Duyarlılık Bulguları" (sensitivity findings) işlevi kullanılarak hesaplama tamamlanmıştır.

Gerçek risk etkisi, bir düğüme ait değişkenlerin sınıf değişkeni üzerindeki risk etkisini ölçmek için kullanılan bir duyarlılık analizi yöntemidir (Alyami vd., 2019). TAN modeli kullanılarak REF'lerin Yüksek Risk Etki Değeri (HRI) ve Düşük Risk Etki Değeri (LRI) hesaplanır. Burada HRI, bir düğüme ait her bir REF değerinin gerçekleşme olasılığının %100 yapılmasıyla, sınıf değişkeni üzerinde en yüksek etkiye sahip REF'in olasılık değerinin başlangıç olasılık değerinden farkının alınmasıyla hesaplanan olasılık değeri olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde LRI, bir düğüme ait her bir REF değerinin gerçekleşme olasılığının %100 yapılmasıyla, sınıf değişkeni üzerinde en az etkiye sahip REF'in olasılık değerinin başlangıç olasılık değerinden farkının alınmasıyla hesaplanan olasılık değeri olarak şeklinde ifade edilebilir. HRI ve LRI değerleri hesaplandıktan sonra bu iki değer ortalaması alınarak TRI değeri elde edilir. Bu çalışmada TRI, bir değişkenin kirlilik boyutu üzerindeki etki derecesini belirlemek için kullanılmıştır. Özellikle, sınıf değişkenine ait her değişkenin ilk satırı başlangıç olasılık değerlerini temsil eder ve sonraki satırlar değişkenin her bir durumu sırasıyla %100 gerçekleşme olasılığına ulaştığında farklı senaryoları temsil eder. Uygulama aşamasında öncelikle kirlilik boyutu üzerinde önemli etkiye sahip olan REF'lerin olasılık değerleri sırasıyla %100'e getirilir. Daha sonra bu düğüme ait HRI'yi elde etmek için kirlilik boyutu değişkeninin ilk olasılık değeri ile en büyük olasılık değeri arasındaki fark bulunur. Benzer şekilde LRI'yi elde etmek için kirlilik boyutu değişkeninin ilk olasılık değeri ile en düşük olasılık değeri arasındaki fark hesaplanır (Cao vd., 2023).

Bu çalışmada MI'den elde edilen en yüksek bağımlılık değerine sahip beş düğümün Kirlilik boyutu düğümü üzerindeki etki derecelerini karşılaştırmak için TRI değerleri

hesaplanmıştır. Bu duyarlılık analizi yönteminde, düğümün TRI değeri ne kadar büyükse, kaza boyutu düğümü üzerindeki etkisi de o kadar büyük olur.

2.5. TAN Modeli Vaka Çalışması

Deniz ortamına dökülen petrol ve türevleri çevre, insan, deniz ortamı ve doğal kaynaklar üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Xing & Zhu, 2022). Daha önce de bahsedildiği üzere bu ve benzer nedenlerle petrol sızıntılarını anlamak oldukça önemlidir (McGenity vd., 2012; Jin vd., 2019). Bir defada deniz ortamına en fazla miktarda petrol dökülmesine neden olan sızıntılar büyük boyutlu (≥ 700) sızıntılardır. Bu durum göz önüne alınarak büyük boyutlu sızıntıların gerçekleşmesinde etkili olan REF'lerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle TAN modeli vaka çalışmasında kaza sonucu meydana gelebilecek büyük sızıntılar ve bu sızıntıların gerçekleşmesinde en yüksek etkiye sahip olan REF'ler incelenmiştir.

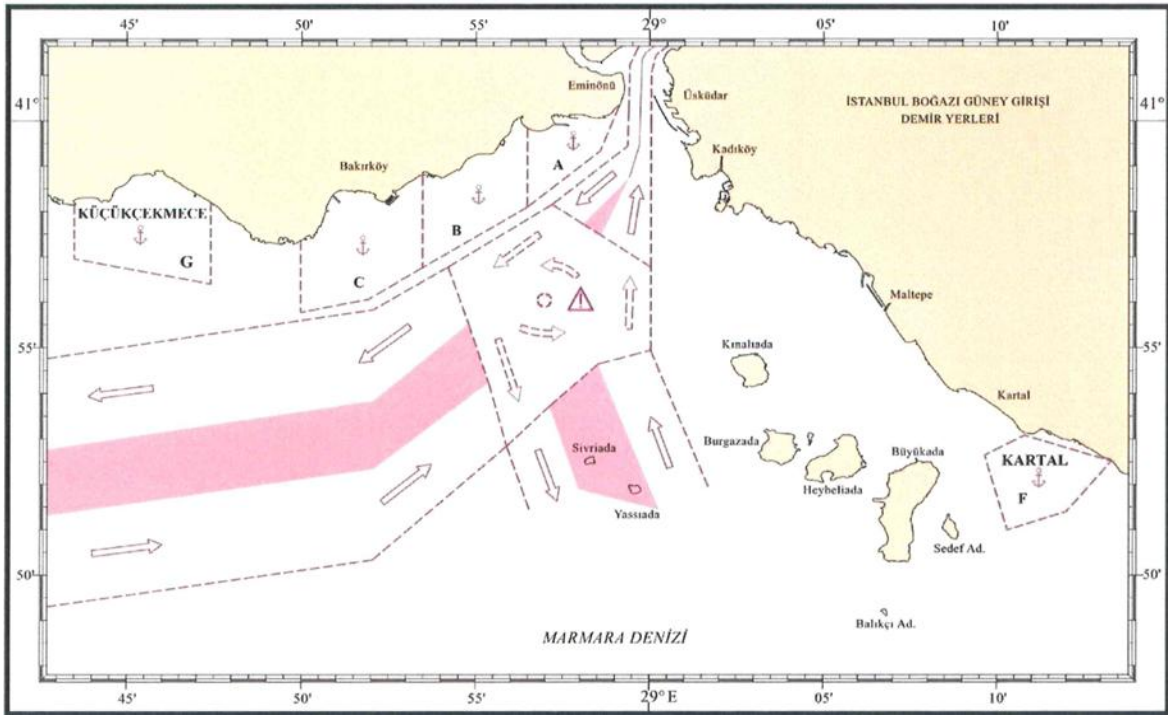
Büyük boyutlu sızıntı vakasının incelenmesinde çalışma için oluşturulmuş TAN modeli kullanılmıştır. Genie 5.0 akademik yazılımında TAN modelinde büyük boyutlu sızıntıların gerçekleşme değeri %100 yapılmıştır. Daha sonra TAN modelinde, sınıf değişkeni düğümünde (kirlilik boyutu) meydana gelen bu değişikliğin diğer düğümlerin REF değerleri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma veri setinden elde edilen TAN modeli ile büyük sızıntıların olasılık değerinin %100 olduğu durum karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Böylelikle büyük boyutlu bir sızıntının meydana gelmesinde en yüksek korelasyon değerine sahip REF'ler tespit edilmiştir. Yapılan bu vaka çalışması ile ağın uygun şekilde çalışıp çalışmadığı görülmüştür. Çalışmanın TAN modeli üzerinde senaryo uygulamaları yapılarak ağın çalışma şekli değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı senaryo çıktılarına dayanarak gerçekleşebilecek sızıntı olasılıkları hakkında tahminde bulunulabilir.

2.6. GNOME Modelinin Oluşturulması

Çalışmanın bu aşamasında TAN modelinden elde edilen çıktıların kirlilik dağılım simülasyonu için yüksek tahmin doğruluğuna sahip GNOME 1.3.10 modeli kullanılmıştır (Farzingohar vd., 2011; Balogun vd., 2021; Farzingohar vd., 2024). TAN analizi sonucunda her bir düğümün sınıf değişkeni (kirlilik boyutu) üzerinde en yüksek etkiye sahip olan REF'ler analiz edilmiştir. GNOME modeli analizleri için kullanılacak bu REF'ler orta

boyutta bir sızıntı, çatma/çatışma kazası, gündüz, iyi görüş ve sakın hava koşulları, kış ayları ve FO sızıntısı olarak tespit edilmiştir.

Denizcilik Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan Demirleme Sahalarına İlişkin Duyuru 5 Ocak 2023 tarihinde yürürlüğe girmiştir (DTO, 2024). Bu duyuru ile demirleme bölgelerinin sınırları ve özellikleri belirlenmiştir (Şekil 8). İstanbul Boğazı Güney Girişi G (Küçükçekmece) Demirleme Sahası tehlikeli yük taşıyan gemiler için belirlenmiş demirleme sahasıdır. Bu nedenle analiz sonucunda elde edilen değerler G Demirleme Sahası'nda oluşabilecek bir kirlilik kazasının simülasyonu için kullanılmıştır.



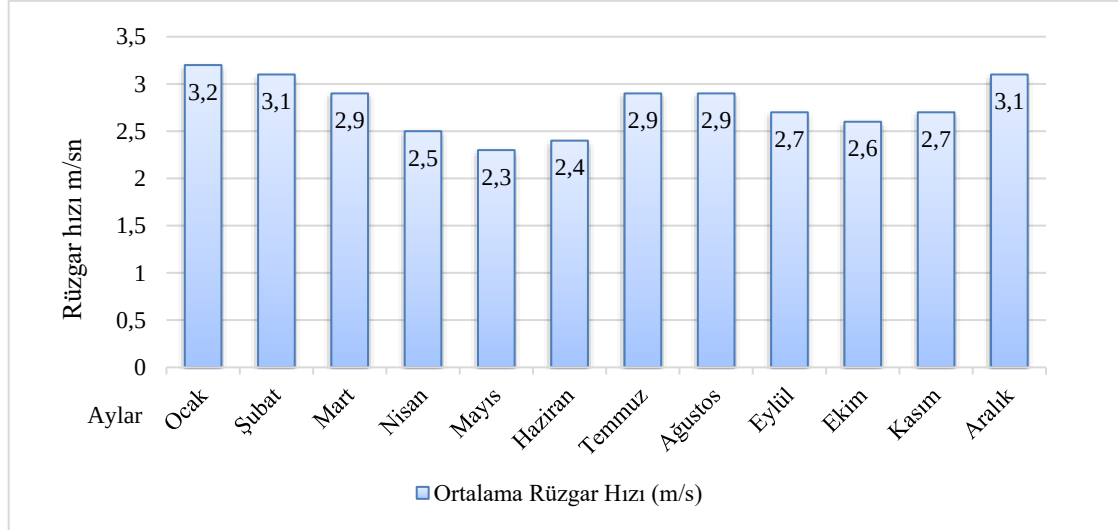
Şekil 8. İstanbul Boğazı Güney Girişi Demirleme Sahaları (UAB-KEGM, 2024).

GNOME programının doğru şekilde çalışması ve tahminleme yapabilmesi için TAN modeli çıktılarına ek olarak bölgeye ait akıntı yönü, rüzgâr yönü, rüzgâr hızı gibi bilgilerin de girilmesi oldukça önemlidir. Elde edilen tüm veriler GNOME modeli için uygun formatlar haline getirilmiştir. Belirlenmiş harita sınırları “.bna”, rüzgâra ait yön ve hız bilgileri “.wnd”, akıntıya ait bilgiler ise “.cur” formatında kaydedilmiştir. Sızıntı boyutunun orta ölçekli olması nedeniyle programa 500 MT FO değeri girilmiştir. Çalışmada kullanılan rüzgâr verilerine Florya Meteoroloji İstasyonundan ulaşılmıştır (ÇŞİDB-MGM, 2024). Bu veri seti 1937-2023 yılları arasında rüzgârların mevsimsel hız-yön ortalamalarına, ay bazında hızlarına ve yönlerine ait bilgileri kapsamaktadır (Şekil 9). Şekil 9’ da 1937-2023

tarih aralığında her aya ait ortalama rüzgâr hızları verilmiştir. GNOME modeline rüzgârın hızı 3,3 m/s, yönü ise NNE olarak girilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. 1937-2023 yılları arası ortalama rüzgâr hızı ve yönü (ÇŞİDB-MGM, 2024).

	İlkbahar (Mart-Nisan- Mayıs)	Yaz (Haziran- Temmuz-Ağustos)	Sonbahar (Eylül-Ekim- Kasım)	Kış (Aralık-Ocak- Şubat)
Hâkim Rüzgâr Yönleri	NE	NE	NE	NNE
Ortalama Rüzgâr Hızları (m/s)	2,6	2,9	2,7	3,3



Şekil 9. 1937-2023 yılları arası aylara göre ortalama rüzgâr hızı

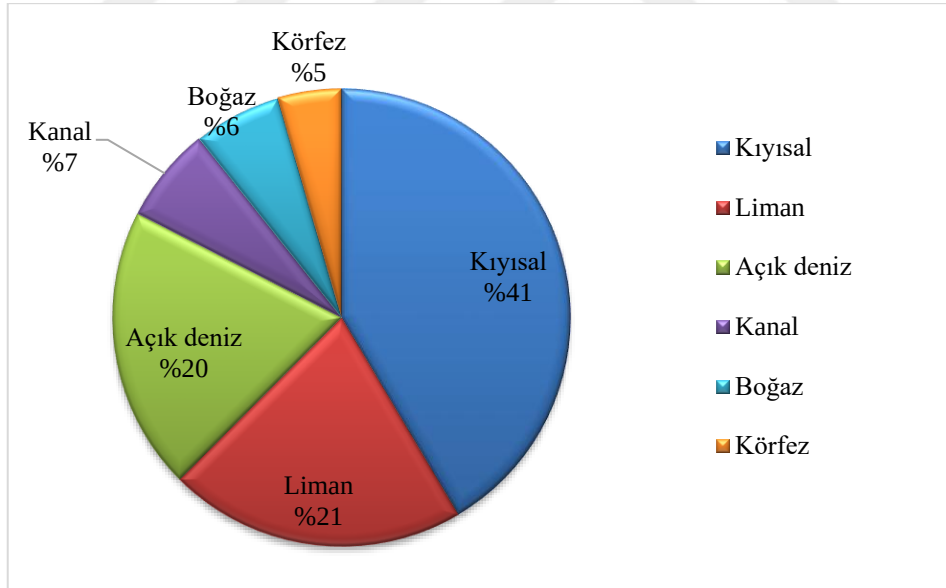
Modelde kullanılan diğer veri girdisi ise akıntıdır. Akıntı ile ilgili bilgiler ise Copernicus Deniz Çevresi İzleme Hizmeti (CMEMS) programından elde edilmiştir (Marine Copernicus, 2024). Avrupa Birliği tarafından desteklenen CMEMS, deniz ve okyanus çevresinin izlenmesine ve araştırılmasına olanak sağlayan bir programdır. CMEMS programından akıntılar, deniz suyu tuzluluk, sıcaklıkları gibi çevresel faktörler hakkında bilgi edinmek mümkündür. Denizcilik, iklim değişikliği ve balıkçılık gibi alanlar da programın sağladığı veri kaynağını kullanmaktadır (Le Traon vd., 2019). Tüm veriler kullanılarak 30 Aralık 2024 tarihinde G demirleme sahasında bir gemi kazası senaryosu gerçekleştirilmiş ve meydana gelen petrol sızıntısının 24 saatlik hareketi gözlemlenmiştir.

3. BULGULAR

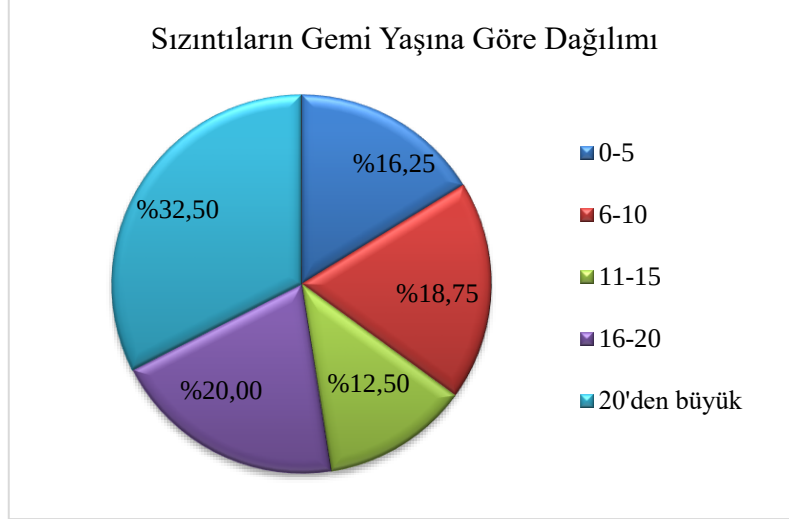
3.1. Kirlilik Kazalarına Ait Genel Bulgular

Bu çalışmanın temelini oluşturan kirlilik kazaları, 1990-2021 yılları arasında kaza araştırma kuruluşlarından elde edilen 161 adet deniz kaza raporunu içermektedir. Meydana gelen bu kazaların denizcilik sektörü ve çevre üzerinde yıkıcı etkilere sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada gerçekleşen kazalar sonucunda meydana gelen petrol sızıntılarının deniz çevresi için önemli ölçüde risk oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmada deniz kirliliği kazalarının %41,6 oranıyla kıyı sularında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Kıyı sularını sırasıyla %21 oranıyla liman ve %20 oranıyla açık deniz takip etmektedir. Deniz trafiği açısından yoğun olan kıyı suları ve gemilerin yükleme, bekleme gibi operasyonlarını gerçekleştirdiği liman bölgelerinin deniz kazalarına daha açık olduğu görülmektedir (Şekil 10).

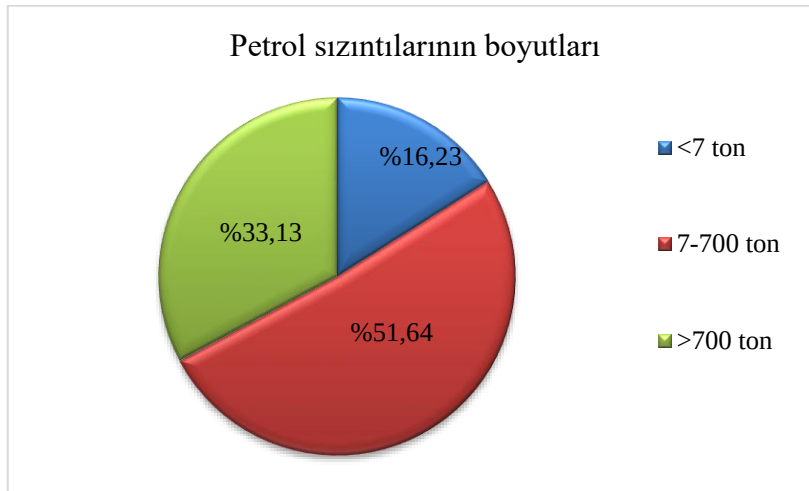


Şekil 10. Sızıntıların kaza bölgesine göre dağılımları



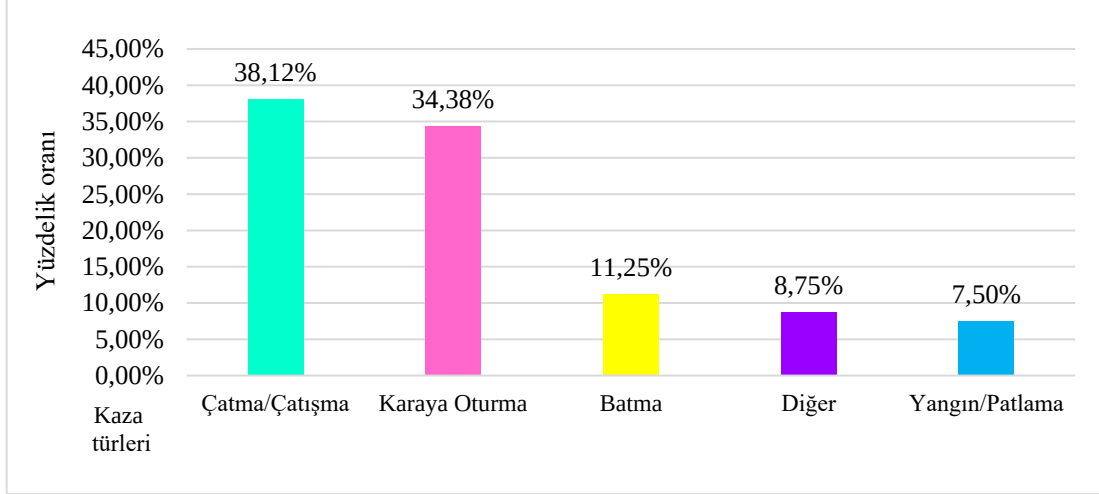
Şekil 11. Sızıntıların gemi yaşına göre dağılım oranları

Kaza veri setinden elde edilen verilere göre gerçekleşen petrol sızıntılarının gemi yaşına göre dağılımları Şekil 11’de verilmiştir. Deniz kazaları gemi inşa yılına göre incelendiğinde eski inşa gemilerde kaza oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Gemiler inşa yılına göre; 0-5, 6-10, 11-16, 16-20 ve 20 yaş üstü gemiler olarak sınıflandırılmıştır. Kaza sonucu deniz kirliliği görülme oranının 20 yaşından büyük gemilerde en fazla (%32,5), 11-15 yaş arası gemilerde ise en az (%16,25) olduğu görülmüştür. Deniz kazaları ile gemi yaşı arasında 20 ve 20 yaş altı gemilerde ise toplamda %67,5’dir (Şekil 11). Bu oranlar ışığında kirlilikle sonuçlanan deniz kazalarında gemi yaşı ve kaza oranı arasında doğru bir orantının olmadığı söylenebilir. Deniz kirliliği kazalarının boyutlarına göre dağılımı Şekil 12’de gösterilmiştir.



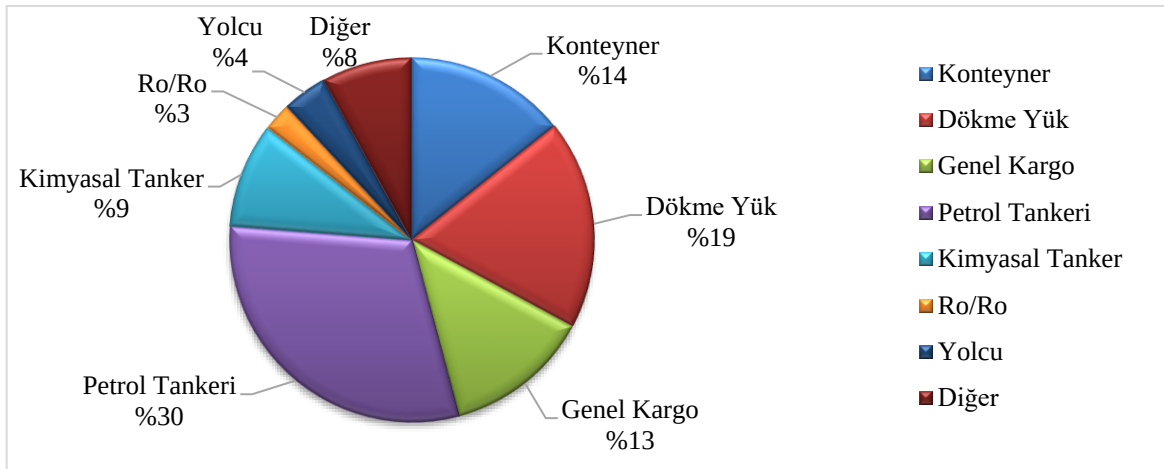
Şekil 12. Sızıntıların boyutlarına göre dağılım oranları

Sızıntı boyutları incelendiğinde ise %51,64 oranında orta ölçekli (7-700 ton) sızıntıların meydana geldiği görülmüştür. Şekil 12’ de verildiği üzere kaza sonucu deniz ortamına dökülen petrol ve türevleri oldukça önemli değerlere sahiptir. Deniz kirliliğine sebep olan deniz kazalarının kaza türlerine göre dağılımları Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 13. Sızıntıların kaza türlerine göre dağılım oranları

Deniz kirliliğine sebep olan deniz kazalarının kaza türlerine göre dağılımları incelendiğinde çatma/çatışma kazalarının en yüksek orana (%38,12) sahip olduğu görülmüştür. Çatma/çatışma kazalarını (62 adet) sırasıyla karaya oturma (55 adet), batma (18 adet) ve diğer kazalar (14 adet) takip etmektedir. Kirliliğe sebep olan kazaların gemi türüne göre dağılımı Şekil 14’de verilmiştir.



Şekil 14. Sızıntıların gemi türlerine göre dağılım oranları

Kirliliğe neden olan deniz kazaları kazaya karışan gemi türleri özelinde analiz edildiğinde petrol tankerlerinin %30 oranıyla ilk sırada olduğu tespit edilmiştir. Petrol tankerlerini (49 adet) sırasıyla dökme yük (30 adet) ve konteynerler (23 adet) takip etmektedir.

3.2. TAN Analizine Ait Bulgular

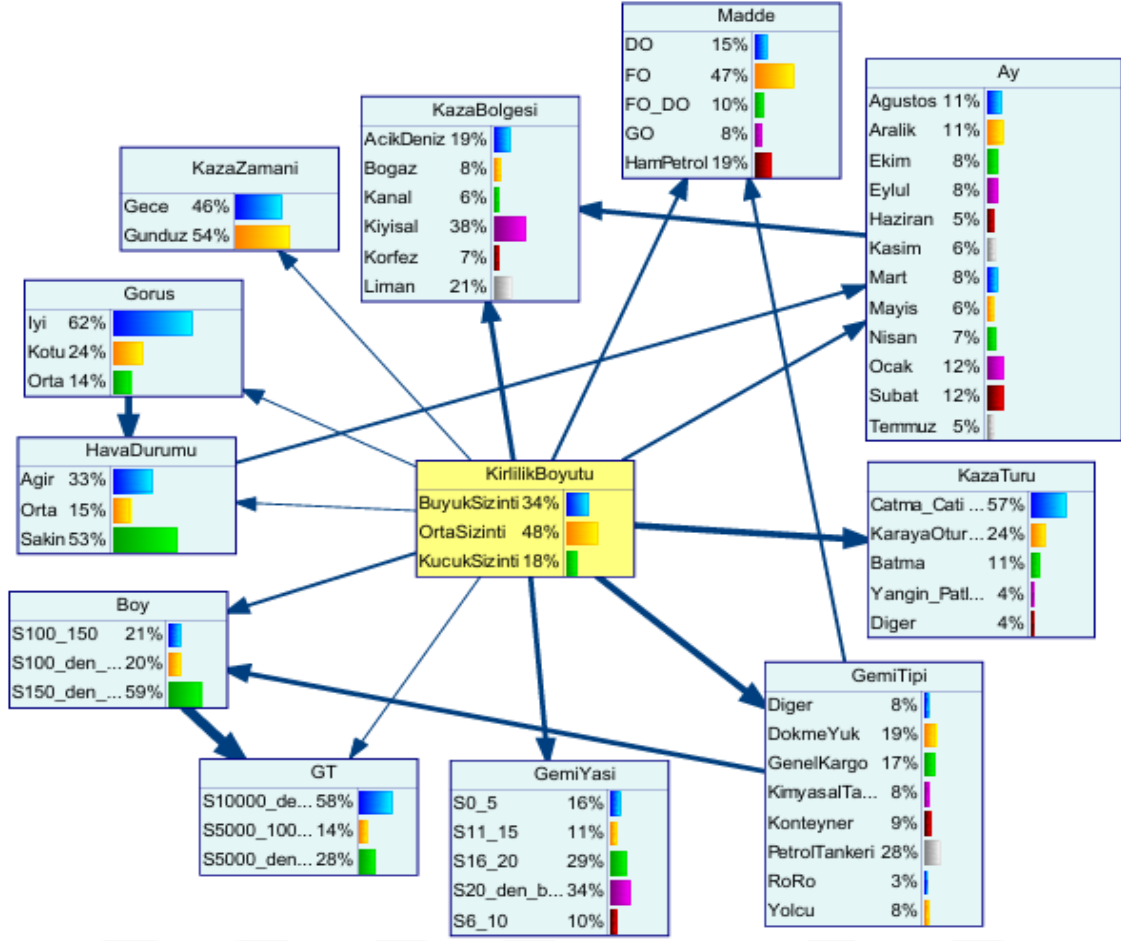
3.2.1. TAN Güvenilirlik ve Doğruluk Analizi

Genie 5.0 akademik yazılımında oluşturulan TAN modelinin ilk olarak doğrulama ve güvenilirlik testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın TAN modelinin güvenilirliği ve doğruluğunun ispatlanması için gerekli prosedürler uygulanmıştır. Bu prosedürler temelinde E-M algoritmalarının uygulandığı Etkileme Gücü Diyagramı ve Karışıklık Matrisi ile gerçekleştirilmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere uygun TAN modelini bulmak için hesaplamalar yapılmış ve çalışma modelin %75-25 (eğitim-test) oranına ve 0,818 genel doğruluk değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın TAN modeline ait ve Karışıklık Matrisi kullanılarak hesaplanmış değerler Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Çalışmaya ait TAN modelinin doğruluk ve güvenilirliği

Eğitim/ Test Oranı	Genel Doğruluk	Sızıntı Miktarı	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1- Skoru	Özgüllük	AUC
%75/25	0,818	Büyük sızıntı	0,848	0,80	0,727	0,762	0,909	0,929
		Orta Sızıntı	0,969	0,875	1,00	0,933	0,962	0,870
		Küçük Sızıntı	0,818	0,80	0,80	0,80	0,833	0,994

Takip edilen prosedürler ve hesaplamalar sonucunda kurulan ağın doğruluğunun yüksek ve kabul edilebilir olduğu söylenebilir. AUC değeri, 0 ile 1 arasında yer alan bir değeri temsil etmektedir. Bu değerin 0,5 ile 1 arasında yer alması modelin tutarlı ve güvenilir olduğunu ifade eder. Ayrıca AUC değerleri de incelendiğinde (değerin her değişken için 1’e yakın olması) modelin tahmin yeteneğinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir (Wang & Yang, 2018). Çalışmanın TAN modeline ait Etki Gücü Diyagramı Şekil 15’de verilmiştir. Şekildeki okların kalınlığı değişkenler arasındaki korelasyon ilişkisinin gücüne göre değişmektedir.



Şekil 15. TAN modelindeki REF'lerin etkileme gücü

Bu duruma göre güçlü korelasyon değerine sahip olan değişkenlerin gemi boyu-GT, görüş-hava durumu, kirlilik boyutu-kaza türü, kirlilik boyutu-gemi tipi ve kirlilik boyutu-gemi yaşı olduğu görülmüştür. Kirlilik kazaları boyutlarının kaza türü, gemi tipi ve gemi yaşıyla yakından ilişkili olduğu söylenebilir. Diğer bir deyişle bu REF'lerin sınıf değişkeni üzerindeki etki gücü yüksektir.

3.2.2. TAN Modeli Hassasiyet Analizi Bulguları

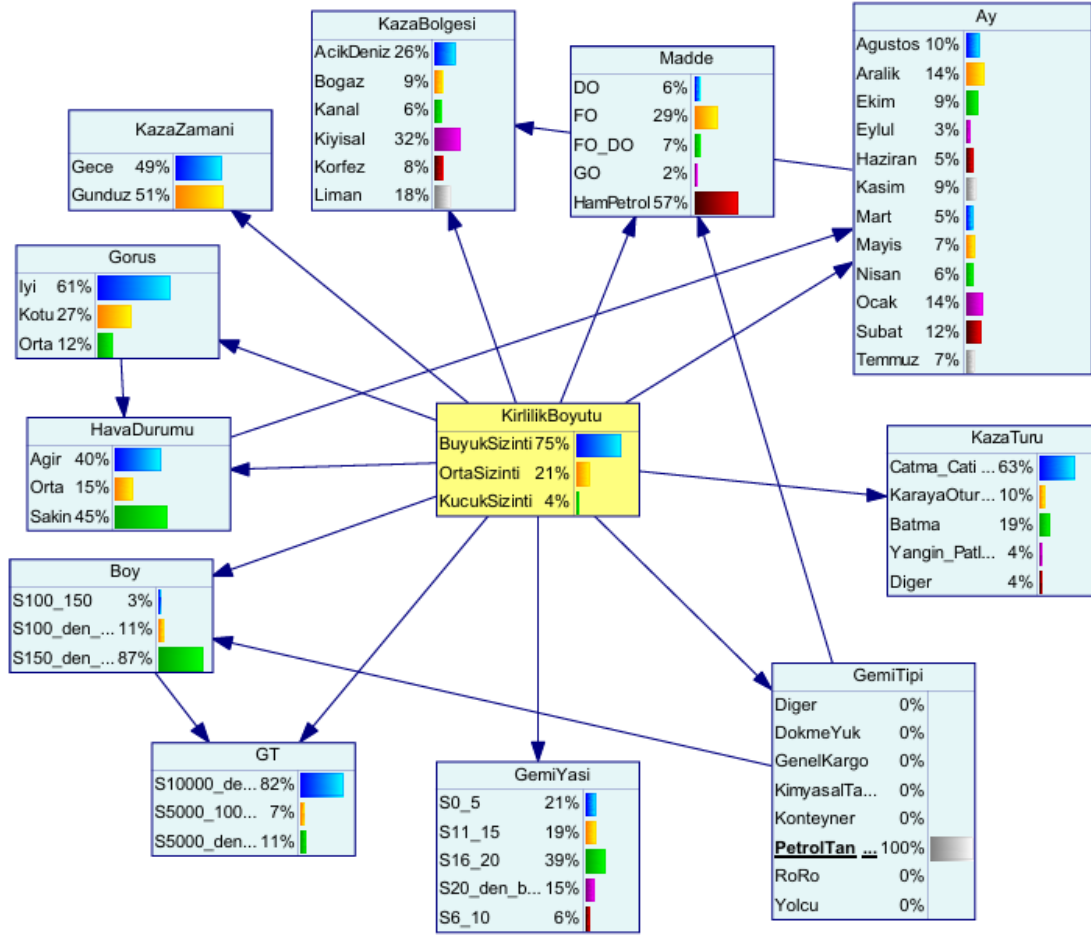
TAN modeli üzerinde uygulanan hassasiyet analizi ilk olarak karşılıklı bilgi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşılıklı bilgi yöntemiyle elde edilen ve her bir REF'in sınıf değişkeni üzerindeki etki değerleri Tablo 6'da verilmiştir. En büyük entropi azalmasına sahip düğüm sınıf değişkeni üzerinde en yüksek etkiye sahiptir.

Tablo 6. Petrol sızıntısının diğer düğümlerle hassasiyet verileri

Düğüm	Karşılıklı Bilgi	Entropi Azalması (%)	İnançların Varyansı
Gemi Tipi	0,51739	35	0,1222977
Kaza Türü	0,28320	19,2	0,0309377
Gemi Yaşı	0,27394	18,6	0,0360050
Madde	0,24226	16,4	0,0522714
Boy	0,17335	11,7	0,0197852
Ay	0,15318	10,4	0,0235318
GT	0,14241	9,65	0,0179597
Kaza Bölgesi	0,04134	2,8	0,0070098
Görüş	0,03533	2,39	0,0071468
Hava Durumu	0,02948	2,0	0,0038275
Kaza Zamanı	0,02750	1,86	0,0020492

Karşılıklı bilgi analizi sonucunda deniz kazalarından kaynaklanan kirlilik boyutu üzerinde en yüksek etkiye sahip olan değişkenin %35 oranıyla gemi tipi olduğu görülmektedir. Bu sonuç gemi tipinin deniz kazaları sonucunda meydana gelen kirlilik boyutu üzerindeki etkisinin önemini vurgulamaktadır. Gemi tipini sırasıyla kaza türü (%19,2), gemi yaşı (%18,6), madde (%16,4) ve boy (%11,7) düğümleri takip etmektedir. Kaza bölgesi (%2,8), görüş (%2,39), hava durumu (%2,0) ve kaza zamanı (%1,86) düğümlerinin kirlilik boyutu üzerinde diğer düğümlere oranla nispeten daha az etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Karşılıklı bilgi analizinden sonra uygulanan bir diğer analiz yöntemi Gerçek Risk Etkisi yöntemidir. Bu yöntemle düğümler arasındaki bağımlılığın daha iyi anlaşılması ve sınıf değişkeni üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. TRI analizi bütün REF'lere uygulanabilecek bir yöntem olmasıyla beraber çalışmada sınıf değişkeni üzerinde en yüksek etki derecesine sahip beş düğüm için uygulanmıştır (Şekil 16). Şekil 16'da petrol tankeri REF'inin olasılık durumu %100 yapıldığında diğer REF'lerin ve kirlilik boyutu düğümünün olasılık değerlerinin nasıl etkilendiği görülmektedir. Sınıf değişkeni üzerinde en yüksek korelasyon değerine sahip olan beş düğüme ait REF değerleri için benzer işlemler yapılmış ve sonuçlar ilgili tablolar ile verilmiştir.



Şekil 16. Petrol tankeri REF'inin olasılığının %100 olduğu durum

Tablolarda Genie 5.0 akademik yazılımından her bir REF için elde edilen değerler yazılmıştır. İlgili tablolarda kalın yazılı şekilde verilen değerler her bir REF için HRI ve LRI değerlerini temsil etmektedir. Elde edilen bu değerler kullanılarak REF'lerin sınıf değişkeni üzerindeki TRI değerleri hesaplanmış ve yine tablolarla verilmiştir. İlk olarak Tablo 7'de gemi tipi REF'i incelenmiş ve sonuç değerleri sunulmuştur (Tablo, 7).

Tablo 7. Gemi tipi düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri

Gemi tipi											
Dökme yük	Genel kargo	Petrol tankeri	Konteyner	Kimyasal Tanker	RoRo	Yolcu	Diğer	Büyük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	-	-	-	%34	47	29	38
%100	-	-	-	-	-	-	-	%5			
-	%100	-	-	-	-	-	-	%5			
-	-	%100	-	-	-	-	-	%75			
-	-	-	%100	-	-	-	-	%81			
-	-	-	-	%100	-	-	-	%11			
-	-	-	-	-	%100	-	-	%33			
-	-	-	-	-	-	%100	-	%11	-	-	-

Tablo 7'nin devamı

-	-	-	-	-	-	-	%100	%11			
Dökme yük	Genel kargo	Petrol tankeri	Konteyner	Kimyasal Tanker	RoRo	Yolcu	Diğer	Orta sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	-	-	-	%48	42	41	41,5
%100	-	-	-	-	-	-	-	%90			
-	%100	-	-	-	-	-	-	%36			
-	-	%100	-	-	-	-	-	%21			
-	-	-	%100	-	-	-	-	%7			
-	-	-	-	%100	-	-	-	%76			
-	-	-	-	-	%100	-	-	%23			
-	-	-	-	-	-	%100	-	%76			
-	-	-	-	-	-	-	%100	%76			
Dökme yük	Genel kargo	Petrol tankeri	Konteyner	Kimyasal Tanker	RoRo	Yolcu	Diğer	Küçük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	-	-	-	%18	41	14	27,5
%100	-	-	-	-	-	-	-	%6			
-	100%	-	-	-	-	-	-	%59			
-	-	%100	-	-	-	-	-	%4			
-	-	-	%100	-	-	-	-	%12			
-	-	-	-	%100	-	-	-	%14			
-	-	-	-	-	100%	-	-	%42			
-	-	-	-	-	-	%100	-	%14			
-	-	-	-	-	-	-	%100	%14			

Tablo 7 incelendiğinde ilk satırdaki %34 değeri büyük sızıntılar için genel gerçekleşme oranını göstermektedir. Alttaki her bir satır ise farklı REF değerleri sırasıyla %100 yapıldığında sızıntıların gerçekleşme ihtimallerini gösterir. Dökme Yük gemilerinin oranı %100 yapıldığında (diğer REF'lerin değeri 0 olur) büyük sızıntıların gerçekleşme oranı %5 olur. Bütün REF'ler bu şekilde irdelenmiştir ve büyük sızıntıların oluşmasında en riskli gemi tipinin konteyner olduğu tespit edilmiştir (%81). Konteyner gemisinin olasılık değeri %100 yapıldığında büyük sızıntının olma olasılığı %47 artmıştır. Büyük sızıntılar üzerinde en az etkiye sahip REF'in ise dökme yük gemilerinin olduğu görülmüştür (%5). Bu değerler kullanılarak öncelikle büyük sızıntılar için öncelikle HRI (%47) ve LRI (%29) hesaplanmıştır. Daha sonra büyük sızıntılar için %38 olan TRI değeri elde edilmiştir. Sınıf değişkeni düğümünün her bir durumu için aynı işlemler gerçekleştirilerek orta ve küçük sızıntılar incelenmiştir. Orta sızıntılar için analiz sonucuna bakıldığında dökme yük gemilerinin bu tür sızıntıların olma olasılığını %42 arttırdığı görülmektedir. Konteyner gemilerinde meydana gelecek bir sızıntı kazası ise orta boyutlu sızıntıların gerçekleşme ihtimalinin en az olduğu gemilerdir. Küçük boyutlu sızıntılar içinse başlangıç olasılık değeri en fazla değiştiren gemi tipinin genel kargo gemileri (%41) olduğu görülmüştür. En az etkileyen gemilerin ise %4 oranıyla petrol tankeri olduğu görülmektedir. Gemi tipi düğümünün TRI değerleri sırasıyla büyük boyutlu sızıntılar için %38, orta boyutlu sızıntılar

için %41,5 ve küçük boyutlu sızıntılar için %27,5 olarak hesaplanmıştır (Tablo 7). Kaza türü düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki etkileri tablo 8’de sunulmuştur (Tablo, 8).

Tablo 8. Kaza türü düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri

Kaza türü								
Batma	Çatma/ Çatışma	Karaya oturma	Yangın/ Patlama	Diğer	Büyük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%34	40	28	34
%100	-	-	-	-	%74			
-	%100	-	-	-	%38			
-	-	%100	-	-	%6			
-	-	-	%100	-	%33			
-	-	-	-	%100	%33			
Batma	Çatma/ Çatışma	Karaya oturma	Yangın/ Patlama	Diğer	Orta sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%48	11	38	24,5
%100	-	-	-	-	%10			
-	%100	-	-	-	%59			
-	-	%100	-	-	%50			
-	-	-	%100	-	%26			
-	-	-	-	%100	%26			
Batma	Çatma/ Çatışma	Karaya oturma	Yangın/ Patlama	Diğer	Küçük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%18	26	15	20,5
%100	-	-	-	-	%16			
-	%100	-	-	-	%3			
-	-	%100	-	-	%44			
-	-	-	%100	-	%42			
-	-	-	-	%100	%42			

Tablo 8 incelendiğinde büyük sızıntılar için en riskli kaza türünün batma kazası olduğu görülmektedir. Batma kazasının olasılık değeri %100 yapıldığında büyük sızıntının gerçekleşme olasılığı %40 artmıştır. Büyük sızıntılar üzerinde en az etkiye ise karaya oturma kazalarının sahip olduğu görülmüştür. Büyük boyuttaki sızıntıların gerçekleşme oranı %34 iken kara oturma kazaları sonucunda gerçekleşme olasılığının %6 olduğu tespit edilmiştir. Orta boyutlu bir sızıntı için analiz sonucuna bakıldığında çatma/çatışma kazalarının başlangıç olasılığını %11 arttırdığı görülmektedir. Kaza türü düğümü küçük boyutlu sızıntılar için analiz edildiğinde başlangıç olasılık değerinin en fazla karaya oturma kazalarında değiştiği görülmektedir. Küçük boyutlu sızıntıların başlangıç olasılık değeri %18 iken %44 olmuştur. Kaza türü düğümünün TRI değerleri sırasıyla büyük boyutlu sızıntılar için %34, orta boyutlu sızıntılar için %24,5 ve küçük boyutlu sızıntılar için %20,5 olarak hesaplanmıştır (Tablo 8). Gemi yaşı düğümünün ve REF’lerin kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri Tablo 9’da verilmiştir (Tablo, 9).

Tablo 9. Gemi yaşı düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri

Gemi yaşı								
0-5	6-10	11-15	16-20	20'den büyük	Büyük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%34	40	30	35
%100	-	-	-	-	%50			
-	%100	-	-	-	%14			
-	-	%100	-	-	%74			
-	-	-	%100	-	%53			
-	-	-	-	%100	%4			
0-5	6-10	11-15	16-20	20'den büyük	Orta sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%48	19	38	28,5
%100	-	-	-	-	%39			
-	%100	-	-	-	%67			
-	-	%100	-	-	%10			
-	-	-	%100	-	%41			
-	-	-	-	%100	%66			
0-5	6-10	11-15	16-20	20'den büyük	Küçük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%18	13	12	12,5
%100	-	-	-	-	%11			
-	%100	-	-	-	%18			
-	-	%100	-	-	%16			
-	-	-	%100	-	%6			
-	-	-	-	%100	%31			

Tablo 9 incelendiğinde büyük sızıntılar üzerinde en büyük etkiye sahip gemi yaş aralığının 11-15 olduğu görülmüştür. Başlangıç olasılık değerini %34'den %74'e çıkartarak büyük boyutta sızıntı olasılığını %40 arttırdığı tespit edilmiştir. Büyük sızıntılar üzerinde en düşük etkiye sahip yaş değişkeninin ise 20 yaşından büyük gemiler olduğu tespit edilmiştir. Orta boyutlu sızıntı değişkeninin üzerinde ise en yüksek etki değerine sahip yaş aralığının 6-10 olduğu görülmüştür. Orta sızıntı boyutunun başlangıç olasılık değeri %48'den %67'ye yükselmiştir. Orta boyuttaki sızıntıların gerçekleşme oranını %19 oranında arttırmıştır. Gemi yaşı düğümü küçük boyutlu sızıntılar için analiz edildiğinde başlangıç olasılık değerinin en fazla 20 yaşından büyük gemilerde değiştiği görülmektedir. Küçük boyutlu sızıntıların başlangıç olasılık değeri %18 iken %31 olmuştur. Küçük boyutlu sızıntıların gerçekleşmesinde en az etkiye sahip yaş düğümü değişkeninin ise 16-20 yaş aralığı olduğu görülmüştür. Gemi yaşı düğümünün TRI değerleri sırasıyla büyük boyutlu sızıntılar için %35, orta boyutlu sızıntılar için %28,5 ve küçük boyutlu sızıntılar için %12,5 olarak hesaplanmıştır (Tablo 9). Madde düğümüne ait TRI değerleri Tablo 10'da verilmiştir (Tablo, 10).

Tablo 10. Madde düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri

Madde								
DO	FO	FO-DO	GO	Ham petrol	Büyük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%34	51	28	39,5
%100	-	-	-	-	%6			
-	%100	-	-	-	%29			
-	-	%100	-	-	%27			
-	-	-	100%	-	%11			
-	-	-	-	%100	%85			
DO	FO	FO-DO	GO	Ham petrol	Orta sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%48	17	38	27,5
%100	-	-	-	-	%58			
-	%100	-	-	-	%55			
-	-	%100	-	-	%65			
-	-	-	%100	-	%57			
-	-	-	-	%100	%10			
DO	FO	FO-DO	GO	Ham petrol	Küçük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	-	-	%18	18	13	15,5
%100	-	-	-	-	%36			
-	%100	-	-	-	%16			
-	-	%100	-	-	%9			
-	-	-	%100	-	%32			
-	-	-	-	%100	%5			

Tablo 10 incelendiğinde ham petrol değişkeninin olasılık değerinin %100 durumuna getirilmesinin büyük sızıntılar üzerinde %51 oranında artışa sebep olduğu görülmüştür. Büyük sızıntılar üzerinde en az etkiye sahip değişkenin ise DO değişkeninin olduğu tespit edilmiştir. Orta sızıntılar üzerindeyse FO-DO değişkeninin %17'lik artışla en yüksek etkiye sahip olduğu görülmüştür. Küçük sızıntılar üzerinde ise DO değişkeni en yüksek etkiye sahiptir. Başlangıç olasılık değerini %18'den %36'ya çıkartmıştır. Madde düğümünün TRI değerleri sırasıyla büyük boyutlu sızıntılar için %39,5, orta boyutlu sızıntılar için %27,5 ve küçük boyutlu sızıntılar için %15,5 olarak hesaplanmıştır (Tablo 10). Boy düğümüne ait TRI değerleri Tablo 11'de verilmiştir (Tablo, 11).

Tablo 11. Boy düğümünün kirlilik boyutu üzerindeki TRI değerleri

Boy						
100'den kısa	100- 150	150'den uzun	Büyük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	%34	17	25	21
%100	-	-	%11			
-	%100	-	%9			
-	-	%100	%51			
100'den kısa	100- 150	150'den uzun	Orta sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %

Tablo 11'in devamı

-	-	-	%48	16	7	11,5
%100	-	-	%64			
-	%100	-	%54			
-	-	%100	%41			
100'den kısa	100- 150	150'den uzun	Küçük sızıntı	HRI %	LRI %	TRI %
-	-	-	%18	20	10	15
%100	-	-	%25			
-	%100	-	%38			
-	-	%100	%8			

Tablo 11 incelendiğinde 150 metreden uzun gemilerin büyük boyutlu sızıntılar üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu değişkenin olasılık değeri %100 yapıldığında büyük sızıntılar üzerinde %17 oranında artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Orta sızıntılar üzerindeyse 100 metreden kısa gemilerin en yüksek etkiye sahip olduğu görülmüştür. Başlangıç olasılık değerini %18'den %38'e çıkartarak %20 oranında bir artışa sebep olmuştur. Küçük sızıntılar üzerinde ise 100-150 metre arasındaki gemilerin en yüksek etkiye sahip olduğu görülmüştür. Boy düğümünün TRI değerleri sırasıyla büyük boyutlu sızıntılar için %21, orta boyutlu sızıntılar için %11,5 ve küçük boyutlu sızıntılar için %15 olarak hesaplanmıştır (Tablo 11).

Yukarıdaki tablolarda her bir REF için verilen TRI değerlerin ortalaması alınarak düğümlerin TRI değerleri bulunmuştur. TRI analizi sonucunda karşılıklı bilgi yönteminden elde edilen düğümlerin sıralamasının değişiklik gösterdiği görülmüştür (Tablo 12).

Tablo 12. Farklı kaza şiddet derecelerine göre önemli REF'lerin TRI değerleri

Düğüm	TRI			
	Büyük sızıntı	Orta sızıntı	Küçük sızıntı	Ortalama
Gemi tipi	%38	%41,5	%27,5	%35,67
Kaza türü	%34	%24,5	%20,5	%26,33
Gemi yaşı	%35	%28,5	%12,5	%25,33
Madde	%39,5	%27,5	%15,5	%27,55
Boy	%15,5	%11,5	%15	%15,80

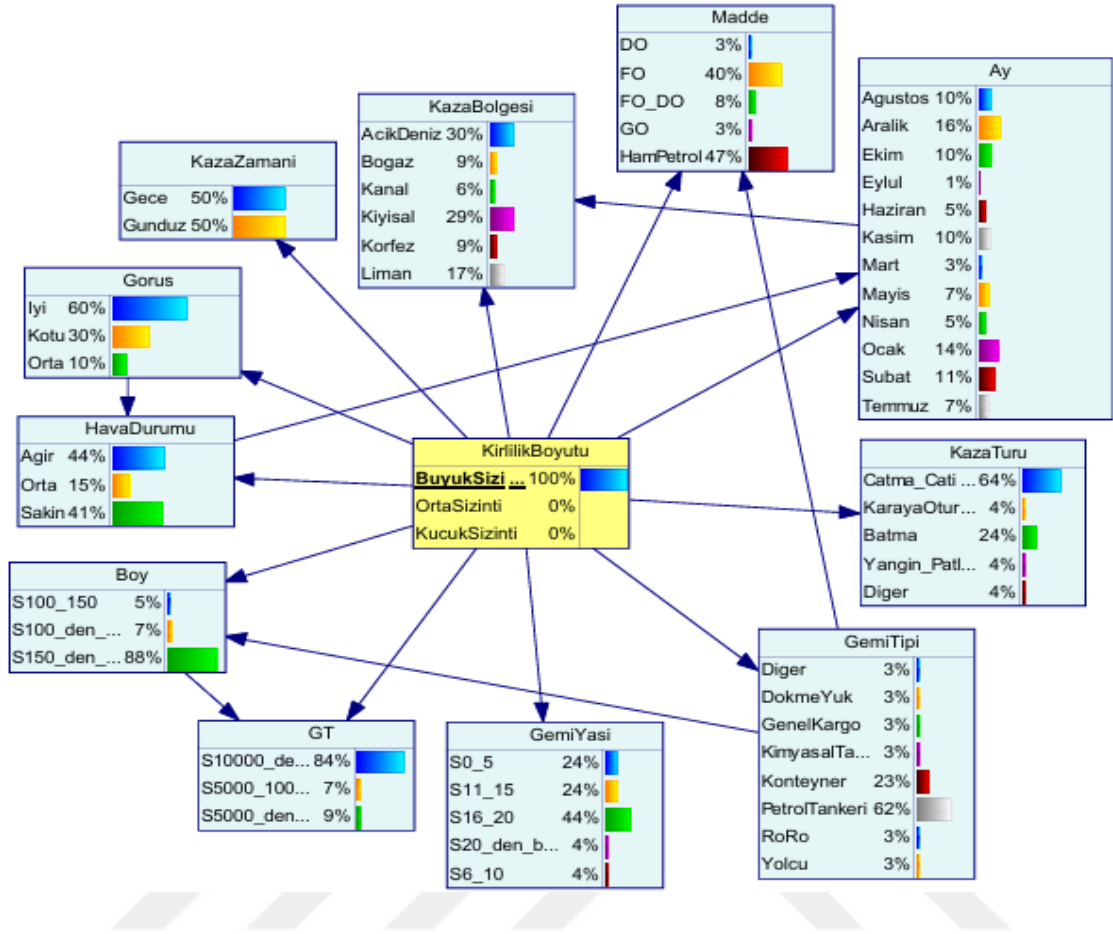
TRI analizi sonucunda sınıf değişkeni üzerinde en etkili REF'in %35,67 oranıyla gemi tipi olduğu tespit edilmiştir. REF'lerin sınıf değişkeni üzerindeki etkilerinin sırasıyla gemi tipi, madde, kaza türü, gemi yaşı ve boy olduğu görülmüştür. Karşılıklı bilgi analizinden farklı olarak TRI analizinde madde düğümünün 2. sıraya yerleştiği görülmektedir. Ayrıca sınıf değişkeninin her bir olasılığı ayrı ayrı incelendiğinde büyük sızıntıların meydana

gelmesinde madde düğümünün etkili olduğu görülmüştür. Gemi yaşı ve boy düğümlerinin sıralaması değişmeyip sabit kalmıştır. Bununla birlikte yine kirlilik boyutunun her bir olasılığı için incelendiğinde orta boyutlu sızıntılar için gemi yaşı düğümünün %28,5 oranıyla 2. sırada yer aldığı görülmektedir.

3.2.3. TAN Modeli Vaka Çalışması Bulguları

Çalışmanın TAN modeli ile bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Vaka çalışmasında büyük sızıntıların gerçekleşme olasılığının anlaşılması hedeflenmiştir. Şekil 17’de büyük sızıntıların gerçekleşme olasılığının %100 olduğu duruma ait TAN modeli verilmiştir. Büyük sızıntıların gerçekleşmesinde en etkili kaza türünün çatma/çatışma kazaları (%64 oranında) olduğu görülmektedir. Gemi tipi düğümünde ise en etkili değişkenin %62 oranıyla petrol tankerleri olduğu tespit edilmiştir. Petrol tankerlerinden sonra ise konteyner gemilerinin (%32 oranında) etkili olduğu görülmüştür. Çalışma veri setinde yer alan diğer gemi türlerinin (genel kargo, dökme yük, yolcu, RoRo, kimyasal tanker ve diğer gemiler) ise etkileme gücünün %3 oranında olduğu görülmüştür.

Büyük boyutta sızıntılara neden olan gemilerin ise 16-20 yaş aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu yaş aralığını %24 oranıyla 0-5 yaş ve 11-15 yaş aralığındaki gemiler takip etmektedir. Deniz kazaları sonucu deniz ortamına salınan kirletici madde ise %47 oranıyla ham petroldür. Ham petrolü %40 oranı ile FO’nun takip ettiği görülmüştür. Büyük sızıntıların gerçekleşmesinde 150 metreden uzun gemilerin %88 oranıyla en etkili değişken olduğu tespit edilmiştir. GT’ı düğümünde ise 10.000’den büyük olan gemilerin etki değerinin %84 oranıyla en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Büyük sızıntı ile sonuçlanan deniz kazalarının %30 oranında açık denizde, %29 oranında ise kıyısal ve %17 oranında ise limanda meydana geldiği tespit edilmiştir. Görüş durumu düğümü incelendiğinde %60 oranında iyi, %30 oranında ise kötü durumlarda büyük boyutta sızıntılar gerçekleşmiştir. Hava durumu ise ağır (%44 oranında) olduğu durumlarda büyük sızıntıların gerçekleşme ihtimali daha yüksektir. Sakin havalarda ise büyük sızıntıların gerçekleşme oranı %41’dir. Kaza zamanının (gece ve gündüz) büyük sızıntıların gerçekleşmesinde eşit oranda etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 17. Büyük sızıntı olasılığının %100 olduğu durum

3.3. GNOME Modeli Bulguları

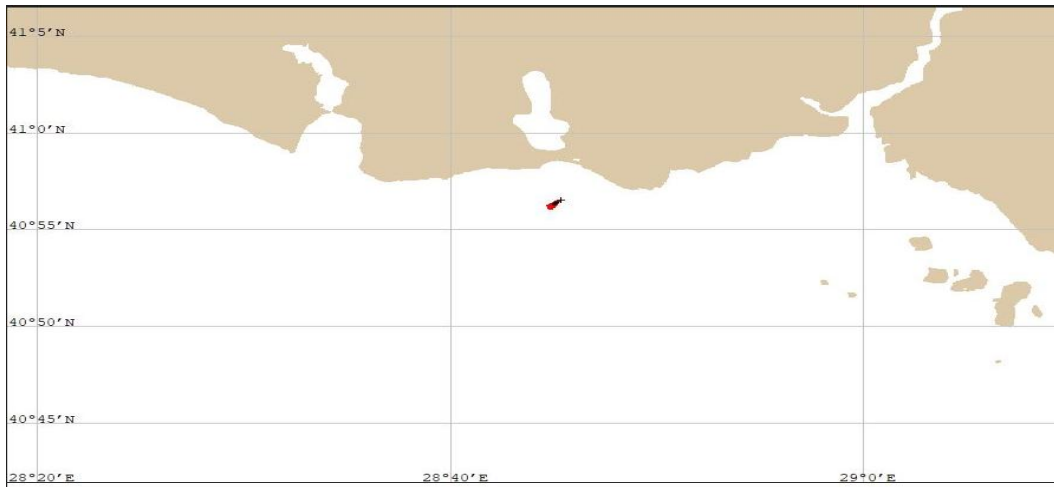
İstanbul Boğazı Güney Girişi G Bölgesi Demirleme Sahası'nda gemi kazasından kaynaklı petrol sızıntı senaryosu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle TAN analizi sonucunda etki düzeyi en yüksek olan REF değerleri tespit edilmiştir (Şekil 18). Tespit edilen bu REF'ler arasından gerekli olanlar (kirletici madde ve sızıntının boyutu) ile akıntı ve rüzgâra ait veriler GNOME modelinde modeline girilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen senaryo simülasyonunda kullanılan akıntı ve rüzgâr değerlerinin zaman aralığını belirlemek amacıyla TAN analizi çıktıları kullanılmıştır. 30 Aralık 2024 tarihinde G demirleme sahasında gerçekleştirilen deniz kazası senaryosu ile petrol sızıntısının 24 saatlik alansal ve zamansal hareketi izlenmiştir.



Şekil 18. TAN modelinden elde edilen REF'ler

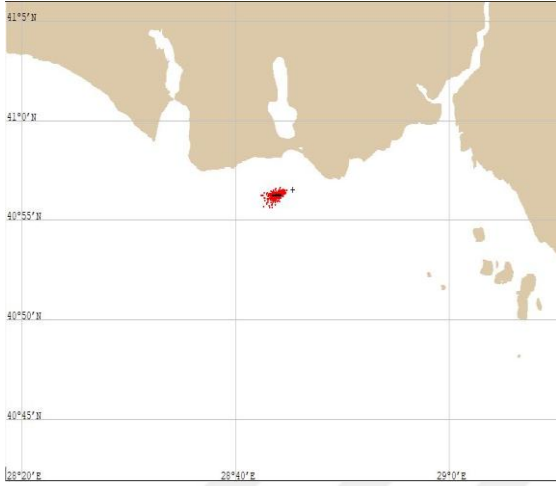
Gemiden yayılan petrolün akıntı ve rüzgâr verileri etkisiyle 24 saatlik yayılımı izlenmiştir. İlk bir saat içerisinde gerçekleşen petrolün yayılım ve hareketi Şekil 19'da verilmiştir. İlk saatin ardından 3'üncü, 6'ıncı, 10'uncu, 18'inci ve 24'üncü saatlerde de GNOME modelinden elde edilen petrolün yayılımının zamansal ve alansal dağılımı ile ilgili çıktılar alınmıştır.

Şekil 19'da denize dökülen petrolün birinci saatteki yayılımı verilmiştir. Kirlilikle sonuçlanan deniz kazasının birinci saatinin simülasyonu sonucunda dökülen 500 ton FO'in 488 tonunun (%97,6) yayılmaya devam ettiği, 12 tonunun (%2,4) buharlaştığı veya parçalandığı tespit edilmiştir (Şekil 19).

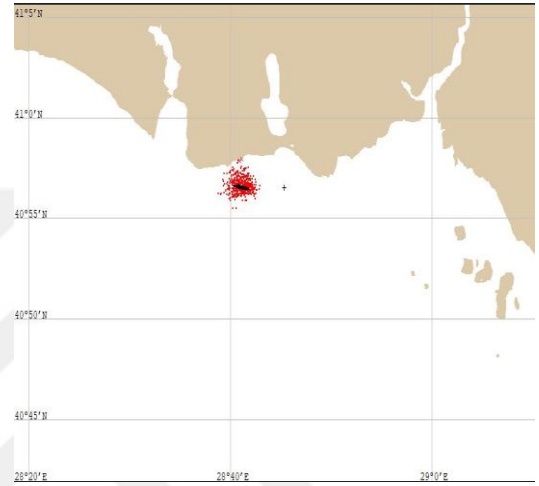


Şekil 19. Petrolün 1. saatte dağılımı

Şekil 20’de dökülen petrolün 3 saat geçtikten sonraki durumu, şekil 20’de ise 6 saat geçtikten sonraki durumu verilmiştir. Simülasyon süresi 3 saat olarak çalıştırılmış ve dökülen FO’in 469 tonunun (%93,8) yayılmaya devam ettiği, 31 tonunun (%6,2) buharlaştığı veya parçalandığı görülmüştür (Şekil 20). Deniz kazasının 6’ıncı saatinde ise dökülen FO’in 422 tonunun (%84,4) yayılmaya devam ettiği, 78 tonunun (%15,6) buharlaştığı veya parçalandığı tespit edilmiştir (Şekil 21).

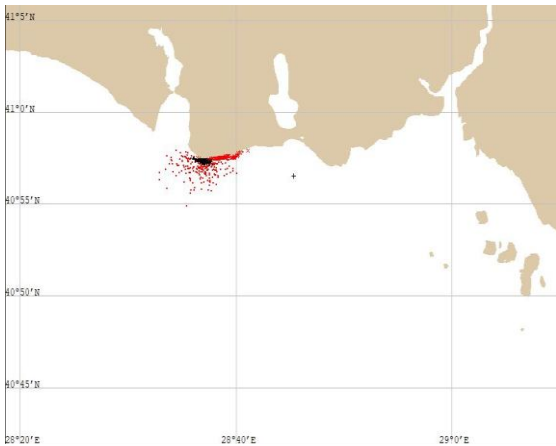


Şekil 20. Petrolün 3. saatte dağılımı

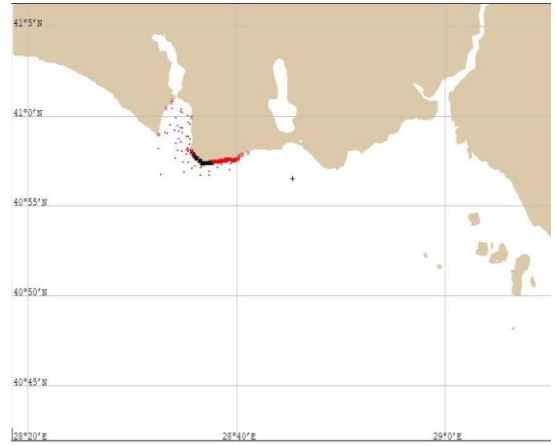


Şekil 21. Petrolün 6. saatte dağılımı

Şekil 22’de dökülen petrol 10 saat sonraki dağılımı, Şekil 23’de ise 18 saat sonraki dağılımı sunulmaktadır.

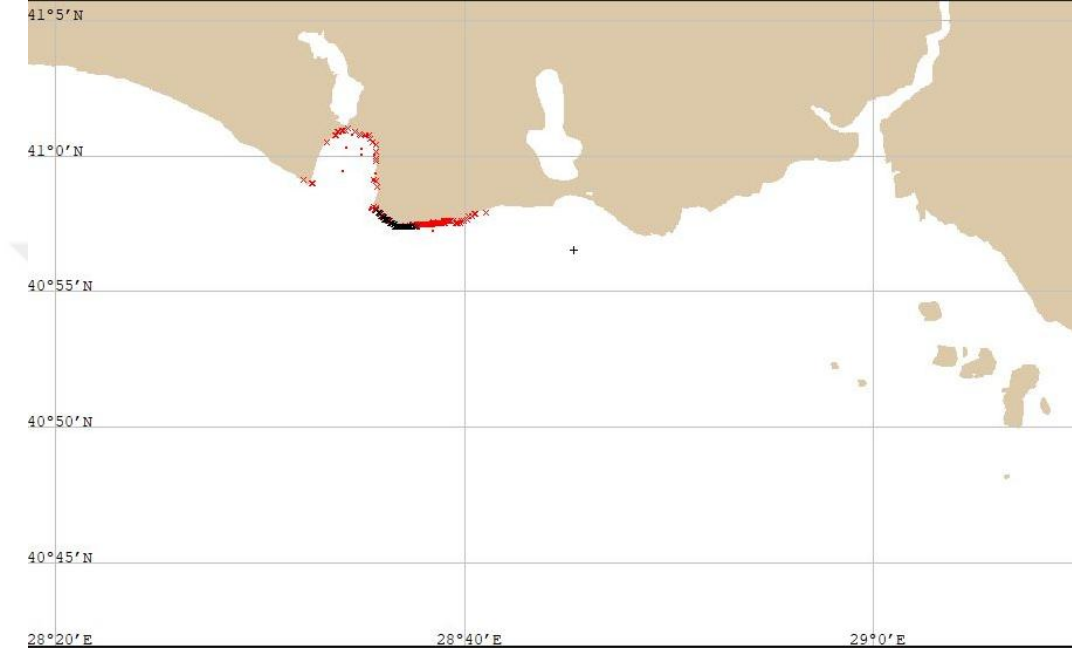


Şekil 22. Petrolün 10. saatte dağılımı



Şekil 23. Petrolün 18. saatte dağılımı

Simülasyon süresi 24 saat olarak çalıştırılmış ve dökülen 500 ton FO'in 4 tonunun (%0,8) yayılmaya devam ettiği, 330 tonunun (%66) kıyıya ulaştığı, 164 tonunun (%32,8) buharlaştığı veya yayıldığı görülmüştür (Şekil 24). Simülasyon süresinin 24 saat ile sınırlandırılmasının nedeni kaza sonucu sızan FO'in kıyıya ulaşmış olması, yüzer durumda çok az bir miktarının kalmasıdır.



Şekil 24. Petrolün 24. saatte dağılımı

4. İRDELEME

Bu çalışmada, deniz kazaları sonucunda meydana gelen petrol sızıntılarına etki eden faktörler incelenmiştir. Petrol sızıntılarının su ortamı ve kıyı üzerinde kısa, orta ve uzun vadeli pek çok olumsuz etkisi bulunmaktadır (Yang vd., 2011). Bu nedenle petrol sızıntısı ile sonuçlanan kazaları daha iyi anlayabilmek ve etki faktörlerini analiz etmek için TAN ve GNOME Modelleri kullanılmıştır. TAN modeli ile 161 deniz kazası analiz edilmiş ve gerçekleşen kirlilik kazalarının boyutları tespit edilmiştir. TAN analizleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak, GNOME modeli ile İstanbul Boğazı Güney Girişi G Bölgesi (Küçükçekmece) Demirleme Sahası'nda bir sızıntı simülasyonu oluşturulmuştur.

Çalışmanın veri setinin %75-25 oranında (eğitim-test) SPSS ile ayrılmasıyla oluşturulan TAN modelinin en yüksek genel doğruluk değeri 0,818 tespit edilmiştir (Tablo 5). Bu değer, oluşturulan TAN'ın doğruluğunun güvenilir olduğu ifade etmektedir. Literatürdeki çalışmaların birçoğunda bu değer 0,70 ve üzerinde bir değer almasının TAN'ın doğruluğunun kanıtlamasında geçerli olduğu kabul edilmiştir (Sevgili vd., 2022; Kaptan & Bayazıt, 2024; Park & Lee, 2024). Yapılan analizler sonucunda REF'lerin sızıntı boyutları üzerindeki etkileri sırasıyla gemi tipi, kaza türü, gemi yaşı, madde, boy, ay, GT, kaza bölgesi, görüş, hava durumu, kaza zamanı şeklinde tespit edilmiştir (Tablo 6). Bu duruma ek olarak gemi tipi ve kaza türü, petrol sızıntısının boyutunu belirlemede en önemli değişkenlerdir. Bu durum kirlilik boyutu düğümünün gemi tipi ve kaza türü düğümlerine ait değişkenlere en duyarlı olduğu şeklinde de ifade edilebilir. Çakır vd. (2021), araştırmalarında benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

Gemi tipi düğümü deniz kazası sonucu meydana gelen sızıntı boyutu üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Kirlilik boyutu düğümü ile gemi tipi düğümü arasındaki bağımlılık en yüksek değere sahiptir. Çalışma veri setinde petrol tankerleri de yer almaktadır. Tanker kazalarından bir seferde deniz ortamına dökülecek petrol ve türevi miktarının diğer gemilere kıyasla daha fazla olacağı öngörülebilir. Bu nedenle gemi tipi ile kirlilik boyutu arasındaki bağımlılık değerinin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Bu düğüm altında yer alan petrol tankerleri REF'i sızıntı boyutunu en çok etkileyen değişken olarak dikkat çekmektedir (Tablo 7). Çalışmanın veri setinde bulunan diğer gemiler (genel kargo, dökme yük, konteyner vb. gibi) yalnızca taşıdıkları yakıt nedeniyle kirliliğe sebep olurken petrol tankerleri ise hem taşıdıkları kargo hem de yakıt nedeniyle kirlilik oluşturmaktadırlar. Bu nedenle petrol

tankerlerinin bir defada sebep olacakları kirlilik boyutu oldukça fazladır. Akhtar vd., (2012), çalışmalarında petrol tankerlerinin petrol sızıntılarının büyük çoğunluğuna katkıda bulunduklarını ifade etmişlerdir. Petrol tankerlerini dökme yük ve genel kargo gemileri izlemektedir. Çakır vd. (2021) çalışmalarında TAN analizi sonucunda tankerler, genel kargo ve kuru yük gemilerinin büyük sızıntılar (≥ 250 galon) üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirterek benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Ayrıca sızıntı boyutu fark etmeksizin sızıntılar üzerinde en çok etkiye sahip gemi türünün balıkçı gemileri olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durum bu çalışma ile karışıklık göstermektedir (Çakır vd., 2021). Bununla birlikte gemi tipi düğümü REF'leri sızıntı boyutları özelinde incelendiğinde konteyner gemilerinin büyük sızıntı boyutları üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu görülmüştür. Konteyner gemilerinin oranı %100 yapıldığında büyük sızıntıların meydana gelme oranı %47 artmıştır. Bu gemi tipini petrol tankerleri izlemektedir. Orta sızıntı boyutu incelendiğinde en yüksek etkiye sahip REF dökme yük gemileri olarak tespit edilmiştir. Küçük boyutlu sızıntıların gerçekleşmesinde ise en yüksek etkiye sahip REF genel kargo gemileri olurken en düşük etkiye sahip olan REF petrol tankeridir. Bu durum toplam veri setinde en fazla kirlilik kazasına sahip olan gemi türünün petrol tankeri olduğunu ayrıca petrol tankerlerinin genellikle büyük ve orta boyutta sızıntılara neden olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra diğer türde gemilerin de taşıdıkları yakıt miktarı nedeniyle büyük boyutta sızıntılara neden olduğu görülmektedir (Dalton & Jin 2010). White & Molloy, (2003) ise araştırmalarında tanker dışındaki gemilerin yakıtlarından kaynaklanan büyük sızıntıların dünya çapında giderek daha fazla ilgi odağı olduğunu ifade etmişlerdir. Elde edilen verilerle çalışma sonuçlarının yapılan diğer çalışmalarla paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Çalışma sonucundan elde edilen verilere göre denize en fazla dökülen maddenin Fuel oil olduğu tespit edilmiştir. Fuel oilin deniz ticaret filosundaki birçok farklı gemi tipinde yakıt olarak kullanıldığı bilinen bir gerçektir.

TAN analizi sonuçlarına göre en çok çatma/çatışma kazaları sonucunda petrol sızıntıları meydana geldiği görülmüştür (Tablo 8). ITOPF'in araştırmalarına göre, büyük petrol sızıntısı olaylarının çoğunluğu çatma/çatışma ve karaya oturma kazaları sonucunda meydana gelmektedir (ITOPF, 2024). Çatma/çatışma kazalarını karaya oturma ve batma kazalarının izlediği tespit edilmiş ve elde edilen sonuçların geçmişte yapılan çalışmalarla benzerlik gösterdiği görülmüştür (Ketkar & Babu, 1997; Dalton & Jin, 2010; Rogowska & Namieśnik, 2010). Batma kazaları sonucunda büyük boyutta sızıntıların meydana gelme olasılığı daha yüksektir. Batma kazalarının gerçekleşme oranının %100 yapılması büyük

boyutlu sızıntıların oranını %34'ten %74'e çıkartmıştır (Tablo 8). Çatma/çatışma kazaları ise daha çok orta boyutlu sızıntıların meydana gelmesine neden olmuştur. Bu kaza türünün oranı %100 yapıldığında orta boyutlu sızıntıların meydana gelme oranı %11 artmıştır. Karaya oturma kazaları ise çoğunlukla küçük boyutta sızıntılarla ilişkilidir. Karaya oturma kazalarının gerçekleşme oranı %100 yapıldığında küçük boyutlu sızıntıların gerçekleşme oranının %18'den %44'e çıktığı tespit edilmiştir. Kaza türleri ve gemi tipleri değişiklik gösterse de batma, çatma/çatışma ve karaya oturma kazaları sonucunda geminin tamamen kaybı ya da yapısal bütünlüğün bozulması nedeniyle deniz ortamına petrol dökülme ihtimali oldukça yüksektir (Sevgili vd., 2022). Özellikle büyük tanker sızıntılarına neden olan kazaların çatma/çatışma ve karaya oturma sonucu meydana geldiği görülmektedir (Chen vd., 2019a). Karaya oturma kazaları, en küçük gemi hasar maliyetlerine neden olurken en büyük petrol sızıntılarına neden olmaktadır (Talley, 1999). Bu nedenle kaza türü düğümü kirlilik boyutu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Gemi yaşı sızıntı boyutu üzerinde önemli olan diğer bir düğümdür. TAN analizleri sonucunda 20 yaşından büyük gemilerin sızıntı boyutları üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (Tablo 9). Gemi yaşı düğümü sızıntı boyutları özelinde incelendiğinde 20 yaşından büyük gemilerin özellikle orta ve küçük boyutlu sızıntılar üzerinde etkili olduğu görülmektedir. 20 yaşından büyük gemilerin oranı %100 yapıldığında büyük sızıntıların gerçekleşme oranını %4, orta sızıntıların gerçekleşme oranını %13, küçük boyutlu sızıntıların gerçekleşme oranını ise %32 arttırdığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra geçmişte yapılan çalışmalarda yaş durumunun sızıntı üzerinde tutarlı bir bağlılığa sahip olmadığı ileri sürülmüştür (Yip vd., 2011; Çakır vd., 2021). Çakır vd., (2021), yaptıkları çalışmada gemi yaşlarını <33,5, 33,5-42,5 ve >42,5 olarak belirlemişler ve genç gemilerin yaşlı gemilere göre daha büyük boyutta kazalara neden olduğunu ifade etmişlerdir. Fan vd., (2020), çalışmalarında deniz kazasının en çok 16-20 yaş aralığındaki gemilerde meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada gemi yaşı düğümü 5 adet REF'ten oluşmaktadır. Sızıntı boyutları gemi yaşı düğümü özelinde incelendiğinde özellikle 11-15 yaş arasındaki gemilerin büyük boyutlu sızıntılara daha çok neden olduğu tespit edilmiştir. Bu REF'in durumu %100 yapıldığında büyük boyutlu sızıntıların gerçekleşme oranının %34'ten %74'e çıktığı görülmektedir. Ayrıca 16-20 yaş arasındaki gemiler %53, 0-5 yaş arasındaki gemiler ise büyük boyutlu sızıntıların gerçekleşme olasılığını %50 oranında arttırmaktadır. Diğer bir deyişle 20 yaşından küçük gemilerin özellikle büyük ve orta boyutlu sızıntılarda etkili olduğu görülmektedir. Bu durum 20 yaşından küçük gemilerin genellikle daha büyük

boyutlara sahip olmasıyla da ilişkilendirilebilir. UNCTAD tarafından 2024 yılında yayınlanan raporda 0-4 yaş aralığındaki gemilerin deniz ticaret filosunda adet bazında (%12 oranında) diğer gemi yaşlarına kıyasla daha az bulunduğu görülmektedir. Buna rağmen 0-4 yaş aralığındaki gemiler dedveyt tonaj olarak (ortalama 36.893 MT) deniz ticaret filosunda daha fazla hacme sahiptir (UNCTAD, 2024). Raporda dünya deniz ticaret filosu dedveyt tonaj olarak 0-4 yaş, 4-9 yaş, 10-14 yaş, 15-19 yaş ve 20 yaşından büyük gemiler şeklinde sıralanmaktadır. Bu bilgiler ışığında gemi yaş ortalaması küçüldükçe dedveyt tonaj ortalamasının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum 20 yaşından küçük gemilerin kazaları sonucunda meydana gelen büyük boyutlu sızıntıları açıklamaktadır.

Gemi GT'sinin sızıntı boyutu üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca GT ile arasında güçlü bir korelasyon bulunun boy düğümü de incelenmiştir. Gemilerin GT ile boyları arasında pozitif bir ilişki vardır. TAN analizleri sonucunda GT'si 10.000'den büyük olan gemilerin sızıntı boyutu üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (Tablo 10). Benzer şekilde boy düğümünde de 150 metreden uzun gemilerin sızıntı boyutu en fazla etkileyen REF olduğu görülmüştür. Gemi boyu düğümü özelinde sızıntı boyutu sınıf değişkeni analiz edildiğinde 150 metreden uzun REF değerinin %100 yapılması durumunda büyük boyutlu sızıntıların meydana gelme durumu %34'ten %51'e yükselmiştir. Orta ve küçük boyutlu sızıntıların meydana gelmesinde ise en az etkiye sahip (%41, %8) REF değeri olarak tespit edilmiştir. Ketkar & Babu (1997), araştırmalarında gemi büyüklüğü arttıkça büyük boyuttaki sızıntıların gerçekleşme ihtimalinin arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca Talley vd., (2012) çalışmalarında GT ve sızıntının boyutu arasında anlamlı bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Bir kazaya karışan GT'si büyük petrol tankeri haricindeki yük gemilerinin yakıt sızıntısının daha küçük GT'li yük gemisinden daha fazla olacağını ileri sürmüşlerdir (Talley vd., 2012). Bunun yanı sıra bu araştırmadan farklı olarak Çakır vd., (2021) yaptıkları çalışmada 400 GT'nin altındaki gemilerin, 400 GT'ye eşit ve üzerindeki gemilere göre ciddi bir petrol sızıntısına neden olma olasılığının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Kirlilik boyutu sınıf değişkeni ay düğümü özelinde irdelendiğinde aralık, ocak ve şubat aylarının etki düzeyinin yüksek olduğu tespit edilmiştir (Tablo 12). Schulze, (1983) St. Marys Nehri'nde petrol sızıntısının meydana gelme olasılığını incelediği çalışmasında, 16 Aralık-1 Nisan tarihleri arasında petrol sızıntılarının gerçekleşme ihtimalinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu yapılan çalışmanın sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Çakır vd., (2021) yaptıkları çalışmada kış aylarında (Aralık, Ocak, Şubat) meydana gelen

petrol sızıntılarının boyutlarının daha fazla olduğu tespit etmişlerdir. Sevgili vd., (2022) de çalışmalarında ilkbahar aylarında meydana gelen kazalar sonucunda petrol sızıntısı olma ihtimalinin daha yüksek olduğunu ileri sürmüşlerdir. Park & Lee, (2024) ise araştırmalarında petrol sızıntısı miktarının sonbaharda en yüksek, ilkbaharda ise en düşük seviyede gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Kışın oluşan çevresel şartların gemiler ve gemi trafiği üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle kaza oluşumunda olumsuz mevsimsel şartlar etkili olmaktadır (Whitfield, 2003; Burgherr, 2007).

Görüş, hava durumu ve kaza zamanı düğümleri Karşılıklı Bilgi Analizi sonuçlarına göre sınıf değişkeni üzerinde en az etkiye sahip üç düğümdür. Hava durumu REF'inin benzer çalışmalarda da sızıntı boyutu üzerinde etki düzeyi en az olan düğümlerden biri olduğu görülmektedir (Çakır vd., 2021; Sevgili vd., 2022; Kaptan & Bayazıt, 2024). Çalışmanın TAN analizlerinden elde edilen sonuçlara göre deniz kazalarının çoğunlukla iyi hava durumu ve iyi görüş durumunda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum geçmişte yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Weng ve Li, (2017) ve Fan vd., (2022) yaptıkları çalışmada deniz kazalarının gerçekleşme oranlarının iyi görüş ve sakın havada daha fazla olduğunu ifade ederek benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Ayrıca bu çalışmada deniz kazaların gerçekleşme oranının gündüz daha yüksek olduğu tespit edilmiş ve yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Weng & Yang, 2015; Fan vd., 2020; Çakır vd., 2021; Sevgili vd., 2022). Bu durumda sakın havalarda ve iyi görüşte gemi personelinin dikkatinin daha az olduğu söylenebilir. Diğer bir deyişle olumlu çevresel şartlarda yapılan seyir ve operasyonlar durumsal farkındalık kaybına sebep olabilir. Dalton & Jin, (2010) ise sızıntı boyutunun kötü hava koşullarında ve gece daha büyük olduğu ifade etmişlerdir.

Sınıf değişkeni üzerinde etkisi irdelenen bir diğer düğüm ise kaza bölgesi düğümüdür. Bu düğüm 6 adet REF'ten oluşmaktadır. Kirlilik boyutu üzerinde en fazla etkiye sahip olan REF'in kıyı suları (kıyısal) olduğu tespit edilmiştir. Kıyı sularını (kıyısal), liman ve açık deniz takip etmektedir. Cao vd. (2023), deniz kazalarıyla ilgili çalışmalarında TAN analizleri sonucunda kıyısal sularda ve limanlarda deniz kazalarının gerçekleşme ihtimalinin oldukça yüksek olduğunu ileri sürmüşlerdir. Li vd., (2023) çalışmalarında deniz kazalarının çoğunun açık denizde meydana geldiğini (%25,3) ve bunu sırasıyla kıyısal sular (%20,8) ve limanın (%20,1) takip ettiğini ortaya koymuşlardır. Talley & Anderson (1996), petrol sızıntılarıyla sonuçlanan deniz kazalarının kıyı sularında okyanus yollarına göre daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Weng & Li, (2019) de çalışmalarında kıyısal sularda ve liman bölgelerinde deniz kazalarının gerçekleşme oranının daha fazla olduğunu ifade ederek çalışma ile benzer

sonuçlar elde etmişlerdir. Çakır vd., (2021), çalışmalarında petrol sızıntısıyla sonuçlanan deniz kazaların büyük çoğunluğunun nehirde ve kıyısal sularda meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Bu durum kıyısal suların deniz kazalarına açık olduğunu göstermektedir. Kıyı sularında trafik yoğunluğu ve kısıtlı seyir imkanları gibi olumsuzluklar nedeniyle deniz kazaları sonucu kirlilik gerçekleşebilir.

Farklı kirlilik boyutlarının ortalama TRI değerleri hesaplanarak ve önceliklendirilerek, ilgili REF'lerin kirlilik boyutu üzerindeki etkisi tespit edilebilir. TRI değeri ne kadar büyükse, ilgili düğümün kirlilik boyutu üzerindeki etkisi o kadar fazladır (Tablo 12). Tablo 12'de kirlilik boyutu düğümü için önemli REF'lerin TRI değerleri verilmiştir. Bu sıralamada hem benzerlikler hem de farklıklar bulunmaktadır. Ortalama TRI değerleri en büyükten en küçüğe doğru sıralandığında gemi tipi, madde, kaza türü, gemi yaşı, boy şeklinde olduğu görülmüştür. Gemi tipi düğümü Karşılıklı Bilgi analizinde olduğu gibi ilk sıradadır. TRI analizi sonucunda madde düğümü ikinci sırada yer alırken diğer düğümlerin sıralamasında değişiklik olmamıştır (Tablo 12). Etkileme Gücü Diyagramında kirlilik boyutu-kaza türü, kirlilik boyutu-gemi tipi ve kirlilik boyutu-gemi yaşı arasında güçlü bir bağımlılık olduğu görülmüştür (Şekil 14). MI, Etkileme Gücü Diyagramı ve TRI analizleri karşılaştırıldığında sonuçların birbirleriyle tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum çalışma için oluşturulan TAN modelinin güvenilir ve uygun olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın TAN modeli ile yapılan vaka çalışmasında büyük sızıntıların oluşmasında etkili olan REF değerleri incelenmiştir. Büyük sızıntıların gerçekleşmesinde etkili olan REF'lerin Karşılıklı Bilgi Analizi çıktılarına paralel olduğu görülmüştür. Bu sızıntıların oluşmasında en yüksek etkiye sahip gemi tipinin petrol tankerleri olduğu tespit edilmiştir. Bu durum deniz ortamına bir seferde dökülen petrol miktarının taşıdıkları yük nedeniyle petrol tankerlerinden kaynaklandığını bir kez daha göstermektedir (Akhtar vd., 2012; Jin vd., 2019). Büyük sızıntıların oluşmasında çatma/çatışma kazaları en yüksek etkiye sahiptir. Bu durum ITOPF tarafından 2024 yılında yayınlanan istatistik raporuyla ve bu çalışmanın diğer sonuçları ile paralellik göstermektedir. Bu tür deniz kazaları sonucunda gemi bütünlüğünün bozulması sıklıkla görülmektedir. Gemi yaşının 16-20 olması durumunda deniz kazası sonucu büyük sızıntıların gerçekleşme olasılığının en yüksek olduğu görülmüştür. Bu yaş aralığı takip eden REF'lerin ise 0-5 ve 6-11 olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda gemi yaşı ile deniz kazası arasında her zaman pozitif bir ilişki olmadığı anlaşılmıştır. Fan vd., (2020) çalışmalarında benzer sonuçlar elde etmişken Yip vd., (2011) ve Çakır vd., (2021),

çalışmalarında gemi yaşı ve sızıntı durumu arasında tutarlı bir ilişki olmadığını ifade etmişlerdir.

Başar (2010), Marmara Deniz’inde meydana gelen tanker kazaları sonrasındaki petrol dağılımını GNOME Modeli ile petrolün sudaki davranışını ise ADIOS-II Modeli ile belirlemiş olup, dağılan petrolün Marmara’nın açıklarına doğru sürüklendiğini tespit etmiştir. Özellikle petrolün dökülme noktası Karadeniz’den gelen İstanbul Boğazı akıntısı etkisi altında kalarak Marmara Denizinde geniş bir yayılıma maruz kaldığını bildirmiştir. Bu tez çalışmasında tankerlerin demirleme noktası olan G Demir Sahası’nda yapmış olduğumuz dağılımda ise akıntının etkisiyle Marmara Denizinin kuzeydoğu yönünde petrolün hareket ettiği tespit edilmiştir. İstanbul Boğazı akıntısının Marmara Denizinde oluşabilecek bir petrol dökülmesinde dağılımın alansal ve zamansal olarak yönünün belirlenmesinde en önemli kriterlerden biri olduğu anlaşılmaktadır. TAN sonucundan elde edilen veriler doğrultusunda kış mevsiminde deniz kazaları sonucu petrol sızıntılarının daha yoğun olduğu anlaşılmış, mevsime bağlı olarak akıntı profillerinin petrol dağılımı simülasyon çalışmalarında dikkat edilmesi gereken bir faktör olduğu ortaya çıkmıştır. Olita vd., (2012) yaptıkları çalışmada denize dökülen petrolün dağılımının zamansal ve alansal değişkenliğini gözlemlemiş, kuvvetli rüzgârlar etkisinde ve kış aylarında en yüksek değerlere sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Uğurlu vd., (2016) yapmış oldukları çalışmada Türk Boğazlarında deniz kazaları sonrasındaki can emniyeti ve ekonomik kayıpları belirlemişlerdir. Farzingohar vd., (2011) çalışmalarında liman bölgesinde petrol dağılımlarını ekonomik kayıplara yol açtığını bildirmiştir. Her iki çalışmada da tehlikeli bu su yollarında meydana gelecek kazaların büyük oranda ekonomik kayıplara yol açacağını ortaya koymuşlardır. Galieriková & Materna, (2020), çalışmalarında petrol sızıntılarının küresel deniz taşımacılığı üzerindeki etkilerini araştırmış ve kirliliğin gemi trafiği üzerindeki olumsuz etkilerinden bahsetmişlerdir. Özellikle gemi trafiğinin yoğun olduğu sularda meydana gelen petrol sızıntılarının gemi trafiğini etkilemesi nedeniyle dünya ticaretini de olumsuz yönde etkilediğini ve ekonomik kayıpları arttırdığını ifade etmişlerdir. Elde ettiğimiz petrol dağılımında özellikle İstanbul ili sınırları içerisinde ekonomik ve çevre değeri yüksek alanları etkilemiş olduğundan ekonomik kayıpların da dramatik boyutlara ulaşabileceği anlaşılmaktadır.

Marmara Denizi ve Adalar Bölgesi 2021 yılından itibaren Özel Çevre Koruma Bölgesi olarak ilan edilmiştir (Resmî Gazete, 2021). Son yıllarda bu özel deniz alanında müsilaj etkisi altında çevre sorunlarının yaşanmakta olduğu bilinmektedir (Savun-Hekimoğlu, &

Gazioğlu, 2021; Ertürk & Erten, 2023). Dalton & Jin (2020), çalışmalarında petrol kirliliğinin özel deniz alanlarında olumsuz etkiler ortaya çıkarttığını ifade etmişlerdir. Gibson vd., (2019) yaptıkları araştırmada gemi kaynaklı kirliliklerin özellikle özel çevre koruma bölgelerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalar ışığında G Bölgesi Demirleme Sahasında oluşabilecek bir petrol kirliliğinin özel bir alan olan Marmara Denizi'ni olumsuz yönde etkileyeceği anlaşılmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmaları sonrasında bu bölgede oluşabilecek petrol sızıntılarının hızla kıyı bölgesine ulaştığı ve bu nedenle kıyısız alanları etkileyeceği belirlenmiştir. Öte yandan petrol sızıntıları, rüzgâr ve akıntıyla sürüklenerek plajları ve sahil alanlarını kirletmektedir. Ayrıca deniz çevresine zarar vererek kirliliğe, deniz ortamının ekolojik yapısı ve deniz canlıları üzerinde de dramatik etkilere neden olmaktadır (Simecek-Beatty & Lehr, 2017). Bu durum, Marmara Denizi gibi önemli çevresel, sosyal ve turistik değerlere sahip alanlar için oldukça önemlidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Odağında insan olan ve insanların ihtiyaçlarını karşılamak için gerçekleştirilen faaliyetlerin tümünün yaşadığımız çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu olumsuz etkileri en aza indirmek ve mevcut yaşamsal kaynakları korumak oldukça önemlidir. Bu nedenle günümüzde çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik sıklıkla gündeme gelen kavramlardır. Bu kavramların bir parçası olarak mavi ekonomi kapsamında yeşil deniz taşımacılığı ve gemiler için temiz enerji konuları da dikkat çekici bir hal almaktadır. Bunun yanı sıra temiz enerji kaynakları endüstri faaliyetlerinde yerini almaya başlasa da petrol ve ürünlerine olan ihtiyaç yerini korumaktadır. Ayrıca petrol kirliliği riski devam etmektedir. Geçmiş yıllarda çevre felaketi ile sonuçlanan çok sayıda petrol sızıntısının meydana geldiği bilinmektedir. Bu tez çalışmasında petrol kirliliğiyle sonuçlanan deniz kazalarının anlaşılması ve petrol kirliliği üzerinde etkili olan risk faktörlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon uygulamasının petrol sızıntılarının bölge özelinde zamansal ve alansal hareketi izlenerek kirliliğe müdahale için uygun adımların belirlenmesinde yardımcı olması hedeflenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında deniz kaza raporları incelenmiş ve çalışmanın veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti kullanılarak deniz kazaları sonucunda meydana gelen petrol sızıntılarının oluşumunu anlamak için risk etki faktörleri belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında veri seti için uygun yöntemler belirlenmiş ve model öğrenimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında ise REF'leri anlamak ve değerlendirmek için TAN analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda petrol sızıntısıyla sonuçlanan kazaların en yüksek oranla (%57) çatma/çatışma kazaları olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçlarına göre petrol sızıntısıyla sonuçlanan kazalar %38 oranında kıyı sularında meydana gelmiştir. Kıyılara yakın bölgelerin yüksek petrol sızıntısı riskine sahip olduğunu söylenebilir. Bu durumda kıyı ve kıyıya yakın sularda seyir yapar gemilerin trafik yoğunluğu gibi engelleyici faktörleri göz önünde bulundurarak köprüüstü faaliyetlerini gerçekleştirmeleri gerekmektedir. Bunun yanı sıra çalışma sonuçlarında kıyısız ve limandan sonra en çok petrol sızıntı kazalarının açık denizlerde gerçekleştiği görülmüştür. Açık denizde gerçekleşecek bir petrol sızıntısına hızlı ve etkili bir şekilde müdahale etmenin zor olması, kirlilik boyutunun artmasına neden olmaktadır. Bu tez çalışmasının TAN analizi sonuçlarına göre petrol tankerlerinin karıştığı deniz kazaları sonucunda büyük ve orta

boyutta sızıntıların meydana geldiği tespit edilmiştir. Özellikle tankerlerin çatışmaları deniz ortamına bir seferde çok fazla petrolün dökülmesine neden olmaktadır. Tankerler için özel yaptırımların uygulamasına rağmen kirlilik kazalarının önüne geçilemediği açıkça görülmektedir.

TAN analizinden elde edilen veriler ile İstanbul Boğazı Güney Girişi G Demirleme Sahası'nda GNOME yazılımı kullanılarak bir petrol sızıntı simülasyonu uygulaması yapılmıştır. G Demirleme Sahası (Küçükçekmece) 5 Ocak 2023 tarihinden itibaren tehlikeli yük taşıyan gemilerin demirlemesi için belirlenmiş sahadır. Ayrıca bu demirleme sahasını da kapsayan deniz alanı ‘‘Marmara Denizi ve Adalar Bölgesi’’ Özel Çevre Koruma Bölgesi olarak ilan edilmiştir. Yapılan simülasyon sonucunda meydana gelen petrol sızıntısının ilk 6 saatte kıyıya ulaşmaya başladığı ve 24 saat gibi kısa bir sürede tamamına yakınının kıyıya ulaştığı görülmüştür. Bu durum petrol sızıntılarının çevre üzerinde daha büyük etki yaratabileceğini göstermektedir. Öte yandan petrol sızıntısının ilk etki süresi, müdahale öncelikleri hakkında karar vermede etkili olabilir.

Bu çalışmanın en önemli çıktılarından biri yapılan simülasyon sonucunda petrol döküntüsünün 6 saat gibi kısa bir sürede karaya ulaşmaya başlamasıdır. Bu sonuç göstermektedir ki petrolün hareketinin anlaşılması doğrudan kirliliğe müdahale için önemli bir adımdır. Petrol döküntüsüne kısa sürede müdahale etmek kirliliğin yayılmasını ve dolayısıyla çevre üzerindeki etkisini azaltacaktır. Çalışmanın diğer bir önemli çıktısıysa petrol tankeri haricindeki gemilerinde tankerler kadar kirlilikle sonuçlanan kazalara neden olmasıdır. Özellikle büyük tonajlara sahip gemiler taşıdıkları yakıtlar nedeniyle kirliliğe sebep olmaktadırlar. Çalışma sonucuna göre petrol sızıntıları çocuklukla kış aylarında, gündüz, sakın havada ve iyi görüş koşullarında meydana gelmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında olumlu koşullarda seyir yapmanın gemi personeli üzerinde aşırı rahatlama, dikkatsizlik gibi olumsuz etkilere sahip olduğu söylenebilir.

Petrol sızıntılarına acil müdahale, müdahale kapasitesi ve temizleme teknikleri gibi faktörler hesaba katılmamıştır. Bu doktora tezi çalışması, petrol sızıntılarının risklerinin anlaşılması ve değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Ayrıca çalışma sonucunda elde edilen petrolün zamansal ve alansal hareketi gibi veriler yerel makamların petrol sızıntısına acil müdahale yöntemlerini etkin bir şekilde yönetmeleri için yararlı olabilir. Bu nedenle, gelecekte bu konuda yapılacak akademik çalışmalar için araştırmacılara faydalı olabilecek öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Çalışmada sonuçları İstanbul Boğazı Güney Girişi G Demirleme Sahası'nda gerçekleşebilecek bir kirliliği değerlendirmek için kullanılabilir. Etkili ve zamanında müdahale için kirlilik ekipmanlarının miktarı ve yeri oldukça önemlidir. Bu malzemeler yeterli miktarda ve erişilebilir olmalıdır. Acil durum planının oluşturulması ve sızıntı müdahale operasyonlarının yönetimi ve kontrolü oldukça önemlidir. Bu nedenle çalışma sonuçları bu bölgede meydana gelebilecek herhangi bir kirliliğe müdahale ve kirlilikle mücadele için gerekli ekipmanları depolama bölgelerinin belirlenmesinde fayda sağlayabilir. Buna ek olarak sahaya özel risk kontrol ve azaltma seçeneklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Ayrıca çalışmadan elde edilen sonuçlar farklı bölgeler içinde kullanılabilir. Petrol sızıntısının yeri ve boyutu müdahale yöntemlerini, stratejilerini ve gerekli önlemleri belirlemede oldukça önemlidir.
- Suyun dinamik yapısı ve akışkan doğası nedeniyle kirliliğin önlenmesi imkânsız gibi görünmektedir. Fakat doğru ve zamanında yapılan eylem ile kirlilik durumu kontrol altına alınabilir. Bu durumu desteklemek amacıyla kirlilik için risk oluşturabilecek bölgelerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Risk altındaki bölgeler belirlenerek bu bölgeler özelinde çalışmalar yapılabilir. Gerçek zamanlı bir müdahaleyi odak noktası olarak belirleyecek bu çalışmalar ile kirliliğe erken müdahalede bulunulabilir. Sızıntının erken tespit edilmesi, takibi ve hızlı müdahale için sensörler, uzaktan algılama araçları, uydu görüntüleri gibi ileri teknolojiden yararlanılabilir. Bu sistemlerinin birbirine ve diğer veri tabanlarına entegre edilerek kullanılması olası kirlilik durumları için erken uyarı sistemlerini geliştirebilir. Sızıntının kontrol altına alınması erken ve etkili bir müdahaleyle mümkünken deniz ekosistemi ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerin de en aza indirilmesini sağlayabilir.
- Çalışmada BayesFusion Genie 5.0 akademik yazılımı kullanılarak bir TAN modeli oluşturulmuştur. Bu yazılım bir makine öğrenimi ve istatistiksel modelleme aracıdır. Dinamik modellemeye imkân tanıyan bu yazılım diğer modellerle birleştirilerek (uzaktan algılama yöntemleri vb.) disiplinler arası bir çalışma gerçekleştirilebilir. Ayrıca oluşturulan TAN modelinde hem tankerlere hem de diğer gemi türlerine (genel kargo, dökme yük, konteyner vb.) ait veriler kullanılmıştır. Bu nedenle modelden elde edilen çıktılar farklı bölgeler ve farklı

gemi türleri için yapılacak simülasyon uygulamalarında da kullanılabilir. Böylelikle bölge özelinde çeşitli kirlilik senaryoları oluşturulabilir.

- TAN analizlerinden elde edilen sonuçlara göre petrol sızıntıları çoğunlukla kış aylarında, kıyısal alanlarda, çatma/çatışma kazaları sonucunda, gündüz, sakin havada ve iyi görüş koşullarında meydana gelmiştir. Ayrıca petrol tankerinin çoğunlukta olduğu kazalar sonucunda deniz ortamına dökülen en fazla kirlletici maddenin Fuel Oil olduğu tespit edilmiştir. Özellikle gündüz saatleri ve sakin hava koşullarında, iyi görüş şartlarında kazaların gerçekleşmesi dikkat çekicidir. Bu durum normal seyir koşullarında gemi personelinin uygulamalarını rutin şekilde yaptıklarını gösterebilir. Olumlu çevresel şartlarda yapılan seyir ve operasyonların durumsal farkındalık kaybına sebep olduğu söylenebilir. Bu nedenle gemi kaptanları ve personel şirket tarafından uyarılmalı ve şirket prosedürlerinde yer alan köprüüstü talimatlarının dikkatli ve zamanında uygulandığı kontrol edilmelidir. Ayrıca şirket tarafından bu durumla ilgili tavsiyeler yayınlanabilir.
- Bu tezde literatürde yaygın bir şekilde kullanılan NOAA tarafından geliştirilen GNOME yazılımı ile simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. GNOME, gerekli veriler aktarıldığında istenilen bölgede sızıntı hareketlerini takip etmek için kullanılan güvenilir bir yazılımdır. Çalışmayı geliştirmek için suyun dinamik yapısını, tuzluluk, sıcaklık gibi değerleri de göz önünde bulunduran farklı yöntemlerle birbirine entegre edilmiş simülasyon modelleri de kullanılabilir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalarda bu bölgede gerçekleşebilecek bir petrol sızıntısının maliyet tahminleri araştırılabilir. Maliyet türü hesaplamaları kirliliği önlemek için alınan tedbirlerin maliyetleri, temizleme maliyetleri ve zararların tazmin maliyetleri şeklinde yapılabilir. Uygun müdahale zamanı, müdahale yöntemleri ve müdahale ekipmanlarının tespiti yapılarak detaylı bir fayda/maliyet analizi gerçekleştirebilir. Ayrıca dökülen yerin fiziksel ve biyolojik özellikleri, dökülen petrolün özellikleri ve boyutu ile temizleme maliyetleri arasındaki ilişki araştırılabilir. Müdahalenin zamanında yapılabilmesi için kirliliğin gerçekleştiği bölge de önem arz etmektedir. Açık denizde olan bir kirlilik kazası ile kıyısal sularda ya da nehirde gerçekleşen bir kirlilik kazasına müdahale aynı zamanda ve aynı şekilde olmayacaktır. Diğer bir deyişle sızıntının gerçekleştiği yerin sızıntıyla ilgili maliyetler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Ayrıca bazı kaza türlerinin, diğerlerine göre daha yüksek oranda petrol sızıntısıyla ilişkili olması

beklenmektedir. Bununla birlikte çeşitli seçeneklerin maliyet etkinliğini değerlendirirken bu durumları dikkate almak ve farklı kaza türlerini önlemeyi amaçlayan risk kontrol seçenekleri için farklı kriterler kullanılabilir. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalarda bu konulara odaklanılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Abascal, A. J., Castanedo, S., Medina, R., & Liste, M. (2010). Analysis of the reliability of a statistical oil spill response model. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2099-2110.
- Abdolshah, M., Teimouri, M., & Rahmani, R. (2017). Classification of X-Ray images of shipping containers. *Expert Systems with Applications*, 77, 57-65.
- Adedigba, S. A., Oloruntobi, O., Khan, F., & Butt, S. (2018). Data-driven dynamic risk analysis of offshore drilling operations. *Journal of petroleum science and engineering*, 165, 444-452.
- Afenyo, M., Khan, F., Veitch, B., & Yang, M. (2017). A probabilistic ecological risk model for Arctic marine oil spills. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1494-1503.
- Akhtar, J., Bjørnskau, T., & Jean-Hansen, V. (2012). Oil spill risk analysis of routeing heavy ship traffic in Norwegian waters. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 11, 233-247.
- Akhtar, M. J., & Utne, I. B. (2014). Human fatigue's effect on the risk of maritime groundings—A Bayesian Network modeling approach. *Safety science*, 62, 427-440.
- Alyami, H., Yang, Z., Riahi, R., Bonsall, S., & Wang, J. (2019). Advanced uncertainty modelling for container port risk analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 123, 411-421.
- Amir-Heidari, P., & Raie, M. (2019). A new stochastic oil spill risk assessment model for Persian Gulf: Development, application and evaluation. *Marine pollution bulletin*, 145, 357-369.
- Anderson, E. E., & Talley, W. K. (1995). The oil spill size of tanker and barge accidents: Determinants and policy implications. *Land Economics*, 216-228.
- Anderson, K., & Bows, A. (2012). Executing a Scharnow turn: reconciling shipping emissions with international commitments on climate change. *Carbon management*, 3(6), 615-628.
- Andersson, K., Baldi, F., Brynolf, S., Lindgren, J. F., Granhag, L., & Svensson, E. 2016. *Shipping and the Environment* (pp. 3-27). Springer Berlin Heidelberg.
- Anstey, F. (2008, October). Ballast water management: a time for action. In *Proceedings of the International Maritime Lecturers Association 16th Conference on Met* (pp. 14-17).
- Arslan, O., & Turan, O. (2009). Analytical investigation of marine casualties at the Strait of Istanbul with SWOT–AHP method. *Maritime Policy & Management*, 36(2), 131-145.

- Arzaghi, E., Abbassi, R., Garaniya, V., Binns, J., & Khan, F. (2018). An ecological risk assessment model for Arctic oil spills from a subsea pipeline. *Marine pollution bulletin*, 135, 1117-1127.
- Asif, Z., Chen, Z., An, C., & Dong, J. (2022). Environmental impacts and challenges associated with oil spills on shorelines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6), 762.
- Avrupa Komisyonu. (2022a, Kasım 25). MEMO, /05/438, Third Maritime Safety Package, Brussels, 23 November 2005. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/memo_05_438/MEMO_05_438_EN.pdf adresinden alınmıştır.
- Avrupa Komisyonu. (2022b, Kasım 26). Communication From The Commission To The European Parliament And The Council, On A Second Set Of Community Measures On Maritime Safety Following The Sinking Of The Oil Tanker Erika. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52000DC0802&from=EN> adresinden alınmıştır.
- Avrupa Komisyonu. (2023, Aralık 25). Fourth annual report from the European Commission on CO2 emissions from maritime Transport (period 2018-2021), European Commission https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-03/swd_2023_54_en.pdf adresinden alınmıştır.
- Baksh, A. A., Abbassi, R., Garaniya, V., & Khan, F. (2018). Marine transportation risk assessment using Bayesian Network: Application to Arctic waters. *Ocean Engineering*, 159, 422-436.
- Balmat, J. F., Lafont, F., Maifret, R., & Pessel, N. (2009). MARitime RISk Assessment (MARISA), a fuzzy approach to define an individual ship risk factor. *Ocean engineering*, 36(15-16), 1278-1286.
- Balogun, A. L., Yekeen, S. T., Pradhan, B., & Yusof, K. B. W. (2021). Oil spill trajectory modelling and environmental vulnerability mapping using GNOME model and GIS. *Environmental Pollution*, 268, 115812.
- Banda, O. A. V., Goerlandt, F., Kuzmin, V., Kujala, P., & Montewka, J. (2016). Risk management model of winter navigation operations. *Marine pollution bulletin*, 108(1-2), 242-262.
- Bandara, U. C., Yapa, P. D., & Xie, H. (2011). Fate and transport of oil in sediment laden marine waters. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(3), 145-156.
- Başar, E. (2010). Weathering and oil spill simulations in the aftermath of tanker accidents at the junction points in the Marmara Sea. *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(2), 260-265.
- Başar, E., Sivri, N., Uğurlu, Ö., & Sönmez, V. Z. (2018). Potential impacts of oil spill damage around the planned oil rigs at the Black Sea.

- Başar, E., Kose, E., & Guneroglu, A. (2006). Finding risky areas for oil spillage after tanker accidents at Istanbul strait. *International journal of environment and pollution*, 27(4), 388-400.
- 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.
- Bayes, T. (1958). An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Biometrika*, 45(3-4), 296-315.
- BayesFusion, L. (2024, Şubat 20). GeNIe modeler, BayesFusion, LLC, Pittsburgh, PA. <https://www.bayesfusion.com/genie/> adresinden alınmıştır.
- Baykut, F., Aydın, A., Artüz, I. 1985. Scientific investigation of environmental problems caused by tanker fires. *Istanbul University Environmental Problems Research Centre Publications*.
- Bătrâncă, G. (2007). Risk assessment. Ship-Shore Interface Safe Working Practices, *Nautical Press*, Constanta 70-81.
- BEAMER. (2022). The French marine casualties investigation board, Erika Report, Report of The Enquiry into the Sinking of the Erika off the Coasts of Brittany on 12 December 1999.
- Beegle-Krause, J. (2001). General NOAA oil modeling environment (GNOME): a new spill trajectory model. In *International oil spill conference* (Vol. 2001, No. 2, pp. 865-871). American Petroleum Institute.
- Beegle-Krause, C. J. (1999). GNOME: NOAA's next-generation spill trajectory model. In *Oceans' 99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 99CH37008)* (Vol. 3, pp. 1262-1266). IEEE.
- Belenli, T. (2020). İstanbul Boğazı'nda Yaşanan En Büyük Çevre Felaketi: İndependenta-Evriali Çarpışması ve Etkileri (15 Kasım 1979). *Turkish Studies*, 15, 2.
- Biksey, T. M., Schultz, A. C., Bernhardt, A. M., Marion, B., & Peterson, C. (2010). Ecological and human health risk assessment. *Water Environment Research*, 82(10), 2067-2094.
- BMA. (2002, Kasım 19). Bahamas Maritime Authority, Prestige Report Investigation Report, <https://www.bahamasmaritime.com/wp-content/uploads/2020/10/BMA-Investigation-Report-Hull-failure-and-loss-of-the-Prestige.pdf> adresinden alınmıştır.
- Bozkurtoğlu, Ş. N. E. (2017). Modeling oil spill trajectory in Bosphorus for contingency planning. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), 57-72.
- Bragg, J. R., Prince, R. C., Harner, E. J., & Atlas, R. M. (1994). Effectiveness of bioremediation for the Exxon Valdez oil spill. *Nature*, 368(6470), 413-418.

- Brakstad, O. G., Nordtug, T., & Throne-Holst, M. (2015). Biodegradation of dispersed Macondo oil in seawater at low temperature and different oil droplet sizes. *Marine pollution bulletin*, 93(1-2), 144-152.
- Brynolf, S., Lindgren, J. F., Andersson, K., Wilewska-Bien, M., Baldi, F., Granhag, L., ... & Zetterdahl, M. (2016). Improving environmental performance in shipping. *Shipping and the environment: Improving environmental performance in marine transportation*, 399-418.
- Bukša, J., & Zec, D. (2005). Model of Maritime Risk Assessment in A Restricted Area of Navigation. *Pomorstvo*, 19(1), 173-193.
- Burgherr, P. (2007). In-depth analysis of accidental oil spills from tankers in the context of global spill trends from all sources. *Journal of hazardous materials*, 140(1-2), 245-256.
- Burrows, P., Rowley, C., & Owen, D. (1974). Torrey Canyon: a case study in accidental pollution. *Scottish Journal of Political Economy*, 21(3), 237-258.
- Butt, N. (2007). The impact of cruise ship generated waste on home ports and ports of call: A study of Southampton. *Marine Policy*, 31(5), 591-598.
- Cadiou, B., Riffaut, L., McCoy, K. D., Cabelguen, J., Fortin, M., Gélinaud, G., ... & Boulinier, T. (2004). Ecological impact of the “Erika” oil spill: Determination of the geographic origin of the affected common guillemots. *Aquatic Living Resources*, 17(3), 369-377.
- Cakir, E., Sevgili, C., & Fiskin, R. (2021). An analysis of severity of oil spill caused by vessel accidents. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102662.
- Abascal, A. J., Castanedo, S., Medina, R., & Liste, M. (2010). Analysis of the reliability of a statistical oil spill response model. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2099-2110.
- Camilli, R., Di Iorio, D., Bowen, A., Reddy, C. M., Techet, A. H., Yoerger, D. R., ... & Fenwick, J. (2012). Acoustic measurement of the Deepwater Horizon Macondo well flow rate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(50), 20235-20239.
- Cao, Y., Wang, X., Wang, Y., Fan, S., Wang, H., Yang, Z., ... & Shi, R. (2023). Analysis of factors affecting the severity of marine accidents using a data-driven Bayesian network. *Ocean Engineering*, 269, 113563.
- Capuzzo, J. M. (1987). Biological effects of petroleum hydrocarbons: assessments from experimental results (pp. 343-410). *Boesch, Rabalais (Eds.), Long-Term Environmental Effects of Offshore Oil and Gas Development*, Elsevier Science, London (1987).
- Cârlig, E. D., Robu, B., & Macoveanu, M. (2008). Quantification of environmental impact and risk induced by industrial activities on ground water quality: case study Cordun-Roman area, Romania. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 7(6).

- Carpenter, A. D., Dragnich, R. G., & Smith, M. T. (1991, March). Marine operations and logistics during the Exxon Valdez spill cleanup. In *International Oil Spill Conference* (Vol. 1991, No. 1, pp. 205-211). American Petroleum Institute.
- Carracedo, P., Torres-López, S., Barreiro, M., Montero, P., Balseiro, C. F., Penabad, E., ... & Pérez-Muñuzuri, V. (2006). Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system. *Marine Pollution Bulletin*, 53(5-7), 350-360.
- Carriger, J. F., Barron, M. G., & Newman, M. C. (2016). Bayesian networks improve causal environmental assessments for evidence-based policy. *Environmental science & technology*, 50(24), 13195-13205.
- Carro, D., Delgado, J., Vázquez, A., Barrientos, V., & Juncosa, R. (2008). Final disposal of the wastes associated with the oil spill of the tanker prestige through its stabilization with quicklime and granite fines. *Soil & Sediment Contamination*, 17(4), 393-410.
- Carson, R. T., Mitchell, R. C., Hanemann, M., Kopp, R. J., Presser, S., & Ruud, P. A. (2003). Contingent valuation and lost passive use: damages from the Exxon Valdez oil spill. *Environmental and resource economics*, 25, 257-286.
- CEDRE. (2023a, 09 Şubat 2023). Centre for Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution, <https://wwz.cedre.fr/en/Resources/Spills/Spills/Exxon-Valdez> adresinden alınmıştır.
- CEDRE. (2023b, 08 Şubat 2023). Centre for Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution, <https://wwz.cedre.fr/en/Resources/Spills/Spills/Independenta> adresinden alınmıştır.
- CEDRE. (2023c, 08 Şubat 2023). Centre for Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution, <https://wwz.cedre.fr/en/Resources/Spills/Spills/Erika> adresinden alınmıştır.
- CEDRE. (2023d, 09 Şubat 2023). Centre for Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution, <https://wwz.cedre.fr/en/Resources/Spills/Spills/Prestige> adresinden alınmıştır.
- Chan, F. T., MacIsaac, H. J., & Bailey, S. A. 2015. Relative Importance of Vessel Hull Fouling and Ballast Water as Transport Vectors of Nonindigenous Species to the Canadian Arctic. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72(8), 1230-1242.
- Chang, S. E., Stone, J., Demes, K., & Piscitelli, M. (2014). Consequences of oil spills: a review and framework for informing planning. *Ecology and Society*, 19(2).
- Chen, J., Zhang, W., Wan, Z., Li, S., Huang, T., & Fei, Y. (2019a). Oil spills from global tankers: Status review and future governance. *Journal of cleaner production*, 227, 20-32.

- Chen, J., Huang, T., Xie, X., Lee, P. T. W., & Hua, C. (2019b). Constructing governance framework of a green and smart port. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(4), 83.
- Chiri, H., Abascal, A. J., Castanedo, S., & Medina, R. (2019). Mid-long term oil spill forecast based on logistic regression modelling of met-ocean forcings. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 962-976.
- Chiu, C. M., Huang, C. J., Wu, L. C., Zhang, Y. J., Chuang, L. Z. H., Fan, Y., & Yu, H. C. (2018). Forecasting of oil-spill trajectories by using SCHISM and X-band radar. *Marine pollution bulletin*, 137, 566-581.
- Chow, C. K. C. N., & Liu, C. (1968). Approximating discrete probability distributions with dependence trees. *IEEE transactions on Information Theory*, 14(3), 462-467.
- Chrastansky, A., & Callies, U. (2011). Using a Bayesian Network to Summarize Variability in Numerical Long-Term Simulations of a Meteorological–Marine System: Drift Climatology of Assumed Oil Spills in the North Sea. *Environmental modeling & assessment*, 16, 1-14.
- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from ship emissions: a global assessment. *Environmental science & technology*, 41(24), 8512-8518.
- Crist, P. (2009). *Greenhouse gas emissions reduction potential from international shipping* (No. 2009-11). OECD/ITF joint transport research centre discussion paper.
- Čulin, J., & Bielić, T. (2016). Plastic pollution from ships. *Pomorski zbornik*, 51(1), 57-66.
- ÇŞİDB-MGM. (2024, Eylül 10). T.C. Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Veri Değerlendirme. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H> adresinden alınmıştır.
- Daling, P. S., Singaas, I., Reed, M., & Hansen, O. (2002). Experiences in dispersant treatment of experimental oil spills. *Spill Science & Technology Bulletin*, 7(5-6), 201-213.
- Daling, P. S., Brandvik, P. J., Mackay, D., & Johansen, O. (1990). Characterization of crude oils for environmental purposes. *Oil and Chemical Pollution*, 7(3), 199-224.
- Dalton, T., & Jin, D. (2010). Extent and frequency of vessel oil spills in US marine protected areas. *Marine pollution bulletin*, 60(11), 1939-1945.
- Daniel, P., Claveau, M., Paradis, D., & Ulvoas, V. (2011). Use of Ensemble Prediction Techniques to Protect Sensitive Areas from Oil Spills. In *International Oil Spill Conference* (Vol. 2011, No. 1, p. abs237).
- Davidson, I. C., & Simkanin, C. (2012). The biology of ballast water 25 years later. *Biological Invasions*, 14, 9-13.

- Davies, A. J., & Hope, M. J. (2015). Bayesian inference-based environmental decision support systems for oil spill response strategy selection. *Marine pollution bulletin*, 96(1-2), 87-102.
- De La Fayette, L. A. (2009). The Sound Management of Wastes Generated at Sea-MARPOL, Not Basel. *Envtl. Pol'y & L.*, 39, 207.
- Deng, X., Liu, Q., Deng, Y., & Mahadevan, S. (2016). An improved method to construct basic probability assignment based on the confusion matrix for classification problem. *Information Sciences*, 340, 250-261.
- Deniz ticaret Odası, (2024, Ekim 01). <https://www.denizticaretodasi.org.tr/tr/sirkuler/istanbul-bogazi-guney-demirleme-sahalarina-iliskin-duyuru-hk-18806> adresinden alınmıştır.
- Depellegrin, D., & Pereira, P. (2016). Assessing oil spill sensitivity in unsheltered coastal environments: A case study for Lithuanian-Russian coasts, South-eastern Baltic Sea. *Marine pollution bulletin*, 102(1), 44-57.
- DNV. (2002, Nisan 15). Marine risk assessment, Offshore Technology Report 2001/063, Health and Safety Executive. https://www.academia.edu/40160227/HSE_Health_and_Safety_Executive_Marine_risk_assessment adresinden alınmıştır.
- Ding, L., Yang, Y., Wang, L., & Calin, A. C. (2020). Cross Efficiency Assessment of China's marine economy under environmental governance. *Ocean & Coastal Management*, 193, 105245.
- Doğan, E., & Burak, S. (2007). Ship-originated pollution in the Istanbul strait (Bosphorus) and Marmara Sea. *Journal of Coastal Research*, 23(2), 388-394.
- DTO. (2024, Eylül 05). Deniz Ticaret Odası. <https://iskenderun.denizticaretodasi.org.tr/tr/sirkuler/istanbul-bogazi-guney-demirleme-sahalarina-iliskin-duyuru-hk-18806?page=71> adresinden alınmıştır.
- Dubinsky, E. A., Conrad, M. E., Chakraborty, R., Bill, M., Borglin, S. E., Hollibaugh, J. T., ... & Andersen, G. L. (2013). Succession of hydrocarbon-degrading bacteria in the aftermath of the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico. *Environmental science & technology*, 47(19), 10860-10867.
- Duran, R., Romeo, L., Whiting, J., Vielma, J., Rose, K., Bunn, A., & Bauer, J. (2018). Simulation of the 2003 foss barge-point wells oil spill: A comparison between BLOSUM and GNOME oil spill models. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(3), 104.
- Eliopoulou, E., & Papanikolaou, A. (2007). Casualty analysis of large tankers. *Journal of Marine Science and Technology*, 12(4), 240-250.
- Eliopoulou, E., Papanikolaou, A., & Hamann, R. (2008). Risk analysis of large tankers. In *2nd Int. Workshop on Risk-Based Approaches in the Maritime Industry, Glasgow* (pp. 5-6).

- Elizaryev, A., Maniakova, G., Gabdulkhakov, R., Elizareva, E., Longobardi, A., Nurutdinov, A., & Khakimov, R. (2018). Numerical simulation of oil spills based on the GNOME and ADIOS. *Int. J. Eng. Technol*, 7(2), 24.
- Elmahi, M., Kattel, G. R., Abdallah, I. M., Larbi, B. R., Hamadanel, M., Nacira, C., ... & Almahi, A. (2024). Analyzing Oil Spill Dynamics along the Sudanese Coast Using Web GNOME Modeling. *Open Access Library Journal*, 11(4), 1-26.
- EMSA. (2004) European Maritime and Safety Agency 2004, Annual Report 2004.1-50.
- EMSA. (2023, Aralık 03). European Maritime and Safety Agency 2022. Annual overview of marine casualties and incidents 2022. https://www.emsa.europa.eu/publications/download/7207_4735/23.html adresinden alınmıştır.
- EMSA. (2024, Aralık 14). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024, European Maritime Safety Agency, 1-66. <https://www.emsa.europa.eu/emcip/items.html?cid=141&id=5352> adresinden alınmıştır.
- Embankment, A. (2002). Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. *MSC/Circ*, 1023.
- Encheva, S. (2015). Evaluation of reception facilities for ship-generated waste. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, 4(7), 51-54.
- Ertürk, A., & Erten, E. (2023). Unmixing of pollution-associated sea snot in the near surface after its outbreak in the sea of marmara using hyperspectral prisma data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20, 1-5.
- Eyring, V., Isaksen, I. S., Berntsen, T., Collins, W. J., Corbett, J. J., Endresen, O., ... & Stevenson, D. S. 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4735-4771.
- Falk, R., & Elver, H. (1999). Comparing Global Perspectives: the 1982 UNCLOS and the 1992 UNCED. In *Order for the Oceans at the Turn of the Century* (pp. 145-156). Brill Nijhoff.
- Fan, S., Blanco-Davis, E., Yang, Z., Zhang, J., & Yan, X. (2020). Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data-driven Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 203, 107070.
- Fan, S., Yang, Z., Wang, J., & Marsland, J. (2022). Shipping accident analysis in restricted waters: Lesson from the Suez Canal blockage in 2021. *Ocean Engineering*, 266, 113119.
- Farrington, J. W. 2014. Oil pollution in the marine environment II: fates and effects of oil spills. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 56(4), 16-31.
- Farzingerhar, M., Ibrahim, Z. Z., & Yasemi, M. (2011). Oil spill modeling of diesel and gasoline with GNOME around Rajaee Port of Bandar Abbas, Iran.

- Farzingohar, M., Bagheri, M., Gholami, I., Ibrahim, Z. Z., & Akhir, M. F. (2024). Mapping pollution dynamics: utilizing GNOME to model oil spill trajectories in tanker terminals. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-24.
- Fingas, M. (2013). Oil spills and their cleanup: introduction. In *Encyclopedia of Environmental Management* (pp. 1-17). Taylor and Francis New York.
- Fingas, M. (Ed.). (2014). *Handbook of oil spill science and technology*. John Wiley & Sons.
- Fingas, M. (2015). Review of the properties and behaviour of diluted bitumens. In *Proceedings of the thirty-eighth AMOP technical seminar, environment Canada, Ottawa, ON* (pp. 470-494).
- Fowler, T. G., & Sørgård, E. (2000). Modeling ship transportation risk. *Risk Analysis*, 20(2), 225-244.
- French, D. P., Schuttenberg, H. Z., & Isaji, T. (1999, June). Probabilities of Oil Exceeding Thresholds of Concern: Examples from An Evaluation for Florida Power and Light. In *Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar* (Vol. 1, pp. 243-270). Ministry Of Supply And Services, Canada.
- French-McCay, D. P. (2004). Oil spill impact modeling: development and validation. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 23(10), 2441-2456.
- Friedman, N., Geiger, D., & Goldszmidt, M. (1997). Bayesian network classifiers. *Machine learning*, 29, 131-163.
- Friis-Hansen, P., & Simonsen, B. C. (2002). GRACAT: software for grounding and collision risk analysis. *Marine Structures*, 15(4-5), 383-401.
- Galieriková, A., & Materna, M. (2020). World seaborne trade with oil: One of main cause for oil spills?. *Transportation research procedia*, 44, 297-304.
- Gao, X., Wu, Y., Yu, Q., & Dai, W. (2024). Data-driven Bayesian analysis of marine accidents in the English Channel. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1-30.
- Garrett, R. M., Pickering, I. J., Haith, C. E., & Prince, R. C. (1998). Photooxidation of crude oils. *Environmental science & technology*, 32(23), 3719-3723.
- Gasparotti, C. (2010). Risk assessment of marine oil spills. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 9(4).
- Gibson, M., Murphy, A. J., & Pazouki, K. (2019). Evaluation of environmental performance indices for ships. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, 152-161.
- Gill, D. A., Picou, J. S., & Ritchie, L. A. (2012). The Exxon Valdez and BP oil spills: A comparison of initial social and psychological impacts. *American Behavioral Scientist*, 56(1), 3-23.

- Glug, M., & Waş, J. (2018). Modeling of oil spill spreading disasters using combination of Langrangian discrete particle algorithm with Cellular Automata approach. *Ocean Engineering*, 156, 396-405.
- Goerlandt, F., & Montewka, J. (2015). A framework for risk analysis of maritime transportation systems: A case study for oil spill from tankers in a ship–ship collision. *Safety Science*, 76, 42-66.
- Goerlandt, F., Laine, V., Bal-Beşikçi, E., Baldauf, M., Al-Quhali, M. A., & Koldenhof, Y. (2019). End-user and stakeholder views on selected risk assessment tools for marine oil spill preparedness and response, including future research and development needs. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 13(1), 213-220.
- Gros, J., Nabi, D., Würz, B., Wick, L. Y., Brussaard, C. P., Huisman, J., ... & Arey, J. S. (2014). First day of an oil spill on the open sea: Early mass transfers of hydrocarbons to air and water. *Environmental science & technology*, 48(16), 9400-9411.
- Gu, Q., Zhu, L., & Cai, Z. (2009). Evaluation measures of the classification performance of imbalanced data sets. In *Computational Intelligence and Intelligent Systems: 4th International Symposium, ISICA 2009, Huangshi, China, October 23-25, 2009. Proceedings 4* (pp. 461-471). Springer Berlin Heidelberg.
- Gu, C., & Huo, J. (2020). Electric Ship, the Green Push Hand of Inland River Shipping Transformation. *China Water Transport News*, 6.
- Gulas, S., Downton, M., D'Souza, K., Hayden, K., & Walker, T. R. (2017). Declining Arctic Ocean oil and gas developments: Opportunities to improve governance and environmental pollution control. *Marine Policy*, 75, 53-61.
- Hänninen, M. (2014). Bayesian networks for maritime traffic accident prevention: Benefits and challenges. *Accident Analysis & Prevention*, 73, 305-312.
- Helle, I., Ahtiainen, H., Luoma, E., Hänninen, M., & Kuikka, S. (2015). A probabilistic approach for a cost-benefit analysis of oil spill management under uncertainty: a Bayesian network model for the Gulf of Finland. *Journal of environmental management*, 158, 122-132.
- Hooke, N. Modern shipping disasters 1963-1987. Les naufrages de 1963-1987. *Energy economics*, 731, 45.
- Iduk, U., & Samson, N. (2015). Effects and solutions of marine pollution from ships in Nigerian waterways. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(9), 81-90.
- IAPH. (2022, Aralık 20). International Assosiation of Ports and Harbors, <https://www.iaphworldports.org/n-iaph/wp-content/uploads/legal-db/B-2-INTERNATIONAL-CONVENTION.pdf> adresinden alınmıştır.
- IMO. (1995, Eylül 14). Interim Guidelines for the Approval of Alternative Methods of Design and Construction of Oil Tankers under Regulation 13F (5) of Annex I of

MARPOL73/68. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.66\(37\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.66(37).pdf) adresinden alınmıştır.

- IMO. (2002, Nisan 05). Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. *MSC/Circ. 1023; MEPC/Circ. 392, Ref T1/3.02, T5/1.01*. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/1023-MEPC392.pdf> adresinden alınmıştır.
- IMO. (2003, Temmuz 18). Revised Interim Guidelines for the Approval of Alternative Methods of Design and Construction of Oil Tankers under Regulation 13F (5) of Annex 1 of MARPOL 73/78'', Resolution MEPC, 110 (49). [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.110\(49\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.110(49).pdf) adresinden alınmıştır.
- IMO. (2018, Aralık 15). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MS-C-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20\(Fsa\)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20\(Secretariat\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MS-C-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20(Fsa)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20(Secretariat).pdf) adresinden alınmıştır.
- IMO. (2022a, Kasım 11). International Maritime Organization Publishing, Prevention of pollution by garbage from ships. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/garbage-default.aspx> adresinden alınmıştır.
- IMO. (2022b, Kasım 12). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) adresinden alınmıştır.
- IMO. (2022c, Aralık 02). United Nations Convention on the Law of the Sea <https://www.imo.org/en/ourwork/legal/pages/unitednationsconventiononthelawofthesea.aspx> adresinden alınmıştır.
- IMO. (2022d, Aralık 02). International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage (CLC). [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-Civil-Liability-for-Oil-Pollution-Damage-\(CLC\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-Civil-Liability-for-Oil-Pollution-Damage-(CLC).aspx) adresinden alınmıştır.
- IMO. (2023a, Ocak 02). List of IMO OPRC-HNS related guidance and manuals. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/List-of-IMO-OPRC-HNS-related-guidance-and-manuals.aspx> adresinden alınmıştır.
- IMO. (2023b, Ocak 04). International Convention on the Establishment of an International Fund for Compensation for Oil Pollution Damage (FUND). [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-the-Establishment-of-an-International-Fund-for-Compensation-for-Oil-Pollution-Damage-\(FUND\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-the-Establishment-of-an-International-Fund-for-Compensation-for-Oil-Pollution-Damage-(FUND).aspx) adresinden alınmıştır.

- IMO. (2023c, Ocak 05). International Convention on Civil Liability for Bunker Oil Pollution Damage (BUNKER). [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-Civil-Liability-for-Bunker-Oil-Pollution-Damage-\(BUNKER\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-Civil-Liability-for-Bunker-Oil-Pollution-Damage-(BUNKER).aspx) adresinden alınmıştır.
- IOPC. (2012a, Kasım 01). Protocol of 2003 to the International Convention on the Establishment of an International Fund for Compensation for Oil Pollution Damage, 1992. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/235985/8490.pdf adresinden alınmıştır.
- IOPC. (2012b, Kasım 15). International Convention on Civil Liability for Bunker Oil Pollution Damage, 2001. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/235987/8489.pdf adresinden alınmıştır.
- IOPC. (2018, Haziran 01). The International Oil Pollution Compensation Funds, Liability and Compensation for Oil Pollution Damage 2018. https://iopcfunds.org/wp-content/uploads/2018/06/Text-of-Conventions_e.pdf adresinden alınmıştır.
- IOPC. (2022, Ekim 01). The International Oil Pollution Compensation Funds, Explanatory Note 2022. https://iopcfunds.org/wp-content/uploads/2022/10/explanatory-note_e.pdf adresinden alınmıştır.
- ITOPF. (2011, Mayıs 01). Fate of Marine Oil Spills. https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/TIPS_TAPS_new/TIP_2_Fate_of_Marine_Oil_Spills.pdf adresinden alınmıştır.
- ITOPF. (2022, Mart 05). Fate of Marine Oil Spills, Technical Information Report. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/tip-02-fate-of-marine-oil-spills/> adresinden alınmıştır.
- ITOPF. (2024, Ocak 25). Oil Tanker Spill Statistics, 2023. https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Company_Lit/Oil_Tanker_Spill_Statistics_2023 adresinden alınmıştır.
- ITOPF. (2025, Ocak 20). Oil Tanker Spill Statistics, 2024. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2024/> adresinden alınmıştır.
- Jiang, M., & Lu, J. (2020). The analysis of maritime piracy occurred in Southeast Asia by using Bayesian network. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 139, 101965.
- Jiang, M., Lu, J., Yang, Z., & Li, J. (2020). Risk analysis of maritime accidents along the main route of the Maritime Silk Road: a Bayesian network approach. *Maritime Policy & Management*, 47(6), 815-832.
- Jin, M., Shi, W., Yuen, K. F., Xiao, Y., & Li, K. X. (2019). Oil tanker risks on the marine environment: An empirical study and policy implications. *Marine Policy*, 108, 103655.

- Jolma, A., Lehtikoinen, A., Helle, I., & Venesjärvi, R. (2014). A software system for assessing the spatially distributed ecological risk posed by oil shipping. *Environmental Modelling & Software*, 61, 1-11.
- John, K. P., & Amedu, N. M. (2019). Assessment of port reception facilities and waste management control in Nigeria: case study:(Tin Can Island Port).
- Kaiser, M. J. (2008). A review of ship breaking and rig scrapping in the Gulf of Mexico. *Ocean Development & International Law*, 39(2), 178-199.
- Kamal, B., & Kutay, Ş. (2021). Assessment of causal mechanism of ship bunkering oil pollution. *Ocean & Coastal Management*, 215, 105939.
- Kamal, B., & Çakır, E. (2022). Data-driven Bayes approach on marine accidents occurring in Istanbul strait. *Applied Ocean Research*, 123, 103180.
- Kankara, R. S., Arockiaraj, S., & Prabhu, K. (2016). Environmental sensitivity mapping and risk assessment for oil spill along the Chennai Coast in India. *Marine Pollution Bulletin*, 106(1-2), 95-103.
- Kaptan, M., & Bayazit, O. (2024). Data-driven Bayesian risk assessment of factors influencing the severity of marine accidents in port areas. *Process Safety and Environmental Protection*, 192, 1094-1109.
- Kaya, İ. S. (2016). Gemi kaynaklı deniz kirliliğini önleme amaçlı sözleşmelerin uluslararası hukuk açısından değerlendirilmesi. *International Journal of Social Sciences and Education Research*, 2(4), 1310-1319.
- Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges. *Journal of marine science and engineering*, 9(2), 181.
- Ketkar, K. W., & Babu, A. J. G. (1997). An analysis of oil spills from vessel traffic accidents. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(1), 35-41.
- Kim, I. (2002). Ten years after the enactment of the Oil Pollution Act of 1990: a success or a failure. *Marine Policy*, 26(3), 197-207.
- King, T. L., Robinson, B., McIntyre, C., Toole, P., Ryan, S., Saleh, F., ... ve Lee, K. 2015. Fate of surface spills of Cold Lake Blend diluted bitumen treated with dispersant and mineral fines in a wave tank. *Environmental Engineering Science*, 32,3, 250-261.
- Kjærulff, U. B., & Madsen, A. L. (2009). Bayesian networks and influence diagrams: a guide to construction and analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 12, 1273.
- Knudsen, S. (2009). A precautionary tale: Assessing ecological damages after the Exxon Valdez oil spill. *U. St. Thomas LJ*, 7, 95.
- Kontovas, C. A., Psaraftis, H. N., & Ventikos, N. P. (2010). An empirical analysis of IOPCF oil spill cost data. *Marine pollution bulletin*, 60(9), 1455-1466.

- Köse, E., Başar, E., Demirci, E., Güneroğlu, A., & Erkebay, Ş. (2003). Simulation of marine traffic in Istanbul Strait. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11(7-8), 597-608.
- Lamine, S., & Xiong, D. (2013). Guinean environmental impact potential risks assessment of oil spills simulation. *Ocean engineering*, 66, 44-57.
- Lauritzen, S. L. (1995). The EM algorithm for graphical association models with missing data. *Computational statistics & data analysis*, 19(2), 191-201.
- Lecklin, T., Ryömä, R., & Kuikka, S. (2011). A Bayesian network for analyzing biological acute and long-term impacts of an oil spill in the Gulf of Finland. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2822-2835.
- Le Traon, P. Y., Reppucci, A., Alvarez Fanjul, E., Aouf, L., Behrens, A., Belmonte, M., ... & Zacharioudaki, A. (2019). From observation to information and users: The Copernicus Marine Service perspective. *Frontiers in Marine Science*, 6, 234.
- Lee, K., Boufadel, M., Chen, B., Foght, J., Hodson, P., Swanson, S., & Venosa, A. (2016). High-priority research needs for oil spills in Canada: summary of a royal society expert panel report on the behaviour and environmental impacts of crude oil released into aqueous environments. In *Proc, 39th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response* (pp. 966-991).
- Liang, X., Fan, S., Lucy, J., & Yang, Z. (2022). Risk analysis of cargo theft from freight supply chains using a data-driven Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108702.
- Li, G., Weng, J., & Hou, Z. (2021). Impact analysis of external factors on human errors using the ARBN method based on small-sample ship collision records. *Ocean Engineering*, 236, 109533.
- Li, H., Ren, X., & Yang, Z. (2023). Data-driven Bayesian network for risk analysis of global maritime accidents. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, 108938.
- Li, H., Zhou, K., Zhang, C., Bashir, M., & Yang, Z. (2024). Dynamic evolution of maritime accidents: Comparative analysis through data-driven Bayesian Networks. *Ocean Engineering*, 303, 117736.
- Li, K. X., Yin, J., Bang, H. S., Yang, Z., & Wang, J. (2014). Bayesian network with quantitative input for maritime risk analysis. *Transportmetrica A: Transport Science*, 10(2), 89-118.
- Li, X., Zhu, Y., Abbassi, R., & Chen, G. (2022). A probabilistic framework for risk management and emergency decision-making of marine oil spill accidents. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 932-943.
- Liu, Z., & Callies, U. (2019). Implications of using chemical dispersants to combat oil spills in the German Bight—Depiction by means of a Bayesian network. *Environmental Pollution*, 248, 609-620.

- Liubartseva, S., Federico, I., Coppini, G., & Lecci, R. (2021). Stochastic oil spill modeling for environmental protection at the Port of Taranto (southern Italy). *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112744.
- Loughney, S., & Wang, J. (2017). Bayesian Network Modelling of An Offshore Electrical Generation System for Applications Within An Asset Integrity Case for Normally Unattended Offshore Installations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 232(4), 402-420.
- Loureiro, M. L., Loomis, J. B., & Vázquez, M. X. (2009). Economic valuation of environmental damages due to the Prestige oil spill in Spain. *Environmental and Resource Economics*, 44, 537-553.
- Loureiro, M. L., Ribas, A., López, E., & Ojea, E. (2006). Estimated costs and admissible claims linked to the Prestige oil spill. *Ecological Economics*, 59(1), 48-63.
- Lu, L., Goerlandt, F., Tabri, K., Höglund, A., Banda, O. A. V., & Kujala, P. (2020). Critical aspects for collision induced oil spill response and recovery system in ice conditions: A model-based analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 66, 104198.
- Ma, L., Ma, X., & Chen, L. (2024). A data-driven Bayesian network model for pattern recognition of maritime accidents: A case study of Liaoning Sea area. *Process Safety and Environmental Protection*.
- MacAskill, N. D., Walker, T. R., Oakes, K., & Walsh, M. 2016. Forensic assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons at the former Sydney Tar Ponds and surrounding environment using fingerprint techniques. *Environmental Pollution*, 212, 166-177.
- Marine Copernicus. (2024, Eylül 10). Copernicus Marine Data Store. <https://data.marine.copernicus.eu/products?facets=main> adresinden alınmıştır.
- Matellini, D. B., Wall, A. D., Jenkinson, I. D., Wang, J., & Pritchard, R. (2013). Modelling dwelling fire development and occupancy escape using Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 114, 75-91.
- McCarthy, M. A. (2007). *Bayesian Methods for Ecology*. Cambridge University Press.
- McGenity, T. J., Folwell, B. D., McKew, B. A., & Sanni, G. O. (2012). Marine crude-oil biodegradation: a central role for interspecies interactions. *Aquatic biosystems*, 8, 1-19.
- Meel, A., & Seider, W. D. (2008). Real-time risk analysis of safety systems. *Computers & Chemical Engineering*, 32(4-5), 827-840.
- Meng, H., An, X., & Xing, J. (2022). A data-driven Bayesian network model integrating physical knowledge for prioritization of risk influencing factors. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 434-449.

- Milan, I., & Gomoiu, M. (2008). Causes and consequences of oil marine pollution. *Geo-Eco-Marina, Earth Sciences, Knowledge and Environment*, 14-22.
- Mishra, A. K., & Kumar, G. S. (2015). Weathering of oil spill: modeling and analysis. *Aquatic Procedia*, 4, 435-442.
- Montewka, J., Ståhlberg, K., Seppala, T., & Kujala, P. (2010). Elements of risk analysis for collision of oil tankers. *Risk, Reliability and Safety*, 1005-1013.
- Montewka, J., Weckström, M., & Kujala, P. (2013). A probabilistic model estimating oil spill clean-up costs—a case study for the Gulf of Finland. *Marine pollution bulletin*, 76(1-2), 61-71.
- Montewka, J., Ehlers, S., Goerlandt, F., Hinz, T., & Kujala, P. (2012). A model for risk analysis of RoPax ships—the Gulf of Finland case. In *11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference* (pp. 5544-5553). Curran Associates Inc. New York.
- Negro, M. G., Villasante, C. S., & Penela, A. C. (2007). Compensating system for damages caused by oil spill pollution: Background for the Prestige assessment damage in Galicia, Spain. *Ocean & Coastal Management*, 50(1-2), 57-66.
- NOAA/HMRAD, (1992). Oil Spill Case Histories, 1967-1991, Summaries of Significant U.S. and International Spills, Report No. HMRAD 92-11 to the U.S. Coast Guard Research and Development Center, NOAA/Hazardous Materials Response and Assessment Division, Seattle, WA, November, 1992.
- Nordam, T., Beegle-Krause, C. J., Skancke, J., Nepstad, R., & Reed, M. (2019). Improving oil spill trajectory modelling in the Arctic. *Marine pollution bulletin*, 140, 65-74.
- NRC. (2003, May 15). Oil in the Sea III: Inputs, Fates and Effects. *National Academies Press*. <http://www.nap.edu/catalog/10388.html>. adresinden alınmıştır.
- Olita, A., Cucco, A., Simeone, S., Ribotti, A., Fazioli, L., Sorgente, B., & Sorgente, R. (2012). Oil spill hazard and risk assessment for the shorelines of a Mediterranean coastal archipelago. *Ocean & Coastal Management*, 57, 44-52.
- Onwuegbuchunam, D. E., Ebe, T. E., Okoroji, L. I., & Essien, A. E. (2017). An analysis of ship-source marine pollution in Nigeria seaports. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(3), 39.
- Otay, E. N., & Yenigün, O. (2000, October). Volgoneft-248 oil spill in the Marmara Sea. In *Proc. 2nd International Conference on Oil Spills in the Mediterranean and Black Sea Regions* (Vol. 31, pp. 13-23).
- Öztürk, B., & Balcıoğlu, E. B. (2017). Notes on the fisheries compensation for the Independenta/Evriali incident in the Istanbul Strait, Turkey. *Notes*, 23(2).
- Park, M. H., & Lee, W. J. (2024). Marine oil spill analyses based on Korea Coast Guard big data from 2017 to 2022 and application of data-driven Bayesian Network. *Journal of Cleaner Production*, 436, 140630.

- Pearl, J. (1986). Fusion, propagation, and structuring in belief networks. *Artificial intelligence*, 29(3), 241-288.
- Pearl, J. (1988). Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference. Morgan kaufmann.
- Peterson, C. H., Rice, S. D., Short, J. W., Esler, D., Bodkin, J. L., Ballachey, B. E., & Irons, D. B. (2003). Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. *Science*, 302(5653), 2082-2086.
- Pettipas, S., Bernier, M., & Walker, T. R. (2016). A Canadian policy framework to mitigate plastic marine pollution. *Marine Policy*, 68, 117-122.
- Pristrom, S., Yang, Z., Wang, J., & Yan, X. (2016). A novel flexible model for piracy and robbery assessment of merchant ship operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 155, 196-211.
- Prince, R. C., Garrett, R. M., Bare, R. E., Grossman, M. J., Townsend, T., Suflita, J. M., ... & Lessard, R. R. (2003). The roles of photooxidation and biodegradation in long-term weathering of crude and heavy fuel oils. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(2), 145-156.
- PRS. (2022, Kasım 07). Polish Register of Shipping, Informative Publication No. 19/1- Formal Safety Assessment Methodology (FSA), was approved by the Director for Ship Classification of the Polish Register of Shipping P.L.C. on 7 November 2002. https://prs.pl/wp-content/uploads/2024/03/p19i_en.pdf adresinden alınmıştır.
- Qiao, F., Wang, G., Yin, L., Zeng, K., Zhang, Y., Zhang, M., ... & Chen, G. (2019). Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill. *Science of the Total Environment*, 685, 856-866.
- Quan-Gen, F., Zai-Li, Y., Shen-Ping, H., & Jin, W. (2005). Formal safety assessment and application of the navigation simulators for preventing human error in ship operations. *Journal of Marine Science and Application*, 4, 5-12.
- Radwan, M. E., Chen, J., Wan, Z., Zheng, T., Hua, C., & Huang, X. (2019). Critical barriers to the introduction of shore power supply for green port development: case of Djibouti container terminals. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1293-1306.
- Rausand, M. (2011). *Risk assessment: theory, methods, and applications* (Vol. 115). John Wiley & Sons.
- REMPEC. (1998, Kasım 26). The Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea, <https://www.rempec.org/en/knowledge-centre/online-catalogue/1998/wg-16-9-liability-and-compensation-for-marine-pollution-damage> adresinden alınmıştır.
- Resmi Gazete. (2021, Kasım 04). Cumhurbaşkanlığı Kararı. Marmara Denizi ve Adalar Özel Çevre Koruma Bölgesi. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/11/20211105-5.pdf> adresinden alınmıştır.

- Rice, S. D. (2009). Persistence, toxicity, and long-term environmental impact of the Exxon Valdez oil spill. *U. St. Thomas LJ*, 7, 55.
- Robu, B., Bulgariu, L., Bulgariu, D., & Macoveanu, M. (2008). Quantification Of Impact And Risk Induced In Surface Water By Heavy Metals: Case Study-Bahlui River Iasi. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 7(3).
- Rogowska, J., & Namieśnik, J. (2010). Environmental implications of oil spills from shipping accidents. *Reviews of environmental contamination and toxicology volume* 206, 95-114.
- Sammut, C., & Webb, G. I. (Eds.). (2011). *Encyclopedia of machine learning*. Springer Science & Business Media.
- Sampson, H., Bloor, M., Baker, S., & Dahlgren, K. (2016). Greener shipping? A consideration of the issues associated with the introduction of emission control areas. *Maritime Policy & Management*, 43(3), 295-308.
- Sarıalioğlu, S., Uğurlu, Ö., Aydın, M., Vardar, B., & Wang, J. (2020). A hybrid model for human-factor analysis of engine-room fires on ships: HFACS-PV&FFTA. *Ocean Engineering*, 217, 107992.
- Sarraf, M., Stuer-Lauridsen, F., Dyoulgerov, M., Bloch, R., Wingfield, S., & Watkinson, R. (2010). The ship breaking and recycling industry in Bangladesh and Pakistan.
- Savun-Hekimoğlu, B., & Gazioğlu, C. (2021). Mucilage problem in the semi-enclosed seas: Recent outbreak in the Sea of Marmara. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8(4), 402-413.
- Schulze, R. H. (1983, February). Probability of an oil spill on the St. Marys River. In *International Oil Spill Conference* (Vol. 1983, No. 1, pp. 129-132). American Petroleum Institute.
- Sebastiao, P., & Soares, C. G. (1995). Modeling the fate of oil spills at sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2(2-3), 121-131.
- Sevgili, C., Fiskin, R., & Cakir, E. (2022). A data-driven Bayesian Network model for oil spill occurrence prediction using tankship accidents. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133478.
- Sherrington, C., Darrah, C., Hann, S., Cole, G., & Corbin, M. (2016). Study to support the development of measures to combat a range of marine litter sources. *Report for european commission DG environment*, 410.
- Short, J. W., Irvine, G. V., Mann, D. H., Maselko, J. M., Pella, J. J., Lindeberg, M. R., ... & Rice, S. D. (2007). Slightly weathered Exxon Valdez oil persists in Gulf of Alaska beach sediments after 16 years. *Environmental Science & Technology*, 41(4), 1245-1250.
- Singkran, N. (2013). Classifying risk zones by the impacts of oil spills in the coastal waters of Thailand. *Marine pollution bulletin*, 70(1-2), 34-43.

- Skinner, S. K. (1989). *The Exxon Valdez oil spill: A report to the president*. US Environmental Protection Agency.
- Skjong, R., & GUEDES SOARES, C. (2008). Safety in maritime transportation. *Reliability engineering & systems safety*, 93(9).
- Smith, T. W., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., ... & Pandey, A. (2015). Third imo ghg study.
- Southward, A. J., & Southward, E. C. (1978). Recolonization of rocky shores in Cornwall after use of toxic dispersants to clean up the Torrey Canyon spill. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 35(5), 682-706.
- Spies, R. B., Rice, S. D., Wolfe, D. A., & Wright, B. A. (1996). The effects of the Exxon Valdez oil spill on the Alaskan coastal environment. In *American Fisheries Society Symposium*. 1996..
- Sun, J., & Sun, J. (2015). A dynamic Bayesian network model for real-time crash prediction using traffic speed conditions data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54, 176-186.
- Taljaard, S., Slinger, J. H., Arabi, S., Weerts, S. P., & Vreugdenhil, H. (2021). The natural environment in port development: A 'green handbrake' or an equal partner?. *Ocean & Coastal Management*, 199, 105390.
- Talley, W. K., & Anderson, E. E. (1996). Determinants of tanker accident oil spill risk. *International Journal of Transport Economics/Rivista internazionale di economia dei trasporti*, 3-16.
- Talley, W. K. (1999). Determinants of the property damage costs of tanker accidents. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 4(6), 413-426.
- Talley, W. K. (2003). Environmental impacts of shipping. In *Handbook of Transport and the Environment* (Vol. 4, pp. 279-291). Emerald Group Publishing Limited.
- Talley, W. K., Yip, T. L., & Jin, D. (2012). Determinants of vessel-accident bunker spills. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(8), 605-609.
- Ten Hallers-Tjabbes, C. C., Wegener, J. W., Van Hattum, B. A., Kemp, J. F., Ten Hallers, E., Reitsema, T. J., & Boon, J. P. (2003). Imposex and organotin concentrations in *Buccinum undatum* and *Neptunea antiqua* from the North Sea: relationship to shipping density and hydrographical conditions. *Marine Environmental Research*, 55(3), 203-233.
- To, N. T., & Kato, T. (2017). Solid waste generated from ships: a case study on ship-waste composition and garbage delivery attitudes at Haiphong ports, Vietnam. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 988-998.

- Trucco, P., Cagno, E., Ruggeri, F., & Grande, O. (2008). A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(6), 845-856.
- UAB-KEGM. (2024, Kasım 14). Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü, <https://kiyiemniyeti.gov.tr/Data/1/Files/Document/Documents/pH/EG/cT/iV/TÜRK%20BOĞAZLARI%20GEMİ%20TRAFİK%20HİZMETLERİ%20KULLANICI%20REHBERİ.pdf> adresinden alınmıştır.
- Uğurlu, Ö., Yıldırım, U., & Başar, E. (2015). Analysis of grounding accidents caused by human error. *Journal of Marine Science and Technology*, 23(5), 19.
- Uğurlu, Ö., Erol, S., & Başar, E. (2016). The analysis of life safety and economic loss in marine accidents occurring in the Turkish Straits. *Maritime Policy & Management*, 43(3), 356-370.
- Ulusçu, Ö. S., Özbaş, B., Altıok, T., & Or, İ. (2009). Risk analysis of the vessel traffic in the strait of Istanbul. *Risk Analysis: An International Journal*, 29(10), 1454-1472.
- UNCLOS. (1982). United Nations Convention on the Law of the Sea. United Nations, New York.
- UNCTAD. (2012, Ocak 31). Liability and Compensation for Ship-Source Oil Pollution: An Overview of the International Legal Framework for Oil Pollution Damage from Tankers https://unctad.org/system/files/official-document/dtlb20114_en.pdf adresinden alınmıştır.
- UNCTAD. (2020, Ocak 31). United Nations Conference on Trade and Development, Review of Maritime Transport 2019. UNCTAD/RMT/2019. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2019_en.pdf adresinden alınmıştır.
- UNCTAD. (2023, Ekim 21). United Nations Conference on Trade and Development, Review of Maritime Transport 2023. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023_en.pdf adresinden alınmıştır.
- UNCTAD. (2024, Kasım 02). United Nations Conference on Trade and Development, Review of Maritime Transport 2024. UNCTAD/RMT/2024. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf adresinden alınmıştır.
- UNTS. (2022a, Nisan 02). United Nations Treaty Series Online, 2022. <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%20970/volume-970-I-14049-English.pdf> adresinden alınmıştır.
- UNTS. (2022b, Nisan 03). United Nations Treaty Series Online, 2022. <https://treaties.un.org/doc/publication/unts/volume%201891/volume-1891-i-32194-english.pdf> adresinden alınmıştır.

- Valentine, D. L., Fisher, G. B., Bagby, S. C., Nelson, R. K., Reddy, C. M., Sylva, S. P., & Woo, M. A. (2014). Fallout plume of submerged oil from Deepwater Horizon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(45), 15906-15911.
- Van de Wiel, G., & van Dorp, J. R. (2011). An oil outflow model for tanker collisions and groundings. *Annals of Operations Research*, 187, 279-304.
- Vaneeckhaute, C., & Fazli, A. (2020). Management of ship-generated food waste and sewage on the Baltic Sea: A review. *Waste Management*, 102, 12-20.
- Vanem, E., Endresen, Ø., & Skjong, R. (2008). Cost-effectiveness criteria for marine oil spill preventive measures. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(9), 1354-1368.
- Ventikos, N. P., & Sotiropoulos, F. S. (2014). Disutility analysis of oil spills: graphs and trends. *Marine Pollution Bulletin*, 81(1), 116-123.
- Ventikos, N. P., & Psaraftis, H. N. (2004). Spill accident modeling: a critical survey of the event-decision network in the context of IMO's formal safety assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 107(1-2), 59-66.
- Walker, T. R., Adebambo, O., Feijoo, M. C. D. A., Elhaimer, E., Hossain, T., Edwards, S. J., ... & Zomorodi, S. (2019). Environmental effects of marine transportation. In *World seas: an environmental evaluation* (pp. 505-530). Academic Press.
- Wang, L., & Yang, Z. (2018). Bayesian network modelling and analysis of accident severity in waterborne transportation: A case study in China. *Reliability Engineering & System Safety*, 180, 277-289.
- Wang, S. D., Shen, Y. M., & Zheng, Y. H. (2005). Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. *Ocean Engineering*, 32(13), 1556-1571.
- Wang, Y., Jia, Y., Tian, Y., & Xiao, J. (2022). Deep reinforcement learning with the confusion-matrix-based dynamic reward function for customer credit scoring. *Expert Systems with Applications*, 200, 117013.
- Wells, P. G. (2017). The iconic Torrey Canyon oil spill of 1967-Marking its legacy. *Marine pollution bulletin*, 115(1-2), 1-2.
- Wene, J. (2005). European and International Regulatory Initiatives Due to the Erika and Prestige Incidents. *MLAANZ Journal*, 19, 56.
- Weng, J., & Li, G. (2019). Exploring shipping accident contributory factors using association rules. *Journal of Transportation Safety & Security*, 11(1), 36-57.
- Weng, J., & Yang, D. (2015). Investigation of shipping accident injury severity and mortality. *Accident Analysis & Prevention*, 76, 92-101.
- White, I. C., & C. Molloy, F. (2003, April). Factors that determine the cost of oil spills. In *International oil spill conference* (Vol. 2003, No. 1, pp. 1225-1229). American Petroleum Institute.

- Whitfield, J. (2003). How to clean a beach. *Nature*, 422(6931), 464-467.
- Willette, T. M. (1996). Impacts of the Exxon Valdez oil spill on the migrations, growth, and survival of juvenile pink salmon in Prince William Sound. In *Am. Fish. Soc. Symp.* (Vol. 18, pp. 533-550).
- Wu, B., Wang, Y., Zhang, J., Savan, E. E., & Yan, X. (2015). Effectiveness of maritime safety control in different navigation zones using a spatial sequential DEA model: Yangtze River case. *Accident analysis & prevention*, 81, 232-242.
- Xanthos, D., & Walker, T. R. (2017). International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. *Marine pollution bulletin*, 118(1-2), 17-26.
- Xiao, J., Cao, H., Jiang, X., Gu, X., & Xie, L. (2017). GMDH-based semi-supervised feature selection for customer classification. *Knowledge-Based Systems*, 132, 236-248.
- Xing, W., & Zhu, L. (2022). Assessing the impacts of Sanchi incident on Chinese law concerning ship-source oil pollution. *Ocean & Coastal Management*, 225, 106227.
- Xu, L., Di, Z., & Chen, J. (2021). Evolutionary game of inland shipping pollution control under government co-supervision. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112730.
- Yang, C., Kaipa, U., Mather, Q. Z., Wang, X., Nesterov, V., Venero, A. F., & Omary, M. A. (2011). Fluorous metal-organic frameworks with superior adsorption and hydrophobic properties toward oil spill cleanup and hydrocarbon storage. *Journal of the American Chemical Society*, 133(45), 18094-18097.
- Yang, Z., Bonsall, S., & Wang, J. (2008). Fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA. *IEEE Transactions on Reliability*, 57(3), 517-528.
- Yang, Z. L., Wang, J., & Li, K. X. (2013). Maritime safety analysis in retrospect. *Maritime Policy & Management*, 40(3), 261-277.
- Yang, Z., Yang, Z., Smith, J., & Robert, B. A. P. (2021). Risk analysis of bicycle accidents: A Bayesian approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 209, 107460.
- Yang, Z., Lau, Y. Y., & Kanrak, M. (2023). Pollution prevention of vessels in the greater bay area: A practical contribution of port state control inspection system towards carbon neutralisation using a tree augmented naive bayes approach. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138651.
- Yang, Z., Yu, Q., Yang, Z., & Wan, C. (2024). A data-driven Bayesian model for evaluating the duration of detention of ships in PSC inspections. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 181, 103371.
- Yıldırım, U., Başar, E., & Uğurlu, Ö. (2019). Assessment of collisions and grounding accidents with human factors analysis and classification system (HFACS) and statistical methods. *Safety Science*, 119, 412-425.

- Yildiz, S., Uğurlu, Ö., Loughney, S., Wang, J., & Tonoğlu, F. (2022). Spatial and statistical analysis of operational conditions influencing accident formation in narrow waterways: A Case Study of Istanbul Strait and Dover Strait. *Ocean Engineering*, 265, 112647.
- Yip, T. L., Talley, W. K., & Jin, D. (2011). The effectiveness of double hulls in reducing vessel-accident oil spillage. *Marine Pollution Bulletin*, 62(11), 2427-2432.
- Yu, F., Xue, S., Zhao, Y., & Chen, G. (2018). Risk assessment of oil spills in the Chinese Bohai Sea for prevention and readiness. *Marine pollution bulletin*, 135, 915-922.
- Zelenke, B., O'Connor, C., Barker, C. H., Beegle-Krause, C. J., & Eclipse, L. (2012). General NOAA operational modeling environment (GNOME) technical documentation.
- Zhang, C., An, W., Xiong, D., Liu, B., & Song, S. (2018). Research on the risk-based model for regional emergency resource allocation for ship-source oil spill. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(11), 133-138.
- Zhang, S., Chen, J., Wan, Z., Yu, M., Shu, Y., Tan, Z., & Liu, J. (2021). Challenges and countermeasures for international ship waste management: IMO, China, United States, and EU. *Ocean & Coastal Management*, 213, 105836.
- Zhang, S., Sun, X., Zhang, S., & Chen, X. (2006). Risk analysis methods in oil spill contingency plans. *Proc. 7th Annual General Assembly of the International Association of Maritime University, Dalian Maritime University*, 34-41.
- Zhang, Z. & Xiao-Ming, L., 2017. Global Ship Accidents and Ocean Swell-Related Sea States, *Natural Hazards Earth System Sciences*, 17, 11, 2041.
- Zhang, D., Yan, X. P., Yang, Z. L., Wall, A., & Wang, J. (2013). Incorporation of formal safety assessment and Bayesian network in navigational risk estimation of the Yangtze River. *Reliability Engineering & System Safety*, 118, 93-105.
- Zhong, L., Wu, J., Wen, Y., Yang, B., Grifoll, M., Hu, Y., & Zheng, P. (2023). Analysis of Factors Affecting the Effectiveness of Oil Spill Clean-Up: A Bayesian Network Approach. *Sustainability*, 15(6), 4965.
- Zou, X., & Yue, W. L. (2017). A bayesian network approach to causation analysis of road accidents using netica. *Journal of advanced transportation*, 2017(1), 2525481.

7. EKLER

Ek Tablo A. Koşullu Olasılık Tabloları

Ek Tablo A.1 Kirlilik boyutu düğümü

REF	Olasılık değeri
BuyukSizinti	0,3416666666666666
OrtaSizinti	0,4833333333333334
KucukSizinti	0,175

Ek Tablo A.2 Gemi tipi düğümü

REF	Olasılık değeri
Diger	0,07989583333333335
DokmeYuk	0,1873032407407408
GenelKargo	0,16739583333333332
KimyasalTanker	0,07989583333333333
Konteyner	0,09452546296296292
PetrolTankeri	0,28489583333333333
RoRo	0,02619212962962962
Yolcu	0,07989583333333333

Ek Tablo A.3 Kaza türü düğümü

REF	Olasılık değeri
Catma_Catisma	0,5691296296296298
KarayaOturma	0,2368148148148148
Batma	0,1102407407407407
Yangin_Patlama	0,04190740740740741
Diger	0,04190740740740741

Ek Tablo A.4 Boy düğümü

REF	Olasılık değeri
S100_150	0,2088914314209453
S100_den_kisa	0,2023782729937244
S150_den_uzun	0,5887302955853304

Ek Tablo A.5 Gemi yaşı düğümü

REF	Olasılık değeri
S0_5	0,1639444444444444
S11_15	0,1102407407407407
S16_20	0,2859814814814816
S20_den_buyuk	0,3442222222222222
S6_10	0,0956111111111111

Ek Tablo A.6 Madde düğümü

REF	Olasılık değeri
DO	0,152265516350933
FO	0,470966636026011
FO_DO	0,1046262980268189
GO	0,08450706916540249
HamPetrol	0,1876344804308346

Ek Tablo A.7 Ay düğümü

REF	Olasılık değeri
Agustos	0,1083806396251572
Aralik	0,1123441152333696
Ekim	0,08251363625815379
Eylul	0,07661473496451569
Haziran	0,05243515723230636
Kasim	0,06133607113322027
Mart	0,08441687921402835
Mayis	0,05887483597461669
Nisan	0,06878645213623283
Ocak	0,1210309839202383
Subat	0,1206358989856797
Temmuz	0,05263059532248128

Ek Tablo A.8 GT düğümü

REF	Olasılık değeri
S10000_den_buyuk	0,5775599871555511
S5000_10000	0,1408996950160294
S5000_den_kucuk	0,2815403178284194

Ek Tablo A.9 Kaza bölgesi düğümü

REF	Olasılık değeri
AcikDeniz	0,1942771477479479
Bogaz	0,08257542002772339
Kanal	0,0629757678095892
Kiyisal	0,3835773619805191
Korfez	0,06889464728064337
Liman	0,2076996551535771

Ek Tablo A.10 Görüş düğümü

REF	Olasılık değeri
Iyi	0,6220767195767196
Kotu	0,2361441798941798
Orta	0,1417791005291005

Ek Tablo A.11 Hava durumu düğümü

REF	Olasılık değeri
Agir	0,325
Orta	0,1500000000000001
Sakin	0,525

Ek Tablo A.12 Kaza zamanı düğümü

REF	Olasılık değeri
Gece	0,45625
Gunduz	0,54375

Ek Tablo B.1 Gemi tiplerinin Kaza türü, Kaza bölgesi ve Sızıntı boyutlarına göre dağılımı

	Petrol Tankeri (N=49)	Dökme Yük (N=30)	Konteyner (N=23)	Genel Kargo (N=21)	Kimyasal Tanker (N=15)	Yolcu (N=6)	RoRo (N=4)	Diğer (N=13)
Çatma/Çatışma (N=62)	22	10	9	4	4	1	2	10
Karaya oturma (N=55)	17	13	8	11	1	4	0	1
Batma (N=18)	5	5	2	3	1	1	0	1
Yangın/Patlama (N=12)	3	1	1	1	3	0	2	1
Diğer (N=14)	2	1	3	2	6	0	0	0
Kıyısız (N=67)	15	14	12	15	2	5	1	3
Liman (N=34)	13	5	2	3	7	0	0	4
Açık deniz (N=32)	10	8	4	2	4	0	2	2
Kanal (N=11)	3	0	2	0	2	0	1	3
Boğaz (N=10)	5	1	2	0	0	1	0	1
Körfez (N=7)	3	2	1	1	0	0	0	0
Büyük sızıntı (N=54)	34	9	5	1	2	1	1	1
Orta sızıntı (N=80)	9	16	16	13	9	3	3	11
Küçük sızıntı (N=27)	6	5	2	7	4	2	0	1

Ek Tablo B.2 Çalışmanın veri setinin Sızıntı boyutlarına göre dağılımı

	Veri seti değişkenleri	Büyük sızıntı (N=54)	Orta sızıntı (N=80)	Küçük sızıntı (N=27)
Gemi Tipi	Petrol Tankeri (N=49)	34	9	6
	Dökme Yük (N=30)	9	16	5
	Konteyner (N=23)	5	16	2
	Genel Kargo (N=21)	1	13	7
	Kimyasal Tanker (N=15)	2	9	4
	Yolcu (N=6)	1	3	2
	RoRo (N=4)	1	3	0
	Diğer (N=13)	1	11	1
Kaza Türü	Çatma/ Çatışma (N=62)	17	35	10
	Karaya oturma (N=55)	23	21	11
	Batma (N=18)	9	8	1
	Yangın/ Patlama (N=12)	5	7	0
	Diğer (N=14)	0	9	5
Kaza Bölgesi	Kıyısız (N=67)	18	35	14
	Liman (N=34)	8	17	9
	Açık deniz (N=32)	17	13	2

Ek Tablo B.2' nin devamı

	Kanal (N=11)	3	6	2
	Boğaz (N=10)	5	5	0
	Körfez (N=7)	3	4	0
Gemi Yaşı	0-5 (N=26)	9	12	5
	6-10 (N=30)	10	14	6
	11-15 (N=20)	8	11	1
	16-20 (N=33)	15	14	4
	20<Yaş (N=52)	12	29	11
Gemi Boyu	Boy<100 (N=31)	3	22	6
	100-150 (N=26)	3	17	6
	150<Boy (N=104)	48	41	15
GT	GT≤5.000 (N=42)	5	29	8
	5.000-10.000 (N=22)	3	9	4
	10.000<GT (N=58)	46	42	15
Madde	Ham Petrol (N=24)	21	3	0
	FO (N=88)	24	50	14
	DO (N=24)	0	15	9
	GO (N=8)	1	4	3
	FO-DO (N=17)	8	8	1
Hava Durumu	Ağır (N=58)	28	25	5
	Orta (N=22)	7	11	4
	Sakin (N=81)	19	44	18
Görüş	İyi (N=96)	29	49	18
	Orta (N=42)	7	15	1
	Kötü (N=23)	18	16	8
Kaza zamanı	Gündüz (N=91)	27	31	12
	Gece (N=70)	27	49	15
Ay	Ocak (N=24)	9	12	3
	Şubat (N=20)	6	11	3
	Mart (N=15)	3	12	0
	Nisan (N=12)	1	7	4
	Mayıs (N=7)	3	1	3
	Haziran (N=8)	3	4	1
	Temmuz (N=8)	5	2	1
	Ağustos (N=14)	4	9	1
	Eylül (N=9)	0	6	3
	Ekim (N=15)	5	7	3
	Kasım (N=11)	6	6	0
	Aralık (N=18)	9	3	5

ÖZGEÇMİŞ

Songül SARIALIOĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü'nden 2006 yılında mezun oldu. 2006-2016 yılları arasında Türk Deniz Ticaret Filosunun farklı tonajlarda farklı tip gemilerinde Uzakyol Vardiya Zabiti ve Uzakyol Birinci Zabit olarak görev yaptı. 2013 yılında Uzakyol Kaptanı oldu. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans programına başladı. 2019 yılında "Gemi Makine Dairesi Yangınlarının İnsan Faktörü Analiz Sınıflandırma Sistemi ve Bulanık Hata Ağacı Yöntemleri ile Analizi" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. İyi derece İngilizce bilmektedir.

Sarialioğlu, S., Uğurlu, Ö., Aydın, M., Vardar, B., & Wang, J. (2020). A Hybrid Model for Human-factor Analysis of Engine-room Fires on Dhps: HFACS-PV&FFTA. *Ocean Engineering*, 217, 107992.879-897.

Kaptan, M., Sarialioğlu, S., Uğurlu, Ö., & Wang, J. (2021). The Evolution of the HFACS Method Used in Analysis of Marine Accidents: A Review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 86, 103225.

Sana, F., Başar, E., & Sarialioğlu, S. (2023). Career Preference of the Turkish Officers After Sea Service. *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, 20-42.

Yildirim, U., Nart, S., Akar, S., Sarialioğlu, S., Toygar, A., Vardar, B., ... & Sari, M. (2024). In-depth exploration of challenges faced by women in the Turkish maritime industry: A qualitative study. *Work*, 78(2), 527-539.