

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENİZ TAŞIMACILIĞINDA NİKEL MADENİ YÜKÜNÜN SIVILAŞMASINDAN
KAYNAKLANAN DENİZ KAZALARININ BULANIK HATA AĞACI ANALİZİ
(FFTA) VE HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA) YÖNTEMLERİ
İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat ALKAÇ

OCAK 2024

TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENİZ TAŞIMACILIĞINDA NİKEL MADENİ YÜKÜNÜN SIVILAŞMASINDAN
KAYNAKLANAN DENİZ KAZALARININ BULANIK HATA AĞACI ANALİZİ
(FFTA) VE HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA) YÖNTEMLERİ
İLE İNCELENMESİ**

Murat ALKAÇ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09/01/2024
Tezin Savunma Tarihi : 29/01/2024**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Devran YAZIR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

Bu çalışma, deniz taşımacılığında dökme nikel madeni yükünün sıvılaşması sonucu gerçekleşen kazaları Bulanık Hata Ağacı Analizi ve Hata Türleri ve Etki Analizi ile inceleyerek kazaların azaltılmasına ya da önlenmesine yönelik çözüm önerileri sunmak amacıyla yapılmıştır.

Çalışmalarım ve akademik yaşantım süresince bana her anlamda örnek olan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, akademik disiplini kazanmama destek olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Devran YAZIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmayı hazırlarken her zaman yanımda olan ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Büşra ALKAÇ'a, kıymetli aile büyüklerime, Bulancak Kaptan Ahmet Fatoğlu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'ndeki mesai arkadaşlarıma ve İTÜ Denizcilik Fakültesi'nde görev yapan ve bu çalışmamda her türlü desteği sağlayan dostum Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre ŞENOL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasını aileme ithaf ediyorum.

Murat ALKAÇ
Trabzon, 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Deniz Taşımacılığında Nikel Madeni Yü künün Sıvılaşmasından Kaynaklanan Deniz Kazalarının Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) ve Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) Yöntemleri İle İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Devran YAZIR’ın danışmanlığında tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz gösterdığimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 29.01.2024

Murat ALKAÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Sıvılaşma Olgusu.....	4
1.2.1. Granüler Maddeler.....	4
1.2.2. Zemin Sıvılaşması	6
1.2.3. Yük Sıvılaşması.....	7
1.2.5. Nem Göçü.....	9
1.2.6. Yükün Değerlendirilmesi İçin Uygulanan Test Yöntemleri	10
1.2.6.1. Akış Tablosu Test (ATT/FTT) Yöntemi	10
1.2.6.2. Penetrasyon (Titreşim) Testi (PT)	11
1.2.6.3. Proctor/Fagerberg Test (PFT) Yöntemi.....	13
1.2.7. Akış Nem Noktası (FMP/ANN) ve Taşınabilir Nem Limiti (TML/TNL)	14
1.3. Gemi Stabilitesi	15
1.4. Sıvılaşma Özelliği Bulunan Yükler.....	22
1.5. Nikel Madeni	24
1.5.1. Nikel Madeni ve Rezervleri.....	24
1.5.2. Nikel Cevherinin Çıkarılması.....	27
1.5.3. Nikelin Özellikleri ve Kullanım Alanları	27
1.6. Nikel Madeni Yükünün Denizyolu İle Taşınması.....	30
1.6.1. Nikel Cevheri Sevkiyatı İçin Bazı Önleyici Tedbirler	32
1.6.1.1. IMSBC Kodu Gerekliliklerine Aşına Olma	32
1.6.1.2. Gerekli Belgeleri Temin Etme.....	33
1.6.1.3. Uygun Akış Nem Noktası (ANN/FMP) Testi	33

1.6.1.4. Yük Kalitesinin Kontrol Edilmesi	34
1.6.1.5. P&I Kulübünden Rehberlik İsteme	34
1.6.1.6. Ambar Kapağının Su Geçirmez Olmasını Sağlama	34
1.6.1.7. Mantıksız Onay Mektubunun Reddedilmesi	35
1.6.1.8. Gemi Sahibi Adına veya Bağımsız Bir Yük Sörveyörü Atanmasının Sağlanması	35
1.7. Uluslararası ve Ulusal Kurallar/Yönetmelikler	35
1.7.1. Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yükler Kodu (IMSBC Code)	36
1.7.2. Uluslararası Emniyetli Yönetim Kodu	39
1.7.3. Dökme Yükler için Kanada Emniyet Uygulama Kuralları	39
1.7.4. Lloyd's Register Kontrol Listesi	40
1.7.5. Nikel Madeni Yükü ve Sıvılaşma Hakkında Yayınlanan Kurumsal Bazı Bültenler	40
1.7.5.1. DNV GL'nin Sıvılaşma İle İlgili Araştırmaları	41
1.7.5.2. İsveç Kulübü (The Swedish Club) Rehberliği	42
1.7.6. Sıvılaşma Riskinin Sınırlandırılmasına Yönelik Fikirler	43
1.7.6.1. Nikel Cevheri İçin Özel Gemi Yapımı	43
1.7.6.2. Minerallerin Sıvılaşmasını Önlemek İçin Kimyasal Bir Çözüm	44
1.7.6.3. Güvenli Şişirilmiş Cihaz	45
1.7.6.4. DNV GL'nin Cevherlerin Taşınmasına Yönelik Önerileri	45
1.7.6.5. Bazı Yenilikçi Çözümler	45
1.7.6.6. Ambarların İçinde Pıhtılaştırıcı Kullanımı	46
1.8. Deniz Kazaları	47
1.8.1. Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşması Sonucu Meydana Gelen Kazalarına Ait Raporlardan Elde Edilen Genel Kaza Nedenleri	48
1.9. Benzer Çalışmalar	51
1.9.1. Sıvılaşma, Yük Sıvılaşması ve Nikel Madeni Yükü ile İlgili Çalışmalar	51
1.9.2. Bulanık Hata Ağacı (FFTA) ve Hata Türleri ve Etki Analizi (FMEA) İle İlgili Çalışmalar	61
1.10. Yöntem	72
1.10.1. Hata Ağacı Analiz Yöntemi	72
1.10.1.1. Mantık Kapılarının Gösterimi ve Niceliği	77
1.10.1.2. Kesim Setlerinin Değerlendirilmesi	78
1.10.1.3. Tepe Olay (TE) Olasılığı	78
1.10.2. Bulanık Hata Ağacı Analiz Yöntemi	78
1.10.2.1. Adım 1. Toplama Aşaması	79

1.10.2.2. Adım 2. Durulaştırma Aşaması	80
1.10.2.3. Adım 3. Kesin Hata Olasılığının Hata Olasılığına Dönüştürülmesi.....	81
1.10.2.4. Adım 4. Minimum Kesim Setlerine (MCS) Dayalı Tepe Olay (TE) Olasılığının Hesaplanması	81
1.10.2.5. Adım 5. Minimum Kesim Setlerinin (MCS) Sıralanması	82
1.10.3. Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA)	83
1.10.3.1. Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) Uygulama Adımları	84
1.10.4. FTA-FMEA Entegrasyonu	92
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	93
2.1. Vaka Çalışması.....	93
2.2. Bulanık Hata Ağacı (FFTA) Uygulaması.....	93
2.2.1. Katılımcıların Analizi	93
2.2.2. Hata Ağacı (FT) Diyagramı.....	95
2.2.3. Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşmasına Neden Olan Temel Nedenler, Ara Nedenler ve Hata Ağacı Diyagramının Yapısı	98
2.2.4. Uzman Kararlarından İhtimallerin Elde Edilmesi	107
2.2.5. Toplama ve Durulaştırma Aşamaları.....	109
2.2.8. Tepe Olayın Hata Olasılığını Hesaplama	124
2.3. Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşma Nedenlerinin FMEA ile Risk Analizinin Gerçekleştirilmesi	126
2.3.1. FFTA-FMEA Entegrasyonu ile Hata Türleri ve Etki Analizi	127
2.3.1.1. Hata Türlerinin Olasılıklarının Derecelendirilmesi.....	127
2.3.1.2. Hata Türlerinin Şiddetlerinin ve Tespit Edilebilirliklerinin Derecelendirilmesi.....	128
2.3.1.3. Risk Öncelik Seviyelerinin Belirlenmesi	130
3. BULGULAR	132
4. TARTIŞMA.....	134
5. SONUÇLAR.....	137
6. ÖNERİLER	141
7. KAYNAKLAR.....	143
8. EKLER.....	160
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DENİZ TAŞIMACILIĞINDA NİKEL MADENİ YÜKÜNÜN SIVILAŞMASINDAN KAYNAKLANAN DENİZ KAZALARININ BULANIK HATA AĞACI ANALİZİ (FFTA) VE HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA) YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ

Murat ALKAÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Devran YAZIR
2023, 159 Sayfa, 10 Ek Sayfa

Denizyolu taşımacılığında kuru dökme yüklerin sıvılaşması nedeniyle meydana gelen deniz kazaları ciddi can, mal, gemi kayıpları ve büyük çevresel problemlerle sonuçlanan önemli bir olgudur. Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yük Kodu (IMSBC Code) tehlikeli kuru dökme yükleri *Grup A*, *Grup B* ve *Grup C* olmak üzere üç gruba ayırmaktadır. İçerisinde bulundurduğu nemin taşınabilir nem limitini (TNL) aşması durumunda sıvılaşma riski taşıyan yükler *Grup A tipi yükler* sınıfında yer almaktadır. Nikel cevheri yükü de bu sınıfta yer alan ve taşınması sırasında çok sayıda ölümcül kaza meydana gelen, yüklenmesi ve taşınması sürecinde dikkat edilmesi gereken bir yükür.

Deniz taşımacılığında en önemli unsur olarak emniyet unsuru öne çıkmaktadır. Bu tez ile nikel madeni taşımacılığında emniyet farkındalığının artırılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle çalışmada, denizyolu taşımacılığında nikel madeni yükünün sıvılaşması nedeniyle meydana gelen deniz kazalarının nedenleri üzerine geniş kapsamlı sayısal bir risk analizi yapılmıştır. Bu kapsamda risk analizi değerlendirmesi için, Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) ve Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemleri uygulanmıştır. Bulanık Hata Ağacı yöntemi ile nikel madeni yükünün sıvılaşmasına neden olan temel olayları/hataları belirlemede ve risk analizi yapmada kullanılırken, Hata Türleri ve Etkileri Analizi yöntemi ise, hataların risk öncelik seviyeleri değerlendirmede kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasının sonuçlarının P&I klüpleri, bayrak devletleri, gemi kiralama, yükleme, taşıma şirketleri ve yüksek eğitim kurumları gibi denizcilik paydaşlarına ve Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yük Kodu'na katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Nikel madeni, Deniz Kazaları, TNL, IMSBC Code, FFTA, FMEA

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF MARINE ACCIDENTS CAUSED BY LIQUEFICATION OF NICKEL
ORE CARGO IN SEA TRANSPORT WITH FAULT TREE ANALYSIS AND FAILURE
MODES EFFECTS ANALYSIS METHODS

Murat ALKAÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Maritime Transportation and Management Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Doç. Dr. Devran YAZIR
2023, 159 Pages, 10 Appendix Pages

Maritime accidents that occur due to the liquefaction of dry bulk cargo in maritime problems are an important phenomenon with serious losses of life, property, ships and problems with large explosions. International Maritime Solid Bulk Cargo Code (IMSBC Code) dangerous dry bulk cargoes are divided into three groups: *Group A*, *Group B* and *Group C*. Cargoes that carry the risk of liquefaction if the moisture content exceeds the transportable moisture limit (TML) are included in the *Group A type cargoes*. Nickel ore cargo is also in this class and many loss accidents occur while it is distributed, it is a cargo that needs to be taken into consideration during the loading and transportation process.

It is the most important and uncertain safety element in sea conditions. This thesis aims to develop safety awareness in nickel ore transportation. For this reason, a comprehensive quantitative risk analysis was carried out on the causes of maritime accidents that occur due to liquefaction of nickel ore in maritime transportation. Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) and Fault Modes and Effects Analysis (FMEA) methods are methodical for this capability risk analysis evaluation. While the Fuzzy Fault Tree method was used to identify the main events/faults that caused the liquefaction of the nickel ore cargo and to perform risk analysis, the Fault Modes and Effects Analysis method was used to evaluate the risk priority numbers of the faults.

It is thought that the results of this thesis study will contribute to maritime stakeholders such as P&I clubs, flag states, chartering, loading, transportation companies and higher education institutions and the International Maritime Solid Bulk Cargo Code.

Keywords: Nickel ore, Marine Accidents, TML, IMSBC Code, FFTA, FMEA

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tozlar katılar, sıvılar ve gazlardan oluşan yığınlardır.....	5
Şekil 2. Yük sıkışmasının bir sonucu olarak sıvılaşma	8
Şekil 3. Akış Tablosu Testi.....	11
Şekil 4. Penetrasyon (Titreşim) Testi	12
Şekil 5. Proctor/Fagerberg Testi.....	13
Şekil 6. Çeşitli nem içeriklerinde nikel madeni yükünün görünümü	14
Şekil 7. ANN ve TNL. A Grubu yükler sadece uygun nem içeriklerinde taşınabilir.....	15
Şekil 8. Stabil gemi meyili ve GZ'nin negatif olması, geminin alabora olmasına neden olur.....	16
Şekil 9. Bir GZ stabilite eğrisinin temel özellikleri. Sıvılaşmadan önce (düz çizgi) ve sıvılaşmadan sonra (kesikli çizgi)	17
Şekil 10. 3.6t/m ³ yoğunluğa sahip bir yük için sıvılaşma öncesi ve sonrası GZ stabilite eğrisinin gösterimi	17
Şekil 11. 5.6t/m ³ yoğunluğa sahip bir yük için sıvılaşma öncesi ve sonrası GZ stabilite eğrisinin gösterimi	18
Şekil 12. Gemiye etki eden etkenlerden dolayı geminin hareketleri sonucunda ortaya çıkan sıvılaşma olgusu ve gemi stabilitesi üzerindeki etkileri	19
Şekil 13. Geminin yalpalanması esnasında sıvılaşan yükün ambar içerisindeki hareketi	20
Şekil 14. Kararlı gemi ve kararsız gemi durumları	21
Şekil 15. Yük kuru ve sıvılaşmış haldeyken ambar alabandaları ve ambar tabanı üzerindeki basınç.....	21
Şekil 16. Nikel Madeni.....	24
Şekil 17. Ni-laterit ve Ni-sülfür maden yataklarının dünya üzerindeki dağılımı	25
Şekil 18. Nikel Madeni ve Nikel Alaşım Paralar	28
Şekil 19. Nikelin kullanım alanları dağılım grafiği.....	29
Şekil 20. Nikel Madeni Yükünün Maden Ocağından Gemiye Taşınma Süreci.....	32
Şekil 21. Basit Teneke Kutu Testi/Can Test	38
Şekil 22. Nikel Cevheri taşımak için özel olarak inşa edilmiş ilk gemi, JULES GARNIER II	44
Şekil 23. Padang Hawk gemisinin 1 numaralı yük ambarının içindeki kuru ve sıvılaşmış cevher fotoğrafları	49

Şekil 24. Nasco Diamond gemisine yüklenen nikel cevheri yükünün Endonezya'nın Kolonodale kentinde yükleme sırasındaki durumuna ilişkin Kaptan tarafından merkez ofise sunulan fotoğraflar	50
Şekil 25. Trans Summer'ın iskele tarafa 45 derece ve 90 derece yattığını gösteren kurtarma helikopterinden çekilen görüntüleri	50
Şekil 26. Örnek hata ağacı yapısı	75
Şekil 27. Hata türleri sınıflandırma eşik değerleri.....	90
Şekil 28. FMEA'nın uygulama basamakları	91
Şekil 29. Hata Ağacı (FT) Diyagramı	97
Şekil 30. Bulanık derecelendirme ve üyelik fonksiyonları.....	107



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. IMSBC Kodu'na göre sıvılaşılabilen A Grubu yüklerin listesi	23
Tablo 2. Nikelin temel özellikleri.....	25
Tablo 3. Dünya metal nikel rezervi	26
Tablo 4. Yük sıvılaşması nedeniyle meydana gelmiş büyük kazaların listesi	48
Tablo 5. FTA'da kullanılan temel semboller.....	74
Tablo 6. Bir hata türlerinin olasılık derecelendirme tablosu	87
Tablo 7. Bir hata türü şiddetinin derecelendirme tablosu.....	88
Tablo 8. Bir hata modunun tespit edilebilirlik değerinin derecelendirilme tablosu	89
Tablo 9. Uzmanların Profil Detayları	94
Tablo 10. Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşmasına Neden Olan Olası Hatalar	95
Tablo 11. Doğrudan Eğitim Eksikliğinden Kaynaklanan Hatalar.....	106
Tablo 12. Dolaylı Olarak Eğitim Eksikliğinden Kaynaklanan Hatalar	106
Tablo 13. Ölçeğin Bulanık Sayı Kümeleri	108
Tablo 14. Ankete Katılan Denizcilik Uzmanlarının Ağırlıkları	108
Tablo 15. $\tilde{R}_u = (r_{u1}, r_{u2}, r_{u3}, r_{u4})$ Uzmanların BEx40 için fikirleri	109
Tablo 16. Uzmanların Benzerlik Fonksiyonları ve Benzerlik Fonksiyonlarının Her Bir BE İçin Değerleri	110
Tablo 17. Uzmanların Ortalama Uyum (AA), Göreceli Uyum (RA) ve Fikir Birliği Katsayılarının (CC) Herbir BE için Değerleri.....	118
Tablo 18. BE'lerin Toplu Uzman Görüşleri ve Durulaştırılmış Olasılıkları.....	122
Tablo 19. Tüm Temel Olayların Hata Olasılıkları (FP)	123
Tablo 20. Temel Olayların Hata Olasılıklarına Göre Sıralanması (FP)	124
Tablo 21. Mnimum Kesme Setleri (MCS) ve Olasılıkları (İlk 30 MCS).....	125
Tablo 22. İlk 30 Mnimum Kesme Setlerinin (MCS) Duyarlılık Analizi Sonuçları	126
Tablo 23. Hata Türlerinin Olasılık Değerleri (Bulanık Hata Ağacı Analizi İle Elde Edilen İlk 30 MCS Olasılık Değerleri)	127
Tablo 24. Hata Türlerinin Belirlenen Şiddet Değerleri (S)	128
Tablo 25. Hata Türlerinin Tespit Edilebilirlik Değerleri (D)	129
Tablo 26. Risk Öncelik Seviyeleri (RÖS)	130
Tablo 27. Ağırlıklandırılmış Risk Öncelik Seviyesi Değerleri (wRÖS).....	131
Tablo 28. Hata Türlerinin Risk Öncelik Seviyelerine Göre Sıralaması	131

KISALTMALAR DİZİNİ

AA	: Uzmanların Ortalama Uyum
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci
AMSA	: Avustralya Deniz Güvenliği Otoritesi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
ATSB	: Avustralya Ulaştırma Güvenliği Bürosu
ATT/FTT	: Akış Tablosu Testi
B	: Yüzme Merkezi
BCSN	: Dökme Yük Nakliye Adı
BE	: Temel Olay
CC	: Fikir Birliği Katsayıları
ClassNK	: Japon Klas Kurumu
COLREG	: Denizde Çatışmayı Önleme Sözleşmesi
CPT	: Koni Penetrasyon Testi
CSR	: Döngüsel Kayma Oranı
DNV-GL	: Norveç Veritas Vakfı
DWT	: Ölü Ağırlık
E	: Uzman
EMSA	: Avrupa Deniz Güvenliği Ajansı
ETA	: Olay Ağacı Analizi
FEM/SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
FFTA	: Bulanık Hata Ağacı Analizi
FLIP	: Sonlu Elemanlar Analiz Programı
FMEA	: Hata Türleri ve Etkileri Analizi
FMECA	: Hata Modu Etkileri ve Kritiklik Analizi
FMP/ANN	: Akış Nem Noktası
FTA	: Hata Ağacı Analizi
G	: Ağırlık Merkezi
GISIS	: Küresel Entegre Gönderi Bilgi Sistemi
GM	: Metasentr Yüksekliği
GTH	: Gemi Trafik Hizmetleri
GWC	: Brüt Su İçeriği
GZ	: Denge Kolu
HAZID	: Tehlike Tanımlama

HAZOP	: Fonksiyonel Etki Analizi ve Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi
HAZOP	: Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi
HFACS	: İnsan Faktörleri Analiz ve Sınıflandırma Sistemi
IBC Kodu	: Uluslararası Dökme Kimyasal Kodu
ICS	: Uluslararası Deniz Ticaret Odası
IE	: Ara Olay
IGC Kodu	: Uluslararası Gaz Taşıyıcı Kodu
IMDG Kodu	: Uluslararası Denizcilik Tehlikeli Maddeler
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization)
IMSBC Kodu	: Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yükler
INTERCARGO	: Uluslararası Kuru Yük Armatörleri Birliği
ISM Code	: Uluslararası Emniyet Yönetimi
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
İMİB	: İstanbul Maden İhracatçıları Birliği
JTSB	: Japonya Ulaştırma Emniyeti Kurulu
KAİK	: Türkiye Kaza Araştırma ve İnceleme Kurulu
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LSA Code	: Can kurtarma Araçları
M	: Geminin Metasentir Merkezi
MAIB	: Birleşik Krallık Deniz Kazaları Araştırma Birimi
MARPOL	: Gemilerden Kaynaklı Deniz Kirliliğini Önleme Sözleşmesi
MC	: Nem İçeriği
MPFT	: Modifiye Proctor/Fagerberg Testi
MSC	: Deniz Emniyet Komitesi
MSDS	: Malzeme Emniyet Bilgi Formu
MTA	: Maden Teknik Arama Kurumu
NTSB	: ABD Ulusal Taşımacılık Emniyet Kurulu
PFT	: Proctor/Fagerberg Testi
PMA	: Panama Denizcilik Otoritesi
PPI	: Filipinler Koruma ve Tazminat Kulübü/Kurumu
PT	: Penetrasyon Testi
QFD	: Kalite Fonksiyon Yayılımı
QRA	: Niceliksel Risk Analizi
RA	: Göreceli Uyum
RBI	: Risk Temelli Denetim

RÖS/RPN	: Risk Öncelik Seviyesi
SOLAS	: Uluslararası Denizde Can Güvenliği Sözleşmesi
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
Sw	: Doygunluk Derecesi
TE	: Tepe Olay/En Üst Olay
TML/TNL	: Taşınabilir Nem Limiti
TOPSIS	: Sipariş Tercih Tekniği
TSB-C	: Kanada Taşımacılık Emniyeti Komisyonu
UE	: Geliştirilmemiş Olay
UK P&I CLUB	: Birleşik Krallık Koruma ve Tazminat Kulübü
UN	: Birleşmiş Milletler
UNTACT	: Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı
USGS	: Birleşik Devletler Jeoloji Araştırmaları
W	: Gemi Ağırlığı, Deplesman

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Denizyolu taşımacılığı yük ve yolcu taşımacılığı ile liman hizmetleri faaliyetlerini kapsayan bir taşımacılık yöntemidir. Denizyolu taşımacılığı ile yük ve yolcular bir yerden başka bir yere denizyoluyla taşınırken limanlar da deniz ile kara arasında köprü görevi görmektedir. Deniz yolu taşımacılığında, özellikle yük taşımacılığı, küresel anlamda ciddi bir öneme sahiptir (Cesur, 2020). Denizyolu taşımacılığı, diğer taşıma türleri ile kıyaslandığında tek seferde taşınabilecek yük miktarının fazla olmasının yanında daha uygun maliyetlere sahip olması bakımından tercih edilen bir taşımacılık türüdür. Tonaj bakımından kıyaslandığında ise denizyolu taşımacılığı ile yaklaşık olarak dünya ticaretinin %80'den fazlası taşınmaktadır (UNTACT, 2022; Deniz Ticaret Odası, 2023).

Denizyolu taşımacılığı kendine özgü dinamikleri nedeniyle birçok zorluk ve tehlikeyi barındırmaktadır. Deniz yolu taşımacılığı sırasında yaşanan olaylardan en önemlilerinden biri deniz kazalarıdır. Maddi kayıplara, ciddi can kayıplarına ve çevresel felaketlere etki payı en fazla olan deniz olayları deniz kazalarıdır (Aslan, 2022). Meydana gelen deniz kazalarının çok yönlü etkilere ve çok önemli felaketlere neden olmaya başlaması üzerine, Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization-IMO) tarafından uluslararası standartları belirlemek amacıyla Denizcilik Emniyet Komitesi (MSC), Küresel Bütünleşik Denizcilik Bilgi Sistemi (GISIS) gibi çeşitli alt birimler oluşturularak birçok sözleşme, kod, yönetmelik ve kurallar yayınlamaktadır. Bu kurallar deniz kazalarının incelenmesi ve raporlanması konularını da içermektedir (Yıldırım, 2016). Denizde Can Emniyeti Uluslararası Sözleşmesi (SOLAS), Denizlerin Gemiler Tarafından Kirletilmesinin Önlenmesi Sözleşmesi (MARPOL 73/78), Denizde Çatışmayı Önleme Kuralları (COLREG), Yükleme Hatları Sözleşmesi ve Deniz Kaza Araştırma Kodu IMO tarafından kabul edilen sözleşme ve kodlardan bazılarıdır. Ayrıca birçok ülkede deniz kazalarının incelenip araştırılması amacıyla çeşitli kaza araştırma kurum ve birimleri oluşturulmuştur. Kanada Taşımacılık Emniyeti Komisyonu (TSB-C), Avustralya Ulusal Kaza ve Kaza Araştırması Kurulu (ATSB), Japonya Ulaştırma Emniyeti Kurulu (JTSA), İngiltere Deniz Kazaları Araştırma Bölümü (MAIB), Panama Denizcilik Otoritesi (PMA), ABD Ulusal Taşımacılık Emniyet Kurulu (NTSB), Türkiye Kaza Araştırma ve İnceleme

Kurulu (KAİK) gibi kurumlar kaza araştırma kurum ve birimlerden bazıları olup, bu kurum ve birimler yaşanmış veya yaşanabilecek deniz kazalarına yönelik araştırmalar yaparak raporlar hazırlamakta, kazaların temel sebeplerinin araştırılmasına imkân sağlamakta ve yaşanabilecek yeni kazaların önüne geçilmesine yönelik çalışmalar yapmaktadırlar (Tunçel, 2020). Deniz kazalarını önlemek üzere uluslararası birçok sözleşme, kural, düzenleme ve standartlar düzenlenmesine rağmen yine de birçok deniz olayı ve deniz kazası meydana gelmeye devam etmektedir (Yıldırım vd., 2015). Deniz kazaları can kaybı, deniz ortamının zarar görmesi ve ciddi maddi kayıplar gibi çok önemli sonuçlara neden olmaktadır (Akyüz ve Çelik, 2018).

Gemilerde gerçekleştirilen her operasyon ve işlem yüksek risk teşkil eder (Montewka vd., 2014; Coskun 2019). Deniz yolu taşımacılığında emniyeti artırmak için, risk etmeninin makul seviyelere indirilmesi gerekir. Risk; tehlike/hata fonksiyonunun ortaya çıkma olasılığı ve sonuçların şiddeti olarak tanımlanabilir (Akyüz 2015; Gül ve Güneri, 2016).

Ticari gemiler için emniyet konularıyla ilgili gereklilikler hakkında IMO tarafından asgari şartları belirlemek üzere kabul edilen temel sözleşmelerden biri Uluslararası Denizde Can Emniyeti Sözleşmesidir (SOLAS) (An, 2016). Bu sözleşme, emniyet standartlarının iyileştirilmesi ile ilgili birçok kodu içerir. IMO tarafından ISM Code (Uluslararası Emniyet Yönetimi), IBC Kodu (Uluslararası Dökme Kimyasal Kodu), IGC Kodu (Uluslararası Gaz Taşıyıcı Kodu), LSA Code (Can kurtarma Araçları), IMDG Kodu (Uluslararası Denizcilik Tehlikeli Maddeler), IMSBC Kod (Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yükler) gibi çeşitli kodlar ve sözleşmeler yayınlanmış olmasına rağmen, deniz taşımacılığında emniyet faktörü henüz arzu edilen düzeylere ulaşmamıştır (Knudsen ve Hassler, 2011). Yapılan birçok düzenleme ve getirilen birçok kurallara arzu edilen seviyelerde uyulmaması ve insan hataları merkezli nedenler, deniz kazalarının en önemli ve temel nedenleri olarak öne çıkmaktadır (Yıldırım ve Başar, 2019). IMSBC Kodu (Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yükler) IMO tarafından kuru dökme yüklerin güvenli bir şekilde taşınmasını yönetmek için SOLAS sözleşmesi kapsamında kabul edilmiştir. IMSBC Kodu, gemilerde taşınan katı dökme yüklerin potansiyel tehlikeleri hakkında detaylı bilgi vermektedir (Munro ve Mohajerani, 2017; Akyüz vd., 2020).

Gemilerde yapılan her operasyon ve uygulama için risk analizine bağlı olarak riskleri kabul edilebilir seviyelere indirme yöntemleri önerilebilir. Risk, oluşma olasılığı ve sonucunun ciddiyeti olmak üzere iki önemli parametreden oluştuğundan, kritik gemi operasyonlarında insan hatası olasılığı risk seviyesini belirlemek için büyük önem

taşımaktadır. İstatistiklere göre, ölümlü deniz kazalarının %80'den fazlası insan hatasına bağlanmaktadır (Corovic ve Djurovic, 2013; Akyüz, 2016; Pazouki vd., 2018; Akyuz vd., 2020; EMSA, 2022). Denizcilik operasyonlarında insan kaynaklı hataların hangi durumlarda ortaya çıkabileceğini analiz etmek ve bu tür hataların oluşumunu azaltmak ve önlemek için denizcilik otoriteleri tarafından büyük çaba harcanmaktadır (Weng vd., 2019). İnsan hatalarının meydana gelme olasılıklarının hesaplanması sayısal risk analizlerinin (QRA) ana unsurlarından biridir (Akyuz vd., 2020). Bu çalışmada, kuru dökme nikel yükünün sıvılaşmasında olası insan hatası dikkate alınarak sayısal (nicel) bir risk analizi yapılmıştır.

Bu çalışmanın amaçları şu şekilde sıralanabilir. Nikel madeni yükünün nakliyesi sırasında meydana gelen sıvılaşma probleminin potansiyel tehlikeleri ve sonuçları hakkında bilgi vermek, kuru dökme yük taşımacılığında sayısal ve hibrit bir risk analizi sunmak, Hata Ağacı Analizi yöntemini bulanık mantık yöntemi ile birleştirerek nikel madeni yükünün sıvılaşması üzerine yapılacak kapsamlı bir risk analizi ortaya koymak, Hata Türleri ve Etki Analizi (FMEA) yöntemiyle nikel yükünün sıvılaşmasına neden olan hataların risk öncelik değerlerini belirleyerek önleyici öneriler sunmak, deniz yolu taşımacılığında emniyet kültürünü ön plana çıkarmak suretiyle kuru dökme yük gemilerinde emniyetli yönetim sistemini geliştirme konusunda katkı sağlamak ve sıvılaşabilen yükler ile ilgili potansiyel risklerin yönetilmesi konusunda Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yük Kodu (IMSBC Code) düzenlemelerine katkıda bulunmaktır.

Çalışmanın birinci bölümünde sıvılaşma olgusu, kuru dökme yüklerin sıvılaşması, sıvılaşan yükler, yükün sıvılaşmasını tespit etmek için yapılan laboratuvar test yöntemleri, nikel madeni ve sıvılaşması, sıvılaşmanın gemi stabilitesine etkisi, nikel madeni yükünün sıvılaşması sonucu yaşanan deniz kazalarının kaza raporları, Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA), Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA), ve literatürde bulunan çalışmalar ile ilgili bilgilere yer verilmiştir. İkinci bölümde nikel madeni yükünün sıvılaşmasına neden olan temel hataların belirlenmesi, hata ağacının oluşturulması, Hata Ağacı hesaplamaları ve hata türlerinin risk öncelik değerlerinin hesaplanması ile ilgili yapılan çalışmalar ortaya konmuştur. Üçüncü bölümde ise, elde edilen bulgular ışığında çalışmanın diğer çalışmalardan farklı yönleri açıklanmış, elde edilen sonuçlara yer verilerek çeşitli öneriler sunulmuş ve çalışmanın katkıları hakkında bilgi verilmiştir.

1.2. Sıvılaşıma Olgusu

"Sıvılaşıma" terimi ilk kez 1918 yılında Allen Hazen isimli araştırmacı tarafından Kaliforniya'daki Calaveras Barajı'nın yıkılması anlatılırken kullanılmıştır. Ancak sıvılaşıma (liquefaction) terimini bilimsel literatüre ilk kazandıran araştırmacı olarak Karl Terzaghi (1925) olarak bilinmektedir. O zamanlar sıvılaşıma sadece toprak sıvılaşması ile ilişkilendiriliyordu.

Zemin sıvılaşması, toprak tabakasının uygulanan stres nedeniyle mukavemetini ve sertliğini kaybederek aniden katı ve kuru bir durumdan neredeyse akışkan bir duruma dönüştüğü bir olgu olarak tanımlanmaktadır. Bu gerilme bir deprem veya sıvıya benzer bir davranışla sonuçlanan gerilme koşullarındaki herhangi bir ani değişiklik olabilir (Castro, 1975).

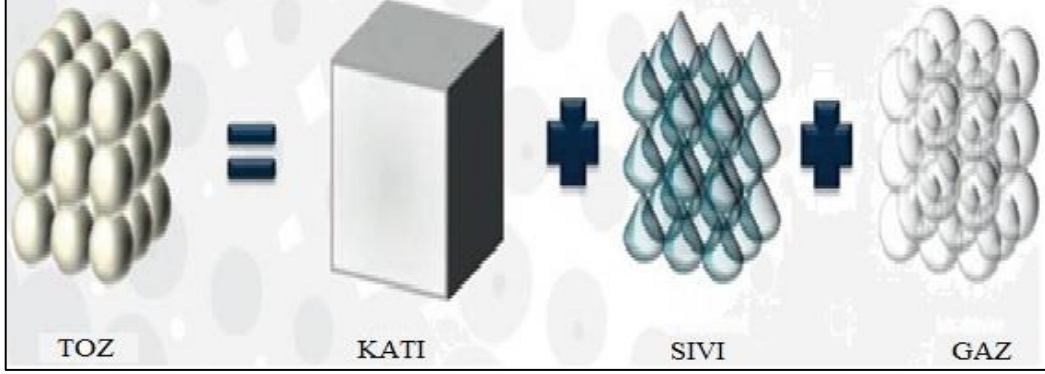
Her ne kadar 20. yüzyılın sonunda toprağın sıvılaşması iyi bilinen bir olgu olsa da, başka bir sıvılaşıma türü dünya çapında bir endişe ortaya çıkarmıştır. Bu endişe gemilerdeki yük sıvılaşmasıdır ve denizcilik dünyası için ciddi bir tehlike haline gelmeye başlamıştır. Her ne kadar "sıvılaşıma" kelimesinin yüksek nem içeriğine sahip yüklerle ilgili olması beklense de, kısa süre içinde belli bir oranda nem içeriğiyle taşınan bir taneli yükün sıvılaşabileceği, bir geminin ve birçok hayatın kaybına yol açabileceği kanıtlanmıştır. 1980'li yılların sonlarından buyana sıvılaşıma nedeniyle meydana gelen kazaların sayısı, bu olgunun anlaşılması ve ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Sıvılaşıma olgusunu anlayabilmek ve açıklamak için granüler maddelerin özelliklerini ve zemin sıvılaşması olayını çok iyi açıklamak gerekir.

1.2.1. Granüler Maddeler

Sıvılaşıma olgusunu açıklayabilmek için tanecikli maddelerin özelliklerini de tanımlamak ve açıklamak önemlidir. Birçok araştırmacı tanecikli malzemelerin kolayca tanımlanabileceğini düşünmektedir. Fakat tanecikli malzemelerin davranışları inanılmaz derecede karmaşıktır. Bu nedenle granüler (tanecikli) maddelerin özelliklerine ilişkin pek çok soru hala cevapsızdır. Tanecikli yapıya sahip maddelerin davranışları katıların, sıvıların veya gazların davranışlarıyla aynı olmayıp bunların bir karışımıdır (Spandonidis and Spyrou, 2016; Ju, 2017). Granül malzemelerin özellikleri her zaman taneciklerin boyut

ölçülerine, dağılımlarına, ağırlıklarına, yüzeylerine ve malzemenin yoğunluğuna bağlıdır (Mitarai ve Nori, 2007).



Şekil 1. Tozlar katılar, sıvılar ve gazlardan oluşan yığınlardır (Freeman, 2015)

Tozlar, tanecikli malzemelerin özel bir sınıfıdır. Genellikle özellikleri, küçük parçacık ölçülerinden dolayı diğer tanecikli malzemelerden oldukça farklıdır. Bir tozun tanecik aralığı, tipik bir iri taneli malzemenin aralığından daha büyüktür. Bir ambarın/tankın içine yüklenirken yoğunluğu düşük olsa bile, taşınırken sıkışma meydana gelir ve daha büyük bir yoğunluğa neden olur. (Rowe ve Roberts, 1995)

Kümelenme tozların önemli bir mekanik özelliğidir. Moleküller arasındaki Van Der Waals kuvvetinin gelişmesi nedeniyle genellikle tanecikler birbirlerine yapışırlar. Van Der Waals kuvveti daha küçük taneli granüler malzemeleri de etkiler, fakat bu durumda, taneciklerin boyutlarından dolayı kuvvetin etkisi daha küçük olur (Freeman, 2015)

Sıkıştırılabilirlik özelliği de toz formlarının başka bir özelliğidir. Bir toz kümesi bir kaba biriktirilerek bir basınç uygulandığı zaman, tozun parçacıkları daha yakın hareket etmeye zorlanır ve toz kümesinin hacmi değişir. Aynı sayıda toz parçacığı artık daha az bir hacme sığar. Sıkıştırma işlemi çoğunlukla kontrolsüz meydana gelir ve bir tozun taşınması veya stoklanması sırasında da meydana gelebilir. Karmaşık bir durum olması nedeniyle bir tozun akışkanlığının açıklanması da oldukça zordur. Sıkıştırılabilirlik aynı zamanda tozların başka bir özelliği olan akışkanlık ile de ilgilidir. Bir tozun akışkanlığı genellikle malzemenin fiziksel özelliklerine bağlıdır ve tozun geçtiği işlemlerden dolayı değişebilir. Bir tozun akışkanlık özellikleri başka bir tozla karıştırılıp karıştırılmayacağını veya nasıl karıştırılabileceğini ve bu tozların birlikte nasıl davranacağını belirleyebilir (Freeman, 2015; Ju vd., 2016).

Tozların bir diğer önemli özelliği de geçirgenlik özellikleridir. Tanecikli malzemelerin parçacık boyutları ve şekillerindeki farklılıklar, aralarında boşlukların bulunmasına neden olur. Parçacıklar arasındaki boşluklar boyunca hava hareket edebilir. Daha büyük parçacıklara sahip tozlar, tanecikleri arasındaki boşlukların daha büyük olması nedeniyle daha yüksek oranda bir geçirgenliğe sahiptirler. Her bir malzemenin özelliklerini ve davranışını etkileyen kritik bir orana sahip boşluk-tanecik oranı vardır. Özellikle, bir malzemenin boşluk-tanecik oranı kritik orandan büyük olduğu zaman tanecikler birbirlerine yaklaşma eğiliminde olurlar, daha küçük olduğu zaman ise uzaklaşma eğiliminde olurlar (Terzaghi vd., 1996). Boşluk-tanecik oranı yükün yoğunluğunu da etkileyen bir orandır. Yoğunluğu az olan (yani boşluk/tanecik oranı büyük) bir malzemenin tanecikleri arasında bulunan boşluklar suyla dolduğunda, tanecikler birbirlerine yaklaşma ve boşluklardan su alma eğiliminde olurlar. Bu düzensizlik yoğun değilse veya yavaşça uygulanırsa, su boşluklardan uzaklaştırıldığı için buharlaşır ve böylece sıvılaşma gerçekleşmeden tanecikler birbirine yaklaşır. Tersine, düzensizlik yoğun, hızlı ve tekrarlı olduğunda ise su buharlaşmaz ve neticede gözenek basıncı artarak sıvılaşmaya neden olur. Geçirgenlik özelliği aynı zamanda katı benzeri bir davranıştan sıvı benzeri bir davranışa dönüşme ihtimali en yüksek olan malzemelerin tespit edilmesine olanak sağlayan bir özelliktir (Ju, 2017).

Son olarak, toz taneciklerinin suyu emme kabiliyeti de çok önemli bir özelliktir. Bir sıvı bir toza eklendiğinde, parçacıkların yüzeyini kaplayarak örtme eğilimi gösterir. Bu durum meydana geldiği zaman, tanecikler arasında her bir taneciğin serbest hareketine engel olan sıvı köprüleri oluşur. Malzemenin davranışını ve verimliliğini tozun içinde su bulunması önemli derecede etkileyebilir. Sıkışma-çözülme, kırılabilirlik, kinetik enerji kaybı, sürtünmeli kesme-sıkıştırma özellikleri granül malzemelerin davranışlarını etkileyen diğer özelliklerdir (Antonia, 2018).

Sonuç olarak, granüler maddelerin davranışları gerçekten karmaşıktır ve malzemenin birçok farklı mekanik ve fiziksel özelliğine bağlıdır.

1.2.2. Zemin Sıvılaşması

Sıvılaşma, silt ve kum gibi taneli zeminlerde görülen sarsıntı, titreşim gibi hızlı ve büyük yüklemeler sonucunda, malzemenin dayanımını, sertliğini ve sıkılığını kaybetmesi

kavramıdır (Alpaslan, 2013). Sıvılaştırılabilir özelliklere sahip bir zeminin sıvılaştırılması için kuvvetli bir sarsıntıya maruz kalmasıyla meydana gelen bir durumdur (Şengöz, 2019).

Zemin sıvılaştırılması, yeraltında su seviyesi altında bulunan toprak tabakalarının dayanım güçlerini geçici olarak kaybetmeleri sonucu katı madde yerine akışkan bir madde gibi davranmalarıdır. Özellikle killi olmayan kum ve silt tabakalar ile bazı alanlarda da çakıl tabakaları sıvılaştırma potansiyeline sahip tabakalardır. Deprem esnasında yer dalgaları, özellikle de kayma dalgaları, su içeriği açısından doygun ve taneli tabakalardan geçerken, tanelerin yerleşim düzeninin değişmesine ve gevşek halde bulunan tanelerin yer değiştirerek yerleşmesine ve sıkışmasına neden olur. Bu yerleşme sırasında toprak/kum taneleri arasında bulunan suyun yol bularak ortamdaki ortamdan çıkamaması sonucu boşluk suyu basıncı yükselir. Bu basıncın üstteki tabakaların ağırlığına yakın bir değere ulaşmasıyla, taneli tabakalar geçici olarak sıvı gibi davranır ve sıvılaştırma durumu meydana gelir (Celep ve Kumbasar, 2000). Başka bir ifadeyle zemin sıvılaştırılması, su seviyesi altında bulunan zemin tabakalarında, hareketli yüklerin etkileri nedeniyle gevşek taneli, bütünleşmemiş zeminlerin (ince taneli, kum ve siltli zeminler) dayanım kuvvetlerini kaybederek akışkan bir madde gibi davranmaları olayıdır (Şengöz, 2019).

Karl Terzaghi sıvılaştırma (liquefaction) terimini bilimsel literatürde kullanan ilk araştırmacı olarak bilinmektedir (Terzaghi, 1925). Terzaghi (1925) sıvılaştırmayı, suya doygun bir zeminin aşağı doğru çökmesi esnasında, katı parçacıkların ağırlığını zeminin etrafını saran suya iletmesiyle oluşması olarak ifade etmiştir (Terzaghi, 1925; Castro, 1969; Şengöz, 2019). Bu durumun neticesinde, zeminin herhangi bir derinliğinde sudan kaynaklanan hidrostatik basınç yükselir. Yükselen hidrostatik su basıncının kuvveti zeminin suya batan kısmının birim ağırlığına yaklaşır (Castro, 1969; Alpaslan, 2013).

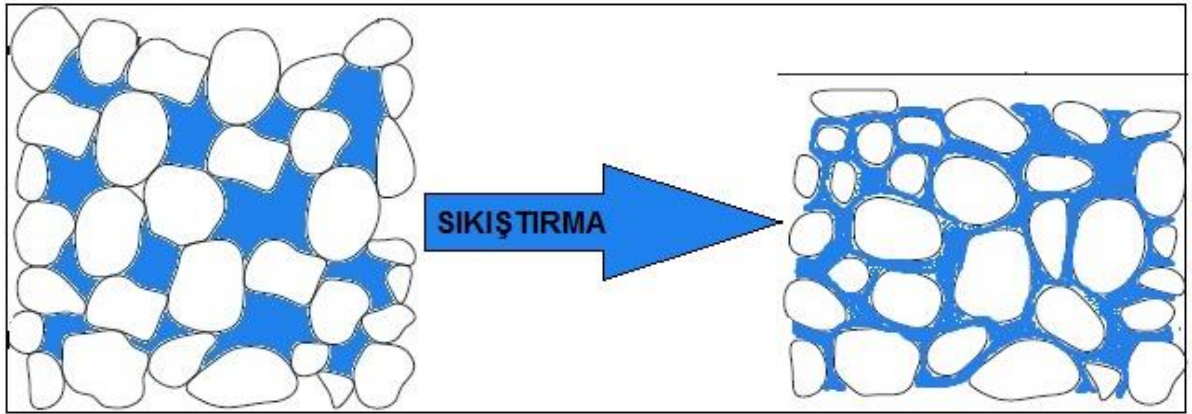
1.2.3. Yük Sıvılaştırılması

Hem granül malzemelerde hem de çok ince yapılı cevher malzemelerinde (granül olmayan malzemelerde) yük sıvılaştırılması gözlemlenebilir. Her iki kategoride de sıvılaştırma farklı şekillerde açıklanabilir (Zhang vd., 2016a).

Cevher yükleri gibi granül malzemeler dökme yük taşıyıcıları arasında en yaygın yük türlerindedir. Malzemeyi gözlemleyerek bile küçük ve büyük taneli taneciklerin bir karışımı olduğu ayırt edilebilir. Sıvılaştırma olgusu genellikle nem içeren dökme yüklerde görülen bir olgudur. Daha küçük ve daha büyük tanecikli tanecikler arasında sadece hava

ile birlikte su da bulunur. Malzeme kuru haldeyken, bu parçacıklar birbirleriyle temas halinde olması parçacıklar arasında sürtünme kuvvetlerine neden olarak yük için kesme gücü ve yapışkanlık meydana getirir (Jaeger vd., 1996; Ju, 2017).

Yük, taşıma sırasında dalgalar, gemi hareketleri ve diğer çalkantılardan kaynaklanan titreşimlerle karşı karşıya kalır. Bu hareketler, tanelerin uygun yoğunlukta düzenlenmesini sağlar ve yükün aşamalı olarak sıkıştırılmasına neden olur. Yükün düzenlenmesi ve sıkıştırılması sonucu hacmi azalırken yoğunluğu artar. Tanecikler arasındaki boşluklar küçüldüğü için hava ve su için kullanılabilir hacim de azalır. Havanın aksine su sıkıştırılabilir olmadığı için malzeme sıkıştırıldığında su dışarı çıkar ve su gözeneklerinin basıncı artarak granül parçacıkların birbirinden ayrılması durumu ortaya çıkar. Neticede birbirleriyle temas halinde olmayan tanecikli parçacıklar aralarındaki sürtünme kuvvetlerini kaybederler. Parçacıkları arasındaki sürtünme kuvveti ve kesme mukavemetini kaybeden yük, bir sıvı gibi davranmaya başlar. Akışkan davranışın ortaya çıkması genellikle yükleme operasyonlarından sonra hızlı bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Birçok sıvılaştırma olayında yükün sadece bir kısmının sıvılaştığı tespit edilmiştir (Gullen ve Norwegian Hull Club, 2015).



Şekil 2. Yük sıkışmasının bir sonucu olarak sıvılaştırma (Gullen ve Norwegian Hull Club, 2015)

Çok ince malzemelerin sıvılaştırılması, malzemenin yorulmasının bir sonucudur. Taşıma sırasında yük, gemi hareketleri ve titreşimler nedeniyle döngüsel bir hareket altındadır. Yük, kesme mukavemetinin bir kısmını kaybeder ve kohezyonu (moleküllerin birbirini tutma gücü) önemli ölçüde azalır. Sonuç olarak, yük bir sıvı gibi davranmaya başlar. Taneli malzemelerle karşılaştırıldığında, kil benzeri malzemelerde sıvılaştırmanın ortaya

çıkması için daha fazla zamana ihtiyaç vardır. Ancak sıvılaşma olayı genellikle yükün en önemli kısmında meydana gelir (Gullen ve Norwegian Hull Club, 2015; Antonia, 2018).

Sıvılaşmanın yukarıda açıklanan tiplerinin yanı sıra, ıslak taban oluşumu sıvılaşmanın daha nadir fakat daha tehlikeli bir şeklidir. Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yükler Koduna (IMSBC Kodu) göre, bir seyir sürecinde yük içerisindeki nemin yükün alt kısımlarına doğru hareket etme ihtimali vardır. Bu hareket, nem miktarının akış nem noktasını (FMP/ANN) aşması neticesinde kuru bir yüzey ve ıslak bir tabanla sonuçlanır. Yani yük sıvılaşır. Bu durum, yükmeden önce yükün nem içeriği taşınabilir nem limitini (TML/TNL) aşmamış olsa dahi meydana gelebilecek bir durumdur. Islak bir zemin oluşabilmesi için granül malzemenin yüksek tane geçirgenliğine sahip olması gerekir. Böylece nem alt seviyelere geçerek yükün altında ıslak bir taban meydana getirebilir (Antonia, 2018).

1.2.5. Nem Göçü

Nem göçü ve nem göçünün sonuçları sıvılaşma ile ilişkili başka bir olgudur. Bir geminin yüklenmesinden önce yükler kuru görünebilir. Ancak aslında önemli miktarda nem içerir (Lee, 2017). Yükleme sırasında yükün miktarı arttıkça yük sıkışması başlar ve bu sıkışma seyir sırasında da devam eder. Bu sıkışmalar yükün yeniden düzenlenmesine yol açarak nem göçüne neden olur. Nem göçü, yük ambarlarının içindeki nemin hareketi olarak adlandırılır. Bütün yükün neminin bir seyrin başında ve sonunda aynı olması, fakat yükün farklı bölümlerinin nem içeriğinin önemli ölçüde değişmesi gemilerde sıklıkla gözlemlenen bir durumdur (Groot vd., 2006; Nippon Kaiji Kyokai, 2012; DNV-GL, 2015). Nem göçünün sıvılaşma ile nasıl bağlantılı olduğunu anlamak için bunun nasıl ve neden gerçekleştiğini açıklamak çok önemlidir.

Yükün parçacıkları arasında su buharı içeren hava bulunur. Bu havanın buhar basıncı, malzemenin nem içeriği ile dengelenme yönelimindedir. Yükün bir bölümündeki tanecikler arasındaki havanın basıncı başka bir bölümündeki hava basıncından daha yüksek bir değerde olabilir. Basınç farkının dengelenmesi için yüksek hava basıncı olan bölümden düşük basınçlı olan bölüme su buharı akışı olur. Bu akış, su buharının yükün merkezinden yükün dışına doğru hareket etmesi sonucu hava buharı basıncı düşer. Fakat başlangıçtaki buhar basıncını dengede tutmak için daha fazla su, taneciklerin içinden boşluklara doğru

hareket etmeye başlar ve denge koşulları yeniden sağlanır. Yük içerisindeki su buharı döngüsü bu şekilde devam eder. (UK P&I CLUB, 2010)

Hareketli nem, su buharı basıncı farkından kaynaklanan bir olgu olduğu gibi aynı zamanda yükün ısınması ile de meydana gelebilir. Yükün ısınması nemin her yöne hareket etmesine ve ısınan bölgeden uzaklaşmasına yol açar. Sıcak hava ısınan bölgeden yukarı doğru yükselerek yanlardan veya aşağıdan gelen daha soğuk havayla yer değiştirirken beraberinde nemi de taşır. Bu da nemin yukarı doğru hareket etmesine ve yükün üst kısmına çok daha fazla su taşınmasına neden olur. Havalandırma yoluyla yükün üst kısmına taşınan suyu uzaklaştırmak mümkün değilse, yükün üst katmanlarında daha fazla su birikmesi meydana gelir (UK P&I CLUB, 2010; Antonia, 2018).

Tüm bu nem hareketleri yükün bir bölgesinde nem içeriğinin yükselmesine yol açar. Bu şartlar altında su, ambarların kenarları veya yükün üst kısmı gibi belirli kısımlarda yoğun bir şekilde toplanabilir. Bu durum, sadece bölgesel olsa bile sıvılaşmanın meydana gelmesiyle sonuçlanabilir.

1.2.6. Yükün Değerlendirilmesi İçin Uygulanan Test Yöntemleri

Sıvılaşmanın meydana gelme olasılığının değerlendirilmesi, yükün emniyetini sağlamak için gerekli bir ilk adımdır. IMSBC Kodu'nda, sıvılaşma potansiyeli olan "A Grubu" yüklerin taşınabilir nem limitini (TML/TNL) belirlemek için Akış Tablosu Testi (ATT), Penetrasyon Testi (PT) ve Proctor/Fagerberg (PFT) Testi olmak üzere üç çeşit test yöntemi vardır (IMSBC Code, 2022).

Sıvılaşma riskini azaltmak için geliştirilmiş ve halen kullanılmakta olan başlıca deneysel yöntemler aşağıda listelenmiştir.

1.2.6.1. Akış Tablosu Test (ATT/FTT) Yöntemi

Akış tablosu testi esasen Kanada mineral konsantreleri için geliştirilmiş ve IMO tarafından 1980'lerde kabul edilmiş bir test yöntemidir. Test maksimum parçacık boyutu 1 mm olan kargolar için geçerli olsa da IMSBC Kodu'na göre maksimum parçacık boyutu 7 mm'ye kadar kullanılabilir. Standart bir akış tablosuna (ASTM C230-08) yerleştirilen standart ölçülerde konik şekilli bir kalıp kullanır. Kalıp, standart bir doldurma ve sıkıştırma prosedürü kullanılarak üç katman halinde doldurulur. Her üç katmana uygulanan sıkıştırma

basıncı, yükteki basınç şartlarına uygun olmalıdır. Toplam basınç, kütle yoğunluğunun yük yüksekliğine oranından hesaplanabilir. Örneğin, 10 m derinlikte yük yoğunluğu 2000 kg/m³ olan bir yükün tabakasındaki toplam dikey basınç yaklaşık 200 kPa'dır. Doldurma ve sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra kalıp çıkarılır ve masanın üzerinde kesik bir numune malzemesi konisi bırakılır. Daha sonra masa, dakikada 25 düşme hızında, 12,5 mm düşme yüksekliğinde 50 defa yukarı kaldırılıp aşağı indirilir. İşlem tamamlandıktan sonra nem içeriğini tespit edebilmek için bir numune alınır. Test prosedürü, su içeriğindeki küçük artışlarla tekrarlanır. Bir malzeme sıvılaşmaya yatkın ise, nem içeriği belirli bir seviyeyi geçtiğinde çökmeye ve akmaya başlar. Çökme sonucu çaptaki artma ölçülür. koninin çökmeye başladığı nem içeriği akış nem noktası olarak ifade edilir. ANN (FMP), akış nem noktasının üzerindeki nem içeriğinde görülen küçük artışlar ile koni çapındaki ortalama artışın ölçülmesi ve bu ölçümlerin 3 mm değerinde doğrusal olarak orantılanarak belirlenir. ANN'nın altında bir nem içeriğine sahip numune sıklıkla parçalanır ve tablanın art arda düşmesiyle parçalar halinde ayrılır. Taşınabilir nem limiti (TNL/TML), bir emniyet sınırını ifade eden ANN'nın %90'ı olarak tanımlanır (Paassen vd., 2015; Munro ve Mohajerani 2016a; Ju, 2017; IMSBC Code, 2022).



Şekil 3. Akış Tablosu Testi (Ju, 2017)

1.2.6.2. Penetrasyon (Titreşim) Testi (PT)

Standart Penetrasyon Testi (SPT) de denilen bu test, basit bir test olması ve düşük maliyetli olması nedeniyle günümüzde hala kullanılmaktadır. Temel olarak zemin testi için kullanılan bu test yöntemi, ince taneli kumlarda güvenilir sonuçlar verirken kalın taneli

kum veya kil içerikli malzemelerde tutarlı sonuçlar vermeyebilir. Erişilmesi zor olan bölgelerde uygulanabilir bir yöntem olması nedeniyle zemin testlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Paassen vd., 2015; Lee, 2017; Antonia, 2018).

Penetrasyon testi, ilk başlarda kömür için TNL'ni değerlendirmek amacıyla Japonya'da geliştirilmiş, aynı zamanda diğer malzeme türlerine de uygulanabilir olduğu düşünülmüştür (IOTWG, 2013). Test, daha büyük bir kalıp kullandığından 25 mm'ye kadar daha büyük tane boyutlarını test etmeye izin vermektedir. Kalıp, yaklaşık 1,7 dm³'lük sıkıştırılmış hacme kadar dört katman halinde doldurulur. Her katman, sıkıştırma basıncının akış tablosu testinde uygulanan prosedüre benzer standart bir sıkıştırma prosedürü kullanılarak sıkıştırılır. Sıkıştırma işleminden sonra numune bir titreşim tablası üzerine konur ve yüzeyine standart boyut ve ağırlıkta bir penetrasyon ucu yerleştirilir. Numune, 6 dakika boyunca öngörülen 2 m/s²'lik bir ivme ile 50 Hz frekansta titreştirilir ve matkabın ilerlemesi ölçülerek nem içeriğini belirlemek üzere bir örnek alınır. Test, nem içeriğindeki küçük artışlar için tekrarlanır. Akış Nem Noktası (ANN), ucun 50 mm nüfuz ulaştığı nem içeriği olarak belirlenir. Akış tablosu testine benzer şekilde TNL, bir emniyet sınırını dahil ederek ANN'nin %90'ı olarak tanımlanır (Paassen vd., 2015; Munro ve Mohajerani 2016a; Ju, 2017; IMSBC Code, 2022).

Penetrasyon test yönteminin biri Koni Penetrasyon Testi (CPT) diğeri Becker Penetrasyon Test yöntemi olmak üzere iki çeşidi vardır (Dejong vd., 2016; Antonia, 2018).



Şekil 4. Penetrasyon (Titreşim) Testi (Ju, 2017)

1.2.6.3. Proctor/Fagerberg Test (PFT) Yöntemi

Proctor/Fagerberg Test (PFT) Yöntemi ilk olarak 1962 yılında Stockholm'de Bengt Fagerberg ve Kjell Eriksson tarafından bir programın parçası olarak yayınlanmış bir yöntemdir. PFT yöntemi, geliştirilen Proctor aparatının (ASTM Standardı D-698) kullanımına dayanmaktadır. Daha sonra Ralph Proctor tarafından zemin mekaniğinde kullanılmak üzere geliştirilen bu yöntem, 1991 ve 1998 yılları arasında IMSBC Kodunda kullanım için IMO tarafından benimsenmiştir (Munro ve Mohajerani 2016a; Paassen vd., 2015).

Prosedür, malzemenin standart bir litrelik sıkıştırma kalıbına, değişen hızlarda sıkıştırılmasını içerir. En az beş veri noktasına sahip bir sıkıştırma eğrisi oluşturmak üzere kılavuzlu bir borudan 350 g'lık bir çekiç, 200 mm yükseklikten 25 kez düşürülerek beş kez uygulanır. Her nokta için brüt su içeriği (GWC) ve boşluk oranı hesaplanarak karşılık gelen değerle birlikte bir grafik üzerinde doygunluk seviyesi (S_w) tespit edilir. Ortaya çıkan GWC daha sonra S_w 'nin %70'ine eşit olup olmadığı grafikten belirlenir. Bu değer TNL olarak adlandırılır (Munro ve Mohajerani 2016a; Paassen vd., 2015; IMSBC Code, 2022).

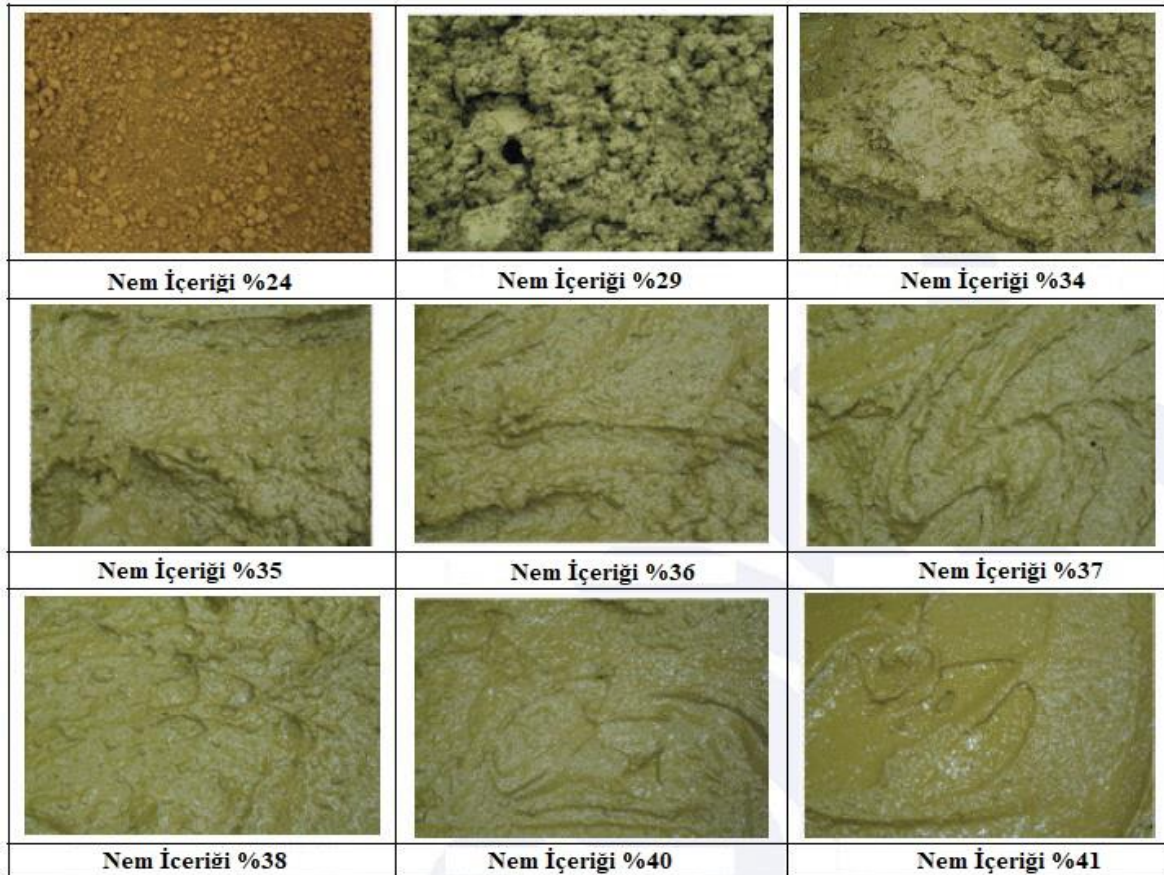


Şekil 5. Proctor/Fagerberg Testi (Ju, 2017)

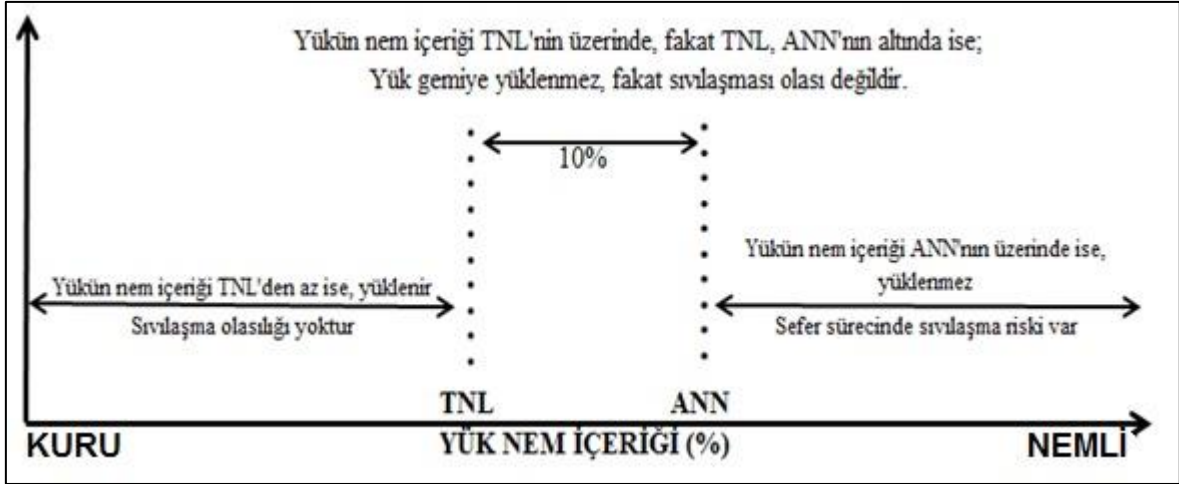
1.2.7. Akış Nem Noktası (FMP/ANN) ve Taşınabilir Nem Limiti (TML/TNL)

Sıvılaştırma araştırmalarında çok sık kullanılan iki temel terimi açıklamak çok önemlidir. Bu iki terimden biri Akış Nem Noktası, diğeri ise Taşınabilir Nem Limiti'dir.

Akış Nem Noktası (FMP/ANN) sıvılaştırmanın görülebileceği en düşük nem seviyesi olarak adlandırılır (Ju, 2017). Gemi makinesi ve pervanesinden kaynaklanan titreşimlere, geminin hareketlerine, dalgaların gemi üzerindeki etkisine ve dolayısıyla yükün sıkıştırılma derecesine bağlı olarak ANN değerinin üzerinde bir nem içeriğine sahip bir yük gemiye yüklenirse; bu yük seyir sırasında herhangi bir zamanda sıvılaşabilir. ANN, maksimum sıkıştırmada yük parçacıkları arasındaki boşlukların hacmine bağlıdır. Boşluk hacmi, yükü meydana getiren parçacıkların yüzeyinin kıvamına, boyutuna ve şekline bağlı olması nedeniyle, ANN'nin sayısal değeri madenin olduğu bölge ve işleme tesislerine bağlı olarak önemli derecede değişiklik gösterir. Kısacası, ANN her durumda laboratuvar testleri ile belirlenerek güvenilir sonuçlar elde edilebilir (Munro ve Mohajerani, 2016; Antonia, 2018).



Şekil 6. Çeşitli nem içeriklerinde nikel madeni yükünün görünümü (Ju,2017)



Şekil 7. ANN ve TNL. A Grubu yükler sadece uygun nem içeriklerinde taşınabilir (Rose, 2014)

Taşınabilir Nem Limiti (TML/TNL), yükün taşınması için güvenli kabul edildiği maksimum nem içeriğidir. TNL, laboratuvar testleri ile elde edilen ANN'nın %90'ına eşittir. Taşınabilir nem limiti ile akış nem noktası arasındaki fark, Şekil 7'de gösterildiği gibi emniyetli yükleme için gereken sınırlar içerisinde bulunması gerekir (Shen, 2012; Munro ve Mohajerani, 2016).

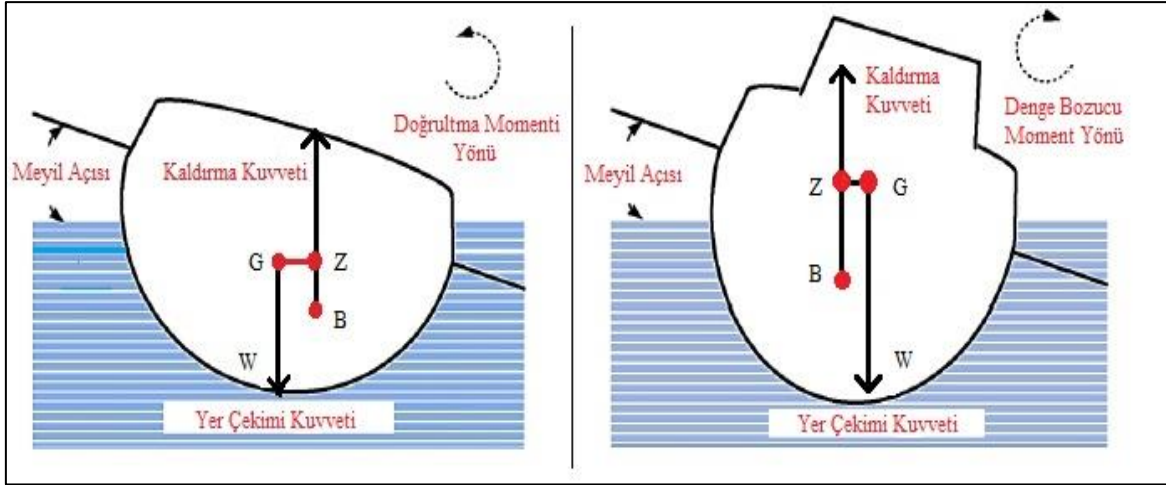
1.3. Gemi Stabilitesi

Yük sıvılaşmasının gemilerin stabilite değerlerini çok ciddi bir şekilde etkilemesinden dolayı sıvılaşma nedeniyle gemi kayıpları yaşanmaktadır.

Denizde yüzen herhangi bir nesne gibi gemiye de su tarafından gemi ağırlığına eşit bir kaldırma kuvveti uygulanır. Geminin ağırlığı genellikle W harfi ile gösterilir ve geminin ağırlık merkezinden aşağıya doğru etki eder. Yani cismin ağırlığı taşıdığı suyun ağırlığına eşit ($W=\Delta$) olur. Bu durum bir cismin suda yüzmeye şartıdır (Τζαμπίρας, 2015). Bu kuvvet, geminin sadece batık hacminin geometrik merkezi olan kaldırma kuvveti merkezine (yüzme merkezine/B) etki eden kaldırma kuvvetine eşittir. Dengede olan bir gemide kaldırma kuvvetleri ve ağırlık aynı dikey doğru üzerinde hareket eder (Τζαμπίρας, 2015; Antonia, 2018).

Teknede bir dış kuvvet (örneğin dalgalardan veya rüzgârdan kaynaklanan) ortaya çıktığında, ağırlık merkezi (G) yerinde kalırken kaldırma kuvveti merkezinin yeri değişebilir. B ve G arasındaki yatay mesafeye denge kolu denir ve GZ olarak sembolize

edilir. Ortaya çıkan denge momenti ($W \times GZ$) teknede bir yatıklığa (meyil) neden olur ve tekne stabilitesini bozar (Ju, 2017).

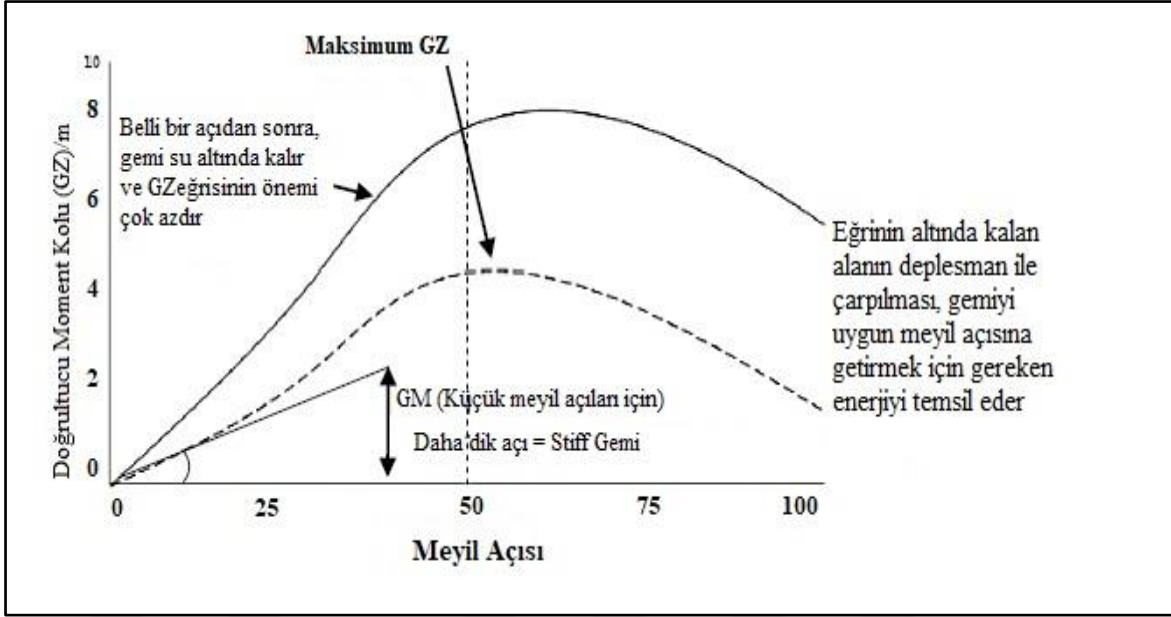


Şekil 8. Stabil gemi meyili ve GZ 'nin negatif olması, geminin alabora olmasına neden olur (Rose, 2014; Ju, 2017)

Bir geminin dengesi incelenirken, geminin metasentr merkezi (M) de göz önünde bulundurulur. Metasentr merkezi gemiye etki eden tüm dikey kuvvetlerin kesiştiği noktayı temsil eder. Küçük açılarda yeri değişmez. Geminin stabilitesi M'nin G'ye olan dikey uzaklığı ile temsil edilir. Buna Metasentr Yüksekliği (GM) denir (Tζαμπίρας, 2015; Ju, 2017; Antonia, 2018).

GM ve GZ ambarların içindeki yükün türüne ve yüklenmesine göre değişir ve kaldırma kuvveti merkezinin tam konumuna bağlıdır. Ambarlara yoğunluğu büyük bir yük yüklendiğinde geminin ağırlık merkezi, yoğunluğu düşük bir yük yüklediğimizden daha çok omurgaya yaklaşacaktır. Ağırlık merkezinin omurgaya daha yakın olması gemiyi daha dengeli hale getirecektir. Bu tip yüklü gemilere stiff gemi denir (Derrett ve Barrass, 2001). Stiff gemiler daha dengeli olsa da, daha yüksek enine kesme kuvvetleri (hareketleri) yük üzerinde etkili olabilir ve yükün kayma olasılığını artırabilir (Derrett ve Barrass, 2001; Antonia, 2018).

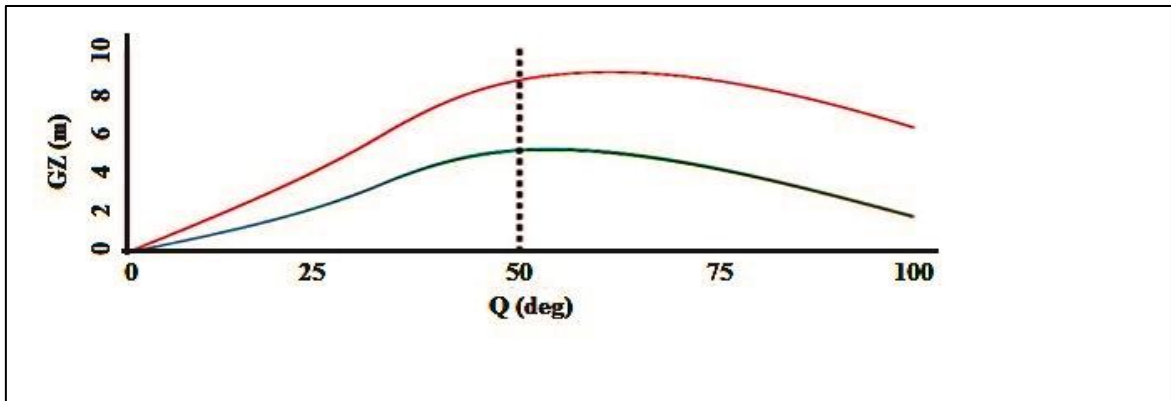
Bir geminin stabilitesini öğrenebileceğimiz başka bir yol da stabilite eğrileridir. Bu eğriler, herhangi bir meyil açısı için geminin doğrultucu moment kolunu (GZ) gösterir. Şekil 9'da görüldüğü gibi stabilite aralığı, kaybolan stabilite açısı, maksimum GZ ve başlangıç GM 'i gibi bilgilere stabilite eğrilerinden ulaşabiliriz (Derrett ve Barrass, 2001; Koromila, 2013).



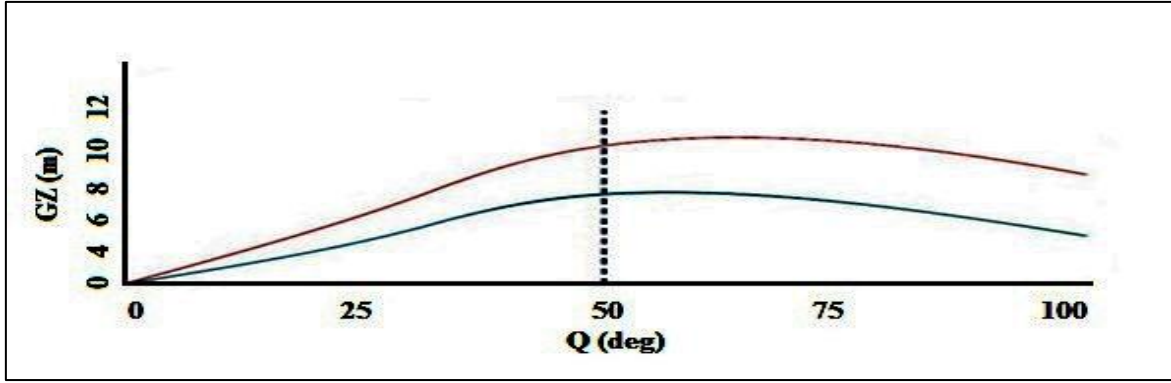
Şekil 9. Bir GZ stabilite eğrisinin temel özellikleri. Sıvılaşmadan önce (düz çizgi) ve sıvılaşmadan sonra (kesikli çizgi) (Koromila vd., 2013; Ju, 2017)

Bir geminin stabilitesi genellikle herhangi bir meyil açısı için (varsayılan bir ağırlık merkezine bağlı olarak) düzeltme kolu (GZ) hakkında bilgi veren "stabilite eğrisi" ile ifade edilir. Bu eğri ile; stabilite (kararlılık) aralığı, kararlılığın kaybolma açısı, maksimum GZ ve ilk GM bilgileri elde edilir.

Şekil 10 ve Şekil 11'de kırmızı eğri geminin sıvılaşma öncesi stabilitesini, mavi eğri ise sıvılaşma sonrası stabilitesini göstermektedir.

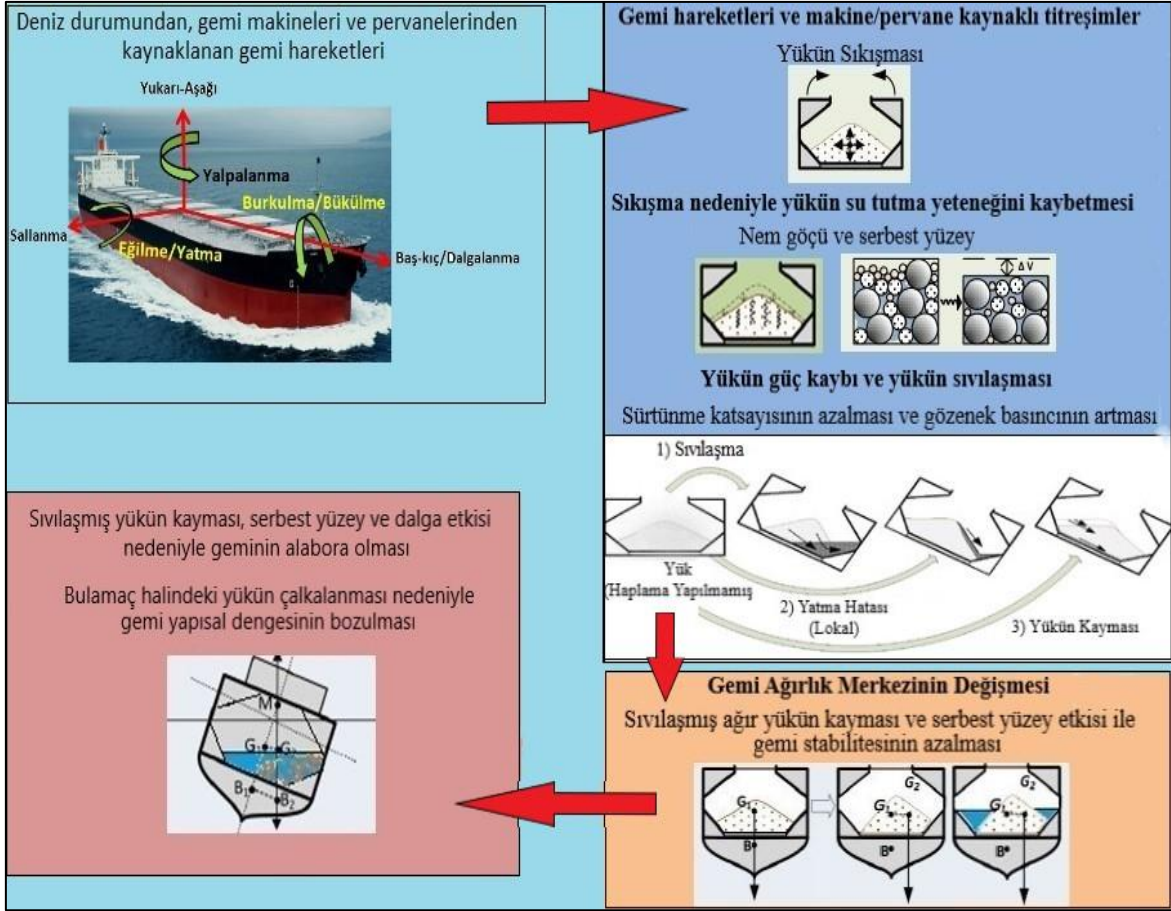


Şekil 10. 3.6t/m³ yoğunluğa sahip bir yük için sıvılaşma öncesi ve sonrası GZ stabilite eğrisinin gösterimi (Koromila vd., 2013)



Şekil 11. 5.6t/m³ yoğunluğa sahip bir yük için sıvılaşma öncesi ve sonrası GZ stabilite eğrisinin gösterimi (Koromila vd., 2013)

Sıvılaşma riski taşıyan yükler arasında nem, hava ve katı iskeletler bulunur. Bu tür yükler yüklenirken kuru görünebilir, ancak geminin hareketi yükleri sıkıştırıp yeniden düzenleyerek, su tutma yeteneğinin kaybına neden olur. Aralardaki boşluk suyunun basıncı artar ve kesme mukavemeti azalarak büyük yer değiştirmelere neden olur (Rose, 2014; Ju, 2017). Yükün sıvılaşmasına etki eden faktörlerin bir araya gelmesi sonucunda yükün sıvılaşması ve neticede geminin alabora olması veya gemi bünyesine etkileri etkileri Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında sıvılaşmanın nedenleri, gemilerdeki etkisi ve sıvılaşma meydana geldiğinde neden bu kadar tehlikeli olduğu incelenmiştir.

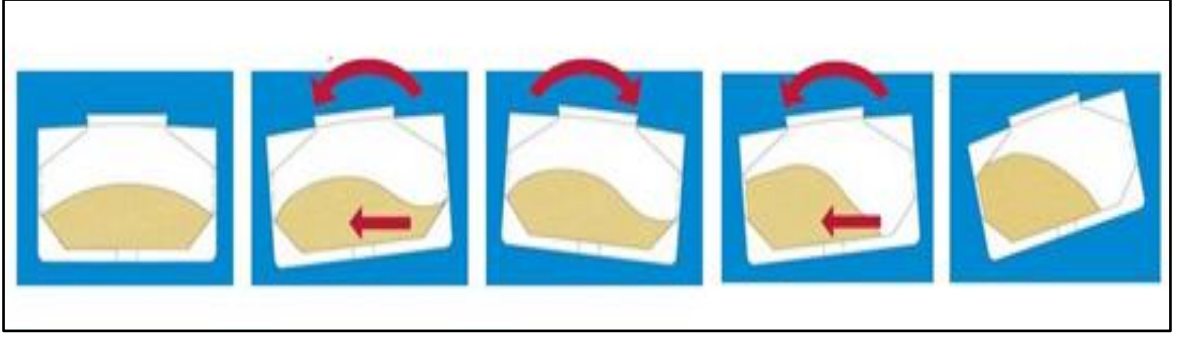


Şekil 12. Gemiye etki eden etkenlerden dolayı geminin hareketleri sonucunda ortaya çıkan sıvılaşma olgusu ve gemi stabilitesi üzerindeki etkileri (Rose, 2014; Ju, 2017)

Yük sıvılaşması, yükün üst kısmında serbest bir su yüzeyi oluşturarak, alt kısımda ıslak bir taban oluşturarak ya da yükün genel olarak bir akışkan gibi davranarak ortaya çıktığı görülebilir. İlk durumda, yüzeyde görünen su miktarı düşük olduğunda, su ambarın kenarlarına yakın yerlerde birikme eğilimindedir. Diğer yandan, su miktarı daha fazla olduğunda, su yükün yüzeyine yayılır ve onu tamamen kaplar. Ortaya çıkan bu serbest yüzeyin etkisi ile GM'nin azalması (gizli GM küçülmesi) ya da tamamen kaybolması söz konusu olur.

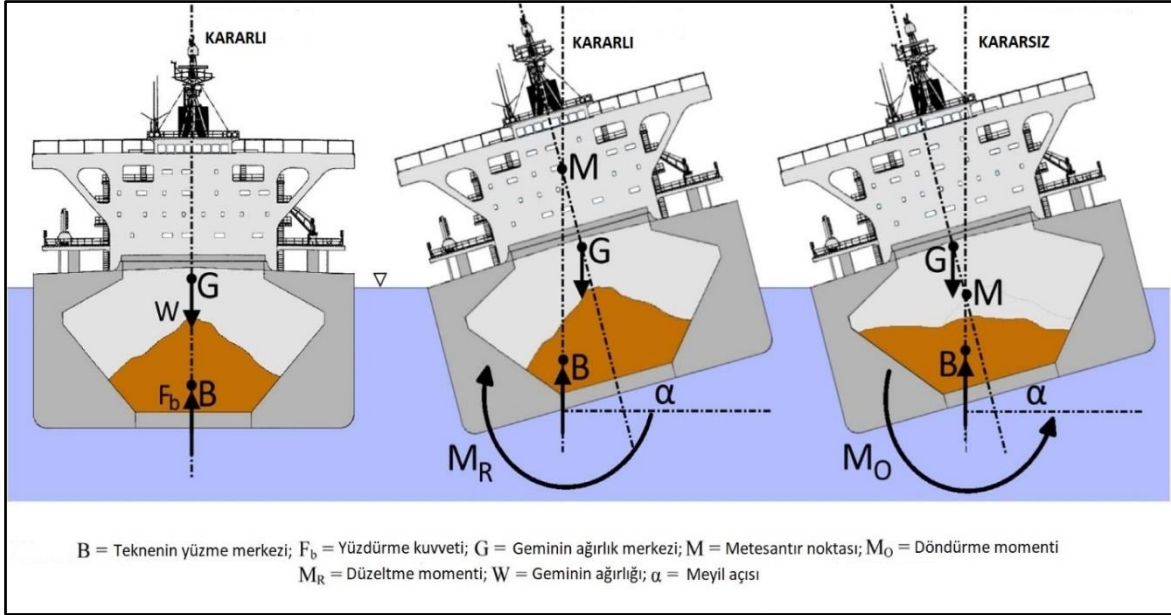
GM küçülmesi $(I/V) \times (d_1/d_2) \times (1/n^2)$ formülü ile hesaplanır. Formülde I: Tanktaki suyun serbest yüzey momenti, V: Geminin sualtı hacmi, d_1 : Tanklardaki sıvının yoğunluğu, d_2 : Deniz suyunun yoğunluğu, n: Bir bordadan diğer bordaya tank adedidir. Tanktaki suyun serbest yüzey momenti ise, $I = (L \times B^3)/12$ formülü ile bulunur. Formülde L: Tank uzunluğu, B: Tank genişliğidir. Formüllerde de görüldüğü gibi Kuru/dökme yük gemilerinde ambarlar genel olarak tek bölmeli olduğu için "n" değeri 1 olur. Tanktaki

suyun serbest yüzey momenti formülünde bulunan ‘‘L’’ ve ‘‘B’’ değerleri de gemi ambar ölçüleri değeri kadardır, deniz suyu yoğunluğu (d_2) da sabittir. Bu durumda gizli GM değerini en fazla etkileyecek olan değerler geminin sualtı hacmi ve ambar/tank içerisindeki suyun yoğunluğudur. Gemi yalpa yaptığında daha çok bir sıvı gibi davranan yükün ambar içerisinde serbest halde hareket etmeye başladıktan bir müddet sonra yoğunlaşma artar, geminin sualtı hacmi yalpa durumundan dolayı azalır. Bundan dolayı da GM küçülmesi artarken, gemi diğer yöne yalpa yaptığında yükün tamamı diğer tarafa geri akmamaya başlar. Her seferinde daha fazla yük bir tarafa doğru hareket eder ve ambarın bir tarafında yük birikmesi meydana gelir. Yoğunlaşan yük (biriken yük) geminin tehlikeli bir yatma açısına (40° 'den fazla) sahip olmasına neden olarak alabora olmasına da neden olabilir (Bureau Veritas, vd., 2017). Bu olgu Şekil 12 ve Şekil 13’de gösterilmektedir.



Şekil 13. Geminin yalpalanması esnasında sıvılaştıran yükün ambar içerisindeki hareketi (Bureau Veritas vd., 2017)

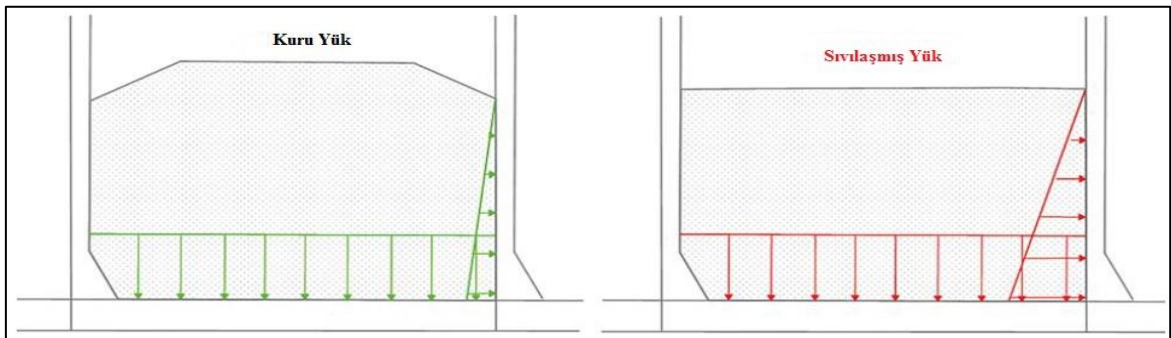
Suyun ambarın dibine doğru hareket ederek ıslak bir taban oluşturması ve yükün sıvı gibi hareket etmesi durumunda üstte bulunan ve daha kuru olan yükün kaymasına yol açarak gemide büyük bir meyil oluşmasına ve gemi dengesinin bozulmasına neden olur. Yükün tamamı sıvı gibi davranırsa, yalpalanma ve yuvarlanma hareketleri sırasında geminin dengesi daha fazla etkilenir ve geminin büyük meyil açıları geliştirmesi sonucu aniden alabora olmasına neden olur.



Şekil 14. Kararlı gemi ve kararsız gemi durumları (Munro ve Mohajerani, 2017)

Sıvılaşma geminin stabilitesini etkileyeceğinden dolayı gemi sıvılaşabilecek yükler taşıdığına geminin metasentrik yüksekliği dikkatle değerlendirilmelidir. GM değeri daha büyük olduğunda, daha kısa yalpalanma sürelerine ve daha yüksek ivmelere, bu durum da sıvılaşmanın ortaya çıkmasına neden olur.

Geminin alabora olmasının dışında, yükün davranışının katı davranıştan sıvı davranışına dönüşmesi, yük ambarlarının albandalarına uygulanan basınçları da etkiler. Sıvı davranışlarından ortaya çıkan basınç değerleri çok daha fazla olur ve yük ambarlarının bu tür yüklemeler için uygunsuz hale gelmesine neden olur. Ambarlar su baskınına karşı tasarlanmadığından dolayı daha yüksek basınçlar gemi ambarlarının hasar alarak zarar görmesine de yol açabilir (Gullen ve Norwegian Hull Club, 2015)



Şekil 15. Yük kuru ve sıvılaşmış haldeyken ambar alabandaları ve ambar tabanı üzerindeki basınç (Gullen ve Norwegian Hull Club, 2015)

1.4. Sıvılaşıma Özelliği Bulunan Yükler

INTERCARGO, sıvılaşıma ve dinamik ayrılma gibi neme bağlı bir yük hatası mekanizmasına maruz kalabilecek yükler olan A Grubu yüklerle özellikle ilgilenmektedir. INTERCARGO tarafından yayınlanan dökme yük gemisi kaza raporlarında, sıvılaşımanın gemi kayıpları ve denizci ölümleri üzerindeki etkisini vurgulanmaktadır (INTERCARGO, 2022).

Taşınmaları sırasında sıvılaşılabilen yükler çok fazladır ve özellikleri çeşitlilik göstermektedir. Her yıl INTERCARGO Dökme Yük Gemileri Kaza Raporu, önceki 10 yılı kapsayan kaza istatistiklerinin bir analizini sunmaktadır. 2012'den 2021'e kadar olan 10 yıllık dönemde, 92 denizcinin ölümüyle 10,000 detveyt tonajı (dwt) üzerinde 27 dökme yük gemisinin kaybolduğu bildirilmektedir. Yük sıvılaşıması, can kaybına en büyük katkıyı yapmaya devam etmektedir (INTERCARGO, 2022).

INTERCARGO'nun raporuna göre, son yıllarda sıvılaşıma nedeniyle meydana gelen kazaların çoğu, işlenmemiş nikel cevheri veya demir cevheri gibi ince taneli cevherlerin taşınmasıyla ilişkilidir. Diğer yüklerden farklı olarak, bu yükler farklı hava koşullarına maruz kalan açık madenlerin zemininden doğrudan alınır ve mineral bakımından zengindirler. Genellikle kil gibi ince ve taş gibi kaba parçacıkların heterojen bir karışımından meydana gelen formlara sahiptirler (INTERCARGO, 2022). Ayrıca, gemilere yüklenmeden önce stoklandıkları koşullar da bu tür yüklerin nem içeriğini ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Hem nem oranının yüksek olması hem de Kasım ayından Şubat ayına kadar yağışlar görülmesi nedeniyle, özellikle Endonezya gibi nikel cevheri madenciliği yapılan ülkelerde yükün stok alanları kritik bir öneme sahiptir (Antonia, 2018).

Aşağıda verilen Tablo 1'de IMSBC Kodu'nun A Grubunda yer alan ve sıvılaşılabilen madenlerin/cevherlerin listesi yer almaktadır.

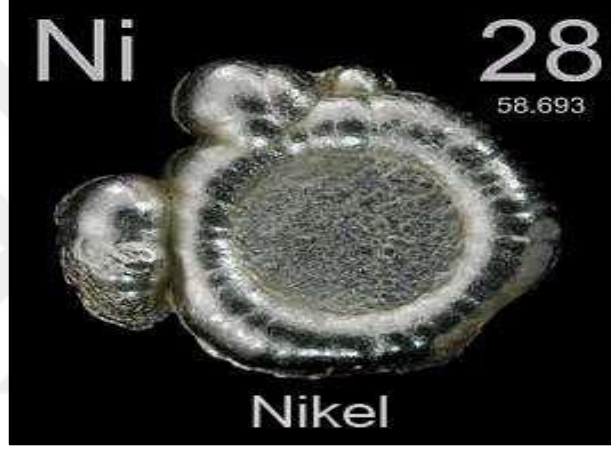
Tablo 1. IMSBC Kodu'na göre sıvılaştırılabilen A Grubu yüklerin listesi (IMSBC Code, 2022)

IMSBC Kodu'na Göre Sıvılaştırılabilen A Grubu Yükler		
Alüminyum Florür	Demir Konsantre (pelet Besleme)	Piritik Kül (B olabilir)
Alümina Hidrat (B de olabilir)	Demir Konsantre (sinter besleme)	Piritik Kül (Demir)
Alüminyum Eritme / Yeniden Eritme ile İşlenmiş Yan Ürünler (B de olabilir)	Demir Cevher (konsantre, pelet besleme, sinterleme besleme)	Piritik Kül
Blende (çinko sülfür)	Demir Cevher Madeni	Kum, Ağır Mineral
Kalsine Edilmiş Piritler (B de olabilir)	Demir Oksit Teknik	Demir ve Çelikten Üretilmiş Kabuklar
Çimento Bakır	Kurşun ve Çinko Kalsinler (Karışık)	Gümüş Kurşun Konsantresi
Kalkopirit	Kurşun ve Çinko Orta Halli	Gümüş Kurşun Cevher Konsantresi
Kimyasal Alçıtaşı	Kurşun Konsantresi	Slig (Demir Cevher)
Klinker Kül, ıslak (B de olabilir)	Kurşun Cevher Konsantresi	Spodumen (Yükseltilmiş)
Kömür (B de olabilir)	Kurşun Cevher Atığı	Çinko ve Kurşun kalsinler (Karışık)
Kömür Bulamaç	Kurşun Gümüş Konsantresi	Çinko ve Kurşun Orta Halli
Kok Kömürü	Kurşun Gümüş Cevher	Çinko Konsantresi
Bakır Konsantresi	Kurşun Sülfür	Çinko Cevher, Yanmış
Bakır Nikel	Kurşun Sülfür (galena)	Çinko Cevher, Kalamın
Bakır Cevher Konsantresi	Manganez Konsantresi	Çinko Cevher, Konsantreler
Bakır Çökelti	Manganez Cevher Madeni	Çinko Cevher, ham
Bakır Cüruf	Metal Sülfür Konsantreleri (B de olabilir)	Çinko Sinter
Balık (toplu olarak)	Mineral Konsantreleri	Çinko Cüruf
Kalsiyum Florit (B de olabilir)	Nefelin Siyenit (mineral)	Çinko Çamur
Kül, ıslak	Nikel Konsantresi	Çinko Sülfür
Galena (kurşun sülfür)	Nikel Cevher	Çinko Sülfür (Blende)
İlmenit Kili (iron titanium oxide)	Nikel Cevher Konsantresi	Zirkon Kiyanit Konsantresi
İlmenit kum (C de olabilir)	Bataklık Yosunu (B de olabilir)	
İlmenit (Yükseltilmiş)	Ham Pentahidrat	
Demir ve Çelik Cüruf Karışımı	Kalsine Edilmiş Piritler (B olabilir)	
Demir Konsantresi	Piritler (bakırlı, ince, flotasyon veya kükürt)	

1.5. Nikel Madeni

1.5.1. Nikel Madeni ve Rezervleri

Nikel, periyodik tablonun sekizinci grubunda yer alır ve yeryüzünde en yaygın bulunan beşinci elementtir. Yerkabuğunda bulunan elementler arasında tahmini %0,008'lik bir oranla 24. sırada yer alan nikel madeninin kullanılmaya başlanması MÖ 3500'lü yıllara dayanmaktadır (Zografidis, 2010). Çin'den M.Ö. 1500'lü yıllara atfedilen bazı raporlarda, gümüş ve nikel alaşımı olduğu varsayılan beyaz bakırdan bahsedilmektedir (Antonia, 2018).



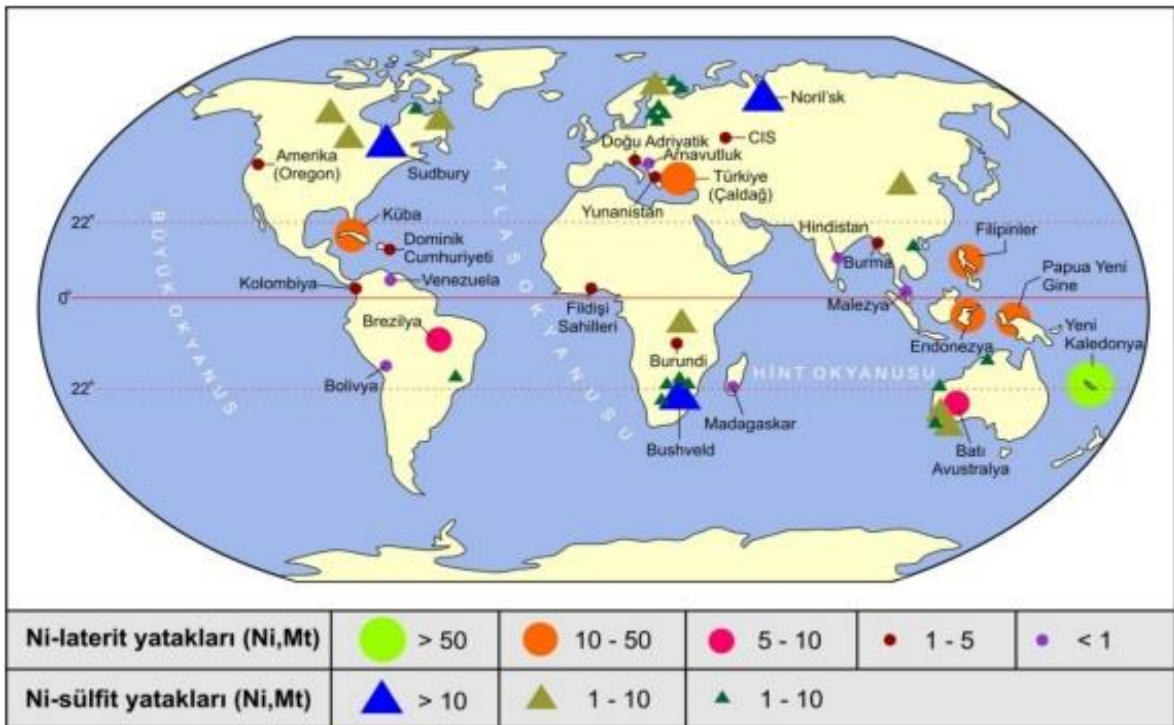
Şekil 16. Nikel Madeni (MTA, 2018)

Nikel, 1751 yılında İsveçli kimyager Baron Axel Fredrik Cronstedt tarafından keşfedilmiştir. Yerkabuğundaki ana elementlerden biri olan nikel, sanayi ve endüstri gibi birçok alanda yüz yıldan fazla bir süredir kullanılmaktadır. 1848 yılında modern manada ilk olarak Norveç'te nikel üretimi gerçekleştirilmiş ve 1889 yılında çelik üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Paslanmaz çelik üretimine geçilmesi ile nikel elementi kaplama ve döküm sektörleri açısından en önemli metallere biri olmuştur. Oksitlenme direncinin yüksek olmasından dolayı günümüzde alaşımların üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmakla beraber nikel metalinin kıymeti artmaya devam etmektedir (MTA, 2018). Periyodik cetvelde geçiş metalleri içerisinde bulunur. Parlak gümüş beyazı renginde olup bakır, krom, alüminyum, kurşun, kobalt, altın ve gümüş gibi metallerle birlikte alaşım üretiminde kullanılan bir metaldir. (Antonia, 2018; MTA, 2018; Çavuşoğlu, 2020).

Tablo 2. Nikelin temel özellikleri (Antonia, 2018; MTA, 2018)

Element İsmi	NİKEL
Kimyasal Sembol	Ni
Atom numarası	28
Atomik Ağırlık	58.693
Ergime Noktası	1455 °C
Kaynama Noktası	2730 °C
Yoğunluk	8,90 g/cm ³ (25 °C'de)
Curie Sıcaklığı	253 °C

Yerkabuğundaki oranı %0,008 kadar olan nikel, yer çekirdeğinin derin bölgelerinde demir, oksijen, silis ve magnezyum elementlerinden sonra en fazla bulunan beşinci elementtir. Nikel elementi doğada saf bir şekilde bulunmaz, genellikle demir ve kobalt ile birlikte oksitler, sülfidler ve silikatlar şeklinde meydana gelir. Madencilikte nikel madeninun işletilebilir tenör limiti; lateritik yataklar için %1, sülfid yataklar için %0,2 dir. Co/Ni oranının 1/30 olması halinde aynı maden yatağından kobalt madeni üretimi de yapılabilmektedir. Günümüzde daha çok sülfidik maden yataklarından nikel üretimi yapılmaktadır (Tufan, 2014; MTA, 2018).



Şekil 17. Ni-laterit ve Ni-sülfid maden yataklarının dünya üzerindeki dağılımı (Hoatson vd., 2006; Tufan, 2014; MTA, 2018)

Dünya genelinde, %0,5 oranında Ni veya daha fazla oranda tenör içeren Ni-lateritlerin toplam rezervi 300 milyon tonun üzerindedir (USGS, 2023). Bu rezervlerin yaklaşık olarak %40'ı sülfid yataklarında, %60'ı ise lateritik yataklarda yer almaktadır (Kuck, 2006; Hoatson vd., 2006; USGS, 2023). Aynı zamanda, özellikle Pasifik Okyanusu ve Hint Okyanusu tabanında geniş alanlarda yayılmış olarak görülen derin deniz tabanlarında manganez kabukları ve yumruları de ciddi miktarlarda nikel oranına sahiptirler (Rona ve Scott, 1994; Rona, 2003; Tufan, 2014). Derin-deniz nikel kaynakları, yeryüzündeki toplam nikel kaynaklarının yaklaşık olarak 2 katından daha fazla bir miktardır. Lateritik nikel yataklarının büyük bir bölümü, tektonik olarak aktif çarpışma bölgeleri ve nemli tropikal iklim kuşaklarının hakim olduğu (Ekvatorun her iki tarafında 22°'lik güney-kuzey enlem bandı arasında) Yeni Kaledonya, Endonezya, Brezilya, Filipinler, Avustralya, Afrika, Kolombiya, Küba, Dominik Cumhuriyeti gibi ülkelerde görülmektedir (Brand vd., 1998; Lewis vd., 2006, Tufan; 2014; MTA, 2018). Avustralya, Brezilya, Rusya ve Yeni Kaledonya Adaları, Küba, Filipinler ve Endonezya'da bulunan nikel yatakları bilinen en önemli nikel yataklarıdır (MTA, 2018). Amerikan Jeoloji Araştırmaları Kurumu'nun raporunda yer alan 2022 yılı mutlak verilerine göre; Avustralya 21 milyon ton, Endonezya 21 milyon ton, Brezilya 16 milyon ton, Rusya 7,5 milyon ton, Yeni Kaledonya 7,1 milyon ton ve Filipinler 4,8 milyon ton nikel rezervleri ile ilk altı sırada yer alan ülkelerdir (USGS, 2023).

Tablo 3. Dünya metal nikel rezervi (USGS, 2023)

Ülkeler	Rezervler (Ton)	Yüzdellik Oran (%)
ABD	370.000	0,36
Avustralya	21.000.000	20,57
Brezilya	16.000.000	15,68
Kanada	2.200.000	2,16
Çin	2.100.000	2,06
Endonezya	21.000.000	20,57
Yeni Kaledonya	7.100.000	6,96
Filipinler	4.800.000	4,70
Rusya	7.500.000	7,35
Diğer Ülkeler	20.000.000	19,59
Dünya Geneli	102.070.000	100,00

1.5.2. Nikel Cevherinin Çıkarılması

Nikelin birbirinden tamamen farklı iki cevher türünde bulunması nedeniyle madencilik yöntemlerinin de farklılık göstermektedir. Süreçler cevherin sülfür veya laterit olmasına bağlıdır. Nikelin cevherden çıkarılması birçok durumda bakıra benzediğinden, kullanılan süreçler ve ekipmanlar da benzerdir. Sülfürler söz konusu olduğunda, cevherdeki demir-sülfür ile oksijenin reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısı eritme işlemi için gereken ısının bir kısmını oluşturur. Sülfür yatakları genellikle bakır madeninin çıkarılmasına benzer bir şekilde uygulanan yeraltı teknikleriyle çıkarılır. Laterit madenciliği, büyük kepçeler, çekme halatları veya önden yükleyicilerin nikel bakımından zengin tabakaları çıkardığı ve büyük kayaları ile atık malzemeleri ayırt ettiği bir hafriyat işlemidir. Cevher, bir açık ocakta olduğu gibi, yüzeyde kamyonlara yüklenir ve eritme tesisine nakledilir (Tufan, 2014; MTA, 2018).

En büyük nikel cevheri madenciliği süreci Endonezya ve Filipinler'de gerçekleşmektedir. Laterit çıkarıldığında çok az işlem gerçekleşmektedir. Dünya çapında birçok farklı madencilik prosedürü olmasına rağmen genellikle cevher çıkarılır, boyutlarına göre ayrıştırılır, stoklar alanlarında depolanır ve daha sonra sevk edilir (The Swedish Club, 2012)

Nikelin çıkarılması, karmaşık mineral bileşimlerinden dolayı genellikle zor bir işlemdir. Bu zorlukların ana nedenleri; cevherlerin çeşitliliği ve kimyasal bileşimindeki farklılıklar, geleneksel fiziksel veya fizyokimyasal yöntemlerle geri kazanılabilecek belirli bir oranda nikel mineralinin olmaması ve lateritlerin sınırlı kullanımınıdır. Cevher içerisinde ekonomik olarak ihraç edilemeyen demir, kobalt, krom gibi diğer metallerin bir arada bulunması da daha fazla zorluk ortaya çıkaran durumlardır (Tzouvelakis, 1981; Antonia, 2018).

1.5.3. Nikelin Özellikleri ve Kullanım Alanları

Nikelin kobalt ve demir ile büyük bir yakınlığı vardır. Bu nedenle birçok alanda bir arada bulunurlar ve birçok uygulamada birbirlerinin yerini alabilirler. Fiziksel özelliklerinden dolayı manyetik davranışları ve yüksek basınçlara karşı dirençleri en önemli benzerlikleridir. Oda sıcaklığında çelikle benzer özelliklere sahiptir, açık havada oksitlenmez (paslanmaz) ve iyi bir katalizördür. Bir metal olarak önemi, diğer elementlerle

alaşım elementi olarak kullanıldığında mukavemeti, sertliği ve alaşım korozyonuna karşı direnci artırmasıdır. Elastikiyetinin yanı sıra mükemmel termal ve elektrik direnci nikeli değerli bir maden yapan diğer faktörlerdir (Tufan, 2014; MTA, 2018, Antonia, 2018)

Oda sıcaklığında (25 °C) özellikle uçucu olan kompleks bir karbonil oluşturmak için doğrudan karbon monoksit ile reaksiyona girebilmesi nikelin temel özelliklerinden bir diğeridir. Belirli sıcaklıklarda havada, deniz suyunda ve oksitleyici olmayan asitlerde korozyona karşı dirençlidir. Nikelin bir diğer özelliği de alkali erozyonuna karşı dirençli olmasıdır (Jordan ve Swanger, 1930; Hemmati vd., 2013; Çavuşoğlu, 2020).

Madeni para üretimi nikelin eski yıllardan beri en ünlü kullanım alanıdır. Günümüzde nikelin 300.000'den fazla kullanım alanı olduğu bilinmektedir. Bunların en önemlisi paslanmaz çelik üretiminde (dünya çelik üretiminin %70'inden fazlası) kullanılmasıdır (Katzagiannakis, 2013; USGS, 2023).



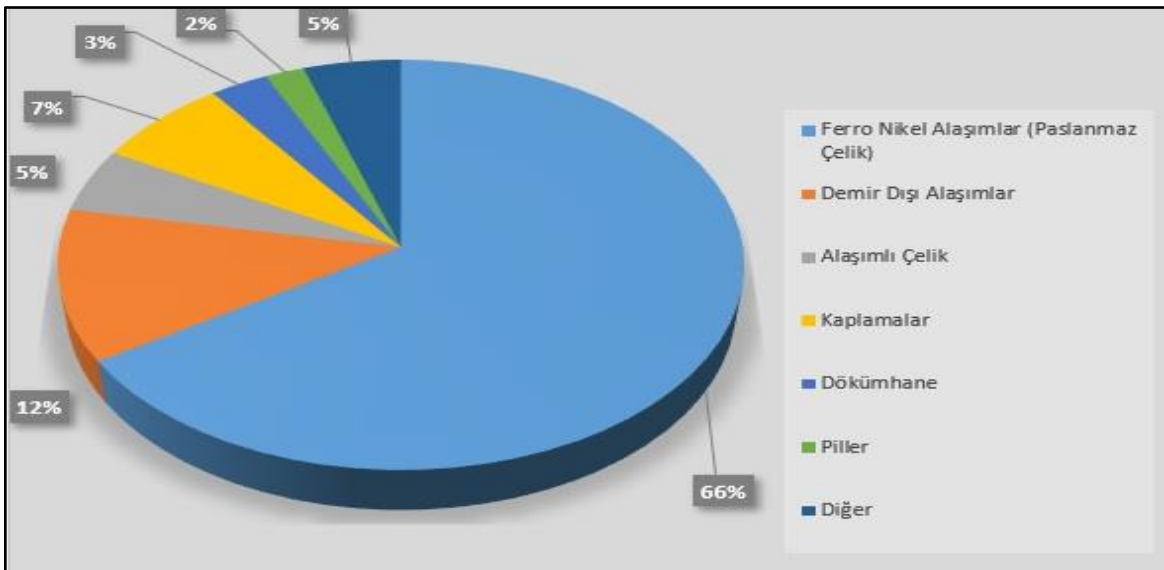
Şekil 18. Nikel Madeni ve Nikel Alaşım Paraları (MTA,2018)

Nikel, sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılabilen bir madendir. Nikel üretim teknolojisi ile ilgili çalışmalar son yıllarda artmış, üretimi ve tüketimi ciddi oranlarda yükseliş göstermiştir. Nikel bir alaşım metallere biridir. Dünya Nikel Enstitüsü'ne göre; üretilen nikelin %66'ya yakını paslanmaz çelik üretiminde ve korozyona karşı dirençli alaşımların elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu alaşımlar; bakır, krom, alüminyum, kurşun, kobalt, gümüş ve altın ile elde edilen alaşımlardır. Nikelin çok yüksek ve çok düşük sıcaklıklara karşı sahip olduğu

dayanma gücünden dolayı gaz türbinleri, jet motorları gibi motor parçalarının üretiminde de kullanılmaktadır (Onur, 2005; MTA, 2018).

Günümüzde nikel; endüstri, sanayi, ulaştırma, havacılık, denizcilik ve inşaat sektörlerinde, mimari uygulamalarda, tıbbi cihaz ve ekipman üretiminde, madeni para yapımı gibi yaklaşık olarak 300 bin çeşit ürünün üretim ve yapımında kullanılmaktadır. İnşaat, tıp sektörü, otomobil, uçak ve gemi endüstrisinin yanında; elektronik cihazlar, bilgisayar ve cep telefonu üretiminde, bilgi depolamak amacıyla kullanılan CD ve DVD'lerde, pillerde, zırh kaplamalarında, batarya ve yakıt depolarında, atık su arıtma tesislerinde, yenilenebilir temiz enerji sistemlerinde, mutfak eşyalarının üretiminde, su tesisat ve armatürlerinde, tren-metro gibi toplu taşıma araçlarında, silah sanayisinde top ve mermi yapımında, deniz suyu taşıma boru devrelerinde, metro durakları, terminal ve hava alanları gibi yerlerde hayatımızı kolaylaştıran birçok ürün ve alanda kullanılmaktadır (Göveli, 2006; Eroğlu vd., 2019; İMİB, 2021).

Hurda metal ürünlerden geri dönüşüm yolları ile de nikel üretimi yapılabilmektedir. 2022 yılında Amerika'da tüketilen nikelin %56'ya yakını hurda nikelden geri dönüşüm yolu ile kazanılmıştır (USGS, 2023). Genel olarak üretilen nikelin önemli bir miktarı paslanmaz çelik (ferro nikel) üretiminde, geriye kalan kısmı demir dışı alaşımlar, alaşımlı çelik, kaplama, dökümhane ve pil üretiminde kullanılmaktadır. Nikel ve alaşımlarını değerli metal yapan faktörler dayanım gücü, korozyon direnci, yüksek yumuşaklık özelliği, iyi iletkenlik (ısı ve elektrik), manyetik özellikleri ve katalitik özellikleridir (URL-1, 2023).



Şekil 19. Nikelin kullanım alanları dağılım grafiği (MTA, 2018; URL-1, 2023)

1.6. Nikel Madeni Yükünün Denizyolu İle Taşınması

2010-2013 yılları arasında Endonezya'da nikel cevheri yükleyen altı gemi Çin'e yaptıkları seferler sırasında battı ve 81 denizci hayatını kaybetti. Her bir zayıtın nedeninin, geminin dengesini etkileyen yükün sıvılaşmasından kaynaklandığı ve geminin çok hızlı, bazen birkaç dakika içinde alabora olmasına neden olduğu düşünülüyor. Bu nedenlerle INTERCARGO tarafından nikel cevheri dünyanın en ölümcül yükü olarak nitelendirildi (INTERCARGO, 2022). Nikel cevherinin sıvılaşmasının neden olduğu kazalar ve neticesinde meydana gelen kazalar göz önünde bulundurulduğunda bu tanımlama daha iyi anlaşılabilir. Meydana gelen kaza ve olayların genelinde nikel cevheri taşıyan gemilerin kaza sonucu tam kayıbdan dolayı, bu çalışmada, bu özel yükün denizyolu ile taşınması sürecinde yükün sıvılaşmasına neden olan hatalara odaklanılmıştır.

Dünyadaki nikel cevheri ve zenginleştirilmiş nikel ticareti yılda 40 milyon ton civarındadır. Çin nikel cevherinin en büyük ithalatçısı iken bunu sırasıyla Japonya ve Güney Kore takip etmektedir. Bu üç ülke dünya nikel cevherinin yaklaşık %97'lik bölümünü ithal eden ülkelerdir. Nikel üretimi ile birlikte ihracat yapan ülkeler sıralamasında ise, miktar açısından 1. sırada Filipinler (%91), 2. sırada Guatemala (%5,5) yer almaktadır. Endonezya, Zimbabve, Avusturalya, Rusya, Güney Afrika bu iki ülkeyi izleyen ülkelerdir (Eroğlu vd., 2019; İMİB, 2021).

Endonezya ve Filipinler gibi büyük rezervlere sahip ülkelerden nikel madeni yükünün denizyolu ile taşınması için yükleme öncesinde ve yükleme sürecinde aşağıdaki zorluklar ile karşılaşmaktadır (Shen, 2012):

- Madenlerin çoğu denizden ve limanlardan uzak yerlerde bulunmakta ve liman tesisleri neredeyse yok veya çok sınırlıdır. Nikel cevherinin sahilde veya açık alanlarda stoklanması sonucu yük hakim hava koşullarına (yağışlara) maruz kalmaktadır.
- Geleneksel olarak, nikel cevheri yalnızca kurak mevsimde, yani Şubat'tan Mayıs/Haziran'a kadar sevk edilmektedir. Bu dönemlerde yağış neredeyse yok denecek kadar azdır. Ancak günümüzde yağışlı ve kurak mevsimler arasındaki belirgin sınırlar artık önemli derecede karışmış ve artık kurak mevsimlerde de şiddetli yağışlar yaşanabilmektedir. Bundan dolayı depolandığı alanlarda nikel cevherini yağışlardan korumak oldukça zor olmaktadır.

- Özellikle Endonezya ve Filipinler gibi ülkelerde az sayıda bağımsız ve itibarlı laboratuvar vardır. Maden işletmelerinin genellikle kendi laboratuvarları vardır ve genellikle düşük standartlarda işletilmektedirler. Nikel cevherinin bileşimi ve fiziksel özellikleri bölgeden bölgeye önemli ölçüde değişir. Nakliyeciler gemilere ya da taşıyıcılara yalnızca bir dizi farklı kaynaktan alınmış bir TNL sertifikası temin ederler. Göndericinin IMSBC Kodu kapsamında sağlaması gereken bilgi ve diğer belgeler, özellikle TNL ve ANN sertifikaları genellikle şüphe taşımaktadır.
- Çoğu zaman nikel cevheri yükleyecek olan gemiler karadan açıkta demirli pozisyonda iken mavnalarla getirilen yüklerle yüklenirler. Bu durum gemi kaptanının bu mavnaların test edilen stoktan olup olmadığını belirlemesini zorlaştırır. Mavna nakliyesi sırasında nem içeriği değişebilir ve numune alma ile yükleme arasındaki aralık 7 günü geçebilir.
- Mavnalardan gemi tarafından alınan numunelerin gemi imkânları ile doğru bir şekilde test edilmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Ayrıca gemi personeli numune alma konusunda da uzman kişiler olmadıkları için doğru numune alınıp alınmadığı da genellikle şüphelidir.
- Gemi tarafından yapılan testler (genellikle teneke kutu testi/can test) sonucu yükün nem içeriği fazla çıktığı zaman mavnada bulunan yük kabul edilmemektedir. Yüklenmesi iptal edilen mavna sahile giderek ya yükünü değiştirmekte ya da yükü sahile boşaltıp kurutarak tekrar yükleyip gemiye getirmektedir. Mavnaların bu işlemleri gerçekten yapıp yapmadıkları genellikle şüphelidir.

Bu zorluklar altında yüklenen gemilerle nikel madeninin taşınması sürecinde, yani seyir esnasında gemilerin pervanelerinden kaynaklanan titreşimler ve dalgaların etkisiyle geminin yalpa yapması sonucu nikel madeni yükü sıvılaşabilmekte, geminin stabilitesini bozmakta ve alabora olarak batmasına neden olmaktadır. Neticede nikel madeni yükünün bu olumsuzluklar altında taşınması gemi kaybı, yük kaybı ve insan hayatı kaybı ile sonuçlanmaktadır.



Şekil 20. Nikel Madeni Yükünün Maden Ocağından Gemiyeye Taşınma Süreci (PPI, 2020)

1.6.1. Nikel Cevheri Sevkiyatı İçin Bazı Önleyici Tedbirler

Gemi personeli, taşınan yükün yüklenmesi, elleçlenmesi, istiflenmesi, taşınması, muhafazası, bakımı ve tahliyesinden sorumlu olacağından gemi kaptanı ve mürettebatı, yükün operasyonunu denetlemekle sorumludurlar. Nikel cevheri sevkiyatı için bazı önleyici tedbirler verilmiştir:

1.6.1.1. IMSBC Kodu Gerekliliklerine Aşına Olma

Dökme yük taşımacılığı için zorunlu bir kural olan IMSBC Kodu, SOLAS 1974 ve Protokolleri kapsamında yayınlanmıştır. Katı dökme yüklerin güvenli istiflenmesi ve nakliyesi için uluslararası kabul görmüş hükümleri belirler. Nikel cevheri taşıyan gemi

sahibi ve mürettebatı, IMSBC Kodu'nun gerekliliklerini önceden tam olarak bilmelidir (Shen, 2012; IMSBC Code, 2022).

1.6.1.2. Gerekli Belgeleri Temin Etme

IMSBC Kodu'na göre, yük göndericisi/satıcı taraf gerekli olan yazılı bilgi ve belgeleri yükleme başlamadan yeterli bir süre önce sağlaması gerekir. Göndericinin bilgisi dâhilinde gemi ambarlarının her birine yüklenecek nikel cevherinin nem içeriğinin nikel cevherinin ortalama nem içeriği olduğuna dair bir beyanı ile birlikte onaylayan bir sertifika/beyan ve yetkili bir laboratuvar tarafından hazırlanmış akış nem noktası (ANN/FMP) test sonucu ile yükün taşınabilir nem limitini (TNL/TML) onaylayan bir sertifika IMSBC Kodu'na göre gerekli belgelerdir (Shen, 2012; IMSBC Code, 2022). Yani yükün yüklenmesi için gemi kaptanı gerekli tüm yazılı belge ve bilgileri alana kadar yükleme başlatılmamalıdır.

1.6.1.3. Uygun Akış Nem Noktası (ANN/FMP) Testi

IMSBC Kodu'na göre, ANN testi ile yükün yüklenmeye başlaması arasındaki sürenin, üretim süreci herhangi bir şekilde değiştirilmediği müddetçe normal malzemeler için 6 aydan fazla olmaması gerekir. Ayrıca nem içeriği testi ile yükleme arasındaki zaman farkı 7 günü kesinlikle geçmemelidir. Düzensiz içeriği nedeniyle nikel cevheri için nem içeriği ve ANN her nakliyyede kontrol edilmelidir (Shen, 2012; IMSBC Code, 2022). IMSBC Kodu'na göre, ANN'nı belirlemek için üç çeşit yöntem önerilmektedir: *Akış tablosu testi (düşme testi)*, 1 mm (bazı kargo türleri için 7 mm'ye kadar) tane boyutuna sahip konsantreler veya ince malzemeler için uygundur. *Penetrasyon testi (titreşim testi)*, 25 mm'ye kadar mineral konsantreleri, kömürler vb. için uygundur. *Proctor/Fagerberg testi (sıkıştırma)*, 5 mm'ye kadar ince ve kaba taneli cevher konsantreleri için uygundur (Shen, 2012; IMSBC Code, 2022).

Bu nedenle gemi sahibi veya işleticisi, göndericiye muhakkak nikel cevherinin kalitesini ve bilgilerini sormalı, ANN'sını belirlemek için en uygun yöntemi kullanmalıdır.

1.6.1.4. Yük Kalitesinin Kontrol Edilmesi

Kaptan, ilgili zabıtlar ve gemi mürettebatı, yükleme operasyonunu başladığı andan yüklemenin sonuna kadar takip etmelidir. Gönderici yüklemeye önce gerekli belgeleri sunsa da, bazı nedenlerden dolayı bu belgeler güvenilir görülüyorsa, gemi kaptanı ve mürettebatı, kendi belgelerini kontrol etmek ve nem içeriğini doğrulamak için yükleme boyunca her türlü makul yolu kullanmalıdırlar (Shen, 2012; IMSBC Code, 2022). Herhangi bir şüphe varsa, IMSBC kodu, gerçek nem içeriğini kontrol etmek için kolay ve uygulanabilir bir test olan "Can Test/Teneke Kutu Testi" yöntemini önerir. "Can Test/Teneke Kutu Testi" prosedürü aşağıdaki gibidir:

- 0,5 ila 1 litre kapasiteli teneke kutuya yaklaşık 1 Kg Nikel Cevheri koyun,
- Kutuyu yaklaşık 0,2 m yükseklikten sert bir yüzeye vurun,
- 1 ila 2 saniyelik aralıklarla 25 kez tekrarlayın,
- Yükün serbest sıvı nemi koşulları gösterip göstermediğini kontrol edin, eğer öyleyse, yüklemeye önce nikel cevheri numunelerinin laboratuvar testlerini düzenleyin (Shen, 2012; IMSBC Code, 2022).

Ancak gemi kaptanı, bu "Can Test/Teneke Kutu Testi"nin yalnızca ANN'nı kontrol ettiğinin, geminin yalnızca yükün nem içeriğini TNL'den daha düşük, yani ANN'nın %90'ını kabul ettiğinin farkında olmalıdır.

1.6.1.5. P&I Kulübünden Rehberlik İsteme

Her gemi bir P&I Club ile sigortalanmıştır, P&I Club nikel cevheri taşımacılığında çok deneyime sahiptir ve talep edildiğinde üyelerine gerekli rehberliği vermeye isteklidir. Bu nedenle armatör mürettebatını P&I Club'tan rehberlik istemeye teşvik etmelidir (Shen, 2012).

1.6.1.6. Ambar Kapağının Su Geçirmez Olmasını Sağlama

Yük ambarına sızan su, nikel cevherinin sıvılaşması için başka bir kaynaktır. Mürettebat ambar kapağını, yük ambarına su girmesini önlemek için uygun şekilde su geçirmez olmasını ve bunun devamlılığını sağlamalıdır. Yerel hava tahmin raporlarına çok

dikkat edilmeli, olumsuz hava koşullarıyla karşılaşmamak için gerekli önlemler alınmalıdır (Shen, 2012).

1.6.1.7. Mantıksız Onay Mektubunun Reddedilmesi

Gönderici, gemi kaptanına onay isteyen herhangi bir belge sunarak bu tür nikel cevherinin sevkiyat için güvenli olduğunu belirtirse, gemi kaptanı imzalamayı reddetmelidir. Çünkü IMSBC Kodu kapsamında yükün okyanus nakliyesi için uygun olduğunu beyan etmek göndericinin yükümlülüğüdür (Shen, 2012; IMSBC Code, 2022). Böyle bir belgenin imzalanması karşılaşılabilecek bir zayıf durumda geminin taşıtana karşı rücu haklarını zedeleyebilir

1.6.1.8. Gemi Sahibi Adına veya Bağımsız Bir Yük Sörveyörü Atanmasının Sağlanması

IMSBC Kodu'nun kurallarının uygulanmasından kaçınan bazı göndericiler, kasıtlı olarak yanlış nem içeriği ve TNL sertifikaları, zamanında verilmeyen sertifikalar ve yanlış tanımlanmış sertifikalar sağlayabilirler. Böylece güvenli olmayan yükü sevkiyat için kabul edilebilir hale getirme niyetinde olabilirler. Bu nedenle gemi kaptanı, yükün sevkiyata uygun olup olmadığına karar vermek için bilgi ve deneyimine dayanmalıdır. Gemi kaptanının yükün yüklemeye uygunluğu konusunda herhangi bir şüphesi varsa; gemi sahibi, özellikle yağmurların yoğun olduğu muson zamanlarında, yüklemeye önce gemi kaptanına yardımcı ve destek olması için gemi sahibi adına bir yük sörveyörü veya bağımsız bir yük sörveyörü atanmasını sağlamalıdır. Bu sörveyör nikel yükü konusunda eğitimli bir uzman olmalıdır (Shen, 2012; IMSBC Code, 2022).

1.7. Uluslararası ve Ulusal Kurallar/Yönetmelikler

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) ve bazı ulusal kurum ve kuruluşlar yüklerin yüklenmesi, taşınması ve boşaltılmasını güvence altına almak için küresel ve ulusal düzeyde çeşitli yönetmelikler oluşturmuşlardır. Düzenlemelerin çoğu deniz kazalarını ve olaylarını önlemeye ve insan hayatının yanı sıra çevreyi de korumaya yönelik hazırlanmış

düzenlemelerdir. Denizde Can Emniyeti Uluslararası Sözleşmesi (SOLAS), Uluslararası Emniyet Yönetimi Kodu (ISM Kodu), Dökme Yük Gemilerinin Emniyetli Yüklenmesi ve Boşaltılması için Uygulama Kodu (BLU Kodu), Uluslararası Denizcilik Tehlikeli Mallar Kodu (IMDG Kodu), Kanada Tehlikeli Dökme Malzeme Yönetmelikleri, Kanada Katı Dökme Yükler için Emniyetli Uygulama Kodu, Uluslararası Denizcilik Katı Yükler Kodu (IMSBC Kodu) bu düzenlemeler arasındadır.

1.7.1. Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yükler Kodu (IMSBC Code)

SOLAS Sözleşmesi kapsamında 1 Ocak 2011 tarihinde zorunlu hale gelen Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yükler (IMSBC) Kodu katı dökme yüklerin emniyetli taşınmasına ilişkin ana mevzuattır (İşiaçık Çolak ve Şatır, 2014; INTERCARGO and Lloyd's Register, 2022). IMSBC Kodu'nun temel amacı; katı dökme yüklerin emniyetli bir şekilde istiflenmesi, taşınması ve gemiye alınması planlanan katı dökme yük hakkında detaylı bilgi vermek ve belirli yüklerin tehlikeleri ve riskleri hakkında talimatlar vermektir (İşiaçık Çolak ve Şatır, 2014). IMSBC Kod, yükleri üç gruba ayırmaktadır. Grup A: Sıvılaşabilecek yükler, Grup B: Gemide tehlikeli duruma yol açabilecek kimyasal tehlike içeren yükler ve Grup C: Bu tür yükler ne A Grubu ne de B grubu olarak sınıflandırılabilir ancak yine de çimento ve kum gibi yükler gibi tehlikeli yüklerdir (Akyüz, 2020; IMSBC Code, 2022). Bu çalışmanın amacı denizcileri, özellikle de kaptanları yük sıvılaşması konusunda bilinçlendirmek ve genel bir bakış olarak yük sıvılaşmasının risklerini vurgulamaya çalışmaktır.

IMSBC kodu farklı tehlikelere ilişkin düzenlemeler içermektedir. Dökme yük gemileri için en önemli tehlikeler, taşıma sırasında yükün uygunsuz dağılımı veya ambar içindeki hareketi nedeniyle geminin dengesini kaybetmesi ile ilgili olanlardır. Uluslararası Denizcilik Katı Dökme Yükler Kodu'nun (IMSBC Kod) ana amacı katı dökme yüklerin gemilerle emniyetli bir şekilde taşınmasını sağlamaktır. Her bölümde, her bir yükün nasıl ele alınması gerektiği, farklı yük türlerinin taşınmasında ne gibi tehlikelerin bulunduğu ve yükün yüklenmeye uygun olup olmadığını kontrol etmek amacıyla yapılması gereken testlerle ilgili özel talimatlar hakkında bilgi vermektedir (IMSBC Code, 2022).

Günümüzde taşınmakta olan yüklerin çoğu hakkında IMSBC Kodu'nda bilgiler bulunur. Bu bilgiler; yüklerin özellikleri, karakteristikleri, yükleme riskleri ve

gereklilikleri, istifleme faktörü, ayırıştırma ve bu yüklerin taşınması, temizlenmesi ve havalandırılması gibi bilgilerdir (IMSBC Code, 2022).

Yükün gemilerle emniyetli bir şekilde taşınmasını sağlamak için, yüklemeden önce gemi kaptanı yükün özellikleri hakkında bilgilendirilmelidir. Yüke ait tüm bilgilerin yer aldığı özel bir formda yükün BCSN kodu, ait olduğu grup (A, B veya C), IMO'ya göre sınıfı, yüklenecek toplam yük miktarı, UN numarası, istif faktörü, gerekli yük elleçleme prosedürleri, uygun yığın duruş açısı, nem seviyesi (TNL) ve yükün sıvılaşmasının mümkün olup olmadığı hakkında bilgiler yer almalıdır. Ayrıca ıslak taban oluşturma olasılığı, yük tarafından üretilebilecek zehirli ve zehirsiz gazlar, yanıcılık, zehirlilik, erozyon kabiliyeti, yükün kendi kendine ısınma özellikleri, suyla temas ettiğinde yanıcı gazların özellikleri, radyoaktif özellikler ve ulusal makamlar tarafından istenen diğer yük bilgilerini içermelidir (IMSBC Code, 2022).

Kaptan yükü yüklemeye kabul etmek için, gerekli testlere ve sertifikalara ek olarak yükün uygun bir şekilde test ve kontrol edilmesini talep etmelidir. Yüklenecek olan yükün tehlikeli yük olması veya sıvılaşabilir olması durumunda kaptana özel sertifikalar sağlanmalıdır. Özellikle, A grubuna ait yükler yalnızca nem içerikleri taşınabilir nem limitinden (TNL) az olduğunda yükleme için kabul edilmelidir. Yükün TNL'i yük nem içeriğinden daha düşük ise yükleme yapılmamalıdır (Antonia, 2018; Akyüz 2020; IMSBC Code, 2022).

Sıvılaşabilecek malzemelerin test edilmesi için Akış tablosu testi, Penetrasyon testi ve Proctor/Fagerberg testi IMSBC Kodu tarafından önerilen test yöntemleridir. Bu test yöntemleri bu çalışmanın "1.2.5. Yükün Değerlendirilmesi İçin Uygulanan Test Yöntemleri" bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Genel olarak IMSBC kodu, yetkililere alınan numunelerin ve testlerin aşırı sıcaklıklardan, hava akımlarından ve nem değişimlerinden korunacağı bir yerde yapılmasını tavsiye etmektedir. Ayrıca, daha doğru sonuçlar için malzeme hazırlıkları ve test makul bir süre içinde tamamlanmalıdır (Antonia, 2018; PPI, 2020; IMSBC Code, 2022).

Son olarak, bu testlerden sonra kaptan yükün durumundan emin olmasa bile, IMSBC Kodu Teneke Kutu testi adı verilen çok basit bir test daha yapılmasını önermektedir. Bu test için yarısına kadar numune ile doldurulması gereken silindirik bir teneke kutu gerekli olan tek araçtır. Daha sonra kutunun zemin gibi sert bir yüzeye bir ya da iki saniyelik aralıklarla 25 kez çok hızlı bir şekilde vurulması gerekir. Bundan sonra, numunenin

yüzeyinde herhangi bir serbest nem veya sıvı izi olup olmadığını incelenmesi gerekir. Eğer numunenin yüzeyinde serbest nem veya sıvı izi varsa, yükleme öncesinde malzeme üzerinde düzenlemeler yapılmalı ve ek laboratuvar testleri gerçekleştirilmelidir. Numuneler kuru kalırsa, numune yükleme için kabul edilebilir (PPI, 2020).



Şekil 21. Basit Teneke Kutu Testi/Can Test (PPI, 2020)

Daha önce bahsedilen tüm testler yükün durumunu doğrulayabilse de, bunların sonuçları ancak numune alma prosedürü doğru ve kılavuza uygun bir şekilde yürütüldüğünde doğru olabilir. Anlaşıldığı gibi, cevherlerden yanlış numune alınması, yükün yanlış nem içeriğiyle kabul edilmesi nedeniyle birçok gemi kazası meydana gelmiştir. Özellikle, IMSBC Kodu'nun 4.6 Bölümüne göre numune alınması konusunda yapılması gerekenler şunlardır (IMSBC Code, 2022):

- Numune alma işlemi yalnızca bu prosedürler için eğitim almış ve geçerli numune alma ilke ve uygulamalarını bilen kişiler tarafından gerçekleştirilmelidir.
- Grup A'ya ait yükler için, numuneden sorumlu kişi gemi kaptanı ile birlikte yük stok sahalarını ziyaret etmeli ve yüklerin yüklendiği stok sahalarını incelemelidir.
- Numune almadan önce, yükün görsel bir incelemesi yapılmalıdır. Yükün bir kısmı geri kalanından belirgin bir şekilde farklı görünüyorsa, bu kısım ayrı olarak test edilmelidir.
- Malzemenin türü, parçacık boyutu dağılımı, malzemenin bileşimi ve değişkenliği, malzemenin depolanma şekli, malzemenin neden olabileceği kimyasal tehlikeler, nem içeriği, TNL, yığın yoğunluğu (stowage faktörü), duruş açısı, hava koşulları nedeniyle seyir boyunca nem dağılımında meydana gelebilecek değişimler, doğal

drenaj, malzemenin donmasından sonra ortaya çıkabilecek değişimler gibi yükün özellikleri dikkate alınarak yükün tamamından numune alınmalıdır.

- Test prosedürleri gerçekleştirilirken hava koşullarının yükün nem içeriğini veya diğer özelliklerini değiştirmemesi için yüke özen gösterilmesi de önemlidir.
- Numuneler stok yığınlarının tüm derinliğinden alınmalıdır.

Yükleme öncesinde stoklama için belirli bir plan vardır ve tüm yükün miktarına bağlı olarak 125 tondan 500 tona kadar olabilen alanlara bölünmüştür. Numune, stok alanının üst kısmındaki yüzeyin yaklaşık 50 cm altından alınmalıdır (Walton, 2015).

1.7.2. Uluslararası Emniyetli Yönetim Kodu

IMO tarafından yayınlanan Uluslararası Emniyetli Yönetim Kodu, gemilerin emniyetli yönetimi ve işletimi için uluslararası bir standart oluşturmayı amaçlayan bir koddur. 4 Kasım 1993 yılında kabul edildikten sonra SOLAS'a dâhil edildiği için hükümleri zorunludur. ISM Kodu'nun temel kurallarından biri, her geminin ve işletmecisinin operasyonel bir emniyetli yönetim sistemine sahip olması gerektiğidir. Dökme yük taşımacılığı ile ilgili olarak, tüm potansiyel tehlikeli durumları ve risklerini değerlendirmek ve ayrıca bunlarla yüzleşmek için uygun prosedürleri planlamak önemlidir. Daha özel olarak Emniyetli Yönetim Kodu, "yükü yüklemeye önce ayrıntılı bir risk değerlendirmesi yapılmalı, yükü yükledikten sonra ve limandan ayrılmadan önce uygun stabilite hesaplamalarını yapmalı, kaptanın geminin planlanan seferi için liman yükleme türlerini bilmeli, seyir sırasında bir sorun yaşanması durumunda gemi sahibi ile doğrudan temas kurulmalı, sıvılaşma meydana gelmesi durumunda, kaptan en yakın limana gitmelidir." gibi hükümleri içermektedir (UK P&I, 2010; ISM Code, 2018).

1.7.3. Dökme Yükler için Kanada Emniyet Uygulama Kuralları

1984 yılında Kanada hükümeti Katı Dökme Yükler için Kanada Güvenli Uygulama Kurallarını oluşturmuştur. Kod, başka bir kod tarafından kapsanan tahıllar hariç olmak üzere, katı dökme yüklerin güvenli istiflenmesi ve taşınması için standart bir prosedür oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu kod, IMSBC Kodu'nun en son basımında yer alan özellikle cevherlerin emniyetli bir şekilde taşınmasına ilişkin tüm tavsiyeleri Kanada gereklilikleri ile birlikte içermektedir (Antonia, 2018).

Kod'da personelin ve geminin korunmasının dışında sıvılaşılabilecek yükler için de özel referanslar bulunmaktadır. Koda göre sıvılaşılabilecek yükler olarak cevherler, belli kömür türleri ve bunlara benzer özelliklere sahip diğer yüklerdir. Kod aynı zamanda cevherlerin Kanada'ya giden ve Kanada'dan gelen gemilerin nasıl yüklenmesi gerektiğine dair özel talimatlar da içermektedir. Son olarak, Kodun Ek E kısmı, yükün doğru bir şekilde kontrol edilmesi için numune alma prosedürlerine atıfta bulunmaktadır. Ayrıca, tüm düzenlemelere uyulmasını sağlamak amacıyla yükün yüklenmesinden önce ve yükleme sırasında liman otoritesinin görev ve sorumluluklarının üzerinde duran bir ek de bulunmaktadır (Ship Safety Branch of the Canadian Coast Guard, 2017).

1.7.4. Lloyd's Register Kontrol Listesi

Son yıllarda, dünya çapında birçok klas kuruluşu, denizcilik kuruluşları, Intercargo, Uluslararası P&I Kulüpleri Grubu ve Uluslararası Deniz Ticaret Odası (ICS) gibi kurum ve kuruluşlar tarafından sıvılaşma problemine karşı farkındalığı artırmak ve pratik çözümler sunmak için birçok bülten ve rapor yayınlamaktadır

Lloyd's Register, Intercargo ve UK P&I Club ile işbirliği içinde, sıvılaşılabilecek yüklerle ilgili temel bilgileri içeren IMSBC koduna dayalı bir bülten yayınladı. Bu bülten aynı zamanda gemi kaptanını ve mürettebatı yükü kabul etmek için nelerin gerekli olduğu ve sıvılaşma riskini azaltmak için neler yapmaları gerektiği konusunda bilgilendirmektedir. Bültende yükün incelenmesi, yüklenmesi ve ardından ambarlara taşınmasına kadar tüm prosedürün denetimini kolaylaştıran bir kontrol listesi yer almaktadır.

1.7.5. Nikel Madeni Yüğü ve Sıvılaşma Hakkında Yayınlanan Kurumsal Bazı Bültenler

Aralık 2013'te Denizcilik Enstitüsü nikel madeni yüküne atıfta bulunan "En Ölümcül Kargo" başlıklı bir bülten yayınlamıştır. Rapor, Harita Bauxite gemisinin yükünün sıvılaşması nedeniyle nasıl kaybedildiğine ve bu kazaya yol açan nedenlere odaklanmıştır. Ayrıca raporda, bu tür kazaların önüne geçmek için hangi unsurların iyileştirilebileceğine, kaptan ve mürettebatın bu konuda doğru eğitim ve doğru bilgiye sahip olmasının ne kadar önemli olduğuna dikkat çekilmiştir (Poulsen, 2013).

Nisan 2017'de Teknik Hizmetler Asya, Amerikan P&I Kulübü (Hong Kong Ofisi) de "Nikel Cevheri taşımak: Dünyanın En Tehlikeli Yüğü" başlıklı bir bülten yayınlamıştır. Bültende 2010-2013 yılları arasında Endonezya'dan nikel cevheri yükleyen altı geminin Çin'e yaptıkları seferler sırasında batmaları ve 81 denizcinin hayatını kaybetmesi üzerinde duruluyor. Her bir zayıatın nedeninin, geminin dengesini etkileyen yükün sıvılaşmasından kaynaklandığı ve geminin çok hızlı, bazen birkaç dakika içinde alabora olmasına neden olduğu düşünülüyor. Bu nedenlerle nikel cevheri "dünyanın en tehlikeli yüğü" olarak nitelendirilmiştir (John, 2017)

Ayrıca, Stiftelsen Det Norske Veritas (DNV GL) ve İsveç Kulübü rehberliği gibi kuruluşlar da sıvılaşma ve nikel madeni hakkında çeşitli bültenler ve rehber bilgiler yayınlamaktadırlar.

1.7.5.1. DNV GL'nin Sıvılaşma İle İlgili Araştırmaları

Stiftelsen Det Norske Veritas, DNV GL adıyla bilinen Norveç kökenli bir vakıf ve sınıflandırma kurumudur. 1864 yılında ilk kurulduğu dönemlerde Norveç'teki deniz araçlarının teknik yeterliliklerinin denetlenerek belgelendirilmesi amacıyla görev yapmıştır.

DNV GL 2019 yılında, sıvılaşabilen dökme yük taşıyan gemilerin tasarımı ve işletilmesi için kılavuz ve sıvılaşma olgusu hakkında detaylı bir bülten yayınlamıştır. Bülten, sıvılaşmanın hem granüllü hem de granülsüz cevherlerde nasıl meydana gelebileceğine dair ayrıntılı bir açıklama içermektedir. Ayrıca, sıvılaşma olasılığı en yüksek olan yüklere atıfta bulunmakta ve mürettebatı nikel cevheri, demir cevheri ve boksit riski hakkında bilgilendirmektedir. Rapor, yükün nem içeriğinin test edilmesinden taşınmasına kadar prosedürlerin her adımı hakkında özel talimat ve bilgiler vermektedir (Gullen ve Norwegian Hull Club, 2019).

IMSBC Kodu'nda TNL'sinden daha yüksek nem içeriğine sahip yüklerin özel donanımlı gemiler ile taşınmasına izin verilmesine de atıfta bulunmaktadır. Bültende ayrıca, geleneksel dökme yük gemilerinin stabilitesini ve emniyet sağlamak üzere bazı değişikliklerin uygulanması önerilmektedir.

1.7.5.2. İsveç Kulübü (The Swedish Club) Rehberliği

2012 yılında İsveç Kulübü sıvılaşmanın nasıl meydana geldiğini ve mürettebat ile şirketlerin bu problemle nasıl başa çıkması gerektiğini açıklamak amacıyla bir rapor yayınlamıştır. Ayrıca iki acil durumda ne yapılması gerektiğine de cevap vermektedir.

- Yükün ambarlara yüklenmesi sırasında yağmur yağması durumunda ne yapılmalıdır?

Dökme yüklerin numune alma ve yükleme prosedürlerinden önce stok sahalarında depolandığı ve nem içeriğini etkileyebilecek yağmur, nem gibi hava şartlarına maruz kaldığı sıklıkla görülen bir durumdur. Yükleme için kabul edilen bir kargo, nem içeriği yükseldiğinde sıvılaşmaya meyilli olabileceğinden geminin yaşamı için bir tehlikeye dönüşebilir. Gemi kaptanına, yağmur sırasında mümkünse yükleme işlemine durdurması tavsiye edilmektedir. Ayrıca, Kaptanın bir uzman veya srveyrden yükün nem içeriğini tekrar kontrol etmesini ve TNL'nin altında olduğundan emin olmak amacıyla daha fazla test yapmasını istemesi önemlidir. Numune alma, test etme ve yükleme arasındaki bu prosedür yedi günden fazla sürmemelidir (The Swedish Club, 2012).

- Güvensiz yükün boşaltılması veya bu yük ile denize açılma

Bir geminin gerekli belgeleri olmadan yk yüklemesi durumunda, yükün güvensiz olma ihtimali vardır ve kaptanın yükün tahliyesini emretmesi gerekecektir. Bu durumda, tahliye işlemi kaptan, şirket ve hatta liman için birçok sıkıntıya neden olabilecek bir sorundur. Bunun nedeni, bu durumun nasıl ele alınması gerektiğine dair kesin düzenlemelerin olmamasıdır. şirket tahliye sürecinde çok para kaybedecektir ve ayrıca terminaller ve nakliyeciler boşaltılan yükü kabul etmeye istekli olmayabilir. Sonuç olarak, birçok bürokratik zorluk ortaya çıkabilir. Genellikle bu gibi durumlarda gemi kaptanları üzerinde büyük bir baskı oluşur. Çünkü kimse daha büyük bir maliyet ya da gecikme istemez (The Swedish Club, 2012).

Geçmişte, sıvılaşma manzaraları kaptan ve mürettebat tarafından grldğinde ve yükün tahliyesi mümkün olmadığında, gemi ve mürettebatı için riski azaltmak için birçok öneri yapılmıştır. Bu önerilerden bazıları düşük hızda seyretmek, karaya daha yakın kalmak ve kötü hava koşullarından kaçınmak için rota değişikliği yapmaktı. Bu neriler gemi için riskleri azaltabilecek olsa da, etkili olacaklarının garantisi yoktur. Sakin havalarda meydana gelen herhangi bir kaza ya da kazalar rapor edilmemiştir (Antonia, 2018).

Bir başka öneri de yük yüzeyinin sınırlandırılmasıdır. Bu uygulama, ambarların üstüne torbalanmış yük yerleştirerek ya da yükü çemberleyerek gerçekleştirilebilir. Bunlar tahıl yükünün kaymasını önlemek için getirilmiş çözümlerdir. Ancak sıvılaştırılabilen yüklerdeki etkinlikleri şüphelidir. Çünkü sıvılaşma yük ambarının tabanında da görülebilir ve bu durumda bu öneriler riski azaltamaz (The Swedish Club, 2012).

Sonuç olarak, sıvılaşma durumunun ortaya çıkması halinde Gemi Kaptanı, uzmanlardan yardım ve tavsiye istemesi gereken mal sahiplerini derhal bilgilendirmekle yükümlüdür.

1.7.6. Sıvılaşma Riskinin Sınırlanmasına Yönelik Fikirler

Bilim camiası hala yük sıvılaşması olgusunu anlamaya ve açıklamaya çalışırken, 2009'dan günümüze kadar bu riski azaltmak, geminin ve mürettebatın güvenliğini sağlamak için birçok fikir önerilmiştir. Aşağıda, denizcilik sektöründe çalışan kişilerin görüşlerinin yanı sıra önerilen fikirler açıklanmıştır.

1.7.6.1. Nikel Cevheri İçin Özel Gemi Yapımı

2009 yılından itibaren Class NK, nikel cevherinin sıvılaşması nedeniyle çok sayıda can kaybı yaşandığı için bu cevherin taşınması için özel olarak inşa edilmiş bir gemi tasarlamaya başladı. Nikel cevherinin özelliklerini ve nakliye sırasındaki davranışını anlamak için birçok araştırma yapıldı. Sadece iki yıl sonra, 2011 yılında, Japon klas kuruluşu Class NK nikel cevherinin taşınması için ilk özel gemi fikrini denizcilik dünyasına sundu. Özel bir gövde yapısı geliştirilmiş ve gerekli stabilite gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.

Mart 2012'de Japon klas kuruluşu Class NK bu özel gemi hakkında bilgi içeren "Nikel Cevherinin Güvenli Taşınması İçin Kılavuz" bültenini yayınlamıştır. Kısa süre sonra Panama ve Japonya hükümetleri kendi idarelerinin bayrağını taşıyan bu özel gemilerin kullanımını onaylamıştır. Günümüzde bu gemiler sadece INTERCARGO'nun değil, daha geniş denizcilik sektörünün de onayını kazanmıştır.



Şekil 22. Nikel Cevheri taşımak için özel olarak inşa edilmiş ilk gemi, JULES GARNIER II (URL- 2, 2023)

Ölü ağırlığı (DWT) 27200 ton olan özel geminin adı Jules Garnier II'dir. İnşaasında Class NK'nin o dönemin yeni gerekliliklerini uyguladığı ilk gemidir. Yükün sıvılaşması durumunda bile sadece stabiliteyi değil aynı zamanda yapısal mukavemeti de sağlamak için yük ambarlarında boyuna perdeler kullanılmıştır (Hull Department ClassNK, 2013; Antonia, 2018).

1.7.6.2. Minerallerin Sıvılaşmasını Önlemek İçin Kimyasal Bir Çözüm

Class NK sıvılaşma sorununa yapısal bir çözüm ararken, 2010 yılının sonlarında, Popek soruna farklı bir açıdan yaklaşmıştır. Toprağın sıvılaşması sorunundan esinlenerek ıslak yükteki suyu emmek için polimer malzemelerin kullanılmasını önermiştir. Bu konuda çeşitli deneyler yapmıştır. Deneyler sonucunda, polimerlerin eklenmesiyle kohezyonun (aynı cins iki maddenin birbirini çekmesi ile oluşan durum) ve iç sürtünme açısının etkilendiğini göstermiştir. Sonuç olarak, polimer malzemelerin kullanımı yükün gözeneklerinden çıkan suyun drenajını önleyerek yükün ambar içinde veya yüklemeye önce depolanırken kaymasını ve yer değiştirmesini engeller. Kullanılması önerilen polimer

malzemelerin doğal ve yenilenebilir kaynaklara dayanan ve çevre kirliliği konusunda herhangi bir zararlı yönü olmayan malzemelerdir (Popek, 2010; Antonia, 2018).

1.7.6.3. Güvenli Şişirilmiş Cihaz

2013 yılında Güvenli Şişirilmiş Cihaz kullanımını içeren farklı bir çözüm tavsiye edilmiş ve üzerinde çalışılmıştır. Bu cihazlar hem iskele hem de sancak tarafındaki yük ambarlarının dış yüzeyine yerleştirilebilir. Her seferinde başka bir konuma ya da ambara da yerleştirilebilirler. Güvenli Şişirilmiş Cihazın avantajı, mevcut gemilere de kolayca monte edilebilmeleri ve maliyet ve ağırlıklarının düşük olmasıdır. Araştırmada kanıtlandığı üzere, bu cihazların kullanımı tüm ambarlarda sıvılaşma meydana geldiğinde bile gemilerin alabora olmasını önleyebilme ve tamamen suya batırıldıklarında dahi etkinlikleri devam etmektedir. Ayrıca geminin karınaya daha yakın bir kısmına yerleştirilmesi geminin stabilitesini artırabilmektedir (Zografakis, 2013).

1.7.6.4. DNV GL'nin Cevherlerin Taşınmasına Yönelik Önerileri

Class NK'nin örneklerini takip eden DNV GL de bir bülten yayınlayarak yükün sıvılaşması nedeniyle meydana gelen kazaları önleyebilecek bazı yapısal değişikliklere atıfta bulunmuştur. Önerilerinden biri, ambarları daha dar hale getirebilecek ve serbest yüzeyin stabilite üzerindeki etkisini azaltabilecek boyuna perdelerdir. Bu çözüm stabilitenin artmasını sağlayabilecek olsa da, ambar hacminde kayba ve yapının ağırlığında ve maliyetinde artışa yol açacaktır. DNV GL ayrıca cevher taşıyıcıları için özel gereklilikleri de vurgulamıştır. Yük ambarlarındaki yüksek doluluk seviyesi nedeniyle, yük sıvılaşma kriterlerine uymak için gövdenin mukavemetinin artırılması gerektiğini belirtmiştir (DNV GL, 2019).

1.7.6.5. Bazı Yenilikçi Çözümler

Yükün sıvılaşması nedeniyle geminin alabora olma risklerini en az indirmek için Stefan Kirchner isimli bir araştırmacı tarafından yenilikçi bir çözüm önerilmiştir. Bu öneri, geminin ambarlarında ultra hafif ağırlığa sahip bir bal peteği yapısının kullanılmasıdır. Bu

ultra hafif bal peteği kafes yapısı, ambarlardaki yükün yer değiştirme hareketlerini kısıtlama görevi yapmaktadır. Ayrıca bal peteği kafes yapısının hafif bir malzemeden inşa edilmesi tahliye operasyonundan önce yük ambarlarından hızlı bir şekilde çıkarılabilmesini sağlamaktadır (Kirchner, 2015a). Kirchner başka bir öneri olarak da yük ile tepkimeye girmeyecek kurutucu bir dolgu malzemesinin yük içerisine eklenmesidir. Bu şekilde yük ambarlarının içindeki (boş) alan (taşınacak yük miktarı ne olursa olsun) azaltılmış olur ve malzemenin ambar içindeki hareketleri sınırlandırılmış olur (Kirchner, 2015a).

Ayrıca, bu malzemelerin kurutucu özellikleri yükteki nemi emebilir ve sıvılaşma riskini azaltabilir. Kullanılması gereken malzeme olarak ise odun peletleri gibi büyük parçaların daha uygun olduğu düşünölmüştür. Fakat Kirchner uygun bir yapay cihazın inşa edilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerektiğini düşünmektedir. Bu çözümin tek dezavantajı olarak, tahliye operasyonundan önce dolgu malzemesini yükten çıkarılması zorluğudur. Bu durum cevherlerin bu malzemelerle birlikte taşınma süresini ve dolayısıyla maliyetini arttırmaktadır (Kirchner, 2015b).

1.7.6.6. Ambarların İçinde Pıhtılaştırıcı Kullanımı

Mart 2017'de Strathclyde Üniversitesi'nden bir grup öğrenci "Sıvılaşma Risk Yönetimi" konulu bir çalışmalarında sıvılaşma olgusu ile ilgili pratik çözümler ortaya koymaya çalışmışlardır. Yapısal, mekanik ve kimyasal çözümleri ayrıntılarıyla inceleyerek sadece yeni inşa edilen gemilere değil, tüm gemilere uygulanabilecek fikirler üretmeyi hedeflemişlerdir. Ayrıntılı olarak inceledikleri temel fikir, bir yağmurlama sistemi ile yük ambarlarındaki pıhtılaştırıcıların içinde bulunduğu sistem fikridir. Test etmiş oldukları malzemelerden sodyum poliakrilatın en etkili pıhtılaştırıcılardan biri olduğu sonucuna varmışlardır (Seng vd., 2017). Ayrıca bu kimyasal katkının özelliklerini dikkate alarak gemide kullanılacak sistemi tasarlamışlardır. Önerilen sistemin sıvılaşma riskini azaltabileceği düşünölmektedir. Bununla birlikte, ortaya koymuş oldukları çözümin denizcilerin hayatlarını korumak açısından uygulanabilir ve etkili bir çözüm olduğu sonucuna varmışlardır (Seng vd., 2017; Antonia, 2018).

1.8. Deniz Kazaları

Deniz durumu, gemi makine ve pervanelerinin titreşimleri oluşturmaları nedeniyle ambarların içindeki yükün hareket etmesi neticesinde meydana gelen sıvılaşma, genel olarak geminin stabilitesini kaybetmesine neden olan serbest yüzey momentleri meydana getirir. Gemide ciddi bir meyil durumu oluşması ve geminin aniden alabora olabilmesi en kötü senaryodur (Zou vd., 2013).

İlk başlarda, taneli malzemeler veya çok ince malzemeler gibi maden yüklerinin sıvılaşması önemli ve kritik bir konu olarak görülmemiştir. Ancak gemilerin alabora olarak batması ve can kayıpları ile sonuçlanan kazaların yaşanmasından sonra sıvılaşma, dökme yük gemileri için büyük bir tehlike olarak görülmeye başlamıştır. Sıvılaşma riski artık denizcilik şirketleri, tüm denizcilik camiası ve sektör ortakları açısından büyük bir endişe kaynağıdır.

Bu tür kazaların nedeni olarak çoğunlukla, yükleyicilerin ve gemi personelinin yüklenecek yükün taşınması için emniyetli olup olmadığını doğrulamak için gerekli testlere ve sertifikalara uymaması olarak görülmektedir (Jonas, 2010). Bir diğer neden de yükmeden önce yükün depolandığı ortamdır. Bu ortamlar (stok sahaları) genellikle her türlü hava şartına maruz kalan açık alanlardır (Gullen ve Norwegian Hull Club, 2015).

Aşağıdaki tabloda 1988-2019 yılları arasında nikel, demir ve boksit cevheri yüklerini taşıyan gemilerde meydana gelen önemli kazalar ve can kayıplarını gösteren bir listesi sunulmuştur (İşiaçık Çolak ve Şatır, 2014; Antonia, 2018; DNV-GL, 2019; Intercargo, 2022).

Tablo 4. Yük sıvılaşması nedeniyle meydana gelmiş büyük kazaların listesi (İşiaçık Çolak ve Şatır, 2014; Antonia 2018; DNV-GL, 2019; Intercargo, 2022)

	Geminin Adı	Kaza Yılı	Can Kaybı	Yük
1	Mega Taurus	1988	20	Nikel Cevheri
2	Sea Prosped	1988	10	Nikel Cevheri
3	Oriental Angel	1990	0	Nikel Cevheri
4	Padang Hawk	1999	0	Nikel Cevheri
5	Hui Long	2005	0	Kalsiyum Floriti
6	Jag Raghul	2005	0	Nikel Cevheri
7	Black Rose	2009	1	Demir Cevheri
8	Asian Forest	2009	0	Demir Cevheri
9	Nasco Diamond	2010	22	Nikel Cevheri
11	Hong Wei	2010	10	Nikel Cevheri
12	Jian Fu Star	2010	13	Nikel Cevheri
13	Vinalines Queen	2011	22	Nikel Cevheri
14	Sun Spirits	2012	0	Demir Cevheri
16	Trans Summer	2013	0	Nikel Cevheri
17	Harita Bauxite	2013	15	Nikel Cevheri
18	Bulk Jupiter	2015	18	Boksit
19	Alam Manis	2015	1	Nikel Cevheri
20	Stellar Daisy	2017	22	Demir Cevheri
21	Emerald Star	2017	10	Nikel Cevheri
22	Nur Allya	2019	27	Nikel Cevheri

1.8.1. Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşması Sonucu Meydana Gelen Kazalarına Ait Raporlardan Elde Edilen Genel Kaza Nedenleri

Nikel madeni yükünün sıvılaşmasından kaynaklanan kazaların ve olayların nedenlerini analiz etmek için Kanada Taşımacılık Emniyeti Komisyonu (TSB-C), Avustralya Ulusal Kaza ve Kaza Araştırması Kurulu (ATSB), Japonya Ulaştırma Emniyeti Kurulu (JTSCB), İngiltere Deniz Kazaları Araştırma Bölümü (MAIB), Panama Denizcilik Otoritesi (PMA), ABD Ulusal Taşımacılık Emniyet Kurulu (NTSB) gibi kurumlar tarafından hazırlanan kaza raporları incelenmesi ve bu raporların nikel cevherinin özellikleriyle birleştirilmesi sonucu, bu yükü bu kadar tehlikeli kılan nedenler aşağıda listelenmiştir (Munro & Mohajerani, 2016).

- Çoğu zaman nikel cevherinin doğrudan kazı alanından/maden sahasından gemilere yüklenmesi,
- Uzak yerlerdeki madenlerden dolayı sörveyörlerin ve uzmanların buralara ulaşmasının zor olması ve bu tür ülkelerde güvenilir laboratuvarların

bulunmaması nedeniyle yük numunelerinin bağımsız olarak test edilmesini sağlamanın kolay olmaması,

- Yük ile ilgili bilgilerin gemiye yanlış beyan edilmesi,
- Stok sahalarının şiddetli yağışlara maruz kalması,
- "Solar kurutma işlemi" uygulansa bile etkisiz kalması,
- Fiziksel özelliklerin bazen çakıldan çamura kadar değişmesi,
- Genellikle sıvılaşma şüphesi olan numunelerin test için yurtdışına gönderilmesi gerekliliği,
- Mürettebatın genellikle deneyimsiz olması ve talep edilen testleri doğru bir şekilde uygulamak için eğitilmemiş olmamaları,
- Yük sıvılaştıktan sonra, sorunla başa çıkmak için etkili bir çözümün olmaması,
- Bir yük olarak nikel cevherinin özellikleri ile nem içeriği yüksek olduğunda ve yeterli fiziksel strese maruz kaldığında akışkan hale gelme eğilimi hakkında yeteri kadar bilgi sahibi olunmaması.



Şekil 23. Padang Hawk gemisinin 1 numaralı yük ambarının içindeki kuru ve sıvılaşmış cevher fotoğrafları (DNV-GL, 2019)



Şekil 24. Nasco Diamond gemisine yüklenen nikel cevheri yükünün Endonezya'nın Kolonodale kentinde yükleme sırasındaki durumuna ilişkin Kaptan tarafından merkez ofise sunulan fotoğraflar (Panama Denizcilik Otoritesi, 2011a)



Şekil 25. Trans Summer'ın iskele tarafa 45 derece ve 90 derece yattığını gösteren kurtarma helikopterinden çekilen görüntüleri (The Hong Kong Special Administrative Region, 2015)

1.9. Benzer Çalışmalar

1.9.1. Sıvılaşma, Yük Sıvılaşması ve Nikel Madeni Yüğü ile İlgili Çalışmalar

Yakın zamana kadar, yük sıvılaşması probleminin karmaşıklığı bilim adamlarının yararlı sonuçlar ortaya koymasına izin vermemiştir. Ancak, son yıllarda bu olguyu ve sonuçlarını daha iyi anlamak ve tahmin etme konusunda başarı elde edilmiştir. Dökme kuru yüklerin sıvılaşma olgusunu daha iyi anlamak için zemin sıvılaşması olgusu referans alınmıştır. Zemin sıvılaşması ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bir kısmı incelenerek sıvılaşma olgusu açıklanmıştır.

Sıvılaşma (liquefaction) terimini bilimsel literatürde ilk kez kullanan araştırmacı Terzaghi'dir (1925) Terzaghi sıvılaşmayı, suya doymuş malzemenin aşağı doğru çökmesi sırasında, malzemeyi meydana getiren katı parçacıkların ağırlığının, malzemenin çevresini saran suya ilemesiyle meydana gelen bir olgu olarak tanımlamıştır (Terzaghi, 1925). Castro da (1969) kumların sıvılaşması ile ilgili çalışmasında bu durum sonucunda, malzemenin herhangi bir derinliğindeki su basıncının yükselerek hidrostatik basıncın büyüklüğünün suya batan malzemenin birim ağırlığına yaklaştığını ifade etmiştir (Castro, 1969).

Celep ve Kumbasar (2000) çalışmalarında zemin sıvılaşmasını, yeraltı su seviyesi altındaki tabakaların bir süreliğine dayanımlarını kaybederek, katı özelliği değil akışkan bir sıvı özelliği göstermesi olarak tanımlamışlardır. Özellikle, kil içermeyen kum ve silt yapılı zeminler ile çakıl içerikli yapıların sıvılaşma potansiyeline sahip olduğunu ifade etmişlerdir (Celep ve Kumbasar, 2000). Depremlerde Yer Hareketi ve Zemin Sıvılaşması üzerine bir çalışma yapan araştırmacılar Seed ve Idriss (1982), zeminin mukavemetini etkileyen statik gerilmelerden daha az bir değere düşmesi durumunda, zeminde ciddi deformasyonların meydana gelmekte olduğunu ve zemin sıvılaşmasının meydana geldiği sonucuna varmışlardır (Seed ve Idriss, 1982). Youd (1992), 22 Nisan 1991 "Kosta Rika Depremi Sırasında Sıvılaşma, Zemin çökmesi ve Buna Bağlı Hasarlar" konulu çalışmasında zemin yapısında sıvılaşmaya sebep olan hareketlerin, özellikle makaslama dalgaları ve sismik dalgalar olduğunu açıklamışlardır (Youd, 1992).

Uyanık (2002), Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi ile ilgili çalışması ile, deprem süresince sismik dalgaların, genellikle su bakımından doygun ve yumuşak zeminler içinde zemini ihtiva eden toprak partiküllerinin hareket etmesine

neden olduğunu, bu şartlar altında doygun ve yumuşak zemin toprak partiküllerinin birbirine yaklaşma yönünde eğilim gösterdiğini, bu durumda olan partiküllerin değme noktalarında görülen gerilimi partikülleri saran suya aktardığını, deprem boyunca sismik dalgaların ani ve çok kısa süreli hareketlere neden olmasından dolayı partiküller arası suyun uzaklaşması için ihtiyaç duyulan süreye imkân tanımadığını, dolayısıyla ortamdan uzaklaşmayan gözenek suyunun hidrostatik basıncı aniden artarak zemin partiküllerini bir arada tutan çekim kuvvetlerini ortadan kaldırması neticesinde partiküllerin birbirinden uzaklaştığı sonucuna varmıştır. Böylece mukavemetini kaybeden zeminin, düşey basıncın ortadan kalktığı bu şartlar altında zeminin, deprem öncesinde sahip olduğu katı bir malzeme davranışı yerine, bir sıvı gibi davranarak su ile beraber yukarı doğru hareket ederek yüzeyden fışkırmaya başladığını ifade etmiştir. Zeminin dinamik ağırlıklardan dolayı gösterdiği bu davranış biçimini sıvılaşma olarak tanımlamıştır (Uyanık, 2002).

Mittari ve Nori (2006), ıslak granüler ortamın mekanik özelliklerinin bir incelemesini yaparak özellikle yapışma etkisine vurgu yaptıkları çalışmalarında, granüler fizik üzerine yapılan çalışmaların çoğunun taneler arasında sıvı bulunmayan kuru granüler ortama odaklandığını, ancak jeolojide ve birçok alanda taneler arasında sıvı bulunduğunu, bu durumun tanecikler arasında yapışma ürettiğini ve granüler ortamın mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirdiğini ifade etmişlerdir (Mitarai ve Nori, 2007).

Alpaslan (2013), ‘‘Zemin Sıvılaşması ve Mekanizması’’ hakkında yaptığı çalışmasında sıvılaşmanın arazide zeminin bütün tabakalarında meydana gelmediği için sıvılaşma tehlikesi ile ilgili analizlerinde en başta sıvılaşma olgusunun oluşması için gereken şartların var olup olmadığının incelenmesi gerektiğini ifade etmiştir (Alpaslan, 2013). Şengöz (2019) ise, çalışmasında sıvılaşma ve zemin sıvılaşmasının mühendislik yorumlamasını yaparak, zemin sıvılaşması ile ilgili takip edilmesi gereken önlem ve tavsiyeler üzerinde durmuştur. Ayrıca zemin ve temel analizi uygulamanın ciddiyetine dikkat çekmiştir (Şengöz, 2019).

Yük sıvılaşması ile ilgili denizcilik literatüründe az sayıda çalışma yapılmıştır. Örneğin Zografakis (2013) katı dökme yüklerin sıvılaşması konusunda kapsamlı bir tez çalışması yürütmüştür. Tez deneysel prosedürleri ve izlenmesi gereken adımları içermektedir. Katı dökme yük taşımacılığında yük sıvılaşması nedeniyle oluşabilecek denizcilik olaylarına yönelik de detaylı inceleme yapmıştır. Benzer şekilde Monro ve Mohajerani (2016a), Dökme yük gemilerinde sıvılaşmanın önlenmesi için demir cevheri tozlarının nem içeriği limitinin incelenmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma,

minerallerin TNL'sinin belirlenmesinde kullanılan 2013 IMSBC Kodu'nda tavsiye edilen üç test yönteminin demir madeni cevheri (Iron Ore Fine/IOF) test edilmesi için uygun olmadığını, demir cevherinin goetit içeriğinin ve Modifiye Proctor/Fagerberg testi ile ilgili gibi son gelişmelerin de göz önüne alınması gerektiğini ifade etmektedir. Mohajerani (2016a)'nın çalışmasının sonuçlarına göre demir madeni cevheri önceki üç test yönteminden birinin kullanıldığı duruma göre daha yüksek nem içeriklerinde taşınmasına izin verir. Yine Munro ve Mohajerani (2016b), deniz taşımacılığında kuru dökme yüklerin sıvılaşmasının toplu potansiyel nedenlerini tartışmak için bir araştırma gerçekleştirdi. Araştırma sonucunda, dökme yük gemilerinde katı dökme yüklerin sıvılaştırılmasının neden olduğu benzer olayların önlenmesi için bazı öneriler vermişlerdir.

Rose (2014) esas olarak gemilerdeki TNL test yöntemine odaklanmıştır. Araştırma, mevcut TNL test yöntemlerinin doğruluğunu ve bunlarla ilgili mevcut bulguları doğrulamak amacıyla yapılmış, IMSBC Code 2013 basımında tanımlanan yükün nem içeriğini tespit etmek için önerilen üç test yöntemi üzerine hazırlanmış ve sunulmuş teknik bir çalışmadır. Ayrıca, bu çalışmada IMSBC Kodu'nda önerilen iki test yöntemiyle gerçekleştirilen deneysel araştırmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yükün sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için önerilen modeli doğrulamak amacıyla katı dökme yük sıvılaşması ile ilgili kapsamlı bir sayısal analiz de Vassalos ve Boulougouris tarafından yapılmıştır (Vassalos ve Boulougouris, 2016). Benzer bir çalışma da Ju vd. tarafından, kuru dökme yüklerin sıvılaşma özelliklerinin sayısal olarak incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada, yükün deneysel analizi için ayrık eleman yöntemi (Discrete Element Method/DEM) denilen yeni bir bakış açısı tanıtılmıştır (Ju vd., 2018).

Rebouillat ve Liksonov (2010) tarafından yapılan ilk araştırmalardan biri, kısmen sıvı dolu kaplarda katı-sıvı etkileşiminin modellenmesini incelemiştir. Dalga genliğini, frekansını ve basınçlarını tahmin etmek için sayısal yaklaşımların yanı sıra çalkalanma (sloshing) olgusu da kullanılmıştır. Ayrıca, çalkalanma etkisi sırasında bir kabın stabilitesi de araştırılmıştır (Rebouillat ve Liksonov, 2010).

Koromila vd., yük sıvılaşmasının anlaşılması konusunda ilk adımlardan bazılarını atmışlardır. Koromila, kum ve pirincin yuvarlanma ve sallanma hareketi altındaki davranışını araştırmak için bir titreşim masası ile bir dizi deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bir dökme yük gemisinde meydana gelebilecek yük sıvılaşmasının sonuçlarını inceleyerek heterojen bir yüklemenin gemi dengesi/stabilitesi açısından homojen yüklemeye göre daha meniyetli olduğunu kanıtlamışlardır. Bu sonuçların ardından, Spandonidis ve Sprou

mineral numunesinin nem içeriğini göz ardı ederek granüler malzemelerin bir tanktaki iki boyutlu davranışını analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, parçacıklar etkileşim içinde olan ayrık nesnelere gibi ele alınmış ve neticede elde edilen sonuçlar deneysel verilerle pozitif bir uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, daha küçük boyutlarda parçacıklara sahip ve daha fazla yoğunluğu olan sahip malzemelerin daha akışkan olduğunu kanıtlamışlardır (Koromila vd., 2013).

Aynı zamanda, Jian vd.,(2013) deneyler yoluyla nikel ve demir cevherinin sıvılaşmasına yol neden olan durumları anlamaya ve açıklamaya çalışmışlardır. Nem içeriği ile birlikte ivmenin de sıvılaşmanın ortaya çıkmasında önemli bir etken olduğunu ortaya koyan sonuçlar elde etmişlerdir. Ayrıca, nem oranı %31'den fazla olan yüklerin yükleme için uygun olmadığını ve yüklenmesinin kabul edilmemesi gerektiğini ifade etmişlerdir (Jian vd., 2013). Chen vd. (2013) farklı nem içeriğine sahip numunelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, bir yük sıvılaştağında, geminin ve yükün hareketi arasında bir faz farkı olduğunu kanıtlamışlardır. Bu faz gecikmesinin geminin alabora olmasına yol açan bir etken olduğunu ifade etmişlerdir (Chen vd, 2013). Benzer şekilde, Guan vd., (2014) de nikel cevherinin davranışına odaklanan bir dizi model deneyler gerçekleştirmişlerdir. Özel olarak, nikel cevheri, nem içeriği oranı %35 olduğu bir durumda incelenerek dinamik yalpa momenti ölçülmüştür. Sıvılaşma olgusunun üç aşamaya ayrılabilceği gerçeği bu araştırmanın temel sonucudur (Guan vd., 2014).

Zou, vd. (2013) tarafından dikdörtgen bir tanktaki akışkanın çalkalanma hareketi için sayısal bir simülasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Akışkanın çalkalanma davranışının tahminleri deneyler yoluyla doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar uyarma genliğinin ve frekansının tankın alabandalarında sıvıdan nedeniyle oluşan basıncı etkilediğini göstermiştir. Sıvının kayma direncinin çökmesi durumunun, sıvı şamandırasından elde edilen ve artan yalpa momenti ile birlikte bir geminin alabora olarak batmasına sebep olabileceği sonucuna varmışlardır (Zou vd., 2013). Zhang vd. (2016a) tarafından başka bir parametrik çalışma, sayısal simülasyonlara dayalı olarak yük ambarları içindeki nikel cevheri bulamacının çalkalanma olgusunu göstermek için geliştirilmiştir. Sonuçlar arasında, ortalama moment genliğinin maksimum değerinin, rezonans frekansına yakın olan 4.8rad/s civarındaki bir uyarma frekansında gerçekleştiği ortaya konulmuştur. Bu çalışmada ayrıca, teknenin yalpalanması 10 dereceden büyük olduğunda, ortalama moment genliği, akışkanın viskozitesinin etkisi nedeniyle doğrusal davranıştan sapma eğiliminde olduğu sonucu elde edilmiştir (Zhang vd., 2016a).

Diğer bir grup araştırmacı ise tank içerisindeki bir bölmenin etkisine odaklanmıştır. İlk çalışmalardan bazıları hem bölmeli hem de bölmesiz dikdörtgen tanktaki basınç değişimlerini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Bölmenin etkilerinin sığ sulara daha belirgin olduğu ve buna bağlı olarak basıncın bölme kullanımıyla azaldığı kanıtlanmıştır (Akyıldız ve Erdem Ünal, 2006). Jung vd. (2012) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, sonlu hacim ve akışkan hacmi (VOF) yöntemlerine bağlı olarak, basınç ve serbest yüzey etkisinin farklı bölme seviyeleri ile değişimleri analiz edilmiştir. Sonuçlar daha sonra deneysel verilerden elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır (Jung vd., 2012). Zhang vd.'nin (2016b) yaptığı başka bir araştırmada ambarların içindeki uzunlamasına bir bölmenin nikel cevheri bulamacının çalkalanması üzerindeki etkisini incelenmiştir. Sonuçlar arasında, dinamik viskozitenin bölme yüksekliği değiştiğinde değiştiği ve bölme yüksekliği artmaya devam ettikçe yüksek viskozitenin artmaya devam ettiği kanıtlanmıştır. Ayrıca, suyun hareketinin nikel cevheri bulamacına göre daha şiddetli olduğu belirtilmiştir (Zhang vd., 2016b).

Nikel bulamaçlarının çalkalanması üzerine Zhang vd.'nin (2017) yaptığı son çalışmalarından birinde, nem içeriği farklı üç numunenin davranışlarını karşılaştırdır. Çalkalanma kaynaklı momenti etkileyen önemli faktörlerin dış uyarım ve frekansı olduğunu ortaya koymuşlardır. Frekansla birlikte uyarım genliğindeki artmanın da, daha büyük moment genliği ve faz gecikmesi ile neticelendiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca viskozitenin, nemli nikel cevheri yükünün çalkalanmasında bir diğer önemli faktör olduğunu ve viskozitenin daha yüksek olduğu bir seviyede, bulamaçların akışkanlık özellikleri bozulur ve geminin meyil yapmasına sebep olabilecek yük birikintilerinin oluşumunun kolaylaştırdığını ifade etmişlerdir (Zhang vd., 2017).

Isıacık Colak ve Satır (2014), dökme yük gemilerinin ve yüklerinin tamamen kaybının nedenlerini araştırdıkları çalışmalarında, yük sıvılaşmasından dolayı meydana gelen stabilite kaybının nedenlerini, SOLAS 74 yönetmeliği ve IMSBC Kod kapsamında gemi kaptanı ve mürettebatın yükleme ve seyir sürecindeki görev ve sorumluluklarını araştırmışlardır. Başta gemi kaptanları olmak üzere denizcileri, yük sıvılaşması konusunda bilinçlendirmek ve yük sıvılaşmasının risklerini vurgulamayı amaçlamış ve şu sonuçlara ulaşmışlardır: Katı dökme yüklerin hatalı yüklenmesi, yükün sıvılaşma etkileri ve gönderici ile gemi kaptanı arasındaki yetersiz iletişim, çok sayıda kazaya neden olmaktadır. Kaptan, demir cevheri, nikel cevheri ve diğer konsantre yükler için yükleme başlamadan önce ve sonra her daim hava şartlarını takip etmelidir. Kaptanın SOLAS

gereği üstün bir yetkiye sahip olduğunu unutmaması gerekir. Eğer yükün emniyetinden memnun değilse yükü reddetmeli ve herhangi bir risk varsa yüklemeyi durdurmalıdır. SOLAS ve IMDG Kodu, yük sıvılaşmasını önlemek için çok katı kurallara sahiptir. IMSBC Kod'un belirlediği taşınabilir nem limiti, yükleme başlamadan önce bilinmeli ve uygun bir laboratuvar tarafından sertifikalandırılmalıdır. Dökme yük gemisi mürettebatının IMSBC Kod ve SOLAS yönetmeliklerine aşına olması gerekmektedir. Katı dökme yük taşıyıcılarının can kayıplarını ve toplam gemi kayıplarını önlemek için kalifiye ve deneyimli gemi mürettebatı şarttır (Isıacık Colak ve Satır, 2014). Aynı şekilde Xiaonan vd. (2014) sıvılaşabilen katı dökme yük taşıyan gemilerde meydana gelmiş olan kazaların nedenini anlamak ve benzer kazaların tekrar yaşanmasını önlemek amacıyla, 2001 ve 2010 yılları arasında Çin'de veya yakınında yaşanan kazaların kaza inceleme raporlarını veya kaza vakalarını inceleyerek kazaların iç ve dış nedenlerini analiz etmişlerdir. Sonuçlar, yüklerin taşınabilir nem limiti ve nem içeriğinin sevkiyattan önce doğru bir şekilde tespit edilmesi gerektiğini ve temel güvenliği sağlamak için nem içeriğinin taşınabilir nem limitinin altında olması gerektiğini göstermektedir (Xiaonan vd., 2014).

Paassen vd. (2015) çalışmalarında, çok çeşitli ince taneli yüklerin karakterize edildiği ve kılavuzlarda belirtilen farklı testlere göre test edildiği deneysel bir araştırma programının sonuçlarını sunmuşlardır. Bu TNL testlerinin bir yükün sıvılaşp sıvılaşamayacağını değerlendirme konusunda uygun olup olmadığını değerlendirmek amacıyla sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçlar TNL testlerinin uygulanabilirliğinin sınırlı olduğunu ve test koşullarının gerçek nakliye koşullarına uymadığını göstermiştir. Yükün kaymasına ve gemilerin alabora olmasına yol açan süreçlerin mekanik anlayışını ve risk değerlendirme yaklaşımını geliştirmek için daha fazla araştırma yapılması gerektiği ve bu işlemlerin ortalama nem içeriğinden daha fazla faktöre bağlı olduğundan, böyle bir yaklaşımın yalnızca TNL'ye dayanmaması gerektiği sonucuna varmışlardır (Paassen vd., 2015).

Munro ve Mohajerani (2017), katı dökme yüklerin sıvılaşığından şüphelenilen dökme yük gemilerinde 1988-2016 yılları arasında meydana gelen olayları ve bu olayların insan hayatı ve sanayi varlıklarının kaybına olan etkisini araştırmak üzere yaşanan deniz kazalarını ve olaylarını incelemişlerdir. Ayrıca, ince demir cevheri (IOF) için Modifiye Proktor/Fagerberg Testi (MPFT) kullanılarak taşınabilir nem nimitinin (TNL) belirlenmesinin etkinliği, bir malzemenin kesme mukavemeti sınırlarını belirlemek için kullanılan bir aparat geliştirilerek sorgulamış ve test etmişlerdir. Bu çalışmada sıvılaşmaya

yapılan atıf, araştırılan kazaların kesin sebebi olduğunun bir göstergesi olmadığını, sıvılaşma teriminin, endüstri ve araştırma kurumları tarafından yükün karşılaştığı problemi ifade etmek için kullanılan bir genel terim gibi görüldüğünü ve problemin asıl şeklinin bu mu olduğu, yoksa farklı bir neden mi olduğunu sorgulamışlardır. Plastik sarsıntı, artan çökme, genel şev yıkılması ve hatta şu anda ön görülemeyen ve araştırılmayan başka bir durum bile olabileceği üzerinde durmuşlardır. Ek olarak, IMSBC Kodu'nun zorunlu olarak uygulanmasından sonra katı dökme yüklerde sıvılaşma şüphesi olaylarının neden devam ettiğini belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır (Munro ve Mohajerani, 2017).

Coskun (2019), yük sıvılaşması probleminin muhtemel tehlikelerini ve sonuçlarını açıklamak, denizyolu taşımacılığında niceliksel bir risk analizi için FTA ve ETA analiz yöntemlerini Bulanık mantık ortamında birleştirmek, gemide yük sıvılaşması problemi üzerinden kapsamlı bir risk analizi yapmak amacıyla bir tez çalışması yapmıştır. Çalışmada, FTA yaklaşımı kaza olayına neden olabilecek temel olayları belirleme yeteneğine sahipken, ETA yaklaşımı başlatıcı olaylardan kaza senaryolarına kadar olay dizilerini ortaya koymayı sağlamıştır. Böylece gemilerde yük sıvılaşmasının nedenini anlamak için temel olaylar belirlenmiş ve yukarıdan aşağıya doğru hata ağacı diyagramı oluşturulmuştur. Dökme yük gemilerinde yükün sıvılaşmasına neden olabilecek olası arızalar niceliksel olarak analiz edilmiştir. Detaylı niceliksel risk analizi sonucunda kuru dökme yük taşımacılığında yükün sıvılaşmasına neden olabilecek en önemli hataların yüklemmeden önce yükün ortalama nem içeriğinin yanlış beyan edilmesi, yanlış yük tanımlaması, yanlış teneke kutu testi uygulaması ve yükleme sırasında yük ambarlarına su veya diğer sıvıların girmesi olarak tespit edilmiştir (Coskun, 2019).

Wang vd. (2019), sıvılaşma üzerindeki her önemli etki faktörünün ağırlığını belirlemek ve mineral cevheri için sıvılaşma riskinin değerlendirme indeks sisteminin hiyerarşik yapısını oluşturmak için AHP yöntemini kullanarak bir çalışma yapmıştır. Deniz taşımacılığı sırasında maden cevherlerinin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek amacıyla, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) aracılığıyla mineral cevherleri için bir sıvılaşma risk değerlendirme modeli oluşturmuştur. Sıvılaşma riskine ilişkin bir değerlendirme indeks sistemi düzenli bir hiyerarşik yapıya dönüştürülmüş, süreç sırasında üç önemli faktör olan titreşim ivmesi, nem içeriği ve ince parçacıklar ikili olarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, sıvılaşma risk değeri hesaplanmış ve buna karşılık gelen sıvılaşmanın meydana gelme olasılığı yorumlanmıştır (Wang vd., 2019).

Zhuang vd. (2019), farklı nem içeriklerine ve belli ivmelere sahip demir cevheri konsantrelerinin sıvılaşma davranışı üzerine santrifüj testleri uygulamışlardır. Bu çalışmada, farklı başlangıç nem içeriklerinde ve ivmelerde dinamik santrifüj modeli testleri uygulanarak simüle edilmiş ve bir yerçekimi alanında demir cevheri konsantrelerinin sıvılaşma davranışları incelenmiştir. Sıvılaşma olgusu ve buna bağlı olarak yük davranışları ilgili daha deneysel sonuçlar elde etmişlerdir (Zhuang vd., 2019).

Akyuz vd. (2020), gemide yük sıvılaşması durumu, yük sıvılaşmasının sonuçlarının mürettebat, gemi ve çevre için önemli derece tehlikeli olması dolayısı ile yük sıvılaşması olgusunu seçmiş ve bulanık mantık ortamında FTA ve ETA yöntemlerini entegre ederek papyon yöntemi ile birlikte kapsamlı risk analizi gerçekleştirmişlerdir. Yüklemeden önce yükün ortalama nem içeriğinin yanlış beyan edilmesi, yanlış kargo tanımlaması, hatalı teneke kutu testi uygulaması ve yükleme sırasında yük ambarlarına su ve başka sıvı girişi sıvılaşmayı etkileyen kritik olaylar olduğu sonucuna varmışlardır. Teorik anlayışın yanı sıra, çalışmanın denizcilik profesyonellerinin yük sıvılaşması olgusu hakkında emniyet farkındalığını artırmalarını destekleyeceği düşünülmektedir (Akyuz vd., 2020).

Jian vd. (2020) çalışmalarında, nakliye sırasında nem içeriğindeki değişimi kullanarak demir cevheri madenlerinin sıvılaşma potansiyelini doğru bir şekilde değerlendirmek için bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Nem içeriğindeki artış, matris emme ve efektif normal gerilme değerlerini düşürerek demir cevheri madenlerinin doymamış kayma mukavemetinde azalmaya neden olmuştur. Nem içeriği, demir cevheri madenlerinin mukavemetini etkileyen kritik faktör olduğu görülmüştür. Nem içeriği ve döngü sayısı göz önüne alındığında, sahadaki demir cevheri madenlerinin döngüsel mukavemet oranı, laboratuvar testlerinden saha koşullarına olan korelasyondan elde edilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli yüksek olan bölgeler, derinlik boyunca çevrimsel dayanım oranı ve çevrimsel kayma gerilmesi oranına göre belirlenmiştir. Değerlendirme sonuçlarında, dinamik jeoteknik santrifüj modeli testlerinden elde edilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır (Jian, 2020).

Islam vd. (2022), sıvılaşabilir yüklerin, özellikle de nikel cevheri ve boksitin nakliyesi sırasında gemi stabilitesinin kaybına neden olan faktörleri tanımlamayı ve değerlendirmeyi amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Veriler, Google Formlar ile oluşturulan ve denizcilere doldurmaları için sunulan bir ankete dayanarak toplandı. Faktör analizi ile yük sıvılaşması nedeniyle geminin stabilite kaybına katkıda bulunan unsurları değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, başta nikel cevheri ve boksit olmak üzere yükün

sıvılaşmasına birçok faktör katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmada faktörler insan hatası, bilgi faktörü, hava durumu ve kargonun kendisi olarak kategorize edilmiştir. Araştırma, sıvılaşmış yük nakliyesi sırasında geminin kaybına neden olabilecek en önemli unsurun insan hatası olduğu sonucuna varmışlardır (RanakulIslam vd., 2022).

Shen (2012) nikel cevherinin özel özelliklerine dayanan çalışmada, nikel cevherinin gemide taşındığında sıvılaşmasının neden kolay olduğunun temel nedenini analiz etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada, nikel cevheri taşınırken gerçekleşen birçok kazayı analiz etmiş, nikel cevherinin sıvılaşma özelliğinin geminin dengesiz hale gelmesine ve seyir halindeyken alabora olmasına neden olan temel neden olduğunu belirtmiş, yükün nem içeriğini TNL'nin altında tutmanın güvenli operasyonun temel faktörü olduğuna işaret etmiştir. Benzer kazaları en aza indirmek için gemi sahibi ve yönetim şirketi, bu temel nedenler ışığında mürettebata gerekli eğitimleri vermeli, mürettebata nikel cevheri yükünün yük operasyonunun nasıl denetlenmesi gerektiği konusunda rehberlik etmeli, mürettebatı gerek görüldüğünde yardım çağırmaya teşvik etmeli ve nikel cevherinin sıvılaşmasını önlemek için uygun ölçümlerin yapılmasını sağlamalıdır (Shen, 2012).

Chu vd. (2013), yaptıkları çalışmada nakledilen lateritik nikel cevherinin nem içeriğinin izlenmesine ilişkin gerçek ihtiyaçlardan yola çıkmakta ve kablosuz sensör ağları ile neredeyse gerçek zamanlı bir izleme sistemi tasarlayarak lateritik nikel cevherinin nem içeriğinin izlenmesine uygulamışlardır. Sistem, tüm izleme sisteminin enerji tasarrufu sorununu, sensör düğümlerinin tasarımını, yerleşimini ve toplu taşıyıcı üzerindeki kablosuz sensör ağlarının sinyal iletim sorunlarını çözmektedir. Çalışmanın sonucuna göre, bu sistemin araştırılması, lateritik nikel cevherinin nakliyesinin emniyet yönetimini destekleyebilir ve can ve mal güvenliğinin korunmasında aktif bir rol oynayabilir (Chu vd., 2013).

Roberts vd. (2013), kuru yük taşımacılığının son 30 yılda ne ölçüde daha güvenli hale geldiğini araştırmak ve son yıllarda dökme yük gemilerinin batma ve can kaybı riskleriyle ilişkili nakliye etkenlerini tespit etmek üzere Lloyd'un kaza kayıtlarını incelemişlerdir. Her ne kadar 1980'lerin başlarından bu yana dökme yük gemilerinin kayıplarında ve can kayıplarında zaman içerisinde azalmalar görülse de, 1990'ların başlarında ve ortasında bir ara zirveye ulaşmıştı. Bu artışlar kısmen nikel cevheri taşırken batan birkaç dökme yük gemisiyle ilgiliydi. Dikkate alınan 11 deniz kaza etkeni arasında bayrak devleti, yük, kazazedenin yeri, grostonaj ve hava durumu son yıllarda batma ve

mürettebat ölümlerinin en güçlü bağımsız belirleyicileri olduğu sonucuna varmışlardır (Roberts vd., 2013).

Lee vd. (2017) 55562 metrik tonluk yaz draftı ölü ağırlığına sahip bir Handymax dökme yük gemisinin sıvılaşma olayı için geliştirilen, alabora riskini azaltmak ve gemideki homojen istifleme yükünü alternatif yüklemeye yeniden dağıtarak stabilitesini geri kazanmak amacıyla geliştirilen bir müdahale planı ortaya koymak üzere bir çalışma yapmışlardır. Gemideki homojen yükleme planını uygun alternatif yüklemeye göre yeniden düzenleyerek bozulan stabilitesini stabil dengeye geri döndürmeye odaklanma amacına sahip müdahale planı, bir gemi stabilitesi ve yükleme yazılımı kullanılarak analiz edildi. Sonuçlar, sıvılaşma etkisine yanıt olarak alternatif yüklemenin daha iyi stabilite direncine sahip olduğunu doğrulamıştır (Lee vd., 2017).

Bigarre vd. (2018), Nikel cevherinin deniz taşımacılığında hidromekanik tepkisi ve sıvılaşma duyarlılığı ile ilgili deneysel çalışma yapmışlardır. Laboratuvardaki üç eksenli testlerden TNL testlerini kalibre ederken göz önünde bulundurulması gereken ve önemli bir parametre olan *döngüsel kayma oranını* (CSR) tespit etmeyi amaçlamışlardır. Uygun boyutlardaki bir dökme yük gemisi ile taşınan nikel cevheri yükünün içine gemi hareketine ve deniz koşullarına karşı dinamik gerilimleri gösteren çok parametrelili bir izleme sistemi yerleştirilerek testler gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, Yeni Kaledonya'dan Japonya'ya sefer yapan iki gemiye ait elde ettikleri gözlemleri ve sonuçları ayrıntılarıyla açıklamışlardır. Sonuç olarak, nemli katı yığın halindeki yükün deniz yoluyla taşınması sıvılaşma riski altındaki gerçekleşen bir süreç olduğunu ve sıvılaşma riskini yöneten temel fiziksel parametreler arasında katı kütleyle uygulanan döngüsel kayma oranının taşınabilir nem limitini belirlediğini belirtmişlerdir. Döngüsel Kayma Oranı (CSR), sayısal modellerle değerlendirilmesi zor olan dinamik bir etkileşim olmakla beraber esas olarak deniz seyri sırasında karşılaşılan deniz koşullarına ve geminin kendisine bağlıdır. Sağlam bir TNL testinin tasarımını verimli bir şekilde sınırlamak için CSR'nin güvenilir bir değerini ölçmek ve tespit etmek için yürütülen deneysel bir yaklaşımı tanımlanmıştır (Bigarre vd., 2018).

Antonia (2018) yaptığı tez çalışmasında, bir dizi deneye dayalı olarak nikel cevheri sıvılaşması olgusunu ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Nikel cevherinin taşınması sırasındaki davranışını ve sıvılaşma olayına yol açan nedenleri anlamak için, sıvılaşmanın nasıl oluştuğunu açıklayan olayın teorik bir açıklamasını yapmıştır. Bu olguya duyarlı malzemelerin daha yakından incelenmesi için granüler malzemelerin temel özelliklerine ilişkin bir bilgiler vermiştir. Çalışmada, sıvılaşmadan kaynaklanan en önemli kazalara

ilişkin referansların yanı sıra, dökme yük gemilerindeki sıvılaşmanın etkileri de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Daha sonra deney kısmında iki farklı nikel cevheri numunesi test edilmiş ve numunelerin davranışları gözlemlenmiştir. Nikel madeni yükü taşıyan bir gemi üzerinde yapılan deneyler ve stabilite analizleri neticesinde, nikel cevheri gibi yüklerde sıvılaşmanın nasıl ortaya çıktığı ve bu olgunun geminin stabilitesini nasıl etkilediği hakkında bilgiler elde edilmiştir. İki numuneyi karşılaştırabilmek için deneyler aynı (veya benzer) koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Malzeme aynı olsa da, numunelerin farklı yoğunluk ve kimyasal bileşimlerinin özdeş olmayan davranışlara yol açtığı sonucuna varılmıştır (Antonia, 2018).

Zhang vd. (2020), sıvılaşmış nikel cevherinin çalkalanmasını çözmek için çözücü olarak bilinen bir palatform aracılığı ile Newtonyen olmayan bünyesel denklemlere dayanan sayısal bir model kullanmışlardır. Doğrulamalar mevcut deneysel verilerle karşılaştırılarak gerçekleştirilmiş ve geminin dış tepkisi için doğrusal olmayan basitleştirilmiş bir gövde yüzeyi yöntemi önerilmiştir. Farklı dalga frekansları ve genlikleri dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Son olarak geminin alabora olma durumunun temel nedenleri elde edilerek çalışma sonuçlandırılmıştır (Zhang, 2020).

Deniz taşımacılığında katı yüklerin sıvılaşması konusunda yapılan temel literatür incelemeleri göz önüne alındığında, bunların çoğunluğunun yüklerin sıvılaşması, yüklerin veya cevherlerin nem içerikleri ile ilgili ve TNL'nin test prosedürlerini araştıran teknik makaleler olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında, sıvılaşma sonucu gemilerin alabora olarak batmasına ve büyük can kayıplarına neden olan nikel madeni yükünün sıvılaşması ile ilgili potansiyel nedenler ayrıntılı olarak analiz edilerek kapsamlı ve hibrit bir niceliksel risk analizi gerçekleştirilmektedir.

1.9.2. Bulanık Hata Ağacı (FFTA) ve Hata Türleri ve Etki Analizi (FMEA) İle İlgili Çalışmalar

Deniz emniyeti konusu denizcilik literatüründe en çok çalışılan konulardan biridir. Deniz taşımacılığında kabul edilebilir bir emniyet seviyesine ulaşılabilmesi için deniz taşımacılığının temel elemanları olarak kabul edilen insan unsurunun, yasal çerçevenin, teknolojik gelişmenin ve pratik yaklaşımların kullanımının birbiriyle tutarlı ve uyumlu olması gerekmektedir. Çevreci, maliyeti az ve sürdürülebilir deniz taşımacılığı düzeyine ulaşabilmek için, deniz emniyeti ve deniz güvenliğini azami derecede artırmak

gerekmektedir. Deniz emniyeti ve güvenliği namına yeni kanun, düzenleme ve kodlar uluslararası kuruluşlar tarafından yürürlüğe sokulsa da, deniz taşımacılığında emniyetin unsurunun arzu edilen düzeylere ulaşamadığı görülmektedir. Ayrıca, deniz kazalarının istatistiksel oranları, araştırılıp irdelenen kaza adedinin makul görülebilir bir seviyenin oldukça üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu sebeplerden dolayı, deniz taşımacılığı alanında çalışma yapan araştırmacılar deniz emniyeti ve güvenliğini arzu edilen düzeye çıkarmaya yönelik unsurlar üzerine çok sayıda çalışma yapmışlardır. Deniz kazalarının analiz edilmesi ve temel nedenlerinin tespit edilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda farklı metotlar uygulanmıştır. Ayrıca bu çalışmalar incelendiğinde birçok kaza türü üzerinde durulduğu gibi bazı özel operasyonel işlemler için de risk değerlendirme ve analizleri de yapılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde FTA ve FFTA yöntemleri ile yapılan çalışmalar irdelenmiştir.

Menteş ve Helvacıoğlu (2010) tarafından yapılan çalışmada çok noktalı tanker şamandıra sistemlerinin risk analizini gerçekleştirmek üzere FTA yöntemi kullanılarak riskler incelenmiştir. Çalışmada ortaya çıkan verilerle ayrıntılı risk analizinin yapılabilmesi ve hata ihtimallerinin belirlenebilmesi amacıyla bir yöntem önerilmiştir.

Lavasani ve vd. (2011), istenmeyen bir olaya sebebiyet veren temel nedenleri belirlemek, bu önemli olayların tepe olayına neden olan mantıksal ilişkisini göstermek ve son olarak meydana gelme olasılığını hesaplamak için Olasılıksal Risk Değerlendirmesi (PRA) yöntemi olarak FTA'yı kullanmışlardır. Kantitatif bir FTA için bir hata ağacının yanı sıra önemli olayların hata verilerinin de gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca temel olayların elde edilen başarısızlık verilerinde görülen hatalar nedeniyle genel çıktıların sorgulanabilir olduğunu ve bu gibi durumların önüne geçmek için FTA tekniği ile bulanık bir mantığın kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Bu, verilerin kendilerine özgü durumlarından kaynaklanan belirsizliği ve yanlışlığı azaltmaktadır. Geleneksel FTA yöntemi, sistemin olası arızasını ölçmek için tüm önemli olayların başarısızlığını içeren sağlam bir veri tabanına ihtiyaç duyar. Bunun aksine, açık deniz boru hattı endüstrisinde böyle bir veri tabanı mevcut değildir. Bu nedenle bu problemin çözümü için bulanık FTA yaklaşımı önerilmektedir. Bu çalışma aynı zamanda bir olgunun araştırılmasında duyarlılık analizinin kullanımını da göstermektedir (Lavasani vd., 2011).

Waghmode ve Patil (2013), torna tezgahında oluşabilecek hataları FTA ile incelemiştir. Çalışmanın amacı tasarım kriterlerini ve bakım tavsiyelerini belirlemektir (Waghmode ve Patil, 2013). Hossain vd. (2014) FTA ile Bangladeş'te iç su taşımacılığında

çatışma, karaya oturma ve temas türü kazaların nedenlerinin incelenmesine yönelik önerilerde bulunmuşlardır (Hossain vd ., 2014).

Uğurlu vd. (2015), 1998-2010 yılları arasında petrol tankeri gemilerinde meydana gelmiş olan karaya oturma ve çatışma kazalarını FTA yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. Kaza bilgilerini ve verilerini GISIS veri tabanından toplamışlardır. Çalışmada raporları incelenen 72 kazanın %46'sı çatışma, %26'sı karaya kazasıdır. Çalışma neticesinde; çatışma ve karaya oturma kazalarının sebepleri, kazaların meydana gelmesine neden olan risk faktörleri ve bu kazalarda insan hatasının rolü ortaya konarak kazaların önlenmesine yönelik önerilerde bulunulmuştur (Uğurlu vd., 2015).

Kılıç ve Sanal (2015) tarafından yapılan çalışmada, FTA yöntemi kullanılarak 2000-2011 yılları arasında Çanakkale Boğazı'nda meydana gelen 62 karaya oturma kazasının nedenleri incelenmiştir. Araştırmada karaya oturma kazalarının en sık rastlanan hatanın insan hataları olduğu ifade edilmiştir (Kılıç ve Sanal, 2015).

Kim vd. (2017), balıkçı teknelerinde meydana gelen kazaların nedenlerini FTA ile incelemiştir. Araştırmada vardiya sırasında dikkatsizlik ve ihmâl kökenli çatışma kazası olasılığı %64,9 olarak belirlenmiştir. Bu olasılık içerisinde insan hatası etkisinin medya ve yönetim unsurlarından daha az olduğu tespit edilmiştir. Kazaların önlenmesi ve en aza indirilmesi için sadece insan hatasının değil, medya ve yönetim unsurlarının da göz önünde bulundurulması gerektiği üzerinde durmuşlardır (Kim vd., 2017).

Lee vd. (2017) çalışmalarında LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) transfer sisteminin güvenilirliğini değerlendirmek, olası tehlikeleri tespit ederek önlem almak ve analiz etmek için FMEA (Arıza Modu ve Etki Analizi), HAZID (Tehlike Tanımlama), HAZOP (Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi) ve FTA yöntemlerini kullanmışlardır. Elde edilen çıktılar ile ayrıntılı emniyet değerlendirme örneği sunmuşlardır (Lee vd., 2017).

Li ve Chu (2018) tarafından yapılan çalışmada Bulanık FTA yöntemi ile Çin'de uygulanan Güneyden Kuzeye Su Yönlendirme Projesi'nin ana kanalındaki ani su kirliliği kazalarının sebepleri incelenerek analiz edilmiştir. Çalışmada ani su kirliliği kazasının olasılığı %0,0205 olarak elde edilmiştir. Kaza nedenlerinden su kalitesinin anlık bozulması, aşırı su kalitesi, suni zehirlenme ve terör saldırılarının en büyük etkiye sahip nedenler olduğu sonucuna varmışlardır (Li ve Chu, 2018).

Putra vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada gemi denetimleri ve bakım-tutum işlemlerinin amacına tam olarak ulaşabilmesi için Ro-Ro gemilerinin bakım ve denetim sonuçları Risk Temelli Denetim (RBI) yöntemi ile incelenmiştir. Ayrıca FMEA ve FTA

yöntemleri kullanılarak riskin sonuçlarına ulaşmışlardır. Çalışmada RBI yöntemi ile tüm elemanların %20'si incelenmiş ve geriye kalan %80'lik kısmın arıza riskini nasıl azaltabileceği üzerinde durulmuştur (Putra vd., 2018).

Aslan vd. (2018), tanker terminallerinde yükleme ve tahliye operasyonları esnasında gemilerde ortaya çıkan kazaları insan faktörü ve emniyet açısından incelemiştir. Çalışma için GISIS, MAIB ve ATSB gibi kuruluşların 2000-2014 yılları arasında yayınladığı kaza raporlarından yararlanılmıştır. Uygun bilgi ve verileri barındıran toplam 10 gemi kazası sınıflandırılarak sonuçlarına göre incelenmiştir. Kazanın kök nedenlerinin belirlenmesinde FTA yöntemi kullanılmış ve sonuçlar Monte Carlo Simülasyonu ile doğrulanmıştır. Sonuç olarak prosedüre uyulmaması ve bilgi eksikliğinin en önemli uygunsuzluklar olduğu tespit edilmiştir (Aslan vd ., 2018).

Cheliyan ve Bhattacharyya (2018) FTA yöntemini kullanarak bir deniz altı üretim sisteminde petrol ve gaz kaçağı ihtimallerini inceleyen bir analiz çalışması yapmışlardır. Sızıntıların başlatılabileceği dört ana alan dikkate alınarak bir hata ağacı meydana getirilmiştir. Bunlar şu şekilde sınıflandırılır; gaz ve petrol kuyuları, boru hatları, ana tesisler ve üçüncü taraf hasarları. Hata verileri belirgin olmadığından dolayı, ara ürünün hata olasılıklarını hesaplamak için uzman görüşleri ve bulanık küme teorilerini kullandıkları hata ağacı analizi yöntemini uygulamışlardır. Minimum kesme setleri (MCS) ve temel olayın (TE), ana nedenlere (BE) bağımlılığının belirlenmesine yardımcı olan ve dolayısıyla deniz altı üretim sisteminde gaz kaçağına neden olabilecek en zayıf halkaları tespit edebilen bir dizi önemli tedbir alınmıştır (Cheliyan ve Bhattacharyya, 2018).

Yıldırım ve Başar (2019) tarafından balıkçı teknelerinde görülen çatışma kazalarının nedenlerini sınıflandırmak için İnsan Faktörleri Analiz ve Sınıflandırma Sistemi (HFACS) yöntemiyle bir analiz çalışması yapılmıştır. Çalışmada ortaya çıkan sınıflandırmada ihlaller, karar hataları, Köprü Kaynak Yönetimi eksiklikleri, yönetim ihlalleri, uygun olmayan iş planlaması ve fiziksel çevrenin balıkçı teknelerinin karıştığı çatışma kazalarının en önemli nedenleri arasında olduğunu belirlemişlerdir (Yıldırım ve Başar, 2019).

Kuzu vd. (2019) gemi bağlama operasyonlarının risk analizini gerçekleştirmek için Fuzzy FTA kullanılarak bir deniz kazası incelemiştir. Çalışmada örnek bir risk geliştirerek risk kontrol alternatifleri önerilmiştir (Kuzu vd ., 2019). Fan vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise 2012-2017 yılları arasında meydana gelmiş olan deniz kazaları Bayes Ağı yöntemi kullanılarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada gemi operasyonu,

yolculuk bölümü, gemi tipi, gros tonaj, tekne tipi ve bilginin farklı kaza tipleri arasındaki ortak risk faktörleri olduğu belirtilmiştir (Fan vd., 2020).

Hosseini vd. (2020) doğal gaz sektöründeki yangın kazalarını FTA ve ETA ile incelemiştir. Çalışmada elde edilen verilerle işletmeye yönelik risk değerlendirmesi adına farklı bir uygulama yöntemi tavsiye edilmiştir (Hosseini vd., 2020).

Sarialioğlu vd. (2020) makine dairesinde meydana gelen kazaları İnsan Faktörleri Analizi ve Sınıflandırma Sistemi (HFACS) ve Bulanık Hata Ağacı Analizi'ni (FFTA) içeren hibrit bir yöntem kullanarak incelemiştir. Yangın ve patlama kazalarının 20 yaş üzeri gemilerde daha sık görüldüğü ve kazaların meydana gelmesinde mekanik arızaların etkili olduğu belirtilmektedir (Sarialioğlu vd., 2020).

Tunçel (2020) 2008-2018 yılları arasında dökme yük ve genel kargo gemilerinde meydana gelmiş olan karaya oturma ve çatışma kazalarını hata ağacı analizi (FTA) yöntemi ile incelemiştir. Çalışmasında, 48 çatışma ve 25 karaya oturma kazasının kök sebeplerini araştırmıştır. COLREG yorumlama hatasının çatışma kazalarında, köprüüstü kaynak yönetimi ile iletişim eksikliğinin ise karaya oturma kazalarında en önemli kök sebepler olduğu sonucunu elde etmiştir (Tunçel, 2020).

Wang vd. (2020) doğalgaz endüstrisindeki yangın kazalarını FTA ve ETA yöntemleri ile analiz etmeye çalışmışlardır. Çalışmadan elde edilen verilerle işletme namına yapılan risk değerlendirmesi için farklı bir uygulama yöntemi önermişlerdir (Wang vd., 2020).

Zhu vd. (2020) laboratuvarlarda ortaya çıkan patlama kazalarının nedenlerini FTA ve İkili Karar Diyagramı (BDD) yardımı ile incelemiştir. Çalışma sonucunda en önemli nedenlerin insan, makine, çevre ve yönetim faktörlerinin olduğu sonucuna varmışlardır (Zhu vd., 2020).

Zaib vd. (2022), kazaların meydana gelmesinde insan faktörlerinin katkısını sayısallaştırarak belirlemek ve bu kazaların deniz araçlarının ve çevrenin güvenliğini sağlamak için uygun önlemler alınarak ele alınmasını sağlamak amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, insan kaynaklı hatalar, nedenlerin hata olasılığının hesaplanmasına yardımcı olan bulanık hata ağacı analizi kullanılarak analiz etmişlerdir. 28 Mart 2020'de İskoçya'nın Skye Adası'ndaki Kyleakin İskelesi'nde meydana gelen Key Bora kimyasal tankerinin gerçek bir vakasını incelemiş ve analiz etmişlerdir. Analiz neticesinde; sahanın koşullarına ilişkin yanlış bilgi, farkındalık eksikliği, ekip çalışması

eksikliği ve baskı altında yanlış karar verme öne çıkan faktörler olduğu sonucuna varmışlardır (Zaib vd., 2022).

Gürgen vd. (2023), çalışmalarında, Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) kullanarak bir geminin dümen tutma yeteneğini kaybetmesinden kaynaklanan kazaların temel nedenlerini araştırmışlardır. Dümen motorunun hidrolik gücünün arızalanması, dümenin arızalanması ve dümen motorunun kontrolünün arızalanması geminin manevra kabiliyetini kaybetmesinin en yaygın üç nedeni olduğunu tespit etmişlerdir. Kesin olasılıkları elde etmenin zorluğu nedeniyle, her olayın gerçekleşme olasılıklarını belirlemek için uzmanların dilsel yargıları kullanarak sonuçları elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarına göre; "dümen motoru hidrolik güç arızasının" en yüksek meydana gelme olasılığına sahip iken bunu azalan sırayla "dümen arızası" ve "dümen motoru kontrol arızası" izlemektedir (Gürgen vd., 2023).

Çalışmanın bu bölümde FMEA ve Bulanık FMEA konularında gerçekleştirilmiş çalışmalar araştırılmıştır. Denizcilik sektöründe, gemi ve terminal operasyonlarında deniz sistemlerinin risk analizlerinin ortaya konmasında etkili analiz tekniklerinden biri olan FMEA, ulusal yönetmeliklerin yanı sıra uluslararası denizcilik yönetmelikleri ve operasyonlarında yer almakta ve uygulanmaktadır (Pillay ve Wang, 2002).

Araştırmacılar, ürünün ilk konsept tasarımı alanında çeşitli metodolojiler önermişlerdir. FMEA'nın çeşitli alanlardaki gelişimi ve uygulamaları konusunda farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar bu bölümde tartışılmaktadır:

Russomanno (1999), arıza modları ve etki analizi için kapsamlı bir uzman sistemin bir bileşeni olan bir simülasyon alt sistemi için bilgi organizasyonunu sunmuştur. Ortaya çıkan mimari, sistem davranışını uygulamak için belirli bir teknolojiye taahhütte bulunulmadan önce, bilgisayar destekli analiz ve tasarım araçlarının bir mühendislik sisteminin kavramsal tasarımına erken bir şekilde dâhil edilmesi yeteneğini sağlamıştır. Çalışma neticesinde Russomanno (1999) tarafından kavramsal tasarımlara dayanarak sistem hatalarının etkilerini açıklamak için kullanılacak bir sistem simülasyonu önerilmiştir (Russomanno, 1999).

Braglia vd. (2003) çalışmasında, hata modu etkileri ve kritiklik analizinde (FMECA) hataların önceliklendirilmesi için alternatif birçok özelliğe sahip karar verme yaklaşımı sunmuştur. Yaklaşım, "ideal çözüme benzerliğe göre sıralama tercihi tekniğinin" (TOPSIS) bulanık bir versiyonuna dayanmaktadır. Kesin değerlerin FMECA yönteminin üç parametresi (başarısızlık şansı, tespit edilememe şansı ve ciddiyet) açısından

değerlendirilmesinde karşılaşılan zorluklardan ortadan kaldırmaya imkân sağladığı için bulanık mantık teorisini kullanmıştır. Sıralamanın temel sorunu olan nihai bulanık kritiklik değerini elde etmek için, nihai sonucun hızlı ve etkili bir şekilde sıralanmasını sağlayacak özel bir sınıflandırma yöntemi önermiştir. (Braglia vd., 2003).

Musubeyli Erginel (2004) yaptığı çalışmada AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) ile mekanik termostatın parçalarını önceliklendirerek parçalara Tasarım FMEA analiz yöntemini uygulamıştır. Analiz sonucunda %35 oranında zaman ve işçilikten tasarruf sağlanabileceği sonucuna varmıştır (Musubeyli Erginel, 2004).

Aksu vd. (2006), bir gemideki iki sabit ve iki döner bölmeli üniteyle donatılmış birleşik dört bölmeli tahrik sistemine bir güvenilirlik değerlendirme uygulanmasına yönelik bir çalışma yapmışlardır. Değerlendirme uygulamasında FMEA, Hata Ağacı Analizi (FTA) ve Markov Analizi tamamlayıcı yöntemler olarak uygulanmıştır. FTA uygulamasında minimum kesim seti, güvenilirlik önem ölçüsü ve kullanılabilirlik analizleri de dikkate alınmıştır. Niceliksel güvenilirlik değerlendirmesinden her bir sabit ve döner ünitenin güvenilirliği, bileşenlerinin güvenilirliği ve birleştirilmiş dört bölmeli tahrik sisteminin güvenilirliği, tahrik sistemi üreticileri tarafından önerilen kabul edilebilir güvenilirlik şartlarıyla iyi bir uyum gösterdiği sonucuna varmışlardır (Aksu vd., 2006).

Eleren (2007) eğitim sistemini başarısızlığa sürükleyen nedenleri tespit etmek ve ortadan kaldırmak amacıyla yürüttüğü çalışmada FMEA yöntemini uygulamıştır. Verilerin FMEA yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda RÖS değerlerini belirlemiş, risklerin sıralamasını oluşturmuş ve tavsiye tedbirler belirlemiştir. Tedbirler alındıktan sonra FMEA uygulamasını tekrarlamış ve önceki sonuçlara göre risklerde %21,14 oranında azalma olduğu sonucunu elde etmiştir (Eleren, 2007).

Aran ve Çevik (2009) motor piston üretim sürecine karşılaşılan hataları analiz etmek için yaptıkları çalışmada FMEA yöntemini uygulamışlardır. Uygulama sonucunda 10 adet hata türü ortaya koymuş ve bu hataları RÖS değerine sıralamışlardır. Sıralamaya göre üç hatanın ön plana çıktığını tespit etmişlerdir. FMEA çalışması sonucunda alınan önlemler neticesinde ön plana çıkan 3 hatanın RÖS değerlerinde ortalama %47,4 iyileşme elde etmişlerdir (Aran ve Çevik, 2009). Ayrıca Hoseynabadi vd. (2010) de, özel bir yazılımı güvenilirlik analiz aracı kullanarak bir rüzgâr türbini (WT) sisteminin güvenilirliğini incelemek üzere Arıza Modları ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemini kullanmıştır. FMEA'nın niceliksel sonuçları ile gerçek rüzgâr türbini sistemlerinin

düzeneklerinden elde edilen güvenilirlik alanı verilerini karşılaştırmışlardır (Hoseynabadi vd., 2010).

Çeber (2010) yaptığı çalışmada deterjan üreten bir fabrikada üretim süreci için Süreç FMEA'yı uygulamış ve elde ettiği sonuçları değerlendirmiştir. Deterjan üretiminin en problemlili kısmı olan toz kısmını çalışmasında göz önünde bulundurmuş ve gerekli tedbirlerle iyileştirme sağlandığı sonucuna varmıştır. Sonuç değerleri neticesinde alınan tedbirler var olan ve olası hataları sıfıra indirememiş ancak FMEA ekibi tarafından eşik değer olarak kabul edilen değer altına indirmiştir. FMEA çalışması sonrasında iyileşme oranının %95 oranında olduğunu gözlemlemiştir (Çeber, 2010).

Bayar (2010) yaptığı çalışmada İstanbul Boğazında Gemi Trafik Hizmetleri (GTH) kurulmadan önce ve kurulduktan sonra meydana gelen gemi kazalarını FMEA ve Bulanık AHP (Analitik Hiyerarşi Yöntemi) risk değerlendirme yöntemlerini kullanarak değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda, GTH faaliyete geçtikten sonra yaşanan çatışma ve karaya oturma kazalarında düşüş yaşandığı sonucuna ulaşmıştır. Bayar'ın çalışmasında GTH risk önleyici faaliyet olarak yer almaktadır (Bayar, 2010).

Demirer ve Kahraman (2010) yaptıkları çalışmada iş sağlığı ve güvenliği açısından bir otomobil fabrikasında FMEA yöntemini uygulamışlardır. İş makineleri atölyesinde bulunan forklift ve vidanjörleri değerlendirerek bu iş makineleri ile ilgili 36 risk belirlemişlerdir. Hesaplamalar sonucunda, RÖS değeri 80'in üzerinde olan risklere yönelik önlemler geliştirilmiş olup, süreç başında 112,07 olan RÖS ortalaması, iyileşme sonrasında 51,72'ye düşürülmüştür (Demirer ve Kahraman, 2010).

Kahrobaee vd. (2011), derecelendirme ölçekleri yerine başarısızlık olasılıkları ve oluşan başarısızlık maliyetlerini temel alan Risk Tabanlı FMEA adı verilen niceliksel bir yaklaşım sunmuşlardır. Bir vaka çalışması olarak, bu yaklaşım doğrudan tahrikli bir rüzgâr türbinine uygulanmıştır. Sonuçlar, rüzgâr türbininin toplam arıza maliyetine katkılarına dayalı arıza modları önceliklerinin tanımının, ortak FMEA yaklaşımından daha gerçekçi ve pratik olduğunu göstermektedir. MS Excel elektronik tablo platformu kullanılarak önerilen yöntem farklı rüzgâr türbini türleri için genelleştirilebilir. Ek olarak, rüzgâr türbini sahibinin toplam arıza maliyetini azaltmak için uygun yaklaşımı belirleyebileceği duyarlılık analizi yoluyla etkili hata maliyet etkenleri araştırılmaktadır (Kahrobaee vd., 2011).

Chun-Bo Liu vd. (2013), uçakların yakıt deposu sistemlerinde yaşanan yangınların büyük kazalar nedeniyle uçak emniyetini tehdit eden önemli bir faktör olduğunu göstermek

üzere bir çalışma yapmışlardır. Arıza türü ve etki analizi (FMEA) ve hata ağacı analizi (FTA) ile farklı türdeki yakıt tankı sistemleri için yangın felaketinin nedeni ve yakıt tankı sistemi yangın önleminin temel faktörleri analiz etmişlerdir (Chun-Bo Liu vd., 2013).

Sayareh ve Ahouei (2013) tarafından dökme yük terminalinde yapılan yük elleçleme faaliyetlerine ilişkin FMEA uygulaması yapılmıştır. Yük elleçleme operasyonlarının gecikmelerini azaltarak bir dökme yük terminallerinin verimliliğini ve üretkenliğini artırmayı amaçlamışlayan tavsiyelerde bulunmuşlardır (Sayareh ve Ahouei, 2013).

Yörükoğlu (2014) çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarından meydana gelebilecek risklerin tespiti için, FMEA ve Bulanık FMEA tekniklerini kullanarak risklerin giderilmesi veya iyileştirilmesi amacıyla risk analizleri gerçekleştirmiştir. Enerji santrallerinin RÖS değerlerini hesaplayarak risk tablosu elde etmiştir. Elde ettiği risk tablosuna göre, çalışmada ele aldığı 3 tip enerji santralini her iki tekniği kullanarak elde edilen sonuçlar kapsamında değerlendirmiş ve oluşturdukları riskler açısından karşılaştırmıştır. Risk öncelik değerlerini MATLAB programı kullanarak tespit etmiştir (Yörükoğlu, 2014).

Sofyaloğlu ve Gülçiçek (2014) çalışmalarında, QFD (Kalite Fonksiyon Yayılımı) sürecindeki belirsizlik problemine çözüm sunabilmek amacıyla bulanık mantık yaklaşımından yararlanmışlardır. FMEA'nın risk faktör ağırlık değerlerini göz ardı etmesi problemini ortadan kaldırmak için de Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi'ni (Bulanık AHP) FMEA sürecine dâhil ederek Liou-Wang Sıralama Yöntemi ile bütünleştirmiştir. QFD ile FMEA'nın birlikte kullanılması ile iyileştirme faaliyetlerine RÖS değeri yüksek olan risklere sebebiyet verecek teknik özelliklerden başlamanın önemini ortaya koymuşlardır (Sofyaloğlu ve Gülçiçek, 2014).

Özfirat (2014) çalışmasında FMEA ve bulanık mantık yöntemlerini kullanarak risk analizi yapmıştır. Belirlenen risklerin değerlendirilmesi sonucu risk önem katsayıları elde edildi. Dünyada en tehlikeli ve riskli sektörlerden biri olarak kabul gören madencilik sektöründe gerçekleştirilen bu uygulama ile elde edilen sonuçlar ışığında gaz ve toz patlaması, zehirlenme, çökme ve yangın risklerine karşı proaktif ve reaktif önlemlerin alınması kararına varıldı. Alınan önlemler sonrasında tüm risklerin RÖS değerlerinin kabul edilebilir makul düzeylere düştüğü tespit edilmiştir (Özfirat, 2014).

Çakmak (2015), uyguladığı Bulanık FMEA yöntemi ile demir çelik haddeleme süreçlerinde ortaya çıkabilecek risklerin önlenmesini amaçlamıştır. Klasik FMEA'ya göre daha yüksek olan risk öncelik değerlerinin, bulanık giriş değerlerinden dolayı Bulanık

FMEA'da daha düşük, düşük değerlerin ise daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, bulanık mantığın FMEA yöntemi ile birlikte uygulandığında risk değerlendirme durumlarında karşılaşılabilecek olumsuz durumların önlenmesinde daha etkili sonuçlar veren bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (Çakmak, 2015).

Leveson (1997) hazırlamış olduğu raporda Hava Trafik Hizmetleri sisteminde yükseltme amaçlı FMEA yöntemi uygulaması yapılmış ve iyileştirmeler kaydedilmiştir (Leveson, 1997). Benzer bir çalışma da Li vd. (2017) tarafından Hava Trafik kontrolleri üzerine yapılmıştır, hava trafik kontrolleri otomasyon sisteminin performansını etkileyen hata türlerinin sayısal değerlendirmesi yapılarak, birtakım algoritmalar önerilmiştir (Li vd, 2017).

Turan (2018) tez çalışmasında; bulanık FMEA yöntemi yoluyla risk ve risk analizi kavramlarını incelemiştir. Uygulama çalışmasında Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri A.Ş.'nin ürün gruplarından biri olan güç transformatörlerinin tasarım ve üretim süreçlerindeki riskleri incelemiştir. Şirketin kazanç değerinin büyük bir kısmını oluşturan ürünleri analiz ederek potansiyel riskleri belirlemiştir. Tespit ettiği riskleri önceliklendirmek için bulanık hata türü ve etki analizi (Bulanık FMEA) yöntemin kullanmıştır. Yaptığı çalışmayla FMEA yönteminin bulanık mantıkla uygulandığında klasik FMEA'ya göre risk değerlendirmede daha etkili sonuçlar veren bir yöntem olduğu sonucuna varmıştır. Bulanık FMEA yönteminin, transformatör tasarımı ve üretim süreçlerinde oluşabilecek risklerin en aza indirilmesinde etkin bir değerlendirme yöntemi sunarak faydalı olacağını ifade etmiştir (Turan, 2018).

Göksu (2021) tez çalışmasında gemi operasyonlarında riskleri artıran dinamik faktörleri belirlemiş ve operasyondaki hangi değişkenlerin hangi riskleri ne ölçüde artırdığını niceliksel olarak incelemek amacıyla deneyimli denizciler üzerinde bir araştırma yapmıştır. Dinamik risk faktörlerinin sebep olacağı potansiyel hata türleri uzman bir ekip tarafından belirlendi. Dinamik risk faktörlerini analiz etmek için Arıza Modları ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemini kullandı. Çalışma sonucunda elde edilen FRPN değerlerine göre dinamik risklerden kaynaklanabilecek olası hatalardan hangisinin operasyon süreci açısından daha kritik olduğu hesaplanmıştır. Geminin emniyetini etkileyen olası risklerin kontrol altına alınması, proaktif bir yaklaşımla risklerin etkilerinin azaltılması veya ortadan kaldırılması için kontrol tedbirleri belirlenmiştir (Göksu, 2021).

Bao vd. (2022) çalışmalarında, insansız gemilerin risk değerlendirmesi için mevcut olan geçmiş olay verilerinin eksikliğini telafi etmek amacıyla, potansiyel arızaları analiz

etmek üzere arıza modu ve etkileri analizi (FMEA) tekniğini benimsemiş ve uzman deneyimlerine dayanarak potansiyel arızaları olasılıklarına göre sıralamışlardır. Değerlendirmenin nasıl yürütüldüğünü açıklamak amacıyla otomatik bağlama sistemi için 19 arıza modu seçmişlerdir. Geliştirdikleri model yüksek düzeyde risk içeren arıza türlerini etkili bir şekilde tarayabildiğini göstermişlerdir. Bu çalışma aynı zamanda risk kontrol seçeneklerini (RCO'lar) sunmakta ve insansız yük gemilerinin risk değerlendirmesine yeni ve pratik bir yaklaşım sunmaktadır (Bao vd., 2022).

Gündoğdu (2022) tez çalışmasında, Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA) tekniklerini uygulayarak İstanbul Gemi Trafik Hizmetleri Merkezi'nin günlük işletim süreçlerine ilişkin bir risk değerlendirmesi yapmıştır. Tespit edilen potansiyel hatalar risk puanlarına göre sınıflandırılmış, öncelik sırasına göre tüm hata türleri için önlemler alınarak risk değerleri azaltılmıştır. Uygulama sonucunda risk öncelik seviyesi değerlerine göre %66,8 iyileşme sağlanmıştır (Gündoğdu, 2022).

Bacıoğlu (2022) ise çalışmasında gemiler için hayati öneme sahip olan kompresör sistemlerinin detaylı bir risk analizi yapmıştır. Risk analizi çalışması için, özellikle makine kaynaklı risklerin belirlenmesinde son derece kapsamlı bir metot olan Hata Türleri ve Etkileri Analiz (FMEA) kullanılmıştır. Yapılan analiz ile kompresöre ait her bir hata modu tespit edilmiş, kodlanarak her birinin neden ve sonucu saptanmıştır. Elde edilen girdi değerleri yardımıyla kompresöre ait Risk Öncelik Seviyesi (RÖS) değerleri hesaplanmıştır. Risklerin saptanmasından sonra, yüksek riskteki maddelere karşı önleyici faaliyetler planlanmıştır. Yapılan çalışma ile, gemi kompresör sisteminin riskleri tespit edilmiş, sıralanmış ve karşı tedbirler önerilmiştir. Böylece denizcilik paydaşlarına, kompresörlerde meydana gelebilecek riskler belirlenmiştir. Farkındalık oluşturulması amacıyla bu risklerden dolayı meydana gelebilecek hata etkileri belirtilmiş ve sunulmuştur (Bacıoğlu, 2022).

1.10. Yöntem

Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO 31000 – Risk yönetimi) (2009), ekonomik performans ve mesleki itibar açısından sonuçları olan riskleri özetlemektedir. Ancak çevresel konular, eminyet ve sosyal hususlar da dikkate alınmalıdır (ISO, 2009) . Literatürde süreç veya operasyon risklerinin tahmin edilmesine, önlenmesine ve azaltılmasına yönelik risk analizi yöntemleri bulunmaktadır. Niteliksel analiz için Arıza Modları ve Etkileri Analizi (FMEA), fonksiyonel etki analizi ve Tehlike ve İşletilebilirlik (HAZOP) çalışmaları gibi geleneksel risk analizi yöntemlerinin çoğundan yararlanılmaktadır. Tipik olarak, bu tür yöntemler genellikle bir FTA için geri bildirim hazırlama aşaması için kullanılır (Lee vd., 1985). FTA, arzu edilmeyen olayların potansiyel temel sebepleri ve meydana gelme ihtimallerini tespit etmek için esnek ve uygun bir risk değerlendirme metodudur. Hatta komplike ve belirsiz bir sistemin güvenliğini, performansını, sürdürülebilirliğini ve güvenilirliğini hem niteliksel hem de niceliksel olarak tahmin etmek için sistemli bir çözüm yoludur (Goodman, 1988; Wang vd., 2013; Kuzu vd., 2015; Senol vd., 2015). Bu manada FTA, deniz yolu, demiryolu, kara yolu, hava yolu taşımacılık sektörleri, endüstri, nükleer enerji, madencilik, tünel açma, uzay teknolojisi ve bilgisayar bilimleri gibi birçok alanda, bir sistemin muhtemel hatalarını belirleyen ve iyileştirmeler tavsiye eden, sistemin zayıf yönlerini belirleyen ve davranışını tahmin edebilen, kolay uygulanabilirliği olan ve grafiksel gösterimi nedeniyle sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Hyun vd., 2015; Kum ve Şahin, 2015; Senol ve Şahin, 2016; Ünver vd., 2019; Jung vd., 2020; Purba vd., 2020) .

1.10.1. Hata Ağacı Analiz Yöntemi

Hata Ağacı Analizi yöntemi (Fault Tree Analysis-FTA) Risk analizinde ve hataların kök sebeplerinin tespit edilmesinde en fazla kullanılan yöntemlerden biridir.

FTA, arzu edilmeyen bir olay veya durumun temel sebeplerinin tanımlanarak dallanmış bir ağaç şeklinde ifade edilmesidir. FTA ile tehlike oluşturabilecek tüm nedenler tespit edilir. Bu yöntemde ana olayın tüm alt nedenleri ortaya konarak risk içeren hataların en aza indirilmesi veya önlenmesi amaçlanır. 1960'lı yıllardan bu yana güvenlik ve emniyet analizinde kullanılan en önemli yöntemlerin başında geldiği söylenebilir. Ayrıca

karmaşık sistemlerin analizinde de kullanılabilen çok etkili bir analiz yöntemidir (Lee vd., 1985; Ringdahl, 2001; Özkılıç, 2005; Kim vd., 2020).

FTA yöntemi temel manada sistemin analizi, hata ağacının oluşturulması ve hata ağacının incelenerek değerlendirilmesi olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilir.

Hata ağacı oluşturulurken ve analiz yapılırken aşağıdaki adımlar izlenir (Özkılıç, 2005):

- Analizi yapılacak sistem, olay ya da durumların işlem bölümleri tespit edilir.
- Tespit edilen işlem bölümlerini teşkil eden kısımlar belirlenir.
- İşlem bölümleri ve kısımları ile ilgili tehlike, hata ve arızalar tanımlanır.
- Tanımlanan hata, arıza ya da tehlikelerin potansiyel bütün sebepleri ortaya çıkarılır. Bu adım en temel sebeplere (kök nedenlere) ulaşmaya kadar devam eder.
- Her bir temel neden için olasılık değerleri hesaplanır. Bu adımda uzman veya uzman gruplarının görüşlerinden, incelenen sistemin hata kayıtları veya kaza raporlarından ve diğer kök nedene ulaştıran kaynaklardan faydalanılır.
- Toplanan tüm bilgi ve veriler kaydedildikten sonra hata ağacında kullanılan semboller göz önünde bulundurularak hata ağacı meydana getirilir.
- Oluşan hata ağacında kullanılan sembollerin anlamlarına göre matematiksel hesaplamalar yapılarak Hata Ağacı Analizi yapılır. Bu adımdaki hesaplamaların yapılması ve ulaşılmak istenen değerlerin elde edilmesi için genel olarak bilgisayar yazılım ve programları kullanılır.

FTA yönteminde semboller kullanılarak ağaç oluşturulmaktadır. FTA'da kullanılan temel semboller Tablo 5'te verilmiştir.

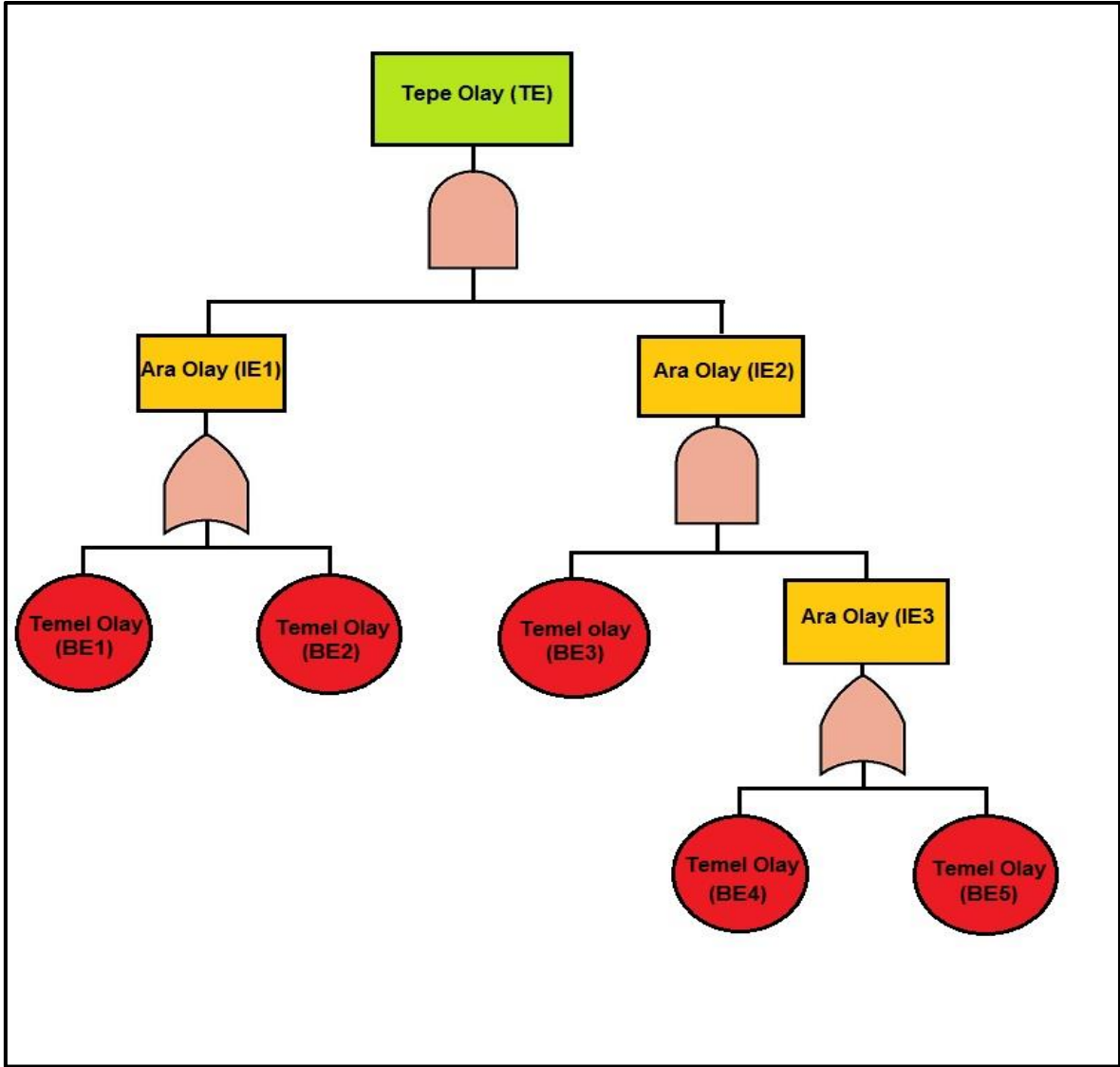
Tablo 5. FTA’da kullanılan temel semboller

Sembol	İşaret edilen	İşlev
	Temel olay	Temel olay / hata
	Olay	Daha temel olaylardan oluşan olay
	VE kapısı	Çıktı olayının, bu kapının altında bulunan tüm girdi olaylarının aynı anda meydana gelmesinden oluştuğunu gösterir.
	VEYA kapısı	Çıktı olayının, herhangi bir girdi olayı meydana getirdiğini gösterir.
	Transfer sembolü	Ağacın başka bir yerde daha ileri noktaya geliştiğini gösterir.

FTA ile analiz yapılırken niceliksel (kantitatif) değerler ya da niteliksel (kalitatif) ifadeler kullanılabilir.

Kantitatif Analiz: Hata ağacında sıralanan sebeplerin ve alt sebeplerin nicel olarak tespit edilerek incelenmesidir. FTA’da her bir neden ve alt nedenler hem gerçekte hem de uygulamada kullanılabilir olmalıdır. FTA’da kullanılan kantitatif analizle elde edilen olasılık değerleri ile nedenler ve üst olaylar arasında bağ kurulmaktadır. Bu bağ ile üst olayın ortaya çıkma olasılığı nicel olarak hesaplanmaktadır (Uğurlu, 2011; Aslan, 2022).

Kalitatif Analiz: Hata ağacında sıralanan sebeplerin ve alt sebeplerin niteliksel açıdan incelenmesidir. FTA’da, kantitatif analiz ile yapılan hesaplamalar sonucunda ulaşılan verilerin yorumlanarak üst olayı oluşturan nedenler arasındaki bağ kurulması kalitatif analiz ile açıklanmaktadır (Uğurlu, 2011; Aslan, 2022).



Şekil 26. Örnek hata ağacı yapısı

Oluşma olasılığı incelenen ana neden tepe ya da üst olay olarak tanımlanır. Üst olayın oluşmasını etkileyen ve alt nedenlere ayrılamayan olaylara ise ana/temel olay denir (Şekil 26). FTA yapısında bulunan kapılardan biri olan "ve" kapısı, altındaki olayların bir arada meydana gelmesi durumunda olayın gerçekleşeceğini belirtir. "Veya" kapısında ise altta yatan sebeplerden herhangi birinin meydana gelmesi, olayın gerçekleşmesi için yeterlidir. Kesme seti, en düşük (minimum) kesme seti ve yol seti terimleri FTA uygulamasında sonuçların yorumlanmasında yardımcı olarak kullanılan terimlerdir. Bir kesme seti kümesi, hepsinin gerçekleşmesi durumunda üst olayın meydana geleceğini bildiren herhangi bir hata ağacı kümesini ifade eder. Minimum kesme seti (MCS), hepsinin gerçekleşmesi durumunda ana olayın meydana geleceğini belirten en küçük hata ağacı

grubunu ifade eder. Yol seti hata ağacını başlatan grup olarak ifade edilir. Bu gruptaki nedenler meydana gelmezse üst olay oluşmaz. Hata ağacının indirgenmesi, minimum kesme kümelerinin kolayca tespit edilmesi, daha iyi bir analiz ve değerlendirme yapabilmek amacıyla George Boole (1847) tarafından geliştirilmiş olan Boolean matematiği kullanılmaktadır (Özkılıç, 2005).

Genel hata ağacı bir Top Event (TE) ile başlar ve nedenlerin ortaya çıkışı kademeli olarak dallara ayrılır. Analiz, bir sınır koşuluna veya temel nedenlere ulaşıncaya kadar sürdürülür. Temel bir neden veya olay, daha fazlasının geliştirilmesi gerekmeyen durumlarda daire ile sembolize edilir. Mevcut veri eksikliği nedeniyle bir olay geliştirilemiyorsa, Geliştirilmemiş Olay (UE) adı verilen baklava şekli ile sembolize edilir. Üçgen şekli, ağacın bazı dal/dallarını başka bir yerleşim yerine aktarmak amacıyla kullanılır (Stapelberg, 2009) .

FT şemalarında operatörler olarak çoğunlukla "VEYA" ve "VE" kapıları kullanılır. VE kapısının çıkışı herhangi bir giriş olayının meydana gelmesine bağlıdır. Bu, VE geçidinin kümeler içeren tüm giriş olaylarının kesişimi olduğu anlamına gelir. Giriş olaylarından herhangi biri VEYA kapısının çıktısını doğrudan etkiler. VEYA kapısının kümeler içeren tüm giriş olaylarının birleşim kümesi olduğu anlamına gelir.

Başarılı bir FTA aşağıdaki beş ana kurala dayanmalıdır (Ericson ve Li, 1999) ;

- TE, limit şartlarıyla birlikte kritik kırılmayı temsil etmelidir.
- Tekrarlanan olaylar ve dallar sistemin karmaşık yapısını artırır
- Olaylar arasındaki ilişkilerin neden-sonuç ilkesine dayandığı hata ağacı yapısının oluşturulması gerekir.
- Geçerli ve doğru olduklarından emin olmak için kesim setlerinin ve yol kümelerinin kontrol edilmesi gerekir
- Ağacın daha da genişletilmesinin sağlanması gerekir

1.10.1.1. Mantık Kapılarının Gösterimi ve Niceliği

TE'nin olasılığı t zamanında $Q_0(t)$, BE'nin olasılığı (E_i) ise t zamanında $q_i(t)$ olsun. $Q_0(t)$, minimum kesme setinin (MCS) (J) t zamanında başarısız olma olasılığını temsil eder.

BE'nin (E_i), t zamanında meydana geldiğini varsayalım.

VE Kapısı

$$i = 1, 2 \text{ için } q_i(t) = P(E_i(t)) \quad (1)$$

TE $Q_0(t)$ olasılığı;

$$Q_0(t) = P(E_1(t) \cap E_2(t)) = P(E_1(t) \cdot E_2(t)) = q_1(t) \cdot q_2(t) \quad (2)$$

n olaylı tek bir VE kapısı varsa;

$$Q_0(t) = \prod_{j=1}^n q_j(t) \quad (3)$$

VEYA Kapısı

$$i = 1, 2 \text{ için } q_i(t) = P(E_i(t))$$

TE $Q_0(t)$ olasılığı;

$$\begin{aligned} Q_0(t) &= P(E_1(t) \cup E_2(t)) = P(E_1(t)) + P(E_2(t)) - P(E_1(t) \cap E_2(t)) \\ &= q_1(t) + q_2(t) - q_1(t) \cdot q_2(t) = 1 - (1 - q_1(t)) \cdot (1 - q_2(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

n olaylı tek bir VE kapısı varsa;

$$Q_0(t) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - q_j(t)) \quad (5)$$

1.10.1.2. Kesim Setlerinin Değerlendirilmesi

Tüm l BE'ler aynı anda başarısız olursa MCS başarısız olur. Kesim setinin (J) t zamanında başarısız olma olasılığı,

$$\phi_j(t) = \prod_{i=1}^n q_{j,i}(t) \quad (6)$$

1.10.1.3. Tepe Olay (TE) Olasılığı

MCS'ler TE'ye bir VEYA kapısı ile bağlanır. Bu nedenle MCS'lerden en az biri hata verdiğinde TE meydana gelir. TE olasılığı:

$$Q_0(t) \leq 1 - \prod_{j=1}^k (1 - \phi_j(t)) \quad (7)$$

1.10.2. Bulanık Hata Ağacı Analiz Yöntemi

Bulanık FTA (FFTA), bulanık kümeler içeren genişletilmiş bir FTA biçimidir. FFATA, temel nedenlerin olasılıklarının belirlenmediği veya önceden toplanmadığı durumlarda kullanılır. Çevrimiçi veya yüz yüze görüşmeler veya anketler yoluyla karar verici uzmanlardan temel olayların (BE'ler) hata olasılıklarını değerlendirmeleri istenir ve uzmanlar da önceden tanımlanmış dilsel ifadeler yardımıyla inandıkları düşüncelerini beyan ederler. Karar verici grubun beyanlarından elde edilen kararlar daha sonra toplanır, analiz edilerek sayısal çıktı değerlerine dönüştürülür. FFATA süreci aşağıdaki adımlardan oluşur (Lavasani vd., 2015; Senol vd., 2015; Şahin, 2017; Kuzu vd., 2019) :

1.10.2.1. Adım 1. Toplama Aşaması

Belirli bir konuya ilişkin uzman görüşlerinin, uzmanların bilgi ve tecrübelerine bağlı olarak birbirinden farklı olması beklenebilir $E_k (k = 1, 2, \dots, M)$. Ford ve Sterman'a (1998) göre uzmanların yargıları, kendi bakış açılarından, düşünce yapılarından ve amaçlarından etkilenmektedir. Sorun, tüm uzmanların aynı yeterlilik, tecrübe, eğitim ve ilgi alanında olduğu homojen bir karar verici grup mu, yoksa uzmanların farklı özelliklerde olduğu heterojen bir karar verici grup mu olduğunu belirlemektir. Bu çalışmada akademisyenler, şirket operasyon yöneticileri, şirket güverte enspektörleri, kaptanlar ve 1.Zabitlerden oluşan heterojen bir uzman grubu oluşturulmuştur. Bir diğer konu ise uzman görüşlerinin sistematik bir teknikle bir araya getirilmesidir. Bu amaçla Hsu ve Chen (1996) tarafından önerilen benzerlik toplama yöntemi (SAM) kullanılmıştır (Hsu ve Chen, 1996). Her bir temel olaya (BE) ilişkin uzmanların değerlendirmelerinin toplanmasına yönelik SAM adımları aşağıda açıklanmaktadır.

Benzerlik derecesi ($S_{uv}(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) \in [0, 1]$) ile hesaplanır; burada S, iki yamuk bulanık sayıyı temsil eder iken, $\tilde{R}_u = (r_{u1}, r_{u2}, r_{u3}, r_{u4})$ ve $\tilde{R}_v = (r_{v1}, r_{v2}, r_{v3}, r_{v4})$ ile gösterilen semboller ise uzmanların görüşleri için benzerlik derecesini temsil eder. İki uzmanın görüşleri arasındaki benzerlik derecesi şu şekilde hesaplanır:

$$S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) = 1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |r_{ui} - r_{vi}| \quad (8)$$

Uzmanlar için ortalama anlaşma derecesini $AA(E_u)$, aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$AA(E_u) = \frac{1}{N-1} \sum_{\substack{u \neq v \\ v=1}}^N S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) \quad (9)$$

Burada N toplam uzman sayısıdır ve $E_u (u = 1, 2, \dots, N)$, dir.

Uzmanlar için göreceli anlaşma derecesi aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$RA(E_u) = \frac{AA(E_u)}{\sum_{u=1}^N AA(E_u)} \quad (10)$$

Uzmanların fikir birliği katsayısını $CC(E_u)$, aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$CC(E_u) = \beta \cdot w(E_u) + (1 - \beta) \cdot RA(E_u) \quad (11)$$

Burada $(0 \leq \beta \leq 1)$ ve β moderatör tarafından belirlenen esneklik faktörüdür ve $w(E_u)$, $RA(E_u)$ üzerindeki önem derecesini ifade eder. Eğer $\beta = 0$ ise uzmanların ağırlıklandırılması ihmal edilir. Eğer $\beta = 1$ ise, uzlaşım katsayısı derecesi ve uzmanın ağırlığı eşittir. Doğru sonuçları elde etmek için uygun β değer ataması önemlidir.

Toplulaştırılmış uzmanların görüşleri \tilde{R}_{AG} şu şekilde hesaplanır:

$$\tilde{R}_{AG} = CC(E_1) \times \tilde{R}_1 + CC(E_2) \times \tilde{R}_2 + \dots + CC(E_M) \times \tilde{R}_M \quad (12)$$

1.10.2.2. Adım 2. Durulaştırma Aşaması

Durulaştırma işlemi bulanık ortamda ölçülebilir sonuçlar elde edilmesini sağlayan bir işlemdir. Bulanık sorunlara karar verme sürecinde bulanık sayıların durulaştırılması çok önemlidir. Bu çalışmada durulaştırma işlemi için en sık kullanılan yöntemlerden biri olan alan merkezi yöntemi kullanılmış olup, bu yöntem şu şekilde ifade edilmektedir:

$$X^* = \frac{\int \mu_i(x) x dx}{\mu_i(x)} \quad (13)$$

Burada X^* durulaştırılmış çıktı, $\mu_i(x)$ toplu üyelik fonksiyonu ve x çıktı değişkenidir.

$$X^* = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \frac{x-r}{r_2-r_1} xdx + \int_{r_2}^{r_3} xdx + \int_{r_3}^{r_4} \frac{r_4-x}{r_4-r_3} xdx}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{x-r_1}{r_2-r_1} dx + \int_{r_2}^{r_3} xdx + \int_{r_3}^{r_4} \frac{r_4-x}{r_4-r_3} dx} = \frac{1}{3} \frac{(r_4+r_3)^2 - r_4r_3 - (r_1+r_2)^2 + r_1r_2}{r_4+r_3-r_2-r_1} \quad (14)$$

1.10.2.3. Adım 3. Kesin Hata Olasılığının Hata Olasılığına Dönüştürülmesi

Bu aşama, kesin hata olasılığının (CFP) hata olasılığına (FP) dönüştürülmesi aşamasıdır (Onisawa, 1988, 1990, 1996; Onisawa ve Nishiwaki, 1988).

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^K}, & CFP \neq 0 \\ 0, & CFP = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Burada,

$$K = \left[\left(\frac{1-CFP}{CFP} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (16)$$

1.10.2.4. Adım 4. Minimum Kesim Setlerine (MCS) Dayalı Tepe Olay (TE) Olasılığının Hesaplanması

Bir MCS, TE oluşumuna yol açabilecek BE'lerin minimum kombinasyonudur. Başka bir deyişle, bir MCS kombinasyonunda, hatayı temsil eden herhangi bir BE oluşmazsa TE oluşmayacaktır. Her hata ağacının benzersiz ve sınırlı sayıda MCS'si vardır. TE olasılığı

$P(TE)$ şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}
P(TE) &= P(MCS_1 \cup MCS_2 \cup \dots \cup MCS_N) = P(MCS_1) + P(MCS_2) \\
&+ \dots + P(MCS_N) - (P(MCS_1 \cap MCS_2) + (P(MCS_1 \cap MCS_3) \\
&+ \dots + (P(MCS_i \cap MCS_j) \dots) \dots \\
&+ (-1)^{N-1} P(MCS_1 \cap MCS_2 \cap \dots \cap MCS_N)
\end{aligned} \tag{17}$$

Burada MCS_i oluşma olasılığı ve N MCS'nin sayısıdır.

1.10.2.5. Adım 5. Minimum Kesim Setlerinin (MCS) Sıralanması

FTA'nın en öne çıkan çıktularından biri, MCS'leri katkı derecelerine göre sıralayarak TE olasılığının duyarlılığını ortaya koymaya olanak tanıyan önem ölçüsüdür. Bu çalışmada duyarlılık analizi için Fussell-Vesely Önem Ölçeği (F-VIM) kullanılmıştır. F-VIM aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır (Modarres, 2006):

$$I_i^{FV}(t) = \frac{Q_i(t)}{Q_s(t)} \tag{18}$$

Burada $Q_i(t)$ MCS'nin olasılığı, $Q_s(t)$ ise TE olasılığıdır.

1.10.3. Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA)

FMEA yöntemi ilk olarak havacılık endüstrisi tarafından 1960'lı yıllarda geliştirilmiş, muhtemel veya mevcut arıza türlerinin sistem performansı üzerindeki etkilerinin anlaşılıp açıklanabilmesi için geliştirilmiş sistematik bir analiz yöntemidir (Liu vd., 2013). Bir sistem içerisinde veya operasyon sürecinde, sürecin nerede ve nasıl başarısız olabileceğini tahmin ve tespit etmeye, buna bağlı olarak da farklı hataların ne tür etkiler oluşturabileceğini açıklamaya çalışan FMEA yöntemi aynı zamanda proaktif bir yaklaşım sunabilme konusunda da oldukça başarılı bir yöntemdir (Chen ve Deng, 2018).

FMEA yardımıyla, bir sistemde en fazla bakım ve onarıma ihtiyaç duyan kısım ve bölümlerin belirlenmesi kolaylaşır. Böylece, ciddi ve tehlikeli problemler için düzeltici önlemlerin alınması ve aksiyonların gerçekleştirilmesi mümkün olur. Özünde kalitatif bir yöntem olan FMEA, yeni kurulacak bir sistemin tasarımını optimize ederek riskleri azaltmaya çalıştığı gibi, var olan sistemlerde de risklerin azaltılabilmesi için detaylandırılabilir. Ayrıca uygun noktalarda sayısallaştırılarak yarı kantitatif bir yöntem olarak da kullanılabilir (Pourramazan vd., 2017).

Bu tekniği öncelikle ürünün ya da olayın yaşam döngüsünde potansiyel hata türlerini belirleyen bir analiz tekniğidir. Sonrasında bu teknik, bu hata türlerinin etkilerini ve son olarak ürün ya da olayın bu arızaya etkisinin şiddetini analiz eder. Mühendislerin üründeki olası sorunları daha erken bulmalarına yardımcı olur ve böylece üretim aşamasında olduğu gibi sonraki garanti aşamalarında meydana gelebilecek maliyetli değişiklikler veya yeniden çalışmalar gibi aksiyonları engellemeye çalışır. Bu analiz sürecinde ürün fonksiyonları dikkatlice değerlendirilmeli ve olası arızalar listelenmelidir. Bu analiz süreci, her ayrıntılı işlevsellikte daha kapsamlı bir analiz sağlar ve güvenilirlik tahmini artar. Analiz sürecinde üç risk kategorisi tanımlanır:

- Etkinin şiddeti
- Gerçekleşme olasılığı
- Olayın tespit edilebilirliği

FMEA yönteminde temel risk analizinde kullanılan olasılık, şiddet ve risk önlemleri faktörlerine ek olarak kullanılan temel parametreler şu şekilde sıralanabilir (Damanab vd., 2015):

- Hata modu (türü), bir sistemde arızanın meydana gelme veya bir sistem bileşenin gerekli bir işlevi yerine getirememesi şeklindedir.

- Hatanın türünün nedeni, gerçekleşmesinde etkili olan bir olay veya olaylar zincirini ifade eder. Kök neden olarak da adlandırılabilir.

- Hatanın etkisi, bir olay veya hatanın, içinde yer aldığı sistem üzerinde çalışırlık, işlev ve performansı bakımından etkisi olarak adlandırılır.

Söz konusu parametreler dikkate alınarak analiz; ‘yeni bir ürünün, sistemin veya hizmetin tasarlanması, bir sürecin veya sistemin sürecin kalitesinin iyileştirilmesi, sistemde meydana gelebilecek başarısızlıklarının açığa çıkarılması ve mevcut önlemlerin ve iyileştirilmesi’ gibi farklı aşamalarda gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla bir sürecin oluşturulma aşamasından başlanarak, ömrü boyunca belli aralıklarla hata modlarının ve etkilerinin analizinin yapılması sistem güvenilirliği ve emniyeti açısından faydalı olacaktır (Paciarotti vd., 2013).

Basit bir risk hesabında istenmeyen olayın gerçekleşme olasılığı ve sonuçların şiddeti arasındaki ilişkiye benzer bir şekilde; FMEA’da meydana gelme olasılığı (O), sonucun ciddiyeti (S) ve tespit edilebilirliği (D) için risk faktörleri dikkate alınır. Bunun için öncelikle analiz yapılacak sistemin veya sürecin tanımlanması gerekmektedir. Ardından stratejik bir biçimde, ilgili konu hakkında yeterli bilgi birikimi ve tecrübesi olan bir uzman grubu oluşturulur. Uzman grubu, sistemde meydana gelebilecek hataların ve arızaların neler olabileceğini açığa çıkarmaya, buna bağlı olarak da bu hataların nedenleri ve etkilerini açıklamaya çalışır.

1.10.3.1. Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) Uygulama Adımları

FMEA uygulamasına kapsamın belirlenmesi, takımın kurulması ve uygulanacak sürecin (sistem, tasarım, süreç veya servisin) incelenmesi ile başlanır. Daha sonra sırasıyla muhtemel hata türleri, hata nedenleri, hata etkileri ve mevcut kontroller tespit edilir. Daha sonra ortaya çıkma değeri, şiddet değeri ve tespit edilebilirlik değeri belirlenir. Ortaya çıkma değeri hatanın oluşma olasılığıdır. Şiddet değeri, olası hatanın diğer sistemlere ve bağlantılı olarak alt sistemlere olan etkisini gösteren değerdir. Tespit edilebilirlik değeri ise firmanın uygulayacağı kontrol mekanizmalarına bağlı olarak hatayı tespit edebilme yeteneğidir. Olasılık, şiddet ve saptama değerleri FMEA takımının tecrübeleri, geçmiş raporların, kayıtların analiz edilmesi sonucu belirlenir.

Adım 1. FMEA Kapsamının Belirlenmesi: FMEA çalışmasına başlamadan önce gereksiz alanlarda zaman kaybını önlemek için çalışmanın sınırları belirlenmelidir. Uygulama alanlarının belirlenmesi FMEA takımını uygulama süresince odağından uzaklaşıp başka alanlara kaymasını engeller.

Adım 2. FMEA Takımının Kurulması: Her şeyden önce FMEA aktif bir takım çalışmasıdır. Takım oluşturulurken çok çeşitli görüşlere ve tecrübelerine sahip kişiler bir araya getirilir. FMEA takımında süreci yöneten bir takım lideri ve ele alınacak süreç içerisinde faaliyet gösteren diğer üyelerden oluşmaktadır. Sürecin farklı kademelerinde bulunan takım üyelerinin farklı bakış açıları, fikirleri ve deneyimleriyle analiz edilecek olan süreç hakkında kapsamlı bir beyin fırtınası gerçekleştirir. Böylelikle süreç için ihtiyaç duyulan kapsamlı bir değerlendirme yapılır.

FMEA takımının büyüklüğü ise yeteri kadar fikir üretilebilecek ve sürecin doğru değerlendirilmesine imkân sağlayacak büyüklükte 5 ile 9 kişi arasında olmalıdır (Stamatis, 2003). Takım üyesi dışındaki kişilerin de bilgi ve tecrübelerinden faydalanılabilir (Aydan ve Kaya, 2017).

Bu çalışmamızda FMEA takımı tecrübeli, olayları analitik değerlendirebilen akademisyenler, şirket operasyon yöneticileri, şirket güverte inspektörleri, kaptanlar ve 1.Zabitlerden oluşmaktadır.

Adım 3. Uygulanacak Sürecin İncelenmesi: FMEA uygulamadan önce mutlaka daha önce sınırlarını belirlediğimiz süreci analiz etmemiz ve çok iyi bir şekilde anlamış olmamız gerekir ki başarılı bir uygulama uygulayabilelim. Süreci incelerken geçmiş kayıtlardan, iş akış diyagramlarından, prosedür ve talimatlardan faydalanabiliriz.

İyileştirilmesi istenen kısımlar öncelik sırasına göre belirlenerek çalışmaya nereden başlanacağı belirlenir. Beklentilerin karşılanıp karşılanmadığı kontrolü yapılır (Stamatis, 2003).

Adım 4. Olası Hata Türlerinin Belirlenmesi: FMEA ve diğer hata analizi tekniklerini kullananlar için "hata türü" nün açık bir şekilde anlamı belirtilmelidir. Hata türü ifadesi, fonksiyonun beklenen işlevi ve ilgili gereksinimleri karşılamada başarısız olma şekli olarak tanımlanabilir. Hatalar tanımlanmış sınırlar içerisinde çalışmama, yetersiz veya zayıf performans, aralıklı veya tutarsız performans veya istenmeyen işlevleri içerebilir (Popov vd., 2016).

Olası hatalar bir sistem veya tasarımda ortaya çıkma ihtimali olan fonksiyon zafiyetleridir. Olası hatalar belirlenirken neden-sonuç ilişkisi içerisinde birbirine bağlı ve anlamlı görülen olası bir hata, hata türü olarak değerlendirilir (Stamatis, 2003).

Her süreç için, tüm olası hata türleri tanımlanır. Her bir hata türü, diğer hata türlerinden bağımsız olarak değerlendirilmeli ve FMEA takımının nedenlerini belirlemesine izin verecek kadar yeterince açıklanmalıdır. Hata türleri belirlenirken, geçmiş kayıtlar, arıza kayıtları, ramak kala raporları, test verileri, müşteri şikâyet raporları, simülasyon çalışmaları gibi kaynakların sağladığı verilerden yararlanır.

Adım 5. Olası Hata Nedenlerinin Belirlenmesi: Olası hata nedenleri “bu hata türüne neden olabilecek sebepler neler olabilir?” sorusuna cevap aranarak bulunur. Bir hata sebebi bir veya daha fazla hata türünün ortaya çıkmasına neden olabilir. Bir hata nedeni bir veya birden çok değişkenin bir araya gelmesiyle oluşabilir. Çözüm sunan tedbire yönelik olarak oldukça anlamlı görülen bir sebep “kök sebep” olarak değerlendirilebilir (Stamatis, 2003).

Adım 6. Olası Hata Etkilerinin Belirlenmesi: Olası hata etkileri, “Bu hata oluştuğunda bize veya diğer ilgililere ne gibi sonuçlar doğurur?” sorusuna verilecek cevap olarak tanımlanır. Olası hata etkilerini belirlerken, garanti bilgileri, müşteri şikâyet formları, kaza raporları, güvenilirlik verileri, daha önce benzer özellikteki hizmet veya ürün için uygulanmış FMEA çalışmaları gibi kaynaklar kullanılabilir (Stamatis, 2003).

Adım 7. Mevcut Kontrollerin Belirlenmesi: Mevcut kontroller FMEA uygulaması yapıldığında olası hata türünün meydana gelmesini ve ilgililere ulaşmasını engellemek için kullanılan mekanizmalardır. Olası hata türlerinin tespit edilebilirlik derecesini bulmada yardımcı olan kontrollerdir.

Hata türünü saptamak için mevcut kontrol yok ise bu durum belirtilmelidir. Ağırlık, boyut, testler, kontrol listeleri, kaçak kontrolleri, elle, gözle muayene gibi önlemler mevcut kontroller olarak gösterilebilir.

Adım 8. Ortaya Çıkma (Olasılık) Değerinin Belirlenmesi: Olasılık terimi, nesnel veya öznel olarak belirlenmiş matematiksel olarak tanımlanmış, bir olayın olma olasılığını ifade etmek için kullanılır (TSE, 2018).

Olası hata türünün, ne sıklıkla ortaya çıktığını ifade eder, bu değer yüzde üzerinden sayısal bir değer olabileceği gibi FMEA takımının tecrübe ve öngörülerine göre kesin, nadiren, sıkça gibi sözel ifadelerde olabilir (Işığınçok, 2005).

Literatürde hata türlerinin olasılık değerlerini belirlemede 5’lik ve 10’luk skala kullanılabilir. Daha detaylı olmasından dolayı bu çalışmada 10’luk sakala kullanılmıştır.

Hata türünün oluşma olasılığını belirlerken çeşitli analizlerden veya geçmiş kayıtlar, kaza, arıza raporlarından faydalanılır. Somut verilerin olmaması durumunda FMEA takımı kendi bilgi ve deneyimlerinden faydalanarak ortaya çıkma olasılığı değeri hakkında fikir yürüterek bir değer belirleyebilirler (Stamatis, 2003). Bu aşamadan sonra kullanılan olasılık ölçeğine göre her bir hata türü için olasılık değerleri belirlenmiş olur.

FMEA’da hata türlerinin meydana gelme olasılığı Tablo 6’da yer alan sözel ifadeler ve karşılığı olan değerler ile derecelendirilmektedir.

Tablo 6. Bir hata türlerinin olasılık derecelendirme tablosu (Özkılıç, 2005)

Derece	Hata Olasılığı	Muhtemel Hata Değeri
10	Oldukça yüksek	2’de 1 veya daha fazla
9	Çok yüksek	3’te 1
8	Tekrarlı bir biçimde	8’de 1
7	Yüksek	20’de 1
6	Orta derecede yüksek	80’de 1
5	Orta	400’de 1
4	Nispeten düşük	2000’de 1
3	Düşük	15000’de 1
2	Oldukça düşük	150000’de 1
1	Neredeyse imkânsız	150000’de 1’den az

Adım 9. Şiddet Değerinin Belirlenmesi: Olası hata türlerinin şiddet değerleri belirlenirken geçmiş kayıtlardan, müşteri anketlerinden, geri dönen ürünlerin kayıtlarından, kaza ya da hasar kayıtları için hazırlanan rapor sonuçlarından, simülasyon çalışmalarından faydalanılır. Eğer herhangi bir hata türü için geçmiş kayıtlardan veri elde edilemiyorsa bu durumda FMEA takımının bilgi ve tecrübelerinden faydalanılır ve her bir hata türü için mantıklı şiddet değerleri belirlenir. Bu süreç sonunda her bir hata türü için şiddet değerleri tespit edilmiş olur.

Şiddetin, diğer deyimle hata türü etkisinin derecelendirilmesi için Tablo 7’den yararlanılmaktadır.

Tablo 7. Bir hata türü şiddetinin derecelendirme tablosu (Özkılıç, 2005)

Derece	Etki	Etkinin Şiddeti
10	Uyarısız Gelen Tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata
9	Uyarısız Gelen Tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata
8	Çok Yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara, 3.derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata
7	Yüksek	Ekipmanın tamamen hasar görmesine sebep olan ve ölüme, zehirlenme, 3.derece yanık, akut ölümcül hastalık vb. etkiye sahip hata
6	Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata
5	Düşük	Kırık, kalıcı küçük iş görmemezlik, 2.derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip hata
4	Çok Düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata
3	Önemsiz	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata
2	Çok Önemsiz	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata
1	Yok	Etki yok

Adım 10. Tespit Edilebilirlik Değerinin Belirlenmesi: Tespit edilebilirlik derecelendirmesi, olası hata türünün meydana gelmeden önce ne kadar kolay tespit edilebileceğine dair bir tahmine dayanır ve bir işletmede meydana gelebilecek hata türlerinin yakalanma yeteneğidir. Eğer işletme faaliyet süreçlerinde hataları erken fark edebilecek bazı kontrol, denetim mekanizmaları kurmuş ise hataları yakalama olasılığı yeteneği fazla olur.

Tespit edilebilirlik değeri, geçmiş kayıtlardan, ürün veya hizmet iç denetimlerinden, somut veri olmayan durumlarda FMEA takımının bilgi ve tecrübelerinden faydalanılarak belirlenir (Ceber, 2010). Saptama değeri, şiddet ve olasılık tablolarına göre numara sıraları ters mantıkla çalışır, tespit numarası ne kadar yüksekse tespit edilebilme olasılığı o kadar azdır. Daha düşük bir tespit olasılığı sonuç olarak daha yüksek bir RÖS'e ve hata türlerinin önlenmesi için daha yüksek bir önceliğe yol açar.

Her bir hata türü için tespit edilebilme değeri kullanılan 10'luk skalada 1-10 arasında bir değer olarak belirlenir. 1 hatanın nerdeyse kesin olarak belirlendiği, 10 ise hatanın tepe olaya ulaşmadan önce tespit edilme olasılığının çok düşük olduğu durumu ifade

etmektedir. Bu süreç sonunda her bir hata türü için saptanabilirlik değerleri tespit edilmiş olunur.

Tespit edilebilirlik değerinin derecelendirilebilmesi için Tablo 8'de yer alan niteleyici ifadeler kullanılabilir.

Tablo 8. Bir hata modunun tespit edilebilirlik değerinin derecelendirilme tablosu (Özkılıç, 2005)

Derece	Tespit edilebilirlik	Etkinin Şiddeti
10	Neredeyse imkânsız	Tespit etme imkânı yok
9	Çok Az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği çok uzak
8	Az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği uzak
7	Çok düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği düşük
6	Düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği çok düşük
5	Orta	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği orta
4	Yüksek Ortalama	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği yüksek ortalama
3	Yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği yüksek
2	Çok yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği çok yüksek
1	Neredeyse kesin	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği hemen hemen kesin

Adım 11. Risk Öncelik Sayısının (RÖS) Belirlenmesi Ve Değerlendirilmesi: Risk Öncelik Sayısı (RÖS) belirlenen tüm hata türleri için hatanın ortaya çıkma olasılığı, hatanın şiddet değeri ve hatanın saptanabilirlik değerlerinin çarpımı sonucu belirlenen bir risk puanıdır. Böylelikle her bir hata türü için RÖS değerleri hesaplanmış olunur ve her bir hata türü için elde edilen RÖS puanları yardımıyla hataların öncelik sıralaması yapılır (Popov vd., 2016). Risk öncelik sayısı risk öncelik puanı olarak da ifade edilir.

$$\text{Risk Öncelik Sayısı (RÖS)} = \text{Olasılık (O)} \times \text{Şiddet (Ş)} \times \text{Saptanabilirlik (S)}$$

Her bir parametre için 1'den 10'a ölçeklendirilmiş referans skalalar kullanıldığında, RÖS değeri 1 ve 1000 arasında değişen bir değer alır.

En yüksek RÖS değerinden başlanarak en düşük RÖS değerine sahip tüm hatalar sıralanır. RÖS değeri için bir eşik değeri belirlenir ve belirlenen eşik değerinin üstünde olan hatalar için önleyici faaliyetlerde bulunur.

Eşik değerinin altında kalan hatalar için ise herhangi bir önlem alınmayabilir (Eryürek ve Tanyaş, 2003).

Risk Öncelik Seviyesi (RÖS)	Değerlendirme
1-50 arası	Düşük Riskli
51-100 arası	Orta Riskli
101-200 arası	Yüksek Riskli
201-1000 arası	Çok Yüksek Riskli

Şekil 27. Hata türleri sınıflandırma eşik değerleri (Erdoğan, 2022)

RÖS değerleri ile pareto analizi yapılarak değerlendirme yapılabilir, 80/20 kuralı ile hangi hatalar üzerinde düzeltici faaliyet uygulanacağı belirlenebilir. Toplam RÖS değerinin %80'i geriye kalan %20'den kaynaklanmaktadır ve bu %20'lik kısma düzeltici faaliyet uygulanmalıdır (Ozcan, 2001).

Aynı RÖS değerine sahip birden fazla hata var ise bu durumda hataların öncelikle şiddet ve saptama değeri yüksek olan hatalardan başlanarak önlem alınmalıdır. Şiddet değerleri de aynı ise bu durumda saptama olasılığı zor olan hatadan başlanmalıdır (Stamatis, 2003).

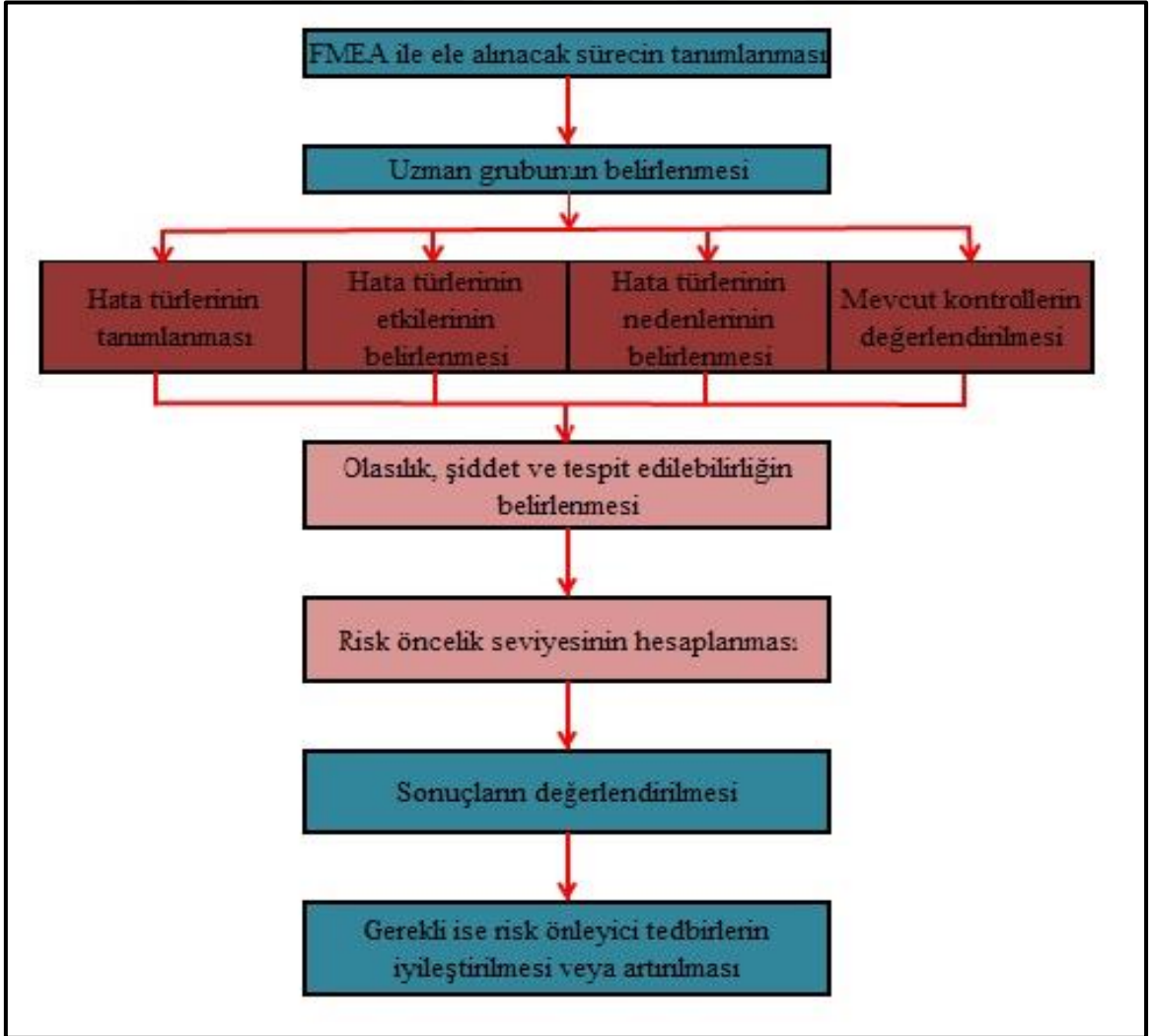
Adım 12. Alınacak Önlemlerin Belirlenmesi ve Uygulanması: Alınacak önlemler RÖS değeri için belirlenen eşik değerinin üstünde olan tüm hata türleri için uygulanır. Amaç olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik değerlerini küçülterek RÖS değerini eşik değerinin altına çekmektir.

Şiddet Değerinin Azaltılması: Sadece hizmet, tasarım veya ürün modernizasyonu ile sağlanabilir. FMEA takımı yapılacak olan bu revizyon ve değişikliğin uygulamada ne gibi önleyici etkileri olduğunu değerlendirir ve katkı sağladığı görülürse şiddet değeri aşağı çekilebilir (Down vd., 2008).

Tespit Edilebilirlik Değerinin Azaltılması: Tespit Edilebilirlik Değerini düşürmek için mevcut kontroller geliştirilebilir, ilave kontroller eklenebilir, kontrollerin sıklığı artırılabilir veya tasarım ve proses değişikliğine gidilebilir (Down, vd., 2008).

Ortaya Çıkma (Olasılık) Değerinin Azaltılması: Hata türü nedenleri hakkında yapılacak olan kontrol ve yok etme yöntemleriyle hataların oluşma olasılıkları düşürülebilir (Down, vd., 2008).

Aritmetik çarpım işlemi sonucunda elde edilecek risk öncelik değerinin yüksek olması, sistemin güvenilirliğini etkileyebilecek risklerin daha büyük olacağı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla öne çıkan yüksek risk oluşturan durumların önüne geçilmek için hangi uygun emniyet önlemlerinin alınabileceği tartışılmalıdır. FMEA'nın genel bir biçimde uygulama basamakları Şekil 28'deki gibi sıralanmıştır.



Şekil 28. FMEA'nın uygulama basamakları (Özkılıç, 2005).

1.10.4. FTA-FMEA Entegrasyonu

FTA-FMEA entegrasyonu Bulanık Hata Ağacı Analizi sonucu minimum kesme setlerinin olasılıkları ve ağırlıklarının tespit edildiği adımdan sonra başlayacak. Temel olayların (hata türlerinin) olasılık değerleri Bulanık Hata Ağacı Analizi ile Fusel Vessel Measurement (F-VIM) index kullanılarak minimum kesme setleri (MCS) olasılık ve ağırlıkları tespiti sonucunda yapılmış olacaktır. Bu aşamadan sonra aşağıdaki adımlar takip edilir.

1. Adım: Tespit edilen minimum kesme setlerinin ağırlık değerleri (olasılıkları) hata türlerinin olasılık değerleri olarak kullanılır.

2. Adım: Hata türü şiddetinin derecelendirme tablosu kullanılarak daha önce belirlenmiş ve ağırlıklandırılmış 10 uzman tarafından hata türleri şiddet değerleri tespit edilir.

3. Adım: Hata türünün tespit edilebilirliği tablosu kullanılarak yine daha önce belirlenmiş ve ağırlıklandırılmış 10 uzman tarafından hata türlerinin tespit edilebilirlik değerleri belirlenir.

2. ve 3. adımlarda uzmanlardan hata türü şiddet tablosu ve tespit edilebilirlik tablosu yardımıyla her bir minimum kesme seti (MCS) için görüş alınarak şiddet ve tespit edilebilirlik değerleri belirlenir.

4. Adım: Anketlerden/Uzman görüşlerinden elde edilen her bir şiddet ve tespit edilebilirlik değeri uzman ağırlıkları ile birlikte hesaplanarak her bir MCS için ortalama şiddet ve tespit edilebilirlik değerleri elde edilir.

5. Adım: Her bir MCS için tespit edilen şiddet ve tespit edilebilirlik değerlerinin ortalamaları ile MCS'lerin olasılığı olan ve FTA kapsamında fuzzy ile hesaplanmış olan MCS olasılıkları çarpılarak Risk Öncelik Seviyeleri belirlenir. Risk öncelik seviyesi ‘ $RÖS = O \times S \times D$ ’ formülü ile bulunur. Burada O, hatanın olasılığı; S, hatanın şiddeti ve D, hatanın tespit edilebilirliğidir. Hataların şiddet değerleri için Tablo 7, tespit edilebilirlik değerleri için ise Tablo 8 kullanılır.

6. Adım: Bulunan risk öncelik değerleri her bir MCS'nin ağırlık değerleri ile çarpılarak ağırlıklandırılmış risk öncelik değerleri elde edilir. Son olarak hata türleri risk öncelik seviyelerine göre sıralanır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Vaka Çalışması

Kuru dökme yüklerin taşınması dökme yük gemileri için ciddi riskler taşımaktadır. Katı dökme yüklerin sıvılaşması, serbest yüzey etkisi nedeniyle gemilerin stabilitesinin azalmasına neden olduğundan dolayı kuru dökme yük taşımacılığı için en tehlikeli durumlardan biridir. Ayrıca yükün kaymasına da neden olabilir. Yük sıvılaşması olayları gemilerin ve denizcilerin kaybıyla sonuçlanan ciddi deniz olaylarıdır. Kuru dökme yüklerden nikel madeni yükünün taşınması sırasında sıvılaşması ve yaşanan deniz kazaları benzer yüklere göre oldukça fazladır. 1.Bölümde Tablo 4'te de listelendiği gibi 1988-2019 yılları arasında yük sıvılaşması nedeniyle yaşanan 22 kaza ve olaylardan 14 kaza ve olay (yaklaşık olarak %63,63) nikel madeni yükünün sıvılaşması nedeniyle meydana gelmiştir.

Deniz kaza ve olaylarının kök nedenlerinin tespit edilebilmesi, alınacak önlemler açısından büyük öneme sahiptir. Gemilerin karıştığı kazalar sonucunda birçok maddi kayıplar ve can kayıpları meydana gelmektedir. Aynı zamanda deniz çevresi de bu kazalardan etkilenmekte ve doğal ekosistem bozulabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı deniz kazalarının önüne geçmek ya da en aza indirmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır.

2.2. Bulanık Hata Ağacı (FFTA) Uygulaması

2.2.1. Katılımcıların Analizi

Çalışmada nikel madeni yükünün sıvılaşmasının kök nedenlerini araştırmak üzere kuru dökme yük taşımacılığı, özellikle de nikel cevheri, demir cevheri, maden gibi katı cevher yükleri hakkında yeterli deneyime sahip 13 denizcilik uzmanı ile çalışılmıştır. Bu çalışmada aynı zamanda, dökme yük gemilerinde nikel madeni yükünün sıvılaşması kazalarıyla bağlantılı veri azlığı nedeniyle kullanılacak veriler için olarak uzman görüşlerinden de yararlanılmıştır. Nikel madeni yükünün sıvılaşmasının temel olaylarının (BE) bulanık ölçekle ilgili hata olasılıklarını elde etmek temel hata türlerinin risk öncelik

değerlerini elde etmek için denizcilik uzmanları seçilerek onlarla temasa geçildi. Denizcilik uzmanlarının profilleri arasında akademisyenler, şirket operasyon müdürleri (kuru dökme yük uzmanı), şirket güverte enspektörleri (kuru dökme yük uzmanı), kaptan ve 2.Kaptanlar (1.Zabit) yer almaktadır. Seçilen uzmanların çalıştıkları denizcilik firmaları dökme yük gemisi sahibi prestijli denizcilik firmaları olup, filolarında çeşitli tonajlarda (handymax, supramax, kamsarmax, panamax ve capesize) dökme yük gemileri bulunan firmalardır. Uzmanların çalıştıkları denizcilik firmaları, cevher (nikel cevheri ve demir cevheri dâhil), mineraller, tahıl vb. gibi çeşitli katı dökme yüklerle ilgilenmektedir. Bu nedenle seçilen denizcilik uzmanları (akademisyen, güverte ve operasyon müdürleri, kaptan ve 2.Kaptanlar), genel olarak sıvılaşabilecek yükler özelde de nikel madeni yükünün sıvılaşması hakkında geniş bilgi ve deneyime sahiptir. Denizcilik uzmanları, hata verilerinin belirsiz olduğu sorunları çözmek üretebilmek için kendilerine yöneltilen anketlere katıldılar. Ankete katılan denizcilik uzmanlarının profil detayları Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9. Uzmanların Profil Detayları

Uzman Numarası	Profesyonel Konum	Deniz Hizmeti Süresi (Yıl)	Kara Hizmeti Süresi (Yıl)	Eğitim Seviyesi
E1	Akademisyen	3-5	6-10	Doktora
E2	Kaptan	6-10	11-15	Doktora
E3	Akademisyen	3-5	11-15	Doktora
E4	Akademisyen	<=3	11-15	Yüksek Lisans
E5	Şirket Operasyon Müdürü	11-15	11-15	Yüksek Lisans
E6	Şirket Operasyon Müdürü	>=16	>=16	Lisans
E7	Kaptan	11-15	<=3	Lisans
E8	Akademisyen	<=3	6-10	Doktora
E9	Şirket Güverte Enspektörü	3-5	6-10	Doktora
E10	2.Kaptan	6-10	<=3	Lisans
E11	Kaptan	6-10	<=3	Yüksek Lisans
E12	Şirket Güverte Enspektörü	6-10	3-5	Yüksek Lisans
E13	Kaptan	>=16	<=3	Lise

2.2.2. Hata Ağacı (FT) Diyagramı

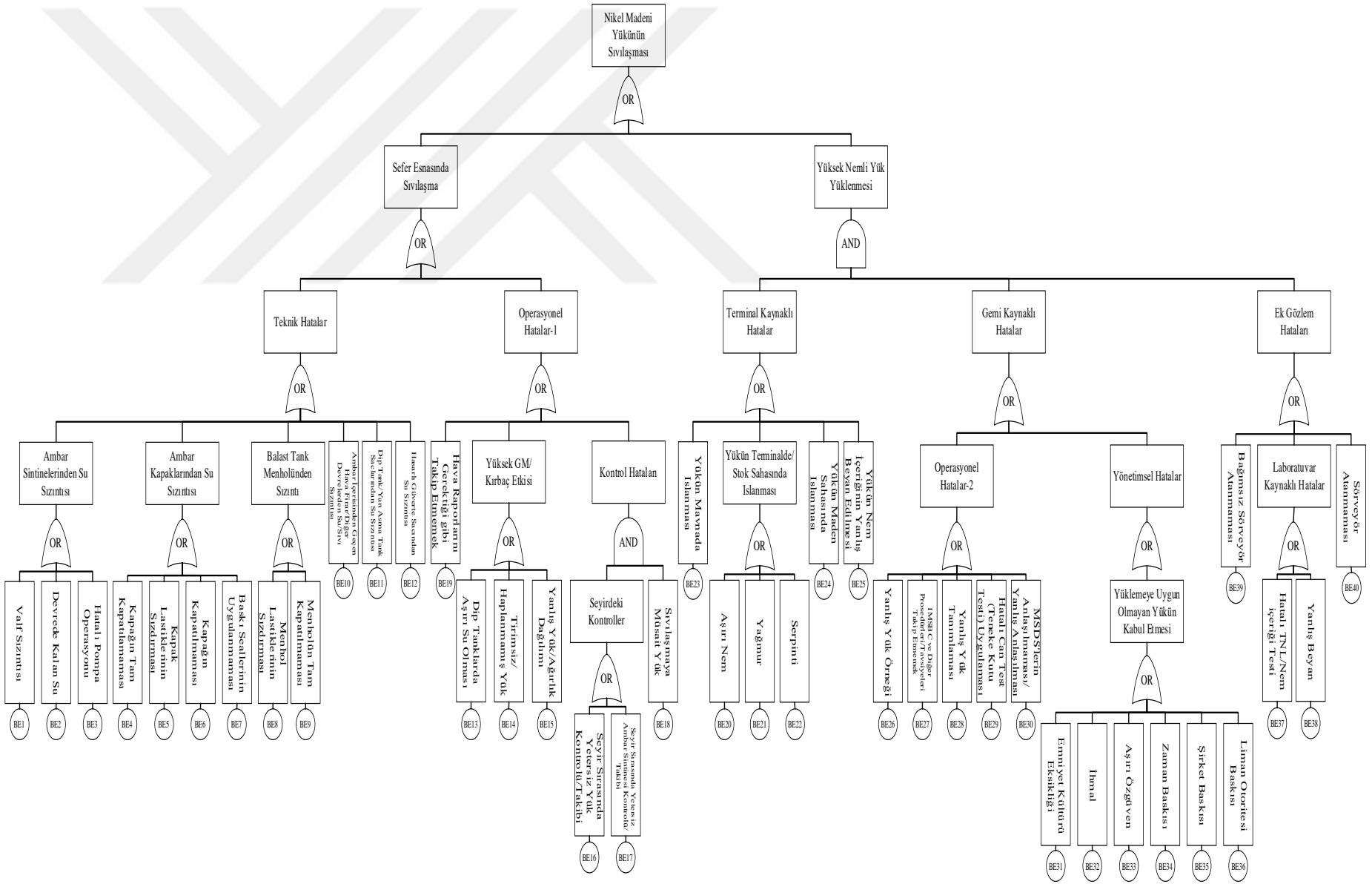
Tezin amacı kuru dökme yük taşımacılığında nikel madeni yükünün sıvılaşması konusunda niceliksel risk analizi yapmak olduğundan dolayı, 13 denizcilik uzmanının gözetiminde detaylı bir hata ağacı diyagramı oluşturulmuştur. Hata ağacı diyagramında en üst olay (Tepe olay/TE), risk analizine yönelik temel olaydır. Nikel yükünün sıvılaşmasının sonuçları gemiler, deniz ortamı ve gemideki mürettebat için ciddi endişe kaynağı olduğundan, niceliksel risk analizi için “Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşması” bir TE olarak seçilmiştir. Tablo 10, nikel cevheri yükünün sıvılaşmasıyla ilgili potansiyel hataları göstermektedir. Buna göre de, denizcilik uzmanlarının fikir birliğiyle oluşturulmuş olan hata ağacı diyagramı Şekil 29'da gösterilmektedir.

Tablo 10. Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşmasına Neden Olan Olası Hatalar

Hata No	FTA Tanımı	Potansiyel Hatalar
	TE	Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşması
1	IE1	Ambar Sintinelerinden Su Sızıntısı
2	IE2	Ambar Kapaklarından Su Sızıntısı
3	IE3	Balast Tank Menholünden Sızıntı
4	IE4	Yüksek GM/Kırbaç Etkisi
5	IE5	Kontrol Hataları
6	IE6	Seyirdeki Kontroller
7	IE7	Yükün Terminalde/Stok Sahasında Islanması
8	IE8	Yüklemeye Uygun Olmayan Yükün Kabul Edilmesi
9	IE9	Laboratuvar Kaynaklı Hatalar
10	IE10	Teknik Hatalar
11	IE11	Operasyonel Hatalar (1)
12	IE12	Operasyonel Hatalar (2)
13	IE13	Yönetimsel Hatalar
14	IE14	Terminal Kaynaklı Hatalar
15	IE15	Gemi Kaynaklı Hatalar
16	IE16	Ek Gözlem Hataları
17	IE17	Sefer Esnasında Sıvılaşma
18	IE18	Yüksek Nemli Yük Yüklenmesi
19	BE1	Valf Sızıntısı
20	BE2	Devrede Kalan Su
21	BE3	Hatalı Pompa Operasyonu
22	BE4	Kapağın Tam Kapatılmaması
23	BE5	Kapak Lastiklerinin Sızdırması
24	BE6	Kapağın Kapatılmaması

Tablo 10'un devamı

Hata No	FTA Tanımı	Potansiyel Hatalar
25	BE7	Baskı Seallerinin Uygulanmaması
26	BE8	Menhol Lastiklerinin Sızdırması
26	BE9	Menholün Tam Kapatılmaması
28	BE10	Ambar İçerisinden Geçen Hava Fırar/Diğer Devrelerden Su/Sıvı Sızıntısı
29	BE11	Dip Tank/Yan Asma Tank Saclarından Su Sızıntısı
30	BE12	Hasarlı Güverte Sacından Su Sızıntısı
31	BE13	Dip Tanklarda Aşırı Su Olması
32	BE14	Tirimsiz/Haplanmamış Yük
33	BE15	Yanlış Yük/Ağırlık Dağılımı
34	BE16	Seyir Sırasında Yetersiz Yük Kontrolü/Takibi
35	BE17	Seyir Sırasında Yetersiz Ambar Sintinesi Kontrolü/Takibi
36	BE18	Sıvılaşmaya Müsait Yük
37	BE19	Hava Raporlarını Gerekli gibi Takip Etmemek
38	BE20	Aşırı Nem
39	BE21	Yağmur
40	BE22	Serpinti
41	BE23	Yükün Mavnada Islanması
42	BE24	Yükün Maden Sahasında Islanması
43	BE25	Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi
44	BE26	Yanlış Yük Örneği
45	BE27	IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek
46	BE28	Yanlış Yük Tanımlaması
47	BE29	Hatalı Can Test (Teneke Kutu Testi) Uygulaması
48	BE30	MSDS'lerin Anlaşılmasında Yanlış Anlaşılması
49	BE31	Emniyet Kültürü Eksikliği
50	BE32	İhmal
51	BE33	Aşırı Özgüven
52	BE34	Zaman Baskısı
53	BE35	Şirket Baskısı
54	BE36	Liman Otoritesi Baskısı
55	BE37	Hatalı TNL/Nem İçeriği Testi
56	BE38	Yanlış Beyan
57	BE39	Bağımsız Sörveyör Atanmaması
58	BE40	Sörveyör Atanmaması



Şekil 29. Hata Ağacı (FT) Diyagramı

2.2.3. Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşmasına Neden Olan Temel Nedenler, Ara Nedenler ve Hata Ağacı Diyagramının Yapısı

Valf Sızıntısı (BE1): Kuru dökme yük gemilerinde ambar sintinelerini basmak ve gerektiğinde ambara balast almak için kullanılan sintine devreleri vardır. Ambar sintine devresine kumanda eden valflerde meydana gelen arızalar veya valflerin tam kapatılmaması/kapatılmaması gibi nedenlerle su sızıntısı meydana gelir.

Devrede Kalan Su (BE2): Yükleme öncesinde ambarlar yıkanıp ambar sintinelerinde kalan sular dışarı basıldıktan sonra sintine devrelerinde kalan sudur. Ambar sintine kuyusunun kapasitesinin üstünde bir miktarda devrede su kalması bir süre sonra sintine kuyusunun su ile dolarak ambara su girişine neden olur.

Hatalı Pompa Operasyonu (BE3): Gemilerde yükleme, tahliye ve seyir esnasında yağ-yakıt transferi makine sintinelerinde biriken kirli suların atık tankına transfer edilmesi gibi çeşitli pompa operasyonları yapılmaktadır. Hatalı pompa operasyonu zaman zaman ambarlara su veya farklı sıvı girişlerine neden olmaktadır.

Ambar Sintinelerinden Su Sızıntısı (IE1): Ambar Sintinelerinden Su Sızıntısı ara olayı Valf Sızıntısı (BE1), Sintine Devresinde Kalan Su (BE2) ve Hatalı Pompa Operasyonu (BE3) temel olaylarından herhangi birinden dolayı meydana gelebilir. Hata ağacı diyagramında BE1, BE2 ve BE3 temel olayları ‘VEYA’ bağlacı ile IE1 ara olayına bağlanmıştır.

Kapağın Tam Kapatılmaması (BE4): Yükleme sonrası ambar kapakları kapatılır ve seyir boyunca havalandırma operasyonları dışında kapalı tutulurlar. Hidrolik sistemde arızalar, elektriksel arızalar ve mekanik arızalar gibi nedenlerle zaman zaman ambar kapakları olması gerektiği gibi kapatılamaz.

Kapak Lastiklerinin Sızdırması (BE5): Ambar kapaklarında sızdırmazlık görevi yapan kapak lastiklerinin deformasyona uğraması, hasarlanması gibi durumlarda kapak lastikleri sızdırmazlık görevini yerine getiremez.

Kapağın Kapatılmaması (BE6): Seyir esnasında ambarlardaki yükleri havalandırmak amacıyla uygun hava şartlarında gün içerisinde zaman zaman ambar kapakları açılmaktadır. Özellikle çalışma saatleri dışında kalan akşam ve gece saatlerinde kapaklar kapatılarak emniyete alınmaktadır. Havalandırma operasyonu tamamlandığında ambar kapaklarının kapatılmaması hava şartlarının kötüleşmesi durumunda risk teşkil eder.

Baskı Seallerinin Uygulanmaması (BE7): Ambar kapaklarında sızdırmazlık yeteneğini artırmak ve ambar kapağını/yükü emniyete almak için kullanılan baskı seallerinin uygulanmaması sızıntı nedeniyle ambara su girişine neden olur.

Ambar Kapaklarından Su Sızıntısı (IE2): Ambar Kapaklarından Su Sızıntısı ara olayı Kapağın Tam Kapatılmaması (BE4), Kapak Lastiklerinin Sızdırması (BE5), Kapağın Kapatılmaması (BE6), Baskı Seallerinin Uygulanmaması (BE7) temel olaylarından herhangi birinden dolayı meydana gelebilir. Hata ağacı diyagramında BE4, BE5, BE6 ve BE7 temel olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE2 ara olayına bağlanmıştır.

Menhol Lastiklerinin Sızdırması (BE8): Ambar tabanlarında ve alabandalarında balast tanklarına girebilmek için kullanılan menhol lastiklerinin sızdırmazlık özelliğini kaybetmesi durumunda herhangi bir balast alma veya balast taşıma operasyonu esnasında ambara su girişi ile sonuçlanır.

Menholün Tam Kapatılmaması (BE9): Ambar tabanlarında ve alabandalarında balast tanklarına girebilmek için kullanılan menhol kapaklarının tam kapatılmaması durumunda herhangi bir balast alma veya balast taşıma operasyonu esnasında ambara su girişi ile sonuçlanır.

Balast Tank Menholünden Sızıntı (IE3): Balast Tank Menholünden Sızıntı ara olayı Menhol Lastiklerinin Sızdırması (BE8) ve Menholün Tam Kapatılmaması (BE9) temel olaylarından herhangi birinden dolayı meydana gelebilir. Hata ağacı diyagramında BE8 ve BE9 temel olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE3 ara olayına bağlanmıştır.

Ambar İçerisinden Geçen Hava Firar/Diğer Devrelerden Su/Sıvı Sızıntısı (BE10): Ambar içerisinden uygun bölgelerden balast devreleri, hava firar devreleri, yağ-yakıt devreleri gibi devreler geçebilmektedir. Balast alma ve balast taşıma operasyonlarında ambar içerisinden geçen balast devresi veya hava firar devrelerinde hasar olması durumunda bu devrelerden ambara su girişi olur. Ayrıca yağ-yakıt alımı veya transferi sırasında da devrelerden ambar/ambarlara sıvı sızıntısı olabilmektedir.

Dip Tank/Yan Asma Tank Saclarından Su Sızıntısı (BE11): Dökme yük gemilerinde özellikle tahliye esnasında ambar diplerine ve alabandalarına kepçe gibi tahliye ekipmanları çarpmakta ve saclara zarar verebilmektedir. Zaman zaman bu çarpmalar sonucu saclarda sadece görsel kontrol ile tespiti mümkün olmayan delinmeler meydana gelebilmektedir. Dip tanklara veya yan asma tanklara balast alınması ya da balast taşıma operasyonu yapılması durumunda ambarlara su girişi olmaktadır.

Hasarlı Güverte Sacından Su Sızıntısı (BE12): Ambarların kapak kısımları daha dar iken içerden ambarlar daha geniş bir yapıya sahiptirler. Güverte kaplama sacları aynı zamanda ambarların kapak dışında kalan bölümlerinin üzerini de kapatan kaplama saclarıdır. Altında ambar bulunan güverte sacında meydana gelen delinme, kesik gibi fark edilemeyen hasarlar güvertenin yıkanması esnasında ya da güverteye dalgalar nedeniyle deniz suyu çıkması durumunda ambarlara su girişi olabilmektedir.

Teknik Hatalar (IE10): Ambar Sintinelerinden Su Sızıntısı (IE1), Ambar Kapaklarından Su Sızıntısı (IE2), Balast Tank Menholünden Sızıntı (IE3) ara olayları ve Ambar İçerisinden Geçen Hava Fırar/Diğer Devrelerden Su/Sıvı Sızıntısı (BE10), Dip Tank/Yan Asma Tank Saclarından Su Sızıntısı (BE11) ve Hasarlı Güverte Sacından Su Sızıntısı (BE12) temel olaylarından oluşmaktadır. IE1, IE2, IE3 ara olayları ile BE10, BE11 ve BE12 temel olayları "VEYA" bağlacı ile IE10 ara olayına bağlanmıştır.

Dip Tanklarda Aşırı Su Olması (BE13): Gemi yüklenirken stabilite açısından balast tanklarında bulunan balastlar basılır. Nikel madeni yükü gibi dip yükler yüklenirken özellikle dip tanlarda en az seviyede su bulundurulması ya da hiç su olmaması tercih edilir. Bunun için de tank süzdürme işlemi yapılır. Tam olarak basılamayan veya süzdürülemeyen dip tank balastları geminin GM değerinin artmasına sebep olur. Bu durumda olan bir gemi büyük deniz dalgalarına maruz kaldığında çok sert yalpalar yapar ve ambar içerisinde sıvılaşmaya meyilli yükün hareketleri ile birlikte ambarlarda kırbaç etkisi meydana getirir.

Tirimsiz/Haplanmamış Yük (BE14): Nikel madeni yükü gibi dip yükler yükleme tamamlandığında ambarı tam olarak doldurmayan yüklerdir. Çoğunlukla ambarların büyük bölümü boş kalır. Yükleme operasyonu tamamlandığında haplanmayan yükler ambar içerisinde tepeli (yani dik açılı) kalmaktadır. Seyir esnasında gemi yalpaya düştüğünde haplanmayan yük devrilerek yükleme tamamlandığında düşük olan geminin GM değerini artırır. Bu durumda da gemi büyük deniz dalgalarına maruz kaldığında çok sert yalpalar yapar ve ambar içerisinde sıvılaşmaya meyilli yükün hareketleri ile birlikte ambarlarda kırbaç etkisi meydana getirir.

Yanlış Yük/Ağırlık Dağılımı (BE15): Yükleme tamamlandığında geminin GM değerini artıracak şekilde yük dağılımı olması durumudur. Geminin sert dalgalara maruz kalması durumunda sert yalpalar yapmasına ve yükün ambar içerisinde daha hızlı hareket ederek öngörülenden daha önce sıvılaşmasına neden olur.

Yüksek GM/Kırbaç Etkisi (IE4): Dip Tanklarda Aşırı Su Olması (BE13), Tirimsiz/Haplanmamış Yük (BE14) ve Yanlış Yük/Ağırlık Dağılımı temel olaylarından

herhangi birinden dolayı meydana gelebilir. Hata ağacı diyagramında BE13, BE14, BE15 temel olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE4 ara olayına bağlanmıştır.

Seyir Sırasında Yetersiz Yük Kontrolü/Takibi (BE16): Seyir sırasında tüm ambarların sorumlu zabıt tarafından düzenli olarak kontrol edilmesi, ambara herhangi bir su girişi olup olmadığı, yük üzerinde su miktarının gözlemlenerek sınıvlaşma durumu olup olmadığı takip edilmesi gerekmektedir.

Seyir Sırasında Yetersiz Ambar Sintinesi Kontrolü/Takibi (BE17): Seyir sırasında düzenli aralıklarla (örneğin her sabah ve akşam) sorumlu zabıt tarafından ambar sintinelerinden iskandil aldırılarak sintinelere su girişi olup olmadığı kontrol ve takip edilmelidir. Ayrıca ambarlardaki yükten süzülen sular da ambar sintine kuyularında birikir. Düzenli kontrollerle birlikte tespit edilmiş olan sintinelerde biriken bu sular deşarj edilerek sintinelerin boş tutulması sağlanmalıdır.

Seyirdeki Kontroller (IE6): Seyir Sırasında Yetersiz Yük Kontrolü/Takibi (BE16) ve Seyir Sırasında Yetersiz Ambar Sintinesi Kontrolü/Takibi (BE17) temel olayları Seyirdeki Kontroller (IE6) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında BE16 ve BE17 temel olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE6 ara olayına bağlanmıştır.

Sınıvlaşmaya Müsait Yük (BE18): Nem içeriği yüksek ve taşınabilir nem limitinin üstünde bir nem içeriğine sahip nikel madeni yükünü ifade etmektedir.

Kontrol Hataları (IE5): Seyirdeki kontroller (IE6) ara olayı ve Sınıvlaşmaya Müsait Yük (BE18) temel olayı Kontrol Hataları IE5 ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında IE6 ara olayı ile BE18 temel olayı ‘‘VE’’ bağlacı ile IE6 ara olayına bağlanmıştır.

Hava Raporlarını Gerektiği gibi Takip Etmemek (BE19): Gerek seyirden önce gerekse seyir süresince hem geminin ve personelin hem de taşınan yükün selameti için hava raporlarını düzenli bir şekilde takip etmek önem arz etmektedir. Sınıvlaşma riski olan yükleri taşıyan gemiler açısından da hava raporlarının takibi ayrıca önemlidir. Ağır havalarda gemilerin yapacağı hareketler sınıvlaşmaya sebebiyet verecek önemli durumlardır.

Operasyonel Hatalar-1 (IE10): Hava Raporlarını Gerektiği Gibi Takip Etmemek (BE19) temel olayı ile Yüksek Gm/Kırbaç Etkisi ve (IE4) Kontrol Hataları (IE5) ara olayları Operasyonel Hatalar-1 (IE10) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında BE19 temel olayı ile IE4 ve IE5 ara olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE10 ara olayına bağlanmıştır.

Sefer Esnasında Sıvılaşma (IE17): Teknik hatalar (IE10) ve Operasyonel Hatalar-1 (IE11) ara olayları Sefer Esnasında Sıvılaşma (IE17) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında IE10 ve IE11 ara olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE17 ara olayına bağlanmıştır.

Aşırı Nem (BE20): Havada bulunan su buharı miktarına genel olarak nem denir. Nikel madeni yükünün maden stok sahasından gemiye yüklenmesinin tamamlanması arasında geçen süreç içerisinde maruz kalabileceği aşırı nemi ifade etmektedir.

Yağmur (BE21): Nikel madeni yükünün maden stok sahasından gemiye yüklenmesinin tamamlanması arasında geçen süreç içerisinde maruz kalabileceği yağmur şartlarını ifade etmektedir.

Serpinti (BE22): Nikel madeni yükünün maden liman/terminal sahasında veya kıyıya yakın stok sahasında denizden gelen serpintilere maruz kalması durumunu ifade eder.

Yükün Terminalde/Stok Sahasında Islanması (IE7): Aşırı Nem (BE20), Yağmur (BE21) ve Serpinti (BE22) temel olayları Yükün Terminalde/Stok Sahasında Islanması (IE7) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında BE20, BE21 ve BE22 temel olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE7 ara olayına bağlanmıştır.

Yükün Mavnada Islanması (BE23): Nikel madeni yükünün stok sahasından ya da maden sahasından gemiye mavnalarla transfer edilmesi sürecinde yağmur, nem ya da denizden gelen serpintiler nedeniyle ıslanması durumunu ifade etmektedir.

Yükün Maden Sahasında Islanması (BE24): Nikel madeni yükünün stok sahasında yağmur, nem gibi atmosfer şartlarına maruz kalması durumunu ifade etmektedir.

Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi (BE25): Gemilere yüklenen yükler için yükün satıcısı, yükleyicisi veya terminal tarafından gemiye yük ile ilgili bilgilerin olduğu çeşitli (örneğin Cargo Information, MSDS) dokümanlar verilir. Nikel madeni yükünün yüklendiği limanlardan gemilere verilen dokümanlarda yükün nem içeriği bilgisi olmalıdır. Bu bilginin doğruluğu yükün sıvılaşma riskinin önüne geçebilmek için önemlidir.

Terminal Kaynaklı Hatalar (IE14): Yükün Terminalde/Stok Sahasında Islanması (IE7) ara olayı ile Yükün Mavnada Islanması (BE23), Yükün Maden Sahasında Islanması (BE24) ve Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi (BE25) temel olayı Terminal Kaynaklı Hatalar (IE14) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında IE7 ara olayı ile, BE23, BE24 ve BE25 temel olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE14 ara olayına bağlanmıştır.

Yanlış Yük Örneği (BE26): Yüklemeden önce yükün nem içeriğini tespit edebilmek için gemi tarafından bazı testler (Can Test/Teneke Kutu Testi gibi) yapılmaktadır. Test etmek üzere alınan yük örneğinin yükün hangi bölgesinden alınacağı ve nasıl alınacağı ile ilgili yapılan hatayı ifade etmektedir.

IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek (BE27): Nikel madeni gibi sıvılaştırılabilen A Grubu yüklerin yüklenmesi ve taşınması ile ilgili hem IMSBC kodunun hem de taşıtan, taşıyan, yükleyen tarafların talimatlar ile bildirilen yükleme-taşıma prosedürlerinin takip edilmemesi durumunu ifade etmektedir.

Yanlış Yük Tanımlaması (BE28): IMSBC Koduna göre A grubu sınıfında bulunan sıvılaştırılabilir yüklerin yüklenmesinden önce yükleyiciler tarafından kiracılara veya nakliyecilere yük hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Ancak bazen yükleyiciler evrak üzerinde IMSBC Kodunda detaylandırıldığı gibi katı dökme yük isimleri yerine yükün ticari ismini kullanırlar. Bu nedenle yanlış yük tanımlaması durumu ortaya çıkar.

Hatalı Can Test (Teneke Kutu Testi) Uygulaması (BE29): Yüklemeden önce yükün nem içeriğini tespit edebilmek için gemi tarafından Can Test/Teneke Kutu Testi yapılmaktadır. Yükün nem içeriğinin mümkün olduğu kadar doğru tespit edilebilmesi için bu testin tavsiye edilen prosedürler çerçevesinde doğru bir şekilde yapılması önem arz etmektedir.

MSDS'lerin Anlaşılmasız/Yanlış Anlaşılması (BE30): Deniz Emniyeti Bilgi Formları (MSDS) deniz yolu taşımacılığında tehlikeli maddelerin emniyetli taşınması için önemli bir belgedir. Yük ile ilgili ayrıntılı bilgi sağlayan bir belgedir. Bu yüzden yük ile ilgili olarak MSDS'lerin içerdiği teknik bilgilerin doğru anlaşılması yükün emniyeti açısından önem arz etmektedir.

Operasyonel Hatalar-2 (IE12): Yanlış Yük Örneği (BE26), IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek (BE27), Yanlış Yük Tanımlaması (BE28), Hatalı Can Test (Teneke Kutu Testi) Uygulaması (BE29) ve MSDS'lerin Anlaşılmasız/Yanlış Anlaşılması (BE30) temel olayları Operasyonel Hatalar-2 (IE12) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında BE26, BE27, BE28, BE29 ve BE30 temel olayları "VEYA" bağlacı ile IE12 ara olayına bağlanmıştır.

Emniyet Kültürü Eksikliği (BE31): Gemi personeli tarafından emniyet bilincinin tam olarak içselleştirilmemesi sebebiyle kuralların esnetilmesi veya hiç uygulanmaması neticesinde birçok kaza ve tehlikeli olay yaşanmaktadır. Emniyet kültürü sadece kendimizi değil beraber çalıştığımız insanları, gemiyi ve yükü korumak özümsemesi gereken bir

olgudur. Nikel madeni gibi sıvılaşıma tehlikesi olan yükler için de, yükün yüklenmesinden tahliye edilmesine kadar her aşamada emniyet bilinci çerçevesinde takibi önem arz etmektedir.

İhmal (BE32): Yükleme aşamasında yükün görsel kontrolü, numune alınması, numunelerin test edilmesi, yükün ambar içerisindeki durumunun kontrol edilmesi ihmal edilmemesi gerekir. Zaman zaman tebliğ edilen bilgilere güven, zaman zaman da problem olmaz düşüncesi ile yapılması gereken test ve kontroller sorumlu zabıtlar tarafından ihmal edilebilir.

Aşırı Özgüven (BE33): Yükleme sürecinde sorumlu zabıtların yükün nem içeriğini tespit etme aşamasında yükü test ederek yükün nem içeriğini tespit etmek yerine, görsel kontrol veya elle dokunarak kontrol marifetiyle tespit etmelerinden kaynaklanan bir hatadır.

Zaman Baskısı (BE34): Nikel madeni gibi yüklerin yükleme operasyonları genel olarak açıkta demirde yapılmaktadır. Bu yüzden de yükleme süreci oldukça uzun sürebilmektedir. Sürecin uzaması sonucu geminin yetkili personeli (Kaptan ve sorumlu zabıtlar) sürecin daha fazla uzamaması için yapmaları gereken testleri yapmaktan ve uygulamaları gereken yükleme prosedürleri uygulamaktan imtina edebilirler.

Şirket Baskısı (BE35): Yükleme sürecinin uzaması neticesinde yüklemenin mümkün olan kısa bir zamanda tamamlanması için zaman zaman gemi sahibi şirketler/işletmeler, yükleyici firmalar veya kiracılar tarafından gemi personeline baskı uygulanması durumları söz konusu olabilmektedir.

Liman Otoritesi Baskısı (BE36): Yükleme sürecinin uzaması neticesinde yüklemenin mümkün olan kısa bir zamanda tamamlanması için zaman zaman liman otoriteleri tarafından gemi personeline baskı uygulanması durumları söz konusu olabilmektedir.

Yüklemeye Uygun Olmayan Yükün Kabul Edilmesi (IE8): Emniyet Kültürü Eksikliği (BE31), İhmal (BE32), Aşırı Özgüven (BE33), Zaman Baskısı (BE34), Şirket Baskısı (BE35) ve Liman Otoritesi Baskısı (BE36) temel olayları Yüklemeye Uygun Olmayan Yükün Kabul Edilmesi (IE8) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında BE31, BE32, BE33, BE34, BE35 ve BE36 temel olayları "VEYA" bağlacı ile IE8 ara olayına bağlanmıştır.

Yönetimsel Hatalar (IE13): Hata ağacı diyagramında doğrudan Yüklemeye Uygun Olmayan Yükün Kabul Edilmesi (IE8) ara olayına bağlı bir ara olaydır. Dolaylı olarak ise

BE31, BE32, BE33, BE34, BE35 ve BE36 temel olaylarının ‘‘VEYA’’ bağlacı ile bağlanması ile oluşan ara olaydır.

Gemi Kaynaklı Hatalar (IE15): Operasyonel Hatalar-2 (IE12) ve Yönetimsel Hatalar (IE13) ara olayları Gemi Kaynaklı Hatalar (IE15) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında IE12 ve IE13 ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE15 ara olayına bağlanmıştır.

Hatalı TNL/Nem içeriği Testi (BE37): Nikel madeni yükünün nem içeriği ve TNL testleri laboratuvar şartlarında yapılarak mümkün olduğu kadar doğru neticeler alınmaya çalışılır. Fakat zaman zaman bu testler hatalı yapılabilmektedir.

Yanlış Beyan (BE38): Laboratuvar şartlarında yapılan testler neticesinde elde edilen sonuçlar gerek bilerek gerek gözden kaçması nedeniyle gemilere/nakliyecilere yanlış beyan edilebilmektedir.

Laboratuvar Kaynaklı Hatalar (IE9): Hatalı TNL/Nem içeriği Testi (BE37) ve Yanlış Beyan (BE38) temel olayları Laboratuvar Kaynaklı Hatalar (IE9) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında BE37 ve BE38 temel olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE9 ara olayına bağlanmıştır.

Bağımsız Sorveyör Atanmaması (BE39): Gemi sahibi şirketler/işletme firmaları, kiracılar, yükleyiciler aralarında anlaşarak nikel madeni yükü konusunda uzman ortak bir bağımsız yük sorveyörü atamaları gerekir. Bağımsız bir sorveyör atanması yükün emniyeti ve geminin selameti açısından önemlidir.

Sorveyör Atanmaması (BE40): Gemi sahibi şirketleri ya da işletme firmalarının özellikle terminal kaynaklı ve laboratuvar kaynaklı hataların önüne geçmek için nikel madeni yükü konusunda uzman bir yük sorveyörü atamaları yükün emniyeti ve geminin selameti açısından önemlidir.

Ek Gözlem Hataları (IE16): Laboratuvar Kaynaklı Hatalar (IE9) ara olayı ile Bağımsız Sorveyör Atanmaması (BE39) ve Sorveyör Atanmaması (BE40) temel olayları Ek Gözlem Hataları (IE16) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında IE9 ara olayı ile BE39 ve BE40 temel olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE16 ara olayına bağlanmıştır.

Yüksek Nemli Yük Yüklenmesi (IE18): Terminal Kaynaklı Hatalar (IE14), Gemi Kaynaklı Hatalar (IE15) ve Ek Gözlem Hataları (IE16) ara olayları Yüksek Nemli Yük Yüklenmesi (IE18) ara olayını oluşturmaktadır. Hata ağacı diyagramında IE14, IE15 ve IE16 ara olayları ‘‘VEYA’’ bağlacı ile IE18 ara olayına bağlanmıştır.

Hata ağacı diyagramında Sefer Esnasında Sıvılaşma (IE17) ve Yüksek Nemli Yük Yüklmesi (IE18) ara olayları da “VEYA” bağlacı ile Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşması tepe olayına bağlanmıştır.

Bu hataların dışında “Eğitim Eksikliği” de nikel madeni yükünün sıvılaşmasına etki eden temel olaylardandır. Hata ağacı diyagramında doğrudan (11 adet) ve dolaylı olarak (10 adet) eğitim eksikliğinden kaynaklanan temel olaylar olduğu için “Eğitim Eksikliği” ayrıca hata ağacı diyagramına eklenmemiştir. Doğrudan ve dolaylı olarak eğitim eksikliğinden kaynaklanan temel olaylar Tablo 11 ve Tablo 12’de listelenmiştir.

Tablo 11. Doğrudan Eğitim Eksikliğinden Kaynaklanan Hatalar

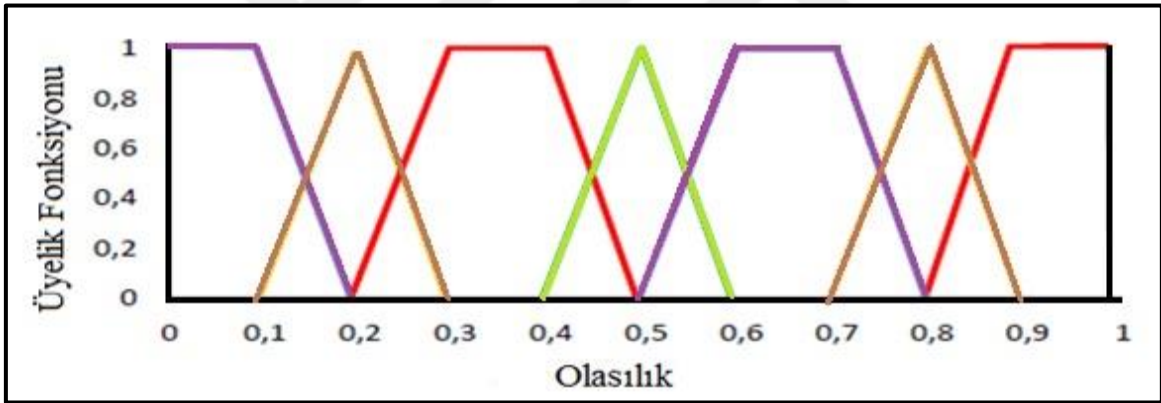
Hata No	FTA Tanımı	Doğrudan Eğitim Eksikliğinden Kaynaklanan Hatalar
1	BE3	Hatalı Pompa Operasyonu
2	BE14	Tirimsiz/Haplanmamış Yük
3	BE15	Yanlış Yük/Ağırlık Dağılımı
4	BE16	Seyir Sırasında Yetersiz Yük Kontrolü/Takibi
5	BE17	Seyir Sırasında Yetersiz Ambar Sintinesi Kontrolü/Takibi
6	BE19	Hava Raporlarını Gerektiği gibi Takip Etmemek
7	BE26	Yanlış Yük Örneği
8	BE27	IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek
9	BE29	Hatalı Can Test (Teneke Kutu Testi) Uygulaması
10	BE30	MSDS'lerin Anlaşılmması/Yanlış Anlaşılması
11	BE37	Hatalı TNL/Nem İçeriği Testi

Tablo 12. Dolaylı Olarak Eğitim Eksikliğinden Kaynaklanan Hatalar

Hata No	FTA Tanımı	Dolaylı Olarak Eğitim Eksikliğinden Kaynaklanan Hatalar
1	BE4	Kapağın Tam Kapatılmaması
2	BE7	Baskı Seallerinin Uygulanmaması
3	BE9	Menholün Tam Kapatılmaması
4	BE23	Yükün Mavnada Islanması
5	BE24	Yükün Maden Sahasında Islanması
6	BE25	Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi
7	BE28	Yanlış Yük Tanımlaması
8	BE32	İhmal
9	BE33	Aşırı Özgüven
10	BE38	Yanlış Beyan

2.2.4. Uzman Kararlarından İhtimallerin Elde Edilmesi

Şekil 29'da gösterilen nikel madeni yükünün sıvılaşmasına ait hata ağacı diyagramına göre, tepe olay (TE) için tanımlanan toplam 40 temel olay (BE) ve 18 ara olay (IE) vardır. Herbiri başarısızlık oranları bilinmeyen hatalar olduğundan dolayı BE'lerin başarısızlık oranlarının olasılıkları uzman görüşleriyle tahmin edilmektedir. Dolayısıyla, TE'nin (nikel madeni yükünün sıvılaşması) meydana gelme olasılığını hesaplamak için BE'lerin olasılıkları birleştirilmiştir. Her BE için hata olasılığı verisi bulunmadığından tahmin yapmak için denizcilik uzmanlarının görüşleri kullanılmıştır. Bu bağlamda BE'lerin arıza olasılıklarının elde edilmesinde bulanık mantık çözüm olarak kullanılmıştır. Denizcilik uzmanlarının dilsel ifadeleri bulanık sayılara dönüştürülmüştür. (Kuzu vd., 2019; Şahin, 2017). Bu anlayışla, Şekil 31 bulanık derecelendirme ve üyelik fonksiyonlarını göstermektedir.



Şekil 30. Bulanık derecelendirme ve üyelik fonksiyonları (Senol, 2015)

Dilsel ifadeler Chen ve Hwang (Chen ve Hwang, 1992) tarafından geliştirilen uygun sayısal yaklaşım yöntemi kullanılarak bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Tablo 13'te gösterilen standartlaştırılmış yedi seviyeli dilsel ölçekler Çok Düşük (VL), Düşük (L), Hafif Düşük (ML), Orta (M), Hafif Yüksek (MH), Yüksek (H), Çok Yüksek (VH) dilsel ifadeleri bulanık sayılara dönüştürmek amacıyla kullanılacaktır.

Tablo 13. Ölçeğin Bulanık Sayı Kümeleri (Şenol, 2015)

Dilsel Terimler	Bulanık Kümeler
Çok Düşük (VL)	(0,0,0.1,0.2)
Düşük (L)	(0.1,0.2,0.2,0.3)
Hafif Düşük (ML)	(0.2,0.3,0.4,0.5)
Orta (M)	(0.4,0.5,0.5,0.6)
Hafif Yüksek (MH)	(0.5,0.6,0.7,0.8)
Yüksek (H)	(0.7,0.8,0.8,0.9)
Çok Yüksek (VH)	(0.8,0.9,1,1)

Tablo 9'da ifade edildiği gibi karar verici denizcilik uzmanları homojen değildir. Bu nedenle bir nitelik hakkındaki fikirleri aynı olmayabilir. Böyle karar verici uzman gruplarına homojen olmayan (heterojen) uzman grubu adı verilmektedir (Ölcer ve Odabaşı, 2005). Bu nedenle, uygulamanın birleştirme aşamasında uzman yargılarının etki düzeyini tespit etmek için kullanılan ağırlık faktörünün tanıtılması önemlidir. Ağırlık faktörünün kullanılması, daha doğru analiz yapılmasına ve ayrıca uzmanlık seviyelerindeki değişikliklerin bulanık mantık dâhilinde çalışma sonuçlarını nasıl etkileyebileceğine dair fikir edinmek için duyarlılık analizi yapılmasına yol açabilir. Ankete katılan denizcilik uzmanlarının profillerine göre ağırlıkları Tablo 14'de gösterilmektedir.

Tablo 14. Ankete Katılan Denizcilik Uzmanlarının Ağırlıkları

Uzman Numarası	Ağırlık Faktörü				Toplam Ağırlık	Ağırlıklandırma Değeri
E1	2	2	3	5	12	0,07
E2	4	3	4	5	16	0,10
E3	2	2	4	5	13	0,08
E4	2	1	4	4	11	0,07
E5	5	4	4	4	17	0,10
E6	5	5	5	3	18	0,11
E7	4	4	1	3	12	0,07
E8	2	1	3	5	11	0,07
E9	3	2	3	5	13	0,08
E10	1	3	1	3	8	0,05
E11	4	3	1	4	12	0,07
E12	3	3	2	4	12	0,07
E13	4	4	1	1	10	0,06

2.2.5. Toplama ve Durulaştırma Aşamaları

Nikel madeni yükünün sıvılaşmasının her bir temel olayının (BE) olasılıkları için toplanan uzman kararlarından sonra, toplama adımlarına geçilir. Denizcilik uzmanlarının toplama adamlarını hesaplamak için 8, 9, 10, 11 ve 12 numaralı denklemler kullanılmıştır. Uzlaşma katsayısının elde edilebilmesi için gerekli β değeri tüm uzmanlar için 0,5 olarak belirlenmiştir. BEX40'ın toplama süreci ve yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 15, 16, 17 ve 18'de gösterilmiştir.

Tablo 15. $\tilde{R}_u = (r_{u1}, r_{u2}, r_{u3}, r_{u4})$ Uzmanların BEx40 için fikirleri

Uzmanların Fikirleri				
Uzmanlar	ru1	ru2	ru3	ru4
E1	0,5	0,6	0,7	0,8
E2	0,8	0,9	1,0	1,0
E3	0,7	0,8	0,8	0,9
E4	0,8	0,9	1,0	1,0
E5	0,7	0,8	0,8	0,9
E6	0,7	0,8	0,8	0,9
E7	0,7	0,8	0,8	0,9
E8	0,5	0,6	0,7	0,8
E9	0,5	0,6	0,7	0,8
E10	0,5	0,6	0,7	0,8
E11	0,7	0,8	0,8	0,9
E12	0,8	0,9	1,0	1,0
E13	0,7	0,8	0,8	0,9

Tablo 16. Uzmanların Benzerlik Fonksiyonları ve Benzerlik Fonksiyonlarının Her Bir BE İçin Değerleri

	Benzerlik Fonksiyonları	Benzerlik Fonksiyonlarının Değerleri																			
		BE1	BE2	BE3	BE4	BE5	BE6	BE7	BE8	BE9	BE10	BE11	BE12	BE13	BE14	BE15	BE16	BE17	BE18	BE19	BE20
1	S(E1&E2)	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,88	1,00	0,70
2	S(E1&E3)	1,00	0,88	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,70	0,70	1,00	1,00	0,85
3	S(E1&E4)	0,85	1,00	0,70	0,70	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,70	0,85	0,88	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,70
4	S(E1&E5)	1,00	0,88	0,85	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,88	1,00	0,70
5	S(E1&E6)	1,00	0,73	1,00	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	0,70	1,00	0,70	1,00	1,00	0,88	0,85	0,85
6	S(E1&E7)	1,00	0,53	0,70	0,70	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,88	0,85	0,70
7	S(E1&E8)	0,85	0,73	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,70	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	S(E1&E9)	1,00	0,88	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,70	1,00	1,00	0,88	1,00	0,70
9	S(E1&E10)	0,70	1,00	0,70	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,88	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00
10	S(E1&E11)	0,85	0,73	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,88	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,88	1,00	0,85
11	S(E1&E12)	1,00	0,88	0,85	0,85	1,00	0,70	1,00	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	0,70	1,00	0,70	0,85	0,88	1,00	1,00	1,00
12	S(E1&E13)	0,85	0,88	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,88	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00
13	S(E2&E3)	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,88	0,85	1,00	1,00	0,85	0,70	0,88	1,00	0,85
14	S(E2&E4)	1,00	0,88	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00
15	S(E2&E5)	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,73	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00
16	S(E2&E6)	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,73	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85
17	S(E2&E7)	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,88	1,00	0,70	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00
18	S(E2&E8)	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,70	1,00	0,70	0,70	1,00	0,85	1,00	0,88	1,00	0,70
19	S(E2&E9)	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,88	0,85	0,70	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00
20	S(E2&E10)	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	1,00	0,85	1,00	0,88	0,85	0,70
21	S(E2&E11)	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,55
22	S(E2&E12)	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,73	0,85	0,85	0,85	1,00	0,88	0,88	1,00	0,70

Tablo 16'nın devamı (1)

	Benzerlik Fonksiyonları	Benzerlik Fonksiyonlarının Değerleri																			
		BE1	BE2	BE3	BE4	BE5	BE6	BE7	BE8	BE9	BE10	BE11	BE12	BE13	BE14	BE15	BE16	BE17	BE18	BE19	BE20
23	S(E2&E13)	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,70
24	S(E3&E4)	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,88	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	1,00	0,85	0,85
25	S(E3&E5)	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,70	0,70	0,88	1,00	0,85
26	S(E3&E6)	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,70	0,70	0,88	0,85	1,00
27	S(E3&E7)	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,70	1,00	0,70	0,85	0,88	0,85	0,85
28	S(E3&E8)	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,88	0,85	0,70	1,00	0,70	0,70	1,00	1,00	0,85
29	S(E3&E9)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,70	0,85	0,70	0,70	0,88	1,00	0,85
30	S(E3&E10)	0,70	0,88	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,88	1,00	0,70	1,00	0,70	0,70	1,00	0,85	0,85
31	S(E3&E11)	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,70	0,85	0,88	1,00	0,85	1,00	0,70	0,70	0,88	1,00	0,70
32	S(E3&E12)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,58	1,00	1,00	0,85
33	S(E3&E13)	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	1,00	1,00	0,85	1,00	0,88	0,85	0,70	1,00	0,70	0,70	0,88	0,85	0,85
34	S(E4&E5)	0,85	0,88	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	0,73	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	0,88	0,85	1,00
35	S(E4&E6)	0,85	0,73	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	0,73	0,70	1,00	0,85	0,85	1,00	0,88	0,70	0,85
36	S(E4&E7)	0,85	0,58	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	0,88	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,88	1,00	1,00
37	S(E4&E8)	1,00	0,73	0,85	0,70	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,70	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,70
38	S(E4&E9)	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,70	0,85	0,85	1,00	0,88	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,88	0,85	1,00
39	S(E4&E10)	0,85	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,70
40	S(E4&E11)	1,00	0,73	1,00	0,70	1,00	0,85	0,85	0,70	0,85	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,88	0,85	0,55
41	S(E4&E12)	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	0,70	1,00	0,70	0,85	1,00	1,00	0,73	0,70	1,00	0,85	1,00	0,88	1,00	0,85	0,70
42	S(E4&E13)	1,00	0,88	1,00	0,70	0,70	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	0,88	1,00	0,70
43	S(E5&E6)	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85
44	S(E5&E7)	1,00	0,75	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,70	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00

Tablo 16'nın devamı (2)

	Benzerlik Fonksiyonları	Benzerlik Fonksiyonlarının Değerleri																			
		BE1	BE2	BE3	BE4	BE5	BE6	BE7	BE8	BE9	BE10	BE11	BE12	BE13	BE14	BE15	BE16	BE17	BE18	BE19	BE20
45	S(E5&E8)	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,70	0,85	0,85	1,00	1,00	0,70	0,73	0,70	0,70	1,00	1,00	1,00	0,88	1,00	0,70
46	S(E5&E9)	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,55	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
47	S(E5&E10)	0,70	0,88	0,85	0,70	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,85	0,70	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	0,70
48	S(E5&E11)	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,70	0,70	1,00	1,00	1,00	0,70	0,73	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,55
49	S(E5&E12)	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,55	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,88	0,88	1,00	0,70
50	S(E5&E13)	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,70
51	S(E6&E7)	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,70	0,85	0,85	1,00	1,00	0,70	0,73	0,55	0,85	0,85	1,00	1,00	0,88	0,85	0,85
52	S(E6&E8)	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,70	0,85	0,85	1,00	1,00	0,70	0,73	0,55	0,85	0,85	1,00	1,00	0,88	0,85	0,85
53	S(E6&E9)	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,55	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85
54	S(E6&E10)	0,70	0,73	0,70	0,70	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,70	0,85	0,85	1,00	1,00	0,88	0,70	0,85
55	S(E6&E11)	0,85	1,00	0,70	0,70	0,85	0,70	0,70	1,00	1,00	1,00	0,70	0,73	0,70	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	0,70
56	S(E6&E12)	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,55	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,88	0,88	0,85	0,85
57	S(E6&E13)	0,85	0,85	0,70	0,70	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,70	0,85
58	S(E7&E8)	0,85	0,85	0,85	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,88	0,70	1,00	1,00	1,00	0,85	0,88	0,85	0,70
59	S(E7&E9)	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00
60	S(E7&E10)	0,70	0,58	1,00	0,70	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	0,88	1,00	0,70
61	S(E7&E11)	0,85	0,85	1,00	0,70	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,88	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,55
62	S(E7&E12)	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,88	0,85	0,70
63	S(E7&E13)	0,85	0,70	1,00	0,70	0,70	0,70	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70
64	S(E8&E9)	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,70	0,88	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,88	1,00	0,70
65	S(E8&E10)	0,85	0,73	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00
66	S(E8&E11)	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,88	1,00	0,85

Tablo 16'nın devamı (3)

	Benzerlik Fonksiyonları	Benzerlik Fonksiyonlarının Değerleri																			
		BE1	BE2	BE3	BE4	BE5	BE6	BE7	BE8	BE9	BE10	BE11	BE12	BE13	BE14	BE15	BE16	BE17	BE18	BE19	BE20
67	S(E8&E12)	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70	0,73	0,55	0,85	0,85	0,85	0,88	1,00	1,00	1,00
68	S(E8&E13)	1,00	0,85	0,85	1,00	0,70	0,70	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00
69	S(E9&E10)	0,70	0,88	0,85	0,85	0,85	0,70	0,70	0,85	0,85	1,00	0,85	0,88	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,88	0,85	0,70
70	S(E9&E11)	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	1,00	1,00	0,85	0,70	0,88	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,55
71	S(E9&E12)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	1,00	0,85	0,88	0,88	1,00	0,70
72	S(E9&E13)	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,55	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,88	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	0,70
73	S(E10&E11)	0,85	0,73	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	0,85
74	S(E10&E12)	0,70	0,88	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,70	0,85	0,85	0,85	0,88	1,00	0,85	1,00
75	S(E10&E13)	0,85	0,88	1,00	1,00	0,70	0,85	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	1,00	1,00
76	S(E11&E12)	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,70	0,73	0,70	1,00	0,85	0,85	0,88	0,88	1,00	0,85
77	S(E11&E13)	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70	0,70	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85
78	S(E12&E13)	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,55	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,85	0,85	0,85	0,85	0,88	0,88	0,85	1,00

Tablo 16'nın devamı (4)

	Benzerlik Fonksiyonları	Benzerlik Fonksiyonlarının Değerleri																			
		BE21	BE22	BE23	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE30	BE31	BE32	BE33	BE34	BE35	BE36	BE37	BE38	BE39	BE40
1	S(E1&E2)	0,85	0,85	0,88	0,88	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85
2	S(E1&E3)	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85
3	S(E1&E4)	0,85	0,70	0,70	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,73	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,70
4	S(E1&E5)	0,73	1,00	0,88	0,88	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	0,70	0,70
5	S(E1&E6)	0,73	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	0,70	0,70
6	S(E1&E7)	0,85	0,70	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,70
7	S(E1&E8)	1,00	0,70	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	0,70	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70	0,85	1,00	1,00
8	S(E1&E9)	0,73	0,85	1,00	1,00	0,70	0,88	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,70	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85
9	S(E1&E10)	0,85	0,70	0,70	0,70	0,70	0,85	0,85	0,85	0,70	0,70	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00
10	S(E1&E11)	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00
11	S(E1&E12)	0,73	0,85	0,85	0,88	0,88	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,73	0,70	0,85	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	0,85	0,85
12	S(E1&E13)	0,85	1,00	0,70	1,00	0,88	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00
13	S(E2&E3)	0,85	0,85	0,73	0,73	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,88	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00
14	S(E2&E4)	1,00	0,55	0,58	0,88	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85
15	S(E2&E5)	0,88	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,73	1,00	0,85	0,85	0,88	1,00	0,85	0,55	0,55	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85
16	S(E2&E6)	0,88	0,85	0,88	0,88	1,00	1,00	0,73	1,00	0,85	0,85	0,88	1,00	0,85	0,55	0,55	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85
17	S(E2&E7)	1,00	0,55	0,73	0,88	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,88	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85
18	S(E2&E8)	0,85	0,55	0,73	0,58	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	0,73	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85	0,70	0,70	0,85	0,85
19	S(E2&E9)	0,88	1,00	0,88	0,88	0,70	0,88	1,00	0,85	1,00	1,00	0,73	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	1,00	0,85	1,00	1,00
20	S(E2&E10)	1,00	0,55	0,58	0,58	0,70	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,73	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85
21	S(E2&E11)	1,00	1,00	0,73	0,88	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,88	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85
22	S(E2&E12)	0,88	1,00	0,73	1,00	0,88	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,88	0,70	1,00	1,00

Tablo 16'nın devamı (5)

	Benzerlik Fonksiyonları	Benzerlik Fonksiyonlarının Değerleri																			
		BE21	BE22	BE23	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE30	BE31	BE32	BE33	BE34	BE35	BE36	BE37	BE38	BE39	BE40
23	S(E2&E13)	1,00	0,85	0,58	0,88	0,88	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,88	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85
24	S(E3&E4)	0,85	0,70	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85
25	S(E3&E5)	0,73	1,00	0,73	0,73	0,85	1,00	0,73	1,00	0,85	0,70	1,00	1,00	1,00	0,70	0,70	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85
26	S(E3&E6)	0,73	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,73	1,00	0,85	0,70	1,00	1,00	1,00	0,70	0,70	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85
27	S(E3&E7)	0,85	0,70	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85
28	S(E3&E8)	1,00	0,70	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,70	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85
29	S(E3&E9)	0,73	0,85	0,85	0,85	0,85	0,88	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00
30	S(E3&E10)	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	0,70	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85
31	S(E3&E11)	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,70	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85
32	S(E3&E12)	0,73	0,85	1,00	0,73	0,73	1,00	0,85	1,00	0,85	0,70	0,88	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,73	0,85	0,85	1,00
33	S(E3&E13)	0,85	1,00	0,85	0,85	0,73	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85
34	S(E4&E5)	0,88	0,70	0,58	0,88	0,85	1,00	0,88	0,85	0,85	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,70	1,00
35	S(E4&E6)	0,88	0,70	0,70	1,00	0,85	1,00	0,88	0,85	0,85	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85	0,70	1,00
36	S(E4&E7)	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,88	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00
37	S(E4&E8)	0,85	1,00	0,85	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70
38	S(E4&E9)	0,88	0,55	0,70	1,00	0,85	0,88	0,85	1,00	1,00	1,00	0,73	0,85	0,85	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
39	S(E4&E10)	1,00	1,00	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	0,70	1,00	0,70
40	S(E4&E11)	1,00	0,55	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,88	0,70	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,70	1,00	0,70
41	S(E4&E12)	0,88	0,55	0,85	0,88	0,73	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	1,00	1,00	1,00	0,73	1,00	0,85	0,85
42	S(E4&E13)	1,00	0,70	1,00	1,00	0,73	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,88	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	1,00	0,70
43	S(E5&E6)	1,00	1,00	0,88	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
44	S(E5&E7)	0,88	0,70	0,73	0,88	0,85	1,00	0,73	0,85	0,85	0,70	1,00	1,00	0,85	0,70	0,70	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00

Tablo 16'nın devamı (6)

	Benzerlik Fonksiyonları	Benzerlik Fonksiyonlarının Değerleri																			
		BE21	BE22	BE23	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE30	BE31	BE32	BE33	BE34	BE35	BE36	BE37	BE38	BE39	BE40
45	S(E5&E8)	0,73	0,70	0,73	0,58	0,85	0,85	0,73	0,70	0,70	0,70	0,85	0,70	0,85	0,70	0,70	0,85	0,70	0,85	0,70	0,70
46	S(E5&E9)	1,00	0,85	0,88	0,88	0,70	0,88	0,73	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,55	0,70	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85
47	S(E5&E10)	0,88	0,70	0,58	0,58	0,70	0,85	0,73	1,00	0,70	0,70	0,85	0,85	0,70	0,70	0,70	0,70	0,85	0,85	0,70	0,70
48	S(E5&E11)	0,88	0,85	0,73	0,88	1,00	1,00	0,88	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,70	0,55	0,85	1,00	0,85	0,70	0,70
49	S(E5&E12)	1,00	0,85	0,73	1,00	0,88	1,00	0,88	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85
50	S(E5&E13)	0,88	1,00	0,58	0,88	0,88	1,00	0,73	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,70	0,55	0,70	1,00	0,85	0,70	0,70
51	S(E6&E7)	0,73	0,70	0,85	0,70	0,85	0,85	0,73	0,70	0,70	0,70	0,85	0,70	0,85	0,70	0,70	0,85	0,70	0,85	0,70	0,70
52	S(E6&E8)	0,73	0,70	0,85	0,70	0,85	0,85	0,73	0,70	0,70	0,70	0,85	0,70	0,85	0,70	0,70	0,85	0,70	0,85	0,70	0,70
53	S(E6&E9)	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70	0,88	0,73	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,55	0,70	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85
54	S(E6&E10)	0,88	0,70	0,70	0,70	0,70	0,85	0,73	1,00	0,70	0,70	0,85	0,85	0,70	0,70	0,70	0,70	0,85	0,85	0,70	0,70
55	S(E6&E11)	0,88	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,70	0,55	0,85	1,00	0,85	0,70	0,70
56	S(E6&E12)	1,00	0,85	0,85	0,88	0,88	1,00	0,88	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,88	0,85	0,85	0,85
57	S(E6&E13)	0,88	1,00	0,70	1,00	0,88	1,00	0,73	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,70	0,55	0,70	1,00	0,85	0,70	0,70
58	S(E7&E8)	0,85	1,00	1,00	0,70	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	0,85	0,85	0,70
59	S(E7&E9)	0,88	0,55	0,85	1,00	0,85	0,88	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85
60	S(E7&E10)	1,00	1,00	0,85	0,70	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70
61	S(E7&E11)	1,00	0,55	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,70
62	S(E7&E12)	0,88	0,55	1,00	0,88	0,73	1,00	0,85	0,85	0,85	0,70	0,88	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	0,88	0,85	1,00	0,85
63	S(E7&E13)	1,00	0,70	0,85	1,00	0,73	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,70
64	S(E8&E9)	0,73	0,55	0,85	0,70	0,85	0,73	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,85	0,85
65	S(E8&E10)	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,70	1,00	1,00
66	S(E8&E11)	0,85	0,55	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,55	1,00	1,00	0,85	1,00	0,70	0,70	1,00	1,00

Tablo 16'nın devamı (7)

	Benzerlik Fonksiyonları	Benzerlik Fonksiyonlarının Değerleri																			
		BE21	BE22	BE23	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE30	BE31	BE32	BE33	BE34	BE35	BE36	BE37	BE38	BE39	BE40
67	S(E8&E12)	0,73	0,55	1,00	0,58	0,73	0,85	0,85	0,70	0,70	0,70	0,73	0,55	0,85	0,85	1,00	1,00	0,58	1,00	0,85	0,85
68	S(E8&E13)	0,85	0,70	0,85	0,70	0,73	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,85	0,55	0,85	1,00	0,85	0,85	0,70	0,70	1,00	1,00
69	S(E9&E10)	0,88	0,55	0,70	0,70	1,00	0,73	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	1,00	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85
70	S(E9&E11)	0,88	1,00	0,85	1,00	0,70	0,88	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85
71	S(E9&E12)	1,00	1,00	0,85	0,88	0,58	0,88	0,85	0,85	0,85	0,85	0,73	0,85	1,00	0,70	1,00	0,85	0,88	0,85	1,00	1,00
72	S(E9&E13)	0,88	0,85	0,70	1,00	0,58	0,88	1,00	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,85	0,70	1,00	0,85	0,85	0,85
73	S(E10&E11)	1,00	0,55	0,85	0,70	0,70	0,85	0,85	0,85	0,85	0,70	0,85	0,70	0,85	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00	1,00
74	S(E10&E12)	0,88	0,55	0,85	0,58	0,58	0,85	0,85	1,00	0,70	0,70	0,73	0,70	0,70	0,85	1,00	0,85	0,73	0,70	0,85	0,85
75	S(E10&E13)	1,00	0,70	1,00	0,70	0,58	0,85	1,00	0,85	0,70	0,85	0,85	0,70	0,70	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00
76	S(E11&E12)	0,88	1,00	1,00	0,88	0,88	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,88	1,00	0,85	0,85	0,85	1,00	0,88	0,70	0,85	0,85
77	S(E11&E13)	1,00	0,85	0,85	1,00	0,88	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00
78	S(E12&E13)	0,88	0,85	0,85	0,88	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	0,85	0,88	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,88	0,70	0,85	0,85

Tablo 17. Uzmanların Ortalama Uyum (AA), Göreceli Uyum (RA) ve Fikir Birliği Katsayılarının (CC) Herbir BE için Değerleri

Uzmanlar	BE1			BE2			BE3			BE4			BE5			BE6			BE7			BE8			BE9			BE10		
	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC
E1	0,91	0,08	0,08	0,83	0,07	0,07	0,80	0,07	0,07	0,85	0,08	0,07	0,93	0,08	0,08	0,86	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,93	0,08	0,07	0,79	0,07	0,07
E2	0,90	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,85	0,08	0,09	0,93	0,08	0,09	0,85	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,93	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,90	0,08	0,09
E3	0,91	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,85	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,86	0,08	0,08	0,83	0,07	0,08	0,93	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,79	0,07	0,07
E4	0,90	0,08	0,07	0,83	0,07	0,07	0,88	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07	0,86	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,79	0,07	0,07	0,91	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07
E5	0,91	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,83	0,07	0,09	0,93	0,08	0,09	0,78	0,07	0,09	0,85	0,07	0,09	0,89	0,08	0,09	0,93	0,08	0,09	0,89	0,08	0,09
E6	0,90	0,08	0,09	0,84	0,07	0,09	0,84	0,07	0,09	0,84	0,07	0,09	0,94	0,08	0,09	0,78	0,07	0,09	0,86	0,08	0,09	0,90	0,08	0,09	0,95	0,08	0,09	0,89	0,08	0,09
E7	0,91	0,08	0,08	0,73	0,06	0,07	0,88	0,08	0,07	0,89	0,08	0,08	0,89	0,08	0,07	0,85	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,91	0,08	0,07	0,93	0,08	0,08
E8	0,89	0,08	0,07	0,86	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,88	0,08	0,07	0,88	0,07	0,07	0,84	0,08	0,07	0,90	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,93	0,08	0,07	0,88	0,08	0,07
E9	0,91	0,08	0,08	0,92	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,83	0,07	0,08	0,94	0,08	0,08	0,76	0,07	0,07	0,85	0,07	0,08	0,90	0,08	0,08	0,94	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08
E10	0,78	0,07	0,06	0,81	0,07	0,06	0,88	0,08	0,06	0,85	0,08	0,06	0,89	0,08	0,06	0,85	0,08	0,06	0,83	0,07	0,06	0,91	0,08	0,06	0,90	0,07	0,06	0,91	0,08	0,06
E11	0,96	0,08	0,08	0,94	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,95	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,96	0,08	0,08	1,00	0,08	0,08	0,96	0,08	0,08
E12	0,93	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,75	0,07	0,07	0,90	0,08	0,08	0,90	0,08	0,07	0,94	0,08	0,08	0,88	0,08	0,07
E13	0,90	0,08	0,07	0,90	0,08	0,07	0,86	0,07	0,07	0,84	0,07	0,07	0,81	0,07	0,06	0,79	0,07	0,07	0,86	0,08	0,07	0,94	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07

Tablo 17'nin devamı (1)

Uzmanlar	BE11			BE12			BE13			BE14			BE15			BE16			BE17			BE18			BE19			BE20		
	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC
E1	0,90	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,89	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,81	0,07	0,07	0,94	0,08	0,08	0,95	0,08	0,08	0,93	0,08	0,07	0,94	0,08	0,08	0,84	0,08	0,08
E2	0,89	0,08	0,09	0,89	0,08	0,09	0,88	0,08	0,09	0,81	0,07	0,08	0,95	0,08	0,09	0,88	0,07	0,09	0,95	0,08	0,09	0,94	0,08	0,09	0,94	0,08	0,09	0,81	0,08	0,09
E3	0,90	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,89	0,08	0,08	0,81	0,07	0,08	0,95	0,08	0,08	0,74	0,06	0,07	0,70	0,06	0,07	0,93	0,08	0,08	0,94	0,08	0,08	0,85	0,08	0,08
E4	0,89	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07	0,90	0,08	0,07	0,95	0,08	0,07	0,88	0,07	0,07	0,95	0,08	0,07	0,93	0,08	0,07	0,88	0,07	0,07	0,81	0,08	0,07
E5	0,89	0,08	0,09	0,81	0,07	0,09	0,88	0,08	0,09	0,81	0,07	0,09	0,95	0,08	0,09	0,94	0,08	0,09	0,95	0,08	0,09	0,94	0,08	0,09	0,94	0,08	0,09	0,81	0,08	0,09
E6	0,86	0,08	0,09	0,81	0,07	0,09	0,75	0,07	0,09	0,89	0,08	0,09	0,88	0,07	0,09	0,94	0,08	0,09	0,95	0,08	0,09	0,93	0,08	0,09	0,84	0,07	0,09	0,86	0,08	0,09
E7	0,88	0,08	0,07	0,90	0,08	0,08	0,85	0,08	0,07	0,86	0,08	0,07	0,95	0,08	0,08	0,94	0,08	0,08	0,86	0,07	0,07	0,94	0,08	0,07	0,88	0,07	0,07	0,79	0,07	0,07
E8	0,81	0,07	0,07	0,88	0,08	0,07	0,76	0,07	0,07	0,86	0,08	0,07	0,94	0,08	0,07	0,94	0,08	0,07	0,95	0,08	0,07	0,92	0,08	0,07	0,94	0,08	0,07	0,86	0,08	0,07
E9	0,88	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,89	0,08	0,08	0,86	0,08	0,08	0,88	0,07	0,08	0,94	0,08	0,08	0,95	0,08	0,08	0,95	0,08	0,08	0,95	0,08	0,08	0,79	0,07	0,08
E10	0,89	0,08	0,06	0,89	0,08	0,06	0,89	0,08	0,06	0,88	0,08	0,06	0,95	0,08	0,06	0,94	0,08	0,06	0,95	0,08	0,06	0,92	0,08	0,06	0,86	0,07	0,06	0,83	0,08	0,06
E11	0,88	0,08	0,07	0,93	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,97	0,09	0,08	1,01	0,08	0,08	1,02	0,09	0,08	1,01	0,08	0,08	1,02	0,08	0,08	1,01	0,08	0,08	0,80	0,07	0,07
E12	0,88	0,08	0,07	0,84	0,07	0,07	0,78	0,07	0,07	0,89	0,08	0,08	0,88	0,07	0,07	0,86	0,07	0,07	0,85	0,07	0,07	0,92	0,08	0,07	0,95	0,08	0,08	0,84	0,08	0,08
E13	0,91	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07	0,88	0,08	0,07	0,86	0,08	0,07	0,94	0,08	0,07	0,95	0,08	0,07	0,95	0,08	0,07	0,95	0,08	0,07	0,86	0,07	0,07	0,85	0,08	0,07

Tablo 17'nin devamı (2)

Uzmanlar	BE21			BE22			BE23			BE24			BE25			BE26			BE27			BE28			BE29			BE30		
	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC
E1	0,83	0,07	0,07	0,85	0,08	0,08	0,84	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08	0,96	0,08	0,08	0,89	0,08	0,07	0,91	0,08	0,08	0,88	0,08	0,07	0,85	0,08	0,07
E2	0,92	0,08	0,09	0,79	0,08	0,09	0,75	0,07	0,08	0,83	0,08	0,09	0,88	0,08	0,09	0,96	0,08	0,09	0,90	0,08	0,09	0,90	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,89	0,08	0,09
E3	0,83	0,07	0,08	0,85	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08	0,82	0,07	0,08	0,87	0,08	0,08	0,96	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,83	0,07	0,08
E4	0,92	0,08	0,07	0,73	0,07	0,07	0,79	0,07	0,07	0,91	0,08	0,07	0,87	0,08	0,07	0,96	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07
E5	0,87	0,08	0,09	0,85	0,08	0,09	0,75	0,07	0,09	0,83	0,08	0,09	0,88	0,08	0,09	0,96	0,08	0,09	0,80	0,07	0,09	0,90	0,08	0,09	0,88	0,08	0,09	0,85	0,08	0,09
E6	0,87	0,07	0,09	0,88	0,08	0,10	0,85	0,08	0,09	0,88	0,08	0,09	0,89	0,08	0,09	0,95	0,08	0,09	0,80	0,07	0,09	0,90	0,08	0,09	0,88	0,08	0,09	0,85	0,08	0,09
E7	0,90	0,08	0,08	0,73	0,07	0,07	0,88	0,08	0,08	0,86	0,08	0,07	0,87	0,08	0,08	0,94	0,08	0,07	0,90	0,08	0,08	0,89	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07	0,83	0,07	0,07
E8	0,84	0,07	0,07	0,69	0,07	0,07	0,87	0,08	0,07	0,73	0,07	0,07	0,85	0,08	0,07	0,85	0,07	0,07	0,90	0,08	0,07	0,79	0,07	0,07	0,81	0,07	0,07	0,84	0,07	0,07
E9	0,88	0,08	0,08	0,83	0,08	0,08	0,87	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08	0,75	0,07	0,07	0,85	0,07	0,07	0,90	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08
E10	0,92	0,08	0,06	0,69	0,07	0,06	0,78	0,07	0,06	0,73	0,07	0,06	0,75	0,07	0,06	0,86	0,07	0,06	0,92	0,08	0,06	0,91	0,08	0,06	0,81	0,07	0,06	0,83	0,07	0,06
E11	0,98	0,09	0,08	0,86	0,08	0,08	0,95	0,09	0,08	0,97	0,09	0,08	0,95	0,09	0,08	1,05	0,09	0,08	0,96	0,08	0,08	0,97	0,08	0,08	0,98	0,09	0,08	0,92	0,08	0,08
E12	0,88	0,08	0,07	0,80	0,08	0,07	0,89	0,08	0,08	0,84	0,08	0,07	0,79	0,07	0,07	0,96	0,08	0,08	0,88	0,08	0,07	0,91	0,08	0,08	0,88	0,08	0,07	0,86	0,08	0,07
E13	0,92	0,08	0,07	0,88	0,08	0,07	0,78	0,07	0,07	0,90	0,08	0,07	0,81	0,07	0,07	0,96	0,08	0,07	0,92	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07	0,89	0,08	0,07

Tablo 17'nin devamı (3)

Uzmanlar	BE31			BE32			BE33			BE34			BE35			BE36			BE37			BE38			BE39			BE40		
	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC	AA	RA	CC
E1	0,86	0,07	0,07	0,84	0,08	0,07	0,91	0,08	0,08	0,85	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,85	0,08	0,07
E2	0,85	0,07	0,09	0,90	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,78	0,07	0,08	0,83	0,07	0,09	0,84	0,07	0,08	0,93	0,08	0,09	0,85	0,07	0,09	0,89	0,08	0,09	0,89	0,08	0,09
E3	0,92	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,89	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,86	0,07	0,08	0,91	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,89	0,08	0,08
E4	0,85	0,07	0,07	0,84	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,85	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,93	0,08	0,07	0,86	0,07	0,07	0,83	0,07	0,07	0,90	0,08	0,07	0,83	0,07	0,07
E5	0,92	0,08	0,09	0,90	0,08	0,09	0,90	0,08	0,09	0,74	0,07	0,09	0,69	0,06	0,08	0,84	0,07	0,09	0,93	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,78	0,07	0,09	0,83	0,07	0,09
E6	0,91	0,08	0,09	0,88	0,08	0,09	0,91	0,08	0,09	0,74	0,07	0,09	0,71	0,06	0,09	0,85	0,07	0,09	0,90	0,08	0,09	0,90	0,08	0,09	0,78	0,07	0,09	0,80	0,07	0,09
E7	0,89	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,89	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,89	0,08	0,08	0,78	0,07	0,07
E8	0,86	0,07	0,07	0,70	0,06	0,06	0,90	0,08	0,07	0,88	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,73	0,06	0,06	0,81	0,07	0,07	0,89	0,08	0,07	0,86	0,08	0,07
E9	0,86	0,07	0,08	0,91	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,79	0,07	0,08	0,91	0,08	0,08	0,84	0,07	0,08	0,94	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08
E10	0,87	0,08	0,06	0,81	0,07	0,06	0,79	0,07	0,06	0,89	0,08	0,06	0,90	0,08	0,06	0,85	0,07	0,06	0,85	0,07	0,06	0,85	0,07	0,06	0,90	0,08	0,06	0,85	0,08	0,06
E11	1,00	0,09	0,08	0,90	0,08	0,08	0,98	0,08	0,08	0,97	0,09	0,08	0,91	0,08	0,08	1,00	0,09	0,08	0,99	0,09	0,08	0,93	0,08	0,08	0,96	0,08	0,08	0,93	0,08	0,08
E12	0,84	0,07	0,07	0,81	0,07	0,07	0,90	0,08	0,07	0,84	0,08	0,07	0,90	0,08	0,08	0,91	0,08	0,08	0,82	0,07	0,07	0,80	0,07	0,07	0,90	0,08	0,08	0,88	0,08	0,08
E13	0,93	0,08	0,07	0,84	0,08	0,07	0,91	0,08	0,07	0,90	0,08	0,07	0,84	0,07	0,07	0,85	0,07	0,07	0,94	0,08	0,07	0,88	0,08	0,07	0,90	0,08	0,07	0,88	0,08	0,07

Nikel yükünün sıvılaşmasının potansiyel hata olasılıklarına ilişkin uzman görüşlerini bir araya getirerek toplulaştırılmış sonuçlar elde edildikten sonra bulanık sayıların net değerlere dönüştürülmesi için durulaştırma işlemi yapılması gerekmektedir. Bu amaca ulaşmak için denklem 13 ve 14 kullanılır. Tablo 18, her bir BE'nin toplu uzman görüşlerini ve durulaştırılmış başarısızlık olasılıklarını (CFP) göstermektedir.

Tablo 18. BE'lerin Toplu Uzman Görüşleri ve Durulaştırılmış Olasılıkları

BE	BE Başarısızlıklarına İlişkin Toplu Uzman Görüşleri				Durulaştırılmış Olasılıklar (CFP)
BE1	0,308	0,408	0,445	0,545	0,426
BE2	0,124	0,204	0,248	0,348	0,232
BE3	0,497	0,597	0,646	0,746	0,621
BE4	0,527	0,627	0,657	0,757	0,642
BE5	0,478	0,578	0,636	0,736	0,478
BE6	0,474	0,574	0,618	0,718	0,596
BE7	0,544	0,644	0,690	0,790	0,667
BE8	0,428	0,528	0,576	0,676	0,552
BE9	0,456	0,556	0,612	0,712	0,584
BE10	0,419	0,519	0,581	0,681	0,550
BE11	0,284	0,384	0,421	0,521	0,403
BE12	0,081	0,137	0,206	0,306	0,184
BE13	0,306	0,406	0,467	0,567	0,436
BE14	0,514	0,614	0,654	0,754	0,634
BE15	0,410	0,510	0,541	0,641	0,525
BE16	0,633	0,733	0,756	0,856	0,745
BE17	0,672	0,772	0,787	0,879	0,777
BE18	0,757	0,857	0,914	0,957	0,869
BE19	0,491	0,591	0,655	0,755	0,623
BE20	0,254	0,354	0,379	0,479	0,366
BE21	0,690	0,790	0,845	0,912	0,807
BE22	0,353	0,453	0,485	0,585	0,469
BE23	0,581	0,681	0,736	0,819	0,703
BE24	0,673	0,773	0,805	0,880	0,781
BE25	0,615	0,715	0,758	0,844	0,732
BE26	0,682	0,782	0,802	0,895	0,790
BE27	0,612	0,712	0,782	0,865	0,742
BE28	0,591	0,691	0,735	0,835	0,713
BE29	0,567	0,667	0,714	0,814	0,691
BE30	0,554	0,654	0,685	0,785	0,669

Tablo 18'in devamı

BE	BE Başarısızlıklarına İlişkin Toplu Uzman Görüşleri				Durulaştırılmış Olasılıklar (CFP)
BE31	0,666	0,766	0,817	0,895	0,785
BE32	0,503	0,603	0,661	0,761	0,632
BE33	0,437	0,537	0,591	0,691	0,564
BE34	0,458	0,558	0,620	0,720	0,589
BE35	0,372	0,472	0,495	0,595	0,484
BE36	0,517	0,617	0,670	0,770	0,644
BE37	0,646	0,746	0,774	0,867	0,758
BE38	0,538	0,638	0,687	0,787	0,663
BE39	0,585	0,685	0,716	0,816	0,700
BE40	0,539	0,639	0,672	0,772	0,655

2.2.7. Kesin Arıza Olasılığı (Crisp Failure Possibility/CFP) Değerlerinin Hata Olasılıklarına (Failure Probability/FP) Dönüştürülmesi

CFP'nin FP sürecine dönüştürülmesi için 15 ve 16 numaralı denklemler uygulanır. Tablo 19 tüm temel olayların hata olasılıklarını (FP), Tablo 20 ise sıralamalarını göstermektedir.

Tablo 19. Tüm Temel Olayların Hata Olasılıkları (FP)

XBE	FP	XBE	FP	XBE	FP	XBE	FP
XBE1	0,00288	XBE11	0,00237	XBE21	0,03739	XBE31	0,03202
XBE2	0,00037	XBE12	0,00017	XBE22	0,00399	XBE32	0,01201
XBE3	0,01121	XBE13	0,00311	XBE23	0,01881	XBE33	0,00772
XBE4	0,01276	XBE14	0,01212	XBE24	0,03122	XBE34	0,00908
XBE5	0,01019	XBE15	0,00597	XBE25	0,02261	XBE35	0,00446
XBE6	0,01495	XBE16	0,02452	XBE26	0,03306	XBE36	0,01291
XBE7	0,01130	XBE17	0,03035	XBE27	0,02412	XBE37	0,02673
XBE8	0,00712	XBE18	0,05943	XBE28	0,01999	XBE38	0,01453
XBE9	0,00882	XBE19	0,01131	XBE29	0,01736	XBE39	0,01847
XBE10	0,00706	XBE20	0,00173	XBE30	0,01515	XBE40	0,01390

Tablo 20. Temel Olayların Hata Olasılıklarına Göre Sıralanması (FP)

XBE	FP	XBE	FP	XBE	FP	XBE	FP
XBE18	0,05943	XBE28	0,01999	XBE14	0,01212	XBE10	0,00706
XBE21	0,03739	XBE23	0,01881	XBE32	0,01201	XBE15	0,00597
XBE26	0,03306	XBE39	0,01847	XBE19	0,01131	XBE35	0,00446
XBE31	0,03202	XBE29	0,01736	XBE7	0,01130	XBE22	0,00399
XBE24	0,03122	XBE30	0,01515	XBE3	0,01121	XBE13	0,00311
XBE17	0,03035	XBE6	0,01495	XBE5	0,01019	XBE1	0,00288
XBE37	0,02673	XBE38	0,01453	XBE34	0,00908	XBE11	0,00237
XBE16	0,02452	XBE40	0,01390	XBE9	0,00882	XBE20	0,00173
XBE27	0,02412	XBE36	0,01291	XBE33	0,00772	XBE2	0,00037
XBE25	0,02261	XBE4	0,01276	XBE8	0,00712	XBE12	0,00017

Tüm temel olayların (BE) hata olasılıkları elde edildikten sonra tepe olayın (TE) hata olasılığını hesaplamak mümkündür.

2.2.8. Tepe Olayın Hata Olasılığını Hesaplama

Tepe olay (TE) hata ağacı (FT) diyagramının en önemli olayıdır. Temel olaylar (BE) tepe olay (TE) olasılığını hesaplamak için tanımlanır. Bu durumda nikel yükü sıvılaşması en önemli olay olarak seçilmiştir. Boolean denklemleri, hata ağacının tepe olayının gerçekleşme olasılığını hesaplamak için kullanılır. TE'nin oluşma olasılığını hesaplamak için 17 numaralı denklem kullanılır. Denizcilik uzmanları tarafından oluşturulan FT diyagramı ve FT'de açıklanan mantık kapıları dikkate alındığında nikel yükünün sıvılaşmasının (TE) hata olasılığı 0,1192 olarak hesaplanmıştır.

Nikel yükü sıvılaşmasının (TE) meydana gelme olasılığı hesaplandıktan sonra, en üst olayın gerçekleşmesine neden olan temel olaylar kümesi olarak tanımlanabilecek çeşitli minimum kesme setler (Minimum Cut Sets/MCS) olduğundan dolayı, hata ağacı diyagramına bağlı olarak MCS belirlenmelidir. MCS sıralaması TE'nin ortaya çıkması sırasındaki önem derecesini belirtmektedir (Kuzu vd., 2019). Bu nedenle FT diyagramında yer alan MCS'lerin duyarlılık analizi için Fussell-Vesely Önem Ölçeği (F-VIM) kullanılmıştır. Analiz sonucunda 282 adet MCS elde edilmiştir. Tablo 21'de olasılık değeri en yüksek ilk 30 MCS listesi ve olasılık değerleri gösterilmiştir.

Tablo 21. Minimum Kesme Setleri (MCS) ve Olasılıkları (İlk 30 MCS)

Sıra	MCS	Olasılıklar	Sıra	MCS	Olasılıklar
1	BE6	0,01495	16	BE16XBE18	0,00145722
2	BE4	0,01276	17	BE2	0,00037
3	BE14	0,01212	18	BE12	0,00017
4	BE19	0,01131	19	BE21XBE26XBE37	3,3041E-05
5	BE7	0,0113	20	BE21XBE31XBE37	3,2002E-05
6	BE3	0,01121	21	BE24XBE26XBE37	2,7589E-05
7	BE5	0,01019	22	BE24XBE31XBE37	2,6721E-05
8	BE9	0,00882	23	BE21XBE27XBE37	2,4106E-05
9	BE8	0,00712	24	BE21XBE26XBE39	2,2831E-05
10	BE10	0,00706	25	BE21XBE31XBE39	2,2113E-05
11	BE15	0,00597	26	BE24XBE27XBE37	2,0128E-05
12	BE13	0,00311	27	BE25XBE26XBE37	1,998E-05
13	BE1	0,00288	28	BE21XBE28XBE37	1,9979E-05
14	BE11	0,00237	29	BE25XBE31XBE37	1,9352E-05
15	BE17XBE18	0,0018037	30	BE24XBE26XBE39	1,9064E-05

Fussell-Vesely Önem Ölçüğü, her bir MCS'nin, TE'nin ortaya çıkma olasılığına katkısının tanımlanmasına olanak tanır. Başka bir deyişle, her bir MCS'nin TE'nin oluşumunu ne kadar etkilediğini tanımlar. Sonuç olarak, sistematik risk değerlendirmelerinin performansını ve daha sonra uygun risk azaltma tedbirlerinin uygulanmasını kolaylaştırır (Kuzu vd., 2019). Hesaplamalar 18 numaralı denklem kullanılarak yapılmıştır ve her MCS olasılığının TE olasılığına bölünmesini içerir. Hesaplanan F-VIM değerleri, her MCS'nin duyarlılığı olarak bilinen, her MCS'nin TE'nin oluşumu üzerindeki orantılı etkisine karşılık gelir. Tablo 22'de de MCS'lerin (30 MCS) duyarlılık analizleri (F-VIM) gösterilmiştir.

Tablo 22. İlk 30 Minimum Kesme Setinin (MCS) Duyarlılık Analizi Sonuçları

TE=0,1192					
Sıra	MCS	F+VIM (W)	Sıra	MCS	F+VIM (W)
1	BE6	0,125419463	16	BE16XBE18	0,01222503
2	BE4	0,10704698	17	BE2	0,003104027
3	BE14	0,101677852	18	BE12	0,001426174
4	BE19	0,09488255	19	BE21XBE26XBE37	0,000277192
5	BE7	0,094798658	20	BE21XBE31XBE37	0,000268472
6	BE3	0,094043624	21	BE24XBE26XBE37	0,000231451
7	BE5	0,085486577	22	BE24XBE31XBE37	0,00022417
8	BE9	0,073993289	23	BE21XBE27XBE37	0,000202235
9	BE8	0,059731544	24	BE21XBE26XBE39	0,000191535
10	BE10	0,059228188	25	BE21XBE31XBE39	0,00018551
11	BE15	0,050083893	26	BE24XBE27XBE37	0,000168862
12	BE13	0,026090604	27	BE25XBE26XBE37	0,00016762
13	BE1	0,024161074	28	BE21XBE28XBE37	0,000167607
14	BE11	0,01988255	29	BE25XBE31XBE37	0,000162347
15	BE17XBE18	0,015131716	30	BE24XBE26XBE39	0,000159929

2.3. Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşma Nedenlerinin FMEA ile Risk Analizinin Gerçekleştirilmesi

Nikel madeni yükünün sıvılaşmasının sonuçları dökme kuru yük özellikle de nikel ve nikel madeni yükü gibi sıvılaşma riski olan yükleri taşıyan şirket, gemi, yük alıcısı, yük satıcısı ve diğer tüm paydaşları ilgilendiren son derece kritik sonuçlardır. Bu bölümde dökme yük gemileri için önemi son derece kritik olan nikel madeni yükünün sıvılaşması risk analizi uygulaması yürütülmüştür. Uygulama bulanık hata ağacı analizi ile elde edilen minimum kesme setlerinin olasılıkları tespit edildikten sonra FFTA-FMEA entegrasyonu ile yapılmıştır. Bulanık hata ağacı analizi aşamasında tespit edilmiş olan her bir temel olay BE1 ile BE40 arasında kodlanmıştır. FFTA-FMEA entegrasyonu uygulaması ve elde edilen verilerle ilgili çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

2.3.1. FFTA-FMEA Entegrasyonu ile Hata Türleri ve Etki Analizi

2.3.1.1. Hata Türlerinin Olasılıklarının Derecelendirilmesi

Olası hatalar bulanık hata ağacı analizi aşamasında temel olay olarak belirlenmiştir. Belirlenen temel hatalardan hata ağacı vasıtasıyla minimum kesme setleri (MCS) oluşturulup olasılık değerleri hesaplanmıştır. FMEA hesaplamaları için hata türleri/modları olarak bulanık hata ağacıyla elde edilen MCS'leri kabul edilmiştir. Toplamda 282 MCS elde edilmiş ve olasılıkları hesaplanmıştır. Hata türü ilk 30 MCS, olasılık değerleri olarak ise ilk 30 MCS'nin olasılık değerleri ile analiz yapılmıştır. Ayrıca hata türü şiddeti ve hata türü tespit edilebilirlik derecelendirmesi için de aynı şekilde ilk 30 MCS kullanılarak uzman görüşleri alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Hata türlerinin olasılık değerleri olarak bulanık hata ağacı analizi ile elde edilen MCS olasılık değerleri Tablo 23'de gösterilmiştir.

Tablo 23. Hata Türlerinin Olasılık Değerleri (Bulanık Hata Ağacı Analizi İle Elde Edilen İlk 30 MCS Olasılık Değerleri)

No	Hata Türleri	Olasılıklar (O)	No	Hata Türleri	Olasılıklar (O)
1	BE6	0,01495	16	BE16XBE18	0,001457224
2	BE4	0,01276	17	BE2	0,00037
3	BE14	0,01212	18	BE12	0,00017
4	BE19	0,01131	19	BE21XBE26XBE37	3,30413E-05
5	BE7	0,0113	20	BE21XBE31XBE37	3,20019E-05
6	BE3	0,01121	21	BE24XBE26XBE37	2,75889E-05
7	BE5	0,01019	22	BE24XBE31XBE37	2,6721E-05
8	BE9	0,00882	23	BE21XBE27XBE37	2,41064E-05
9	BE8	0,00712	24	BE21XBE26XBE39	2,2831E-05
10	BE10	0,00706	25	BE21XBE31XBE39	2,21128E-05
11	BE15	0,00597	26	BE24XBE27XBE37	2,01284E-05
12	BE13	0,00311	27	BE25XBE26XBE37	1,99803E-05
13	BE1	0,00288	28	BE21XBE28XBE37	1,99787E-05
14	BE11	0,00237	29	BE25XBE31XBE37	1,93518E-05
15	BE17XBE18	0,001803701	30	BE24XBE26XBE39	1,90635E-05

2.3.1.2. Hata Türlerinin Şiddetlerinin ve Tespit Edilebilirliklerinin Derecelendirilmesi

Hata türleri şiddetlerinin derecelendirilmesi için Tablo 7, tespit edilebilirlik derecelendirilmesi için ise Tablo 8 kullanılmıştır. Daha önce belirlenmiş ve ağırlıklandırılmış 10 uzmandan her bir MCS (Hata türü) için şiddet (S) ve tespit edilebilirlik (D) puanı vermeleri istenmiştir. Uzmanlar tarafından hata türleri şiddet değerleri ve tespit edilebilirlik değerleri için tablolara göre 1 ile 10 arasında puanlar verilmiştir. Her bir uzmanın verdiği değer kendi ağırlık değeri ile çarpılarak hata türlerinin şiddetleri ve tespit edilebilirlik değerleri elde edilmiştir. Daha sonra 10 uzmanın değerlendirmeleri ile elde edilmiş olan ağırlıklı hata türleri şiddetlerinin ve tespit edilebilirlik değerlerinin ortalama şiddet değerleri belirlenmiştir. Tablo 24’de hata türlerinin elde edilen şiddet değerleri, tablo 25’te de hata türlerinin tespit edilebilirlik değerleri verilmiştir.

Tablo 24. Hata Türlerinin Belirlenen Şiddet Değerleri (S)

No	Hata Türleri	Şiddet Değerleri (S)	No	Hata Türleri	Şiddet Değerleri (S)
1	BE6	0,754	16	BE16XBE18	0,730
2	BE4	0,736	17	BE2	0,242
3	BE14	0,676	18	BE12	0,223
4	BE19	0,567	19	BE21XBE26XBE37	0,754
5	BE7	0,665	20	BE21XBE31XBE37	0,749
6	BE3	0,421	21	BE24XBE26XBE37	0,760
7	BE5	0,665	22	BE24XBE31XBE37	0,695
8	BE9	0,401	23	BE21XBE27XBE37	0,769
9	BE8	0,365	24	BE21XBE26XBE39	0,769
10	BE10	0,418	25	BE21XBE31XBE39	0,769
11	BE15	0,406	26	BE24XBE27XBE37	0,760
12	BE13	0,397	27	BE25XBE26XBE37	0,769
13	BE1	0,401	28	BE21XBE28XBE37	0,765
14	BE11	0,373	29	BE25XBE31XBE37	0,769
15	BE17XBE18	0,713	30	BE24XBE26XBE39	0,680

Tablo 25. Hata Türlerinin Tespit Edilebilirlik Değerleri (D)

No	Hata Türleri	Tespit Edilebilirlik Değerleri (D)	No	Hata Türleri	Tespit Edilebilirlik Değerleri (D)
1	BE6	0,263	16	BE16XBE18	0,453
2	BE4	0,347	17	BE2	0,694
3	BE14	0,324	18	BE12	0,599
4	BE19	0,476	19	BE21XBE26XBE37	0,649
5	BE7	0,263	20	BE21XBE31XBE37	0,643
6	BE3	0,319	21	BE24XBE26XBE37	0,632
7	BE5	0,548	22	BE24XBE31XBE37	0,699
8	BE9	0,257	23	BE21XBE27XBE37	0,666
9	BE8	0,157	24	BE21XBE26XBE39	0,352
10	BE10	0,425	25	BE21XBE31XBE39	0,699
11	BE15	0,263	26	BE24XBE27XBE37	0,705
12	BE13	0,481	27	BE25XBE26XBE37	0,571
13	BE1	0,487	28	BE21XBE28XBE37	0,448
14	BE11	0,481	29	BE25XBE31XBE37	0,425
15	BE17XBE18	0,453	30	BE24XBE26XBE39	0,425

2.3.1.3. Risk Öncelik Seviyelerinin Belirlenmesi

Her bir hata türü için tespit edilen şiddet ve tespit edilebilirlik değerlerinin ortalamaları ile bulanık hata ağacı analizi ile hesaplanmış olan hata türü olasılıkları (ilk 30 MCS olasılıkları) çarpılarak risk öncelik seviyeleri (RÖS/RPN) belirlenmiştir. Risk öncelik seviyesi “ $RÖS = O \times S \times D$ ” formülü ile bulunur. Burada O, hatanın olasılığı; S, hatanın şiddeti ve D, hatanın tespit edilebilirliğidir. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilmiş olan risk öncelik seviyeleri Tablo 26’da gösterilmiştir.

Tablo 26. Risk Öncelik Seviyeleri (RÖS)

No	Hata Türleri	RÖS	No	Hata Türleri	RÖS
1	BE6	0,002963301	16	BE16XBE18	0,000481784
2	BE4	0,003255937	17	BE2	6,21037E-05
3	BE14	0,00265843	18	BE12	2,26771E-05
4	BE19	0,00304889	19	BE21XBE26XBE37	1,61641E-05
5	BE7	0,001976637	20	BE21XBE31XBE37	1,54151E-05
6	BE3	0,001506522	21	BE24XBE26XBE37	1,32615E-05
7	BE5	0,003716643	22	BE24XBE31XBE37	1,29888E-05
8	BE9	0,000911079	23	BE21XBE27XBE37	1,23449E-05
9	BE8	0,000406604	24	BE21XBE26XBE39	6,1898E-06
10	BE10	0,001255271	25	BE21XBE31XBE39	1,1895E-05
11	BE15	0,000637407	26	BE24XBE27XBE37	1,07885E-05
12	BE13	0,000594326	27	BE25XBE26XBE37	8,77027E-06
13	BE1	0,000562654	28	BE21XBE28XBE37	6,8364E-06
14	BE11	0,0004258	29	BE25XBE31XBE37	6,32914E-06
15	BE17XBE18	0,000582618	30	BE24XBE26XBE39	5,50935E-06

Risk öncelik seviyeleri hesaplandıktan sonra bulunan risk öncelik seviyesi değerleri her bir minimum kesme setlerinin ağırlık değerleri ile çarpılarak ağırlıklandırılmış risk öncelik değerleri elde edilmiştir. Ağırlıklandırılmış risk öncelik seviyeleri Tablo 27’de verilmiştir.

Tablo 27. Ağırlıklandırılmış Risk Öncelik Seviyesi Değerleri (wRÖS)

No	Hata Türleri	wRÖS	No	Hata Türleri	wRÖS
1	BE6	0,000371656	16	BE16XBE18	5,88982E-06
2	BE4	0,000348538	17	BE2	1,92772E-07
3	BE14	0,000270303	18	BE12	3,23415E-08
4	BE19	0,000289286	19	BE21XBE26XBE37	4,48057E-09
5	BE7	0,000187383	20	BE21XBE31XBE37	4,13852E-09
6	BE3	0,000141679	21	BE24XBE26XBE37	3,06939E-09
7	BE5	0,000317723	22	BE24XBE31XBE37	2,91169E-09
8	BE9	6,74138E-05	23	BE21XBE27XBE37	2,49658E-09
9	BE8	2,42871E-05	24	BE21XBE26XBE39	1,18556E-09
10	BE10	7,43474E-05	25	BE21XBE31XBE39	2,20664E-09
11	BE15	3,19238E-05	26	BE24XBE27XBE37	1,82177E-09
12	BE13	1,55063E-05	27	BE25XBE26XBE37	1,47007E-09
13	BE1	1,35943E-05	28	BE21XBE28XBE37	1,14583E-09
14	BE11	8,466E-06	29	BE25XBE31XBE37	1,02752E-09
15	BE17XBE18	8,816E-06	30	BE24XBE26XBE39	8,81103E-10

Ağırlıklandırma işlemleri sonucu elde edilen risk öncelik değerlerine göre hata türlerinin sıralaması yapılmıştır. Yapılan sıralama Tablo 28’de verilmiştir.

Tablo 28. Hata Türlerinin Risk Öncelik Seviyelerine Göre Sıralaması

No	Hata Türleri	wRÖS	No	Hata Türleri	wRÖS
1	BE6	0,000371656	16	BE16XBE18	5,88982E-06
2	BE4	0,000348538	17	BE2	1,92772E-07
3	BE5	0,000317723	18	BE12	3,23415E-08
4	BE19	0,000289286	19	BE21XBE26XBE37	4,48057E-09
5	BE14	0,000270303	20	BE24XBE26XBE37	4,13852E-09
6	BE7	0,000187383	21	BE21XBE31XBE37	3,06939E-09
7	BE3	0,000141679	22	BE21XBE27XBE37	2,91169E-09
8	BE10	7,43474E-05	23	BE24XBE31XBE37	2,49658E-09
9	BE9	6,74138E-05	24	BE24XBE27XBE37	2,20664E-09
10	BE15	3,19238E-05	25	BE25XBE26XBE37	1,82177E-09
11	BE8	2,42871E-05	26	BE21XBE28XBE37	1,47007E-09
12	BE13	1,55063E-05	27	BE21XBE26XBE39	1,18556E-09
13	BE1	1,35943E-05	28	BE24XBE26XBE39	1,14583E-09
14	BE17XBE18	8,816E-06	29	BE21XBE31XBE39	1,02752E-09
15	BE11	8,466E-06	30	BE21XBE26XBE38	8,81103E-10

3. BULGULAR

Kuru dökme yük taşımacılığında nikel madeni yükünün sıvılaşmasının sebeplerine ilişkin kapsamlı risk analizi çalışması kapsamında oluşturulan hata ağacında nikel madeni yükünün sıvılaşması tepe olayı (TE) seyir esnasında sıvılaşma ve yüksek nemli yük yüklenmesi olarak iki ana kola ayrılmıştır. Seyir esnasında sıvılaşma (IE17) ara olayı, 0,118'lik hata olasılığı ile yüksek nemli yük yüklenmesi (IE18) ara olayına göre oldukça yüksek bir değere sahiptir. Seyir esnasında sıvılaşma ara olayı da teknik hatalar (IE10) ve operasyonel hatalar-1 (IE11) olmak üzere iki kola ayrılmıştır. Teknik hatalar ara olayı 0,0858 olasılığına sahip iken, operasyonel hatalar-1 ara olayı ise 0,0353 hata olasılığına sahiptir. 0,05943 hata olasılığı ile en yüksek değere sahip olan BE18 (Sıvılaşmaya Müsait Yük) ise operasyonel hatalar-1 ara olayının altında bir alt olaydır.

Bulanık Hata Ağacı Analizi yöntemiyle yapılan analiz neticesinde nikel madeni yükünün sıvılaşması tepe olayının meydana gelme olasılığı 0,1192 (yaklaşık %12) olarak elde edilmiştir. Yani, dökme kuru yük gemileri ile nikel madeni taşımacılığı sürecinde 100 nakliye operasyonundan 11,92'si (yaklaşık %12'si) yükün sıvılaşması ile sonuçlanabilir. Nikel madeni taşımacılığında yaşanan deniz kazası ve deniz olayları istatistikleriyle karşılaştırıldığında oldukça yüksek bir değerdir. Elde edilen tepe olayın hata olasılığı, kuru dökme yük taşımacılığında nikel madeni yükünün sıvılaşması konusunda büyük riskler olduğunu ortaya koymaktadır. Nikel madeni yükünün sıvılaşmasının TE olasılığı değerlendirildikten sonra sonuçlar analiz edilmiştir.

Temel nedenlerin yanında minimum kesme setleri (MCS) de TE'nin hata olasılığını etkileyen önemli olaylardır. Minimum kesme setleri tepe olayın (Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşması) meydana gelmesinde etkili olan en küçük hata ağacı gurubudur (Sarıalioğlu, 2019). Hata ağacı yapısındaki "VE" ve "VEYA" bağlaçlarından dolayı sistemde 282 adet MCS oluşmuştur. Bu minimum kesme setlerinin büyük çoğunluğu üçlü olmak üzere BE16XBE18, BE17XBE18, BE21XBE26XBE37, BE21XBE31XBE37 ve BE24XBE26XBE37 şeklinde BE'lerin birleşimidir, diğerleri ise BE1, BE2 ve BE3 gibi tek minimum kesme setleridir/olaylardır. Analizler sonucu elde edilen 282 MCS'den ilk 30 MCS olasılıkları değerlendirmeye alınmıştır. İlk 30 MCS'den sonra gelen MCS'lerinin

olasılık değerleri birbirlerine çok yakın olduğu için değerlendirmeye alınmamışlardır. Ayrıca ilk 30 MCS FMEA yönteminde hata türü olarak kullanılmıştır.

Bulanık Hata Ağacı Analiz sonuçlarından elde edilen bulgulara göre, MCS'lerden sırasıyla BE6 (Kapağın Kapatılmaması), BE4 (Kapağın Tam Kapatılmaması), BE14 (Tirimsiz/Haplanmamış Yük), BE19 (Hava Raporlarını Gerektiği gibi Takip Etmemek), BE7 (Baskı Siğillerinin Uygulanmaması), BE3 (Hatalı Pompa Operasyonu), BE5 (Kapak Lastiklerinin Sızdırması), BE9 (Menholün Tam Kapatılmaması), BE8 (Menhol Lastiklerinin Sızdırması), BE10 (Ambar İçerisinden Geçen Hava Firar/Diğer Devrelerden Su/Sıvı Sızıntısı) MCS'leri TE'yi (Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşması) en fazla etkileyen ilk on temel neden olarak elde edilmiştir.

Hata Türleri ve Etkileri Analizi yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarından elde edilen bulgulara göre ise, sırasıyla BE6 (Kapağın Kapatılmaması), BE4 (Kapağın Tam Kapatılmaması), BE5 (Kapak Lastiklerinin Sızdırması), BE19 (Hava Raporlarını Gerektiği gibi Takip Etmemek), BE14 (Tirimsiz/Haplanmamış Yük), BE7 (Baskı Siğillerinin Uygulanmaması), BE3 (Hatalı Pompa Operasyonu), BE10 (Ambar İçerisinden Geçen Hava Firar/Diğer Devrelerden Su/Sıvı Sızıntısı), BE9 (Menholün Tam Kapatılmaması), BE15 (Yanlış Yük/Ağırlık Dağılımı) hata türleri nikel madeni yükünün sıvılaşmasında risk öncelik seviyesi en fazla olan ilk on hata türü olarak elde edilmiştir.

Bulgular ışığında bakıldığında hem FFTA hem de FMEA yöntemleriyle elde edilen en etkili ilk iki temel olay aynı temel olaylardır. Ayrıca ilk dokuz sıradaki diğer temel olaylar da sıraları değişmekle birlikte aynı çıkmıştır. Bu bulgular hata ağacının çalıştığını göstermesinin yanında uygulanan her iki yöntemin birbirleriyle tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

4. TARTIŞMA

Deniz yolu taşımacılığının temel hedefi yük ve yolcu taşımacılığıdır (Görgün, 2022). Taşımacılık sistemleri arasında en ekonomik yöntem olan deniz yolu taşımacılığı kendine özgü dinamiklerinden dolayı diğer taşımacılık yöntemlerinden farklı riskler barındırmaktadır. Deniz kazaları can ve mal kayıpları ile birlikte denizleri, deniz canlılarını ve eko sistemini etkileyen, büyük çevresel ve ekonomik problemlere sebep olma potansiyeline sahip olaylardır (Yıldırım, 2016). Son yıllarda deniz taşımacılığında risk analizi en çok araştırılan konulardan biridir. Risk, tehlikeli bir olayın meydana gelme olasılığı ile ciddiyetinin birleşimi olarak tanımlanmaktadır (ABS, 2013; Coskun, 2019). Bu tez, deniz yolu taşımacılığı ve denizcilik endüstrisine, özellikle de kuru dökme yük taşımacılığına yönelik risk analizi yaklaşımlarına rehber niteliğindedir. Tez, nikel yükünün sıvılaşmasının can kaybı ve geminin tamamen kaybı gibi ciddi sonuçlara neden olmasından dolayı deniz taşımacılığında kuru dökme nikel yükünün sıvılaşması üzerine kapsamlı niceliksel bir risk analizi yapmayı amaçlamaktadır. Tez, denizcilikte katı dökme yük taşımacılığı aracılığı ile emniyet kültürü ve bilincinin artırılması konusunda denizcilik paydaşlarını teşvik etmektedir. Bu amacı gerçekleştirmek için Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) ve Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemleri kullanılmıştır. Yöntemlerin entegrasyonu yoluyla çalışma yapılarak elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Tezde, FFTA yaklaşımı bir kaza olayına neden olabilecek temel olayları tespit etme ve bu temel olayların tepe olayın oluşumuna katkılarını analiz etme yeteneğine sahipken, FMEA yaklaşımı ise hata türlerinin olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik değerlerini belirleyerek risk öncelik seviyesine göre değerlendirme yapmayı sağlamaktadır. Böylece gemilerde nikel yükünün sıvılaşmasının nedenlerini anlamak için temel olaylar (BE) ve ara olaylar (IE) belirlenerek yukarıdan aşağıya doğru hata ağacı diyagramı oluşturulmuştur. Dökme yük gemilerinde nikel yükünün sıvılaşmasına neden olabilecek olası hatalar niceliksel olarak analiz edilmiştir.

Coskun (2019) Deniz Taşımacılığında Kuru Dökme Yüklerin Sıvılaşmasına İlişkin Sayısal Bir Risk Analizi Yaklaşımı konulu bir tez çalışması yapmıştır. Akyüz vd., (2020) de Gemide Yük Sıvılaşması Riskinin Hata Ağacı ve Olay Ağacı Analizine Bulanık Mantığın Uygulanması konusunda bir çalışma yapmışlardır. Hem Coskun (2019) hem de Akyüz vd. (2020) çalışmalarında FFTA ve ETA analiz yöntemlerini Papyon Analizi

yöntemiyle entegre ederek birer hibrit çalışma yapmışlardır. Her iki çalışmada da yük sıvılaşmasına katkı sağlayan temel ve ara olaylar aynı olmakla birlikte hata ağacı yapıları da aynıdır. Coskun'un (2019) çalışmasında uzman grubu altı uzmandan oluşurken, Akyuz vd.'nin (2020) çalışmalarında uzman grubu on uzmandan oluşmaktadır. Bu çalışmada ise 13 kişilik uzman grubuyla birlikte çalışılarak, yaşanan kazalar neticesinde can ve mal kaybına sıvılaşabilen diğer katı yüklerden çok daha fazla sebep olan nikel cevheri yükü üzerinde durulmuş ve hata analizi için FFTA ve FMEA yöntemlerinin entegrasyonu ile hibrit bir çalışma yapılmıştır. Coskun (2019) ve Akyuz vd.'nin (2020) çalışmaları ile bu çalışma temel olaylar ve ara olaylar açısından kıyaslandığında, bu çalışmada nikel madeni yükünün sıvılaşmasına neden olan temel olaylar ve ara olaylar oldukça geniş bir açıdan ele alınmış iken diğer iki çalışmada temel olaylar ve ara olaylar daha dar bir açıdan analiz edilmiştir. Hata ağacı açısından bu çalışma ile Coskun (2019) ve Akyuz vd.'nin (2020) çalışmaları karşılaştırıldığında da, diğer çalışmaların hata ağaçlarının daha az dallandığını, bu çalışmanın hata ağacının ise daha ayrıntılı, geniş kapsamlı ve daha çok kollara ayrılarak dallandığını söyleyebiliriz. Coskun (2019) ve Akyuz vd.'nin (2020) çalışmalarında ikinci yöntem olarak kullanılan ETA yöntemi sonuç analizinde kullanılan bir yöntem iken, bu çalışmada ikinci yöntem olarak uygulanan FMEA yöntemi hata türlerinin meydana gelme olasılıkları, şiddetleri ve tespit edilebilirlik değerlerini ayrı ayrı analiz ederek hataların risk öncelik değerlerini ortaya koymaya yarayan bir yöntemdir. Sonuçlar açısından bakıldığında ise Coskun (2019) ve Akyuz vd.'nin (2020) yaptıkları çalışmalarda tepe olay olan 'yükün sıvılaşması' olayının oranının %16 gibi daha yüksek bir oran olarak elde edildiği görülürken, bu çalışmada ise %11,92 oranında elde edilmiştir. Yaşanan kaza ve olay istatistikleri ile kıyaslandığında her iki sonuç da oldukça yüksektir. Çalışmaların sonuçları açısından bir diğer farklılık ise; diğer çalışmaların uzman grupları daha çok yükün yüklenmeden önce ve yükleme esnasında nem içeriği ve ıslak yüklenmesine odaklanmışken, bu çalışmada uzmanların daha çok yüklenmeden sonra ve seyir esnasında gemi personelinin dikkat etmesi gereken hususlar ve nikel madeni yükü ve yükün sıvılaşması hususunda gemi personelinin eğitimi üzerine yoğunlaşmışlardır.

Munro ve Mohajerani (2017), katı dökme yüklerin sıvılaşmasından şüphelenilen dökme yük gemilerinde insan hayatı ve gemilerin kaybına olan etkisini araştırmak üzere 1988-2016 yılları arasında meydana gelen olayları ve yaşanan deniz kazalarını incelemiştir. Bu çalışmada sıvılaşmaya yapılan atıf, araştırılan kazaların kesin sebebi olduğunun bir göstergesi olmadığını, sıvılaşma teriminin, endüstri ve araştırma kurumları

tarafından yükün karşılaştığı problemi ifade etmek için kullanılan bir genel terim gibi görüldüğünü ve problemin asıl sebebinin sıvılaşma mı olduğu, yoksa başka bir problem mi olduğunu sorgulamışlardır. Ek olarak, IMSBC Kodu'nun zorunlu olarak uygulanmasından sonra katı dökme yüklerde sıvılaşma şüphesi olaylarının neden devam ettiğini belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar niceliksel veya niteliksel herhangi bir analiz yapmamışlardır.

Shen (2012) ise, nikel cevherinin özel özelliklerine dayanan çalışmasında, nikel cevherinin gemide taşındığında sıvılaşmasının neden kolay olduğunun temel nedenini analiz etmeye çalışmıştır. Bu nedenle, nikel cevheri taşınması esnasında meydana gelen birçok kazayı analiz etmiştir. Nikel cevherinin sıvılaşma özelliğinin geminin dengesiz hale gelmesine ve seyir halindeyken alabora olmasına neden olan temel yol olduğunu belirtmiştir. Ayrıca yükün nem içeriğini TNL'nin altında tutmanın güvenli operasyonun temel faktörü olduğuna işaret etmiş ve benzer kazaları en aza indirmek için çeşitli tavsiyelerde bulunmuştur.

Ayrıca Antonia (2018), yaptığı tez çalışmasında, bir dizi deneye dayalı olarak nikel cevheri sıvılaşması olgusunu ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Nikel cevherinin taşınması sırasındaki davranışını ve sıvılaşma olayına yol açan nedenleri anlamak için, sıvılaşmanın nasıl oluştuğunu açıklayan olayın teorik açıklamasını yapmıştır. Nikel cevheri taşıyan bir gemi üzerinde yapılan deneyler ve stabilite analizi sayesinde, nikel cevheri gibi yüklerde sıvılaşma olgusunun nasıl ortaya çıktığı ve bu olgunun geminin stabilitesini nasıl etkilediği hakkında değerlendirmeler yapmıştır.

5. SONUÇLAR

Çalışmada seçilen uzman grubuna uygulanan anketlerden elde edilen dilsel değerlendirmeler Bulanık Hata Ağacı ve Hata Türleri ve Etki Analizi yöntemleri ile sayısal ifadelere dönüştürülerek olasılık hesaplamaları yapılmış ve elde edilen niceliksel sonuçlar ile nikel madeni yükünün sıvılaşmasına neden olabilecek kök nedenler analiz edilmiştir.

Uygulanan her iki yöntemin sonuçlarına göre hata ağacında teknik hatalar ara olayı ve ambar kapaklarından su sızıntısı ara olayı altında yer alan Kapağın Kapatılmaması (BE6) temel olayı (oluşma olasılığı 0,01495) kuru dökme yük gemilerinde nikel madeni yükünün sıvılaşmasına neden olan en önemli olay/başarısızlık/neden olarak bulunmuştur. Seyir esnasında ambarlardaki yükleri havalandırmak amacıyla uygun hava şartlarında gün içerisinde zaman zaman ambar kapakları açılabilir. Özellikle çalışma saatleri dışında kalan akşam ve gece saatlerinde kapaklar kapatılarak emniyete alınmaktadır. Havalandırma operasyonu tamamlandığında herhangi bir sebeple (unutma, ihmal, hava durumuna güven gibi) ambar kapaklarının kapatılmaması hem hava şartlarının bozulması durumunda hem de denizlerin güverteye çıkması ve ambarlara su girişi büyük risk teşkil etmektedir. Yine hata ağacında teknik hatalar ara olayı ve ambar kapaklarından su sızıntısı ara olayı altında yer alan Kapağın Tam Kapatılmaması (BE4) temel olayı (oluşma olasılığı 0,01276) ikinci en önemli olay olarak elde edilmiştir. Yükleme sonrası ambar kapakları kapatılır ve seyir boyunca havalandırma operasyonları dışında kapalı tutulurlar. Hidrolik sistemde arızalar, elektriksel arızalar ve mekanik arızalar gibi nedenlerle zaman zaman ambar kapakları olması gerektiği gibi kapatılmaz ise gerek hava durumunun kötüleşmesi gerekse denizlerin güverteye çıkması sonucu ambarlara su girişine ve yükün sıvılaşmasına neden olabilir.

FFTA yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarına göre, hata ağacında Operasyonel Hatalar-1 ara olayı ve Yüksek GM/Kırbaç Etkisi ara olayı altında bulunan yüklemeden sonra Trimsiz /Haplanmamış Yük (BE14) temel olayı (oluşma olasılığı 0,01212) kuru dökme yük gemilerinde nikel madeni yükünün sıvılaşmasına neden olan en önemli üçüncü olay olarak bulunmuştur. Nikel madeni gibi ağır yüklerin (dip yüklerin) yüklenmesinden sonra ambar içerisindeki yükün yükleme açısının dik bir açıda bırakılmaması ve yükün ambar içerisinde mümkün olduğu kadar yayılarak eşit bir şekilde dağıtılmak üzere haplanması önemli bir durumdur. Haplanmamış yük, gemi seyirde iken özellikle ağır bir

havaya veya büyük deniz dalgalarına maruz kaldığında yükün kolayca bir tarafa hareket etmesine ve netice geminin büyük açılarda meyil yaparak meyilli kalmasına neden olur. Geminin yalpalanma hareketleri devam ettiği süreç içerisinde gemi yükün fazla olduğu tarafa daha fazla meyil yapar ve sıvılaştıran yükün meyilin fazla olduğu tarafta daha fazla birikmesine neden olur.

Hata ağacında Operasyonel Hatalar-1 ara olayı altında yer alan Hava Raporlarını Gerektiği Gibi Takip Etmemek (BE19) temel olayı (oluşma olasılığı 0,01131) geminin taşıdığı nikel yükünün nem içeriği sıvılaşmaya uygun bir nem içeriğine sahipse geminin ağır havalara maruz kalacak şekilde seyir yapmasına ve ağır havalara yakalanmasına sebep olacak bir hatadır. Gerek seyirden önce gerekse seyir süresince hem geminin ve personelin hem de taşınan yükün selameti için hava raporlarını düzenli bir şekilde takip etmek önem arz etmektedir. Ağır havalarda gemilerin yapacağı hareketler sıvılaşmaya sebebiyet verecek önemli durumlardır.

Baskı Siğillerinin Uygulanmaması (BE7) ise, yükleme sonrası ambar kapaklarını kapattıktan sonra kapakların sızdırmazlığını sağlamak üzere baskı siğillerinin uygulanmaması sonucu seyir sırasında güverteye kadar çıkan dalgalar nedeniyle veya yağmur yağması durumunda ambarlara su girişine, yükün ıslanmasına ve yükün sıvılaşmasına neden olabilecek bir hatadır. Kapak Lastiklerinin Sızdırması (BE5) olayı da baskı siğilleri uygulansa bile kapak lastiklerinin deforme olması gibi nedenlerden dolayı etkili bir sızdırmazlık sağlamayabilir. Yine gemi seyirde iken güverteye kadar çıkan dalgalar nedeniyle veya yağmur yağması durumunda ambarlara su girişi olabilir ve neticede yükün ıslanarak gemi bünyesindeki titreşimlerden dolayı sıvılaşma riski ortaya çıkacaktır. Hatalı pompa operasyonu (BE3) gemi seyrine başladıktan sonra seyir esnasında uygun pozisyonlarda gemilerin sintine suyu, kirli su basma vb. operasyonlar yapılırken yapılacak olan hatalı bir pompa operasyonu ambar sintinelerinden ambarlara su girişine ve yükün ıslanmasına neden olabilecek bir hatadır. Bundan dolayı da ıslanan yükün sıvılaşma riski ortaya çıkar.

Çalışma neticesinde olasılığı en yüksek çıkan ilk 10 temel olaydan (BE) anlaşıldığı üzere seçilen uzman grubu genel olarak nikel yükünün sıvılaşması olayında nem içeriği yüksek yük yüklenmesi durumundan daha çok seyir öncesinde ve seyir sürecinde gemi personelinin dikkat etmesi gereken muhtemel hatalara ve doğrudan/dolaylı olarak eğitim konusuna öncelik vermişlerdir. Aynı zamanda oluşturulan hata ağacının yapısı da araştırma sonuçlarının belirtildiği gibi çıkmasına katkı sağlamıştır. Yükün nem içeriğini ilgilendiren

temel olayların/hataların ve yükün ıslak ya da nemli yüklenmesinden kaynaklanan temel olayların/hataların hata ağacında genel olarak ‘‘VEYA’’ bağlacı ile bağlanması neticesinde ikili ve üçlü minimum kesme setleri oluşmuştur. Bundan dolayı yapılan hesaplamalarda minimum kesme setlerinin olasılık değerleri düşük çıkmıştır. Fakat bu neticeler, nikel yükünün yükleme öncesi ve yükleme esnasında ıslak veya nemli yüklenebileceği veya bunların ihmal edilebileceği anlamına kesinlikle gelmez. Örneğin; nikel cevheri yükünün ortalama nem içeriğinin, yükleme öncesinde yükü gönderen/kiralayan kişi tarafından beyan edilmesi önemlidir. Bu durumda en tehlikelisi işlenmemiş kuru yüküdür. Limanda veya depolama alanında yük üzerinde çamur veya parçalı kil yoksa gemi kaptanının ortalama nem içeriğini belgelendirmesi veya değerlendirmesi çok zordur. Yükün ortalama nem içeriğinin yanlış beyan edilmesini önlemek için, yükleme işleminden önce (yük limanda ya da mavnada iken) gemi sahibi tarafından bağımsız bir sörvey veya süper kargo atanmalıdır. Ayrıca limandaki yük depolarının derinliğinden operasyon öncesinde yük numuneleri alınmaktadır. Numunelerin yüklemeden 7 gün önce alınmaması gerektiği dikkate alınmalıdır (DNV-GL, 2015; IMSBC Code, 2022).

Yine yanlış yük tanımlaması yükün sıvılaşmasına neden olabilecek önemli bir olaydır. IMSBC Kod gereği sıvılaşabilecek yüklerin yüklenmesinden önce kiracılara veya taşıyıcılara (gemilere) yük hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Ancak bazen IMSBC Kod'da detaylandırıldığı gibi katı dökme yük isimleri yerine yükün ticari ismini kullanırlar. Bu nedenle yanlış yük tanımlaması yük sıvılaşması riskine neden olabilir. Yanlış yük tanımlamasının önüne geçmek için gemi kaptanı, A grubu yük türlerinden haberdar olmalı ve yükleme işlemi öncesinde doğru yük belgelerinin alındığından emin olmalıdır. Bu arada liman başkanlığı, katı dökme yüklerin özelliklerini ve sıvılaşabilecek A grubu yüklerin taşınmasına ilişkin koşulları belirten gerekli belgeleri sağlamalıdır. Hatalı teneke kutu testi uygulaması diğer kritik arıza/olaylardan biridir. Yük testini uygun bir laboratuvarında yaptırmak oldukça zordur. Yükün nem limitini kontrol etmek için test yapılabilir. Test, kuru dökme yüklerin (Grup A) nem içeriğinin güvenilir bir şekilde ölçülmesini sağlar. Gemi kaptanının kuru dökme yüklerin TNL'i konusunda şüphesi varsa, teneke kutu testi uygulanabilir. Yanlış teneke kutu testi uygulaması, test edilen yükün nem içeriğinin TNL'den az olduğunu gösteren hatalı sonuçlar verebileceğinden sıvılaşma tehlikesine neden olabilir. Gemi kaptanı teneke kutu testi konusunda yeterli bilgi ve tecrübeye sahip olduğundan emin olmalıdır. Aksi takdirde, test yapabilecek bağımsız bir sörveyör veya yük uzmanı görevlendirmelidir. Yükleme sırasında yük ambarlarına su veya diğer sıvıların

girmesi başka önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle yükün yükleme öncesinde veya yükleme işlemi sırasında su girişi, yükün içindeki nem içeriğinin artmasına neden olmaktadır. Yükün demirleme yerinde yüklenmesi durumunda mavnalar kullanılmaktadır. Bu durumda; yağmur veya dalgalar yüke nüfuz edebilir ve nem içeriğinin artmasına neden olabilir. Yolculuk süresince yük ambarları düzenli olarak izlenmelidir. Aşırı su veya sıvı akışı veya yükün düzleşmesi gibi diğer sıvılaşma riski göstergeleri periyodik olarak izlenmelidir (DNV-GL, 2015).

Hata ağacında tespit edilen 40 temel olaydan 11'i doğrudan, 10'u dolaylı olarak eğitim eksikliği ile ilgilidir. Eğitim eksikliğini ilgilendiren toplamda 21 adet temel olay tüm temel olayların %52,5'ini oluşturmaktadır. Tepe olayı en fazla etkileyen ilk 30 MCS içerisinde 20 MCS doğrudan ya da dolaylı olarak eğitim ile ilgili temel olaylardan oluşmaktadır. Bu da ilk 30 MCS'nin yaklaşık olarak %66,67'sini oluşturmaktadır. Bu MCS'lerin TE üzerindeki etkileri toplandığında 0,0770 etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca ilgili MCS'lerin F-VIM duyarlılık analizi ile elde edilen etkilerinin toplam değeri 0,6461 olarak hesaplanmıştır. Buna göre nikel madeni yükünün sıvılaşmasının önlenmesi için eğitim eksikliğini etkisini sıfıra indirmek mümkün olmasa da bu etkiyi en aza indirmenin nikel madeni yükünün sıvılaşma riskini azaltmada oldukça etkili bir yöntem olacağı açıktır. Gemi ve terminal personeline teorik ve uygulamalı eğitimler verilerek nikel madeni yükünün sıvılaşmasına etkisi yaklaşık %65 olan faktörün azaltılması mümkün olacaktır. Ayrıca tüm operasyonel süreç adımlarını kapsayan detaylı prosedürlerin ve kontrol listelerinin oluşturulması ve personelin bu prosedürlere sıkı sıkıya uymasının sağlanması, nikel madeni yükünün sıvılaşma riskinin en aza indirilmesinde eğitimin etkin bir rol oynayacağına inanılmaktadır.

6. ÖNERİLER

Nikel madeni yükü gibi sıvılaşma riski taşıyan yüklerin sıvılaşması kuru dökme yük taşıyan gemiler ve şirketler için çok önemli bir sorundur ve ciddi tehlikeler oluşturmaktadır. Sıvılaşma sonucu yaşanan kaza ya da olayların sonuçları gemiye, gemideki mürettebata, deniz ortamına ve yüke göz ardı edilmeyecek zararlar verebilecek potansiyele sahiptir. IMSBC Kod'da, A Grubu Yükler altında sıvılaşabilecek yükler açıkça tanımlanmaktadır. Kod'a göre bu tür kuru dökme yüklerin (nikel cevheri, demir cevheri, boksit vb.) içeriklerindeki nem seviyesinin TNL'ni aşması nedeniyle sıvılaşabilmektedir. Bu durum geminin alabora olması, yan yatması, dengesini kaybetmesi, batması ve geminin tam kaybı gibi trajik sonuçlara neden olabilir. Bu nedenle, nikel yükünün sıvılaşması olgusunun potansiyel hataları/nedenleri bu tez kapsamında kapsamlı bir risk değerlendirmesi yapılarak analiz edilmiştir. FFTA yöntemiyle yapılan detaylı niceliksel risk analizi sonucunda yük sıvılaşmasının (TE) meydana gelme olasılığı 0,1192 olarak hesaplanmıştır. TE'nin oluşmasına katkı sağlayan temel olaylardan hata ağacı analizi ile MCS'ler elde edilmiş ve olasılıkları hesaplanarak MCS'ler sıralanmıştır. Ayrıca elde edilemeyen MCS'ler (hata türleri) FMEA yöntemiyle entegre edilerek her bir MCS'nin risk öncelik seviyesi (RÖS) elde edilmiştir. Kuru dökme yük gemilerinde nikel yükü sıvılaşması olayını önlemek için gerekli kontrol eylemleri ve önleyici tedbirler tavsiye edilmektedir. Çalışma sonuçlarına göre belirlenen öneriler aşağıda sunulmuştur;

- Nikel yükünün sıvılaşması deniz yolu taşımacılığı için ciddi bir endişe oluşturmaktadır. Ancak bu tür yüklerin depolanmasını, ayrıştırılmasını, elleçlenmesini ve izlenmesini düzenleyen uluslararası bir mevzuat bulunmamaktadır. Bu nedenle yük terminallerinin nikel madeni yükü gibi sıvılaşabilecek yüklerin depolanması, elleçlenmesi ve izlenmesi konusunda azami özen göstermesi gerekmektedir.
- Yükleme terminalleriyle ilgili uluslararası düzenleyici kurumların ve yerel otoritelerin, bu tür yüklerin depolanması, ayrıştırılması, elleçlenmesi ve izlenmesi için düzenleyici bir çerçeve veya kod oluşturması tavsiye edilmektedir.
- Gemi sahibi ve yönetim şirketi, mürettebata yükleme öncesi, yükleme süreci ve yükleme sonrası seyir sürecinde yükün izlenmesi, takibi, (numune alma ve test yapma) ve kontrollerle ilgili eğitim vermeli.

- Gemi sahibi ve şirketler mürettebata nikel cevheri taşıırken yük operasyonunun nasıl denetleneceği konusunda rehberlik etmeli, mürettebatı gerekli gördüklerinde yardım çağırmaya teşvik etmeli ve nikel cevherinin sıvılaşmasını önlemek için uygun ölçümlerin yapılmasını sağlamalıdır.
- Tüm operasyonel süreç adımlarını kapsayan detaylı prosedürler ve kontrol listeleri oluşturulmalı ve personelin bu prosedürlere sıkı sıkıya uyması sağlanmalı.
- Nikel madeni yükü taşıyacak olan gemi kaptanları ve ilgili zabıtlar IMSBC Kod gereklilikleri ve nikel madeni yükü hakkında bilinçlenmelidir, yüklerin IMSBC Kod'a göre isimleri ve özellikleri hakkında bilgi sahibi olmalılar.

Teorik altyapısının yanı sıra, tezin sonuçları deniz taşımacılığı sektörüne, özelde nikel madeni yükü taşımacılığına genel anlamda da katı dökme yük taşımacılığına pratik katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle armatörler, kuru yük gemisi operatörleri, süper kargolar, gemi kaptanları, denizcilik profesyonelleri, P&I Kulüpleri, Bayrak devletleri vb. paydaşlar, dökme yük gemilerinde yük sıvılaşması olgusu konusunda çalışmanın pratik avantajlarından yararlanabilirler.

7. KAYNAKLAR

- Alpaslan, N., 2013. Zemin sıvılaşması ve mekanizması. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 3(2), 67-89.
- Aksu, S., Aksu, S. and Turan, O., 2006. "Reliability and Availability of Pod Propulsion Systems", Quality and Reliability Engineering International, Volume 22, Issue 1, pp. 41-58.
- Akyıldız, H. ve Ünal, N. E., 2006. Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation. Ocean engineering, 33(16), 2135-2149.
- Akyuz, E., 2015. Quantification of human error probability towards the gas inerting process on-board crude oil tankers. *Safety science*, 80, 77-86.
- Akyuz, E. 2016., Quantitative human error assessment during abandon ship procedures in maritime transportation, Ocean. Eng. 120:21–29.
- Akyuz, E. ve Celik, E., 2018. The role of human factor in maritime environment risk assessment: A practical application on Ballast Water Treatment (BWT) system in ship. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(3): 653-666.
- Akyuz, E., Arslan, O., ve Turan, O., 2020. Application of fuzzy logic to fault tree and event tree analysis of the risk for cargo liquefaction on board ship. *Applied Ocean Research*, 101, 102238.
- An, K., 2016. E-navigation services for Non-SOLAS Ships. International Journal of e-Navigation and Maritime Economy (4): 13-22.
- Antonia P.K., 2018. Investigation of nickel ore liquefaction in Bulk Carriers. Diploma Thesis. National Technical University of Athens, Athens
- Aran, G. ve Çevik, O. (2009). Kalite İyileştirme Sürecinde Hata Türü Etkileri Analizi (FMEA) ve Piston Üretiminde Bir Uygulama. *SÜ İİBF Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 16, 241-265.
- Arslan, O., Zorba, Y. ve Svetak, Y., 2018. Fault Tree Analysis of Tanker Accidents During Loading and Unloading Operations at The Tanker Terminals. Journal of ETA Maritime Science, 6,1, 3–16.
- Aslan B., 2022. Van Gölü'nde Gerçekleşen Kazaların Hata Ağacı Analizi Ve Denizcilik Faaliyetleri, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Australian Transport Safety Bureau (ATSB), 2000. *Marine Safety Investigation (Report 148)-Investigation into the Shift of Cargo on Board the Singapore Flag Bulk Carrier Padang Hawk*, Australian Transport Safety Bureau.
- Aydan, M. ve Kaya, S., 2017. Hata türü ve etkileri analizi (HTEA):üniversite hastanesinde bir uygulama. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 475-502.
- Bacıoğlu H., 2022. Gemi Kompresör Sisteminin Fmea Yöntemi İle Risk Analizi Ve Önleyici Faaliyetlerin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İ.T.U., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bao, J., Yu, Z., Li, Y., ve Wang, X., 2022. A novel approach to risk analysis of automooring operations on autonomous vessels. *Maritime Transport Research*, 3, 100050.
- Bayar, N., 2010. İstanbul Boğaz'ında Deniz Trafik Güvenliğinin Risk Tabanlı Bulanık-AHP ve FMEA Yöntemleri ile İncelenmesi. Doktora, *Fen Bilimleri Enstitüsü, FBE Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilimdalı*, İstanbul.
- Becerik, F., 2020. Al/Ni -Çkknt Kompozitlerin Toz Metalürjisi İle Üretimi, Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- Bigarre, P., Kazmierczak, J. B., ve Collignon, S., 2018. Experimental Study of the Hydromechanical Response and Liquefaction Susceptibility of Nickel Ore to Maritime Transportation. In *ISRM International Symposium-10th Asian Rock Mechanics Symposium*. OnePetro.
- Braglia, M., Frosolini, M. and Montanari, R. (2003). "Fuzzy TOPSIS approach for failuremode, effects andcriticality analysis", *Quality and Reliability Engineering International*, Volume 19, Issue 5, pp. 425 - 443.
- Brand, N.W., Butt, C.R.M., Elias, M., 1998. Nickel laterites: classification and features: *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 81-88.
- Brinkgreve, R. B. J., Broere, W. ve Waterman, D., 2004. PLAXIS V8 General Information. Public Works.
- Bureau Veritas, London P&I Club ve TMC Marine, 2017. Reducing the risk of liquefaction.
- Castro, G., 1969. Liquefaction of sands, Harvard Soil Mechanics Series, No.87 Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- Castro, G., 1975. Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(6), 551-569.

- Ceber, Y., 2010. Hata türü ve etkileri analizi yönteminin (FMEA) üretim sektöründe uygulanması. Yüksek lisans tezi. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir*, 68-70.
- Celep Z. ve Kumbasar N., 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı İstanbul, Beta Dağıtım.
- Cesur, C., 2020. Deniz Yolu Taşımacılığında Ve Liman Hizmetlerinde İlgili Pazarın Tanımlanması. Rekabet Kurumu, Uzmanlık Tezler Serisi, 167. Ankara.
- Chen, L. ve Deng, Y., 2018. A new failure mode and effects analysis model using Dempster–Shafer evidence theory and grey relational projection method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 76, 13–20.
- Cheliyan, A.S. ve Bhattacharyya, S.K., 2018. Fuzzy Fault Tree Analysis of Oil and Gas Leakage in Subsea Production System, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 3, 38-48.
- Chen, G. X., Jin, D. D., Chang, X. D., Li, X. J. ve Zhou, G. L., 2013. Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes in recent twenty years and liquefaction susceptibility criteria for soils. *Rock and Soil Mechanics*, 34(10), 2737-2755.
- Chen, M. and Wang, K. 2019. A bow-tie model for analyzing explosion and fire accidents induced by unloading operation in petrochemical enterprises. *Process safety progress*, 38(1), 78-86.
- Chu, F., Zhang, Y. J., Shen, J., ve Yang, X. F., 2013. Application of Wireless Sensor Network in Shipping Laterite Nickel Ore Moisture Content Monitoring. *Applied Mechanics and Materials*, 336, 204-209.
- Chun-Bo Liu (2013), “Aircraft fuel tank system fire disaster analysis based on FMEA and FTA” *IEEE Explore*, pp. 99-102.
- Corovic, B. ve Djurovic, P., 2013. Research of marine accidents through the prism of human factors, *Promet. Traffic Transp.* 25 (4):369–377.
- Coskun A., 2019. A Quantitative Risk Analysis Approach On Liquefaction Of Dry Bulk Cargo İn Maritime Transportation, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çakmak, M., 2015. Demir-Çelik Sektöründe Bulanık Hata Türleri ve Etkileri Analiz (Bulanık FMEA) Yöntemi İle Risk Değerlendirme Uygulaması. Yüksek Lisans, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı*, Karabük.
- Çavuşoğlu, O., 2020. Ti6al4v Alaşımının Sert Nikel Alaşım Tozları İle Kaplanması Ve Aşınma Özelliklerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- Çeber, Y., 2010. Hata Türü ve Etkileri Analizi Yönteminin (FMEA) Üretim Sektöründe Uygulanması. Yüksek Lisans, *Sosyal Bilimler Enstitüsü, Toplam Kalite Yönetimi Anabilimdalı*, İzmir.
- Damanab, P. S., Alizadeha, S. S., Rasoulzadeh, Y. ve Moshashaiea, P., 2015. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Technique: A Literature Review. *Scientific Journal of Review*, 4, 14196. <https://doi.org/10.14196/sjr.v4i1.180546>
- Dejong, J. T., Ghafghazi, M., Sturm, A. P., Wilson, D. W., Dulk, J. Den, Armstrong, R. J., ... Davis, C. A., 2016. *Instrumented Becker Penetration Test* (Vol. 1).
- Demirer, A. ve Kahraman, Ö., 2010. OHSAS 18001 Kapsamında FMEA Uygulaması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7 (1), 53-68.
- Derrett, D. R. ve Barrass, C. B., 2001. Ship Stability for Masters and Mates, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Fifth Ed., London, 465 s.
- DNV-GL, 2015. Maritime bulk cargo liquefaction. GuidelinE for Design and Operation of Vessels with Bulk Cargo That May Liquefy.
- DNV-GL, 2019. BULK CARGO LIQUEFACTION, Guideline for the design and operation of vessels with bulk cargo that may liquefy.
- Dırağ, A., 2008. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and an Implementation Study in a Packaging Company. Yüksek Lisans, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilimdalı*, İstanbul.
- Down, M., Brozowski, L., Younis, H., Benedict, D., Feghali, J., Schubert, M. ve Haughey, W., 2008. *Potential failure mode and effect analysis (FMEA) reference manual (4th Edition)*. Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation.
- DTO, 2023. Denizcilik Sektör Raporu 2023, Deniz Ticaret Odası. İstanbul.
- Eleren, A., 2007. Eğitim Başarısının Artırılmasında Süreç Geliştirme Yöntemlerinin Kullanılması ve Bir Uygulama. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, İ.İ.B.F. Dergisi*, 8 (2), 1-25.
- EMSA, 2022. Annual overview of marine casualties and incidents. Portugal.
- Erdoğan G., 2022. İstanbul Gemi Trafik Hizmetleri Merkezi'nin Günlük Operasyonel Faaliyetlerine İlişkin Hata Türü Ve Etkileri Analizi (Fmea) Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. İ.T.U., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ericson, C. A., & Li, C. 1999. *Fault tree analysis*. Paper presented at the System Safety Conference, Orlando, Florida.
- Eroğlu, G., Akgök, Y.Z., ve Şahiner, M., 2019. Üretimden Ticarete Nikel, MTA, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni 26: 53-62

- Eryürek, Ö. F. ve Tanyaş, M., 2003. Hata türü ve etkileri analizi yönteminde maliyet odaklı yeni bir karar verme yaklaşımı. *İtüdergisi/d Mühendislik*, 31-40.
- Fan, S., Yang, Z., Blanco-Davis, E., Zhang, J. ve Yan, X., 2020. Analysis Of Maritime Transport Accidents Using Bayesian Networks, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 234, 3, 439–454.
- Freeman, T., 2015. *An Introduction to Powders. Freeman Technology LTD*. Retrieved from http://www.alfatest.it/keyportal/uploads/130_an-introduction-to-powders-booklet.pdf
- Ford, D. N., & Sterman, J. D. 1998. Expert knowledge elicitation to improve formal and mental models. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 14(4), 309-340.
- Gul, M. ve Guneri, A. F., 2016. A fuzzy multi criteria risk assessment based on decision matrix technique: A case study for aluminium industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry* (40): 89–100.
- Goodman, G. V. 1988. An assessment of coal mine escapeway reliability using fault tree analysis. *Mining Science and Technology*, 7(2), 205-215.
- Göksu S., 2021. Emniyetli Gemi Operasyonları İçin Hata Türleri Ve Etkileri Analizi (FMEA)'ne Dayalı Risk Değerlendirme Modeli Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. İ.T.U., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Görgün, H., 2022. A Case Study Work On Self Heating And Explosion Risks Of Coal Cargo In Maritime Transportation, Yüksek Lisans Tezi. İ.T.U., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Göveli, A., 2006. Nickel Extraction From Gördes Laterites By Hydrochloric Acid Leaching. (MSc thesis), The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, p: 102, Ankara
- Groot, M.B., Bolton, M.D., Foray, P., Meijers, P., Palmer, A.C., Sandven, R., Sawicki, A. ve Teh, T.C., 2006. Physics of liquefaction phenomena around marine structures. *J. Waterw., Port., Coast., Ocean Eng.* 132:4 (227).
- Guan, C., Dong, G. X., Gao, J. Y., ve Jin, Y. L., 2014. Platform experiment and research of nickel ore liquefaction process. *Chin. J. Hydrodyn.*, 29(6), 700-705.
- Gullen, A., ve Norwegian Hull Club, 2015. *Bulk cargo liquefaction*.
- Gürgen, S., Yazır, D., ve Konur, O., 2023. Fuzzy fault tree analysis for loss of ship steering ability. *Ocean Engineering*, 279, 114419.

- Hemmati I., Huizenga R.M., Ocelik V., De Hosson J.Th.M., 2013. Microstructural Design of Hardfacing Ni–Cr–B–Si–C Alloys, *Acta Materialia*, 61(16), 6061-6070.
- Hoatson, D.M., Jaireth, S., Jaques, A.L., 2006. Nickel sulfide deposits in Australia: Characteristics, resources, and potential. *Ore Geology Reviews* 29, 177-241.
- Hoseynabadi, H. A., Oraee, H. ve Tavner, P.J., 2010. “Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 32, Issue 7, pp. 817-824.
- Hossain, M.T., Awal, Z.I. ve Das, S., 2014. A Study on the Accidents of Inland Water Transport in Bangladesh: The Transportation System and Contact Type Accidents, *Journal of Transport System Engineering*, 1, 23-32.
- Hoseynabadi et al. (2010) used the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method to study the reliability of a wind turbine (WT) system, using a proprietary software reliability analysis tool. They compared the quantitative results of an FMEA and reliability field data from real wind turbine systems and their assemblies. Their results may be useful for future wind turbine designs.
- Hosseini, N., Givehchi, S. ve Maknoon, R., 2020. Cost-Based fire Risk Assessment in Natural Gas Industry by Means of Fuzzy FTA and ETA, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 104025.
- Hsu, H.-M., & Chen, C.-T. 1996. Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. *Fuzzy sets and Systems*, 79(3), 279-285.
- Hull Department ClassNK, 2013. Liquefaction of Bulk Cargoes Introduction of the ClassNK Activities for the Safe Carriage of Nickel Ore, 1–24.
- Hyun, K.-C., Min, S., Choi, H., Park, J. ve Lee, I.-M. 2015. Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 121-129.
- IMSBC Code, 2022. International Maritime Solid Bulk Cargoes Code, London.
- INTERCARGO, 2022. 2021–2022 Annual Review, London
- INTERCARGO and Lloyd’s Register, 2013. Carrying Solid Bulk Cargoes Safely Guidance for Crews on the International Maritime Solid Bulk Cargoes Code
- IOTWG, 2013. Iron Ore Technical Working Group Submission for Evaluation and Verification.
- Isiacık Colak T. ve Satır T., 2014. Cargo Liquefaction And Dangers To Ships. *Istanbul Technical University, Faculty of Maritime, Tuzla 34940, Turkey*

- Işığışok, E. 2005. *Toplam kalite yönetimi bakış açısıyla istatistiksel kalite kontrol*. Bursa: Ezgi Kitapevi
- Islam, M. R., Sayed, C. M. A. A., ve Suhrab, M. I. R. 2022. Factors Affecting Ship's Stability Due To Cargo Liquefaction: Nickel Ore and Bauxite. *Specialis Ugdymas*, 1(43), 3465-3475.
- ISO. 2009. *Risk Management: Principles and Guidelines*: ISO.
- İMİB, 2021. Nikel Yataklarının Durumu, İşletmeciliği Ve Geleceği, İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, Maden Kitapçıkları.
- Jaeger H. M., Nagel S.R. ve Behringer R., 1996. Granular solids, liquids and gases. *Reviews of Modern Physics*, 68(4), 1259-1273.
- Jian, Z. H. O. U., Qi-wei, J. I. A. N., Jiao, Z. H. A. N. G. ve Ning, L. I., 2013. Dynamic behaviors of iron ore concentrate under cyclic loading by hollow cylinder apparatus. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(12), 2346-2352.
- Jian, Q., Wang, H., Zhou, J., Mao, W. ve Zheng, H., 2020. Liquefaction potential evaluation for iron ore fines based on a correlation between moisture content and cyclic strength. *Applied Ocean Research*, 103, 102327.
- Jonas, M., 2010. Liquefaction of unprocessed mineral ores -Iron ore fines and nickel ore, Brookes Bell, Liverpool. Gard News 197.
- Jordan, L. ve Swanger, W. H., 1930. The Properties of Pure Nickel. Bureau of Standards Journal of Research, 5, 1291–1307.
- Ju, L., 2017. Assessment Of Ship Cargo Liquefaction. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Naval Architecture, Ocean and Marine Engineering Universities of Strathclyde, UK.
- Ju L., Vassalos D., ve Boulougouris E., 2016. Numerical assessment of cargo liquefaction potential. *Ocean Engineering*, Volume 120, Pages 383-388.
- Jung, J. H., Yoon, H. S., Lee, C. Y. ve Shin, S. C., 2012. Effect of the vertical baffle height on the liquid sloshing in a three-dimensional rectangular tank. *Ocean Engineering*, 44, 79–89.
- Jung, S., Yoo, J. ve Lee, Y.-J. 2020. A Software Fault Tree Analysis Technique for Formal Requirement Specifications of Nuclear Reactor Protection Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 107064.
- Karaca, İ. ve Söner, Ö., 2020. Investigating Real Ship Accidents with Descriptive Analysis in Turkey. International Conference on Maritime Safety and Security Law, Kasım, 14, 299-303

- Kahrobaee, S., 2011. "Risk-based Failure Mode and Effect Analysis for wind turbines (RB FMEA)" IEEE Explore, pp. 1-7.
- Katzagiannakis, N., 2013. Mineralogical-Petrographic study and enrichment possibilities of the nickel lateritic iron ore of Nome deposit, Albania.
- Kılıç, A. ve Sanal, H.T., 2015. Çanakkale Boğazı'nda Karaya Oturmayla Sonuçlanan Gemi Kazaları, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17, 2, 38-50.
- Kim, D.H, Cho, W.I. ve Seung, J.L., 2020. Fault Tree Analysis as A Quantitative Hazard Analysis with A Novel Method for Estimating the Fault Probability of Microbial Contamination: A Model Food Case Study, Food Control. 110, 11, 107019
- Kim, S. H., Kim, H. S., Kang, I. K. ve Kim, W. S., 2017. An Analysis on Maritime Casualties of Fishing Vessel by FTA Method, Journal of the Korean Society of Fisheries Technology, 53, 4, 430-436.
- Kirchner, S., 2015a. Limiting the Effects of Dry Cargo Liquefaction: Ultralight Honeycomb Cargo Hold Separators.
- Kirchner, S. (2015b). Limiting the Risks and Effects of Dry Cargo Liquefaction with Drying Filler Material.
- Knudsen, O. F. ve Hassler, B., 2011. IMO legislation and its implementation: accident risk, vessel deficiencies and national administrative practices. *Marine Policy*, 35(2): 201-207.
- Koromila, I. A., Spandonidis, C. C. ve Spyrou, K. J., 2013. Experimental investigation of cargo liquefaction and impact on the stability of a bulk-carrier. In Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop (pp. 1-7).
- Kuck, P.H., 2006. Nickel. United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2006. United States Geological Survey, 116-117.
- Kuzu, A. C., Akyüz, E. ve Arslan, Ö., 2019. Application Of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) To Maritime Industry: A Risk Analyzing of Ship Mooring Operation, Ocean Engineering, 179, 128-134
- Kuzu, A. C., Şenol, Y. E. ve Arslan, Ö. 2015. Fuzzy Fault Tree Analysis of Parted Rope Injuries During Mooring Operations. *Journal of ETA Maritime Science*, 6(3), 215-227.
- Kum, S. ve Sahin, B. 2015. A root cause analysis for Arctic Marine accidents from 1993 to 2011. *Safety science*, 74, 206-220.

- Lavasani, M. R. M., J. Wang, Z. Yang ve J. Finlay, 2011. Application of Fuzzy Fault Tree Analysis on Oil and Gas Offshore Pipelines, *International Journal of Marine Science Engineering*, 1, 1, 29-42.
- Lavasani, S. M., Ramzali, N., Sabzalipour, F. ve Akyuz, E. 2015. Utilisation of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) for quantified risk analysis of leakage in abandoned oil and natural-gas wells. *Ocean Engineering*, 108, 729-737.
- Lavasani, S. M., Zendegani, A. ve Celik, M. 2015. An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry. *Process Safety and Environmental Protection*, 93, 75-88.
- Lee, H.L., 2017. Nickel ore bulk liquefaction a handymax incident and response. *Ocean Engineering* 139:65–73
- Lee, J. H., Hwang, S. ve Kim, S., 2017. Safety Assessment of LNG Transferring System Subjected to Gas Leakage Using FMEA and FTA, *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, 3,3, 125–135.
- Lee, W.S., Grosh, D.L., Tillman, F.A. ve Lie, C.H., 1985. Fault Tree Analysis, Methods and Applications – A Review. *IEEE Transactions on Reliability*, R-34,3, 121–123.
- Levason, N., 1997. *Safety analysis of air traffic control upgrades. Final report.*
- Lewis, J.F., Draper, G., Proenza, J.A., Espaillat, J., Jimenez, J., 2006. Ophiolite-related ultramafic rocks (serpentinites) in the Caribbean Region: A review of their occurrence, composition, origin, emplacement and Ni-laterite soil formation. *Geologica Acta*, 4, 237-263.
- Li, H. ve Chu, Y., 2018. Cause Analysis of Sudden Water Pollution Accidents Based on Fuzzy Fault Tree: Taking the South-To-North Water Diversion Project in China as An Example, *Nature Environment and Pollution Technology*, 17,4, 1087-1092.
- Li, R., Zhou, Z., Cheng, Y., ve Wang, J., 2017. Failure effects evaluation for ATC automation system. *Hindawi*, 1-7.
- Liu, H.-C., Liu, L. ve Liu, N., 2013. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828–838.
- Lloyd's Register, UK P&I Club ve Intercargo, 2016. Carrying Solid Bulk Cargoes Safely. Guidance for crews on the International Maritime Solid Bulk Cargoes Code – Second edition.

- Menteş, A. ve Helvacıoğlu, İ. H., 2010. Çok Noktadan Bağlı Tanker-Şamandıra Bağlama Sistemlerinde Hata Ağacı Tabanlı Risk Analizi, *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 182, 34-39.
- Mitarai, N. ve Nori, F., 2006. Wet granular materials. *Advances in physics*, 55(1-2), 1-45.
- MTA, 2018. Dünyada ve Türkiye’de Nikel, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Montewka, J., Ehlers, S., Goerlandt, F., Hinz, T., Tabri, K. ve Kujala, P., 2014. A framework for risk assessment for maritime transportation systems –A case study for open sea collisions involving RoPax vessels. *ReliabilityEngineering & System Safety (124)*: 142-157
- Munro, M. ve Mohajerani, A., 2016a. Moisture content limits of iron ore fines to prevent liquefaction during transport: review and experimental study. *International Journal of Mineral Processing*, 148, 137-146.
- Munro, M. C. ve Mohajerani, A., 2016b. Liquefaction incidents of mineral cargoes on board bulk carriers. *Advances in Materials Science and Engineering*,
- Munro, M. C. ve Mohajerani, A., 2017. Bulk cargo liquefaction incidents during marine transportation and possible causes. *Ocean Engineering*, 141, 125–142.
- Musubeyli Erginel, N. (2004). Tasarım Hata Türü ve Etkileri Analizinin Etkinliği İçin Bir Model Uygulaması. *Makine Mühendisleri Odası Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 15 (3), 17-26.
- National Transportation Safety Committee Republic Of Indonesia, 2021. Marine Accident Investigation Report, ‘‘The Sinking of Nur Allya’’, Final Report.
- Nippon Kaiji Kyokai, 2012. Guidelines for the Safe Carriage of Nickel Ore, Class NK. 2nd Edition.
- Onisawa, T. 1990. An application of fuzzy concepts to modelling of reliability analysis. *Fuzzy sets and Systems*, 37(3), 267-286.
- Onisawa, T. 1996. Subjective analysis of system reliability and its analyzer. *Fuzzy sets and Systems*, 83(2), 249-269.
- Onisawa, T. ve Nishiwaki, Y. 1988. Fuzzy human reliability analysis on the Chernobyl accident. *Fuzzy sets and Systems*, 28(2), 115-127.
- Onur, B., 2005. Bursa Orhaneli Nikel Cevherinin Zenginleştirme Olanaklarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İ.T.U., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Ozcan, S. 2001. İstatistiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi ve çimento sanayiinde bir uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 152.
- Özfirat, P.M., 2014. Bulanık Önceliklendirme Metodu ve Hata Türü ve Etkileri Analizini Birleştiren Yeni Bir Risk Analizi Yöntemi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4), 755-768.
- Özkılıç, Ö., 2005. *İş sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri*, Ankara: Ajans-Türk Basın ve Basım A.Ş., 50-60.
- Paassen, L. A., Vardon, P. J., ve Jeffrey, P., 2015. Cargo liquefaction in bulk carriers: a review. *Yearbook Mijnbouwkundige Vereeniging*.
- Paciarotti, C., Mazzuto, G. ve D’Ettorre, D., 2013. A revised FMEA application to the quality control management. In *International Journal of Quality & Reliability Management* (Vol. 31, Issue 7, pp. 788–810). <https://doi.org/10.1108/IJQRM-02-2013-0028>
- Panama Maritime Authority, 2011a. Department of Maritime Casualty Investigations. REPORT: M/V “NASCO DIAMOND” R-020-2011/DIAM.
- Panama Maritime Authority, 2011b. Department of Maritime Casualty Investigations. REPORT: M/V “HONG WEI” R-007-2011- DIAM.
- Panama Maritime Authority, 2011c. Department of Maritime Casualty Investigations. REPORT: M/V “JIAN FU STAR” R- 011-11- DIAM.
- Panama Maritime Authority, 2013. Department of Maritime Casualty Investigations. REPORT: M/V “HARITA BAUXITE” R-025-2013/DIAM.
- PPI, 2020. PANDIMAN PHILIPPINES, INC. P&I Correspondent in the Philippines. Guide to Nickel Ore Cargo, Philippines
- Poulsen, J., 2013. The deadliest cargo, Principal Surveyor, Atlantic Marine Associates, 13–14.
- Popek, M. (2010). The influence of organic polymer on properties of mineral concentrates. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 20(4), 90–93.
- Popov, G., Lyon, B. K. ve Hollcroft, B., 2016. A practical guide to assessing operational risks, failure mode and effect analysis. Kansas City, USA: John Wiley&Sons.
- Pourramazan, A., Saffari, S. ve Barghandan A., 2017. Study of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) on Capacitor Bank Used in Distribution Power Systems. *Ijireeice*, 5(2), 113–118. <https://doi.org/10.17148/ijireeice.2017.5221>

- Purba, J. H., Tjahyani, D. S., Widodo, S. ve Ekariansyah, A. S. 2020. Fuzzy probability based event tree analysis for calculating core damage frequency in nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Progress in Nuclear Energy*, 125, 103376.
- Putra, B. G., Aryawan, W. ve Nurita, Y., 2018. Study on Implementation of Risk based Inspection using FMEA- FTA Method on Ro-Ro Ship Bastiong-Sofifi Route, The 3rd International Conference on Marine Technology (SENTA). 73-78.
- Rebouillat, S. ve Liksonov, D., 2010. Fluid–structure interaction in partially filled liquid containers: a comparative review of numerical approaches. *Computers & Fluids*, 39(5), 739-746.
- Ringdahl, L.H., 2001. Safety Analysis Principles and Practice in Occupational Safety, Second Edition. Taylor and Francis, London Newyork, 120-146.
- Roberts, S. E., Pettit, S. J., ve Marlow, P. B., 2013. Casualties and loss of life in bulk carriers from 1980 to 2010. *Marine Policy*, 42, 223-235.
- Rona, P.A., Scott, S.D., 1994. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization: New Perspectives. *Economic Geology*. 88, 1935-1975.
- Rona, P.A., 2003. Resources of the Sea Floor. *Science*. 299, 673-674.
- Rose. T. P., 2014. *Solid Bulk Shipping: Cargo Shift, Liquefaction and the Transportable Moisture Limit*.
- Russomanno, D. J., 1999. “A function-centered framework for reasoning about system failure at multiple levels of abstraction”, *Expert Systems: The International Journal of Knowledge Engineering and Neural Networks*, Volume 16, Issue 3, pp. 148 - 169.
- Rowe, R. C. ve Roberts, R. J., 1995. *The mechanical properties of powders. Advances in Pharmaceutical Sciences* (Vol. 7).
- Sahin, B. 2017. Consistency control and expert consistency prioritization for FFTA by using extent analysis method of trapezoidal FAHP. *Applied Soft Computing*, 56, 46-54.
- Sarıalioğlu, 2019. Gemi Makine Dairesi Yangınlarının İnsan Faktörü Analiz Sınıflandırma Sistemi ve Bulanık Hata Ağacı Yöntemleri ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Sarıalioğlu, S., Uğurlu, Ö., Aydın, M., Vardar, B. ve Wang, J., 2020. A Hybrid Model for Human-Factor Analysis of Engine-Room fires On Ships: HFACS-PV&FFTA, *Ocean Engineering*, 217, 107992.

- Sayareh J. ve Ahouei, VR., 2013. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for Reducing the Delays of Cargo Handling Operations in Maritime Bulk Terminals. *Journal of Maritime Research* 10 (2):43-50.
- Seed, H. B. ve Idriss, I.M., 1982. Ground Motion and Soil Liquefaction during Earthquakes, Monograph Series, Earthquake Engineering Reserch Institute, University of California, Berkeley, California.
- Seng, T. A. C., Ayris, O., Czerwonka, A., McCrossan, E., Petrov, P. ve Russell, G., 2017. *Liquefaction Risk Management*.
- Senol, Y. E., Aydogdu, Y. V., Sahin, B. ve Kilic, I. 2015. Fault tree analysis of chemical cargo contamination by using fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, 42(12), 5232-5244.
- Senol, Y. E. ve Sahin, B. 2016. A novel real-time continuous fuzzy fault tree analysis (RC-FFTA) model for dynamic environment. *Ocean Engineering*, 127, 70-81.
- Shen, J., 2012. Nickel Ore and its safe shipment. *Advanced Materials Research Vols 396-398. pp 2183-218*
- Ship Safety Branch of the Canadian Coast Guard, 2017. Canadian Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes, Second Edition, Canada.
- Shouzhi, A., Wang J. ve Co, 2011. Carriage of Nickel Ore: Cargo Liquefaction and Suggestions.
- Sofyalıoğlu, Ç. ve Gülçiçek, B., 2014. Bulanık Kalite Fonksiyon Göçerimi ile Hata Türü ve Etkileri Analizinin Bir Ambalaj Firmasında Uygulanması. *Yönetim ve Ekonomi Celal Bayar Üniversitesi*, 21 (2), 73-97.
- Spandonidis C.C. ve Spyrou, K.J., 2016. Coupled vessel-dry-granular-cargo roll dynamics in regular beam seas. *Ocean Engineering*, 120, 238-245.
- Stamatis, D. H., 2003. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Milwaukee: Quality Press.
- Stapelberg, R. F. 2009. *Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design*: Springer Science & Business Media.
- Şengöz, T.E., 2019. Sıvılaşma Nedir? Zemin Sıvılaşmasının Mühendislik Değerlendirmesi, Zemin Sıvılaşması ile İlgili Alınması Gereken Tedbirler, Önlemler ve Tavsiyeler İle Zemin ve Temel Etüdü Uygulama.
- Terzaghi, K., 1925. *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. F. Deuticke.
- Terzaghi, K., Peck, R. ve Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*.

- The Hong Kong Special Administrative Region, 2015. Marine Department-Marine Accident Investigation Section, Report of Investigation into Sinking of Hong Kong Registered Bulk Carrier ‘‘Trans Summer’’
- The Hong Kong Special Administrative Region, 2021. Marine Department-Marine Accident Investigation Section, Report of Investigation into Sinking of Hong Kong Registered Bulk Carrier ‘‘Emerald Star’’
- The Swedish Club, 2012. CARRIAGE OF NICKEL ORE AND IRON ORE FINES, Detailed Bulletin, (June), 1–19.
- TSE, 2018. *Arıza Modları ve Etki Analizi (FMEA) (TS EN IEC 60812)*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Tufan, E.A., 2014. Ni-Lateritlerin Oluşumu ve Özellikleri. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 16(2) 68-78.
- Tunçel, A. L., 2020. Dökme Yük ve Genel Kargo Gemi Kazalarının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İSTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun.
- Turan, M., 2018. Transformatör Üreten Bir Firmada Bulanık Fmea İle Risk Analizi Uygulaması. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir.
- Tzouvelakis, 1981. Processing of the nickel laterites and the position of nickel in the world market, Technical Chronicle.
- Uğurlu, Ö., 2011. Petrol Tankerlerinde Meydana Gelen Deniz Kazalarının Risk Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- USGS, 2023. Mineral Commodity Summaries 2023, U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- UK P&I CLUB, 2010. Moisture migration and surface ventilation.
- UNCTAD Secretariat, 2014. ‘‘Review of maritime transport,’’ in *United Nations Conference on Trade and Development*, United Nations, Geneva, Switzerland.
- URL-1, 2023. <http://www.larco.gr/nickel.php>, 25.07.2023.
- Uyanık, O., 2002. ‘‘Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi’’, DEU. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Ünver, B., Gürgen, S., Sahin, B. ve Altın, İ. 2019. Crankcase explosion for two-stroke marine diesel engine by using fault tree analysis method in fuzzy environment. *Engineering Failure Analysis*, 97, 288-299.

- Vassalos, D. ve Boulougouris, E., 2016. Numerical assessment of cargo liquefaction potential. *Ocean Engineering*, 120, 383-388.
- Waghmode, L. Y. ve Patil, R. B., L., 2013. An Overview of Fault Tree Analysis (FTA) Method for Reliability Analysis, *Journal of Engineering Research and Studies*, 4, 06-08.
- Walton, P., 2015. IMSBC CODE GROUP 'A' BULK CARGOES Prevention, Cause and Effect of Liquefaction.
- Wang, D., Zhang, P. ve Chen, L. 2013. Fuzzy fault tree analysis for fire and explosion of crude oil tanks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1390-1398.
- Wang, H., Jian, Q. ve Xie, X., 2019, September. Application of AHP for Liquefaction Risk Assessment of Bulk Mineral Ores during Marine Transportation. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence* (pp. 545-550).
- Wang L., Wang J., Shi M., Fu S. ve Zhu M., 2020. Critical Risk Factors in Ship Fire Accidents, *Maritime Policy & Management*, 1-19.
- Weng, J., Yang, D., Chai, T. ve Fu, S., 2019. Investigation of occurrence likelihood of human errors in shipping operations, *Ocean Eng.* 182:28–37.
- Wolforth, I., Walker, M., Grunske, L. and Papadopoulos, Y., 2009. "Generalizable safety annotations for specification of failure patterns", *Software: Practice and Experience*, Volume 40, Issue 5, 453 - 483.
- Wu, Y. C., Laiwang, B. ve Shu, C., 2020. Process Loss Prevention of Petrochemical Process: A Case Study of The Flashing Accident of The Storage Tank on Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Powder in Taiwan. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69, 104371.
- Xiaonan, C., Minyan, L. I. U., ve Longjun, H., 2014. Shipwreck statistical analysis and suggestions for ships carrying liquefiable solid bulk cargoes in China. *Procedia Engineering*, 84, 188-194.
- Yazdi, M., Korhan, O. ve Daneshvar, S. 2020. Application of fuzzy fault tree analysis based on modified fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS for fire and explosion in the process industry. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 26(2), 319-335.
- Yıldırım, U., Uğurlu, Ö. ve Başar, E., 2015. Karaya Oturma Kazalarında İnsan Hatası: Konteyner Gemileri için Örnek Çalışma, *Journal of ETA Maritime Science*, 3,1, 1-10

- Yıldırım, U. ve Başar, E., 2019., Balıkçı Gemilerinde Çatışma Kazalarının İnsan Faktörleri Analiz ve Sınıflandırma Sistemi (HFACS) ile İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi, 11, 203-220
- Yıldırım, U., 2016. Deniz Kazalarının İnsan Faktörleri Analiz Ve Sınıflandırma Sistemi (Hfacs) İle İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Youd, T.L., 1992. Liquefaction, ground failure, and consequent damage during the 22 April 1991 Costa Rica Earthquake. Proceedings of the NSF/UCR US.Costa Rica Workshop on the Costa Rica Earthquakes of 1990-1991, April 2 – 4, 1992, Effects on Soils and Structures, Oakland, California, ERI Publication, No: 93-A, 73-75.
- Yörükoğlu, H., 2014. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Risklerinin Bulanık-FMEA Yöntemi ile Analizi. Yüksek Lisans, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilimdalı*, Kocaeli.
- Zaib, A., Yin, J., & Khan, R. U. (2022). Determining role of human factors in maritime transportation accidents by fuzzy fault tree analysis (FFTA). *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 381.
- Zainol, Z., 2005. The development of a resin-in-pulp process for the recovery of nickel and cobalt from laterite leach slurries. (MSc thesis), Murdoch University, Western Australia, p:258.
- Zhang, J., Wu, W.ve Hu, J., 2016a. Parametric studies on nickel ore slurry sloshing in a cargo hold by numerical simulations. *Ships and Offshore Structures*, 12(2), 209–218.
- Zhang, J., Wu, W. ve Hu, J., 2016b. A numerical study of the effects of the longitudinal baffle on nickel ore slurry sloshing in a prismatic cargo hold. *Marine Structures*, 46, 149–166.
- Zhang, J., Wu, W. ve Hu, J., 2017. Study on the Sloshing of Nickel Ore Slurries With Three Different Moisture Contents. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 139(3), 032001.
- Zhang, J., Wu, W., Zhao, Z., ve Chen, Y., 2020. Numerical study on coupled effect of a vessel loaded with liquefied nickel ore. *Journal of Marine Science and Technology*, 25, 520-535.
- Zhu, C., Tang, S., Li, Z. ve Fang, X., 2020. Dynamic Study of Critical Factors of Explosion Accident in Laboratory Based on FTA, *Safety Science*, 130, 104877.
- Zhuang, C., Jian, Q., Zhou, J., Liu, S. ve Li, C., 2019. Centrifuge tests on the liquefaction behavior of iron ore concentrates with different moisture contents and applied accelerations. In International Conference on Robotics.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. ve Zhu, J. Z., 2005. The finite element method: its basis and fundamentals. Elsevier.

Zografidis, C. C., 2010. Effect of physicochemical behavior of nickel laterites in the energy optimization of pyrometallurgy processing them.

Zografakis, K. 2013. *The Problem of Cargo Liquefaction in the Maritime Industry*.

Zou, Y., Shen, C. ve Xi, X., 2013. Numerical simulations on the capsizing of bulk carriers with nickel ores. The Journal of Navigation, 66(6), 919-930.



8. EKLER

Ek 1. Etik Kurul Kararı Onayı



HİZMETE ÖZEL

T.C.

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Hukuk Müşavirliği

28.11.2023 15:43
E-82554930-050.01.04-449242
04370827



Sayı : E-82554930-050.01.04-449242
Konu : Dr. Öğr. Üyesi Devran YAZIR'ın Etik
Kurul Kararı

28.11.2023

Sn. Dr. Öğr. Üyesi Devran YAZIR

İlgi : 27.11.2023 tarihli ve E-26014373-050.01.04-448714 sayılı yazı.

KTÜ-Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi öğretim üyelerinden Dr. Öğr. Üyesi Devran YAZIR'ın "**Deniz Taşımacılığında Nikel Madeni Yükünün Sıvılaştırılmasından Kaynaklanan Deniz Kazalarının Bulanık Hata Ağacı Analiz (Ffta) Ve Hata Türleri ve Etkileri Analizi (Fmea) Yöntemleri İle İncelenmesi**" adlı yüksek lisans tez çalışması için gerekli olan Etik Kurul incelemesi yapılmış ve başvurunuza onay verilmiştir.
Bilgilerinize ve gereğini rica ederim.

Prof. Dr. Akif CİNEL
Rektör Yardımcısı

Ek: Dr. Öğr. Üyesi Devran YAZIR'ın Etik Kurul Kararı

Doğrulama Kod: 146E5119-1E41-41A7-B7FE-5D43BFEF49CA **Bu belge güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.** **HİZMETE ÖZEL** Doğrulama Adres: <https://www.turkiye.gov.tr/karadeniz-teknik-universitesi-ebys>

61080 – Trabzon /
TÜRKİYE
Tel: 04623772107

Faks: 04623774399

www.ktu.edu.tr

Ayrıntılı Bilgi için İrtibat
Belgin ŞEN
hukukmusavirligi@ktu.edu.tr

Sayfa
1 / 1



Ek 2. Araştırma Anketi Ön Bilgilendirme ve Kişisel Bilgiler Bölümü

ARAŞTIRMA ANKETİ

Değerli Katılımcı,

Aşağıda yer alan anket formundaki bilgiler Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Öğr. Üyesi Doç. Dr. Devran YAZIR danışmanlığında yapılacak olan Yüksek Lisans tez çalışmasında kullanılacaktır. Anket soruları genel olarak değerlendirileceği için isminizi belirtmenize gerek yoktur. Anket ile Deniz Taşımacılığında Nikel Madeni Yükünün Sıvılaşmasından Kaynaklanan Deniz Kazalarının Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) ve Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) Yöntemleri İle araştırılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle sorulara vereceğiniz samimi cevaplar için şimdiden teşekkür ederim.

Murat ALKAÇ

KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi / Denizcilik-Gemi Yönetimi Öğretmeni

A- Kişisel bilgiler

Eğitim Durumunuz:	Lise <input type="checkbox"/>	Önlisans <input type="checkbox"/>	Lisans <input type="checkbox"/>	Lisansüstü <input type="checkbox"/>	Doktora <input type="checkbox"/>
Denizde Çalışma Süreniz:	3 yıldan az <input type="checkbox"/>	3-5 yıl <input type="checkbox"/>	6-10 yıl <input type="checkbox"/>	11-15 yıl <input type="checkbox"/>	15 yıldan fazla <input type="checkbox"/>
Karada Çalışma Süreniz:	3 yıldan az <input type="checkbox"/>	3-5 yıl <input type="checkbox"/>	6-10 yıl <input type="checkbox"/>	11-15 yıl <input type="checkbox"/>	15 yıldan fazla <input type="checkbox"/>
Çalıştığınız sektör:	Kamu <input type="checkbox"/>	Üniversite <input type="checkbox"/>	Özel <input type="checkbox"/>	Kooperatif <input type="checkbox"/>	Kendi işim <input type="checkbox"/>
Çalıştığınız Kurumdaki Konumunuz (Göreviniz)					

Ek 3. Bulanık Hata Ağacı İçin Anket

Değerli katılımcı,

Nikel madeni yükünün sıvılaşmasına neden olan temel olaylar Tablo B’de listelenmiştir. Bu temel olayların meydana gelmesi durumunda nikel madeni yükünün sıvılaşmasına hangi derecede etki edeceğini ifade etmek üzere Tablo B’deki anketi doldurunuz.

B- Bulanık Hata Ağacı Analizi İçin Anket							
Hatalar		Çok Az	Az	Orta Az	Orta	Orta Yüksek	Çok Yüksek
1	Valf Sızıntısı						
2	Devrede Kalan Su						
3	Hatalı Pompa Operasyonu						
4	Kapağın Tam Kapatılmaması						
5	Kapak Lastiklerinin Sızdırması						
6	Kapağın Kapatılmaması						
7	Baskı Seallerinin Uygulanmaması						
8	Menhol Lastiklerinin Sızdırması						
9	Menholün Tam Kapatılmaması						
10	Ambar İçerisinden Geçen Hava Firar/Diğer Devrelerden Su/Sıvı Sızıntısı						
11	Dip Tank/Yan Asma Tank Saclarından Su Sızıntısı						
12	Hasarlı Güverte Sacından Su Sızıntısı						
13	Dip Tanklarda Aşırı Su Olması						
14	Tirimsiz/Haplanmamış Yük						
15	Yanlış Yük/Ağırlık Dağılımı						
16	Seyir Sırasında Yetersiz Yük Kontrolü/Takibi						
17	Seyir Sırasında Yetersiz Ambar Sintinesi Kontrolü/Takibi						
18	Sıvılaşmaya Müsait Yük						
19	Hava Raporlarını Gerektiği gibi Takip Etmemek						

Tablo B'nin devamı

20	Aşırı Nem							
21	Yağmur							
22	Serpinti							
23	Yükün Mavnada Islanması							
24	Yükün Maden Sahasında Islanması							
25	Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi							
26	Yanlış Yük Örneği							
27	IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek							
28	Yanlış Yük Tanımlaması							
29	Hatalı Can Test (Teneke Kutu Testi) Uygulaması							
30	MSDS'lerin Anlaşılması/Yanlış Anlaşılması							
31	Emniyet Kültürü Eksikliği							
32	İhmal							
33	Aşırı Özgüven							
34	Zaman Baskısı							
35	Şirket Baskısı							
36	Liman Otoritesi Baskısı							
37	Hatalı TNL/Nem İçeriği Testi							
38	Yanlış Beyan							
39	Bağımsız Sörveyör Atanmaması							
40	Sörveyör Atanmaması							

Ek 4. FMEA / Hata Türlerinin Şiddetlerini Değerlendirme Anketi

Değerli katılımcı,

Nikel madeni yükünün sınıvlaşmasına neden olan temel olaylar ve Hata Ağacı yöntemi ile elde edilmiş minimum kesme setleri Tablo C’de listelenmiştir. Tablodaki temel olayların ve minimum kesme setlerinin meydana gelmesi durumunda şiddetinin hangi derecede olacağını değerlendirmek üzere Tablo C’de verilen anketi doldurunuz. (Not: Hata türlerinin şiddetini değerlendirmek için aşağıda verilen şiddet tablosunu referans alınız)

Hata Türlerinin Şiddet Tablosu		
Derece	Etki	Etkinin Şiddeti
10	Uyarısız Gelen Tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata
9	Uyarısız Gelen Tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata
8	Çok Yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara, 3.derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata
7	Yüksek	Ekipmanın tamamen hasar görmesine sebep olan ve ölüme, zehirlenme, 3.derece yanık, akut ölümcül hastalık vb. etkiye sahip hata
6	Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata
5	Düşük	Kırık, kalıcı küçük iş görmemezlik, 2.derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip hata
4	Çok Düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata
3	Önemsiz	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata
2	Çok Önemsiz	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata
1	Yok	Etki yok

C- FMEA / Hata Türlerinin Şiddetlerini Değerlendirme Anketi			Hataların Şiddet Değerleri									
	Minimum Kesim Setleri (Hata Türleri Kodları)	Hata Türleri	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	BE6	Kapağın Kapatılmaması										
2	BE4	Kapağın Tam Kapatılmaması										
3	BE14	Tirimsiz/Haplanmamış Yük										
4	BE19	Hava Raporlarını Gerekli gibi Takip Etmemek										
5	BE7	Baskı Seallerinin Uygulanmaması										
6	BE3	Hatalı Pompa Operasyonu										
7	BE5	Kapak Lastiklerinin Sızdırması										
8	BE9	Menholün Tam Kapatılmaması										
9	BE8	Menhol Lastiklerinin Sızdırması										
10	BE10	Ambar İçerisinden Geçen Hava Fırar/Diğer Devrelerden Su/Sıvı Sızıntısı										
11	BE15	Yanlış Yük/Ağırlık Dağılımı										
12	BE13	Dip Tanklarda Aşırı Su Olması										
13	BE1	Valf sızıntısı										
14	BE11	Dip Tank/Yan Asma Tank Saclarından Su Sızıntısı										
15	BE17XBE18	Seyir Sırasında Yetersiz Ambar Sintinesi Kontrolü/Takibi x Sıvılaşmaya Müsait Yük										
16	BE16XBE18	Seyir Sırasında Yetersiz Yük Kontrolü/Takibi x Sıvılaşmaya müsait yük										
17	BE2	Devrede Kalan Su										
18	BE12	Hasarlı Güverte Sacından Su Sızıntısı										
19	BE21XBE26XBE37	Yağmur x Yanlış Yük Örneği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi										
20	BE21XBE31XBE37	Yağmur x Emniyet Kültürü Eksikliği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi										

Tablo C'nin devamı

21	BE24XBE26XBE37	Yükün Maden Sahasında Islanması x Yanlış Yük Örneği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi												
22	BE24XBE31XBE37	Yükün Maden Sahasında Islanması xEmniyet Kültürü Eksikliği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi												
23	BE21BE27XBE37	Yağmur x IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi												
24	BE21XBE26XBE39	Yağmur x Yanlış Yük Örneği x Bağımsız Sörveyör Atanmaması												
25	BE21XBE31XBE39	Yağmur x Emniyet Kültürü Eksikliği x Bağımsız Sörveyör Atanmaması												
26	BE24XBE27XBE37	Yükün Maden Sahasında Islanması x IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi												
27	BE25XBE26XBE37	Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi x Yanlış Yük Örneği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi												
28	BE21XBE28XBE37	Yağmur x Yanlış Yük Tanımlaması x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi												
29	BE25XBE31XBE37	Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi x Emniyet Kültürü Eksikliği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi												
30	BE24XBE26XBE39	Yükün Maden Sahasında Islanması x Yanlış Yük Örneği x Bağımsız Sörveyör Atanmaması												
Not: 10: Uyarısız Gelen Tehlike - 1: Etkisi Yok														

Ek 5. FMEA / Hata Türlerinin Tespit Edilebilirliklerini Değerlendirme Anketi

Değerli katılımcı,

Nikel madeni yükünün sınıvlaşmasına neden olan temel olaylar ve Hata Ağacı yöntemi ile elde edilmiş minimum kesme setleri Tablo D'de listelenmiştir. Tablodaki temel olayların ve minimum kesme setlerinin meydana gelmesi durumunda şiddetinin hangi derecede olacağını değerlendirmek üzere Tablo D'de verilen anketi doldurunuz. (Not: Hata türlerinin şiddetini değerlendirmek için aşağıda verilen tespit edilebilirlik tablosunu referans alınız)

Hata Türlerinin Tespit Edilebilirlik Tablosu		
Derece	Tespit edilebilirlik	Etkinin Tespit Edilebilirliği
10	Neredeyse imkânsız	Tespit etme imkânı yok
9	Çok Az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği çok uzak
8	Az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği uzak
7	Çok düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği düşük
6	Düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği çok düşük
5	Orta	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği orta
4	Yüksek Ortalama	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği yüksek ortalama
3	Yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği yüksek
2	Çok yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği çok yüksek
1	Neredeyse kesin	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın tespit edilebilirliği hemen hemen kesin

D- FMEA / Hata Türlerinin Tespit Edilebilirliklerini Değerlendirme Anketi			Tespit Edilebilirlik Değerleri									
	Minimum Kesim Setleri (Hata Türleri Kodları)	Hata Türleri	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	BE6	Kapağın Kapatılmaması										
2	BE4	Kapağın Tam Kapatılmaması										
3	BE14	Tirimsiz/Haplanmamış Yük										
4	BE19	Hava Raporlarını Gerekli gibi Takip Etmemek										
5	BE7	Baskı Seallerinin Uygulanmaması										
6	BE3	Hatalı Pompa Operasyonu										
7	BE5	Kapak Lastiklerinin Sızdırması										
8	BE9	Menholün Tam Kapatılmaması										
9	BE8	Menhol Lastiklerinin Sızdırması										
10	BE10	Ambar İçerisinden Geçen Hava Fırar/Diğer Devrelerden Su/Sıvı Sızıntısı										
11	BE15	Yanlış Yük/Ağırlık Dağılımı										
12	BE13	Dip Tanklarda Aşırı Su Olması										
13	BE1	Valf sızıntısı										
14	BE11	Dip Tank/Yan Asma Tank Saclarından Su Sızıntısı										
15	BE17XBE18	Seyir Sırasında Yetersiz Ambar Sintinesi Kontrolü/Takibi x Sıvılaşmaya Müsait Yük										
16	BE16XBE18	Seyir Sırasında Yetersiz Yük Kontrolü/Takibi x Sıvılaşmaya müsait yük										
17	BE2	Devrede Kalan Su										
18	BE12	Hasarlı Güverte Sacından Su Sızıntısı										
19	BE21XBE26XBE37	Yağmur x Yanlış Yük Örneği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi										
20	BE21XBE31XBE37	Yağmur x Emniyet Kültürü Eksikliği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi										

Tablo D'nin devamı

21	BE24XBE26XBE37	Yükün Maden Sahasında Islanması x Yanlış Yük Örneği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi											
22	BE24XBE31XBE37	Yükün Maden Sahasında Islanması xEmniyet Kültürü Eksikliği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi											
23	BE21BE27XBE37	Yağmur x IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi											
24	BE21XBE26XBE39	Yağmur x Yanlış Yük Örneği x Bağımsız Sörveyör Atanmaması											
25	BE21XBE31XBE39	Yağmur x Emniyet Kültürü Eksikliği x Bağımsız Sörveyör Atanmaması											
26	BE24XBE27XBE37	Yükün Maden Sahasında Islanması x IMSBC ve Diğer Prosedürleri/Tavsiyeleri Takip Etmemek x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi											
27	BE25XBE26XBE37	Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi x Yanlış Yük Örneği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi											
28	BE21XBE28XBE37	Yağmur x Yanlış Yük Tanımlaması x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi											
29	BE25XBE31XBE37	Yükün Nem İçeriğinin Yanlış Beyan Edilmesi x Emniyet Kültürü Eksikliği x Hatalı TNL/Nem içeriği Testi											
30	BE24XBE26XBE39	Yükün Maden Sahasında Islanması x Yanlış Yük Örneği x Bağımsız Sörveyör Atanmaması											
Not: 10: Neredeyse imkânsız - 1: Neredeyse kesin													

ÖZGEÇMİŞ

İlkokul, Ortaokul ve Lise öğrenimini Gümüşhane’de tamamlayarak 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenimine başladı. 2011 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak Uzakyol Vardiya Zabiti ve 1.Zabit olarak tanker ve kuru yük gemilerinde çalıştı. 2018 yılında Gemi Yönetimi Öğretmeni olarak Bulancak Kaptan Ahmet Fatoğlu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi’nde öğretmenliğe başladı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Yazar evli ve bir çocuk babasıdır, iyi seviyede İngilizce bilmektedir.