T.C. KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
DENİZCİLİK İŞLETMELERİ YÖNETİMİ ANABİLİM DALI
DENİZCİLİK İŞLETMELERİ YÖNETİMİ BİLİM DALI

LNG YAKITLI GEMİLERİN DENİZ TAŞIMACILIĞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ: BULANIK DELPHİ VE BULANIK DEMATEL YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

Orçun TOPRAKÇI

KOCAELİ 2026

T.C. KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
DENİZCİLİK İŞLETMELERİ YÖNETİMİ ANABİLİM DALI
DENİZCİLİK İŞLETMELERİ YÖNETİMİ BİLİM DALI

LNG YAKITLI GEMİLERİN DENİZ TAŞIMACILIĞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ: BULANIK DELPHİ VE BULANIK DEMATEL YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

Orçun TOPRAKÇI

Doç. Dr. Ozan Hikmet ARICAN

KOCAELİ 2026

T.C. KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
DENİZCİLİK İŞLETMELERİ YÖNETİMİ ANABİLİM DALI
DENİZCİLİK İŞLETMELERİ YÖNETİMİ BİLİM DALI

LNG YAKITLI GEMİLERİN DENİZ TAŞIMACILIĞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ: BULANIK DELPHİ VE BULANIK DEMATEL YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

Tezi Hazırlayan: Orçun TOPRAKÇI

Tezin Kabul Edildiği Enstitü Yönetim Kurulu Karar ve No: 05.06.2026/20

Jüri Başkanı: Doç. Dr. Ozan Hikmet ARICAN

Jüri Üyesi: Prof. Dr. Gönül KAYA ÖZBAĞ

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Volkan EFECAN

KOCAELİ 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET v

ABSTRACT vi

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ vii

ŞEKİLLER LİSTESİ x

TABLOLAR LİSTESİ xi

GRAFİKLER LİSTESİ xii

GİRİŞ 1

BİRİNCİ BÖLÜM

1. ARAŞTIRMA BİLGİLERİ

1.1. HAVA KİRLİLİĞİ, SEBEPLERİ VE ETKİLERİ 5

1.1.1. Hava Kirliliği 5

1.1.2. Sera Gazı Etkisi 6

1.1.3. Küresel Isınma ve İklim Değişikliği 6

1.2. GEMİ KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİ 7

1.2.1. Azot Oksit (NO_x) 8

1.2.2. Sülfür Oksit (SO_x) 9

1.2.3. Partiküler Madde (PM) 9

1.2.4. Karbondioksit (CO_2) 9

1.2.5. Metan (CH_4) 10

1.3. HAVA EMİSYON KONTROLÜYLE İLGİLİ SÖZLEŞME VE DÜZENLEMELER 10

1.3.1. Hava Emisyonlarının Azaltılmasına Yönelik Tarihsel Süreç 10

1.3.2. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) 12

1.3.3. Hava Kirleticileri Kısıtlamaları 13

1.3.3.1. MARPOL Ek-VI Kural 13 – Dizel Motorlardan Kaynaklanan Azot Oksit (NO_x) Emisyonları 13

1.3.3.2. MARPOL Ek-VI Kural 14–Gemilerden Kaynaklanan Kükürt Oksit (SO_x) ve Partiküler Madde (PM) Emisyonları 14
1.3.3.3. Emisyon Kontrol Alanları (ECAs) 15
1.3.3.4. 2005/33/EC Sayılı AB Direktifi 17
1.3.4. Sera Gazları (CO_2, CH_4) Kısıtlamaları 18
1.3.4.1. Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi (EEDI) 19
1.3.4.2. Enerji Verimliliği Mevcut Gemi İndeksi (EEXI) 19
1.3.4.3. Karbon Yoğunluğu Göstergesi (CII) 20
1.3.4.4. Avrupa Emisyon Ticaret Sistemi (AB-ETS) 20
1.3.4.5. FuelEU Denizcilik Yönetmeliği (FuelEU Maritime) 21
1.4. DENİZ TAŞIMACILIĞINDA EMİSYON KONTROL SEÇENEKLERİ .. 23
1.4.1. MGO, MDO, Düşük Sülfürlü Dizel ve Ultra Düşük Sülfürlü Dizel Yakıt Kullanımı 23
1.4.2. Egzoz Gazı Temizleyiciler 24
1.4.3. LNG Yakıt Kullanımı 26
1.5. LNG YAKITI VE ÖZELLİKLERİ 29
1.5.1. LNG Yakıtının Yapısal Özellikleri 29
1.5.2. LNG Yakıtı Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları 31
1.5.2.1. Emisyon Azaltım Avantajı 31
1.5.2.2. Fiyat Avantajı 32
1.5.2.3. Kapasite Dezavantajı 32
1.5.2.4. Metan Açığa Çıkarması Dezavantajı 33
1.5.2.5. İlk Yatırım Maliyeti Dezavantajı 34
1.5.2.6. Alt Yapı Eksikliği ve Alt Yapı Maliyeti Dezavantajı 34
1.5.2.7. Belirsizlik Dezavantajı 35
1.6. LNG YAKITININ DENİZ TAŞIMACILIĞINDA KULLANILMASI 36
1.6.1. LNG Yakıtlı Makine Tipleri 36
1.6.2. LNG Yakıtlı Gemi Tipleri 41
1.6.3. LNG Yakıtı İkmal Ağı 50
1.6.4. LNG Yakıtlı Gemi Standartları (IGF Kod) 56
1.6.5. LNG Yakıtı Kullanımında Emniyet ve Güvenlik Hususları 57

İKİNCİ BÖLÜM

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. LNG YAKITLI GEMİLER İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR 60

2.2. DENİZCİLİK ALANINDA DELPHİ YÖNTEMİYLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR 66

2.3. DENİZCİLİK ALANINDA DEMATEL YÖNTEMİYLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR 67

2.4. DENİZCİLİK ALANINDA DELPHI-DEMATEL YÖNTEMİYLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR 68

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. YÖNTEM

3.1. TEZİN AMACI 70

3.2. TEZİN KAPSAMI 70

3.3. ARAŞTIRMA MODELİ VE KRİTERLER 72

3.3.1. Araştırma Modelinin Belirlenmesi 72

3.3.2. Ana ve Alt Kriterlerin Belirlenmesi 73

3.3.3. Evren ve Örneklem 75

3.4. BULANIK DELPHI YÖNTEMİ 77

3.4.1. Bulanık Delphi Anketinin Oluşturulması 78

3.4.2. Ortalama Bulanık Değerlendirme Puanlarının Belirlenmesi 78

3.4.3. En Çok Etkileyen Kriterlerin Belirlenmesi 79

3.5. BULANIK DEMATEL YÖNTEMİ 80

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. BULGULAR

4.1. KATILIMCI UZMAN BİLGİLERİ 86

4.2. BULANIK DELPHİ YÖNTEMİNİN UYGULANMASI 87

4.2.1. Anket Verisinin Güvenilirlik ve Geçerlilik Testi 87

4.2.2. Ortalama Bulanık Değerlendirme Puanlarının Belirlenmesi 88

4.2.3. En Çok Etkileyen Kriterlerin Belirlenmesi 88

4.3. BULANIK DEMATEL YÖNTEMİNİN UYGULANMASI 89

4.3.1. Kriter Çiftleri Arasındaki İlişkinin Saptanması 90

4.3.2. Etki-İlişki Haritasının Oluşturulması 93

4.3.3. Kriter Ağırlıklarının Bulunması 96

SONUÇ 98

KAYNAKÇA 105

EKLER 116

Ek-1. Etik Kurul İzni 116

Ek-2. Uzmanlardan Elde Edilen Dilsel Değişkenlerden Dönüştürülen Bulanık Sayıların Ortalama Değerler (ωj) Tablosu 117

Ek-3. Önem Sıralaması İçin Belirleyici Bir Değer Olan SJ Değerleri Tablosu 118

Ek-4. Görüş Birliği İçin Belirleyici Bir Değer Olan EAj Değerleri Tablosu 119

Ek-5. Bulanık DEMATEL Anket Formu 120

Ek-6. Bulanık Ortalama Direkt Etki Matrisi ($\tilde{Z}$) 121

Ek-7. Bulanık Normalize Edilmiş Direkt Etki Matrisi ($\tilde{X}$) 122

Ek-8. Bulanık Toplam İlişki Matrisi ($\tilde{T}$) 123

ÖZGEÇMİŞ 124

ÖZET

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) ve Avrupa Birliği (AB) tarafından sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda egzoz emisyonlarının azaltılması için uygulanan sıkı tedbirler karşısında, sıvılaştırılmış doğal gazla (LNG) çalışan gemiler, gemi sahipleri ve denizcilik işletmeleri tarafından orta vadede en uygun çözüm olarak görülmektedir. Bu gemilerin yaygınlaşması büyük bir hızla devam etmektedir. Bu çalışma, kapsamlı bir literatür taramasıyla belirlenen çevresel, teknolojik, ekonomik, ticari, yasal ve sosyal faktörler açısından Bulanık Delphi Yöntemini kullanarak LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığı üzerindeki etkilerini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma ayrıca, uzman görüşlerine dayalı Bulanık DEMATEL Yöntemini kullanarak bu faktörlerin neden-sonuç ilişkilerini analiz edecektir. Bu çalışmanın bulguları, deniz taşımacılığında LNG yakıtlı gemilerin benimsenmesini ve geliştirilmesini en çok ve en güçlü şekilde etkileyen faktörlerin işletme maliyeti ile sefer ve rota planlaması olduğunu göstermektedir. Çalışma aynı zamanda yakıt ikmal ağı, makine tipi, yanmamış metan emisyonu, egzoz emisyonu (NO_x, SO_x, PM, CO_2) ve emniyet gibi faktörlerin de güçlü etkisini ortaya koymaktadır. Çalışma, LNG yakıtlı gemi filolarının geliştirilmesinin deniz taşımacılığı üzerindeki etkisini IMO ve AB düzenlemeleri bağlamında değerlendirecektir. Bulgular, LNG gemi yatırımcıları için değerli bir referans noktası sağlayacak ve denizcilik işletmelerinin LNG yakıtlı gemilerin benimsenmesine ilişkin bilinçli kararlar almalarına yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Egzoz Emisyonu, LNG Yakıtlı Gemiler, Deniz Taşımacılığı, Bulanık Delphi, Bulanık DEMATEL.

ABSTRACT

In light of the stringent measures implemented by the International Maritime Organization (IMO) and the European Union (EU) to curtail exhaust emissions in accordance with zero emission targets, liquefied natural gas (LNG)-powered vessels are regarded as the optimal solution in the medium term by ship owners and maritime enterprises. The proliferation of these vessels is accelerating at an alarming rate. The present study aims to analyse the effects of LNG-fuelled ships on maritime transport by employing the Fuzzy Delphi Method in terms of environmental, technological, economic, commercial, legal and social factors as determined by a thorough literature review. Furthermore, the study will analyse the cause-and-effect relationships of these factors by employing the Fuzzy DEMATEL Method based on expert opinions. The findings of this study demonstrate that the factors most and most strongly influencing the adoption and development of LNG-fuelled ships in maritime transport are those of operation cost and sailing pattern. The study also identifies the strong influence of factors such as bunkering network, machinery type, unburned methane emission, exhaust emission (NO_x, SO_x, PM, CO_2) and safety. The present study will assess the impact of developing LNG-fuelled ship fleets on maritime transport in the context of IMO regulations. The findings will provide a valuable reference point for LNG ship investors and assist maritime enterprises in making informed decisions regarding the adoption of LNG-fuelled ships.

Keywords: Exhaust Emission, LNG Fuelled Ships, Maritime Transport, Fuzzy Delphi, Fuzzy DEMATEL.

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

EU-ETS : European Union Emissions Trading System (Avrupa Emisyon Ticaret Sistemi)

AEA : American Economic Association (Avrupa Ekonomi Birliği)

AQI : Air Quality Index (Hava Kalitesi Endeksi)

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (Kaynar Sıvının Genleşerek Yaptığı Buhar Patlaması)

BM : United Nations (Birleşmiş Milletler)

CH_4 : Methane (Metan)

GHG : Greenhouse Gas (Sera Gazı)

CII : Carbon Intensity Indicator (Karbon Yoğunluğu Göstergesi)

CO_2 : Carbondioxide (Karbondioksit)

ECA : Emission Control Area (Emisyon Kontrol Alanı)

EEDI : Energy Efficiency Design Index (Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi)

EEXI : Energy Efficiency Existing Ship Index (Enerji Verimliliği Mevcut Gemi Endeksi)

EGR : Exhaust Gas Recirculation (Egzoz Gazı Sirkülasyon Sistemi)

EPA : Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)

GWP : Global Warming Potentional (Küresel Isınma Potansiyeli)

HPDF : High Pressure Dual Fuel (Yüksek Basınç Çift Yakıtlı Makine)

IGC Code : The International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (Toplu Sıvılaştırılmış Gaz Taşıyan Gemilerin İnşası ve Donanımı Hakkında Uluslararası Kod)

IGF Code : International Code Of Safety For Ship Using Gases Or Other Low-Flashpoint Fuels (Dökme Halde Sıvılaştırılmış Gaz Taşıyan Gemilerin İnşası ve Donatımı için Uluslararası Kodu)

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)

IMO : International Maritime Organization (Uluslararası Denizcilik Örgütü)

LBSI : Lean Burn Spark Ignıted Engine (Yalnızca Gazla İşleyen Motor Sistemi)

LFF : Low-Flashpoint Fuel (Düşük Parlama Noktalı Yakıtlar)

LPDF : Low Pressure Dual Fuel (Alçak Basınç Çift Yakıtlı Makine)

LSD : Low Sulfur Diesel (Düşük Sülfürlü Dizel Yakıt)

MDO : Marine Diesel Oil (Deniz Dizel Yağı)

MEPC : Marine Environment Protection Committee (Deniz Çevresini Koruma Komitesi)

MGO : Marine Gas Oil (Deniz Gaz Yağı)

N_2O : Nitrous Oxide (Nitro Oksit)

NECA : Nitrogen Emission Control Area (Azot Oksit Emisyon Kontrol Alanı)

NRC : National Research Council (Ulusal Araştırma Konseyi)

NO_x : Nitrogen Oxide (Azot Oksit)

OPS : Onshore Power Supply (Gemileri Karadan Elektrikle Besleme)

PM : Particulate Matter (Partiküler Madde)

PSV : Platform Supply Vessel (Platform İkmal Gemisi)

RFNBO : Renewable Fuels of Non-Biological Origin (Biyolojik Olmayan Kaynaklı Yenilenebilir Yakıtlar)

SCR : Selective Catalytic Reduction (Seçici Katalatik İndirgeme)

SECA : Sulfur Emission Control Area (Sülfür Oksit Emisyon Kontrol Alanı)

SEEMP : Ship Energy Efficiency Management Plan (Enerji Verimliliği Yönetim Planı)

SO_x : Sulfur Oxides (Sülfür Oksit)

TFN : Trigonometric Fuzzy Number (Trigonometrik Bulanık Sayılar)

ULSD : Ultra Low Sulfur Diesel (Ultra Düşük Sülfürlü Dizel Yakıtı)

UNEP : United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)

UNFCCC : The United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi)

VCE : Vapor Cloud Explosion (Buhar Bulutu Patlaması)

VOC : Volatile Organic Compound (Uçucu Organik Bileşikler)

WMO : World Meteorological Organization (Dünya Meteoroloji Örgütü)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Emisyonları 8
Şekil 2: Hava Emisyonlarının Azaltılmasına İlişkin Uluslararası Konferans ve Organizasyonların Gelişimi 10
Şekil 3: Yeni Gemi Motorları için NO_x Emisyon Standartları 14
Şekil 4: 2000-2025 Yılları Arası SO_x Emisyon Limitleri Değişimi..... 15
Şekil 5: Dünya Geneli Emisyon Kontrol Alanları..... 17
Şekil 6: FuelEU Maritime Sera Gazı (GHG) Azaltım Hedefi..... 22
Şekil 7: M/T BIT VIKING 38
Şekil 8 : Dünya Çapında LNG Yakıtlı Filoların Gelişimi 42
Şekil 9 : LNG Yakıtlı Gemilerin Alternatif Yakıtlar İçindeki Durumu 43
Şekil 10: LNG Yakıtlı Gemi Tipleri 44
Şekil 11 : LNG Yakıtlı Bir Feribot- Viking Grace..... 45
Şekil 12 : LNG Yakıtlı Platform Gemisi- Viking Princess..... 45
Şekil 13 : LNG Yakıtlı Kruvaziyer Gemisi..... 46
Şekil 14 : Çift Yakıtlı (LNG-Dizel) Konteyner Gemisi-TOTE..... 47
Şekil 15 : LNG Yakıtlı İlk Dökme Yük Gemisi-SG OCEAN-NYK..... 47
Şekil 16 : LNG Yakıtlı İlk VLCC Tanker-Yuan Rui Yang- COSCO Shipping. 48
Şekil 17 : LNG Yakıtı Transferlerinin Temel Bileşenleri..... 50
Şekil 18 : Dünya Geneli LNG Yakıt Terminalleri 50
Şekil 19 : LNG Yakıtının İthalat, Üretim, Ara Terminal ve İkmal Aşamaları.. 51
Şekil 20 : LNG Yakıt İkmal Seçenekleri..... 52
Şekil 21 : Dünya Geneli LNG Yakıt İkmal Gemileri..... 53
Şekil 22 : Dünya Geneli Toplam LNG Yakıt İkmal Noktaları 54
Şekil 23 : Araştırma Modeli 73
Şekil 24 : Bulanık DEMATEL Yöntemi 81
Şekil 25 : Bulanık Üçgensel Değerler 82
Şekil 26 : Güçlü Seviyedeki Etki-İlişki Grafiği 93

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1: Hava Kirleticileri Kaynağı ve Etkisi 6
Tablo 2: MARPOL Ek VI NO_x Emisyon Limitleri 13
Tablo 3: IMO Tarafından Belirlenen SO_x Emisyon Limitleri 15
Tablo 4: MARPOL Ek VI'daki Temel Değişiklikleri Gösteren Çizelge 16
Tablo 5: Sera Gazı Düzenlemeleri 18
Tablo 6: MARPOL Ek-VI Limitlerinin Karşılayan Alternatiflerin Avantaj ve Dezavantajları 28
Tablo 7: LNG Yakıtının Diğer Yakıtlar İle Karşılaştırılması 30
Tablo 8: LNG Yakıtlı Motor Teknolojileri 39
Tablo 9: LNG Yakıtlı Gemilerin Gemi Tipine Göre Etkileri 49
Tablo 10 : Denizcilik Alanında Delphi Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar 66
Tablo 11 : Denizcilik Alanında DEMATEL Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar ... 67
Tablo 12 : Denizcilik Alanında Delphi-DEMATEL Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar 68
Tablo 13: Literatür Araştırmasına Göre Belirlenen Ana ve Alt Faktörler 73
Tablo 14: Dilsel Değişkenler ve Trigonometrik Bulanık Sayılar 78
Tablo 15: Dilsel İfadelerin Bulanık Sayı Karşılıkları 82
Tablo 16: Katılımcı Bilgileri 86
Tablo 17: Delphi Yöntemiyle Tespit Edilen En Önemli Faktörler 89
Tablo 18: Durulaştırılmış Değerler 90
Tablo 19: Eşik Seviyesinin Üzerindeki Etki Şiddetine Sahip Kriter Çiftleri 91
Tablo 20: Kriter Çiftleri Arasındaki Birbirini Etkileme Şiddeti 92
Tablo 21: R+C ve R-C Değerleri 94
Tablo 22: Kriter Ağırlıkları ve Sıralaması 96

GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 1: Alternatif Yakıtların Yoğunluk Karşılaştırması 33
Grafik 2: Bulanık DEMATEL Yöntemiyle Bulunan Etki-İlişki Haritası 95
Grafik 3: R-C Değerine Göre Etki-Sonuç Grafiği 96
Grafik 4: Faktör Ağırlıklarının Sıralanması 97

GİRİŞ

Deniz yolu taşımacılığı, çevreye en az zarar veren yöntemlerden biri olarak görülmesine rağmen, artan deniz trafiği ile birlikte gemilerin sebep olduğu gazların hava kirliliği üzerindeki olumsuz etkileri oldukça fazla artmıştır (Peng vd., 2021). Bu gazlar, yerel hava kirliliği oluştururken, rüzgârla birlikte dünya genelindeki hava kirliliğini de artırmaktadır. Motorlardan çıkan hava kirleticileri ve sera gazları, hava kalitesinin bozulmasına, asit yağmurlarına ve küresel ısınmaya yol açarak insan sağlığına büyük zararlar vermektedir (Pekşen, 2015).

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), MARPOL 73/78 Sözleşmesi'nin Ek-VI protokolü altında "Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesine İlişkin Kurallar" başlığıyla, gemi motorlarından çıkan azot oksit (NO_x) ve sülfür oksit (SO_x) gibi gazların emisyonlarını hem dünya genelinde hem de belirli alanlarda sınırlamak için kurallar koymuştur (Dereli, 2018). Bunun yanı sıra, IMO ve AB, 2008 yılına göre denizcilik alanındaki karbon salınımını 2030 yılı itibariyle %40 oranında azaltmayı zorunlu kılan çeşitli politikalar uygulamaya koymuştur (He vd., 2024).

IMO ve AB tarafından egzoz emisyonlarını sınırlamak amacıyla alınan sıkı önlemler sonucunda, gemi sahipleri ve işletmeciler uyumlu yakıt alternatifleri aramak zorunda kalmışlardır. Denizcilik sektöründe faaliyet gösteren işletmeler ve gemi sahipleri için şu anda iki ana seçenek bulunmaktadır. Bunlar; ağır yakıt yağı (HFO) yerine deniz dizel yağı (MDO), deniz gaz yağı (MGO), düşük sülfürlü (LSD) ve ultra düşük sülfürlü (ULSD) yakıtları kullanarak yakıt kalitesinin değiştirilmesi ya da egzoz gazı temizleme sistemleri veya scrubber kullanılarak egzoz emisyon seviyesinin düşürülmesidir (Parfomak vd., 2019). Diğer bir alternatif olarak, alternatif yakıtlardan LNG ile çalışan yeni motorlar tercih edilerek LNG yakıtının kullanılması da mümkündür (Wang ve Notteboom, 2014).

MGO, MDO, LSD ve ULSD yakıtları, sülfür içeriği açısından gerekli standartları sağlasa da, yüksek maliyetleri ve artan talebin etkisiyle hem fiyatlarının daha da artabileceği hem de temin edilebilirlikte belirsizliklerin oluşabileceği düşünülmektedir. Bu durum, armatörlerin farklı alternatif yakıt ve çözümlere yönelme

gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca, NO_x emisyonlarının azaltılması için bu yakıtların tek başlarına yeterli olmaması ek teknolojilere olan ihtiyacı gündeme getirmektedir (Stewart ve Wolosz, 2015).

SO_x emisyonlarını azaltmak için etkili teknolojilerden biri egzoz gazı temizleme sistemleridir. Bu sistemler, HFO yakıtıyla uyumlu bir şekilde çalışabilmektedir. Yüksek teknoloji maliyetlerine rağmen, HFO'nun uygun fiyatı bu teknolojiyi cazip bir seçenek haline getirmektedir (Dereli, 2018). Ancak, kurulum masrafı ve bakım giderlerinin yüksek olması (Lee vd., 2020), NO_x ve CO_2 emisyonları için gerekli standartları tam olarak karşılayamaması, bu sistemlerin kullanımına dair dezavantajlar olarak öne çıkmaktadır (Salarkia ve Golabi, 2023).

Bu koşulda, LNG yakıtı, diğer yakıt türlerine kıyasla daha uygun maliyetli olması (Bayraktar, 2016) ve SO_x, NO_x, PM ile CO_2 emisyonlarının hepsini birden azaltma konusundaki faydalarıyla en değerli alternatif yakıt olarak görülmektedir (Tekeli vd., 2024; Tuswan vd., 2023; Livaniou vd., 2022).

LNG yakıtının faydaları yanında, birçok önemli dezavantajı da bulunmaktadır. Altyapı sorunları (Peng vd., 2021; Wang ve Notteboom, 2014) ve yetersiz ikmal ağı (He vd., 2024; Rahimi vd., 2020) gibi durumlar bunlardan biridir. Ayrıca, LNG'nin yoğunluğunun düşüklüğü nedeniyle diğer yakıtlarla kıyaslandığında depolama alanı konusunda 3-4 kat daha fazla alan gerektirmesi (Salarkia ve Golabi, 2023) ve gemide yer kaplamasının yol açtığı kargo kaybı (Pekşen, 2015) gibi problemler de söz konusudur. Bununla birlikte, sera gazları arasında yer alan yanmamış metan gazının salınımı (Comer vd., 2024; Kuittinen vd., 2023) önemli bir diğer dezavantajdır ve bu durumun ele alınması gerekmektedir (Chen vd., 2018).

Bunun yanı sıra, gemi sahipleri ve denizcilik şirketleri, LNG yakıtına geçiş sürecinde, bölgesel fiyat farklılıkları (Sari vd., 2023) ile gelecekteki fiyat belirsizlikleri, güvenlik ve emniyet kaygıları nedeniyle tereddütler yaşamaktadır (Schinas ve Butler, 2016).

LNG dışında değerlendirilen ve araştırmalarda ele alınan başka çeşitli potansiyel temiz gemi yakıtları da mevcuttur. Bu yakıtlar arasında biyoyakıtlar (biyodizel ve biyogaz), hidrojen, metanol ve nükleer enerji bulunmaktadır. Bu altyapılar, özellikle

karbondioksit emisyonlarının önemli ölçüde azaltılması açısından, gemi yakıtı olarak kayda değer avantajlar sunmaktadır (Ramsay vd., 2023). Ancak, bazı teknik, ekonomik, lojistik ve güvenlik engelleri nedeniyle, bu alternatiflerin denizcilik endüstrisinde kısa vadede yaygın ve ticari olarak uygulanması beklenmemektedir (Wang ve Notteboom, 2014). Biyodizel, çevreye duyarlı bir yakıt olması ve kolayca temin edilebilmesi ile öne çıkmaktadır. Sera gazı emisyonlarının belli ölçüde azaltılmasına katkıda bulunsa da, NO_x emisyonlarını azaltma konusunda etkisi bulunmamaktadır; bunun yanı sıra, hammadde bağımlılığı ve üretim maliyetleri dolayısıyla diğer yakıtlara kıyasla daha yüksek fiyatlarla satıldığı da bilinmektedir (Nayyar, 2010).

LNG ile çalışan gemiler, fosil yakıtların yerine yenilenebilir yakıtlara geçiş imkanı sunmaktadır (Tuswan vd., 2023). Fakat, bu tür gemilerde kullanılan ve en etkili sera gazları arasında yer alan ve küresel ısınmaya CO_2'den daha fazla katkı sağlayan metan gazının (Comer vd., 2024; Kuittinen vd., 2023) taşınması ile belirli LNG motorlarından (LSDI, LDPF) salınımı, iklim yararını azaltmaktadır (Clean Arctic Alliance, 25 Kasım 2024). Ayrıca, sera gazı emisyonlarının iklim değişikliği üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulduğunda, IMO'nun sera gazı hedeflerine ulaşmada LNG yakıtlı gemi sahipleri ve denizcilik sektörünün karşılaştığı en büyük engel olarak görünmektedir (Pavlenko vd., 2020; Balcombe vd., 2021).

Bu kapsamda, küresel denizcilik sektörü 2050 yılı itibariyle net sıfır emisyona ulaşmayı hedeflerken, LNG yakıtı enerji geçiş stratejisinde önemli bir rol oynamaya devam etmektedir (Tuswan vd., 2023). LNG, sera gazı salınımının azaltılması üzerinde tam kapsamlı bir etkiye sahip olmadığı için nihai bir çözüm olmasa da, çevresel faydalar sağlayabilen ve gelecekte sürdürülebilir deniz yakıtları üzerindeki gelişmelere zemin hazırlayabilecek bir geçiş yakıtı olarak sunulmaktadır (Baresic ve Rehmatulla, 2024; Lindstad vd., 2020)

LNG yakıtlı gemilerin kısa vadede bir geçiş yakıtı olarak kullanımının deniz taşımacılığına çevresel, ekonomik, teknolojik, ticari, yasal ve sosyal açıdan etki faktörleri tespit edilmiştir. Bu faktörler LNG yakıtlı gemilerin faaliyetlerinin olumlu ve olumsuz olarak deniz taşımacılığına etkisinin değerlendirilmesinde ele alınması gereken konulardır.

Yapılan kapsamlı literatür araştırmasında LNG yakıtlı gemilerin seçimine yönelik avantaj ve dezavantajlarının değerlendirildiği ve LNG yakıtlı gemilerin benimsenmesine yönelik çalışmalara sıklıkla rastlanmakta olup yıllar içinde sıkılaşan ve halihazırdaki IMO kuralları karşısında farklı açılardan deniz taşımacılığına etkisini ve bu açıların birbirleriyle olan ilişkilerini değerlendiren bir çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Bu kapsamda, kullanımına az sayıda gemi ile başlandığı 2010'lu yıllardan itibaren sürekli güncellenen ve sıkılaşan egzoz emisyon kısıtlamaları karşısında günümüze kadar gelişen LNG filolarının deniz taşımacılığındaki etkisinin uzman görüşlerine dayanarak analiz edilmesinin literatürdeki boşluğu doldurmak açısından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Bu doğrultuda yapılan çalışmanın amacı, LNG yakıtlı gemilerin yapılan literatür araştırması ile belirlenen çevresel, teknolojik, ekonomik, ticari, yasal ve sosyal faktörler açısından Bulanık Delphi Yöntemiyle deniz taşımacılığına olan etkilerini ve Bulanık DEMATEL yöntemiyle birbirleriyle olan ilişkilerini incelemektir. Yapılacak çalışma ile, sıkılaşmakta olan IMO kuralları ile gelişmekte olan LNG filolarının deniz taşımacılığına etkileri belirlenerek, denizcilik işletmeleri ve gemi sahipleri tarafından LNG yakıtlı gemilerin benimsenmesi ve alternatif yakıtlı gemi yatırımları için yol gösterici bir kaynak oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. ARAŞTIRMA BİLGİLERİ

Bu bölümde, çalışmanın konusuna ilişkin kavramsal ve kuramsal çerçeve ortaya konularak LNG yakıtlı gemiler ve deniz taşımacılığında kullanımına ilişkin genel bilgiler ele alınmaktadır.

1.1.HAVA KİRLİLİĞİ, SEBEPLERİ VE ETKİLERİ

1.1.1. Hava Kirliliği

Hava kirliliğine sebep olan maddeler, havanın doğal yapısını bozan duman, gaz, toz, buhar ve aerosol şeklindeki kimyasallar olarak tanımlanmaktadır (Pekşen, 2015). Mevzuatta kirletici ve emisyon şu şekilde tanımlanmaktadır:

"Emisyon: Yakıt ve benzerlerinin yakılmasıyla; sentez, ayrışma, buharlaşma ve benzeri işlemlerle; maddelerin yığılması, ayrılması, taşınması ve diğer mekanik işlemler sonucu bir tesisten atmosfere yayılan hava kirleticilerini tanımlamaktadır (SKKHKY, md 4.1.k)."

"Kirletici: Doğrudan veya dolaylı olarak insanlar tarafından dış havaya bırakılan ve insan sağlığı üzerinde ve/veya bütün olarak çevre üzerinde muhtemel zararlı etkileri olan her türlü maddeyi tanımlamaktadır (SKKHKY, md 4.1.cc)*"*

Çevre Koruma Ajansı (EPA), hava kirliliğini atmosferde bulunan gaz ve parçacık şeklindeki kirleticilerin birleşimi olarak tanımlamaktadır (Pekşen, 2015). Ayrıca hava kirleticilerini aşağıdaki gibi sıralamaktadır ve her biri için Hava Kalitesi Endeksi (AQI) belirlemektedir.

- Partiküler Madde (PM)
- Ozon
- Sülfür Oksit (SOx)
- Azot Oksit (NOx)
- Kurşun
- Karbonmonoksit (CO) (EPA, 2024)

EPA tarafından belirlenen bahse konu hava kirleticilerin kaynağı ve etkisi ise Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Hava Kirleticileri Kaynağı ve Etkisi

Kirletici	Ana Kaynağı	Etkisi
Sülfür oksit (SO_x)	Fosil Yakıtların Yanması, Taşıtlardan Yayılan Egzoz Emisyonları	Solunum Yolu Hastalıkları
Azot oksit (NO_x)	Taşıtlardan Yayılan Egzoz Emisyonları, Yüksek Sıcaklıkta Yanma Olayı	Solunum Yolu ve Göz Hastalıkları, Asit Yağmurları
Partikül madde (PM)	Taşıt Emisyonları, Sanayi, Tarım ve İkincil Kimyasal Reaksiyonlar, Fosil Yakıt Yanması	Kardiyal Problemler, Kanser, Solunum Yolu Hastalıkları, Bebek Ölümlerindeki Artış
Karbonmonoksit (CO)	Eksik Yanma Olayı, Taşıt Emisyonları	Kandaki Hemoglobin ile Birleşerek Oksijen Taşınma Kapasitesinde Azalma, Ölüm
Ozon (O_3)	Trafikten Kaynaklanan NO_x ve VOC (Uçucu Organik Bileşikler) Güneş Işığıyla Değişimi	Solunum Sistemi Hastalıkları, Göz ve Burunda Tahriş, Astım, Vücut Direncinde Zayıflama

Kaynak: EPA, 2024

1.1.2. Sera Gazı Etkisi

Sera gazı emisyonu, hem doğal hem de insan kaynaklı olabilen, kızılötesi radyasyonu emip yeniden yayabilen atmosferik bileşenler olarak tanımlanır (SGETHY, md.4.e). Bu bileşenler arasında karbondioksit (CO_2), nitro oksit (N_2O), metan (CH_4), hidroflorokarbonlar (HFC'ler) ve benzeri gazlar yer almaktadır.

1.1.3. Küresel Isınma ve İklim Değişikliği

Hava emisyonları, ana olarak iki gruba ayrılabilir: birinci grup, kükürt oksitler, azot oksitler, ozon tabakasını zayıflatan maddeler, VOC (Uçucu Organik Bileşikler) ve yakma işlemlerinden kaynaklanan hava kirletici unsurları içerir; diğer grup ise, esas olarak karbondioksit salınımıyla ilişkili olan ve küresel ısınmaya yol açan sera gazlarıdır (GHG) (Ling, 2011). Tablo 1'de EPA tarafından belirtilen bu hava kirleticileri ve sera gazları, insan sağlığı üzerinde yanı sıra küresel ısınma üzerinde olumsuz etkilere sahiptir.

EPA, 2009 yılında, atmosferde birikerek *küresel ısınmaya* ve okyanusların asidik hale gelmesine yol açan karbondioksit ile diğer dayanıklı sera gazlarının mevcut

ve gelecek nesillerin sağlık ve refahını tehdit ettiğini belirtmiştir. Atmosferde ısıyı tutan bu uzun ömürlü sera gazları arasında karbondioksit, metan, diazot oksit ve florlu gazlar bulunmaktadır. Bu gazlar, birçok çeşitli insan etkinliğinden kaynaklanmaktadır (EPA, 2024).

Ulusal Bilimler Akademisi'nin önemli bir parçası olan Ulusal Araştırma Konseyi (NRC), *iklim değişikliğinin* var olduğunu ve büyük oranda insan aktivitelerinin neden olduğunu, bunun yanı sıra çeşitli insan ve doğal sistemler için ciddi tehlikeler arz ettiğini ve birçok durumda bu sistemleri zaten etkilediğini açıklayan bir rapor yayımlamıştır (NRC, 2010).

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)'nde, iklim değişikliği şu şekilde tanımlanmaktadır: "*İklimde, doğal iklim değişkenliğine ek olarak, karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde gözlemlenen ve küresel atmosferin bileşimini doğrudan veya dolaylı olarak değiştiren insan faaliyetlerine atfedilen bir değişiklik*" (Ling, 2011).

1.2. GEMİ KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİ

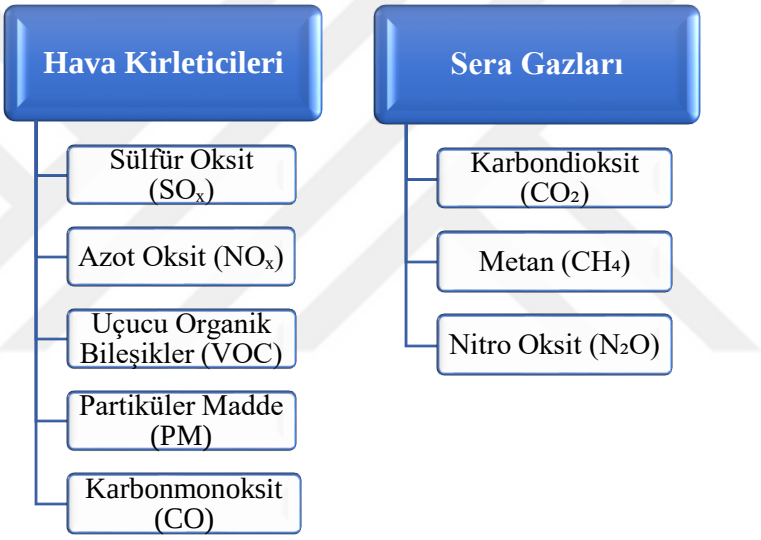
Deniz taşımacılığı, çevreye en duyarlı ulaşım biçimi olarak görülse de, taşımacılığın artan hacmiyle beraber gemilerin sebep olduğu emisyonlar hava kirliliğini ve bu durumun olumsuz etkilerini önemli ölçüde artırmaktadır (Pekşen, 2015). Karayolu taşımacılığından kaynaklanan kirleticilerin emisyonları azalma gösterirken, deniz taşımacılığından kaynaklanan emisyonlar sürekli bir artış göstermeye devam etmektedir (Millet vd., 2021).

Gemi egzozlarından çıkan sera gazları ve hava kirleticileri, atmosferde uzun mesafeler kat ederek, deniz üzerinde oluşsalar bile karasal hava kalitesine ve insan sağlığına zarar vermektedir. Bu durum, hem küresel ısınmaya hem de asit yağmurlarına sebep olmaktadır (Bayraktar, 2016).

Hava kirliliği kaynaklı emisyonlar, deniz motorları, yükle ilişkili emisyonlar ve ekipmanlardan kaynaklanan emisyonlar şeklinde sınıflandırılmaktadır (Ling, 2011). Ancak, bu çalışmanın odak noktası LNG yakıtıyla çalışan gemiler olduğu için, yalnızca gemilerdeki yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan egzoz emisyonları

incelenecektir. Gemilerden kaynaklanan emisyonlar ise genellikle iki gruba ayrılmaktadır: biri doğrudan iklim değişikliğine yol açan ve küresel ısınmayı etkileyen emisyonlar; diğeri ise hava kalitesine etki eden ve dolaylı ya da doğrudan insan sağlığını tehdit eden emisyonlardır (EPA, 2024; Moreira, 2016).

Gemilerde yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan hava kirleticileri sülfür oksit (SO_x), azot oksit (NO_x), uçucu organik bileşikler (VOC), partiküler madde (PM), karbonmonoksit (CO)'dir. Sera gazları ise; karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), nitro oksit (N_2O)'dir (Sharafian vd., 2019). Gemilerden kaynaklanan hava kirleticileri ve sera gazları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Emisyonları

Kaynak: EPA, 2024

Gemilerde kullanılan yakıtın yanmasıyla atmosfere salınan egzoz gazı miktarı, geminin yapısal özellikleri, yükleme durumu, karina yüzeyinin pürüzlülüğü ve makine durumuyla beraber yakıt tüketimiyle doğrudan ilişkilidir ve bu etkenler de göz önünde bulundurulmalıdır (Miola vd., 2010).

1.2.1. Azot Oksit (NO_x)

Azot Oksit (NO_x), azot ve oksijenin birleşimi olup, hava kirliliği kapsamında azot oksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) için genel bir terimdir. Bu gazlar, yakıtın yüksek sıcaklıklarda yanması sırasında ortaya çıkarak endotermik tepkimelere neden olur ve

çeşitli azot oksit türlerinin üretimini sağlar. NO_x, su ile etkileşime geçerek nitrik asit oluşturabilir ve atmosferde asit yağmurlarına yol açabilir. Ayrıca, NO_x, sülfür oksit ve karbondioksit ile birlikte yer yüzeyinde ozon (O_3) üretir ve bu da solunum problemlerine neden olabilir. Fosil yakıt kullanan endüstriler, özellikle enerji santralleri ve motorlu araçlar, ozon incelmesinin başlıca sebeplerindendir (Sharafian vd., 2019).

1.2.2. Sülfür Oksit (SO_x)

Gemilerde yakıtın yanması sonucu açığa çıkan sülfürik gaz, troposfer ve alt stratosferde sülfatlara dönüşerek sülfürik asit haline gelir. Bu gaz, yağmur şeklinde tatlı suyu ve toprağı etkiler, ağaçlara asidik yağmur olarak yansır. Başlıca kaynakları, kömür ve petrol gibi fosil yakıtların yakılmasıdır. Sülfür oksit (SO_x), partikül madde (PM) oluşumuna yol açan bir öncül olup, havaya yayılımı yakıt tipi ve tüketimi ile doğrudan ilişkilidir (Moreira, 2016).

1.2.3. Partiküler Madde (PM)

PM, gemilerin egzozlarından yayılan ve solunum sorunları ile kanser gibi hastalıkları tetikleyebilen serbest radikalleri içeren bir kirlilik türüdür. Gemiler, sağlık tehditlerinin yanı sıra, PM içeren metalleri aşındırarak zorlayıcı yağlı asitlerin oluşumuna da neden olur. Daha küçük PM parçaları (2 μm ile 10 μm) rüzgârla uzun mesafelere taşınabilir ve bu partiküllerin buzullarda birikimi, buz erimesinin hızlanmasına yol açar (Pekşen, 2015).

1.2.4. Karbondioksit (CO_2)

Karbon dioksit (CO_2), fosil ve doğal yakıtların (odun, kömür, petrol, benzin) yan ürünüdür ve sera gazları arasında yer alır. Bu gazların birikimi, küresel ısınmanın başlıca nedeni olarak görülmektedir. İklim değişikliği üzerindeki uluslararası endişeler, 1985-1987 yılları arasında düzenlenen CO_2 ile ilgili konferanslarla artmıştır. CO_2 emisyonları, doğrudan yakıt tüketimine bağlıdır (Ling, 2011).

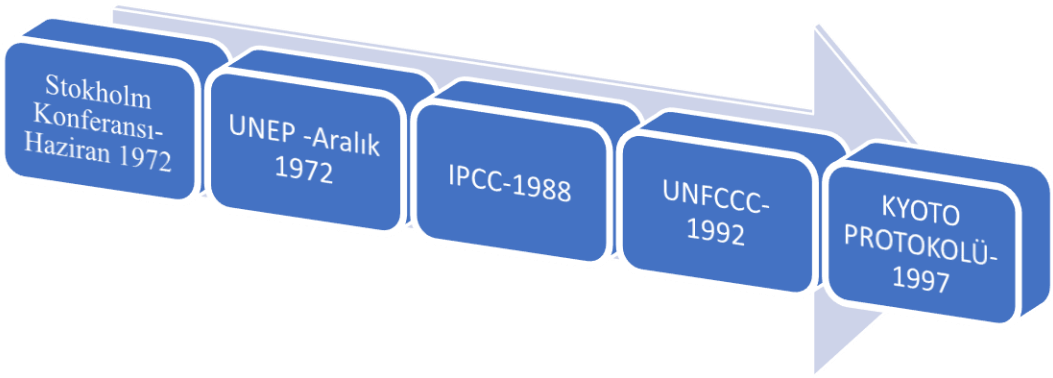
1.2.5. Metan (CH_4)

Metan, doğal gazın ana bileşeni olarak belirli konsantrasyon seviyelerinde yanıcı bir özellik taşır. Havanın içinde %5 ile %15 oranında bulunduğunda, alevlenme meydana gelebilir (Foss vd., 2003). CO_2'ye oranla daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahiptir (Comer vd., 2024).

1.3. HAVA EMİSYON KONTROLÜYLE İLGİLİ SÖZLEŞME VE DÜZENLEMELER

1.3.1. Hava Emisyonlarının Azaltılmasına Yönelik Tarihsel Süreç

Dünya genelinde hava kirliliği meselelerinin yönetimi, Birleşmiş Milletler (BM) tarafından gerçekleştirilmektedir. BM, insan hakları, iş gücü ve çevre gibi alanlarda politikalar geliştirmekte; iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya yönelik önlemler ve uygulamaları desteklemektedir. Ayrıca, uluslararası organizasyonlar ve toplantılarda iklim değişikliği ve hava kirliliğiyle ilgili önemli gelişmeler kaydedilmiş ve kritik tarihleri gösteren gelişim Şekil 2'de sunulmuştur (Ling, 2011).



Şekil 2: Hava Emisyonlarının Azaltılmasına İlişkin Uluslararası Konferans ve Organizasyonların Gelişimi

Kaynak: Ling, 2011

Stockholm Konferansı, 5-16 Haziran 1972 tarihlerinde çevre koruma amacıyla BM tarafından düzenlenmiştir. 1968'de başlatılan eylemlere destek olarak, konferans, çevre sorunlarının hükümetler arası düzeyde ele alınmasını sağlamış ve küresel çevre politikalarına etki etmiştir. Konferans, insan çevresinin korunması ve geliştirilmesi ile

ilgili yirmi altı ilke içermektedir ve UNEP (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)'in kuruluşuna zemin hazırlamıştır (Millet vd., 2021).

Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), Stockholm Konferansı sonrasında özel bir alt organ olarak kurulmuş ve çevreyle ilgili konularda merkezi bir eylem ve koordinasyon organı olarak işlev görmektedir. UNEP, diğer kurumları harekete geçirmekte, çevresel zorlukları incelemekte ve karmaşık programlar üzerinde çalışmaktadır. Ancak, denizcilik sektörü, mevcut bir uluslararası organizasyon olan IMO nedeniyle UNEP toplantılarının gündeminden sürekli olarak hariç tutulmuştur (Kayhan, 2013).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), UNEP ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO), iklim değişikliği ile bunun sosyal ve ekonomik etkileri konusunda hükümetlere bilimsel bir perspektif sunmak için oluşturulmuş bir bilimsel kuruluş niteliğindedir. Günümüzde IPCC'nin fonksiyonu, insan kaynaklı iklim değişikliğinin sonuçlarına uyum sağlama stratejileri ve ilgili azaltma tedbirlerini içerecek şekilde genişletilmiştir (Taghavifar ve Perera, 2023).

1992 yılında kabul edilen **Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC),** atmosferdeki sera gazı yoğunluklarını iklim sistemi üzerindeki insan kaynaklı olumsuz etkileri önleyecek düzeyde istikrara kavuşturmayı amaçlayan ilk uluslararası anlaşmadır (Baresic ve Rehmatulla, 2024).

Küresel ısınmanın insan faaliyetleri nedeniyle artması üzerine, **Kyoto Protokolü** geliştirilmiştir. Bu protokol, 11 Aralık 1997'de Kyoto/Japonya'da kabul edilmiş, 16 Şubat 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir (Miola vd., 2010). Deniz taşımacılığına yönelik gaz emisyonlarını azaltmayı hedefleyen düzenlemeler içermektedir. 2010 itibarıyla 191 ülke protokole imza atmış ve onaylamıştır. Gelişmiş ülkeler, 2008-2012 döneminde 1990 seviyelerine göre dört sera gazını (%5,2) azaltma taahhüdünde bulunmuştur (Ling, 2011).

1.3.2. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO)

IMO, BM bünyesindeki bir kuruluş olarak denizcilik sektöründe faaliyet yürütmektedir. Bu organizasyonun ana hedefi, denizcilik ile ilgili teknik meselelerde uluslararası ticaret yapan ülkeler arasında iş birliğini artırmak ve bu alandaki yasaları ile uygulamaları uyumlu hale getirmektir. Ayrıca, deniz güvenliğini sağlamak, seyir faaliyetlerinin etkinliğini artırmak ve gemilerden kaynaklanan deniz kirliliğini önlemek ve kontrol altına almak gibi konularda etkili standartların benimsenmesini ve uygulanmasını desteklemeyi amaçlamaktadır (Pekşen, 2015).

IMO'nun amaçları, IMO Sözleşmesi'nin 1. Maddesinde şu şekilde ifade edilmiştir:

"*Uluslararası ticarette faaliyet gösteren denizcilik ile ilgili her türlü teknik konularda, hükümetler arasında işbirliği sağlamak amacıyla bir mekanizma sağlamak; deniz güvenliği, seyir etkinliği ile gemilerden kaynaklanan deniz kirliliğinin önlenmesi ve kontrolü konularında en yüksek uygulanabilir standartların genel kabulünü teşvik etmek ve kolaylaştırmaktır*." (MARPOL, 2020).

Bu nedenle, IMO yalnızca bu amaçlarla ilgili idari yetkiye sahiptir. Üye devletler, kabul edilen sözleşmeleri ulusal mevzuatlarına uygulamak zorunda olan taraflardır, böylece bu sözleşmeler kendi ülkelerinde uygulanabilir hale gelmektedir.

IMO tarafından hazırlanan önemli sözleşmelerden biri, gemi kaynaklı kirliliği ele alan MARPOL 73/78 Sözleşmesi'dir. Bu sözleşme, MARPOL 73/78 Sözleşmesi, gemi kaynaklı kirliliği ele alan önemli bir IMO sözleşmesidir ve beş ekten oluşmaktadır. 1997'de yapılan değişiklikle Ek VI eklenmiş ve 19 Mayıs 2005'te yürürlüğe girmiştir. Ek VI, gemilerin hava kirliliğini önlemeye yönelik kuralları düzenleyerek azot oksit ve sülfür oksit gibi emisyonlarının küresel ve belirli bölgelerde sınırlandırılmasını amaçlamaktadır (Lee vd., 2020).

MARPOL Sözleşmesi'nde Ek I ve II zorunlu, Ek III ve VI ise isteğe bağlıdır (Ling, 2011). Türkiye, 26 Şubat 2013 tarihli 6438 sayılı Kanun ve 2014/6035 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile sözleşmeye taraf olmuş; Ek VI'nın kabulüyle birlikte küresel emisyon sınırları yürürlüğe girmiştir (Pekşen, 2015).

1.3.3. Hava Kirleticileri Kısıtlamaları

MARPOL Ek VI Bölüm III, gemilerden kaynaklanan başlıca hava kirliliği türlerini aşağıdaki şekilde tanımlamıştır:

- *Kural 12 – Soğutma sistemleri ve yangın söndürme ekipmanlarından kaynaklanan ozon tabakasını incelten maddelerin emisyonları.*
- *Kural 13 – Dizel motorlardan kaynaklanan Azot Oksit (NO_x) emisyonları.*
- *Kural 14 – Gemilerden kaynaklanan Kükürt Oksit (SO_x) ve PM (Partikül Madde) emisyonları.*
- *Kural 15 – Petrol tankerlerinin kargo tanklarından kaynaklanan Uçucu Organik Bileşiklerin emisyonları.*
- *Kural 16 – Gemideki yakma sistemlerinden kaynaklanan emisyonlar.*
- *Kural 18 – Yakıt yağı kalitesi*

(Casar vd., 2021).

Bu çalışmada, Kural-13 ve Kural-14'ün dünya genelindeki düzenlemelerinden bahsedilecektir.

1.3.3.1. MARPOL Ek-VI Kural 13 – Dizel Motorlardan Kaynaklanan Azot Oksit (NO_x) Emisyonları

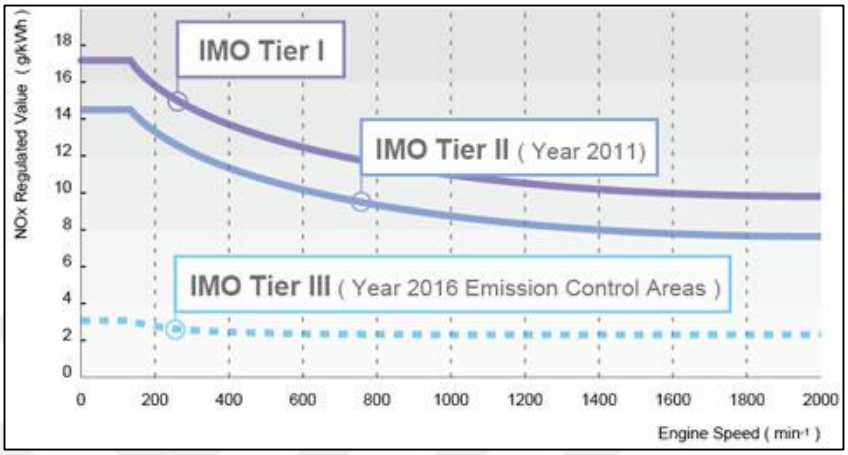
Ek VI Protokolü'nün 13. Maddesi gereği, dizel motorların yaydığı NO_x emisyonları, Tablo 2'de belirtilen limitleri aşarsa, bu makinelerin işletilmesine izin verilmemektedir. Tablo 2'de gemilerin yapım yılı ve motor devriyle alakalı olarak toplam NO_x emisyonu ağırlık sınırları gösterilmektedir (Pekşen, 2015).

Tablo 2: MARPOL Ek VI NO_x Emisyon Limitleri

Aşama	Gemi İnşa Tarihinde veya Sonrasında	Toplam Ağırlıklı Çevrim Emisyon Limiti (g/kWh) n = Motorun Nominal Hızı (dev/dak)		
		n < 130	**n = 130 - 1999**	**n ≥ 2000**
I	1 Ocak 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0,2)}$ Örneğin, 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 Ocak 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0,23)}$ Örneğin, 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 Ocak 2016	3.4	$9 \cdot n \cdot^{(-0,2)}$ Örneğin, 720 rpm – 2.4	2.0

Kaynak: IMO, 2024

Tier III kontrolleri, yalnızca Şekil 3'te gösterildiği gibi Emisyon Kontrol Alanları (ECA) içinde faaliyet gösteren belirli gemiler için uygulanmaktadır ve bu kontrollerin amacı, NO_x emisyonlarını sınırlamaktır. Bu alanların dışındaki gemiler için ise Tier II kontrolleri geçerlidir (Casar vd., 2021; Unseki, 2013).



Şekil 3: Yeni Gemi Motorları için NO_x Emisyon Standartları

Kaynak: IMO, 2024

1.3.3.2. MARPOL Ek-VI Kural 14–Gemilerden Kaynaklanan Kükürt Oksit (SO_x) ve Partiküler Madde (PM) Emisyonları

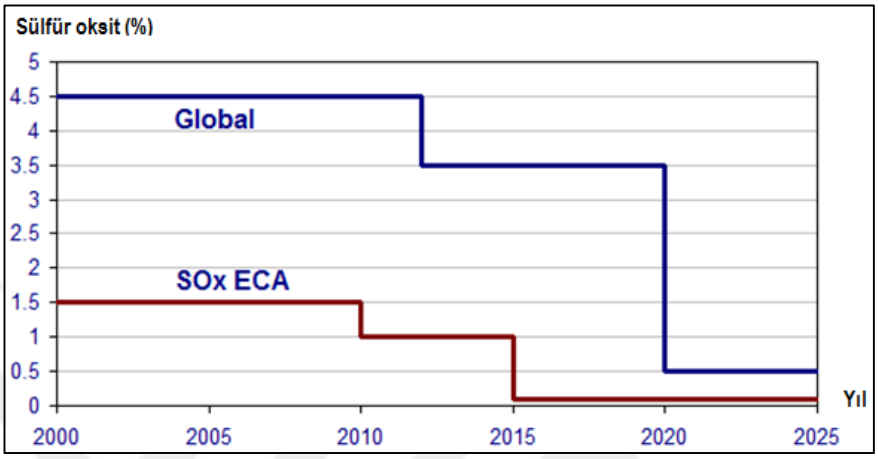
MARPOL Ek VI Kural 14, gemilerdeki yakıt yağlarındaki SO_x seviyelerini düzenlemektedir. 2008'de, IMO, bu düzenlemenin güncellenmesi için bir karar almış ve revize edilmiş hâli 1 Temmuz 2010'da yürürlüğe girmiştir. Bu değişiklikle, deniz yakıtlarındaki kükürt oranı en kötü senaryoda % 4,5'ten % 3,5'e düşürülmüştür (Salarkia ve Golabi, 2023).

1 Ocak 2020 itibarıyla gemilerde kullanılan yakıt yağındaki kükürt içeriği için yeni bir sınır uygulanmaya başlamıştır. IMO 2020 düzenlemesi kapsamında, emisyon kontrol alanları haricinde kullanılan yakıtın kükürt oranı %3,5'ten %0,50'ye düşürülmüştür. Belirli emisyon kontrol alanlarında ise bu oran zaten %0,10 olarak belirlenmiştir. Bu değerler Tablo 3'te sunulmuştur. Yeni sınır, MARPOL Ek VI'da yapılan bir değişiklikle zorunlu hale gelmiştir (IMO, 2024). Bu limitlerin 2000-2025 yılları arasındaki sülfür (%) değişim miktarı Şekil 4'te gösterilmektedir (Unseki, 2013).

Tablo 3: IMO Tarafından Belirlenen SO_x Emisyon Limitleri

GLOBAL		SECA	
1 Ocak 2012'den Önce	4.5% m/m	**1 Temmuz 2010'dan Önce**	1.5% m/m
1 Ocak 2012'den Sonra	3.5% m/m	**1 Temmuz 2010'dan Sonra**	1.0% m/m
2020'den Sonra	0.5% m/m	**2015'ten Sonra**	0.1% m/m

Kaynak: Vuskovic vd., 2023; MARPOL Ek VI



Şekil 4: 2000-2025 Yılları Arası SO_x Emisyon Limitleri Değişimi

Kaynak: Casar vd., 2021; MARPOL Ek-VI

1.3.3.3. Emisyon Kontrol Alanları (ECAs)

IMO tarafından oluşturulan emisyon kontrol alanlarında (ECA) daha da katı bir sınır (%0,10 m/m) uygulanmaktadır. Dört ECA şunlardır: Baltık Denizi bölgesi, Kuzey Denizi bölgesi, Kuzey Amerika bölgesi (ABD ve Kanada kıyı şeridindeki belirli alanları kapsar) ve ABD Karayip Denizi bölgesi (Porto Riko ve ABD Virgin Adaları çevresi) (IMO Raporu, 30 Ekim 2023).

2022 yılında, MEPC 79, Akdeniz'i Kükürt Oksitler (SO_x-ECA) ve partikül maddeler için bir emisyon kontrol bölgesi olarak tanımlayan değişiklikleri onaylamıştır (Maritime Optima, 2024). Bu durum, gemilerin kükürt oksit emisyonları ile ilgili daha sıkı denetimlere uymalarını gerektirecektir. Yapılan değişiklikleri ve yürürlüğe girdiği tarihler Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4: MARPOL Ek VI'daki Temel Değişiklikleri Gösteren Çizelge

Emisyon Kontrol Alanı	MARPOL Ekine Yapılan Değişiklikler	Değişikliğin Yürürlüğe Girdiği Tarih	Uygulanmaya Başladığı Tarih
Baltık Denizi (SO_x)	-	-	19 Mayıs 2006
Baltık Denizi (NO_x)	7 Temmuz 2017 (MEPC.286(71))	1 Haziran 2019	1 Haziran 2021[1]
Kuzey Denizi (SO_x)	22 Temmuz 2005 (MEPC.132(53))	22 Kasım 2006	22 Kasım 2007
Kuzey Denizi (NO_x)	7 Temmuz 2017 (MEPC.286(71))	1 Haziran 2019	1 Haziran 2021[1]
Kuzey Amerika Denizi (SO_x ve PM)	26 Mart 2010 (MEPC.190(60))	1 Ağustos 2011	1 Ağustos 2012
(NO_x)			1 Haziran 2016[2]
ABD Karayip Denizi (SO_x ve PM)	15 Temmuz 2011 (MEPC.202(62))	1 Haziran 2013	1 Haziran 2014
(NO_x)			1 Haziran 2016
Akdeniz (SO_x ve PM)	16 Aralık 2022 (MEPC.361(79))	1 Mayıs 2024	1 Mayıs 2025

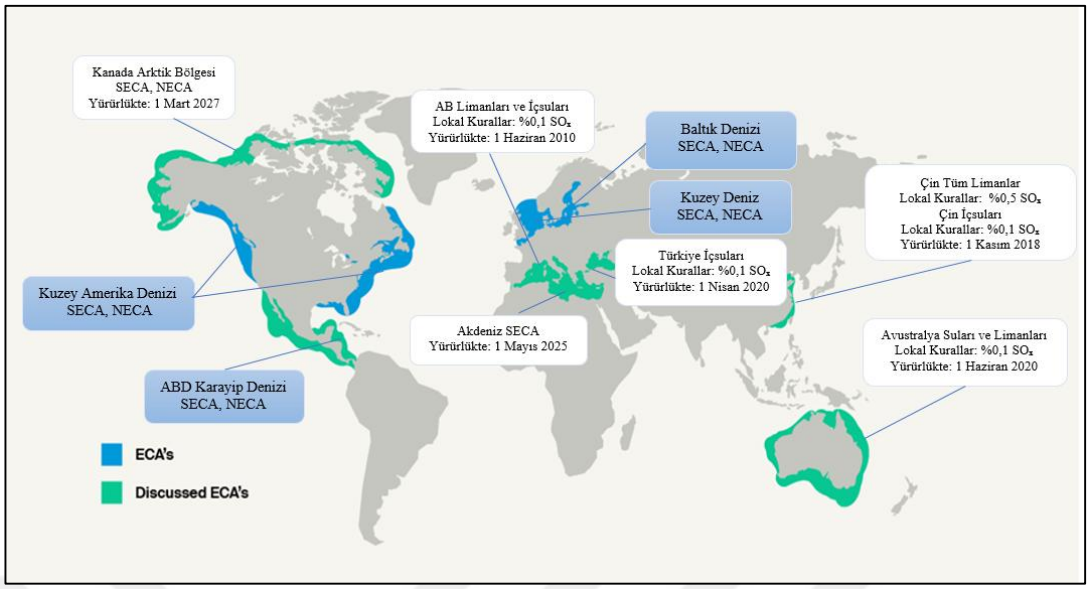
1- 1 Ocak 2021 tarihinde veya sonrasında inşa edilen ve bu emisyon kontrol alanlarında faaliyet gösteren bir gemi, MARPOL Ek VI'nın 13.5 düzenlemesinde belirtilen NO_x Tier III standartlarına uymak zorundadır.

2- 1 Ocak 2016 tarihinde veya sonrasında inşa edilen ve bu emisyon kontrol alanlarında faaliyet gösteren bir gemi, MARPOL Ek VI'nın 13.5 düzenlemesinde belirtilen NO_x Tier III standartlarına uymak zorundadır.

Kaynak: IMO Raporu, 30 Ekim 2023

2024 yılında MEPC 82, MARPOL Ek VI çerçevesinde Kanada Arktik Suları ve Norveç Denizi'nin NO_x, SO_x ve PM'ye yönelik emisyon kontrol alanı olarak belirlenmesi için gereken değişiklikleri onaylamıştır. Bu düzenlemeler, 1 Mart 2026 tarihinde yürürlüğe girecek ve uygulanması ise 1 Mart 2027'de başlayacaktır (IMO Raporu, 30 Ekim 2023).

MARPOL Ek VI'deki ana değişikliklerin amacı, küresel ölçekte ve SECA ile ECA olarak tanımlanan alanlarda SO_x, NO_x ve PM emisyonlarını azaltmaktır. Şekil 5'te gösterilen SECA bölgelerinde yalnızca SO_x emisyonlarının, NECA bölgelerinde ise yalnızca NOx emisyonlarının azaltılması hedeflenirken, ECA bölgelerinde SO_x ve NO_x emisyonun birlikte azaltılması planlanmaktadır (Sari vd., 2023).



Şekil 5: Dünya Geneli Emisyon Kontrol Alanları

Kaynak: Clean Arctic Alliance, 25 Kasım 2024

1.3.3.4. 2005/33/EC Sayılı AB Direktifi

Bölgesel düzeyde, gemi emisyonlarını kontrol altına almak amacıyla uygulanan kurallardan biri de AB Direktifi'dir. 1 Ocak 2010 tarihinden itibaren, AB sınırlarındaki limanlarda rıhtımda yer alan veya demirleyen gemilerin, sülfür içeriği kütlece %0,1'i geçmeyen deniz yakıtlarının kullanımı zorunlu hale getirilmiştir. Fakat limanlarda iki saatten az kalan gemilere bu kural uygulanmamaktadır (Pekşen, 2015).

Türkiye, AB üyesi olmamakla beraber, sülfür emisyonları konusundaki düzenlemeleri ile AB standartlarına uyum sağlamaktadır. Bu nedenle, Türk limanlarına demirleyen veya Türkiye'nin iç suyollarında faaliyet gösteren tüm gemilerin sülfür içeriği %0,10'u aşmayan deniz yakıtlarını kullanması zorunludur (Maritime Optima, 2024). Ancak, bu kural, Türk Boğazları ve Çanakkale Boğazı ile Marmara Denizi'nden geçen gemilere, transit işlemleri sırasında, demirleme alanında veya limanda iki saatten fazla beklemedikleri sürece uygulanmamaktadır (GARD, 8 Ekim 2024).

1.3.4. Sera Gazları (CO_2, CH_4) Kısıtlamaları

CO_2 emisyonlarının azaltılması, yakıt tüketimiyle doğrudan ilişkilidir ve CO_2, düzenleyicilerin şu anda ilgisini çeken ve müdahale edilmesi gereken sera gazları arasındadır (Schinas ve Butler, 2016).

Küresel sera gazı salınımları 2023 yılında yaklaşık 36,8 milyar ton CO_2 ile yeni bir rekor seviyeye ulaşmıştır. Bu, 2022 yılındaki emisyonlarla karşılaştırıldığında yüzde 1,1 oranında bir artış anlamına gelmektedir (He vd., 2024). Aynı yıl, denizcilik sektörü de toplam küresel CO_2 emisyonlarının yüzde 3'ünü oluşturduğu gözlemlenmektedir (Yao vd., 2024; UNCTAD, 2024).

Sektörün fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılığı devam etmekte olup, sürdürülebilir alternatiflere geçişi kritik bir hale getirmektedir. Bu kapsamda, IMO tarafından MARPOL Ek-VI ile gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik stratejiler doğrultusunda (Taghavifar ve Perera, 2023) yeni inşa edilen gemiler için Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi (EEDI) (Sari vd., 2023), mevcut gemiler için Enerji Verimliliği Mevcut Gemi Endeksi (EEXI) ve Karbon Yoğunluğu Göstergesi (CII) düzenlemeleri getirilmiştir (Oh vd., 2024; IMO, 2024). Ayrıca Avrupa Birliği tarafından da son yıllarda karbon emisyonları ile ilgili yeni düzenlemeler getirilmiş olup IMO'nun ve AB'nin getirdiği bu düzenlemelerin genel bir özeti Tablo 5'te sunulmuştur (SEA-LNG Raporu, 17 Aralık 2024).

Tablo 5: Sera Gazı Düzenlemeleri

DÜZENLEYEN/ KURAL	KAPSAM/ EMİSYON	KAPSADIĞI ALAN	GEREKLİLİK	GEÇERLİLİK TARİHİ
IMO/EEDI Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi	TtW/ CO_2	Dünya Geneli / Yeni İnşa Gemiler	Gemilerde taşınan yük birimi başına CO_2 emisyonlarına dayalı enerji verimliliğinin ölçülmesi (ton-mil)	Ocak 2013
IMO/EEXI Enerji Verimliliği Mevcut Gemi İndeksi	TtW/ CO_2	Dünya Geneli / 400 GT ve Üzeri Gemiler	Gemilerde taşınan yük birimi başına CO_2 emisyonlarına (ton-mil) dayalı olarak mevcut enerji verimliliğinin ölçülmesi	Kasım 2022

IMO/CII	TtW/ CO_2	Dünya Geneli	A, B, C, D ve E gemilerinin, yük taşıma kapasitesi ve deniz mili başına saldıkları gram cinsinden CO_2 miktarı	Ocak 2023
AB/ AB ETS	TtW / CO_2 2024'ten itibaren; CH_4 ve N_2O 2026'dan itibaren	AB içi seferler ve AB limanlarına uğrayan uluslararası seferlerin %50'si	Emisyon Ödemesi	Ocak 2024
AB/ FuelEU Maritime	WtW/ CO_2, CH_4 & N_2O	AB içi seferler %100, AB dışı seferler %50	Gemilerde kullanılan enerji için sera gazı yoğunluğu sınırı	Ocak 2025

Kaynak: SEA-LNG Raporu, 17 Aralık 2024

1.3.4.1. Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi (EEDI)

MARPOL Ek VI'nın 4. Bölümü, özellikle 19, 20 ve 21. Kurallar ile 2014 tarihli MEPC.245(66) Kararı, EEDI'nin uygulanmasına ilişkin gereken bilgileri sunmaktadır. EEDI, 1 Ocak 2013 tarihinde yürürlüğe girerken, yeni inşa edilen gemilerde taşınan yük birimi başına (tonmil) CO_2 emisyonlarına dayanarak enerji verimliliğini ölçmeyi (veya bir gösterge sunmayı) amaçlayan bir değerlendirme sağlamaktadır (Vuskovic vd., 2023; Schinas ve Butler, 2016).

Bu verimliliği sağlamak için gemiler MARPOL Ek-IV Kural 22 gereği uygulaması gereken SEEMP (Enerji Verimliliği Yönetim Planı) planı uygularlar (Sari vd., 2023). Bu düzeltme planı, yakıt tasarruflu operasyonlar, draft&trim optimizasyonu, pervane ve gövde temizliği, hız optimizasyonu, zamanında bakım gibi düzeltici tedbirlerde bulunurlar (Denizcilik Bilgileri, 30 Eylül 2018).

1.3.4.2. Enerji Verimliliği Mevcut Gemi İndeksi (EEXI)

EEXI, bir geminin enerji verimliliğini belirlemek için kullanılan bir göstergedir ve EEDI referans değerine göre yüzde olarak bir azaltım faktörüne dayanmaktadır. 400 GT ve üzerindeki gemiler için, farklı tür ve boyut kategorilerine göre hesaplanması gereken EEXI değeri, EEDI formülü ile elde edilir. Geminin gerekli EEXI değerinin altında olması, minimum enerji verimliliği standardını karşıladığını gösterecektir (Vasilev vd., 2025; IMO, 2024).

Eğer değilse aynı şekilde hız limitlemesi, rüzgâr yardımı, pervane optimizasyonu gibi düzeltici tedbirler içeren SEEMP uygulanır (Karatuğ vd., 2023).

1.3.4.3. Karbon Yoğunluğu Göstergesi (CII)

CII, gemilerin operasyonel karbon yoğunluğunun sürekli olarak belirli bir derecelendirme seviyesinde iyileştirilmesi için gerekli olan yıllık azaltma faktörünü tespit etmektedir. Gerçekleşen yıllık operasyonel CII, gerekli olandan bağımsız olarak belgelenmeli ve doğrulanmalıdır. Bu durum, operasyonel karbon yoğunluğu derecelendirmesinin belirlenmesine olanak tanımaktadır (Vuskovic vd., 2023).

Bir geminin CII'sine dayanarak, karbon yoğunluğu A, B, C, D veya E olarak sınıflandırılır; burada en yüksek başarı A ile gösterilmektedir. Bu sınıflandırma, mükemmel (büyük veya küçük), orta düzey, ya da zayıf (küçük veya büyük) bir performans seviyesini yansıtır. Performans düzeyi, geminin SEEMP'inde daha ayrıntılı bir şekilde ele alınmak üzere "Uyum Beyanı"nda belirtilir (IMO, 2024).

Bir geminin, üç yıl boyunca D derecesi alması veya bir yıl E derecesi elde etmesi durumunda, C veya daha yüksek bir indeks elde edebilmesi için bir düzeltici eylem planı sunması gerekecektir (Vasilev vd., 2025).

EEXI sertifikası gereklilikleri 1 Kasım 2022 itibarıyla yürürlüğe girmiş, CII sertifikası gereklilikleri ise 1 Ocak 2023 tarihi itibarıyla uygulanmaya başlanmıştır. Ayrıca, söz konusu düzenlemeler, IMO'nun EEXI ve CII gerekliliklerinin etkinliğini en geç 1 Ocak 2026'ya kadar gözden geçirmesini ve gerektiğinde yeni revizyonlar geliştirerek onaylamasını öngörmektedir (SEA-LNG Raporu, 17 Aralık 2024).

1.3.4.4. Avrupa Emisyon Ticaret Sistemi (AB-ETS)

AB-ETS, sera gazı emisyonlarına neden olan kirleticilerin emisyonları için ödeme yapılmasını zorunlu kılan bir mekanizma olup, yeşil dönüşümü finanse edecek gelirler oluştururken aynı zamanda emisyonların azaltılmasına katkı sağlamaktadır (European Commission Raporu, 2024).

AB-ETS, 1 Ocak 2024 itibariyle denizcilik sektörünü de kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Başlangıçta CO_2 emisyonlarının izlenmesine odaklanan sistem, 2026 itibariyle metan emisyonlarını da kapsamına alacaktır (Aktürk, 2023).

1 Ocak 2024 yılından itibaren, denizcilik şirketleri, bir önceki yılın AB izleme, raporlama ve doğrulama verilerine dayalı olarak yeterli miktarda emisyon tahsisatı teslim etmek zorundadır (ABS, 2024).

1.3.4.5. FuelEU Denizcilik Yönetmeliği (FuelEU Maritime)

FuelEU Maritime, Avrupa Birliği tarafından uluslararası deniz taşımacılığında yenilenebilir ve düşük karbonlu yakıt kullanımını teşvik etmek amacıyla kabul edilen bir düzenlemedir ve 1 Ocak 2025 itibarıyla yürürlüğe girmiştir. Bu düzenleme, 5000 GT ve üzeri gemileri kapsamakta olup, deniz taşımacılığında kullanılan yakıtlarda sürdürülebilir enerji kaynaklarının oranını artırmayı amaçlamaktadır (European Commission Raporu, 2024).

FuelEU Maritime, AB veya Avrupa Ekonomik Alanı'nda (AEA) ticaret yapan gemilerin yıllık ortalama sera gazı (GHG) yoğunluğuna ilişkin gereklilikleri belirlemektedir. Bu yoğunluk, birim enerji başına düşen sera gazı emisyonları (gCO_2e/MJ) cinsinden ölçülmekte ve "kuyudan pervaneye" yaklaşımına göre hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, gemide tüketilen enerjiden kaynaklanan emisyonların yanı sıra, yakıtın çıkarılması, üretimi, yetiştirilmesi ve taşınmasıyla ilişkili emisyonları da kapsamaktadır (Türk Loydu Raporu, Eylül 2024; Oh vd., 2024).

FuelEU Maritime Yönetmeliği metan (CH_4) ve nitro oksit (N_2O) dahil sera gazı emisyonlarını kapsamakta olup aşağıdaki üç temel kuralı içermektedir:

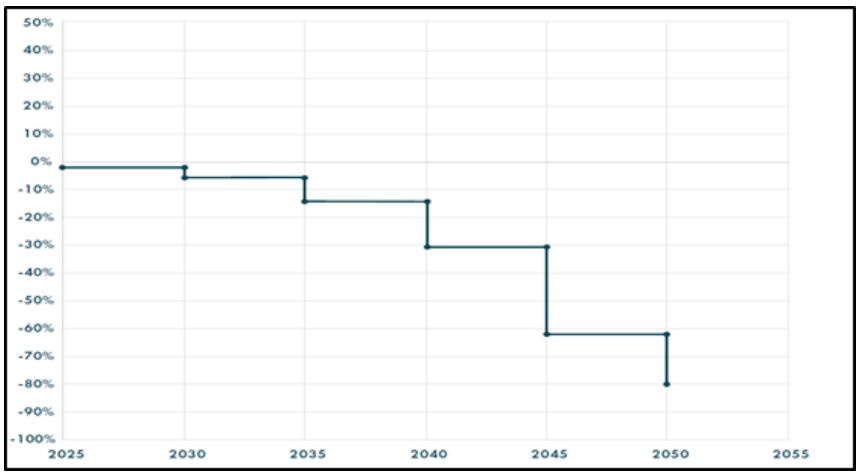
- **2025 yılı itibariyle**, üye devletlerin sorumluluk alanındaki limanlara gelen, bu limanlarda yer alan veya bu limanlardan ayrılan gemilerin kullandığı enerjinin sera gazı (GHG) yoğunluğunun kademeli bir şekilde azaltılması gerekecektir. Bu azaltım, 2025'te %2'lik bir düşüş ile başlayıp, 2050 yılına kadar %80 seviyesine ulaşmayı hedefleyecektir.

- **2020 yılından itibaren** büyük Avrupa limanlarında, yolcu ve konteyner gemileri rıhtımda beklerken elektrik ihtiyaçlarını kıyıdan elektrik güç kaynağı (OPS) ile sağlamaları gerekecektir.

- **1 Ocak 2034 tarihi itibariyle**, gemilerde kullanılan enerjinin en az %2'sinin yenilenemeyen biyolojik olmayan kaynaklı yakıtlardan (RFNBO'lar) elde edilmesi gerekecektir. Fakat bu şart, yalnızca 2031 raporlama dönemi için enerji karışımında RFNBO oranının %1'in altında olması halinde geçerli olacaktır (ABS FuelEU Denizcilik Yönetmeliği, 2024).

Metan kaybını doğru ölçmek, endüstri için önemli bir zorluktur ve etkili algılama ve ölçüm yöntemlerine ihtiyaç vardır. Standart bir ölçüm sistemi olmaması nedeniyle, metan emisyonlarını nicelendirmede çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Motor verimliliğini değerlendirmek ve uyum raporlaması için verilerin CO_2 eşdeğeri dönüşümü gereklidir. Ayrıca, gelişmiş ekipmanlar motor çalışırken kaçan metanı yakalayıp nicelendirebilir (Aktürk, 2023).

Hesaplamanın temel referansı, 2020 yılında filonun kuyudan pervaneye kadarki ortalama sera gazı (GHG) yoğunluğudur ve bu değer 91,16 gCO_2e/MJ olarak tespit edilmiştir. Bu yoğunluk Şekil 6'da gösterildiği gibi, 2025 yılı itibarıyla %2 oranında azalacak, 2030 yılında %6'ya ulaşacak ve 2035 sonrasında hız kazanarak 2050 yılına dek %80 oranında düşecektir (Oh vd., 2024; DNV FuelEU Denizcilik, 2024).



Şekil 6: FuelEU Maritime Sera Gazı (GHG) Azaltım Hedefi

Kaynak: DNV FuelEU Denizcilik, 2024

1.4. DENİZ TAŞIMACILIĞINDA EMİSYON KONTROL SEÇENEKLERİ

Gemi sahipleri, mevcut motorlarının emisyon standartlarını karşılaması için iki ana yol seçebilirler; ya düşük sülfür içeren geleneksel yakıt (ya da biyoyakıtlar) kullanmaları ya da egzoz gazlarını temizlemek üzere yıkayıcı sistemler (SCR, EGR gibi) kurmaları gerekir. Bunun yerine, gemi sahipleri IMO standartlarına uymak için yeni LNG yakıtlı motorlar tercih ederek LNG yakıtını kullanmayı da tercih edebilirler (Wang ve Notteboom, 2014; Salarkia ve Golabi, 2023).

1.4.1. MGO, MDO, Düşük Sülfürlü Dizel ve Ultra Düşük Sülfürlü Dizel Yakıt Kullanımı

Gemi sahiplerinin IMO'nun kükürt gereksinimlerine uygun olmasını sağlamak için en yaygın ve basit gibi görünen yol, düşük kükürtlü yakıtlara (LSD, ULSD) ya da distile petrol ürünlerine (MGO, MDO) geçmektir (Parfomak vd., 2019).

Bu çerçevede, SECA ve ECA bölgelerinde NO_x, SO_x ve PM gereksinimlerini karşılamak için MGO (Deniz Gaz Yağı), MDO (Dizel Deniz Yağı), LSD (Düşük Sülfürlü Dizel Yakıt) ve ULSD (Ultra Düşük Sülfürlü Dizel Yakıt) yakıtlarının kullanılması, gemi sahiplerinin avantaj ve dezavantajlarını göz önünde bulundurarak değerlendirebilecekleri bir alternatif sunmaktadır (Pekşen, 2015).

Son yıllarda bu yeni yakıtların fiyatlarında bir azalma gözlemlenmiş olsa da, geçmiş yıllarda kullanılan yakıtlarla karşılaştırıldığında ortalama olarak hala daha maliyetlidir. Bu durum, bu düzenlemelerin hayata geçirilmesinin nakliye giderlerinde bir yükselişe neden olduğunu göstermektedir (ABS, 2024). Düşük kükürt içeren yakıtların kullanıma geçişi, geleneksel yüksek kükürt yakıtlarına göre maliyetleri artırsa da, çok az ya da hiç başlangıç sermayesi gerektirmediğinden, okyanus taşımacılarına limanlardaki mevcut altyapıyı kullanarak yakıt ikmali yapma imkanı tanımaktadır (Parfomak vd., 2019).

MGO, LSD ve ULSD yakıtları içerdikleri SO_x miktarı sebebiyle MARPOL Ek-VI gerekliliklerini karşılamaktadırlar. PM azaltımına da katkıda bulunmaktadırlar (Pekşen, 2015). Ancak, bu yakıtlar yüksek fiyatlıdır ve ileride fiyat artışının devam

edeceği tahmin edilmekle birlikte artan talebi karşılamayacağı öngörülmektedir (ABS, 2024)

Düşük sülfürlü yakıtlara geçiş, gemilerin mevcut IMO sülfür standartlarını karşılamasına olanak tanısa da, özellikle karbondioksit (CO_2) ve azotoksit (NO_x) gibi sera gazları açısından MARPOL Ek-VI gerekliliklerini karşılamamaktadır (Parfomak vd., 2019).

LSD ve ULSD dizel yakıtlarının en önemli dezavantajı, düşük sülfür yüzünden yakıtın zayıf yağlayıcı özelliklerinin ana makine ekipmanlarında (yakıt pompası, enjektör gibi) arızalara yol açmasıdır. IMO tarafından belirlenen %0,05 (500 ppm) LSD yakıtı ve % 0,0015 (15 ppm) ULSD yakıtı, hâlihazırda gemilerde HFO yakıtı kullanmak üzere tasarlanmış makinelerle uyumsuzluk göstermektedir (MarineDealNews, 2020).

Denizcilik işletmeleri tarafından kullanılabilecek alternatif bir diğer yakıt biyodizel ise, çevre dostu bir yakıt olması ve kolay erişilebilirliği ile dikkat çekmektedir. Sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmasına rağmen, NO_x emisyonlarının düşürülmesine bir katkı sağlamamaktadır ve fiyatının da diğer yakıtlara göre hammadde hassasiyeti ve üretim maliyeti sebebiyle daha pahalı olduğu bilinmektedir (Nayyar, 2010).

1.4.2. Egzoz Gazı Temizleyiciler

Egzoz gazı temizleme sistemleri, geminin ana motordan çıkan gazları filtrelemek amacıyla kullanılmakta olup, esasen geminin bacasına yerleştirilmiş büyük bir duş kabini işlevi görmektedir (Pekşen, 2015).

Bunlara, Seçici Katalatik İndirgeme (SCR) Sistemi, Egzoz Gazı Sirkülasyon Sistemi (EGR) ve Scrubber gibi sistemleri örnek verebiliriz. Seçici Katalatik İndirgeme (SCR) Sistemi ve Egzoz Gazı Sirkülasyon Sistemi (EGR) NO_x salınımını azaltan, Scrubber ise PM ve SO_x salınımını azaltan sistemlerdir (Dereli, 2018).

Seçici Katalitik İndirgeme (SCR), %80'den fazla bir NO_x azaltma yeteneğine sahip bir egzoz gazı sonrası işleme teknolojisidir. SCR de, egzoz gazı akışına üresu

çözeltisi enjekte edilir ve bu işlem, egzoz sistemindeki bir katalizör ünitesi ile birleştirilir. SCR, motorun temel dizaynına etki etmediği için motor üreticilerinin seçiminde esneklik sunan, tanınmış bir ek egzoz arıtma sistemi olarak görev yapmaktadır (Sari vd., 2023).

Egzoz Gazı Sirkülasyonu Sistemi (EGR), egzoz gazlarının bir kısmının soğutulup yeniden yanma sürecine katılacak şekilde taze havaya geri yönlendirilmesi yoluyla gerçekleştirilir; bu sistem, ek bir arıtma tesisine gerek kalmadan NO_x emisyonlarını azaltma işlevi görür (Molitor vd., 2012).

Scrubber teknolojisi, SO_x'ın sudaki çözünmesi prensibine dayanmaktadır. Bu, egzoz gazının scrubber içinde yer alan alkali suya püskürtülmesiyle, SO_x'ın scrubbing suyunda çözündüğü ve böylece egzoz gazından temizlendiği anlamına gelir. Scrubbing suyunun alkalinitesi, SO_x emisyonlarını nötralize ederek denize salındığında çevreye zarar vermesinin önüne geçer. Scrubbing suyu, deşarj işlemi gerçekleşmeden önce partikül madde ve diğer kirleticilerden arındırılmaktadır (Dereli, 2018).

En sık tercih edilen yöntemlerden biri Scrubber'dır. Scrubber ile donatılmış bir gemi, geleneksel olarak yüksek kükürt içeren yakıt kullanarak MARPOL Ek-VI SO_x standartlarına uygunluk sağlayabilir (Parfomak vd., 2019). PM emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunurken, NO_x emisyonlarının azaltılmasına da yardımcı olur; fakat bu konuda yeterli değildir (Burel vd., 2013).

Ancak, mevcut bir motora bir scrubber monte etmek, geminin bir ay boyunca kullanılamaması nedeniyle gelir kaybına yol açabilir. (Parfomak vd., 2019). Bu nedenle başlangıç ve yatırım giderleri oldukça yüksektir (Lee vd., 2020). Söz konusu maliyetler, Scrubber Sisteminin açık çevrim, kapalı çevrim veya hibrit türlerine göre değişiklik gösteren sıvı atık yönetimi, su temizleme işlemleri ve ekipmanın enerji tüketimi ile bakım gibi kalemlerden oluşmaktadır (Faber, 2017).

Scrubber'lar, daha düşük maliyetli yüksek kükürtlü yakıtların kullanılmasına devam edilmesine imkan tanıdıkları için (Burel vd., 2013) başlangıç maliyetlerinin bir kısmını ya da uzun vadede tamamını karşılayabilir. Ancak, scrubber'ların yatırım getirisinin belirlenmesinde etkili olan faktör, yüksek ve düşük kükürt içeren yakıtların

arasındaki fiyat farkının büyüklüğüdür. 2020 yılında yürürlüğe giren IMO standartlarına göre, bu yakıtlardan yararlanan gemi sayısı, talebi ve dolayısıyla fiyatları üzerinde etkili olmaktadır (Parfomak vd., 2019).

Ayrıca, gemi üzerinde önemli ölçüde yer kaplamaktadır ve bakım, kontrol ile sertifikasyon süreçlerine tabi tutulması zorunludur. Bu durum, özellikle küçük boyutlu gemiler için kullanım açısından bir dezavantaj yaratmaktadır (Pekşen, 2015).

1.4.3. LNG Yakıt Kullanımı

Gemi sahiplerine sunulan ilk iki alternatifin mevcut olumsuzlukları ile IMO 2020'nin MARPOL Ek-VI kapsamında getirdiği daha katı kısıtlama gereklilikleri, denizcilik işletmeleri ve gemi sahiplerini daha çevre dostu bir yakıt kullanmaya teşvik etmektedir (Salarkia ve Golabi, 2023).

Bu durumdan dolayı, deniz taşımacılığı şirketleri ve gemi sahiplerinin IMO 2020 standartlarına uygunluk sağlamak amacıyla, NO_x, SO_x, PM ve CO_2 emisyon gereksinimlerinin hepsini karşılayabilen LNG yakıtlı motorlara geçiş yapmaktır (Livaniou vd., 2022).

LNG ile çalışan gemiler, saldıkları egzoz gazlarındaki SO_x seviyesini %90-95 oranında azaltarak (Salarkia ve Golabi, 2023; Ghadikolaei vd., 2016; Wang ve Notteboom, 2014) son derece düşük miktarlarda kükürtoksit (SO_x) yaymaktadır. Bu yayılım, bazı ECA bölgelerindeki %0,1 eşdeğer yakıt limiti ile karşılaştırıldığında bile çok daha azdır. Bu yüzden LNG ile çalışan gemiler, IMO'nun SO_x standartlarına eksiksiz bir şekilde uymaktadır.

Bir diğer avantaja bakıldığında, LNG kullanımı, hem yüksek hem de düşük kükürtlü deniz yakıtlarıyla karşılaştırıldığında, partikül madde emisyonlarını neredeyse %100 oranında (Wang ve Notteboom, 2014) azaltma kapasitesine sahiptir. Ayrıca, LNG ile çalışan gemilerin, geleneksel petrol bazlı yakıtlarla işletilen gemilere kıyasla %15-20 oranında (Burel vd., 2013; Ghadikolaei vd., 2016) daha az CO_2 yayma potansiyeline sahip olduğu da bilinmektedir (Xu ve Yang, 2020).

Ayrıca, LNG'nin azot içeriği, yağdan daha düşük olduğundan, LNG'nin yanmasıyla ortaya çıkan ve yer seviyesindeki ozonun azalmasına etkide bulunan NO_x emisyonları, %85-90 oranında azaltılmaktadır (MerienPaul vd., 2019; Wang ve Notteboom, 2014). Bu emisyon seviyeleri, ihmal edilebilecek düzeydedir (Salarkia ve Golabi, 2023). Bu durum, ECA bölgelerinde Tier III gereksinimlerini fazlasıyla karşılamaktadır (Lee vd., 2020).

LNG'nin deniz yakıtı olarak tercih edilmesi, NO_x, SO_x, CO_2 ve PM gibi zararlı emisyonların azaltılmasını sağladığı gibi (Livaniou vd., 2022; Ghadikolaei vd., 2016) aşağıda belirtilen etkileri sayesinde maliyetlerin de azalmasını sağlamaktadır;

- Daha düşük bakım maliyetleri ve daha uzun revizyon aralıkları (Faber, 2017),
- Azaltılmış emisyonlar nedeniyle gemi sahiplerinin ödediği vergilerin düşmesi (Li ve Yang, 2024; Karatuğ vd., 2023),
- Daha az yağlama yağı tüketimi (Merien-Paul vd., 2019),
- LNG ile çalışan motorların daha yüksek verimliliği sayesinde daha düşük yakıt tüketimi (Karatuğ vd., 2023; Moreira, 2016; Burel vd., 2013),
- LNG'nin alt ısıl değeri göz önüne alındığında yakıt yağlarından daha ucuz olması (Sari vd., 2023),
- Temizleme, ısıtma ve diğer işlemler için ağır yakıt tesisatlarına ihtiyaç duyulmamasıdır (Herdzik, 2012).

Ayrıca, LNG tüketimi sayesinde CO_2 emisyonları büyük oranda düşürüldüğünden (Xu ve Yang, 2020), 01 Ocak 2024 tarihinde AB ETS kapsamında salınan CO_2 emisyonlarının ekonomik etkileri de olumlu bir şekilde değişmektedir. Bu durum, çevresel maliyetlerin azalmasıyla paydaşlara daha fazla fayda sağlamaktadır (Li ve Yang, 2024; Karatuğ vd., 2023).

Ancak, yalnızca LNG kullanımının IMO'nun dekarbonizasyon hedeflerine uygun bir çözüm sunduğu söylenemez. CO_2 emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşabilmek adına, enerjinin verimliliğini artıran ve hız optimizasyonunu içeren farklı stratejilerle bu planların desteklenmesi gerekmektedir (Park vd., 2018).

LNG'nin kullanımı, küresel deniz taşımacılığı alanında sera gazı emisyonlarında bir düşüş sağlamamıştır. LNG, yakıtın yanması sürecinde geminin CO_2 emisyonlarını azaltmış olsa da, özellikle bazı LNG ile çalışan motorlardan kaynaklanan yanmamış metan salınımı, bu sera gazı emisyonlarındaki azalımı nötrlemektedir (Oh vd., 2024; Tuswan vd., 2023; Wang ve Notteboom, 2014).

LNG yakıtının sağladığı avantajların yanı sıra, bazı önemli dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunlar arasında altyapı sorunları (Wang ve Notteboom, 2014), ikmal ağının yetersizliği (Rahimi vd., 2020) ve yoğunluğundan dolayı diğer yakıtlara göre 3-4 kat daha fazla depolama alanı gerektirmesi (Salarkia ve Golabi, 2023) gibi etkenler bulunmaktadır. Ayrıca, gemide bu depolama alanlarının kapladığı yer nedeniyle kaybedilen kargo miktarı da önemli bir sorundur (Pekşen, 2015).

Bunun yanı sıra, gemi sahipleri ve denizcilik işletmeleri, LNG yakıtına geçişte, gelecekteki fiyat belirsizlikleri ile emniyet ve güvenlik sorunları nedeniyle tereddütler yaşamaktadır (Schinas ve Butler, 2016).

Bu bölümde belirtilen gemi sahipleri ve denizcilik işletmelerinin önündeki MARPOL Ek-VI gerekliliklerini karşılayan seçenekleri kıyaslanması maksadıyla aşağıdaki Tablo 6'da özetleyebiliriz.

Tablo 6: MARPOL Ek-VI Limitlerinin Karşılayan Alternatiflerin Avantaj ve Dezavantajları

MARPOL EK-VI LİMİTLERİNİ KARŞILAYAN ALTERNATİFLER		
DÜŞÜK SÜLFÜRLÜ YAKIT	**EGZOZ GAZI TEMİZLEME SİSTEMİ**	**LNG YAKIT KULLANIMI**
İlave yakıt tankına veya işletme maliyetine ihtiyacı olmaması	HFO yakıtı ve ikmal imkânlarının mevcut olması	MARPOL Ek VI SOx, PM ve NOx Tier III gereksinimlerini karşılayabilmesi
Yüksek yakıt maliyeti	Yüksek sülfürlü yakıtlarla kullanılabilme imkânı olduğu için uygun yakıt fiyat avantajı	Daha fazla depolama kapasitesi gereksinimi
Tier III NOx limitini karşılayabilmek için yıkayıcı sistem gereksinimi	Su imha tesislerinin mevcudiyeti ve maliyeti	LNG ekipmanı için yatırım maliyeti
Rafinerilerin oluşabilecek talepleri karşılayamama riski		Yakıt ikmal imkânlarının sınırlı olması ve fiyatlardaki belirsizlikler

Kaynak: Salarkia ve Golabi, 2023; Wang ve Notteboom, 2014; Karatuğ vd., 2023

1.5. LNG YAKITI VE ÖZELLİKLERİ

1.5.1. LNG Yakıtının Yapısal Özellikleri

LNG, -161,08°C sıcaklıkta sıvı hale gelen (ABS, 2022) kolay taşınabilen ve depolanabilen (WARTSILA, 2024) renksiz, kokusuz, zehirli ve aşındırıcı olmayan sıvılaştırılmış gazdır (Lee vd., 2020; Kanbur vd., 2017).

Sıvılaştırma işlemi, doğal gazın akışından su, azot, karbondioksit, hidrojen sülfür ve diğer kükürt bileşenleri gibi safsızlıkların ortadan kaldırılması amacıyla bir ön işleme tabi tutulmasını içerir (Sakmar, 2013). Bu safsızlıklar temizlendiğinde, gazın soğutulması sırasında katı maddeler meydana gelmez (Kumar vd., 2011). Böylece elde edilen ürün, LNG son kullanıcılarının belirlediği kalite standartlarını karşılayabilir. Ön işleme tabi tutulmuş doğal gaz, yaklaşık 160°C (256°F) sıcaklığında sıvı hale getirilir ve depolama ile nakliye için uygun duruma gelir (Foss vd., 2003).

LNG, oda sıcaklığı ve normal atmosfer basıncı altında mevcut doğal gazın kapladığı alana kıyasla yalnızca 1/600 oranında bir hacim işgal eder (Sakmar, 2013). LNG, son derece düşük sıcaklıklarda elde edilen bir sıvı olduğundan dolayı, basınç altında depolanma gerekliliği bulunmaz. LNG'nin basınç altında bir madde olduğu yönündeki yaygın yanlış bilgi, onun tehlikeleri hakkında hatalı bir kavrayışa neden olmaktadır (Foss vd., 2003).

Tipik olarak LNG, %91-97 oranında metan, %15 oranında etan, yaklaşık %1 oranında propan ve yaklaşık %1 oranında bütan ile azot gibi diğer gazları içermektedir (Herdzik, 2012). LNG'nin yoğunluğu 400 ile 500 kg/m³ arasında değişmektedir. Su, LNG'den daha yoğun olduğundan, LNG su ile temas ettiğinde yüzeyde kalır ve hafifliği sayesinde hızla buharlaşır (Kanbur vd., 2017).

LNG buharının ana bileşeni olan metan için, üst alevlenme sınırı hacmi yüzde 15, alt alevlenme sınırı ise hacmi yüzde 5 olarak belirlenmiştir (Herdzik, 2011) ve bu aralığın oldukça dar olduğu gözlemlenmektedir (Molitor vd., 2012). Eğer yakıt konsantrasyonu üst alevlenme sınırını geçerse, alevlenme gerçekleşmez çünkü yeterli oksijen sağlanamamaktadır. Bu durum, örneğin, tamamen metan içeren bir kapalı ve güvenli depolama tankında açıkça görülebilir. Yakıt konsantrasyonu alt alevlenme

sınırının altında kaldığında ise, yeterli metan bulunmadığı için alevlenme olamaz (Foss vd., 2003).

LNG'den yayılan metan buharının, yakıt-hava karışımında yaklaşık yüzde 10 oranında bulunduğu (bu değer, yanıcı karışım sınırının 5-15% aralığının ortasına denk gelir) ve atmosfer basıncı altında kendiliğinden tutuşma sıcaklığının 1000°F (540°C) seviyesinin üzerinde olduğu bilinmektedir. Bu aşırı yüksek sıcaklık, güçlü bir termal radyasyon kaynağına veya ısıya ya da sıcak bir yüzeye ihtiyaç duyar. LNG, suya ya da yere düştüğünde, ortaya çıkan yanıcı gaz buharının alev, kıvılcım ya da 1000°F (540°C) veya daha yüksek bir ısı kaynağı ile karşılaşmaması durumunda, bu buhar genellikle havaya karışır ve yangın oluşumu gerçekleşmez (Tekeli vd., 2024).

LNG diğer diğer sıvı yakıtlarla kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları açısından karşılaştırıldığında, LNG buharı (metan) kendiliğinden tutuşma için en yüksek sıcaklığı gerektirir (Foss vd., 2003).

Aşağıda yer alan Tablo 7'de, LNG'nin diğer sıvı yakıtlarla olan kıyaslaması ortaya konulmuştur. Bu karşılaştırma, LNG'nin Alt Yanıcılık Sınırının genelde diğer yakıtlardan daha yukarıda olduğunu da göstermektedir. Başka bir deyişle, LPG veya benzinle mukayese edildiğinde, LNG'nin alev alabilmesi için daha fazla LNG buharına (belirli bir bölgede) ihtiyaç duyulmaktadır (Foss vd., 2003).

Tablo 7: LNG Yakıtının Diğer Yakıtlar İle Karşılaştırılması

Özellik	LNG	LPG	Benzin	Dizel
Toksik	Hayır	Hayır	Evet	Evet
Kanserojen	Hayır	Hayır	Evet	Evet
Yanıcılık	Evet	Evet	Evet	Evet
Buhar Bulut Formu	Evet	Evet	Evet	Hayır
Boğuculuk	Evet, ama buhar formunda	LNG ile aynı	Evet	Evet
Yüksek Soğukluk Dereceleri	Evet	Evet, soğutulursa	Hayır	Hayır
Diğer Sağlık Tehlikeleri	Yok	Yok	Göz Tahrişi, Uyuşma, Bulantı	Benzin ile aynı
Otomatik Tutuşma Noktası (°C)	540	454-450	257	316
Alevlenme Noktası (°C)	-187	-104	-45	60

Kaynama Noktası (°C)	-160	-42	32	204
Tutuşma Eşiği (%)	5-15	2,1-9,5	1,3-6	N/A
Depolama Basıncı	Atmosferik	Atmosferik	Atmosferik	Atmosferik

Kaynak: Foss vd., 2003; Kumar vd., 2011

LNG, eğer kriyojenik koşullara uygun olarak inşa edilmiş olan depolama tankları, boru hatları ve tesisat içinde bulunuyorsa, tehlikeli değildir. Ancak, LNG'nin kontrolsüz bir biçimde sızması durumunda ortaya çıkan buharlar, yukarıda belirtilen LNG ve buharlara bir ateşleme kaynağıyla temas ettiklerinde tehlike oluşturabilir (Tekeli vd., 2024).

LNG'nin kontrolsüz bir biçimde sızması durumunda, soğuk LNG (163°C) sıcak yüzeyler veya ılık deniz suyuyla karşılaştığında hızla kaynar ve buharlaşarak hacmini 600 kat artırır. Bu durum oldukça tehlikeli olup, büyük yapısal zararlara yol açabilir; ayrıca gemilerin çevresinde büyük bir yanıcı buhar bulutunun oluşmasına yol açabilir (Iannaccone, 2021).

1.5.2. LNG Yakıtı Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları

Bu bölümde LNG yakıtının kullanımına yönelik avantaj ve deazavantajlar açıklanmıştır. LNG yakıtının kullanımının emisyon azaltımı ve fiyat olmak üzere iki önemli avantajı vardır.

1.5.2.1. Emisyon Azaltım Avantajı

LNG, hem ECA bölgelerinde hem de dünya genelinde, MARPOL Ek VI'da belirtilen sülfür limitlerinin altında bir içerik sunması ve NO_x emisyonlarını azami şekilde düşürmesi sebebiyle, ek bir işleme ihtiyaç duymadan doğrudan MARPOL Ek VI gerekliliklerini karşıladığı için en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır (Tuswan vd., 2023; Pekşen, 2015).

LNG yakıtı kimyasal içeriği sebebiyle gemilerde yakıt olarak kullanımı sonucu SO_x emisyonu %90-95 oranında (Salarkia ve Golabi, 2023), PM emisyonunu neredeyse %100 oranında (Wang ve Notteboom, 2014), NO_x emisyonunu %85-90

oranında (Livaniou vd., 2022), CO_2 emisyonunu %15-20 oranında (Parfomak vd., 2019) azaltmaktadır.

1.5.2.2. Fiyat Avantajı

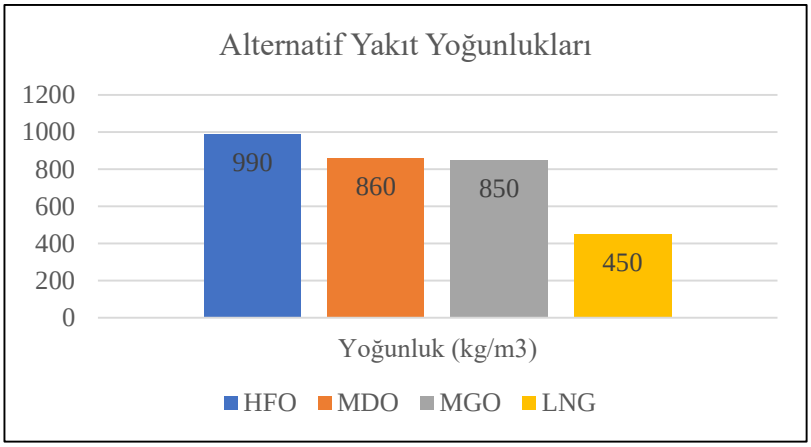
ABD ve Avrupa'daki mevcut ağır yakıt ve damıtılmış yakıt fiyatlarıyla karşılaştırıldığında, doğal gaz ve LNG, deniz yakıtı olarak daha uygun fiyatlı bir alternatif sunmaktadır (Lee vd., 2020). Ancak, doğal gazın satın alınması, sıvılaştırılması, depolanması ve gemilere yakıt olarak dağıtılması gerektiği unutulmamalıdır. Bu süreç, LNG için önemli bir altyapı yatırımı gerektirir ve yatırımın, mevcut altyapıyla sağlanan yakıtlarla rekabet edebilmesi için maliyet açısından uygun olması beklenmektedir. Bu bağlamda maliyet analizi yapmak gereklidir. AsyaPasifik bölgesindeki durum ise belirsizlik taşımaktadır; LNG fiyatları, IFO 380 fiyatlarının üzerinde, fakat MDO fiyatlarının altında seyretmektedir (Pekşen, 2015).

Bu nedenle, ekonomik bir bakış açısıyla düşünüldüğünde, sıvılaştırılmış doğal gaz, dizel yakıtlara göre daha avantajlı bir seçenek sunmaktadır. Bu avantajın başlıca nedenleri arasında bakım ve onarım giderlerinin daha düşük olması ile doğalgaz üretimindeki sürekli artış da bulunmaktadır (Lee vd., 2020; Bayraktar, 2016).

LNG yakıtının kullanımının avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır.

1.5.2.3. Kapasite Dezavantajı

LNG, yoğunluk bakımından diğer geleneksel yakıt yağlarıyla karşılaştırıldığında, geride kalan daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle bir dezavantaj yaratmaktadır. Grafik 1'de, yakıtların enerji yoğunlukları karşılaştırılmakta ve LNG'nin HFO'nun yaklaşık olarak yarı enerji yoğunluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Bu durumun pratik yansımaları, LNG'nin daha fazla hacim ihtiyacı duyması (Herdzik, 2011) ve bu bağlamda HFO, MDO ve MGO'ya kıyasla daha büyük tanklarla birlikte daha geniş tank odalarının gerekliliğini ortaya çıkarmasıdır (Olsen ve Baumgart, 2010).



Grafik 1: Alternatif Yakıtların Yoğunluk Karşılaştırması

Kaynak: Olsen ve Baumgart, 2010

Örneğin; 8.581 metreküp kapasiteye sahip C tipi tankların, LNG ile işletilen gemilerde kullanıldığı düşünüldüğünde, geleneksel yakıtlı motorla çalışan bir geminin konteynerlerle doldurulacak belirli bir alanını kaplamaktadır. 14 000 TEU kapasitesine sahip bir gemi için, yük alanı kaybının 300 TEU'ya veya toplam kapasitenin yaklaşık %2'sine denk geldiği hesaplanmıştır (SEA-LNG Raporu, 2020).

1.5.2.4. Metan Açığa Çıkarması Dezavantajı

Bir diğer önemli dezavantaj, LNG veya çift yakıtlı motorlardan kaynaklanan yanmamış metan (CH_4) salınımlarıdır (Comer vd., 2024; Ghadikolaei vd., 2016; Tuswan vd., 2023). Metan; CO_2, CH_4 ve N_2O gibi önemli sera gazlarından biridir ve CO_2'ye kıyasla 28-30 kat daha yüksek bir küresel ısınma potansiyeline sahiptir (Kuittinen vd., 2023). Küresel ısınmanın %25'ine metan emisyonları sebep olmakta ve kısa vadede CO_2'ye oranla daha güçlü bir etki yaratmaktadır. Araştırmalar, LNG ile çalışan gemilerin ürettiği metan emisyonlarının 2012 ve 2018 yılları arasında %150 oranında bir artış gösterdiğini ortaya koymuştur (Clean Arctic Alliance, 2024).

LNG'nin deniz araçlarında yakıt olarak taşınması ve kullanımı esnasında metan emisyonları, sızıntı emisyonları, havalandırma veya motorlardan kaynaklanan metan kaçakları olarak ortaya çıkabilir (Kuittinen vd., 2023).

LNG motorlarının metan emisyon kaynaklı bu sorunu çözülemezse, LNG yakıtlı gemilerin genel çevresel performansını düşüreceği açıktır (Baresic ve Rehmatulla, 2024; Lehtoranta vd., 2023; Wang ve Notteboom, 2014).

Balcombe vd., (2021) tarafından sıvı yakıtlara kıyasla bir iklim avantajı sağlanabilmesi için tedarik zinciri ve kullanım sırasında izin verilebilir maksimum emisyon miktarlarını hesaplayan bir çalışmada, LNG yakıtlı gemilerin iklim avantajını eline alabilmesi için toplam metan emisyonlarının %0,8 ile %1,6 arasına düşürülmesi gerektiği ve LNG motorlarında metan emisyonu konusunda daha fazla iyileştirme yapılmadan sektörün %50 sera gazı emisyonu azaltma hedefini karşılayamayacağı sonucuna varılmıştır.

Bir LNG taşıyıcısında yapılan bir transatlantik yolculuğuna ilişkin çalışmada ise, ana ve yardımcı motorlardan kaynaklanan metan kaçağının, gemideki yolculuk boyunca toplam metan emisyonlarının %99'unu ve toplam sera gazı emisyonlarının %35'ini oluşturduğu hesaplanmıştır. Bu durum da, LNG motor teknolojilerinin incelenmesi ve geliştirilmesi yoluyla sera gazı emisyon azaltımı için önemli bir göstergedir (Kuittinen vd., 2023).

1.5.2.5. İlk Yatırım Maliyeti Dezavantajı

LNG, gemi sahiplerine çevresel standartlara ulaşma anlamında maliyet etkin bir alternatif sunarken, bazı teknik zorlukları da beraberinde getirmektedir. LNG'nin taşınması ve depolanmasında kullanılan sistemler, sefer sırasında sürekli olarak LNG ile temas eden tanklar, borular ve makineler gibi elemanlardan oluşur. Bu bileşenler, çok düşük sıcaklıklara dayanabilmek için yüksek kaliteli özel alaşımlardan imal edilmekte olup güvenilir standartlara sahiptir. LNG'yi yakıt olarak kullanan gemilerin giderleri, geleneksel yakıt kullanan gemilere kıyasla yaklaşık %20-25 oranında daha yüksektir (Pekşen, 2015).

Dolayısıyla, LNG ile çalışan ana makinelerin başlangıç yatırım maliyetleri dizel yakıtlı muadillerine kıyasla daha yüksektir ve bu farkın telafisi uzun bir geri ödeme süreci gerektirmektedir (Bayraktar, 2016).

1.5.2.6. Alt Yapı Eksikliği ve Alt Yapı Maliyeti Dezavantajı

Çeşitli araştırmalarda, LNG'nin gemi yakıtı olarak kullanılabilmesi için en büyük zorluklardan birinin gemilere LNG ulaştırmak amacıyla gerekli olan yerleşik ikmal sistemleri ve dağıtım ağlarının mevcut eksikliği olduğu belirtilmektedir (Stewart

ve Wolosz, 2015). Yakıt tedarik edenler, ticari deniz taşımacılığına LNG sağlamak için yeterli bir talep oluşmadığı sürece gerekli olan altyapıya yatırım yapmaya isteksiz davranmaktadırlar (Notteboom vd., 2022). Diğer yandan, LNG ile çalışan gemilere yatırım yapma konusunda gemi sahipleri de, ikmalin zor bulunabileceği bir durumdan dolayı tereddüt yaşamaktadır (Yao vd., 2024; Wang ve Notteboom, 2014).

LNG tedarikinin, gemilere ulaştırılmasının, depolanmasının ve teslim edilmesinin özel bir altyapıya ihtiyaç duyduğuna dikkat çekilmektedir (Peng vd., 2021) ve bu süreç çeşitli zorluklar içermektedir (Parfomak vd., 2019). Genellikle stratejik olarak kıyı alanlarında yer alan bu terminaller, kasırgalar ve tsunamiler gibi aşırı hava olaylarına maruz kalabilmektedir. Depolama, yeniden gazlaştırma ve sürekli bir tedarik temin etme gibi operasyonel zorlukların yanı sıra, sıkı emniyet ve güvenlik standartlarına uyum sağlama da sürekli bir endişe konusu olmaktadır. Ek olarak, gaz sızıntısı olasılığı ve bu durumun deniz ekosistemleri üzerindeki olumsuz etkileri (Nubli ve Sohn, 2022), düzenleyici denetimler ve toplumsal kaygılarla birleşerek önemli operasyonel riskler yaratabilmektedir (ASAP, 2024).

1.5.2.7. Belirsizlik Dezavantajı

LNG fiyatlarının diğer yakıt çeşitleriyle olan farkı ve ilerideki çevresel politikalar (örneğin, daha fazla ECA bölgesi ve uluslararası deniz taşımacılığı için CO_2 düzenlemeleri) LNG ile çalışan gemilerin yaygınlaşmasında önemli bir etken olacaktır (Chen vd., 2018). LNG bunker yakıtı ile HFO/MGO/MDO arasındaki fiyat farkı, aslında LNG ile çalışan bir gemi ile HFO/MGO/MDO ile çalışan bir geminin yakıt tüketimi arasındaki farkı açıklamaktadır. LNG ile çalışan bir geminin daha büyük yatırım maliyetlerini karşılayabilmesi için yakıt tasarruflarının yeterli derecede yüksek olması gerektiğinden, LNG bunker fiyatlarının göreceli durumu, gemi sahipleri ve denizcilik firmaları açısından LNG bunker yakıtı pazarındaki talep açısından son derece önemli bir unsurdur (Wang vd,, 2021).

HFO/MGO/MDO bunker fiyatları, geçmişte ham petrol fiyatlarıyla paralel bir seyir izlemiş ve 2014 yılının ortalarından itibaren ham petrol fiyatlarıyla birlikte azalma göstermiştir. LNG ithalat fiyatları, eğer ham petrol fiyatlarına bağlı bir şekilde

devam etmezse, LNG bunker yakıtının göreceli fiyatı artış gösterecek ve bu da LNG ile çalışan gemilerin benimsenmesini zorlaştıracaktır (Faber, 2017).

Hâlihazırda, LNG piyasasında her bölgenin kendine özgü arz-talep dinamikleri, farklı düzenleyici çerçeveleri ve nihayetinde piyasa ve hub gelişiminin farklı aşamalarında olmaları gibi özellikleri vardır (ABAXX, 10 Ocak 2025).

Bu nedenle, yakıtların bölgesel farklılıkları (He vd., 2024; Kuang vd., 2023) ve gelecekteki fiyatlarıyla ilgili olası belirsizlikler (Sari vd., 2023; Molitor vd., 2012), gemi sahiplerinin LNG yakıtlı gemilere yapılacak yatırımlarının kârlı olup olmadığını tahmin etmelerini zorlaştırmaktadır (Wang vd., 2021). Bu belirsizliklere ek olarak, ikmal altyapısının geleceği, yeterli LNG arzının sağlanıp sağlanamayacağına dair belirsizlikler, teknik standartlarla ilgili belirsizlikler ve güvenlik/emniyet standartlarıyla ilgili düzenleyici belirsizlikler de dikkate alınmalıdır (Chen vd., 2018).

1.6. LNG YAKITININ DENİZ TAŞIMACILIĞINDA KULLANILMASI

IMO 2020 ile getirilen SO_x, NO_x, PM ve CO_2 kısıtlamalarını göz önünde bulundurduğumuzda LNG yakıtı avantajları dezavantajlarına oranla önde gelmekte ve sıfır emisyon hedefine ulaşma aşamasında bir geçiş yakıtı olarak en mantıklı çözüm olarak görülmektedir.

Bu bölümde LNG yakıtlı gemilerin makine tipleri, LNG yakıtlı gemi tipleri ve bunların kullanım avantaj-dezavantajları ile deniz taşımacılığında kullanımına yönelik etkileri irdelenecektir. Ayrıca, LNG yakıtlı gemilerin kullanımındaki yakıt ikmali gibi faaliyetlerine, kurallara ve tehlikelerine değinilecektir.

1.6.1. LNG Yakıtlı Makine Tipleri

Gazın motorlarda yakıt olarak kullanılması oldukça eski bir pratiktir. İçten yanmalı motorların ilk örneklerinden birçoğu gazla çalışıyordu ve bu motorlardan biri, Nikolaus Otto tarafından 1876 yılında kömür gazıyla işletiliyordu (IMO, 2016). Ayrıca, LNG'nin gemi yakıtı olarak kullanılması da yeni bir uygulama değildir. Bu teknoloji köklü bir gelişim göstermiştir; zira LNG taşıyıcı operatörleri, LNG ile gemi

işletme konusunda neredeyse 40 yıllık bir deneyime sahiptir (Wang ve Notteboom, 2014).

LNG'nin denizlerde yakıt olarak yaygın kullanımı, yalnızca ulusal ve uluslararası çevresel sorunlardan kaynaklanmamaktadır. Aynı zamanda LNG geçişinin ilk aşamalarında uygulanan hibritleşme stratejileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Hibritleşme, mevcut teknolojinin tam anlamıyla yeni bir teknolojiye dönmediği, ancak kullanıcıların belirli durumlarda eski sistemleri devam ettirdiği anlamına gelmektedir. Denizcilik sektöründe LNG geçişi açısından hibritleşme, çift yakıtlı motorların kullanımıyla kendini göstermektedir (Baresic ve Rehmatulla, 2024). Bu tür motorlarla donatılmış gemiler hem gaz hem de dizel yakıtla işletilebilmektedir. Bu hibritleşme yaklaşımı, filo geliştirme konusunda gemi sahiplerine iki seçenek sunmaktadır; birincisi eski gemilerin yeni teknolojilerle modernleştirilmesi, diğeri ise eski nesil teknolojik özelliklere sahip gemilerin yerine yeni gemilerin inşa edilmesidir. Gemi sahipleri mevcut filolarını güncellemeyi ya da yeni LNG tahrikli motor teknolojisi ile donatılmış gemiler inşa etmeyi tercih edebilmektedir (Bayraktar, 2016).

İki ayrı strateji için yatırım masrafları, geminin modernizasyonu veya yeni inşası durumuna göre değişiklik göstermekte ve bu durum kısmen tahrik sisteminin boyutuna bağlıdır. Örneğin; IMO verilerine göre, çift yakıtlı tahrik sistemi teknolojisi ile bir geminin modernizasyonu, yeni bir gemi inşa etmekten yaklaşık olarak yarı fiyatına mal olmaktadır (Tuswan vd., 2023; Parfomak vd., 2019).

LNG yakıt kullanabilme kapasitesine sahip makinelerin dönüşüm aşamasında, en önemli unsurlardan biri, LNG yakıt tankları için uygun bir alanın bulunmasıdır. Ayrıca, dönüşüm sürecinde dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli nokta, gemideki mevcut makinelerin dönüşüm için elverişli olup olmadığının analiz edilmesidir (Tuswan vd., 2023). Eğer mevcut makineler dönüşüm için uygun değilse, onların yerine çift yakıtlı, yeni makinelerin monte edilmesi gerekecektir. Ancak genelde, mevcut makinelerin dönüşüm masrafı, tamamen yeni makinelerin takılmasıyla ilgili maliyetten daha az olmaktadır (Dereli, 2018).

Birçok araştırma, LNG'nin yeni inşa edilen gemiler için yakıt olma potansiyelinin, var olan ve dönüşüm gerektiren gemilere kıyasla daha fazla olduğunu öne sürmektedir. Bazı araştırmalar ise, mevcut gemilerin dönüşümü için gerekli fizibilite incelemelerinin gerçekleştirilmesinin daha makul bir yaklaşım olduğuna dikkat çekmektedir (Tuswan vd., 2023). Bu duruma iyi bir örnek, 2011 yılında başarılı bir şekilde dönüştürülen İsveç merkezli Tarbit Shipping şirketine ait "Bit Viking" adlı kimyasal tanker projesidir (Parfomak vd., 2019; Dereli, 2018). Söz konusu gemi, geleneksel dizel motorundan çift yakıtlı LNG motoruna, güvertede iki yakıt tankı ile birlikte dönüştürülmüştür. Ancak, bu araştırmalar dönüşüm olasılığının büyük ölçüde geminin yaşı ve yapılandırmasına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini de belirtmektedir (Wang ve Notteboom, 2014).

Teknik açıdan incelendiğinde, LNG tahrik sistemine geçiş yapabilen tankerler, petrol yakıtlı tahrike sahip olan gemi türleri arasında en basit olanlardan biridir. Genelde, tankerler yük alanlarının üst kısımlarında tank yerleştirecek yeterli alan sunarlar ve tehlikeli taşıma işlemleri için uygun yapıya sahiptirler. Ancak, tankerlerin sıklıkla sabit güzergâhlarda düzenli bir şekilde aynı limanı ziyaret etmedikleri görülmektedir. Bu nedenle, LNG'nin gemi yakıtı olarak kullanılması için, tanker sınıfı gemilerin LNG'ye deniz yakıtı olarak daha geniş bir erişimin sağlanması elzemdir (Faber, 2017).



Şekil 7: M/T BIT VIKING

Kaynak: IMO Raporu, 2016; Dereli, 2018

Şekil 7'de gösterilen Bit Viking projesinin hayata geçirilmesinin nedeni, geminin neredeyse sadece Norveç kıta sahanlığında işletilmek üzere uzun vadeli bir kiralama anlaşması yapmış olmasıdır (Faber, 2017).

Doğal gaz motorlarında kullanılan üç temel teknoloji bulunmaktadır: fakir karışım kıvılcım ateşlemeli saf gaz motorları, dizel pilotlu çift yakıtlı motorlar ve dizel pilotlu doğrudan enjeksiyonlu motorlardır.

Yalnızca gazla işleyen motor sistemi (LBSI) ile donatıldığında, IMO'nun "Dökme Halde Sıvılaştırılmış Gaz Taşıyan Gemilerin İnşası ve Donatımı için Uluslararası Kodu" (IGF Kodu), ek bir LNG tankı ve tahrik sistemi kurulmasını zorunlu kılar. Ancak, bu gereklilikler çift yakıtlı motor sistemlerinde mevcut değildir (Unseki, 2013).

Motor teknolojisi, aynı zamanda motorun termodinamik çevrim türü olan Otto çevrimi veya dizel çevrimi gibi kategorilere de ayrılabilir (IMO, 2016). Bu çerçevede, LNG yakıtlı motor teknolojilerini aşağıdaki Tablo 8'de özetlemek mümkündür.

Tablo 8: LNG Yakıtlı Motor Teknolojileri

	Sade Gaz Yakıtlı Makine (LBSI)	**Çift Yakıtlı 4 Strok Makine (LPDF)**	**Çift Yakıtlı 2 Strok Makine (LPDF)**	**Çift Yakıtlı 2 Strok Makine (HPDF)**
Çevrim	Otto	Otto	Otto	Dizel
Basınç	Düşük Basınç	Düşük Basınç	Düşük Basınç	Yüksek Basınç
Tutuşturma Kaynağı	Buji	Sıvı Yakıt Pilot Valf	Sıvı Yakıt Pilot Valf	Sıvı Yakıt Pilot Valf
Metan Emisyonu (gCH4/kWh)	4,1	5,5	2,5	0,2
NOx Salınımı	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
	Tier III karşılar	Gaz Mod Tier III Dizel Mod Tier II karşılar	Gaz Mod Tier III Dizel Mod Tier II karşılar	Gaz Modunda Tier III karşılamaz
Gemi Tipleri	Çoğunlukla Araç/Yolcu Feribotları, birkaç Genel Kargo, TUGS ve RORO	Çoğunlukla LNG Taşıyıcılar, bazı Araç/Yolcu Feribotları, Kruvaziyer Gemileri,	LNG Taşıyıcılar ve Mega Konteyner Gemileri ile bazı Yağ ve Kimyasal Tankerler	LNG Taşıyıcılar Konteyner, Genel Kargo ve Kuru Yük Gemileri

Kanyak: Oh vd., 2024; Faber, 2017; IMO, 2016; Pavlenko vd., 2020; Sharafian vd., 2019; Balcombe vd., 2021; Kuittinen vd., 2023

Temel olarak, dört farklı LNG gemi motoru tipi, gemilerin tüm sülfür gereksinimlerine uyum sağlamasına olanak tanımaktadır ve bu motor türleri, NO_x emisyonları bakımından birbirlerinden farklılıklar göstermektedir (Faber, 2017). NO_x üretimi, zirve yanma sıcaklıklarıyla ilişkilidir ve bu sıcaklıklar, genel olarak dizel motorlara kıyasla gaz motorlarında çok daha yüksektir. Aynı şekilde, doğal gazın yakımında Otto süreçlerini kullanan DF (DualFuel) motorları, dizel difüzyon yanma süreçlerine sahip motorlara göre çok daha düşük NO_x emisyonları üretmektedir. Başka bir deyişle, LPDF motorları, gaz modunda faaliyette bulunurken emisyon azaltım ekipmanı olmadan mevcut IMO NO_x sınırlarını rahatlıkla karşılayabilmektedir (Sharafian vd., 2019; ABS, 2022).

HPDF motorlar, LPDF motorlarla kıyaslandığında daha fazla NO_x emisyonu üretmesine rağmen (Karatuğ vd., 2023; Iannaccone, 2021), iklim değişikliği, maliyetler ve hava kalitesi üzerindeki etkileri açısından en düşük değerlere sahiptir (Pavlenko vd., 2020; Kuittinen vd., 2023). Bu motor tipi, HFO ile karşılaştırıldığında, sera gazı emisyonlarında %28'e kadar bir azalma sağlamaktadır. Öte yandan, LPDF iki zamanlı motorlar ise %18'e kadar bir emisyon düşüşü sunmaktadır (Balcombe vd., 2021). LBSI ve LPDF dört zamanlı motorlar, sırasıyla %2,5 ve %3,1 oranında metan emisyonu gerçekleştirmekte; bu durum ise LNG motorların sera gazı emisyonları bakımından avantajının azalmasına yol açmaktadır (Comer vd., 2024; Karatuğ vd., 2023; Sharafian vd., 2019).

Bunun yanı sıra, LNG motorunun temizlik ve verimlilik açısından üstün bir sisteme sahip olması ile birlikte makinenin dayanıklılığı, onu diğer ağır yakıtlı dizel motorlarla kıyaslandığında daha az bakım giderine sahip kılmaktadır (Wang ve Notteboom, 2014).

Gemi türü ve kullanım amacına bağlı olarak makine çeşitleri (LSDI, HPDF, LPDF vb.) farklılık göstermektedir. Örneğin, LBSI ve LPDF 4 zamanlı motorlar genellikle daha küçük kıyı seferleri yapan gemilerde tercih edilirken, HPDF ve LPDF 2 zamanlı motorlar LNG taşıyan, konteyner ve genel kargo gemilerinde kullanılmaktadır (Balcombe vd., 2021).

Piyasada en çok temsil edilen motorlar 4 zamanlı LPDF motorlarıdır; bunu LBSI ve 2 zamanlı LPDF motorlar izlemektedir. Üreticilerden elde edilen verilere dayanarak HPDF motorlarının metan sızıntısının az olduğunu söyleyebiliriz (Kuittinen vd., 2023).

Günümüzde, LNG ile çalışan yeni sipariş edilen gemilerin yaklaşık %75'ini, iki zamanlı dizel çevrim motorları oluşturmaktadır. *Bu motorlar, metan sızıntısını etkin bir şekilde tamamen ortadan kaldırmıştır.* Düşük basınçlı motor teknolojilerinde metan sızıntısının hala mevcut bir sorun olmasından dolayı, üreticiler son çeyrek yüzyıl içinde düşük basınçlı dört zamanlı motorlardaki sızıntı seviyelerini %85'ten fazla azaltmayı başarmıştır (OffshoreEnergy, 8 Ekim 2024).

LNG'nin gemi yakıtı olarak kullanımı, metan sızıntısının atmosfer üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle eleştirilse de; yeni tasarlanan LNG ile çalışan deniz motorları, metan sızıntısını %50 oranında düşürmeyi başarmış ve CO_2 ile CO_2 eşdeğeri emisyonlarında %20 ila %25 oranında bir azalma sağlamıştır (Abdelmalek ve Guedes Soares, 2023).

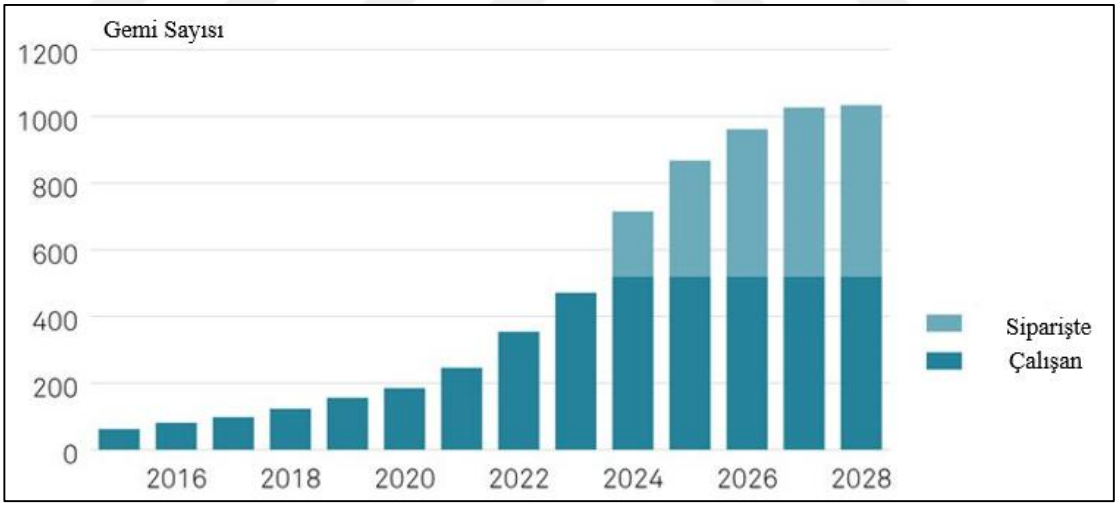
1.6.2. LNG Yakıtlı Gemi Tipleri

LNG, 1970'lerden beri LNG tankerlerinde bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu kullanımda, LNG tanklarında meydana gelen buharlaşma gazı, geleneksel kazan ve buhar türbini sistemlerinde değerlendirilmiştir. Son yıllarda ise Baltık bölgesindeki ülkeler, feribotlar ve petrol ile gaz endüstrisi için açık deniz hizmet gemilerinde LNG'yi yakıt olarak kullanma konusunda öncülük etmiştir. Ayrıca, Kuzey Denizi ülkeleri, özellikle Norveç, son 13 yıl içinde LNG'nin gemi uygulamalarında yaygınlaşmasında önemli bir etki yapmıştır. DNV verilerine göre, 2016 yılında LNG ile çalışan gemilerin yüzde 43'ü Norveç merkezliydi (Laribi ve Guy, 2020). Şu anda, LNG ile faaliyet gösteren gemilerin sayısı artmakta olup, dökme yük gemileri ve kruvaziyer gemiler de dahil olmak üzere büyük tonajlı gemiler inşa edilmektedir (Iannaccone vd., 2020).

Aktif olarak kullanılan LNG yakıtlı gemiler, şu anki dünya denizcilik filosunun %2'sinden daha fazlasını temsil etmektedir. Eğer sipariş edilen gemileri de dikkate

alırsak, rakam gemi sayısında %4'e, deadweight tonajı (DWT) açısından ise %6'ya yükselmektedir (SEA- LNG, 8 Ekim 2024).

2010 yılında, hizmette olan 21 LNG yakıtlı gemi, çoğunluğu yerel alanlarda faaliyet gösteren daha küçük teknelerden meydana gelmekteydi. Bugün ise, bu rakam, 2010'daki gemilerin iki katı büyüklüğünde olup dünyanın en büyük konteyner gemileri de olmak üzere, 590'a çıkarak küresel anlamda büyük bir artış göstermiştir (SEA-LNG, 2024). Ayrıca, 564 geminin sipariş aşamasında olduğu ve 2028 yılının sonuna kadar LNG ile çalışan gemi sayısının toplamda 1154'e ulaşmasının öngörüldüğü belirtilmektedir. Bununla birlikte, hâlihazırda hizmette olan 772 LNG taşıyıcı gemi mevcut olup 2023 yılı sonunda 341 yeni sipariş verilmiştir. Bu durum, dünya üzerindeki en büyük 60000 gemiden 2000'den fazlasının LNG ile çalıştığını ortaya koymaktadır (SEA-LNG, 8 Ekim 2024). Ek olarak, DNV kaynaklarına göre LNG çift yakıtlı gemiler, yeni inşa siparişleri defterinde üçte bir oranında yer kaplamaktadır (DNV, 2024). Bu kapsamda, dünya genelinde LNG yakıtlı gemilerin yıllara sâri gelişimi Şekil 8'de gösterilmiştir.

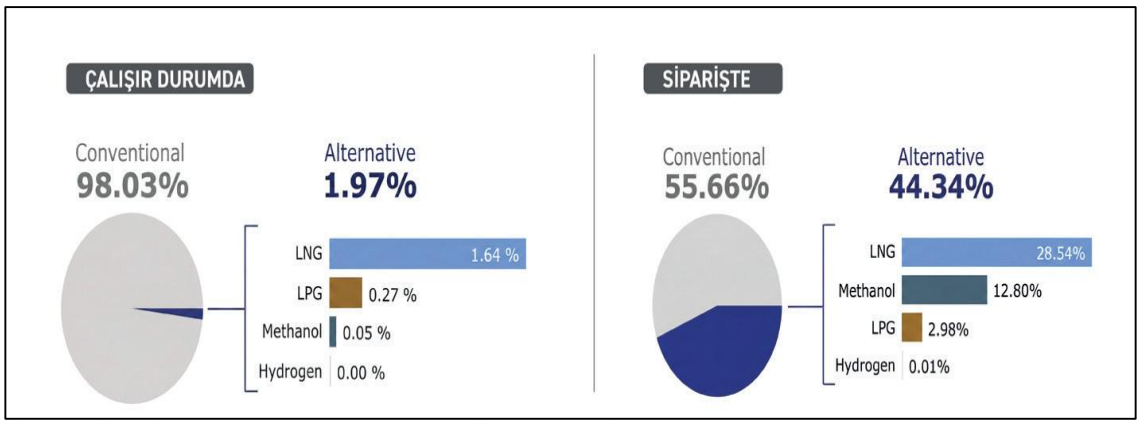


Şekil 8 : Dünya Çapında LNG Yakıtlı Filoların Gelişimi

Kaynak: DNV, 2024

LNG, 2024 yılı içerisinde alternatif yakıtlı gemi siparişlerinin yaklaşık %51'ini oluşturarak, bu sektördeki en önemli etken haline gelmiş olup mevcut durumdaki oranlar Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu süreçte LNG ile faaliyet gösteren gemiler için toplamda 264 yeni sipariş verilmiş ve bu rakam, 2023 yılına göre iki katına çıkmıştır.

Özellikle yılın ikinci yarısında konteyner segmentindeki siparişlerde görülen dikkate değer artış, bu büyümenin ana kaynağını oluşturmuştur (DNV, 2025).

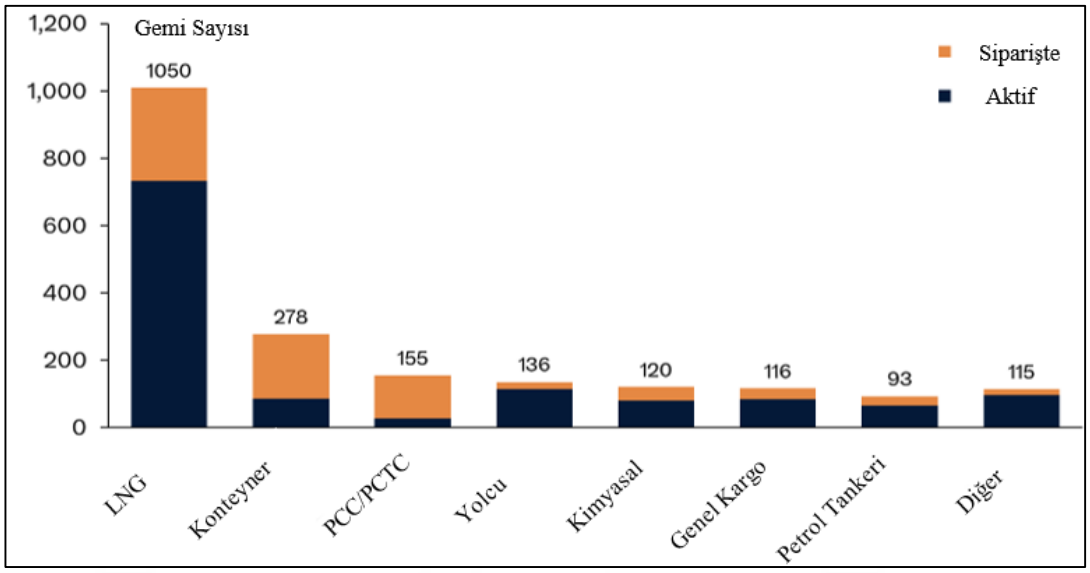


Şekil 9 : LNG Yakıtlı Gemilerin Alternatif Yakıtlar İçindeki Durumu

Kaynak: DNV, 2025

Yapılan çalışmalar, LNG ile tahrik edilen gemi tahrik sistemlerinin erken benimsenmesi için düzenli bir seyir paterni, daha sıkı çevresel standartların tetiklediği belirli bölgelerde operasyonlar (Örneğin ECA'lar ve iç suyolları), LNG yakıt sistemi, gazın depolanması ve diğer gemi içi işlemler için uygunluk, gemi başına yakıt tüketimi gibi kriterleri paylaştığı sonucuna varmaktadır (Olsen ve Baumgart, 2010).

Bu nedenle, kısa mesafe deniz taşımacılığı endüstrisi, mevcut ECA bölgelerinde düzenli hat taşımacılığı yapan gemiler için LNG'nin yakıt olarak benimsenmesi açısından mantıklı bir başlangıç noktası gibi görünmektedir. LNG kullanımı en uygun gemi türleri, araç/yolcu feribotları, açık deniz ikmal gemileri, RoRo gemileri ve devriye gemileridir (Burel vd., 2013). Bunun yanı sıra, iç suyollarındaki LNG yakıt ikmalinin anlamlı bir pazarı da vardır. Uzun vadede, belki de 2020 sonrasında, küresel SO_x sınırlarının yürürlüğe girmesiyle LNG ikmali, dünya genelindeki katı emisyon hedefleri ve mevcut tedarik zinciri ile altyapı ağı sayesinde derin deniz gemilerine kadar yayılmaya devam etmektedir (Wang ve Notteboom, 2014).



Şekil 10: LNG Yakıtlı Gemi Tipleri

Kaynak: Rystad Energy, Nisan 2024

2020'nin başlarında, mevcut durumda 600'den fazla LNG taşıyıcısı hariç, bunun yanı sıra 175 LNG ile çalışan gemi faal durumdaydı ve 200'den fazla yeni gemi siparişi verilmişti. Yeni siparişlerin yaklaşık %10 ila %20'sinin LNG ile işletileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca, Şekil 10'da gösterildiği gibi son dönemlerde verilen yeni gemi siparişleri, açık deniz gemilerine, özellikle kruvaziyer gemilere, konteyner gemilerine, ham petrol ve ürün tankerlerine ve dökme yük gemilerine yönelik bir artış göstermektedir (SEA-LNG, 2024).

LNG taşımacılığı yapan şirketler, ikmal süreçlerinde edindikleri güvenlik ve emniyet tecrübeleri sayesinde, taşınan gazın buharlaşan kısmını makinelerine yönlendirme yolunu seçerek LNG'yi gemi yakıtı olarak kullanma eğilimindedirler (Sari vd., 2023). Bu nedenle, LNG ile çalışan gemilerin büyük bir kısmını LNG transfer gemileri oluşturur (Faber, 2017). 2023 yılı itibarıyla dünya çapında 772 LNG taşıyıcısı aktif olarak çalışmakta olup, 341 adedi de sipariş aşamasındadır (OffshoreEnergy, 8 Ekim 2024).

Diğer sınıf gemileri de inceleyecek olursak;

Şekil 11'de gösterilen bu tür yolcu gemilerinin ölü ağırlık tonajı, LNG yakıt tanklarını yerleştirmek için gerekli alanı sağlayacak kapasiteye sahiptir. Ayrıca, NO_x,

SO_x ve PM gerekliliklerini karşılayarak sahil yakınlarındaki SECA ve ECA bölgelerinde rahatlıkla seferlerini gerçekleştirebilirler (Faber, 2017).



Şekil 11 : LNG Yakıtlı Bir Feribot- Viking Grace

Kaynak: Faber, 2017

Lebedevas vd. (2021) tarafından yapılan bir araştırmanın sonuçları, LNG'nin liman römorkörleri (Şekil 12) için alternatif bir yakıt olarak kullanımının CO_2, SO_x ve NO_x emisyonlarında önemli bir azalma sağlayabileceğini göstermektedir. LNG ve yeni nesil çift yakıtlı motorlar, zararlı emisyonları azaltmak için çevre dostu alternatifler sunarak, mevcut birçok liman römorkörünün ECA'larda faaliyet göstermeye devam etmesini ve IMO Tier III düzenlemelerine uyum sağlamasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 12 : LNG Yakıtlı Platform Gemisi- Viking Princess

Kaynak: Faber, 2017

Kruvaziyer gemilerinin ise çoğunluğu ECA içinde faaliyet gösterdiğinden, bu sınıftaki gemiler için LNG kullanımı çevresel uyum ve operasyonel avantajlar açısından son derece çekici bir tercih olarak görülmektedir (IMO, 2016).

Teknolojideki gelişmeler ve altyapının iyileştirilmesi sayesinde, sektörde LNG kullanımına ilişkin mevcut kısıtlamaların bir kısmının aşılması için fırsatlar oluşturulabileceği düşünülmektedir. Bu doğrultuda birçok yolcu gemisi işletmesi (Carnival, Disney, Royal Caribbean, MSC ve diğerleri) harekete geçmeye başlamıştır. Şu anda toplamda 20 adet Şekil 13'te gösterildiği gibi LNG ile çalışan yolcu gemisi hizmet vermekte ve 23 gemi ise sipariş edilmiş ve inşa aşamasındadır (Rivieramm, 27 Mart 2024).



Şekil 13 : LNG Yakıtlı Kruvaziyer Gemisi

Kaynak: Rivieramm, 27 Mart 2024

Iannaccone vd., (2020) tarafından kruvaziyer gemi modeli üzerinden çevresel etki, ekonomik fizibilite ve emniyet açısından değerlendirilmesine yönelik çok kriterli karar verme yöntemiyle yapılan çalışmada; LNG tabanlı teknolojilerin, MGO'ya kıyasla daha iyi bir sürdürülebilirlik performansı sunduğu, düşük basınçlı çift yakıt sisteminin ilgili çevresel faydalar (çevresel endekste %44 azalma) ve makul maliyetler sayesinde MGO'ya kıyasla toplam sürdürülebilirlik etkisinde %35'lik bir azalma ile daha sürdürülebilir bir alternatif olduğu ancak yüksek basınçlı çift yakıt sisteminin emniyet sorunları nedeniyle dezavantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Konteyner gemisi kategorisinde, LNG yakıtının kullanımı açısından kayda değer bir artış öngörülmektedir (Kuang vd., 2023). Fakat daha uzun mesafeler kat eden gemiler için en büyük engel, yakıt depolamak amacıyla daha fazla yük alanının dönüştürülmesine duyulan ihtiyaçtır (IMO, 2016). Bu nedenle, çift yakıtlı motorlar tercih edilmektedir.

Şekil 14'te gösterilen konteyner gemisinde ana yakıt olarak LNG kullanılmaktadır. Diğer yakıt türleri, geminin LNG tedarik ağının yetersiz olduğu alanlarda esneklik sunmak amacıyla düşünülmüştür (Faber, 2017).



Şekil 14 : Çift Yakıtlı (LNG-Dizel) Konteyner Gemisi-TOTE

Kaynak: SEA-LNG, 2024

Karatuğ vd., (2023) tarafından bir konteyner gemisinin çift yakıtlı motor yatırımının çevresel ve ekonomik değerlendirmesi üzerine yapılan çalışmada, LNG kullanımının gemilerde sağladığı çevresel faydaların açıkça etkili bir çözüm sunduğu ve ekonomik açıdan ise, yeni inşa edilen veya genç yaştaki deniz araçları için daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 15 : LNG Yakıtlı İlk Dökme Yük Gemisi-SG OCEAN-NYK

Kaynak: OffshoreEnergy, 7 Şubat 2024

Şekil 15'te yer alan kuru yük gemisi, çift yakıtlı düşük devirli dizel motoru (LPDF) ile çalışmaktadır. Bu motor, LNG yakıtı kullanıldığında metan emisyonlarını yarı yarıya azaltma kapasitesine sahiptir. Ayrıca, LNG yakıt tankı ve LNG yakıt ikmal

sistemindeki tüm donanım ve düzenlemeler titizlikle planlandığı için, ilave donanımların ağırlığındaki artışa rağmen, gemi, aynı ölçekteki geleneksel dökme yük gemilerine kıyasla yüklenebilir miktarını ve kargo ambarı kapasitesini korumaktadır (OffshoreEnergy, 7 Şubat 2024).



Şekil 16 : LNG Yakıtlı İlk VLCC Tanker-Yuan Rui Yang- COSCO Shipping

Kaynak: OffshoreEnergy, 28 Şubat 2022

Şekil 16'da gösterilen ilk LNG yakıtlı VLCC tanker olan Yuan Rui Yang tarafından teslimatından bu yana toplamda 18 kez sefer yapılarak, 12000 ton LNG tüketilmiştir. Şirketin duyurusuna göre, geleneksel fuel oil ile kıyaslandığında CO_2 emisyonları yaklaşık üçte bire düşerken, SO_x emisyonları neredeyse sıfıra gerilemiştir (OffshoreEnergy, 10 Şubat 2024).

Örneklendirilen bahse konu gemi tiplerinde LNG yakıtına geçiş yapıldığında emniyet ve operasyon açısından gemi sahiplerini ve işletmelerini etkileyen bazı durumlar mevcuttur. Bu durumlar, gemilerin tasarım özellikleri, yakıt depolama gereksinimleri, operasyonel süreçleri ve mürettebatın eğitim ihtiyaçları gibi çeşitli unsurları kapsamaktadır. LNG yakıtlı gemilerin tiplerine göre deniz taşımacılığını etkileyen bahse konu durumlar Tablo 9'da özetlenmiştir. Tablo, farklı gemi tiplerinde LNG kullanımının ortaya çıkardığı temel emniyet ve operasyonel etkilerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

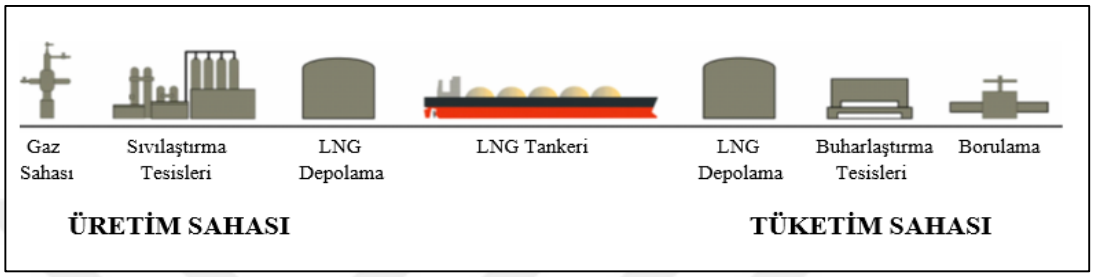
Tablo 9: LNG Yakıtlı Gemilerin Gemi Tipine Göre Etkileri

	Emniyet Etkileri	Operasyon Etkileri
Konteyner Gemileri	• Genel mürettebatın temel bir eğitim alması gerekmektedir. • Makine dairesi ve ana güverte personeli ise daha kapsamlı sertifikalara ihtiyaç duymaktadır. • Teknik olarak, LNG ikmali yükleme/boşaltma operasyonlarıyla eş zamanlı olarak gerçekleştirilebilir. • Ancak, katılımcı, liman otoritelerinin LNG ikmalinin yapılabileceği liman alanlarının sayısına kısıtlama getireceğini beklemektedir.	• Depolama kapasitesine kısıtlayıcı etkisi bulunmaktadır. • Limanda geçirilen süre, ikmal kısıtlamaları nedeniyle artabilir (bu durum seçilen ikmal türüne bağlı olacaktır)
Kruvaziyer Gemileri	• Genel mürettebatın temel bir eğitim alması gereklidir. • Makine dairesi personeli ve ana güverte personeli ise daha ayrıntılı sertifikalara ihtiyaç duymaktadır	• LNG ile çalışan motorların sessiz olması yolcular için daha sessiz ve daha konforlu bir yolculuk ortamı sağlar.
Feribotlar	• Genel mürettebatın temel bir eğitim alması gereklidir. • Makine dairesi personeli ve ana güverte personeli ise daha kapsamlı sertifikalara ihtiyaç duymaktadır. • Yakıt ikmalinin diğer liman faaliyetlerinden uzakta gerçekleştirilmesi suretiyle güvenlik riski en aza indirilmektedir.	• Tankların konumu nedeniyle herhangi bir yük alanında bir kayıp oluşmamaktadır. Yakıt ikmali, limanlarda yükleme/ boşaltma dönemi içinde gerçekleştirilmektedir
Genel Kargo Gemileri	• Genel mürettebatın temel bir eğitim alması gereklidir. • Makine dairesi personeli ve ana güverte personeli ise daha kapsamlı sertifikalara ihtiyaç duymaktadır. • Ek bir güvenlik riski söz konusu değildir.	• Orta veya büyük tank boyutu durumunda depolama kapasitesine etkisi bulunmaktadır. İkmal, yükleme/boşaltma işlemlerinden farklı bir yerde gerçekleştirilmektedir. Küçük tank boyutu nedeniyle operasyonlara etkisi sınırlıdır.
PSV	• Genel mürettebatın temel bir eğitim alması gereklidir. • Makine dairesi personeli ve ana güverte personeli ise daha ayrıntılı sertifikalara ihtiyaç duymaktadır.	• Yoktur.

Kaynak: Faber, 2017; Stewart ve Wolosz, 2015

1.6.3. LNG Yakıtı İkmal Ağı

LNG Tedarik Zinciri, kaynak noktasından nihai kullanıcıya ulaşımını sağlayarak LNG'nin dağıtımını hedefler (Sakmar, 2013). Bu zincir, ihtiyaçlara, altyapılara ve bölgelere göre çeşitli yapılandırmalarla organize edilmektedir. LNG yakıtının transfer zincirinin ana unsurları ise Şekil 17'daki gibi özetlenebilir (Bruzzone ve Sciomachen, 2023).



Şekil 17 : LNG Yakıtı Transferlerinin Temel Bileşenleri

Kaynak: Bruzzone ve Sciomachen, 2023; Sakmar, 2013

LNG, mevcut sıvılaştırma merkezleri ve yeniden gazlaştırma terminalleri aracılığıyla dünya çapında yaklaşık 280 noktada büyük miktarlarda temin edilebilmektedir. Bu toplu altyapı, şu an inşaat aşamasında olan yaklaşık 145 tesis ile birlikte genişlemeye devam etmektedir. Küresel sıvılaştırma kapasitesi yıllık yaklaşık 480 milyon ton LNG iken, yeniden gazlaştırma kapasitesi yılda bir milyar tonun üzerindedir (SEA-LNG, 2024). Aşağıdaki Şekil 18'de, LNG yakıtı üretim, ihracat ve ithalat terminallerini gösteren dünya genelindeki harita sunulmuştur.

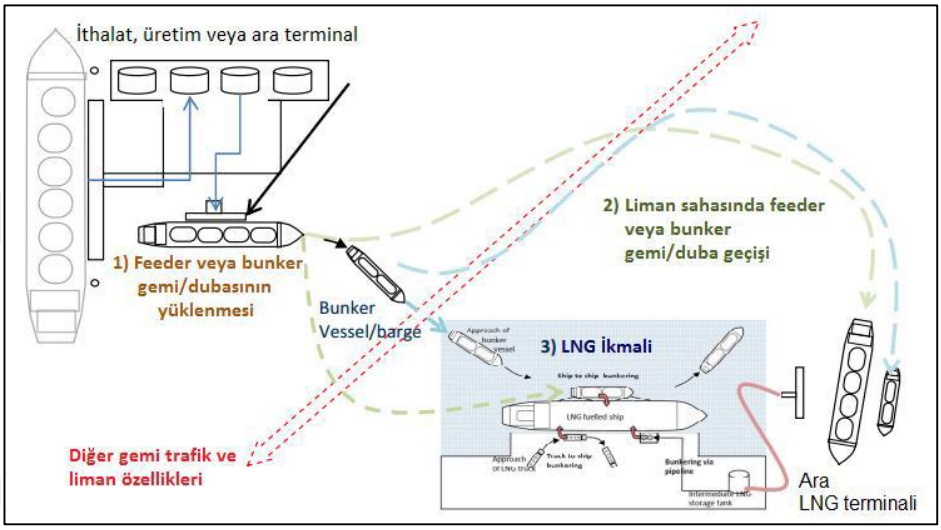


Şekil 18 : Dünya Geneli LNG Yakıt Terminalleri

Kaynak: ASAP, 2024

Dünya genelindeki ticaret hacimlerine göre sıralanan en büyük 25 limandan 24'ünde veya bu limanların çevresinde toplu LNG erişimi mevcuttur. Ancak esas sorun, LNG'nin toplu tesislerden gemilere ulaştırılması için gereken ikmal altyapısına yapılacak olan yatırımlardır (SEA-LNG, 2024).

Şekil 19'da LNG'nin ithalat ya da üretim tesislerinden ara terminallere taşınması veya doğrudan ithalat terminallerinden gemilere yüklenmesi işlemi anlatılmaktadır.



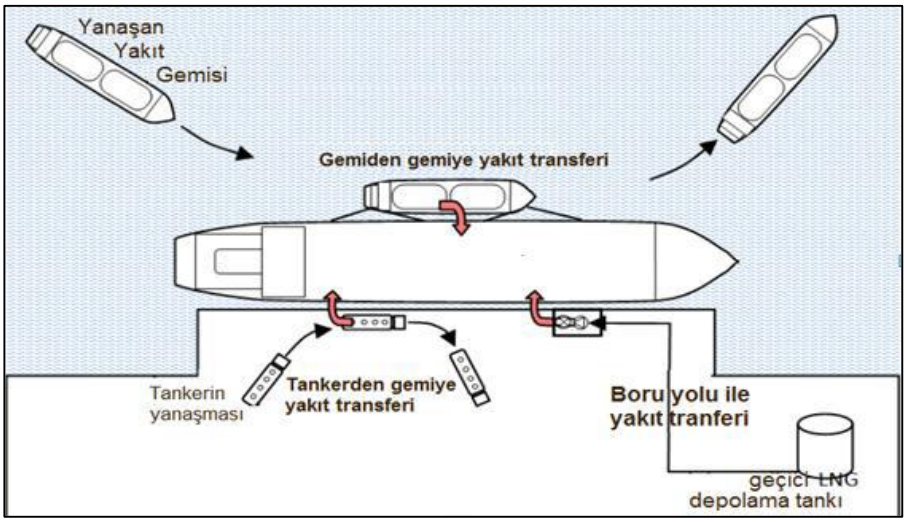
Şekil 19 : LNG Yakıtının İthalat, Üretim, Ara Terminal ve İkmal Aşamaları

Kaynak: Pekşen, 2015

LNG ile çalışan gemilerin yakıt ikmali de çeşitli yöntemlerle sağlanmaktadır. Mevcut durumda, LNG yakıt ikmali büyük ölçüde LNG ikmal sistemi ve küçük ölçekteki ara terminaller aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. LNG'li gemilere yakıt ikmali için genellikle aşağıda belirtilen ve Şekil 20'de gösterilen yöntemler tercih edilmektedir:

- Kara Tankerinden Gemiye (TTS)
- Ara Tanktan Boru Hattı Üzerinden Gemiye (ITPS)
- Rıhtımda ve Denizde Gemiden Gemiye (STS)

(Kuang vd., 2023; Bruzzone ve Sciomachen, 2023; Pekşen, 2015)



Şekil 20 : LNG Yakıt İkmal Seçenekleri

Kaynak: Pekşen, 2015

Seçilecek LNG yakıt ikmal çeşitleri, yukarıda belirtilen hususlar doğrultusunda düzenleyici yapıya, yerel durumlara, maliyet unsurlarına ve operasyonel faktörlere dayanarak belirlenir. Gemi türü ve yakıt tankının kapasitesi, ikmal yöntemini ve ihtiyaç duyulan transfer hızını önemli ölçüde etkilemektedir (Aagesen, 2012). *TTS*, genellikle başlangıç aşamasında benimseme sürecinde ve küçük tank kapasitesine sahip feribotlar, römorkörler ve kıyı gemileri gibi gemiler için tercih edilmekte olup, bu türler için uygun bir seçenek olmaktadır (Rahimi vd., 2020).

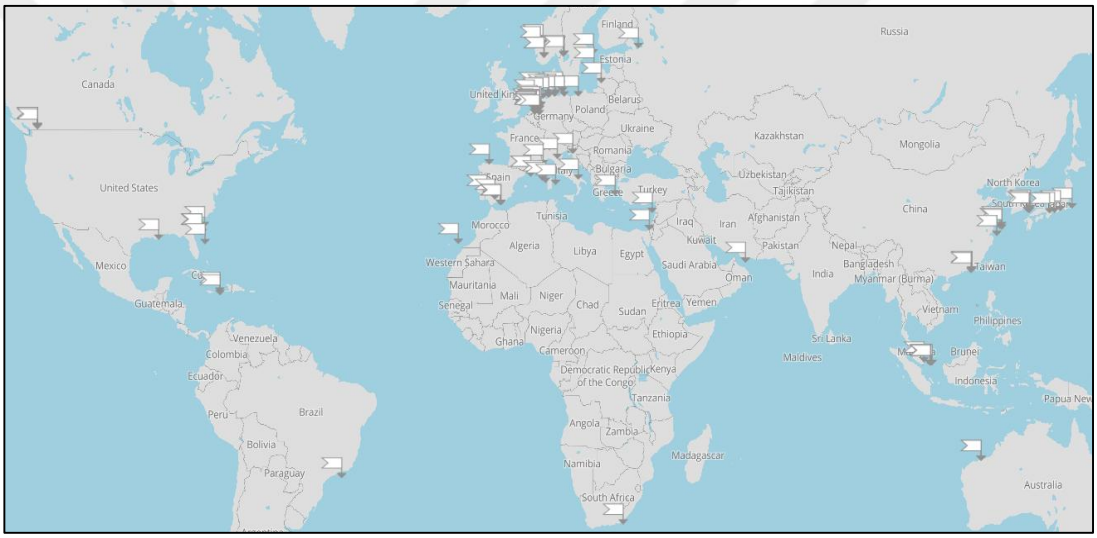
En etkili yöntem *STS* olarak değerlendirilmiştir (IMO, 2016). 2013 yılında İsveç'teki Cryo AB firması tarafından inşa edilen dünyanın ilk LNG ikmal gemisi Viking Line firmasında operasyonlarına başlamıştır (Kuang vd., 2023).

LNG ikmali, gemilere yakıt sağlamak, depolamak ve teslim etmek için özel altyapıya ihtiyaç duyar. Şu ana kadar, bu tür yapıların inşa edildiği liman sayısı dünya genelinde oldukça kısıtlı kalmıştır, ancak bu sektördeki gelişmeler hız kazanmıştır (Parfomak vd., 2019). LNG ikmal istasyonlarının planlaması ve yeri, gemilerin yakıt alım işlemlerinin etkinliğini, maliyetlerin düşürülmesini ve çevredeki alanların emniyetini etkilemektedir (Bruzzone ve Sciomachen, 2023).

Günümüzde yaklaşık 96 limanda, ana ikmal limanları da dâhil, LNG gemilere ulaştırılabilmektedir. Ayrıca, LNG ikmal yatırımlarının ve operasyonlarının

desteklenmesi amacıyla 55 limanda da çalışmalar devam etmektedir (SEA-LNG, 2024).

LNG ikmalinde büyük gemi operasyonlarına uygun olarak konteyner, tanker ve kuruyük gibi esnek tedarik imkânları sağlayan gemiden gemiye (STS) LNG ikmalinde kayda değer bir artış gözlemlenmektedir. 2019' un başında dünya genelinde yalnızca altı LNG ikmal gemisi mevcutken, Ocak 2020 itibarıyla bu sayı 12'ye yükselmiştir. Aralık 2024 itibarıyla da 60 LNG yakıt gemisinin faaliyette olması ve 12 geminin sipariş sürecinde olduğu belirtilmektedir (SEA-LNG, 2024). Dünya geneli LNG yakıt ikmal gemilerinin çalıştığı ve STS ikmal imkânı olan bölgeler Şekil 21'de sunulmuştur.



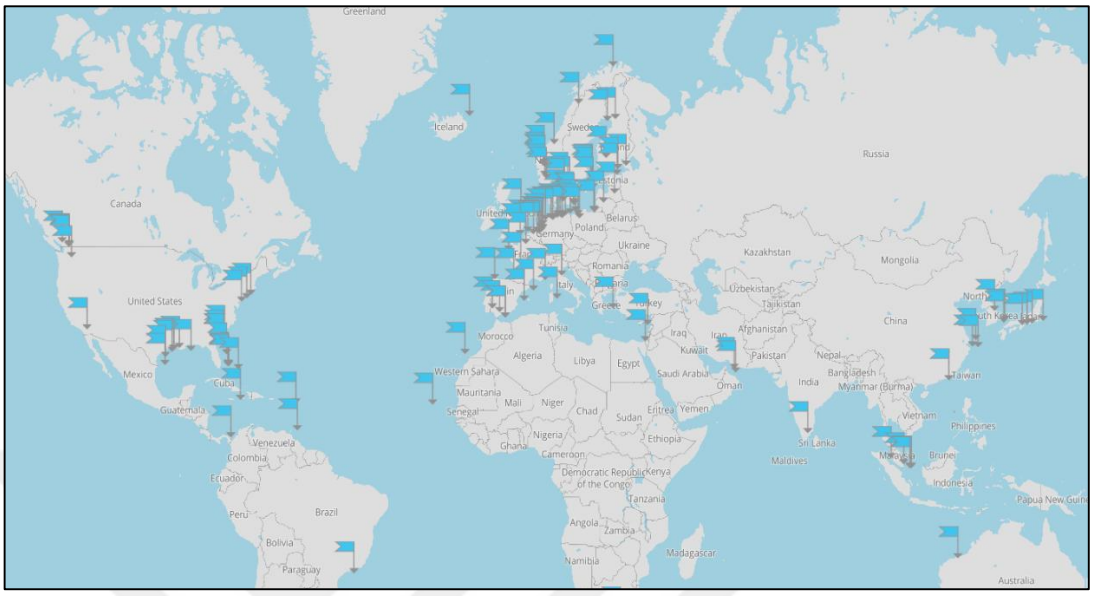
Şekil 21 : Dünya Geneli LNG Yakıt İkmal Gemileri

Kaynak: SEA-LNG Bunker Navigator Ekran Görüntüsü, Ocak 2025

Gemi-gemi (STS) yakıt ikmal yönteminde, LNG Yakıt İkmal Gemilerinin tank kapasiteleri de bir noktada önem kazanmaktadır. Kuang vd., (2023) tarafından yapılan bir çalışmada mevcut LNG yakıt ikmal gemilerinin tank kapasiteleri ile mevcut LNG yakıtlı büyük ebatlı gemilerin tank kapasiteleri kıyaslanmış, daha fazla büyük kapasiteli LNG yakıt ikmal gemisine ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır.

Dünya çapında bulunan LNG yakıt ikmal limanları, neredeyse tamamen LNG ithalatı veya ihracatı gerçekleştiren terminallerin yakınında konumlanmış ve ana ticaret yolları üzerinde yer aldıkları için, gemiler için LNG temin etme konusunda oldukça elverişlidir. Bazı limanlar, LNG yakıt ikmal altyapılarını geliştirmeye yönelik

projeler içermektedir (Aagesen, 2012). Dünya genelinde LNG yakıt ikmal noktaları Şekil 22'de sunulmuştur.



Şekil 22 : Dünya Geneli Toplam LNG Yakıt İkmal Noktaları

Kaynak: SEA-LNG Bunker Navigator Ekran Görüntüsü, Ocak 2025

Burada, LNG ikmal ağı noktalarını talep tarafı ve tedarikçi tarafından değerlendirecek olursak bu açıdan deniz taşımacılığına etki eden birçok faktörler bulunmaktadır.

Talep açısından; LNG ile çalışan gemi sahipleri ya da bu tür gemileri yöneten işletmeciler, gemilerinin güzergâhlarını ve ziyareti planlanan limanları belirlerken mevcut uygun LNG yakıt ikmal yerlerini dikkate almak zorundadırlar (He vd., 2024). Bu gemiler, LNG yakıt ikmal istasyonlarına kolayca ulaşım sağlayan rotalara yönelmektedir (Stewart ve Wolosz, 2015; Fevre, 2018). Ancak, LNG yakıt ikmali için gerekli altyapının eksikliği denizcilik şirketlerinin LNG'li gemileri tercih etmesi konusunda belirsizlikler yaratmaktadır (Notteboom vd., 2022).

Uluslararası deniz taşımacılığı açısından, limanlar ve bölgeler arasındaki fiyat farklılıkları kadar, varlığın da önem taşıdığı göz önünde bulundurulmalıdır (He vd., 2024). Örneğin, Kuzey Amerika'daki LNG fiyatları ile Avrupa veya Asya'daki fiyatlar arasında önemli farklar bulunmaktadır. Ayrıca, ikmal yöntemleri ile düzenlemelerdeki farklılıkların da dikkate alınması gerekmektedir (IMO, 2016). Nihayetinde, devam etmekte olan Rusya-Ukrayna çatışmasının, özellikle Avrupa için gaz arzı ve

fiyatlarında önemli dengesizlikler yarattığı açıkça görülmektedir (Bruzzone ve Sciomachen, 2023).

Talep tarafındaki faktörler gibi, bir LNG tedarikçisinin liman LNG ikmal altyapısına yatırımın kârlı olup olmayacağını değerlendirmesini zorlaştıran öğeler de mevcuttur. Bu öğeler arasında, LNG ikmal yakıtına yönelik yeterli talep olup olmadığına dair belirsizlik, LNG'nin gelecekteki fiyatıyla ilgili belirsizlik ve yeterli LNG temin edilebilme durumu yer almaktadır (Chen vd., 2018). Bunun yanı sıra, güvenlik ve teknik düzenleyici standartlarla ilgili belirsizlikler de mevcuttur (Faber, 2017).

Bu bağlamda, LNG'nin deniz yakıtı olarak kullanımını etkileyen unsurlardan biri, limanlarda LNG bunker yakıtı için işleyen bir pazarın yaratılabilmesi adına aşılması gereken bir *tavuk-yumurta ikilemi* olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır (Yao vd., 2024). Limanlarda LNG temin altyapısının varlığı, gemi sahiplerinin ya da işletmecilerinin LNG ile çalışan gemiler edinmeyi tercih etmesine olanak tanıyacaktır; buna paralel olarak, LNG teminine yönelik yeterli bir talep ortaya çıktığında, limanlarda LNG ikmal altyapısının kurulumu da mümkün hale gelecektir (Aagesen, 2012).

Geçişin ilk dönemlerinde yakıt arzı ile talebi arasındaki "tavuk ve yumurta" meselesi son derece önemli bir meseleydi. İlk feribot güzergâhlarının, mevcut LNG tedarik noktalarına ve deniz taşımacılığı dışındaki talep gruplarına yakın bir şekilde belirlenmesi, bu geçiş sürecinin öncüsü olmuştur. Bu bağlamda, coğrafi faktörler geçişin başlangıç noktası üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir ve özellikle ECA bölgelerinde faaliyet gösteren filoların LNG yakıtına yönelimi son zamanlarda artış göstermiştir (Baresic ve Rehmatulla, 2024).

Ayrıca, yıllar geçtikçe emniyet ve teknik standartlarda da düzenlenmeler yapılmış olup “Gazlar veya Diğer Düşük Parlama Noktalı Yakıtlar Kullanan Gemiler için Uluslararası Güvenlik Kodu” (IGF Kodu), Haziran 2015’te IMO Deniz Güvenliği Komitesi tarafından kabul edilmiştir (Vuskovic vd., 2023).

1.6.4. LNG Yakıtlı Gemi Standartları (IGF Kod)

LNG'nin temiz bir geçiş yakıtı olarak artan tanınırlığı ve LNG ile çalışan gemi sayısındaki yükselişle birlikte, bu gemilerin hem emniyetli hem de verimli bir şekilde işletilmesini sağlamak amacıyla gereken altyapının, emniyet standartlarının ve kapsamlı eğitimlerin oluşturulması önem arz etmektedir (Tekeli vd., 2024; Vuskovic vd., 2023).

Ancak, LNG'nin -175°C gibi düşük bir parlama noktasına sahip olması, onun kullanımının SOLAS tarafından onaylandığı anlamına gelmemektedir. SOLAS, genellikle 60°C'nin altındaki parlama noktasına sahip yakıtların kullanımını yasaklamaktadır. Bu nedenle, LNG'ye olan talep ve kullanımın artmasıyla birlikte, bu tür yakıtların yönetimi için özel bir koda ihtiyaç olduğuna dair soru işaretlerinin yükseldiği gözlemlenmektedir (Alan, 2008).

IGC Kodu ve gemilerde doğal gazla çalışan motor tesisatlarının güvenliğiyle ilgili geçici kılavuzlardan elde edilen deneyim ve bilgi birikimi sonucunda, MSC.391(95) kararı ile 11 Haziran 2015 tarihinde Gazlar veya Diğer Düşük Parlama Noktalı Yakıtları Kullanan Gemilerin Güvenliği için Uluslararası Kod (IGF Kodu) kabul edilmiştir (Sakmar, 2013). Aynı zamanda, SOLAS Bölüm II-1'e yeni bir G bölümü eklenmiş ve bu bölüm, IGF Kodunun düşük parlama noktalı yakıt kullanan tüm gemilere uygulanmasını zorunlu kılmıştır (Casar vd., 2021). Bu zorunluluk, sözleşmesi 1 Ocak 2017 veya sonrasında yapılan, omurgası 1 Temmuz 2017 veya sonrasında kızağa konulan veya benzer bir inşaat aşamasında olan ya da 1 Ocak 2021 veya sonrasında teslim edilen gemiler için geçerlidir (Ha vd, 2022).

IGF Kodunun amacı, düşük parlama noktalı yakıtları (LFF) yakıt olarak kullanan gemiler için makine, ekipman ve sistemler açısından uluslararası standartlar sağlayarak gemiyi, mürettebatı ve çevreyi korumak adına riskleri en aza indirmektir (Casar vd., 2021). Kod, bu tür yakıtların emniyetli ve etkili bir şekilde kullanımı için gerekli tüm yönleri kapsayan Genel, Doğal Gaz Kullanan Gemiler için Özel Gereklilikler, İmalat ve İşçilik, Tatbikatlar, Eğitim olmak üzere beş ana bölüme ayrılmıştır (Vuskovic vd., 2023).

IGF Kodu, düşük parlama noktasına sahip yakıtların (LFF) kullanımıyla ilgili çok çeşitli uygulamaları içerdiğinden, yalnızca belirli kısımları LNG ikmaline doğrudan bağlıdır (Ha vd, 2022).

1.6.5. LNG Yakıtı Kullanımında Emniyet ve Güvenlik Hususları

LNG yakıtı zehirleyici bir madde olarak sınıflandırılmasa da, kriyojenik özellikleri nedeniyle taşınması, transferi ve kullanılması sırasında meydana gelebilecek sızıntılar, hızlı bir faz değişimine neden olabilir. Bu durum, parlama yangınları, ateş topları ve patlama gibi ciddi risklerin ortaya çıkmasına yol açabilir (Alan, 2008; Molitor vd., 2012). Patlama gerçekleştiğinde, gemide yapısal hasarın oluşması kaçınılmaz olmasının yanı sıra, mürettebat da zarar görecektir. Ayrıca, LNG'nin borularla teması halinde soğuk yanıklar oluşabilir ve buharlarının solunması, boğulma tehlikesi yaratabilir (Çelikaslan ve Kılıç, 2023).

LNG ikmali özellikle risk taşıyan bir süreçtir (Woodward ve Pitbaldo, 2010). -259,6°F'deki kriyojenik hali, çalışanlar ile çevrede bulunan geleneksel çelik yapılar veya borular için tehlikeler yaratmaktadır, bu da LNG ikmal işleminin risk unsurlarından biridir (Tekeli vd., 2024). LNG buharlarının tehlikeli olması ve dar alanlarda patlayıcı bulutlar oluşturabilme ihtimali, ikmal sırasında titizlikle incelenmesi gereken bir durumdur (Sari vd., 2023).

LNG sızıntısı, eş zamanlı veya peş peşe gerçekleşebilen bazı sonuçlar doğurabilir (Nubli ve Sohn, 2022). Bunlar arasında gaz sızıntısı, yangın, Buhar Bulutu Patlaması (VCE) ve Kaynar Sıvının Genleşerek Yaptığı Buhar Patlaması (BLEVE) gibi olaylar yer almaktadır. Bu olaylar, *'Domino Etkisi'* olarak adlandırılmaktadır (Abdelmalek ve Guedes Soares, 2023).

LNG'nin taşınması, depolanması ve işlenmesi, iyi bir emniyet gözetimi ile ortaya çıkmaktadır. 1964 yılında ilk LNG tankerinin sefere başlamasından bu yana yaklaşık 100.000 kargo teslim edilmiştir, bu süre zarfında ise kargo tankının kaybı ya da taşıma ile ilgili herhangi bir ölüm olayı yaşanmamıştır (Iannaccone, 2021).

Son 20 sene içerisinde, LNG ile ilgili toplamda 18 kaza rapor edilmiştir ve bu kazaların toplamda yaklaşık 82 milyar dolarlık bir maliyetinin olduğu tahmin

edilmektedir. Bu olaylarla ilgili olarak herhangi bir ölüm vakasına rastlanmamış olup, yalnızca bir operatör yaralanması meydana gelmiştir (Iannaccone, 2021).

LNG emniyet önlemleri, dört ana aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar; standartlar, risk analizi, olay bildirimleri ve eğitimdir Standartlar kapsamında belirlenen emniyet tedbirleri, yakıt ikmal işlemlerinin emniyetli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak, çevre ve insanlara yönelik zararları önlemek amacıyla gerekli sorumlulukları belirlemektedir (Abdelmalek ve Guedes Soares, 2023).

Risk analizi süreci, LNG'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden doğabilecek olası tehlikelere karşı alınacak tedbirleri içermektedir **(**Woodward ve Pitbaldo, 2010). Bu aşamada, gaz sızıntısı halinde izlenecek yollar, çalışanlar üzerindeki potansiyel zararlar, gemi ve kıyı arasındaki iletişim yöntemleri, gemilerde bulunması gerekli olan ilave emniyet araçları ve özellikle deneyimsiz mürettebatın neden olabileceği yeni yakıt kullanımı risklerine dair önlemler titizlikle incelenmektedir (Nubli vd., 2022).

LNG ile bağlantılı kazaların veya olayların raporlanması, bu durumların ışığında çıkarılacak derslerin belirlenmesine yardımcı olur. Bunun sonucunda emniyet önlemleri güçlendirilir, risk analizlerinin kesinlik payı artırılır ve ekipmanların gelişmesine katkı sağlanır. Yapılan araştırmalar, birçok kazanın insan hatasından kaynaklandığını ortaya koymaktadır (Abdelmalek ve Guedes Soares, 2023). Bu nedenle, eğitim, LNG güvenlik planının temel bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. LNG, geleneksel deniz yakıtlarına göre daha yeni bir yakıt çeşidi olduğundan, bu konu hakkında farkındalık yaratacak ve özel bilgi transferine odaklanacak eğitim programlarının düzenli aralıklarla yapılması önemlidir. Bu tür eğitimler, hem gemi ekibinin hem de liman personelinin güvenlik kültürünü benimsemelerine ve operasyonel riskleri azaltmalarına yardımcı olacaktır (Çelikaslan ve Kılıç, 2023).

Yaşanmamış ve tecrübe edilmemiş olsa da, LNG'nin yapısal özellikleri büyük zararlara yol açabileceğinden, bu durumun zaman zaman bir güvenlik zafiyeti de yaratabileceği değerlendirilmektedir (Foss vd., 2003; Wang ve Notteboom, 2014).

LNG tankerleri, ikmal gemileri ve kara tesisleri terör saldırılarına karşı savunmasız hale gelebilir. İkmal gemileri, taşıdıkları LNG'yi imha etmek için fiziksel saldırılara hedef olabilirken, bu gemiler limanlar veya kıyı hedeflerine yönelik silah olarak ele geçirilebilir (Parfomak vd., 2019).

Günümüzde, bu tehdit senaryolarının ciddiyeti, risk analizlerinden elde edilen verilerle azaltılmıştır. Büyük LNG gemileri, küçük ikmal tekneleri veya LNG ile hareket eden gemilerdeki tanklar, yüksek dayanımlı çift duvarlı malzemelerle üretilmiştir ve diğer tehlikeli ve yanıcı maddelere kıyasla, terörizm açısından hedef olma ihtimalinin önemli ölçüde düşük olduğu düşünülmektedir (Molitor vd., 2012).

Bu kapsamda, Deniz Taşımacılığı Güvenlik Yasası (MTSA, P.L. 107-295), Uluslararası Gemi ve Liman Tesisi Güvenlik Kodu (ISPS Kod) ve Sahil Güvenlik'e deniz taşımacılığında tehlikeli maddelerin güvenliği üzerinde geniş kapsamlı yetkiler verilmektedir (Parfomak vd., 2019).

Giriş bölümünde verilen bu bilgiler ile LNG yakıtlı gemileri çevresel, teknolojik, ekonomik, ticari, yasal ve sosyal yönden analiz edilmiş, gelişmekte olan LNG filolarının son durumları hakkında güncel ve teorik bilgiler verilmiş, LNG yakıtlı gemilerin denizcilik sektöründeki konumundan ve yerinden bahsedilmiştir. Yapılacak çalışmada gerekli altyapıyı oluşturacak LNG yakıtlı gemilere ile ilgili bilgiler çok yönlü olarak verilmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. LNG YAKITLI GEMİLER İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Wang ve Notteboom (2014) tarafından LNG'nin deniz yakıtı olarak kullanımı üzerine yapılan araştırmalarda sunulan bulgular arasındaki uyum düzeyini sistematik bir şekilde analiz eden bir çalışma bulunmadığı düşünülerek, LNG'nin gemi yakıtı olarak kullanımına ilişkin yayımlanmış 33 çalışmanın bulgularını sentezlemek için sistematik bir inceleme gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmanın amacı, yalnızca LNG'nin gemi sevkiyatında bir yakıt olarak uygulanmasına yönelik mevcut bakış açılarını ve zorlukları daha geniş bir perspektifle anlamak değil, aynı zamanda literatürdeki eksiklikleri ve zayıf noktaları belirleyerek gelecekteki araştırmalara yol göstermektir. Ayrıca, sentezden elde edilen çıktılara dayanarak gemi sahiplerinin filolarında geleneksel yakıtlardan LNG'ye geçişi yaparken karar vermelerine yönelik kapsamlı bir karar verme çerçevesi sunmaktadır. Yapılan çalışma ile LNG'nin gemi yakıtı olarak kullanımının, başlangıçta küçük ölçekli feribot rotaları ve düzenli hat taşımacılığı gibi niş pazarlarda yaygınlaşmasının beklendiği, daha uzun vadede, LNG'nin küresel ölçekte gemi yakıtı olarak benimsenmesinin LNG ile LSFO arasındaki maliyet farkı, küresel emisyon düzenlemeleri, özellikle 2020 veya 2025 yıllarında uygulamaya konulan küresel SO_x sınırları ve LNG ikmal altyapısının küresel bağlamda erişilebilirliği gibi üç temel faktöre bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Salarkia ve Golabi (2023) tarafından SWOT analizi yöntemiyle yapılan çalışmada, LNG'nin deniz yakıtına alternatif bir enerji kaynağı olarak çevresel ve ekonomik boyutlarını detaylı bir şekilde ele alan kapsamlı bir analiz sunulmuştur. Bu çalışmada, piyasa ve endüstri arasındaki dengenin sürdürülebilmesi için kritik öneme sahip olan kodlar, standartlar, düzenlemeler, kısıtlamalar ve rehber ilkeler incelenmiş, LNG'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri diğer yakıtlarla karşılaştırılmış ve bu doğrultuda, LNG'nin düşük emisyon değerleriyle bölgesel ve küresel düzeyde önemli çevresel avantajlar sunduğu sonucuna varılmıştır. LNG, MGO, MDO ve HFO/Scrubber yakıt alternatifleri yapılan literatür araştırmasına istinaden her yönüyle

karşılaştırılmış IMO 2020 gerekliliklerine en uygun yakıtın LNG yakıtı olduğu tespit edilmiştir.

Dereli (2018) tarafından yapılan tez çalışmasında, egzoz emisyonlarıyla ilgili kapsamlı bilgilere yer verilmiş; bu emisyonların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bağlamda, söz konusu zararların azaltılmasına yönelik yürütülen çalışmalar ele alınmış ve bu çalışmalar sonucunda belirlenen egzoz emisyon limit değerleri açıklanmıştır. Çalışmada, bu limitlere ulaşabilmek için geliştirilen yöntemler incelenmiş, özellikle tek yakıtla çalışan makinelerin LNG kullanabilen çift yakıtlı makineler haline dönüştürülmesi sürecine dair teknik bilgiler sunulmuştur. Ayrıca, global ve yerel düzenlemeler çerçevesinde NO_x ve SO_x emisyon sınır değerleri belirtilmiş ve bu değerlerin sağlanması için uygulanması gereken yöntemler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Tezde, egzoz emisyon ölçümlerinin fabrika ortamında ve gemi üzerinde nasıl gerçekleştirildiği de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Burel vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada Mayıs 2008, 2009 ve 2010 aylarına ait dünya gemilerinin trafik verileri analiz edilmiş, Roll-on/Roll-off (RoRo) gemileri ve tanker gemileri, ECA'larda seyir sürelerinin büyük bir kısmını geçirdikleri için LNG kullanımına en uygun aday, 0.000-60.000 DWT aralığındaki tanker gemileri için LNG kullanımı en karlı seçenek olduğu tespit edilmiştir. LNG uygulanmasının ardından operasyonel maliyetler ve kirletici emisyonlarının azaltımı, 33.000 DWT'lik bir tanker gemisi için hesaplanmış, LNG'nin operasyonel maliyetlerde %35, CO_2 emisyonlarında %25 azalma ve yakıt tüketiminde %15'e varan bir azalma sağladığı sonucuna varılmıştır.

Jasper Faber (2017) tarafından yapılan çalışmada LNG'nin gemi yakıtı olarak kullanımına ilişkin en önemli itici güçleri ve engelleri nitel bir analizle ortaya koyulmuş, on limanda LNG kullanımının ekonomik fizibilitesini nicel olarak analiz edilmiş ve 2020 ile 2030 yılları arasında LNG'nin benimsenmesine yönelik senaryolar geliştirerek AB'deki LNG pazarının gelişimi incelenmiştir. Nitel analiz, LNG'ye olan talebin başlıca itici güçlerinin çevresel düzenlemeler ve LNG ile diğer yakıtlar arasındaki fiyat farkı olduğunu göstermiştir. En önemli engellerin ise limanlarda LNG'nin bulunabilirliği, teknik standartlar ve LNG gemilerinin ikinci el fiyatına ilişkin

belirsizlikler olduğu ortaya çıkarılmıştır. Geliştirilen pazar senaryoları ise, 2030 yılında AB'de 2.500 ila 4.000 LNG gemisi olacağını ve bu gemilerin yılda 1-5 milyon ton LNG kullanacağını öngörmektedir.

Baumgart ve Olsen (2010) tarafından yapılan çalışmada, Norveç'te kısa mesafeli deniz taşımacılığında yapılan Net Bugünkü Değer analizleriyle, LNG'nin MGO'ya kıyasla çevresel açıdan en uygun ve maliyet açısından rekabetçi bir seçenek olduğunu; 90 USD/bbl fiyat düzeyinde platform destek gemileri, 60 USD/bbl seviyesinde ise feribotlar ve dökme yük gemileri için en etkin alternatif olarak öne çıktığını göstermiştir. Bununla birlikte, LNG'nin kurulumu ve uyum süreçlerinin belirli dezavantajlar barındırdığını vurgulamıştır.

Pekşen (2015) tarafından yapılan tez çalışmasında, alternatif yakıtların veya teknolojilerin emisyon azaltım katkıları ile maliyetleri karşılaştırılarak en makul seçenek tespit edilmeye çalışılmıştır. "Net Bugünkü Değer" ve "Geri Ödeme Süresi" yöntemleri kullanılarak, 4.000 kW ve 10.000 kW makine gücüne sahip gemi tipleri üzerinde yapılan değerlendirmelerde, LNG'nin en verimli çözüm olarak öne çıktığı sonucuna varılmıştır.

Balcombe vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, yeni emisyon ölçümleri ve tedarik zinciri verileri kullanılarak LNG'nin deniz yakıtı olarak HFO, MDO, metanol ve olası yenilenebilir yakıtlar (hidrojen, amonyak, biyogaz ve biyometanol) ile kapsamlı bir çevresel yaşam döngüsü ve maliyet karşılaştırılması yapılmıştır. LNG'nin hava kalitesi etkilerini iyileştirdiği, yakıt maliyetlerini azalttığı ve sıvı fosil yakıtlara kıyasla orta düzeyde iklim faydaları sağladığı ancak bazı motor tiplerinde metan emisyonunun kabul edilemez seviyede olduğu ve bu durumun karbonsuzlaşma hedefi için yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır.

Lindstad vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, LNG'nin deniz taşımacılığında karbon emisyonlarının azaltılması sürecinde geçiş yakıtı olarak hangi koşullar altında kullanılabileceği ve bu sırada mümkün olan en düşük ilave küresel ısınma etkisinin nasıl sağlanacağı araştırılmış, LNG'nin, ancak en iyi motor teknolojisiyle, yani dizel çift yakıtlı motorlarla birleştirildiğinde bir geçiş yakıtı olarak hizmet verebileceği sonucuna varılmıştır.

Chen vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada belirsizlik altında LNG ile çalışan gemilere yatırım yapma olasılığını, çok değişkenli belirli stokastik süreçleri izleyen bir erteleme seçeneği modelini 19.000 DWT kapasiteli ve LNG ile çalışan yeni bir kimyasal gemi yatırımında test edilerek araştırılmıştır. LNG'nin gemi yakıtı olarak distile yakıtlara kıyasla çevresel ve ekonomik üstünlüğünün, LNG ile HFO arasındaki fiyat farkı, ECA'lar içindeki operasyon oranı, LNG ile çalışan bir gemi ile referans bir gemi arasındaki yeni gemi değerleri farkı ve tedarik maliyeti gibi birkaç parametre tarafından belirlendiği sonucuna varılmıştır.

Herdzik (2013) tarafından LNG'nin deniz yakıtı olarak kullanımının sonuçlarını ortaya koymak maksadıyla yapılan çalışmada LNG'nin yakıt olarak kullanımının, LNG ikmal ağının tam olarak oluştuğunda hızla artacağı, bunun için de altyapının geliştirilmesinin önemli olduğu ve alt yapı gelişiminin şu anda en büyük zorluk olduğu sonucuna varılmıştır.

Schinas ve Butler (2016) tarafından LNG'nin deniz yakıtı olarak teşvik edilmesi için gereken ticari teşvikleri değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmada alternatif teknolojilerin kullanımını teşvik eden politika girişimlerini değerlendirmek ve bu girişimlerin pazar üzerindeki etkilerini tahmin etmek için bir yöntem kullanılmıştır. Çalışmada, (1) LNG'nin deniz yakıtı olarak kullanımını destekleyen uluslararası düzenleyici çerçeveler ve bölgesel girişimler, (2) LNG ile çalışan gemilerin rekabetçiliğini belirleyen ticari ve operasyonel özellikler ve (3) LNG'nin deniz yakıtı olarak benimsenmesini engelleyen zorluklar ele alınmıştır.

Bayraktar (2016) tarafından hazırlanan tez çalışmasında, belirli bir rotada faaliyet gösteren bir yolcu gemisinin mevcut dizel motor sisteminin, teorik olarak çift yakıtla çalışan bir sevk sistemiyle değiştirilmesi durumunda işletmecilere sağlayacağı ekonomik faydalar analiz edilmiştir. Çalışmada, yeni sistemin işletilmesiyle elde edilecek kazanç ve bakım maliyetleri dikkate alınarak, bu yatırımın yaklaşık 10 yıl içinde ilk yatırım maliyetini karşılayabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, bu sistemin ECA'larda uygulanacak yeni emisyon kısıtlamalarını karşılayabildiği de belirtilmiştir.

Moreira (2016) tarafından yapılan çalışmada LNG'nin deniz yakıtı olarak benimsenmesinin, diğer iki petrol bazlı yakıt kullanan gemilere kıyasla denizcilik üzerindeki etkilerini test etmek için SCR ile donatılmış HFO yakıtlı, SCR ile donatılmış MGO yakıtlı ve LNG yakıtlı gemi modelleri belirlenmiştir. Ve bu modellerden kaynaklanan kirletici emisyonları nicel olarak hesaplanmış ve ekonomik olarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucu, hem SCR ile donatılmış bir yıkayıcıya sahip HFO yakıtlı geminin hem de SCR ile donatılmış MGO yakıtlı geminin maliyet açısından etkili çözümler olmadığını göstermiştir. LNG'nin en çevre dostu alternatif ve maliyet açısından etkili bir çözüm olduğu ve çevresel faydaların sırasıyla HFO ile MGO gemilerine kıyasla 1,9 ve 1,7 kat daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang vd. (2021) tarafından "Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi" yöntemiyle yapılan çalışmada ömür boyu maliyet bazlı bir değerlendirme çerçevesinde LNG kullanımını sistematik olarak değerlendirmek maksadıyla LNG yakıtlı konteyner gemilerinin 3 farklı boyutunun ekonomik performansı test edilmiştir. Çalışmada; LNG fiyatlarının düşük olduğu durumlarda, LNG yakıtlı gemiler ile geleneksel petrol yakıtlı gemiler arasındaki yaşam döngüsü maliyeti ve nakit akışı performansındaki farklılıklar göz önüne alındığında, açık deniz LNG yakıtlı konteyner gemileri için LNG'nin yakıt olarak kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir. Ancak, mevcut piyasa koşulları, LNG ikmal alt yapısı, operasyonlarla ilgili belirsizlik ve riskler göz önüne alındığında, en iyi senaryoda bile, yaşam döngüsü maliyeti açısından sağlanan faydaların, armatörleri ve diğer paydaşları açık deniz LNG yakıtlı konteyner gemileri inşa etmeye veya satın almaya ikna etmek için yeterli olamayabileceği sonucuna varılmıştır.

He vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, LNG yakıtlı düzensiz taşımacılık yapan gemiler için taşıma rotasını, hızları ve yakıt ikmal planını optimize etmek amacıyla toplam işletme maliyetlerini en aza indirmeyi hedefleyen bir model geliştirilmiş, modellerin etkinliğini ve verimliliğini göstermek için vaka çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçların, hız ve yakıt ikmal kararlarının dikkate alınmasıyla, alternatif limanlarda ikmal yapılmasının seyahat süresini etkilemediği ve özellikle limanlar arasındaki yakıt fiyatlarında önemli farklılıklar olduğunda toplam işletme maliyetlerini etkili bir şekilde azaltabileceği sonucuna varılmıştır.

Yapılan kapsamlı literatür araştırmasında, LNG yakıtlı gemilerin seçimine yönelik avantaj ve dezavantajlarının değerlendirildiği ve LNG yakıtlı gemilerin benimsenmesine yönelik çalışmalara sıklıkla rastlanmakta olup yıllara sari olarak sıkılaşan ve daha geniş çerçevede egzoz emisyonlarını kapsayan yeni IMO kuralları karşısında farklı açılardan deniz ticaretine etkisini ve bu açıların birbirleriyle olan ilişkilerini değerlendiren bir çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Bu kapsamda yapılan çalışmanın, kullanımına az sayıda gemi ile başlandığı 2010'lu yıllardan itibaren sürekli güncellenen ve sıkılaşan egzoz emisyon kısıtlamaları karşısında günümüze kadar gelişen LNG filolarının deniz taşımacılığındaki etkisinin uzman görüşlere dayanarak analiz edilmesinin literatürdeki boşluğu doldurmak açısından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Bu doğrultuda yapılan çalışmanın amacı, LNG yakıtlı gemilerin yapılan literatür araştırması ile belirlenen çevresel, teknolojik, ekonomik, ticari, yasal ve sosyal faktörler açısından Bulanık Delphi Yöntemiyle deniz taşımacılığına olan etkilerini ve Bulanık DEMATEL yöntemiyle birbirleriyle olan ilişkilerini incelemektir. Yapılacak çalışma ile, sıkılaşmakta olan IMO kuralları karşısında gelişmekte olan LNG yakıtlı gemi filolarının deniz taşımacılığına etkileri belirlenerek, yapılacak çalışmanın denizcilik işletmeleri tarafından LNG yakıtlı gemilerin benimsenmesi ve LNG yatırımcıları için yol gösterici bir kaynak oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

2.2. DENİZCİLİK ALANINDA DELPHİ YÖNTEMİYLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Denizcilik sektöründeki problemlerin çözümünde, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan DELPHI yönteminin uygulandığı çalışmalara ilişkin örnekler Tablo 10'da özetlenmiştir.

Tablo 10 : Denizcilik Alanında Delphi Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar

SIRA NO	AÇIKLAMA	KAYNAK
1	Deniz Taşımacılığı Araştırmalarında Birleşik Delphi-AHP Yönteminin Uygulanması	(Arof, 2015)
2	Otonom Denizcilik Operasyonları Çağında STCW Liderlik Yetkinliği Üzerine Bir Delphi-AHP Çalışması	(Kim ve Mallam, 2020)
3	2050'ye Kadar Deniz Yoluyla Petrol Taşımacılığı Akışları: Denizcilik Uzmanlarının Delphi Görüşleri	(Dinwoodie vd., 2013)
4	Denizcilik Konteyner Tedarik Zincirlerinin Güvenliğini Etkileyen Risk Faktörlerinin Delphi Yöntemiyle Analizi	(Wan vd., 2019)
5	Denizcilik Alanında Operasyonları Etkileyen Olayların Delphi Yöntemiyle Önceliklendirilmesi	(Zaloom ve Subhedar, 2008)
6	Kuru Liman Sisteminde Delphi-AHP Yönteminin Yöntemiyle Risklerin Belirlenmesi	(Lamii vd., 2022)
7	Yirmi Birinci Yüzyılda Gemiadamı Becerilerinin Yeniden Değerlendirilmesi: Modifiye Edilmiş Delphi-BWM Yaklaşımı	(Hossain Chowdhury vd., 2024)
8	Bulanık Delphi Yöntemi Kullanarak Can Salı Kazalarının Kapsamlı Analizi	(Danacı ve Yıldırım, 2023)
9	Proje Yükü Lojistiğinde Değer Yaratma: Bir Delphi Çalışması	(Denktaş Şakar vd., 2018)
10	Çin'deki Limanlar İçin Yeşil Performans Değerlendirme Göstergeleri Üzerine Bir Delphi Analizi	(Chen ve Pak, 2017)

2.3. DENİZCİLİK ALANINDA DEMATEL YÖNTEMİYLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Denizcilik sektöründeki problemlerin çözümünde, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan DEMATEL yöntemi yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Son yıllarda DEMATEL yönteminin uygulandığı çalışmalara ilişkin örnekler Tablo 11'de özetlenmiştir.

Tablo 11 : Denizcilik Alanında DEMATEL Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar

SIRA NO	AÇIKLAMA	KAYNAK
1	Gemilerde uygulanan Uluslararası Emniyet Yönetimi (International Safety Management-ISM) Kodunun Etkinliğini Belirleyen Faktörlerin Önceliklendirilmesi	(Yorulmaz ve Karabulut, 2022)
2	Gemilerde meydana gelen kapalı alan kazalarının nedensel ilişkilerinin analiz edilmesi	(Soner, 2021)
3	Deniz Taşımacılığında Bulanık DEMATEL Yönteminin Uygulaması: Çapa Kaybı Risk Analizi	(Kuzu, 2023)
4	HFACS Tabanlı DEMATEL ve FCM Yöntemlerini Entegre Ederek Deniz Kazalarındaki İnsan Faktörlerini Modelleme için Veri Tabanlı Bir Yöntem: Gemi Çarpışmaları Örneği	(Ma vd., 2022)
5	DEMATEL ve ANP Tekniği Kullanarak Dengeli Puan Kartı ile Denizcilik Çevresi Değerlendirmesi ve Yönetimi	(Lin, 2022)
6	Deniz Taşımacılığında Bulanık Küme DEMATEL Yöntemlerinin Uygulaması: Gemi Çarpışması Örneği	(Çelik ve Akyüz, 2016)
7	Deniz Konteyner Limanlarında Yönetimin Temel Bir Bileşeni Olarak Bulanık-DEMATEL Yaklaşımı Kullanarak Süreç Yönetimi	(Charłampowicz, 2023)

8	Bulanık DEMATEL Yöntemi Kullanarak Gemi Kırılma Kazalarının Risk Analizi	(Kuzu, 2021)
9	DEMATEL Yöntemi ile Denizcilik Mesleği Seçimini Etkileyen Kriterlerin İncelenmesi	(Demirci ve Uygur, 2021)
10	Bulanık DEMATEL Tekniği Kullanarak Limanlar ve Denizcilik Organizasyonlarında İyi Yönetişimi Etkileyen Faktörlerin Analizi ve Değerlendirilmesi	(Ghafarzadeh vd., 2023)

2.4. DENİZCİLİK ALANINDA DELPHI-DEMATEL YÖNTEMİYLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Özellikle kriterlerin belirlenmesi, ölçülmesi ve etki değerlerinin analizinin etkinliği sebebiyle Delphi-DEMATEL yöntemleri bir arada kullanılmaktadır. Denizcilik alanında Delphi-DEMATEL yöntemlerinin bir arada uygulandığı çalışmalara ilişkin örnekler Tablo 12'de özetlenmiştir.

Tablo 12 : Denizcilik Alanında Delphi-DEMATEL Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar

SIRA NO	AÇIKLAMA	KAYNAK
1	Causal Analysıs Of Indonesıa Archıpelago Marıne Defense System: A Delphi-Dematel Approach	(Raharjo vd., 2024)
2	The factors obstructing the blockchain adoption in supply chain finance: a hybrid fuzzy DELPHI-AHP-DEMATEL approach	(Sahoo ve Thakur, 2024)
3	Analysing factors influencing the adoption of blockchain technology in maritime freight enterprises	(Singh vd., 2024)
4	Selection Of Gyro Stabilized Antenna Devices In The Maritime Telecommunication Project Using The Delphi, DEMATEL And ANP Method	(Ramadlon ve Taufik, 2020)
5	Application of Fuzzy DEMATEL Model to Identify and Analyze the Relationship	(Bavarsad vd., 2016)

	between Factors Affecting Port Privatization in Iran	
6	An evaluation of key service attributes of ocean container carriers from the ocean freight forwarder's perspective	(Chung vd., 2011)
7	Barriers to coastal shipping development: An Indian perspective	(Venkatesh vd., 2017)
8	Assessing sustainable consumption practices on cruise ships	(Tsai ve Bui, 2020)
9	Enhancing freight logistics: overcoming barriers and driving sustainable growth with an integrated grey Delphi DEMATEL approach	(Gupta ve Gupta, 2025)
10	Supply Chain Integration Barriers to Port-Centric Logistics—An Emerging Economy Perspective	(Venkatesh vd., 2020)

Bulanık Delphi yöntemi, belirsizlik içeren karar verme süreçlerinde uzman görüşlerini sistematik olarak toplayarak etkili faktörlerin belirlenmesini sağlar. Öte yandan, DEMATEL yöntemi, karmaşık sistemlerdeki kriterler arasındaki neden-sonuç ilişkilerini analiz ederek ana itici ve engelleyici faktörleri görselleştirme yeteneğine sahiptir. Shanta vd. (2024) ve Ruano vd. (2023), bu iki yöntemin birlikte kullanılmasının, özellikle kriterlerin seçimi ve bu kriterler arasındaki etkileşimlerin analizinde yüksek verimlilik sağladığını vurgulamıştır. Bu bağlamda, çalışmanın metodolojik çerçevesi, niteliksel uzman değerlendirmeleri ile neden-sonuç ilişkilerine dayalı yapısal analizleri entegre eden sistematik ve tamamlayıcı bir yaklaşımla güçlendirilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada Bulanık Delphi ve Bulanık DEMATEL yöntemlerinin birleşimi tercih edilmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. YÖNTEM

3.1. TEZİN AMACI

Bu çalışmanın temel amacı, LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığı üzerindeki potansiyel etkilerini çevresel, teknolojik, ekonomik, ticari, hukuki ve sosyal faktörler çerçevesinde çok boyutlu bir şekilde incelemektir. Bu bağlamda, öncelikle Bulanık Delphi Yöntemi kullanılarak ilgili faktörler belirlenecek ve uzman görüşlerine dayalı olarak bunların önem düzeyleri ortaya konulacaktır. Ardından, Bulanık DEMATEL Yöntemi uygulanarak belirlenen kriterler arasındaki nedensel ilişkiler ve etkileşim ağı analiz edilecektir.

Bu çalışma, çevre kirliliğine önemli etkisi olan denizcilik alanındaki emisyon düzenlemeleri, çevresel açıdan sürdürülebilir yakıtlar ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ile çalışan gemilerin geliştirilmesi bağlamında gelecekteki araştırmalara katkı sağlayacaktır. Ayrıca, IMO ve AB'nin sıfır karbon hedefine yönelik olarak getirdiği sıkı önlemler ve düzenlemeler karşısında gemi sahipleri ve denizcilik işletmeleri için bir yol haritası sağlayabilir. LNG yakıtlı gemilerin etkili bir şekilde uygulanması ve benimsenmesi için önemli unsurların belirlenmesini kolaylaştırabilir. Yönetimlerin çevre önlemleri bağlamında izlemesi gereken yol konusunda rehberlik sağlayabilir.

3.2. TEZİN KAPSAMI

Bu çalışma, uzman görüşlerine dayanarak, 2010 yılından bu yana sürekli güncellenen ve sıkılaştırılan egzoz emisyon kısıtlamaları ışığında LNG filolarının deniz taşımacılığı üzerindeki etkisini analiz etmekte ve özellikle çevresel, ekonomik ve ticari açıdan elde edilen bulguları sunmaktadır. Tezin kapsamı iki temel hedefle sınırlandırılmıştır. İlk olarak, LNG yakıtlı gemilerin benimsenme sürecindeki temel etki kriterlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. İkinci olarak, bu kriterler arasındaki etkileşimler incelenmesidir. Bu çalışma, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) ve Avrupa Birliği (AB) tarafından yürürlüğe konulan mevcut emisyon düzenlemeleri çerçevesinde geçiş yakıtı olarak LNG'nin değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Ancak, HFO, MGO, MDO, biyoyakıt, hidrojen ve metanol gibi alternatif yakıt türleri

yalnızca karşılaştırmalı bir bağlamda ele alınmakta ve ayrıntılı analize dâhil edilmemektedir. Bu çalışma, mühendislik açısından teknik tasarım ve performans hesaplamalarını içermemektedir; yalnızca LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığı üzerindeki etkilerini operasyonel ve yönetimsel açıdan incelemektedir.

Bu çalışma, LNG yakıtlı gemilerin kullanımındaki bölgesel farklılıklar ve çevre düzenlemelerinin gelecekteki kapsamına ilişkin belirsizlikler gibi bazı sınırlamalara tabidir. Ayrıca, uzman değerlendirmelerine dayanılması öznel yorumlara yol açabilirken, uzman grubunun sınırlı büyüklüğü ve çeşitliliği sonuçların genelleştirilebilirliğini kısıtlayabilmektedir. Ayrıca güncel kurallar üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır.

Literatürde, çok kriterli kararların matematiksel analizine olanak tanıyarak karar vericilere rehberlik etmek amacıyla AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci), TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerlik Tekniği ile Sıralama), VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizasyon ve Uzlaşma Çözümü), ELECTRE (Gerçekliği Yansıtan Eleme ve Seçim), GRA (Gri İlişkisel Analiz) ve BWM (En İyi-En Kötü Model) gibi çeşitli yöntemlere rastlanmaktadır (Fendoğlu, 2021). Bu yöntemler ile Gabus ve Fontela tarafından geliştirilen DEMATEL yöntemi karşılaştırıldığında, DEMATEL'in etki-ilişki haritası sayesinde faktörler arasındaki karşılıklı ilişkileri görselleştirmesi, karmaşık neden-sonuç bağlantılarının analizini gerçekleştirmesi ve aynı zamanda değerlendirme kriterlerinin ağırlıklarını belirlemede kullanılabilmesi gibi avantajlarıyla öne çıktığı görülmektedir (Si vd., 2018).

Delphi yöntemi, gizlilik, ardışık anketler, fikir birliğinin sağlanması ve nitel verilerin nicel verilere dönüştürülmesi uygulamalarını içerdiğinden uzman görüşlerinin sistematik ve kapsamlı bir şekilde toplanmasını sağlar. DEMATEL yöntemi faktörler arasındaki neden-sonuç ilişkilerini görselleştirerek kritik itici güçleri veya engelleri belirler. Görselleştirme ve önceliklendirme ile analiz sonuçlarının değerini artırır ve daha anlaşılır hale getirir. Hem Delphi nin uzman odaklı fikir birliği sağlaması hem de DEMATEL'in nedensellik analizi çalışmayı daha sağlam ve stratejik kararlar almak adına güçlendirir. Özellikle LNG yakıtlı gemiler gibi sektörde az sayıda bulunan, yeni ve karmaşık alanlarda belirsizliği azaltarak daha güncel ve net bir yol haritası çizer (Singh vd., 2024).

Özetle; Delphi-DEMATEL yöntemi, uzmanlardan alınan görüşleri sistematik ve yapılandırılmış bir süreçle toplayıp olgunlaştırır, ardından bu görüşleri kullanarak kriterler arasındaki ilişkileri analiz eder. Bu yöntem, hem niteliksel hem de niceliksel açıdan güçlü bir yaklaşım sunarak, belirsizlik ortamlarında stratejik karar almayı destekler (Gupta ve Gupta, 2025; Raharjo vd., 2024).

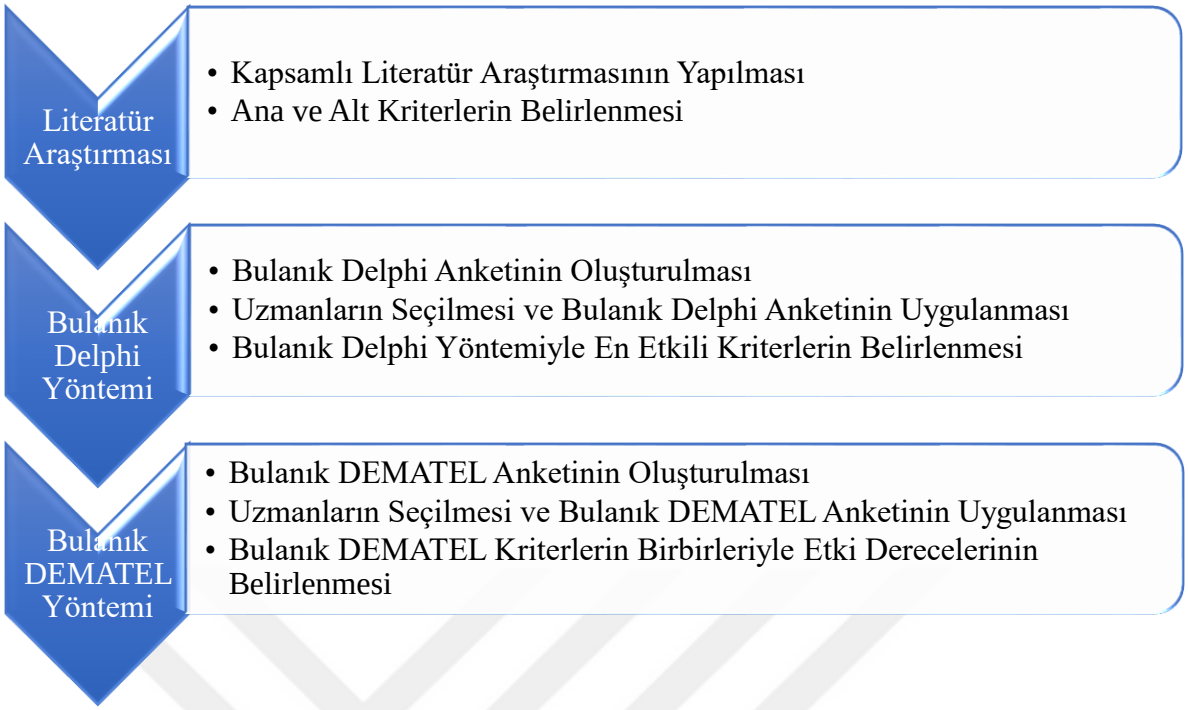
Uzmanların cevaplarındaki küçük farklılıkları kompanse etmek, belirsiz ve tereddütlü düşünceleri sonuca daha uygun bir şekilde dahil etmek, daha sağlam bir fikir birliği sağlamak ve belirsizlikleri ortadan kaldırmak için de bulanık tabanlı yöntem tercih edilmiştir (Bavarsad vd.,2016; Sahoo ve Thakur, 2024).

Shanta vd. (2024) ve Ruano vd. (2023), özellikle kriterlerin belirlenmesi, ölçülmesi ve etki değerlerinin analizinde birlikte kullanıldığında, Bulanık Delphi ve Bulanık DEMATEL yöntemlerinin çok kriterli karar verme teknikleri arasında daha etkili olduğunu belirtmiştir. *Bu iki yöntemin bir arada kullanılması, her adımın sistematik ve bilimsel bir analiz yöntemine dayanması ve birbirini desteklemesi, çalışmanın metodolojisini güçlendirmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada her iki yöntem birlikte kullanılmıştır.*

3.3. ARAŞTIRMA MODELİ VE KRİTERLER

3.3.1. Araştırma Modelinin Belirlenmesi

Araştırmanın yöntemsel süreci; kapsamlı literatür araştırması, Bulanık Delphi yöntemi ve Bulanık DEMATEL yöntemi olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. Literatür taraması ile kriterler belirlenmiş, Bulanık Delphi yöntemi ile en etkili kriterler seçilmiş ve Bulanık DEMATEL yöntemi ile bu kriterler arasındaki etkileşimler analiz edilmiştir. Araştırma sürecinin aşamaları Şekil 23'te gösterildiği gibidir.



Şekil 23 : Araştırma Modeli

Kaynak: Yazar

3.3.2. Ana ve Alt Kriterlerin Belirlenmesi

LNG yakıtlı gemilerin deniz ticaretine etkileyen faktörlerini belirlemek amacıyla kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve bu faktörler çevresel, teknolojik, ekonomik, ticari, yasal ve sosyal olmak üzere altı grupta sınıflandırılmıştır. Elde edilen bulgularla 35 alt faktör tanımlanmış ve Tablo 13'de sunulmuştur.

Konuyla ilgili literatür Scopus, WOS (Web Of Science), Science Direct, SOBIAD, Emerald, EBSCO, ProQuest gibi akademik veri tabanlarından ve IMO, SEA-LNG, DNV, ABS (American Bureau of Shipping), Türk Loydu, Rystad-Energy, Avrupa Komisyonu, EPA (Environmental Protection Agency), Offshore-Energy gibi sektörel bilgi sitelerinden kapsamlı bir şekilde toplanmıştır.

Tablo 13: Literatür Araştırmasına Göre Belirlenen Ana ve Alt Faktörler

ANA FAKTÖRLER	KODU	ALT FAKTÖRLER	AÇIKLAMA	KAYNAKLAR
Çevresel	C1	Egzoz Emisyonu (NO_x, SO_x, PM, CO_2) **Not**	Gemilerde yakıtın yanmasıyla açığa çıkan gazlar, sera gazları, hava kirleticileri	Livaniou vd., 2022; Abdelmalek ve Guedes Soares, 2023 Burel vd., 2013
	C2	Hava Kirliliği	İnsan sağlığı ve çevreye verilen zararları	Sohn ve Jung, 2022; Pekşen, 2015

	C3	Küresel Isınma	Sera gazı seviyelerindeki artış, iklim deseni, iklim değişikliği	Xu ve Yang, 2020; Çelikaslan ve Kılıç, 2023
	C4	LNG Kazalarından Doğan Çevre Kirliliği	Gemi kazaları sonucu LNG sızıntıları, LNG yakıtının kimyasal özellikleri	Nubli ve Sohn., 2022
Teknolojik	C5	Gemi Dizaynı	LNG depolama tanklarının gemideki mevkisi, kapladığı alan	Stewart ve Wolosz, 2015; Parfomak vd., 2019; Herdzik, 2011
	C6	Makine Tipi	LNG yakıtlı makineler, tipi, modelleri ve gemi tipine uygunluğu	Balcombe vd., 2021; Karatuğ vd., 2023; Sharafian vd., 2019
	C7	Yanmamış Metan Gazı	LNG yakıtlı makinelerden sızan yanmamış metan gazı ve küresel ısınmaya etkisi	Tuswan vd., 2023; Comer vd., 2024; Balcombe vd., 2021
	C8	Kapasite Kayıp Oranı	LNG yakıtlı gemilerde depolama tanklarının gemide kapladığı alandan dolayı kaybedilen kargo depolama alanı, yaşam mahali kayıp oranı vb.	Tuswan vd., 2023; Salarkia ve Golabi, 2023
	C9	Emniyet Konuları	LNG yakıtının kriyojenik, tutuşma özellikleri, sızma ve patlama riskleri, risk analizi	Peng vd., 2021; Molitor vd., 2012; Tekeli vd., 2024
	C10	Güvenlik Konuları	LNG yakıtı kimyasal özellikleri sebebiyle sabotaj ve terörist saldırı riski	Bruzzone ve Sciomachen, 2023; Wang ve Notteboom, 2014
	C11	Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketimi	LNG yakıtlı makinelerin yakıt ve yağlama yağı tüketim oranları	Merien-Paul vd. 2019
	C12	İyileştirme Eğilimi	Bir ticari geminin LNG yakıtlı gemiye dönüştürme uygunluğu ve maliyeti, çift yakıtlı makineye dönüşüm yatkınlığı	Baresic ve Rehmatulla, 2024; Parfomak vd., 2019
	C13	Karbon Azaltım Sistemi Gereksinimi	SCR, EGR ve Scrubber gibi egzoz temizleme sistemlerine ihtiyacı	Dereli, 2018
Ekonomik	C14	LNG Yakıtı Sermaye Maliyeti	LNG üretim maliyeti, gaz fiyatları ve bölgesel farklılıklar	Wang vd., 2021; Bayraktar, 2016
	C15	LNG Yakıt Satış Fiyatı	LNG yakıtı bölgesel farklılıkları ve diğer yakıtlara göre fiyat durumu	He vd., 2024; Wang vd., 2021; Dereli, 2018; Bayraktar, 2016
	C16	Operasyon Maliyeti	LNG yakıtlı ticari gemilerde navlun fiyatları, operasyonel masraflar ve maliyetler	Faber, 2017; Chen vd., 2018
	C17	Olası Çevresel Maliyet	LNG yakıtından kaynaklı kazalardan oluşan çevre kirliliği ve cezasal masrafları	Çelikaslan ve Kılıç, 2023; Xu ve Yang, 2020
	C18	Yakıt Tasarrufu	LNG yakıtlı makinelerin yakıt tüketim oranı ve maliyetlere etkisi	Karatuğ vd., 2023; Moreira, 2016
	C19	Altyapı	LNG üretim ve taşıma altyapısı, gaz sahası, sıvılaştırma tesisleri, depolama alanları	Parfomak vd., 2019; Yao vd., 2024; Notteboom vd., 2022
	C20	Bakım Maliyeti	LNG yakıtlı makinelerin periyodik bakım masrafları ve etkileri	Faber, 2017; Merien-Paul vd., 2019
Ticari	C21	Sefer ve Rota Planlaması	LNG yakıtlı gemilerin yakıt ihtiyaçlarını karşılayabileceği rotalar ve operasyonel düzenlemeler	He vd., 2024; Faber, 2017
	C22	Yakıt İkmal Ağı	LNG yakıtlı gemilerin LNG transferi yapabileceği bölgeler, limanlar, rıhtımlar, iskeleler ve LNG transfer gemisi çalıştıran limanlar	Yao vd., 2024; Peng vd., 2021
	C23	LNG Dağıtım Ağı	LNG'nin üretim sahasından LNG yakıtlı gemilere taşınımı, bölgesel ihtiyaçların karşılanması	Schinas ve Butler, 2016
	C24	LNG Kaynağı	LNG üretim sahaları, gaz sahaları, limanlara uzaklığı, bölgesel yeterliliği	Bruzzone ve Sciomachen, 2023
	C25	Gemi Tiplerine Uygunluğu	LNG yakıtlı makinelerin kruvaziyer, konteyner gibi gemi tipleri için uygunluğu, kullanılması durumunda avantajları	Oh vd., 2024; Kuang vd., 2023
	C26	Yük Alanı Kaybı	LNG yakıtlı gemilerde LNG depolama tanklarının gemide kapladığı alandan	Salarkia ve Golabi, 2023; Sakmar, 2013

			dolayı yük ve kargo kaybı, navlun ve taşımacılık fiyatlarına etkisi	
	C27	Operasyon Standartları	LNG yakıtlı ticari gemilerde diğer ticari gemilerin operasyonel kurallarına göre değişiklikler	Stewart ve Wolosz, 2015
	C28	Rekabet	LNG yakıtlı gemi sektörü, LNG yakıtlı makine üreticileri arasındaki teknolojik rekabet	Wang ve Notteboom, 2014; Yao vd., 2024
Yasal	C29	Emisyon Kuralları	MARPOL Annex VI Emisyon Kuralları, AB ETS and FuelEU Maritime Kuralları	Oh vd., 2024; Vuskovic vd., 2023
	C30	LNG Yakıt Transferi Kuralları	IGF Code yakıt ikmali, yakıt devreleri koruma ve lokasyon kuralları vb.	Peng vd., 2021; Bruzzone ve Sciomachen, 2023; Tekeli vd.,2024
	C31	Gaz Yakıt Kullanım Kuralları	IGF Code tank lokalizasyon kuralları, gemi dizaynı ve düzenlemeleri, yakıt sistemleri vb.	Ha vd., 2022; Sakmar, 2013
	C32	Mevzuattaki Boşluk	LNG yakıt kullanımında gerekli kurallardaki yetersizlik	Stewart ve Wolosz, 2015; Ha vd., 2022
Sosyal	C33	Sosyal Farkındalık	Gerekli altyapının teşviki, avantajlarının yayılması ve çevresel öneminin aktarılması	Lee vd., 2020; Wang ve Notteboom, 2014
	C34	Toplum Algısı	Tavuk-yumurta ikilemi, tehlikeli yakıt algısı vb.	Lee vd., 2020; Wang ve Notteboom, 2014
	C35	Bayrak Devlet Katkısı	Hükümetler, bölgesel düzenleyici kuruluşlar tarafından sübvansiyonlar, finansman, vergi indirimleri vb.	Li ve Yang, 2024; Wang ve Notteboom, 2014

Not: LNG yakıtlı gemilerde NO_x, SO_x, PM, CO_2 emisyon değerlerinin düşük olmasından dolayı bu avantajları temsil eden tek bir kriter olarak "C1 Egzoz Emisyonu (NO_x, SO_x, PM, CO_2)" kriteri bulunmuştur.

3.3.3. Evren ve Örneklem

Bu çalışmanın evreni, problemin çözümüne ve çalışmanın amacına uygun olarak denizyolu taşımacılığı faaliyetinde bulunan denizcilik işletmeleridir. Araştırma evreni belirlenirken, araştırma problemiyle ilgili olan herkesin dahil edilmesi sağlanmış ve bu yönde bir ana kütle (evren) belirlenmiştir. Çalışmanın probleminin etkilediği en geniş küme araştırma evreni olarak seçilmiştir.

Çalışmanın örneklemi ise, araştırmadan isabetli sonuçlar elde edebilmek için araştırma problemini en belirgin olarak yansıtabilecek ve araştırma evreni içinde problem çözümünün en tipik biçimde gözlenebileceği bir alt grup olan LNG yakıtlı gemiler tarafından denizyolu taşımacılığı faaliyetinde bulunan denizcilik işletmeleridir. Bu sebepten çalışmanın örneklem seçiminde **güdümlü örneklem seçim tekniği** kullanılmıştır. Anket formundaki soruların yanıtlanması tecrübe ve uzmanlık gerektirdiğinden, örneklemin bu alanda uzman ve tecrübeli kişilerden oluşması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Oluşturulan DEMATEL anketinin, LNG gibi sıvılaştırılmış gaz yakıtlı gemiler ile denizyolu taşımacılığı faaliyetinde bulunan

denizcilik işletmelerinde görevli tecrübeli personele, bu gemilerde çalışan tecrübeli gemiadamlarına, aynı zamanda LNG yakıtlı gemiler konusunda uzmanlaşmış personele ulaştırılması hedeflenmektedir.

Öncelikle çalışmada LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığına etkisinin en efektif bir şekilde gözlemlenebilmesi için LNG gibi gaz yakıtlı veya gaz taşıyıcı gemilerde çalışmış/çalışan personelin seçimi uygun görülmüştür. Aynı zamanda bu konuda uzmanlaşmış, araştırmalarda bulunan kişilerin bilgi birikiminden de yararlanmanın uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda, literatürden tespit edilen LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığına etki kriterlerinin bu grubun kendi çalışma alanlarındaki özellikleri sayesinde yorumlanabilmesi için görevleri de büyük önem kazanmaktadır. LNG yakıtlı gemilerin kullanımıyla bahse konu kriterler açısından örneklem seçimi incelenecek olursa;

- Filolarda müdür seviyesinde gemilerin operasyonlarını yöneten personel; bu gemilerin ECA bölgelerindeki avantajlarını, bunkering noktalarının sefer paternlerine etkisini, gemilerinin MARPOL kurallarına göre hazırlanmasını, yakıt maliyeti hesaplamaları, LNG yakıt depolamasından kaynaklı yük kapasitesi kayıpları ve bunların navlun fiyatlarına etkilerini,
- Gemilerde kaptan seviyesindeki personel; operasyon standartlarını, emniyet ve güvenlik konularını, sefer planlamalarını, bunkering ve gaz yakıtı kullanım kurallarını,
- Başmühendis seviyesindeki personel; yağlama yağı ve yakıt sarfiyatını, makine tiplerine göre etkisini, makine seçimini, bakım gereksinimlerini, çift yakıtlı dizele dönüştürme eğilimini,
- Seçilen örneklemin mesleki çalışma süresi en az 10 yıl ve üzeri olup alanında uzmanlaşmış olduklarından bu kişiler; IMO'nun süregelen kısıtlamalarını, LNG yakıtlı gemilerin 2016'lı yıllardan bu yana dayanan gelişimini ve deniz ticaretine katkılarını, diğer yakıtlara göre avantaj ve dezavantajlarını,

çalışmanın hedefine ulaşmasında isabetli bir şekilde değerlendirebilecektir.

Ayrıca, LNG yakıtlı gemilerin benimsenmesinde en önemli faktör olan IMO kısıtlamalarına yönelik mevzuat değişikliklerinin etkilerinin değerlendirilmesinde eğitim seviyesi de önem kazanmaktadır. Bu maksatla, denizcilik sektöründe araştırmalar ve çalışmalar gerçekleştirmiş kişiler de örneklem içerisine dâhil edilmiştir.

Yani, araştırma evreni içinde problemin çözümü için güdümlü örneklem yöntemiyle seçilen örneklem kümesi LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığına etkisini çevresel, ekonomik, teknolojik, ticari, yasal ve sosyal açıdan etki faktörler açısından değerlendirebilecek kişilerden oluşmaktadır.

3.4. BULANIK DELPHI YÖNTEMİ

Delphi yöntemi, 1950'li yıllarda Rand Corporation'da Dalkey ve Helmer tarafından ilk kez geliştirilmiştir (Hsu ve Sandford, 2007). Geleneksel Delphi yöntemi, sistematik bir karar verme aracı olarak tasarlanmış olup, ilgili alanda uzmanların görüş ve değerlendirmelerini toplama amacını gütmektedir. Bu süreç, uzmanlara peş peşe anketler uygulanarak gerçekleştirilir ve karmaşık konularda ortak bir anlayış sağlama hedeflenir (Linstone ve Turoff, 1975; Hsu ve Sandford, 2007). Delphi tekniği, uzmanların görüşlerine dayanan bir araştırma yaklaşımıdır ve anonimlik, tekrar eden geri bildirim süreci ile grup yanıtlarının istatistiksel analizi olmak üzere üç temel özelliğe sahiptir. Ancak uygulamada, uzman görüşlerini kesin nicel değerlere dönüştürmek mümkün değildir (Hsu vd., 2010). Ayrıca, geleneksel Delphi tekniği, uzman görüşlerinin tutarlılığına ulaşmak için birden fazla ardışık anketin yapılmasını gerektirdiğinden ve uzmanlar arasında uzlaşmayı sağlamak için görüşlerde değişiklik yapılması yönünde baskılar oluşturduğundan olumsuz bir yön taşımaktadır (Ma vd., 2011). 1955'te Lotfi A. Zadeh, karar verme sürecindeki insan düşünceleri ve ifadelerindeki belirsizlikleri ortadan kaldırmak amacıyla Bulanık Küme Teorisi'ni oluşturmuştur (Bouzon vd., 2016; Alqahtani vd., 2023). Bulanık küme teorisi, belirsizlikleri yansıtarak ve nitelik özelliklerini koruyarak uzmanların dilsel tercihlerinin insan odaklı nicel değerlere dönüştürülmesine olanak tanımaktadır (Bui vd., 2020). Ishikawa vd. (1993) geleneksel Delphi tekniği ile bulanık küme teorisinin birleşiminden oluşan bulanık Delphi yönteminin geliştirilmesini önermiştir. Bu yaklaşım, bulanık küme teorisinin Delphi yöntemine entegre edilmesi sayesinde,

uzmanlarla gerçekleştirilen görüşmelerin sayısını ve araştırmanın süresini kısaltmıştır. Bunun yanı sıra, uzmanların araştırma konusuna ilişkin değerlendirmelerinin daha kapsamlı bir şekilde aktarılmasını sağlamıştır (Bui vd., 2020). Uzmanların ortak anlayışındaki belirsizlik, bulanık küme teorisi ile daha esnek bir ölçekte ele alınabilir; bu da anketlerin etkinliğini ve kalitesini artırma imkânı sunar. Bu yöntem, istatistiksel bulgular aracılığıyla daha nesnel değerlendirme kriterleri sağlamaktadır (Hsu vd., 2010).

3.4.1. Bulanık Delphi Anketinin Oluşturulması

Bulanık yöntemde, uzmanların anketlerdeki değerlendirmeleri dilsel unsurlardan bulanık sayılara dönüştürülmektedir ve bu çalışma kapsamında Trigonometrik Bulanık Sayılar (TBS) tercih edilmiştir (Wang ve Chang, 1995). TBS, uzman görüşlerini ifade etmek için üç gerçek sayı kullanmaktadır: (a) en düşük olası değer, (b) en muhtemel değer ve (c) en yüksek olası değer, bu değerler Tablo 14'te sunulmuştur (Alqahtani vd., 2023). Söz konusu dilsel değişkenler vasıtasıyla, kapsamlı bir literatür incelemesi ile belirlenen kriterlerin etkilerinin sorgulandığı bir anket hazırlanır.

Tablo 14: Dilsel Değişkenler ve Trigonometrik Bulanık Sayılar

Sembol	Dilsel Değişkenler	TBSs (a,b,c)
VL (5)	Çok Düşük Etkili	(0,0,0.25)
L (4)	Düşük Etkili	(0, 0.25, 0.5)
M (3)	Orta Derecede Etkili	(0.25, 0.5, 0.75)
H (2)	Yüksek Etkili	(0.5, 0.75, 1)
VH (1)	Çok Yüksek Etkili	(0.75, 1, 1)

Kaynak: Mohammadfam vd., 2022; Rafieyan vd., 2022

3.4.2. Ortalama Bulanık Değerlendirme Puanlarının Belirlenmesi

Adım-1 Her bir olası faktör için grup kararına ait ortalama bulanık değerlendirme puanını hesaplanması: Bir uzman tarafından sağlanan j numaralı faktörün önemine ilişkin tahmini değerin, n toplam uzman sayısı içindeki i numaralı uzman tarafından sağlandığı varsayılırsa, bu değer Formül (1)'de ölçülmektedir.

$$\tilde{\omega}_{ij} = \left(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}\right),\ i = 1,2,3 \ldots . n,\ j = 1,2,3 \ldots . m \qquad (1)$$

Adım-2 Bulanık değerlendirme puanlarının ortalamasının hesaplanması: Formül (2) ile j numaralı faktörün bulanık sayılarının ($\widetilde{\omega}_j$) ortalamasını elde edilmektedir.

$$\widetilde{\omega}_j = \left(a_j, b_j\ , c_j\right),\ \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_{ij}\ ,\ \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} b_{ij}\ ,\ \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} c_{ij}\right),\ \ j = 1,2,3 \ldots . m \qquad (2)$$

3.4.3. En Çok Etkileyen Kriterlerin Belirlenmesi

Adım-3 Durulaştırma süreci: Her bir j faktörüne ait hesaplanmış ortalama bulanık değerlendirme puanının ($\widetilde{\omega}_j$) karşılık gelen kesin ve duru değerlere dönüştürülmesidir. Faktörlerin birleştirilmiş bulanık değerlendirme puanlarının (S_j), basit ağırlık merkezi yöntemi kullanılarak durulaştırılması Formül (3)'te gösterilmiştir (Mohammadfam vd., 2022).

$$S_j = \frac{a_j + b_j + c_j}{3},\ \text{j=1,2,3…..m} \qquad (3)$$

Değerlendirme puanları (S_j), her bir faktörün önemini sıralamak için kullanılmıştır. Buna göre, eğer bir faktör, uzman değerlendirmelerine dayanarak 0.7 veya daha yüksek bir puana sahipse, bu faktör daha etkili bir faktör olarak kabul edilecektir. Aksi takdirde, çalışmadan çıkarılacaktır (Mohammadfam vd., 2022; Alqahtani vd., 2023)

Adım-4 Tahmin alanının kabul edilebilirliğini incelenmesi: Her bir j faktörü için, Formül (4)'te olduğu gibi, ortalama bulanık sayı ($\widetilde{\omega}_j$) ile her bir uzmanın bulanık tahmin değeri ($\widetilde{\omega}_{ij}$) arasındaki fark değerini D_{ij} hesaplanacaktır.

$$D_{ij} = \sqrt{\frac{1}{3}\ [\left(a_j - a_{ij}\right)^2 + \left(b_j - b_{ij}\right)^2 + \left(c_j - c_{ij}\right)^2]} \qquad (4)$$

Adım-5 Her bir faktörün eşik değerinin belirlenmesi: Her bir j faktörünün eşik değerini (d) Formül (5) kullanarak hesaplanacaktır.

$$d = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} D_{ij} \qquad (5)$$

Adım-6 Her bir tahmin alanının eşik değerinin belirlenmesi: Her bir tahmin alanının eşik değerini (Th_d), Formül (6) kullanarak kontrol edilecektir.

$$Th_d = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m} d_j \quad (6)$$

Tahmin alanının kabul edilebilirliği, Th_d değeri ile belirlenebilir. Bu araştırmada, $Th_d \leq 0.2$ ise bir tahmin alanı kabul edilmektedir (Yusof vd., 2022).

Adım-7 Uzman kişilerin mutabakatının test edilmesi: Uzman grup mutabakatını (EA_j), her bir değerlendirilen faktör için uzman anlaşması hesaplanacak Formül (7) ile test edilecektir (Alghawli vd., 2022; Mohammadfam vd., 2022).

$$EA_j = \frac{E_j}{n}\,\% \quad (7)$$

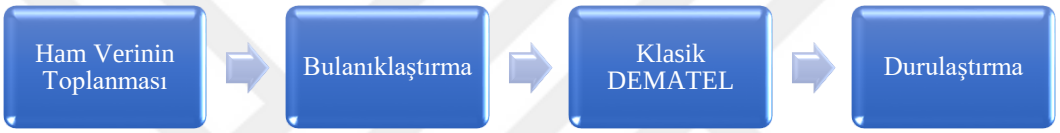
Burada, n toplam uzman sayısını, E_j ise belirli bir j faktörü üzerindeki uzmanların bulanık tahmin değerleri ($\widetilde{\omega}_{ij}$) ile o faktörün tüm uzmanlar için ortalama bulanık sayısı ($\widetilde{\omega}_j$) arasındaki mesafeyi temsil eder. Eğer bu mesafe ≤ 0.2 ise, uzman grup mutabakatı, her bir faktör için uzmanların anlaşmasına dayalı olarak $EA_j \geq 75\%$ kriterine göre değerlendirilmiştir. Aksi takdirde, uzman mutabakatı %75'ten az olan faktörler göz ardı edilecektir (Yusof vd., 2022; Alghawli vd., 2022; Mohammadfam vd., 2022).

3.5. BULANIK DEMATEL YÖNTEMİ

DEMATEL yöntemi, karar alma tekniklerinden biri olarak 1972 yılında Gabus vd. tarafından değişkenler arasındaki etkileşimleri incelemek amacıyla tanıtılmıştır (Mohammadfam vd., 2022). Hemen hemen Delphi yöntemi gibi, DEMATEL de uzman görüşlerine dayanır ve belirlenen Trigonometrik Bulanık Sayılar (TBS) adı verilen değişik bulanık sayı türlerini kullanarak, uzman değerlendirmelerini anketlerde dilsel unsurlardan bulanık sayılara dönüştürür. Bu dönüşüm, belirsizliği minimize etmek ve yazılı görüşlerde bir uzlaşı sağlamak için yapılmaktadır. 2008 yılında Lin, DEMATEL yöntemini ilk kez bulanık bir bağlamda uygulama fırsatını bulmuştur (Lin, 2013). Bulanık DEMATEL tekniği, kriterler ve alt kriterler arasındaki ilişkileri değerlendirerek, etkileyen (neden) ve etkilenen (sonuç) kriterleri belirlemek amacıyla toplam ilişki matrisini kullanır (Wu ve Lee, 2007).

DEMATEL metodunda, karar alma süreci çift taraflı karşılaştırmalara ve ilişkilerin kabulüne dayanmakta olup, bu durum yöntemi diğer araştırma tekniklerine göre avantajlı kılmaktadır (Akyüz ve Çelik, 2015). Bulanık DEMATEL yöntemi, risk analizi ve değerlendirilmesi, güvenlik yönetim sistemleri ve insan kaynakları yönetimi gibi birçok araştırma alanında yaygın bir biçimde tercih edilmektedir (Fendoğlu, 2021).

Bulanık Mantık temelindeki DEMATEL, Şekil 24'te görüldüğü gibi, elde edilen ham verinin önce "Bulanıklaştırma" ardından da "Durulaştırma" süreçlerine tabi tutulması ile oluşturulmuştur (Yorulmaz ve Karabulut, 2022). Bu araştırmada, bulanık DEMATEL yöntemi, listelenen adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.



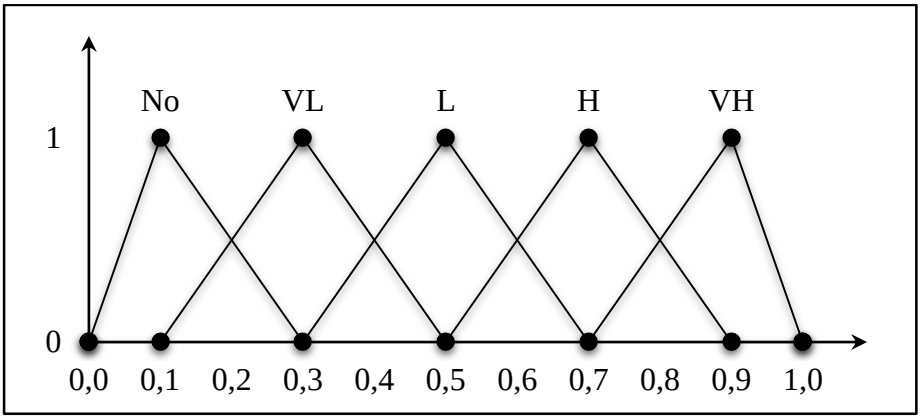
Şekil 24 : Bulanık DEMATEL Yöntemi

Kaynak: Fendoğlu, 2021

Adım-1 Uzmanlardan Ham Verinin Toplanması: Seçilen k sayıda uzmandan belirlenen n tane faktöre ilişkin olarak F_i faktörünün F_j faktörüne olan etkisine olan etki değerlendirmesini 5'li ölçekte Çok Fazla Etkili = 5, Fazla Etkili = 4, Az Etkili = 3, Çok Az Etkili = 2, Etkisiz = 1 şeklinde yapması istenir.

$$F=\{F_1, F_2, \cdots, F_n\}$$
$$E=\{E_1, E_2, \cdots, E_k\}$$

Adım-2 Dilsel Verinin Bulanık Değerlere Dönüştürülmesi (Bulanıklaştırma): Katılımcıların dilsel verilerinin bulanıklaştırılması amacıyla Wang ve Chang (1995), Li (1999) ve Lin (2013) tarafından geliştirilen farklı üçgensel değerlerin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan ve Lin (2013) tarafından oluşturulan üçgensel değerler, Şekil 25'te gösterilmiş, dilsel ifadelerin bulanık sayı karşılıkları ise Tablo 15'te sunulmuştur.



Şekil 25 : Bulanık Üçgensel Değerler

Kaynak: Lin, 2013

Tablo 15 : Dilsel İfadelerin Bulanık Sayı Karşılıkları

DİLSEL İFADE	KOD	BULANIK SAYI
Çok Fazla Etkili	VH	(0.7, 0.9, 1.0)
Fazla Etkili	N	(0.5, 0.7, 0.9)
Az Etkili	L	(0.3, 0.5, 0.7)
Çok Az Etkili	VL	(0.1, 0.3, 0.5)
Etkisiz	No	(0, 0.1, 0.3)

Kaynak: Wu ve Lee, 2007; Yorulmaz ve Karabulut, 2022

Adım-3 Bireysel Direkt Etki Matrislerinin Oluşturulması ($\tilde{Z}^k$): Seçilen k sayıda uzmandan n tane faktöre ilişkin olarak F_i faktörünün F_j faktörüne olan etki değerlendirmesi alınarak bireysel direkt etki matrisleri $\tilde{Z}^k = \left[\tilde{z}_{ij}^k\right]_{nxn}$ oluşturulur. $\tilde{Z}$k kriterlerin birbirlerine etkisini gösteren ikili karşılaştırmalarla elde edilmiş bir n × n matristir. Buradaki (Formül 8) $\tilde{z}_{ij}$, i kriterinin j kriterini etkileme derecesini ifade eder.

$$\tilde{Z}_{ij}^k = \left(z_{ijl}^k, z_{ijm}^k, z_{iju}^k\right) \quad (8)$$

Adım-4 Ortalama Direkt Etki Matrisinin ($\tilde{Z}$) Oluşturulması: Bireysel direkt etki matrislerinin aritmetik ortalaması, tüm uzmanların görüşlerini içeren ortalama direkt etki matrisini $\tilde{Z} = \left[\tilde{z}_{ij}\right]_{nxn}$ oluşturur (Formül 9).

$$\tilde{z}_{ij} = \left(z_{ijl}, z_{ijm}, z_{iju}\right) = \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k} \tilde{z}_{ij}^k = \left(\frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k} z_{ijl}^k, \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k} z_{ijm}^k, \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k} z_{iju}^k, \right) \quad (9)$$

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{z}_{12} & \cdots & \tilde{z}_{1n} \\ \tilde{z}_{21} & 0 & \ddots & \tilde{z}_{2n} \\ \vdots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \tilde{z}_{n1} & \tilde{z}_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

Adım-5 Normalize Edilmiş Direkt Etki Matrisinin ($\tilde{X}$) Oluşturulması: Normalize edilmiş matrisleri formül 10 ve 11 yardımı ile bulunur.

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & 0 & \ddots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\tilde{z}_{ij}}{r} = \left(\frac{z_{ijl}}{r}, \frac{z_{ijm}}{r}, \frac{z_{iju}}{r}\right) \quad (10)$$

$$r = \max_{1 \le i \le n}\left(\sum_{j=1}^{n} z_{iju}\right) \quad (11)$$

$$\tilde{X}_l = \begin{bmatrix} 0 & l_{12} & \cdots & l_{1n} \\ l_{21} & 0 & \ddots & l_{2n} \\ \vdots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \tilde{X}_m = \begin{bmatrix} 0 & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & 0 & \ddots & m_{2n} \\ \vdots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \tilde{X}_u = \begin{bmatrix} 0 & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & 0 & \ddots & u_{2n} \\ \vdots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

Adım-6 Toplam İlişki Matrisinin ($\tilde{T}$) Oluşturulması: Formül 12-16 kullanılarak normalize edilmiş direkt etki matrislerinden toplam ilişki matrisleri $\tilde{T} = \left[t_{ij}\right]_{nxn}$ elde edilir.

$$\tilde{T} = \lim_{h \to \infty}\left(\tilde{X}^1 + \tilde{X}^2 + \cdots + \tilde{X}^h\right) = \tilde{X}\,(I - \tilde{X})^{-1} \quad (12)$$

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{t}_{12} & \cdots & \tilde{t}_{1n} \\ \tilde{t}_{21} & 0 & \ddots & \tilde{t}_{2n} \\ \vdots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \tilde{t}_{n1} & \tilde{t}_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{t}_{ij} = \left(\acute{l}_{ij}, \acute{m}_{ij}, \acute{u}_{ij},\right) \quad (13)$$

$$\tilde{T}_l = \tilde{X}_l\,(I - \tilde{X}_l)^{-1} \quad (14)$$

$$\tilde{T}_m = \tilde{X}_m\,(I - \tilde{X}_m)^{-1} \quad (15)$$

$$\tilde{T}_u = \tilde{X}_u\,(I - \tilde{X}_u)^{-1} \quad (16)$$

Adım-7 Durulaştırma: Bulanık sayıların kesin değerlere dönüştürülmesi olan durulaştırma işlemi (Formül 17), DEMATEL yönteminin en kritik adımlarından biridir (Si vd., 2018).

$$\tilde{T} = \left(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}\right) \stackrel{\text{def}}{=} x_{net} \tag{17}$$

Opricovic ve Tzeng (2003) tarafından geliştirilen *Converting Fuzzy Numbers into Crisp Scores (CFCS)* yöntemi, diğer durulaştırma yöntemlerine kıyasla, aynı ortalamaya sahip iki simetrik üçgen bulanık sayıyı ayırt etme konusunda önemli bir avantaja sahiptir. Yapılan çalışmalar, CFCS yönteminin karışık ve bulanık kriter setleri içeren çok kriterli karar verme modellerinde bulanık sayıları dönüştürmek için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Opricovic ve Tzeng, 2003). Dikkat çeken bir diğer nokta ise, CFCS yönteminin yalnızca DEMATEL yöntemiyle sınırlı kalmayıp, Çok Kriterli Karar Verme (Multiple-Criteria Decision Making - MCDM) ve Çok Kriterli Karar Analizi (Multiple Criteria Decision Analysis - MCDA) yöntemlerinde de bulanık sayıların kesin değerlere dönüştürülmesinde oldukça etkili bir araç olmasıdır. Opricovic ve Tzeng'in (2003) önerdiği yönteme ilişkin formüller 18-23'te belirtilmiştir.

- ***Normalizasyon***

$$L = \min\left(l_{ij}\right), R = \max\left(u_{ij}\right), \Delta = R - L; \tag{18}$$

$$x_l = l_{ij} - L/\Delta \quad x_m = m_{ij} - L/\Delta \quad x_u = u_{ij} - L/\Delta; \tag{19}$$

- ***Sağ ve sol değerlerin hesaplanması***

$$x_{sol} = x_m/(1 + x_m - x_l), x_{sağ} = x_u/(1 + x_u - x_{lm}); \tag{20}$$

- ***Normalize edilmiş değerler toplamı***

$$x = \left[x_{sol}(1 - x_{sol}) + x_{sağ}{}^2\right]/\left[1 - x_{sol} + x_{sağ}\right] \tag{21}$$

- ***Net değerlerin hesaplanması***

$$x_{net} = L + \Delta x \tag{22}$$

- ***Nihai Denklem***

$$x_{net} = L + \Delta\frac{(m_{ij}-L)(\Delta+u_{ij}-m_{ij})^2(R-l_{ij})+(u_{ij}-L)^2(\Delta+m_{ij}-l_{ij})^2}{(\Delta+m_{ij}-l_{ij})(\Delta+u_{ij}-m_{ij})^2(R-l_{ij})+(u_{ij}-L)(\Delta+m_{ij}-l_{ij})^2(\Delta+u_{ij}-m_{ij})} \tag{23}$$

Adım 8 Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi: Formül 24 ve 25 kullanılarak toplam durulaştırılmış ilişki matrisindeki satır ve sütunların toplamı $R = [r_i]_{nx1}$ $C = \left[c_j\right]_{1xn}$ elde edilir.

$$R = [r_i]_{nx1} = \left[\sum_{j=1}^{n} t_{ij}\right]_{nx1} \quad (24)$$

$$C = \left[c_j\right]_{1xn} = \left[\sum_{i=1}^{n} t_{ij}\right]_{1xn} \quad (25)$$

Kriterlerin 0 ile 1 arasındaki ağırlıklarının toplamı formül 26 ve 27 kullanılarak bulunur. Kriter ağırlıklarının toplamı doğal olarak 1'e eşit olacaktır.

$$w_i = \sqrt{(R+C)^2 + (R-C)^2} \quad (26)$$

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad (27)$$

Adım-9 Etki-İlişki Haritasının Oluşturulması: Son olarak, her bir faktör için $(R+C)$ ve $(R-C)$ değerleri ayrı ayrı hesaplanarak, nihai hedef olan etki-ilişki haritası oluşturulur. $(R+C)$ değerinin merkezden uzaklaşması, ilgili kriterin öneminin arttığını ifade eder. $(R-C)$ değerinin pozitif olması, kriterin etkileyen grubunda yer aldığını, negatif olması ise etkilenen grubunda bulunduğunu gösterir.

Birbirlerini etkileyen kriterleri belirlemek için tüm kriterlerin durulaştırılmış değerlerinin ortalaması hesaplanır. Ortalama değerin üzerinde kalan kriterlerin birbirlerini etkilediği sonucuna varılır. Ancak bu yöntem, faktörleri etkileyen ve etkilenen olarak iki gruba ayırsa da, faktörler arasındaki ilişki gücü hakkında bilgi sağlamamaktadır. Bu nedenle, etki-ilişki haritasını oluşturmak için öncelikle durulaştırılmış değerler matrisinin ortalaması alınır ve bu değer eşik değer olarak belirlenir. Eşik değerin altında kalan kriterler arasındaki ilişkiler yok sayılır.

Ayrıca, durulaştırılmış değerler matrisindeki en büyük değer ile eşik değer aralığı üçe bölünerek, kriterler arasındaki ilişki düzeyleri zayıf, orta ve güçlü olarak sınıflandırılır. Bu yaklaşım, karmaşık bir etki-ilişki haritası oluşmasını önlemeye yardımcı olur.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. BULGULAR

Verilerinin toplanması maksadıyla Ek-1'de sunulan Kocaeli Üniversitesi Rektörlüğü Sosyal ve Beşeri Bilimler Etik Kurulu'nun 17/01/2025 tarih ve 2025/01 no'lu toplantısında alınan 5. sıra sayılı kararı ile etik kurul onayı alınarak Ek-5'te verilen DEMATEL anketi uygulanmıştır. Toplanan veriler katılımcı Bulanık Delphi ve Bulanık DEMATEL yöntemiyle analiz edilmiştir.

4.1. KATILIMCI UZMAN BİLGİLERİ

Katılımcı uzman bilgileri Tablo 16'da sunulmuştur.

Tablo 16: Katılımcı Bilgileri

Uzman	Yaşı	Mesleki Tecrübe (Yıl)	Görevi	Eğitim Düzeyi
Uzman1	44	13	Kaptan	Doktora
Uzman2	40	14	Kaptan	Lisans
Uzman3	44	17	Kaptan	Lisans
Uzman4	40	16	Operasyon	Yüksek Lisans
Uzman5	36	10	Kaptan	Lisans
Uzman6	46	18	Kaptan	Lisans
Uzman7	60	25	Filo Müdürü	Lisans
Uzman8	38	12	Kurucu	Doktora
Uzman9	46	14	Baş Mühendis	Lisans
Uzman10	52	32	Baş Mühendis	Lisans
Uzman11	43	24	Müdür	Lisans
Uzman12	41	16	Müdür	Lisans

Anket formunun yanıtlanması uzmanlık ve tecrübe gerektirdiğinden, örneklem, LNG yakıtlı gemiler konusunda uzman ve deneyimli kişilerden oluşturulmuştur. Bu kapsamda, anketlere katılan uzmanlar en az 10 yıl LNG ve LNG yakıtlı gemi konusunda mesleki tecrübeye sahip olup çoğunlukla operasyon müdürü, filo müdürü, teknik müdür, kaptan ve başmühendis gibi görevlerde çalışmaktadırlar.

12 uzmandan oluşan bir örneklem büyüklüğü bazı nicel araştırma çerçevelerinde mütevazı kabul edilebilir, ancak uzman temelli anket metodolojileri alanında, özellikle Bulanık Delphi ve DEMATEL (Bafail ve Alamoudi, 2025; Hanay vd., 2024; Liu vd., 2025) gibi çok kriterli karar verme teknikleri kullanıldığında, yaygın olarak kabul

gören ve metodolojik olarak uygun bir uygulamadır. Son derece deneyimli profesyonellerin derinlemesine bilgilerine ve niteliksel içgörülerine dayanan bu yöntemlerin sağlam yapısı, genellikle geniş ve genelleştirilebilir bir anket örnekleminden ziyade, daha küçük ve yüksek kaliteli bir uzman panelini gerektirir. Bu yaklaşım, DEMATEL'in gerektirdiği ikili karşılaştırmalar için güçlü ve niteliksel girdi sağlamak üzere istatistiksel temsil edilebilirlikten ziyade uzman yargısının derinliğini ve kalitesini önceliklendirir, zira bireysel uzman görüşleri önemli bir ağırlığa sahiptir ve sağlam bir karar modelinin geliştirilmesine doğrudan katkıda bulunur. Tablo 1'de özetlendiği gibi, uzmanların dikkatli bir şekilde seçilmesi, toplanan verilerin yüksek düzeyde alana özgü uzmanlığı yansıtmasını sağlar ve böylece bu tür metodolojiler için mevcut araştırma normları bağlamında bulguların güvenilirliğini ve geçerliliğini güçlendirir.

4.2. BULANIK DELPHİ YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

Delphi yönteminin ilk adımı olarak 5'li Likert anket uzmanlara elektronik ortamda ulaştırılmış ve Ekim 2024'ten Ocak 2025'e kadar 3 aylık bir süre boyunca uzmanlardan veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Toplanan ham veriler dilsel değişken olarak toplanmıştır.

Nicel veri toplama yöntemine ek olarak, katılımcılara kararlarının ardındaki mantığı belirlemek ve literatür araştırması sonucunda belirlenen kriterlerin kapsamını güçlendirmek için ek kriterler eklemek amacıyla sorular da sorulmuştur.

4.2.1. Anket Verisinin Güvenilirlik ve Geçerlilik Testi

5'li Likert Yöntemiyle yapılan Bulanık Delphi anketinden elde edilen verilerinin güvenilirliğini değerlendirmek için Cronbach's Alpha Katsayısı hesaplanmıştır. Eğer, Cronbach's Alpha Katsayısı $0{,}70 \leq \alpha$ ise anketin güvenilirliği oldukça yüksektir (Alqahtani vd., 2023; Park vd., 2022). Bulanık Delphi anketinin genel güvenilirliği 0.74 olarak hesaplanmış olup, bu da anket verilerinin ileri istatistiksel analizler için yeterince güvenilir olduğunu göstermektedir.

4.2.2. Ortalama Bulanık Değerlendirme Puanlarının Belirlenmesi

Delphi yöntemi çerçevesinde, uzmanlardan 5'li Likert anket yöntemiyle elde edilen dilsel değişkenler Tablo 13'te verilen Trigonometrik Bulanık Sayılara (TBS) dönüştürülmüştür.

Daha sonra, (2) numaralı formül kullanılarak uzmanlardan elde edilen dilsel değişkenlerden dönüştürülen bulanık sayıların ortalama değerleri ($\widetilde{\omega}_j$) bulunmuş bu değerler tablo halinde Ek-2'de sunulmuştur.

4.2.3. En Çok Etkileyen Kriterlerin Belirlenmesi

Hesaplanmış ortalama bulanık değerlendirme puanları ($\widetilde{\omega}_j$) basit ağırlık merkezi yöntemi kullanılarak (3) numaralı formül ile durulaştırılarak birleştirilmiş değerlendirme puanları (S_j) hesaplanmış, önem sıralaması için belirleyici bir değer olan S_j değerleri tablo halinde Ek-3'te sunulmuştur.

Daha sonra, tahmin alanının kabul edilebilirliğinin incelenmesi maksadıyla her bir faktör için (4) numaralı formül kullanılarak ortalama bulanık sayılar ($\widetilde{\omega}_j$) ile her bir uzmanın bulanık tahmin değeri ($\widetilde{\omega}_{ij}$) arasındaki fark değeri D_{ij} hesaplanmıştır.

Hesaplanan D_{ij} değerlerinden formül (5) kullanılarak her bir faktör için eşik değeri (d) bulunmuştur.

Tahmin alanının kabul edilebilirliğinin değerlendirildiği (Th_d) değeri her bir faktör için bulunan eşik değerlerinin (d) ortalaması alınmak suretiyle formül (6) kullanılarak bulunmuş ve bu değer eşik değeri 0,15 olarak bulunmuştur.

$Th_d \leq 0.2$ olduğu için tahmin alanı kabul edilmiştir ve her bir faktör üzerindeki uzmanların bulanık tahmin değerleri ($\widetilde{\omega}_{ij}$) ile o faktörün tüm uzmanlar için ortalama bulanık sayısı ($\widetilde{\omega}_j$) arasındaki mesafeler E_j belirlenmiştir. ($d \leq 0.2$)

Müteakiben uzmanların görüş birliğinin test edilmesi maksadıyla formül (7) kullanılarak (EA_j) değeri yüzde olarak bulunmuştur. Görüş birliği için belirleyici bir değer olan EA_j değerlerini içeren tablo Ek-4'te sunulmuştur.

En çok etkileyen kriterin belirlenmesi aşamasında her bir faktörün önemini sıralamak için kullanılan (S_j), mutabakat değerlendirmesi için kullanılan (EA_j) değerleri hesaplanmıştır. (S_j) değeri 0,7 ve üzeri daha etkili kabul edildiğinden (Yusof vd., 2022; Mohammadfam vd., 2022; Alqahtani vd., 2023) bu değer altındaki kriterler elenmiştir. Uzman grup mutabakatı, her bir faktör için uzmanların anlaşmasına dayalı olarak $EA_j \geq 75\%$ şartına göre değerlendirildiğinden (Yusof vd., 2022; Alghawli vd., 2022; Mohammadfam vd., 2022) dolayı da bu şarta uymayan EA_j değerine sahip kriterler elenmiştir.

Bu aşamada, kapsamlı literatür araştırması sonucu tespit edilen 35 adet kriterin en önemlileri tespit edilmiştir. Bulunan en önemli 18 adet faktör Bulanık DEMATEL çalışması için tekrardan sıralanarak (F1, F2, F3….. F_n) Tablo 17'de gösterilmiştir.

Tablo 17: Delphi Yöntemiyle Tespit Edilen En Önemli Faktörler

Kodu	Kriter Adı	S_j (Önem Göstergesi)	EA_j (Mutabakat Göstergesi)
F1	Egzoz Emisyonu (NO_x, SO_x, PM, CO_2)	0,82	88%
F2	Hava Kirliliği	0,75	88%
F3	Makine Tipi	0,71	88%
F4	Yanmamış Metan Gazı	0,73	75%
F5	Emniyet Konuları	0,84	88%
F6	Güvenlik Konuları	0,73	88%
F7	Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketimi	0,73	75%
F8	Egzoz Temizleme Sistemi Gereksinimi	0,71	88%
F9	LNG Yakıtı Sermaye Maliyeti	0,73	88%
F10	LNG Yakıt Satış Fiyatı	0,73	75%
F11	Operasyon Maliyeti	0,78	88%
F12	Maliyet Tasarrufu	0,71	88%
F13	Bakım Maliyeti	0,73	75%
F14	Sefer ve Rota Planlaması	0,73	75%
F15	Yakıt İkmal Ağı	0,73	75%
F16	Operasyon Standartları	0,77	75%
F17	Rekabet	0,75	75%
F18	LNG Yakıt Transferi Kuralları	0,78	88%

4.3. BULANIK DEMATEL YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

DEMATEL yöntemi çerçevesinde, uzmanlardan anket yoluyla dilsel değerler Tablo 15'te belirtilen bulanık değerlere dönüştürülmüştür (Formül 8). Uzmanlara

uygulanan anket formu örneği Ek-5'te sunulmuştur. Elde edilen bulanık değerlerin ortalamaları, formül (9) kullanılarak "Ortalama Direkt Etki Matrisi" ($\tilde{Z}$) oluşturulmuştur ve Ek-6'da sunulmuştur. Daha sonra, $\tilde{Z}$ matrisi formüller (10) ve (11) yardımıyla normalize edilerek, "Normalize Edilmiş Direkt Etki Matrisi" ($\tilde{X}$) elde edilmiş ve Ek-7'de sunulmuştur. Son aşamada ise, elde edilen $\tilde{X}$ matrisi, formüller (12-16) kullanılarak işlenmiş ve sonuç olarak "Toplam İlişki Matrisi" ($\tilde{T}$) elde edilmiş ve Ek-8'de sunulmuştur.

4.3.1. Kriter Çiftleri Arasındaki İlişkinin Saptanması

Toplam İlişki Matrisi ($\tilde{T}$) içerisindeki bulanık sayılar, formüller (17-23) ile açıklanan Bulanık Sayıların Net Sayılara Dönüştürülmesi (Converting Fuzzy Numbers Into Crisp Scores - CFCS) yöntemi kullanılarak durulaştırılma işlemleri yapılmıştır. Bu işlem sonucunda, Tablo 18'de sunulan net sayısal değerler elde edilmiştir.

Tablo 18: Durulaştırılmış Değerler

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
F1	0.038	0.094	0.039	0.047	0.071	0.059	0.069	0.096	0.064	0.078	0.101	0.063	0.054	0.105	0.083	0.088	0.105	0.078
F2	0.032	0.021	0.034	0.024	0.04	0.037	0.041	0.071	0.055	0.06	0.059	0.034	0.038	0.068	0.047	0.052	0.052	0.029
F3	0.101	0.088	0.028	0.086	0.097	0.066	0.096	0.099	0.054	0.063	0.131	0.099	0.097	0.114	0.068	0.08	0.119	0.048
F4	0.094	0.094	0.033	0.023	0.09	0.07	0.045	0.081	0.068	0.085	0.106	0.053	0.054	0.114	0.066	0.093	0.112	0.066
F5	0.043	0.037	0.039	0.029	0.043	0.091	0.039	0.037	0.061	0.075	0.087	0.043	0.039	0.097	0.094	0.092	0.071	0.088
F6	0.032	0.031	0.024	0.024	0.077	0.029	0.031	0.03	0.04	0.049	0.058	0.035	0.032	0.072	0.076	0.071	0.059	0.064
F7	0.071	0.066	0.034	0.03	0.051	0.042	0.034	0.052	0.064	0.075	0.118	0.095	0.087	0.101	0.071	0.057	0.074	0.037
F8	0.067	0.063	0.031	0.025	0.043	0.035	0.032	0.026	0.035	0.04	0.083	0.039	0.052	0.061	0.041	0.056	0.089	0.032
F9	0.036	0.034	0.027	0.036	0.052	0.047	0.045	0.048	0.031	0.095	0.105	0.047	0.045	0.077	0.087	0.058	0.088	0.035
F10	0.038	0.037	0.041	0.029	0.052	0.046	0.055	0.055	0.08	0.041	0.115	0.059	0.059	0.107	0.09	0.055	0.101	0.036
F11	0.037	0.032	0.032	0.033	0.06	0.044	0.037	0.037	0.036	0.045	0.043	0.05	0.048	0.082	0.067	0.046	0.087	0.042
F12	0.056	0.056	0.031	0.039	0.046	0.041	0.085	0.058	0.058	0.071	0.116	0.037	0.085	0.106	0.079	0.043	0.075	0.036
F13	0.032	0.031	0.046	0.026	0.045	0.037	0.05	0.044	0.054	0.06	0.102	0.048	0.025	0.075	0.041	0.035	0.046	0.029
F14	0.051	0.048	0.029	0.04	0.072	0.057	0.082	0.047	0.05	0.072	0.11	0.091	0.066	0.052	0.085	0.06	0.06	0.039
F15	0.063	0.058	0.032	0.032	0.092	0.086	0.052	0.045	0.085	0.099	0.116	0.083	0.064	0.116	0.054	0.06	0.095	0.077
F16	0.069	0.055	0.035	0.027	0.096	0.086	0.053	0.037	0.038	0.044	0.097	0.054	0.039	0.062	0.058	0.036	0.063	0.077
F17	0.037	0.035	0.028	0.028	0.078	0.074	0.037	0.072	0.08	0.097	0.101	0.067	0.049	0.066	0.09	0.043	0.045	0.038
F18	0.056	0.045	0.025	0.025	0.087	0.067	0.032	0.033	0.036	0.045	0.065	0.038	0.035	0.059	0.086	0.072	0.056	0.028

DEMATEL yöntemi, faktörler arasındaki ilişki ve etkilerin analiz edilmesinde kullanılan bir tekniktir. Tablo 17'de görüldüğü gibi, tüm kriterlerin birbirleri üzerinde belirli bir etkisi bulunmaktadır. Ancak, tüm kriterlerin karşılıklı etkilerinin bir arada gösterildiği Etki-İlişki Diyagramı, karar vericiler için yeterince anlamlı ve pratik bir bilgi sunamayabilir. Bu durumun önüne geçmek amacıyla, bir eşik değer belirlenmiş

ve yalnızca bu eşik değerin üzerinde kalan etkilerin dikkate alınması ile kriterler arasındaki anlamlı etkileşimlerin değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Bunun için Toplam İlişki Matrisindeki değerlerin aritmetik ortalamasını alarak eşik değerinin bulunması yeterlidir. Bu çalışmada eşik değeri 0.059 olarak hesaplanmıştır. Durulaştırılmış tüm değerlerin ortalaması alınarak belirlenen eşik değerin üzerinde kalan kriterler arasında karşılıklı etkileşim olduğu Tablo 19'da, sunulmaktadır. Ancak, eşik değeri aşan bu kriter çiftlerinin tamamının yer aldığı Etki-İlişki Haritası, karar vericiler açısından karmaşık bir yapıya sahip olacaktır. Bu nedenle, kriter çiftleri arasındaki etkileşim düzeylerinin belirlenmesi ve bu etkileşimlerin şiddetinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Tablo 19: Eşik Seviyesinin Üzerindeki Etki Şiddetine Sahip Kriter Çiftleri

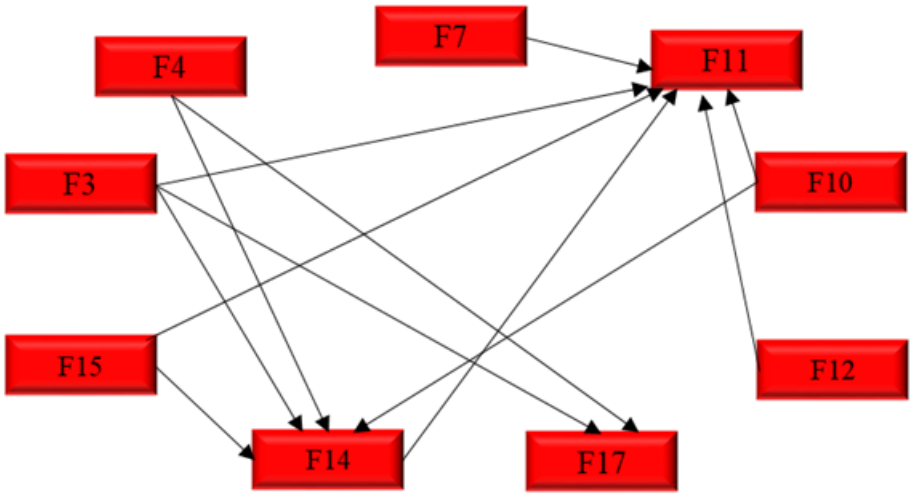
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
F1	0	0,094	0	0	0,071	0	0,069	0,096	0,064	0,078	0,101	0,063	0	0,105	0,083	0,088	0,105	0,078
F2	0	0	0	0	0	0	0	0,071	0	0,06	0	0	0	0,068	0	0	0	0
F3	0,101	0,088	0	0,086	0,097	0,066	0,096	0,099	0	0,063	0,131	0,099	0,097	0,114	0,068	0,08	0,119	0
F4	0,094	0,094	0	0	0,09	0,07	0	0,081	0,068	0,085	0,106	0	0	0,114	0,066	0,093	0,112	0,066
F5	0	0	0	0	0	0,091	0	0	0,061	0,075	0,087	0	0	0,097	0,094	0,092	0,071	0,088
F6	0	0	0	0	0,077	0	0	0	0	0	0	0	0	0,072	0,076	0,071	0	0,064
F7	0,071	0,066	0	0	0	0	0	0	0,064	0,075	0,118	0,095	0,087	0,101	0,071	0	0,074	0
F8	0,067	0,063	0	0	0	0	0	0	0	0	0,083	0	0	0,061	0	0	0,089	0
F9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,095	0,105	0	0	0,077	0,087	0	0,088	0
F10	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0	0,115	0	0	0,107	0,09	0	0,101	0
F11	0	0	0	0	0,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0,082	0,067	0	0,087	0
F12	0	0	0	0	0	0	0,085	0	0	0,071	0,116	0	0,085	0,106	0,079	0	0,075	0
F13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0,102	0	0	0,075	0	0	0	0
F14	0	0	0	0	0,072	0	0,082	0	0	0,072	0,11	0,091	0,066	0	0,085	0,06	0,06	0
F15	0,063	0	0	0	0,092	0,086	0	0	0,085	0,099	0,116	0,083	0,064	0,116	0	0,06	0,095	0,077
F16	0,069	0	0	0	0,096	0,086	0	0	0	0	0,097	0	0	0,062	0	0	0,063	0,077
F17	0	0	0	0	0,078	0,074	0	0,072	0,08	0,097	0,101	0,067	0	0,066	0,09	0	0	0
F18	0	0	0	0	0,087	0,067	0	0	0	0	0,065	0	0	0	0,086	0,072	0	0

Tablo 20: Kriter Çiftleri Arasındaki Birbirini Etkileme Şiddeti

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
F1		0,094			0,071		0,069	0,096	0,064	0,078	0,101	0,063		0,105	0,083	0,088	0,105	0,078
F2								0,071		0,06				0,068				
F3	0,101	0,088		0,086	0,097	0,066	0,096	0,099		0,063	0,131	0,099	0,097	0,114	0,068	0,08	0,119	
F4	0,094	0,094			0,09	0,07		0,081	0,068	0,085	0,106			0,114	0,066	0,093	0,112	0,066
F5						0,091			0,061	0,075	0,087			0,097	0,094	0,092	0,071	0,088
F6					0,077									0,072	0,076	0,071		0,064
F7	0,071	0,066							0,064	0,075	0,118	0,095	0,087	0,101	0,071		0,074	
F8	0,067	0,063									0,083			0,061			0,089	
F9										0,095	0,105			0,077	0,087		0,088	
F10									0,08		0,115			0,107	0,09		0,101	
F11					0,06									0,082	0,067		0,087	
F12							0,085			0,071	0,116		0,085	0,106	0,079		0,075	
F13										0,06	0,102			0,075				
F14					0,072		0,082			0,072	0,11	0,091	0,066		0,085	0,06	0,06	
F15	0,063				0,092	0,086			0,085	0,099	0,116	0,083	0,064	0,116		0,06	0,095	0,077
F16	0,069				0,096	0,086					0,097			0,062			0,063	0,077
F17					0,078	0,074		0,072	0,08	0,097	0,101	0,067		0,066	0,09			
F18					0,087	0,067					0,065				0,086	0,072		

Bu bağlamda, durulaştırılmış değerler matrisindeki en yüksek değer olan 0.131 ile eşik değeri olan 0.059 arasında bir ölçek oluşturularak, bu aralık üç eşit dilime ayrılmış ve kriter çiftleri arasındaki etkileşim düzeyleri belirlenmiştir. Buna göre, kriter çiftleri arasındaki etkileşim düzeyi 0.059-0.083 aralığında olduğunda zayıf, 0.083-0.107 aralığında olduğunda orta, 0.107-0.131 aralığında olduğunda ise güçlü bir etki şiddetine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 20'de, etki şiddet düzeyleri farklı renklerle görselleştirilmiştir: Kırmızı renk, güçlü seviyedeki etki şiddetini; turuncu renk, orta seviyedeki etki şiddetini; yeşil renk ise zayıf seviyedeki etki şiddetini temsil etmektedir.



Şekil 26 : Güçlü Seviyedeki Etki-İlişki Grafiği

Şekil 26'da gösterilen güçlü seviyedeki etki-ilişki grafiğine göre **F3** "*Makine Tipi*" faktörünün **F11** "*Operasyon Maliyeti*", **F14** "*Sefer ve Rota Planlaması*" ve **F17** "*Rekabet*" faktörleri, **F4** "*Yanmamış Metan Gazı*" faktörünün **F14** "*Sefer ve Rota Planlaması*" faktörü, **F7** "*Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketimi*" faktörünün **F11** "*Operasyon Maliyeti*" faktörü, **F10** "*LNG Yakıt Satış Fiyatı*" faktörünün **F11**"*Operasyon Maliyeti*" ve **F14** "*Sefer ve Rota Planlaması*" faktörleri, **F12** "*Yakıt Tasarrufu*" faktörünün **F11** "*Operasyon Maliyeti*" faktörü, **F14** "*Sefer ve Rota Planlaması*" faktörünün **F11** "*Operasyon Maliyeti*" faktörü, **F15** "*Yakıt İkmal Ağı*" faktörünün **F11** "*Operasyon Maliyeti*" ve **F14**"*Sefer ve Rota Planlaması*" faktörleri üzerinde güçlü etkisi vardır.

4.3.2. Etki-İlişki Haritasının Oluşturulması

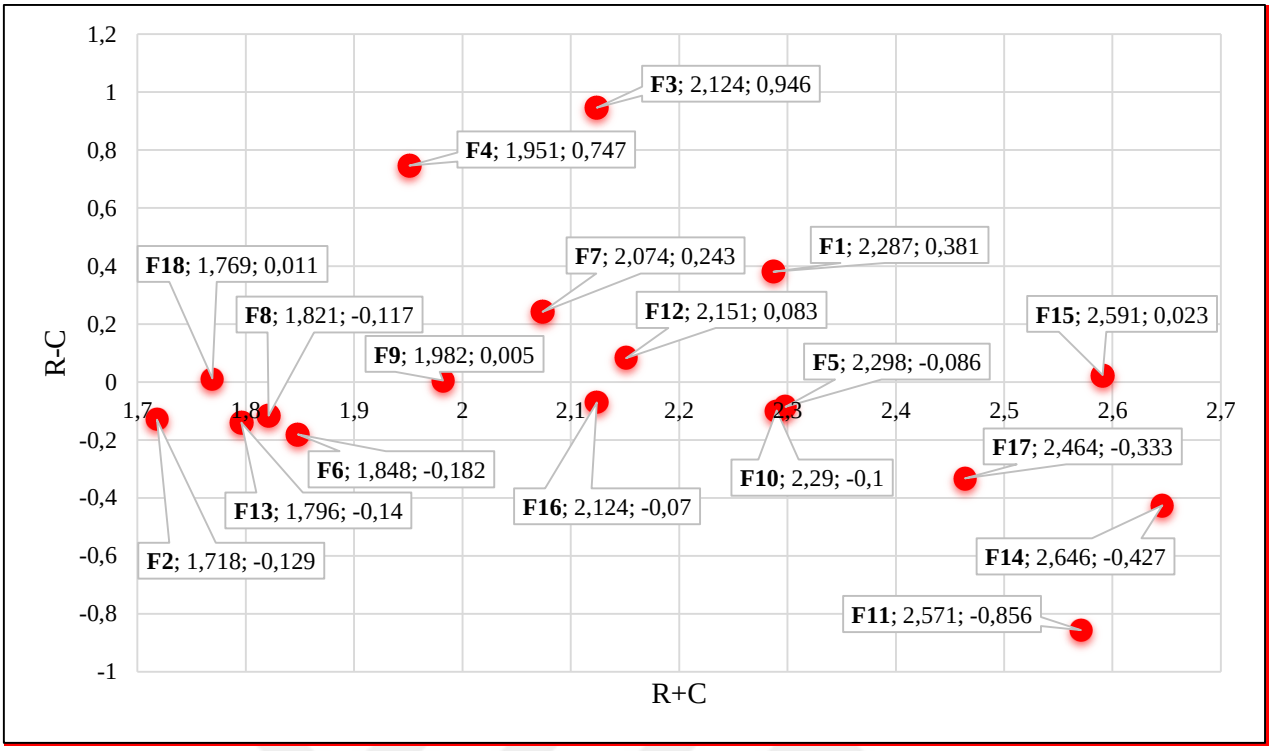
Etki-ilişki haritasının oluşturulmasında, ilk adım olarak formül (24-25) yardımıyla satırların toplamı R ve sütunların toplamı C değerleri hesaplanmıştır.

R ve C değerlerinden yararlanılarak hesaplanan R−C ve R+C değerleri Tablo 21'de sunulmuştur. DEMATEL yöntemine göre, R−C değerinin pozitif olması bir faktörün etkileyici, negatif olması ise etkilenen bir değişken olduğunu ifade ederken, R+C değeri ilgili faktörün sistem içerisindeki toplam önem derecesini yansıtmaktadır.

Tablo 21: R+C ve R-C Değerleri

Kod	C	R	R+C	R-C
F1	0,953	1,334	2,287	0,381
F2	0,923	0,795	1,718	-0,129
F3	0,589	1,535	2,124	0,946
F4	0,602	1,349	1,951	0,747
F5	1,192	1,106	2,298	-0,086
F6	1,015	0,833	1,848	-0,182
F7	0,915	1,159	2,074	0,243
F8	0,969	0,852	1,821	-0,117
F9	0,988	0,994	1,982	0,005
F10	1,195	1,095	2,29	-0,1
F11	1,714	0,857	2,571	-0,856
F12	1,034	1,117	2,151	0,083
F13	0,968	0,828	1,796	-0,14
F14	1,536	1,11	2,646	-0,427
F15	1,284	1,307	2,591	0,023
F16	1,097	1,027	2,124	-0,07
F17	1,399	1,066	2,464	-0,333
F18	0,879	0,89	1,769	0,011

Her bir kritere ait hesaplanan R−C değeri, Etki-İlişki Haritası'nın dikey eksenini temsil etmekte olup, bu değerin negatif olması faktörün "etkilenen" grupta yer aldığını, pozitif olması ise "etkileyen" gruba dahil olduğunu göstermektedir. Ayrıca, R+C değerleri Etki-İlişki Haritası'nın yatay ekseninde yer almakta ve ilgili faktörün sistem içerisindeki önem derecesini ifade etmektedir. R−C ve R+C değerleri temel alınarak oluşturulan Etki-İlişki Haritası Grafik 2'de sunulmuştur.

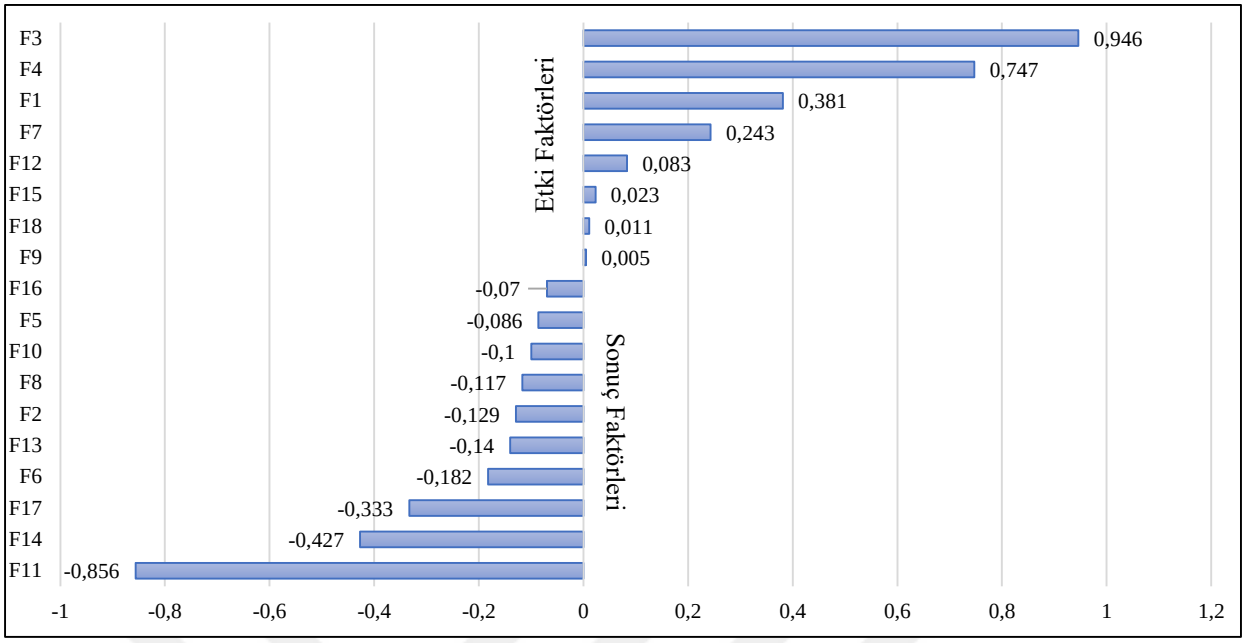


Grafik 2: Bulanık DEMATEL Yöntemiyle Bulunan Etki-İlişki Haritası

Yatay vektör (R+C) değerine göre, önem derecesi açısından F14 birinci sırada yer almakta olup, sırasıyla F15, F11, F17, F5, F10, F1, F12, F16, F3, F7, F9, F4, F6, F8, F13, F18 ve F2 takip etmektedir.

Dikey vektör (R-C) değerine göre**,** F1, F3, F4, F7, F9, F12, F15, F18 **neden** değişkeni olarak değerlendirilirken, F2, F5, F6, F8, F10, F11, F13, F14, F16, F17 **sonuç** değişkeni olarak kabul edilmiştir.

Neden-sonuç değişkenlerinin R-C değerine göre etkileme şiddetleri Grafik 3'te sunulmuştur. F3, F4, F1 ve F7 en çok etkileyen neden değişkeni, F11, F14, F17, F6, F13, F2, F8 ve F10 en çok etkilenen sonuç değişkeni olarak bulunmuştur.



Grafik 3: R-C Değerine Göre Etki-Sonuç Grafiği

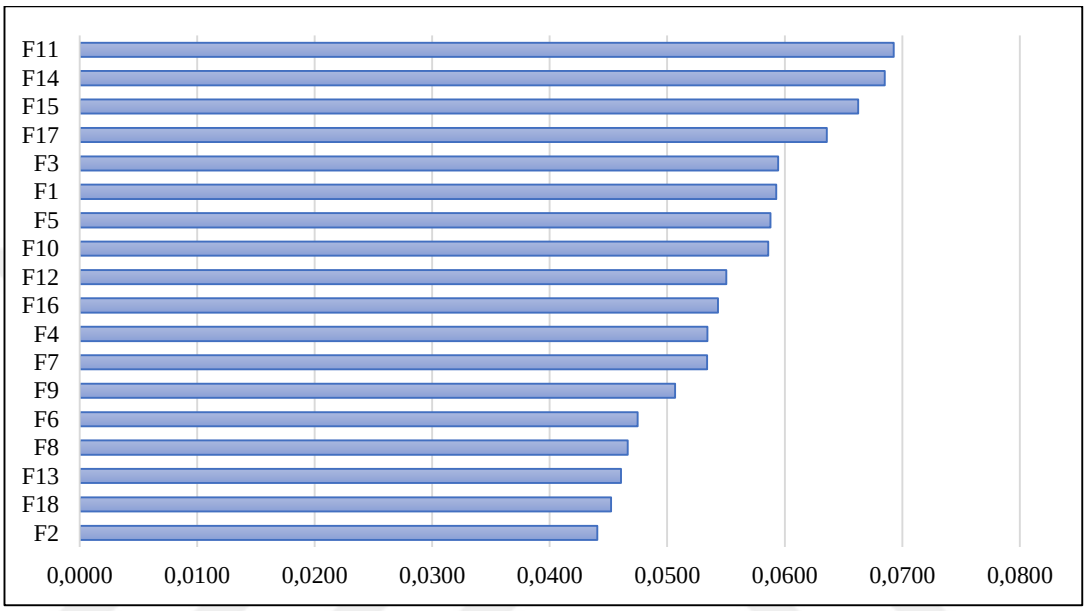
4.3.3. Kriter Ağırlıklarının Bulunması

Kriterlere ait ağırlıklar formüller (26-27) kullanılarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen (R+C) ve (R-C) değerleri ile birlikte kriter ağırlıkları aşağıdaki Tablo 22'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 22: Kriter Ağırlıkları ve Sıralaması

	C	R	R+C	R-C	wi	Wİ
F11	1,714	0,857	2,571	-0,856	2,709756	0,069276604
F14	1,536	1,11	2,646	-0,427	2,680232	0,068521814
F15	1,284	1,307	2,591	0,023	2,591102	0,066243145
F17	1,399	1,066	2,464	-0,333	2,4864	0,063566371
F3	0,589	1,535	2,124	0,946	2,325143	0,059443746
F1	0,953	1,334	2,287	0,381	2,318519	0,059274386
F5	1,192	1,106	2,298	-0,086	2,299609	0,058790934
F10	1,195	1,095	2,29	-0,1	2,292182	0,058601076
F12	1,034	1,117	2,151	0,083	2,152601	0,055032584
F16	1,097	1,027	2,124	-0,07	2,125153	0,05433087
F4	0,602	1,349	1,951	0,747	2,089117	0,053409584
F7	0,915	1,159	2,074	0,243	2,088187	0,053385807
F9	0,988	0,994	1,982	0,005	1,982006	0,050671231
F6	1,015	0,833	1,848	-0,182	1,85694	0,047473845
F8	0,969	0,852	1,821	-0,117	1,824755	0,046650997
F13	0,968	0,828	1,796	-0,14	1,801448	0,046055153
F18	0,879	0,89	1,769	0,011	1,769034	0,045226466
F2	0,923	0,795	1,718	-0,129	1,722836	0,044045388

Bu sıralamaya göre; **F11** "*Operasyon Maliyeti*", **F14** "*Sefer ve Rota Planlaması*", **F15** "*Yakıt İkmal Ağı*", **F17** "*Rekabet*", **F3** "*Makine Tipi*", **F1** "*Egzoz Emisyonunun (NO_x, SO_x, PM, CO_2)*", **F5** "*Emniyet Konuları*", **F10** "*LNG Yakıt Satış Fiyatı*" LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığına etkisindeki en önemli faktörler olarak tespit edilmiştir. Tüm faktör ağırlıklarının sıralanması görsel olarak gösterimi Grafik 4'te sunulmuştur.



Grafik 4: Faktör Ağırlıklarının Sıralanması

SONUÇ

Bu çalışma, kullanımına az sayıda gemi ile başlandığı 2010'lu yıllardan itibaren sürekli güncellenen ve sıkılaşan egzoz emisyon kısıtlamaları karşısında günümüze kadar gelişen LNG filolarının deniz taşımacılığındaki etkisinin uzman görüşlere dayanarak analiz edilerek özellikle çevresel, ekonomik ve ticari olarak bulgular ortaya koymuştur.

Çalışmanın sonuçlarına göre; yapılan faktör ağırlıklarndırma işlemiyle F11, F14, F15, F17, F3, F1, F5 ve F10 faktörleri LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığına etkisindeki en önemli faktörler olarak bulunmuştur.

Yapılan etki-ilişki hesaplamalarında, F3, F4, F1 ve F7 faktörlerinin en çok etkileyen nedensel değişkenler olması bu faktörlerin etki grubu faktörleri üzerinde güçlü bir yönlendirme etkisine sahip olduğunu göstermektedir.

LNG yakıtlı gemilerin makine tiplerine göre farklı NO_x ve yanmamış metan salınımına sebep olması IMO ve AB'nin son yıllarda sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda çıkardığı ve planlamaları dahilinde olan sera gazı emisyon kurallar için engel teşkil etmektedir. Özellikle, Comer vd. (2024) tarafından yapılan çalışmalarla da hesaplanmış LNG makinelerindeki kabul edilemez yüksek güçte sera gazı etkisine sahip yanmamış metan salınımı motorlarda yapılacak teknolojik iyileştirmeler ile azaltılmazsa LNG yakıtlı gemilerin çevresel faydalarını olumsuz yönde etkileyebilecektir. Metan salınımına yönelik AB tarafından 01 Ocak 2025 itibariyle getirilen FuelEU Maritime kuralları ve 2026 yılı itibariyle yürürlüğe girmesi planlanan AB-ETS ödemeleri, Karatuğ vd. (2023) tarafından yapılan çalışmalarda da belirtildiği üzere LNG yakıtlı gemilerin NO_x, SO_x, PM, CO_2 ile sağlanan çevresel ve çevresel maliyetlerinin nötrlenmesine sebep olacaktır.

LNG yakıtının uygun gemiler ile kullanımında Herdzik (2013) ile Wang ve Notteboom (2014) tarafından yapılan çalışmalarda da belirtildiği üzere NO_x, SO_x, PM, CO_2 emisyonlarını diğer geleneksel yakıtlara oranla önemli ölçüde azaltması IMO tarafından belirlenmiş Emisyon Kontrol Alanları içerisinde faaliyetlerini sürdürmeleri için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu durum, ECA'lar içinde kat

edilen mesafeye bağlı olarak geminin işletme maliyetleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir.

LNG ile çalışan motorların daha yüksek verimliliği sayesinde Moreira (2016) tarafından da yapılmış hesaplamalara göre daha düşük yakıt tüketimi ve daha az yağlama yağı tüketimi (Merien-Paul vd., 2019) maliyetlerin düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, LNG motorunun daha temiz ve verimli bir sisteme sahip olması ve makinenin uzun ömürlü olması nedeniyle, diğer ağır yakıtlı dizel motorlara kıyasla daha düşük bakım maliyetine sahiptir.

Bu bağlamda; en çok etkileyen nedensel değişkenler olarak bulunan **F3** "*Makine Tipi*", **F4** "*Yanmamış Metan Gazı*", **F1** "*Egzoz Emisyonunun (NO_x, SO_x, PM, CO_2)*" ve **F7** *"Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketimi"* faktörleri LNG yakıtlı gemilerin ve bu gemilere sahip denizcilik işletmelerinin taşımacılık yapacağı coğrafi bölgeleri, işletme ve bakım maliyetlerine bağlı olarak navlun fiyatlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu faktörler, LNG yakıtlı gemilerin işletildiği bölgelerdeki çevresel düzenlemelere, teknolojik altyapıya ve iklim koşullarına göre değişiklik gösterebilir. Ayrıca, gemilerin sahibi olan denizcilik şirketlerinin filo yapılandırmaları, bakım uygulamaları ve operasyonel maliyetleri de etki derecesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, emisyon standartlarının küresel olarak sıkılaştırılması, daha düşük emisyon seviyelerine sahip gemilere olan talebin artmasına yol açarak, motor tipi ve yakıt verimliliği gibi teknik faktörlerin ekonomik etkilerini daha belirgin hale getirmiştir. Sonuç olarak, bu faktörler navlun fiyatlarının şekillenmesinde sadece çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden değil, aynı zamanda maliyet verimliliği ve piyasa rekabetçiliği perspektifinden de önemli hale gelmektedir. Bu durum, LNG yakıtlı gemi yatırımlarının uzun vadeli finansal uygulanabilirliğini değerlendirirken hem teknik hem de çevresel performans göstergelerinin dahil edilmesi gerektiğinin altını çizmektedir.

Çalışma kapsamında yapılan etki-ilişki hesaplamalarına göre, **F11** "*Operasyon Maliyeti*", **F14** "*Sefer ve Rota Planlaması*" ve **F13** *"Bakım Maliyeti*" ün en çok etkilenen sonuç değişkenleri arasında çıkması da bu duruma paralellik göstermektedir. Aynı zamanda, **F11** ve **F14** faktörleri ağırlıklandırma hesaplamalarına göre de en önemli faktörler olarak bulunmuştur. Bu durum, bu

faktörlerin doğrudan ya da dolaylı olarak çok sayıda diğer nedensel değişkenden etkilendiğini ve sistemin dinamik yapısı içinde birbirlerine oldukça bağımlı olduklarını göstermektedir. Ayrıca, ağırlıklandırma analizlerinde **F11** ve **F14**'ün en öncelikli faktörler olarak belirlenmesi, bu değişkenlerin sadece sonuç olarak hareket etmediğini, aynı zamanda sistem genelinde stratejik karar alma süreçlerinde de ayrılmaz bir rol oynadığını vurgulamaktadır.

Özellikle, operasyonel maliyetler ve sefer düzenleriyle ilgili faktörlere yapılan vurgu, LNG yakıtlı gemilerin sürdürülebilirliği için maliyet verimliliğinin dengelenmesinin hayati rolünün altını çizmektedir. Bu durum, filo yönetimi ve rota optimizasyonu gibi operasyonel stratejiler geliştirilirken LNG yakıtlı gemilerin farklı özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Ayrıca, en çok etkilenen sonuç değişkenleri ve önemli faktörler arasında bulunan **F17** "*Rekabet*" faktörü de sıkılaşan IMO ve AB emisyon kuralları ve teknolojik ilerlemeler kapsamında önem kazanmıştır. 2020 IMO kükürt standartlarının yürürlüğe girmesiyle LNG'nin düşük kükürtlü yakıtlara karşı fiyat rekabetini artırdığı, Wang vd. (2021) tarafından da belirtildiği gibi LNG yakıt satış fiyatının coğrafi bölgelere göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, LNG yakıtlı gemilerde kullanılan ve yanmamış metan salınımının diğerlerine nazaran fazla olduğu motor tiplerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmekte olup bu durum bazı önemli deniz motorları üreticileri arasında bahse konu zafiyeti gidermeye yönelik teknolojik rekabete sebep olmaktadır. IMO ve AB'nin sıkılaşan tedbirleri neticesinde, dünya genelinde LNG yakıtlı gemilerin sayısındaki son yıllardaki hızlı artışı da gemi inşa sektöründe ve Yao vd. (2024) tarafından da belirtildiği gibi limanlar başta olmak üzere denizcilik işletmelerinde rekabetin arttığını göstermektedir.

LNG yakıtlı gemilerin sayısındaki artışa paralel olarak LNG yakıt ikmal noktalarının yeterliliği de sektörün ilerlemesi için büyük öneme sahiptir (Peng vd., 2021). Yapılan ağırlıklandırma hesaplamalarına göre tespit edilen **F15** "*Yakıt İkmal Ağı*" faktörünün en önemli faktörler arasında bulunması bahse konu durum ile örtüşmektedir. He vd. (2024) tarafından da belirtildiği gibi LNG yakıtlı gemi sahipleri veya LNG yakıtlı gemi işletmecileri gemilerinin rotalarını ve uğrayacağı

limanları belirlerken ulaşılabilir uygun LNG yakıt ikmal noktalarını göz önünde bulundurmak zorundadırlar. Bu gemiler, LNG yakıt ikmal tesislerine kolay erişim sağlayan ve LNG yakıtı satış fiyatının uygun olduğu rotaları takip etmektedir. Bu durum, LNG yakıt ikmal ağının genişletilmesinin, LNG yakıtlı gemilerin operasyonel esnekliği ve ekonomik sürdürülebilirliği ile deniz taşımacılığının sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşması açısından önemli bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

Bruzzone ve Sciomachen (2023) tarafından da belirtildiği gibi son yıllarda devam eden Rusya-Ukrayna çatışmasının, özellikle Avrupa için gaz arzı ve fiyatlarında ciddi dengesizliklere neden olduğu da görülmektedir. Çalışmanın bulguları arasında yer alan en çok etkilenen ve en önemli faktörler arasında bulunan **F10** "*LNG Yakıt Satış Fiyatı*" faktörü bu durumu desteklemektedir.

Son olarak; önemli faktörler arasında bulunan **F5** "*Emniyet Konuları*" ve etkilenen faktörler arasında bulunan **F6** *"Güvenlik Konuları"* da LNG'nin kimyasal özellikleri sebebiyle deniz taşımacılığında standartlar, kurallar, eğitim ve materyal olarak desteklenmesi gereken bir husustur. Molitor vd. (2012) tarafından da belirtildiği gibi LNG yakıtı, zehirli bir madde olmamasına ve alevlenme alt-üst sınır aralığı dar olmasına rağmen, kriyojenik özellikleri nedeniyle yakıtın taşınması, transferi ve kullanımı esnasında sızıntı durumunda hızlı faz dönüşümü yaşanabilir. Bu durum, yanıcı buhar bulutu, parlama yangınları, ateş topları ve patlamalar gibi ciddi tehlikelere yol açabilir. Ayrıca, her ne kadar yaşanmamış ve tecrübe edilmemiş olsa da, LNG'nin büyük hasarlara sebep olabilecek yapısal özelliklerinden dolayı da bir güvenlik zafiyeti oluşturabileceği değerlendirilmesi gereken bir husustur.

Bu çalışmanın bulguları, LNG yakıtlı gemilerin avantaj ve dezavantajları ile deniz taşımacılığı faaliyetlerinde aktif rol oynayan uzmanların görüşlerine dayanması ve LNG yakıtlı gemilerin mevcut ve gelecekteki deniz taşımacılığı üzerindeki etkisinin en son IMO ve AB kurallarına göre değerlendirilmesi açısından diğer çalışmalardan farklılık göstermektedir.

Elde edilen bulgulara göre deniz taşımacılığında LNG yakıtlı gemilerin kullanımında Operasyon Maliyeti, Sefer ve Rota Planlaması, Yakıt İkmal Ağı,

Rekabet, Makine Tipi, Yanmamış Metan Salınımı, Egzoz Emisyonunu (NO_x, SO_x, PM, CO_2), Emniyet Konuları, LNG Yakıt Satış Fiyatı gibi faktörlerin önemini göstermiştir. Bu faktörlerin etki-ilişki durumlarının bazı çalışmalar ile de örtüştüğü görülmüştür. Önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi, özellikle Yakıt İkmal Ağı, Makine Tipi, Yanmamış Metan Salınımı, Egzoz Emisyonunu (NO_x, SO_x, PM, CO_2), Emniyet gibi faktörlerin etkisiyle Operasyon Maliyeti ile Sefer ve Rota Planlaması'nın LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığındaki rolünde en çok ve en güçlü bir şekilde etkilenen faktörler olduğu tespit edilmiştir.

Araştırma bulguları, LNG yakıtlı gemilerin operasyonel ve çevresel performans açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Bu avantajlar coğrafi bölgelere ve gemi işletme ve bakım maliyetlerine bağlı olarak değişmekle birlikte, LNG yakıtlı gemiler genel olarak işletme maliyetlerinin azaltılmasına katkıda bulunmakta ve düşük emisyonlar yoluyla çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Bu durum deniz taşımacılığı sektöründeki paydaşlar için hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlamaktadır. Ayrıca, IMO ve AB tarafından belirlenen sıkı emisyon standartları karşısında LNG yakıtlı gemiler, uygun makine tipini seçerek ECA'lar gibi düzenlenmiş alanlarda rekabet avantajı elde etmektedir. Orta vadede, LNG yakıtlı gemilerin sıfır emisyon hedeflerine ulaşma yolunda bir geçiş yakıtı olarak stratejik bir rol oynaması beklenmektedir. Ancak, LNG'nin geçiş yakıtı olarak konumunu daha doğru bir şekilde belirlemek için hidrojen, amonyak ve biyoyakıtlar gibi alternatif yakıtlarla daha fazla karşılaştırmalı çalışma yapılması gerekmektedir. LNG yakıtlı gemilerin benimsenmesi sadece yasal düzenlemelere uyuma katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda deniz ekosistemlerini koruyarak ve deniz kirliliğini azaltarak küresel ölçekte sürdürülebilir denizciliğe geçişi kolaylaştırır. Bu bağlamda LNG yakıtlı gemiler, hem çevre yönetimi politikalarının hayata geçirilmesinde hem de sektörde uzun vadeli dönüşümün sağlanmasında önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, çevre kirliliğini büyük ölçüde kontrol altına alan emisyon kuralları, yeşil yakıtlar ve LNG yakıtlı gemilerin geliştirilmesi çerçevesinde gelecekteki çalışmalara rehberlik edebilir. IMO ve AB tarafından sıfır karbon hedefine yönelik olarak getirilen sıkı tedbirler ve kurallar karşısında armatörler ve denizcilik işletmecileri için bir yol haritası sağlayabilir. LNG yakıtlı gemilerin

kullanımı ve benimsenmesinde başarılı bir sonuç için kilit unsurların belirlenmesine yardımcı olabilir. Çevresel önlemler çerçevesinde politika yapıcıların izlemesi gereken yol konusunda rehberlik sağlayabilir.

Bulgular doğrultusunda denizcilik iç ve dış çevresindeki farklı aktörlere yönelik öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- **Politika Yapıcılar (IMO, AB, Bayrak Devletler vb.)**

Uluslararası ve bölgesel düzenlemelerin oluşturulması sürecinde, LNG motorlarından kaynaklanan metan emisyonları dikkate alınmalıdır. Ayrıca, bu alanda teknolojik gelişmeleri teşvik eden politikalar uygulamalı, bu konuda sağlam adımlar atmalıdır. Yürürlüğe konulan kurallar uygulanabilir olmalıdır. Emisyon politikalarını daha öngörülebilir, aşamalı ve şeffaf bir şekilde yayımlamalıdır. Ayrıca, FuelEU Maritime ve EU-ETS dâhil olmak üzere düzenleyici çerçevelerin aşamalı olarak uygulanması, ticari kuruluşlar için uyum sürecini kolaylaştırırken LNG filolarının sürdürülebilir rekabet gücünü de sağlayacaktır.

- **Denizcilik Şirketleri**

LNG ile çalışan gemilerin operasyonel verimliliği, sefer planlaması sürecinde LNG yakıt ikmal ağının erişilebilirliği ile doğrudan bağlantılıdır. Bu nedenle, rota optimizasyonu ve yakıt tüketimi için stratejiler geliştirerek işletme maliyetlerini düşürmek ve aynı zamanda metan emisyonlarını azaltan teknolojileri benimsemelidir. Uluslararası emisyon düzenlemelerine uyum sağlamak için proaktif stratejiler geliştirmeli; bunu operasyonel ve stratejik kararlarında birincil nedensel faktör olarak kabul etmelidir.

- **Liman İşletmeleri**

LNG ikmal altyapısının yaygınlaştırılması, LNG yakıtlı gemilerin sürdürülebilir operasyonları açısından kritik önemde olduğunu belirtmiştik. Bundan dolayı, limanlarda güvenlik standartları yükseltilmeli, LNG ikmali konusunda personelin eğitimi artırılmalı ve uluslararası standartlarla uyumlu prosedürler

geliştirilmelidir. LNG yakıt ikmali imkânının limanlara kazandırılmasına yönelik altyapı çalışmaları yapılmalıdır.

- **Gemi ve Motor Üreticileri**

LNG motorlarındaki verimlilik artışına yönelik Ar-Ge çalışmaları desteklenmeli, özellikle yanmamış metan salınımını azaltacak teknolojilere odaklanılmalıdır. Motor tipleri arasındaki emisyon performans farklılıklarının ve bu konuda yapılan fabrika çalışmalarının şeffaf bir şekilde raporlanması, armatörlerin yatırım kararlarını kolaylaştıracaktır.

- **Akademi ve Araştırma Kuruluşları**

LNG'nin operasyonel, çevresel ve ekonomik etkilerini farklı coğrafyalarda karşılaştırmalı olarak inceleyen disiplinler arası araştırmalar yapılmalıdır. Ayrıca, LNG sonrası potansiyel alternatif yakıtların (hidrojen, amonyak vb.) fizibilitesine yönelik deneysel ve modelleme temelli çalışmaların artırılması sektörün dönüşümüne katkı sağlayacaktır.

Bu öneriler, LNG yakıtlı gemilerin kısa ve orta vadede sürdürülebilir deniz taşımacılığına katkısını artırmaya, uzun vadede ise sıfır karbon hedeflerine ulaşmada bir geçiş yakıtı olarak daha etkin bir rol üstlenmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma, LNG yakıtlı gemilerin uygulanmasındaki bölgesel farklılıklar ve çevresel düzenlemelerin gelecekteki kapsamına ilişkin belirsizlikler de dâhil olmak üzere bazı kısıtlamalara sahiptir. Buna ek olarak, uzman değerlendirmelerine bağımlılık öznel yorumlara yol açabilirken, uzman grubunun sınırlı büyüklüğü ve çeşitliliği sonuçların genellenebilirliğini kısıtlayabilir. Gelecekteki çalışmaların sağlamlığını artırmak için, daha geniş bir katılımcı yelpazesinin dâhil edilmesi, bulguları doğrulamak ve iyileştirmek için tamamlayıcı analitik yöntemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Buna ek olarak, gelecekteki araştırmalar kargo türlerine odaklanabilir. Bulguların sağlamlığını artırmak için, farklı bölgelerden daha geniş bir uzman ve paydaş grubunu içeren gelecekteki analizler, sonuçların genelleştirilebilirliğini güçlendirecektir.

KAYNAKÇA

1. Kitaplar

Fendoğlu, Eda (2021). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Güncel Uygulamalar. Ankara: Gazi Kitabevi.

Notteboom, T., Athanasios Pallis ve Jean-Paul Rodrigue (2022). Port economics, management and policy. London: Routledge.

National Research Council (NRC) (2010). Advancing the science of climate change. Washington, DC: The National Academies Press

Sakmar, Susan L. (2013). Energy for the 21st century: Opportunities and challenges for liquefied natural gas (LNG). Cheltenham: Edward Elgar Publishing.

Woodward, J. L. ve Robin M. Pitbaldo (2010). LNG risk based safety: modeling and consequence analysis. Hoboken: John Wiley & Sons.

2. Makaler, Bildiriler ve Diğer Basılı Yayınlar

Aagesen, Jesper (2012). Lloyds Register LNG bunkering infrastructure study. BC Shipping News, June.

Arof, Aminuddin Md (2015). "The application of a combined Delphi-AHP method in maritime transport research-a review". Asian Social Science, 11(23): 73.

Abdelmalek, M. ve Carlos Guedes Soares (2023). "Review of risk analysis studies in the maritime LNG sector". Journal of Marine Science and Application, 22(4): 693-715.

Akyuz, E. ve Erkan Çelik (2015). "A fuzzy DEMATEL method to evaluate critical operational hazards during gas freeing process in crude oil tankers". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 38: 243-253.

Alan, Burkay R. (2008). LNG taşımacılığı risk analizi ve emniyet yönetim modeli. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Alghawli, A. S. A., Abdualmajed A. Al-khulaidi, Adel A. Nasser, Nesmah A. AL-Khulaidi ve Faisal A. Abass (2022). "Application of the fuzzy Delphi method to identify and prioritize the social-health family disintegration indicators in Yemen". International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 13(5): 680-691.

Alqahtani, F.M., Mohammed A. Noman, Saad A. Alabdulkarim, Ibrahim Alharkan, Mohammed H. Alhaag ve Faisal M. Alessa (2023). "A New Model for Determining Factors Affecting Human Errors in Manual Assembly Processes Using Fuzzy Delphi and DEMATEL Methods". Symmetry, 15(11): 1967.

Bafail, O. ve Mohammed Alamoudi (2025). "Prioritizing Worker-Related Factors of Safety Climate Using Fuzzy DEMATEL Analy-sis". Systems, 13(5): 383.

Balcombe, P., Iain Staffell, Ivan Garcia Kerdan, Jamie F. Speirs, Nigel P. Brandon ve Adam D. Hawkes (2021). "How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis". Energy, 227: 120462.

Baresic, D. ve Nishatabbas Rehmatulla (2024). "Exploring the Factors Leading to Diffusion of Alternative Fuels Using a Socio-Technical Transition Approach-A Case Study of LNG as a Marine Fuel in Norway". Fuels, 5(4): 574-606.

Bavarsad, P., Sadegh Jamshidi, ve Zinat Jamshidi (2016). "Application of Fuzzy Dematel Model to identify and analyze the relationship between factors affecting port privatization in Iran". Journal of oceanography, 7(25): 23-31.

Bayraktar, Murat (2016). Hizmetteki bir Geminin Sıvılaştırılmış Doğalgaz (LNG) Yakıtlı bir Gemi Makinesiyle Donatılmasının Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Bruzzone, A. ve Anna Sciomachen (2023). "Simulating Operating Performance of Alternative Configurations of LNG Bunkering Stations". Sustainability, 15(13): 9940.

Bouzon, M., Kannan Govindan, Carlos M.Taboada Rodriguez ve Lucila M.S. Campos (2016). "Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP". Resources, conservation and recycling, 108: 182-197.

Bui, T. D., Feng Ming Tsai, Ming-Lang Tseng ve MohD Helmi Ali (2020). "Identifying sustainable solid waste management barriers in practice using the fuzzy Delphi method". Resources, conservation and recycling, 154: 104625.

Burel, F., Rodolfo Taccani ve Nicola Zuliani (2013). "Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion". Energy, 57: 412-420.

Cassar, M. P., Dimitrios Dalaklis, Fabio Ballini ve Seyedvahid Vakili (2021). "Liquefied natural gas as ship fuel: A maltese regulatory gap analysis". Transactions on Maritime Science, 10(01): 247-259.

Çelik, E. ve Emre Akyüz (2016). "Application of interval type-2 fuzzy sets DEMATEL methods in maritime transportation: the case of ship collision". International Journal of Maritime Engineering, 158(A4).

Charłampowicz, Jedrzej (2023). "Process management as an essential component of management in the maritime container terminals: Empirical evidence using Fuzzy-DEMATEL approach". European Research Studies Journal, 26(1): 222–229.

Chen, Z. ve Myongsop Pak (2017). "A Delphi analysis on green performance evaluation indices for ports in China". Maritime Policy & Management, 44(5): 537-550.

Chen, S., Shiyuan Zheng ve Qiang Zhang (2018). "Investment decisions under uncertainty on LNG-powered vessels for environmental compliance". Journal of Shipping and Trade, 3: 1-19.

Chung, C. C., Yi-Shih Chung ve An-Na Tai (2011). "An Evaluation of Key Service Attributes of Ocean Container Carriers from the Ocean Freight Forwarder's Perspective". Proceedings of the 9th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS). Taipei, Taiwan: Eastern Asia Society for Transportation Studies, 116-116.

Comer, B., Jörg Beecken, Robin Vermeulen, Elise Sturrup, Pierre Paschinger, Liudmila Osipova ve Ruud Verbeek (2024). Fugitive and unburned methane emissions from ships (FUMES). In Technical Report. ICCT.

Çelikaslan, Z. ve Alper Kılıç (2023). "Safety Precautions for The Use of LNG as Marine Fuel". Journal of Maritime Transport and Logistics, 4(1): 11-22.

Danacı, M. ve Umut Yıldırım (2023). "Comprehensive analysis of lifeboat accidents using the Fuzzy Delphi method". Ocean Engineering, 278: 114371.

Demirci, S. M. E. ve Selen Uygur (2021). "Investigation of the Criteria Affecting the Selection of Maritime Profession with the DEMATEL Method". Journal of Marine and Engineering Technology, 1(2): 68-76.

Denktaş Şakar, G., Esra Yıldırım ve Ezgi Mansuroğlu (2018). "Value creation in project cargo logistics: a Delphi study". Journal of ETA Maritime Science, 6(3).

Dereli, Deniz (2018). LNG applications in marine transport. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Dinwoodie, J., Sarah Tuck ve Patrick Rigot-Müller (2013). "Maritime oil freight flows to 2050: Delphi perceptions of maritime specialists". Energy Policy, 63: 553-561.

Le Fevre, Chris (2018). A review of demand prospects for LNG as a marine fuel. Oxford Institute for Energy Studies.

Foss, M. M., Fisoye Delano, Gürcan Gülen ve Ruzanna Makaryan (2003). LNG safety and security. Center for Energy Economics (CEE).

Ghadikolaei, M. A., Chun Shun Cheung ve Ka-Fu Yung (2016). "Study of performance and emissions of marine engines fueled with liquefied natural gas (LNG)". Proceedings of 7th PAAMES and AMEC2016, 13: 14.

Ghafarzadeh, A., Gholamreza Memarzadeh, Nnaser Hamidi ve Nabiollah Mohammadi (2023). "Analysis and Evaluation of Factors Affecting Good Governance in the Ports and Maritime Organization Using the Fuzzy Dematel Technique". Journal of Transportation Research, 20(1): 159-176.

Gupta, S. ve Neha Gupta (2025). "Enhancing freight logistics: overcoming barriers and driving sustainable growth with an integrated grey Delphi DEMATEL approach". Benchmarking: An International Journal, 33(2): 368-391.

Ha, S. M., Won-Ju Lee, Byongug Jeong, Jae-Hyuk Choi ve Jun Kang (2022). "Regulatory gaps between LNG carriers and LNG fuelled ships". Journal of Marine Engineering & Technology, 21(1): 23-37.

Hanay, U., Hüseyin İnce ve Gürkan Işık (2024). "Identifying Key Factors of Reputational Risk in Finance Sector Using a Linguistic Fuzzy Modeling Approach". Systems, 12(10): 440.

He, P., Jian Gang Jin, Wei Pan ve Jianghang Chen (2024). "Route, speed, and bunkering optimization for LNG-fueled tramp ship with alternative bunkering ports". Ocean Engineering, 305: 117957.

Herdzik, Jerzy (2011). "LNG as a marine fuel-possibilities and problem". Journal of KONES, 18: 169-176.

Herdzik, Jerzy (2012). "Aspects of using LNG as a marine fuel". Journal of KONES, 19: 201-209.

Herdzik, Jerzy (2013). "Consequences of using LNG as a marine fuel". Journal of KONES, 20(2): 159-166.

Hossain Chowdhury, M. M., Humayun Rashid Askari, Rezwana Tauhid Bushra ve Tomizuddin Rahmath Ullah (2024). "Revisiting seafarers' skills in the twenty-first century: a modified Delphi-BWM approach". Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs, 16(2): 141-161.

Hsu, C. C. ve Brian A. Sandford (2007). "The Delphi technique: making sense of consensus". Practical assessment, research, and evaluation, 12(1).

Hsu, Y. L., Cheng-Haw Lee ve V.B. Kreng (2010). "The application of Fuzzy Delphi Method and Fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection". Expert systems with Applications, 37(1): 419-425.

Iannaccone, T., Gabriele Landucci, Alessandro Tugnoli, Ernesto Salzano ve Valerio Cozzani (2020). "Sustainability of cruise ship fuel systems: Comparison among LNG and diesel technologies". Journal of Cleaner Production, 260: 121069.

Iannaccone, Tommaso (2021). Sustainability and risk management of LNG as a fuel for marine transportation. Doktora Tezi. Bologna Üniversitesi, Bologna, İtalya.

Kanbur, B. B., Liming Xiang, Swapnil Dubey, Fook Hoong Choo ve Fei Duan (2017). "Cold utilization systems of LNG: A review". Renewable and sustainable energy reviews, 79: 1171-1188.

Karatuğ, Ç., Bulut Ozan Ceylan, Emir Ejder ve Yasin Arslanoğlu (2023). "Investigation and examination of LNG, methanol, and ammonia usage on marine vessels". In Decarbonization of Maritime Transport. Singapore: Springer Nature Singapore: 65-85.

Karatuğ, Ç., Emir Ejder, Mina Tadros ve Yasin Arslanoğlu (2023). "Environmental and Economic Evaluation of Dual-Fuel Engine Investment of a Container Ship". Journal of Marine Science and Application, 22(4): 823-836.

Kartal, Ş. E., Emrah Bulut, Yusuf Volkan Aydoğdu ve Yunus Emre Şenol (2014). "A Terminal Location Selection Problem for Turkey's Natural Gas Supply". XII International Logistics and Supply Chain Congress (LM-SCM 2014). İstanbul: LODER (Lojistik Derneği): 580-590.

Kayhan, Ali (2016). "Birleşmiş Milletler Çevre Programı Üzerine Bir İnceleme". Milletlerarası Hukuk ve Milletlerarası Özel Hukuk Bülteni 33/1: 61-90

Kim, T. E., ve Steven Mallam (2020). "A Delphi-AHP study on STCW leadership competence in the age of autonomous maritime operations". WMU Journal of Maritime Affairs, 19(2): 163-181.

Kuang, L., Jie Wang, Yuxiao Cui ve Baofeng Pan (2023). "Brief Analysis on The Current Situation of LNG Fuel Powered Ship and The Challenge of LNG Fuel Bunkering". Proceedings of the 2nd International Conference on Information, Control and Automation (ICICA 2022). Chongqing, China: EAI (European Alliance for Innovation).

Kuittinen, N., Mikko Heikkilä, ve Katı Lehtoranta (2023). "Review of methane slip from LNG engines". European Commission, GREEN RAY project, Deliverable D1.1

Kumar, S., Hyouk-Tae Kwon, Kwang-Ho Choi, Wonsub Lim, Jae Hyun Cho, Kyungjae Tak ve Il Moon (2011). "LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development". Applied energy, 88(12): 4264-4273.

Kuzu, Ali Cem (2021). "Risk analysis of break-in-two accident of ships using fuzzy DEMATEL method". Ocean Engineering, 235: 109410.

Kuzu, Ali Cem (2023). "Application of fuzzy DEMATEL approach in maritime transportation: A risk analysis of anchor loss". Ocean Engineering, 273: 113786.

Lamii, N., Fatimazahra Bentaleb, Mouhsene Fri, Charif Mabrouki ve El Alami Semma (2022). "Use of DELPHI-AHP Method to Identify annd Analyze Risks in Seaport Dry Port System". Transactions on Maritime Science, 11(01): 185-206.

Laribi, S. ve Emmanuel Guy (2020). "Promoting LNG as a marine fuel in Norway: reflections on the role of global regulations on local transition niches". Sustainability, 12(22): 9476.

Lebedevas, S., Lukas Norkevičius ve Peilin Zhou (2021). "Investigation of effect on environmental performance of using lng as fuel for engines in seaport tugboats". Journal of Marine Science and Engineering, 9(2): 123.

Lee, H. J., Seung-Hoon Yoo ve Sung-Yoon Huh (2020). "Economic benefits of introducing LNG-fuelled ships for imported flour in South Korea". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 78: 102220.

Lehtoranta, K., Niina Kuittinen, Hannu Vesala ve Päivi Koponen (2023). "Methane emissions from a state-of-the-art LNG-powered vessel". Atmosphere, 14(5): 825.

Li, Rong Jun (1999). "Fuzzy method in group decision making". Computers & Mathematics with Applications, 38(1): 91-101.

Li, D. C. ve Hua-Long Yang (2024). "Economic feasibility of LNG-fuelled river ships: Carbon tax schemes perspective". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 132: 104235.

Lin, Ru Jen (2013). "Using fuzzy DEMATEL to evaluate the green supply chain management practices". Journal of cleaner production, 40: 32-39.

Lin, Wen Cheng (2022). "Maritime environment assessment and management using through balanced scorecard by using DEMATEL and ANP technique". International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(5): 2873.

Lindstad, E., Gunnar S. Eskeland, Agathe Rialland ve Anders Valland (2020). "Decarbonizing maritime transport: The importance of engine technology and regulations for LNG to serve as a transition fuel". Sustainability, 12(21): 8793.

Ling, Tay Ling Jolyn (2011). Air emissions: The effects on the shipping industry and ports: Implications for the Port of Singapore. Yüksek Lisans Tezi. Dünya Denizcilik Üniversitesi. Malmö, İsveç.

Linstone, H. A. ve Murray Turoff (Eds.). (1975). "The delphi method". Reading, MA: Addison-Wesley, Vol. 1975: 3-12.

Liu, Z., Nannan Wang ve Qiushi Du (2025). "The Governance of PPP Project Resilience: A Hybrid DMATEL-ISM Ap-proach". Systems, 13(4): 277.

Livaniou, S., Georgios Chatzistelios, Dimitrios V. Lyridis ve Evangelos Bellos (2022). "LNG vs. MDO in marine fuel emissions tracking". Sustainability, 14(7): 3860.

Ma, L., Xiaoxue Ma, He Lan, Yang Liu ve Wanyi Deng (2022). "A data-driven method for modeling human factors in maritime accidents by integrating DEMATEL and FCM based on HFACS: A case of ship collisions". Ocean Engineering, 266: 112699.

Ma, Z., Chunfu Shao, Sheqiang Ma ve Zeng Ye (2011). "Constructing road safety performance indicators using fuzzy delphi method and grey delphi method". Expert systems with applications, 38(3): 1509-1514.

Merien-Paul, R. H., Hossein Enshaei ve Shantha Gamini Jayasinghe (2019). "Effects of fuel-specific energy and operational demands on cost/emission estimates: A case study on heavy fuel-oil vs liquefied natural gas". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 69: 77-89.

Millet, Y., Yahya Fidan ve Nagehan Akoğlu (2021). "Ticari Gemilerden Kaynaklanan Karbon Emisyonları Üzerine Bir Araştırma". Ekonomi İşletme ve Yönetim Dergisi, 5(2): 223-242.

Miola, A., Biagio Ciuffo, Emiliano Giovine ve Marleen Marra (2010). Regulating air emissions from ships. The state of the art on methodologies, technologies and policy options. Joint Research Centre Reference Report, Luxembourg, EUR24602EN: 978-992.

Mohammadfam, I., Ali Asghar Khajevandi, Hesam Dehghani, Mohammad Babamiri, ve Maryam Farhadian (2022). "Analysis of factors affecting human reliability in the mining process design using Fuzzy Delphi and DEMATEL methods". Sustainability, 14(13): 8168.

Molitor, Edward (2012). Feasibility Study on LNG Fuelled Short Sea and Coastal Shipping in the Wider Caribbean Region. SSPA SWEDEN AB: London, UK.

Moreira, Paulo (2016). "Liquefied natural gas as an alternative fuel: A voyage-based model". Transport & Logistics: The International Journal, 16(41): 1–10.

Nayyar, Prdeep (2010). The use of biodiesel fuels in the U.S. marine industry. PRIME, Inc., Maritime Administration (MARAD), U.S. Department of Transportation. Rapor No. DTMA1D05007/TO090000055.

Nubli, H., Aprianur Fajri, Aditya Rio Prabowo, Khaeroman ve Jung Min Sohn (2022). "CFD implementation to mitigate the LNG leakage consequences: A review of explosion accident calculation on LNG-fueled ships". Procedia Structural Integrity, 41: 343-350.

Nubli, H. ve Jung Min Sohn (2022). "CFD-based simulation of accidental fuel release from LNG-fuelled ships". Ships and Offshore Structures, 17(2): 339-358.

Oh, J., Donghoi Kim, Simon Roussanaly ve Youngsub Lim (2024). "Greenhouse gas emissions of shipping with onboard carbon capture under the FuelEU Maritime regulation: A well-to-wake evaluation of different propulsion scenarios". Chemical Engineering Journal, 498: 155407.

Olsen, J. H. B., ve Matthias Baumgart (2010). LNG-fueled vessels in the Norwegian short-sea market: A cost-effective response to environmental regulation. Yüksek Lisans Tezi. Norveç Ekonomi Okulu, Norveç.

Opricovic, S., ve Gwo-Hshıung Tzeng (2003). "Defuzzification within a multicriteria decision model". International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 11(05): 635-652.

Parfomak, P. W., John Frittelli, Richard K. Lattanzio ve Michael Ratner (2019). "LNG as a maritime fuel: prospects and policy". Congressional Research Service: Washington, DC, USA.

Park, S., Byongug Jeong, Joon Young Yoon ve Jeom Kee Paik (2018). "A study on factors affecting the safety zone in ship-to-ship LNG bunkering". Ships and Offshore Structures, 13(sup1): 312-321.

Pavlenko, N., Bryan Comer, Yuanrong Zhou, Nigel Clark ve Dan Rutherford (2020). The climate implications of using LNG as a marine fuel. International Council on Clean Transportation (ICCT).

Pekşen, Duygu Yıldırım (2015). Alternatif Gemi Yakıtı Lng; Net Bugünkü Değer Yöntemiyle Değerlendirilmesi. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı. İstanbul.

Peng, Y., Xinzhe Zhao, Tianli Zuo, Wenyuan Wang ve Xiangqun Song (2021). "A systematic literature review on port LNG bunkering station". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 91: 102704.

Rafieyan, A., Hadi Sarvari, Michael Beer ve Daniel W. M. Chan (2024). "Determining the effective factors leading to incidence of human error accidents in industrial parks construction projects: Results of a fuzzy Delphi survey". International Journal of Construction Management, 24(7): 748-760.

Raharjo, P. S., U. Ciptomulyono, Okol S. Suharyo, Joko Purnomo ve April Kukuh Susilo (2024). "Causal Analysis of the Posture of the Indonesian Navy and the

Development of the Strategic Environment in Supporting the Archipelago's Sea Defense Strategy". Journal of Maritime Research, 21(1): 45-53.
Rahimi, G., Touraj Dehghani ve Mohammad Sadegh Jokar (2020). "The Potential of Using LNG as a fuel in Marine Transport". World Journal of Environmental Biosciences, 9(1-2020): 39-44.
Ramadlon, A. S. ve Taufik Akbar Taufik (2020). "Selection of gyro stabilized antenna devices in the maritime telecommunication project using the Delphi, DEMATEL and ANP method". 2nd International Conference on Management of Technology, Innovation, and Project Management (ICMOTIPM 2020). IEEE: Conference Proceedings.
Ramsay, W., Erik Fridell ve Mario Michan (2023). "Maritime energy transition: future fuels and future emissions". Journal of Marine Science and Application, 22(4): 681-692.
Resmî Gazete (03.07.2009). Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, 27277
Resmî Gazete (17.05.2014). Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik, 29003
Ruano, M., Chien-Yi Huang, Phi-Hung Nguyen, Lan-Anh Thi Nguyen, Hong-Quan Le ve Linh-Chi Tran (2023). "Enhancing sustainability in Belize's ecotourism sector: A fuzzy Delphi and fuzzy DEMATEL Investigation of Key Indicators". Mathematics, 11(13): 2816.
Sahoo, P. B. B. ve Vikas Thakur (2024). "The factors obstructing the blockchain adoption in supply chain finance: a hybrid fuzzy DELPHI-AHP-DEMATEL approach". International Journal of Quality & Reliability Management, 41(9): 2292-2310.
Salarkia, M. ve S. Golabi (2023). "Liquefied Natural Gas (LNG): Alternative Marine Fuel Restriction and Regulation Considerations, Environmental and Economic Assessment". Energy Engineering and Management, 10(4): 44-59.
Salem, A. ve Mohamed Hassan (2023). "Exploring the usage of the LNG as fuel for offshore vessels". Maritime Research and Technology, 2(1): 18-26.
Sari, D. P., Tuswan Tuswan, Teguh Muttaqie, Meitha Soetardjo, Totok Tri Putrastyo Murwatono, Ridwan Utina, Yuniati Yuniati, Aditya Rio Prabowo ve Saefulloh Misbahudin (2023). "Critical overview and challenge of representative lng-fuelled ships on potential ghg emission reduction". EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy. Vol. 10, Issue 03: 1792-1808
Schinas, O. ve M. Butler (2016). "Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships". Ocean Engineering, 122: 84-96.
Shanta, M. H., Imtiaz Ahmed Choudhury ve Sheak Salman (2024). "Municipal solid waste management: Identification and analysis of technology selection criteria using Fuzzy Delphi and Fuzzy DEMATEL technique". Heliyon, 10(1).
Sharafian, A., Paul Blomerus ve Walter Mérida (2019). "Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential". Energy Policy, 131: 332-346.
Si, S. L., Xiao-Yue You, Hu-Chen Liu ve Ping Zhang (2018). "DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications". Mathematical problems in Engineering, 2018(1): 3696457.

Singh, S., Kaustov Chakraborty, Saurabh Pratap, Manisha Singh ve Fuli Zhou (2024). "Analysing factors influencing the adoption of blockchain technology in maritime freight enterprises". Enterprise Information Systems, 18(4): 2326676.

Soner, Ömer (2021). "Application of fuzzy DEMATEL method for analysing of accidents in enclosed spaces onboard ships". Ocean engineering, 220: 108507.

Stewart, R. D., ve Carol J. Wolosz (2015). "Development of the Adoption of Liquefied Natural Gas as a Fuel for Shipping on the Great Lakes". Transportation Research Record, 2479(1): 1-8.

Taghavifar, H. ve Lokukaluge P. Perera (2023). "Life cycle emission and cost assessment for LNG-retrofitted vessels: The risk and sensitivity analyses under fuel property and load variations". Ocean Engineering, 282: 114940.

Tekeli, M. M., Seher Suendam Arıcı, Şükrü İlke Sezer, Emre Akyüz ve Paolo Gardoni (2024). "Predicting Human Reliability for Shore-based LNG Bunkering Operation Process on Tanker Ships Using SLIM and Improved Z-numbers". Journal of Marine Science and Application: 1-13.

Tsai, F. M. ve Tat-Dat Bui (2020). "Assessing sustainable consumption practices on cruise ships". Maritime Business Review, 5(2): 229-247.

Tuswan, T., Dian Purnama Sari, Teguh Muttaqie, Aditya Rio Prabowo, Meitha Soetardjo, Totok Tri Putrastyo Murwantono, Ridwan Utina ve Yuniati Yuniati (2023). "Representative application of LNG-fuelled ships: a critical overview on potential GHG emission reductions and economic benefits". Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development, 74(1): 63-83.

Unseki, Takashi (2013). "Environmentally superior LNG-Fueled vessels". Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 50(2): 37-43.

Vasilev, M., Milan Kalajdžić ve Nikola Momčilović (2025). "On energy efficiency of tankers: EEDI, EEXI and CII". Ocean Engineering, 317: 120028.

Venkatesh, V. G., Abraham Zhang, Sunil Luthra, Rameshwar Dubey, Nachiappan Subramanian ve S. Mangla (2017). "Barriers to coastal shipping development: An Indian perspective". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 52: 362-378.

Venkatesh, V. G., Abraham Zhang, Eric Deakins, Venkatesh Mani ve Yangyan Shi (2020). "Supply chain integration barriers to port-centric logistics—An emerging economy perspective". Transportation Journal, 59(3): 215-253.

Vuskovic, B., Igor Rudan ve Matthew Sumner (2023). "Fostering sustainable LNG bunkering operations: development of regulatory framework". Sustainability, 15(9): 7358.

Wan, C., Xinping Yan, Di Zhang ve Zaili Yang (2019). "Analysis of risk factors influencing the safety of maritime container supply chains". International Journal of Shipping and Transport Logistics, 11(6): 476-507.

Wang, Y., Laurie Wright ve Pengfei Zhang (2021). "Economic feasibility of LNG fuel for trans ocean-going ships: A case study of container ships". Maritime Technology and Research, 3(2): 202-222.

Wang, M. J. J. ve Tien-Chien Chang (1995). "Tool steel materials selection under fuzzy environment". Fuzzy Sets and Systems, 72(3): 263-270.

Wang, S. ve Theo Notteboom (2014). "The adoption of liquefied natural gas as a ship fuel: A systematic review of perspectives and challenges". Transport Reviews, 34(6): 749-774.

Wu, W. W. ve Yu-Ting Lee (2007). "Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method". Expert systems with applications, 32(2): 499-507.

Xu, H. ve Dong Yang (2020). "LNG-fuelled container ship sailing on the Arctic Sea: Economic and emission assessment". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 87: 102556.

Yao, A. F., Maxime Sèbe, Laura Recuero Virto, Abdelhak Nassiri ve Hervé Dumez (2024). "The effect of LNG bunkering on port competitiveness using multilevel data analysis". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 132: 104240.

Yorulmaz, M. ve Kaan Karabulut (2022). "Analyzing the factors determining the effectiveness of the international safety management code applied on ships through the fuzzy DEMATEL method". Safety science, 155: 105872.

Yusof, N., Nor Laily Hashim ve Azham Hussain (2022). "A review of fuzzy Delphi method application in human-computer interaction studies". In AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, Vol. 2472, No. 1.

Zaloom, V. ve Vinit Subhedar (2008). Use of the Delphi method to prioritize events impacting operations in the maritime domain. Yüksek Lisans Tezi. Lamar Üniversitesi, Texas, USA.

3. Elektronik Kaynaklar

Abaxx (10 Ocak 2025). Energy Market. https://abaxx.exchange/markets-energy / 10 Ocak 2025.

ABS (2024). EU ETS: Inclusion of Maritime Emissions. https://ww2.eagle.org/en.html / 22 Kasım 2024.

ABS FuelEU Maritime Yönetmeliği (2024). FuelEU Maritime. https://ww2.eagle.org/en/rules-and-resources/regulatory-updates/fueleu-maritime.html#tabs-1a5f223a74-item-66a565a3ca-tab / 22 Kasım 2024.

Aktürk, M. (2023). Understanding Methane Slip: A Key Challenge on the LNG-Powered Vessels. https://www.linkedin.com/pulse/understanding-methane-slip-its-environmental-impact-from-akturk-tk4bc / 30 Aralık 2024.

American Bureau Shipping (2022). LNG as a Marine Fuel. https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/sustainability-whitepaper-lng-as-marine-fuel.pdf / 26 Ekim 2024.

Analytical Solutions and Products (2024). LNG Terminals over the world: Complete list and map 2024. https://www.asap.nl/lng-terminals-over-the-world-complete-list-and-map-2024/ 14 Aralık 2024.

Clean Arctic Alliance (2024). LNG: The Threat to the Arctic from Liquified Natural Gas as a Shipping Fuel. https://cleanarctic.org/campaigns/the-arctic-climate-crisis/lng-the-threat-to-the-arctic-from-liquified-natural-gas-as-a-shipping-fuel/ 13 Aralık 2024.

Clean Arctic Alliance (25 Kasım 2024). Infographic: Emission Control Areas – Reducing Air Pollution From Shipping. https://cleanarctic.org/2023/06/28/infographic-emission-control-areas-reducing-air-pollution-from-shipping/ 13 Aralık 2024.

Denizcilik Bilgileri (30 Eylül 2018). Ship Energy Efficiency. https://www.denizcilikbilgileri.com/energy-efficiency-nedir-i-nasildoldurulmalidir/ 19 Aralık 2024.

DNV AFI (2025). Alternative Fuels Insight (AFI). https://www.dnv.com/services/alternative-fuels-insights-afi 128171 / 10 Ocak 2025.

DNV (2024). FuelEU Maritime. https://www.dnv.com/maritime/insights/ topics/fueleu-maritime/19 Aralık 2024.

Environmental Protection Agency (2024).Air Pollution: Current and Future Challenges. https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/air-pollution-current-and-future-challenges#PP / 26 Kasım 2024.

European Commission (2024).What is the EU ETS. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en / 22 Kasım 2024.

European Commission (2024). Decarbonising maritime transport – FuelEU Maritime. https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en / 17 Aralık 2024.

Faber, J (2017). Analysis Of The LNG Market Development In The EU. https://transport.ec.europa.eu/document/download/ 6d764330-ca1a-43b3-ab9d-3ac9ee3d24d7_en?filename=2015-12-lng-lot3.pdf / 22 Ocak 2025.

GARD (8 Ekim 2024). Regional sulphur emission limits at a glance. https://gard.no/insights/regional-sulphur-emission-limits-at-a-glance/ 22 Kasım 2024.

IMO (2024). EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system. https://www.imo.org/en/MediaCentre/ HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx / 17 Aralık 2024.

IMO (2024). Nitrogen Oxides (NOx) Regulation 13. https://www.imo.org/ en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation- 13.aspx / 21 Kasım 2024.

IMO (2016). Studies on the feasibility and use of LNG as a fuel for shipping. https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/STUDIES-ON-THE-FEASIBILITY-AND-USE-OF-LNG-AS-A-FUEL-FOR-SHIPPING-.pdf / 30 Kasım 2024.

IMO (30 Ekim 2023). List Of Special Areas, Emission Control Areas And Particularly Sensitive Sea Areas. https://wwwcdn.imo.org/localresources/ en/OurWork/Circulars/Documents/MEPC.1Circ.778Rev.4%20%20Special%20Areas%20and%20Emission%20Control%20 Areas%20ECAs)%20under%20MARPOL%20(Secretariat).pdf / 21 Kasım 2024.

MarineDealNews (2 Temmuz 2020). Armatörün VLSFO ile imtihanı. https://www.marinedealnews.com/ armatorun-vlsfo-ile-imtihani/ 23 Kasım 2024.

Maritima Optima (19 Haziran 2024). Global Sulphur regulations, ECA and SECA zones. https://www.maritimeoptima.com/ insights/global-sulphur-regulations-eca-seca-zones / 19 Kasım 2024.

OffshoreEnergy (7 Şubat 2024). Japan’s first LNG-powered Capesize bulker delivered. https://www.offshore-energy.biz/japans-first-lng-powered-capesize-bulker-delivered/ 15 Aralık 2024.

OffshoreEnergy (2024). LNG Dual Fuel VLCC Ship. https://www.offshore-energy.biz/cset-worlds-first-lng-dual-fuel-vlcc-gets-on-ungcsesg20list/ ?cdmwt =QQAIAAIU2LGCEQFYlWOUJwRomgJDnhZirNonig / 16 Aralık 2024.

OffshoreEnergy (2022). COSCO: ‘World’s first’ LNG dual-fuel VLCC delivered in China. https://www.offshore-energy.biz/cosco-worlds-first-lng-dual-fuel-vlcc-delivered-in-china/ 16 Aralık 2024.

OffshoreEnergy (8 Ekim 2024). SEA-LNG: LNG-powered fleet will reach more than 2,000 vessels as demand grows. https://www.offshore-energy.biz/sea-lng-lng-powered-fleet-will-reach-more-than-2000-vessels-as-demand-grows/ 23 Aralık 2024.

Riviera (27 Mart 2024). Cruise ships and clean(er) fuel. https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/cruise-ships-and-cleaner-fuel-80116 / 15 Aralık 2024.

Rystad Energy (2024). Clean Shipping Solution. https://www.rystadenergy.com/services/clean-shipping-solution / 30 Kasım 2024.

SEA-LNG (2024). Global fleet. https://sea-lng.org/why-lng/global-fleet / 26 Ekim 2024.

SEA- LNG (8 Ekim 2024). LNG-fuelled vessels accelerate to 6% of the global fleet. https://sea-lng.org/2024/10/lng-fuelled-vessels-accelerate-to-6-of-the-global-fleet / 23 Aralık 2024.

SEA-LNG (17 Kasım 2024). Shipping Industry Decarbonisation: Fuel Choice And The Costs Of Achieving Regulatory Compliance. https://sea-lng.org/wp-content/ uploads/2024/12/Cost-of-Compliance_Nov24_v4.pdf / 19 Ocak 2025.

SEA-LNG (2020). LNG As A Marıne Fuel-The Investment Opportunıty SEA\LNG Study - Newbuild 14,000 TEU Liner Vessel On Asıa-Uswc Trade. https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2020/04/SEA-LNGStudy FINAL2.pdf / 12 Aralık 2024.

SEA-LNG Bunker Navigator (Ocak 2025). Bunker Navigator Introduction. https://sea-lng.org/bunker-navigator-introduction/ 11 Ocak 2025.

Türk Loydu (2024). FuelEU Maritime. https://www.turkloydu.org/pdf-files/bulten/2024/ Turk%20 Loydu %20Newsletter% 2005-2024.pdf / 30 Aralık 2024.

Wartsila (2024). LNG as fuel for ships: expert answers to 17 important questions. https://www.wartsila.com/ insights/article/lng-fuel-for-thought-in-our-deep-dive-q-a /16 Ekim 2024.

EKLER

Ek-1. Etik Kurul İzni

Evrak Tarih ve Sayısı: 20.01.2025-E.717243

T.C.
KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Sosyal ve Beşeri Bilimler Etik Kurulu

Sayı : E-94094268-204.01.07-717243
Konu : Etik Kurul Onayı hk.

SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

İlgi : 26.12.2024 tarihli ve E-78783421-204.01.07-704389 sayılı yazı.

Sosyal ve Beşeri Bilimler Etik Kurulunun 17/01/2025 tarih ve 2025/01 no lu toplantısında alınan 5 sıra sayılı kararı aşağıda sunulmuştur.

Bilgilerinize arz/rica ederim.

Karar No 5: Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğünün 26.12.2024 tarih ve 704389 sayılı yazısı görüşüldü. Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Yüksek Lisans Programı öğrencisi Orçun TOPRAKÇI'nın, Dr. Öğr. Üyesi Ozan Hikmet ARICAN'ın danışmanlığında yürüteceği "LNG Yakıtlı Gemilerin Deniz Taşımacılığına Etkisinin İncelenmesi: Bulanık Delphi ve Bulanık Dematel Yöntemleri ile Analizi" başlıklı çalışmanın bilimsel araştırma ve yayın etiği açısından uygun olduğuna oy birliği ile karar verildi

Prof.Dr. Elif KARAGÜN
Kurul Başkanı

Ek-2. Uzmanlardan Elde Edilen Dilsel Değişkenlerden Dönüştürülen Bulanık Sayıların Ortalama Değerler ($\tilde{\omega}_j$) Tablosu

	C1			C2			C3			C4			C5			C6			C7			C8			C9			C10			C11			C12			C13			C14			C15			C16			C17		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
DM1	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00
DM2	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00
DM3	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,00	0,00	0,25	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00
DM4	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00
DM5	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50
DM6	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00
DM7	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75
DM8	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75
ORT	0,63	0,88	0,97	0,53	0,78	0,94	0,44	0,69	0,88	0,19	0,34	0,56	0,28	0,47	0,69	0,47	0,72	0,94	0,50	0,75	0,94	0,19	0,44	0,69	0,66	0,91	0,97	0,53	0,75	0,91	0,50	0,75	0,94	0,31	0,56	0,81	0,47	0,72	0,94	0,50	0,75	0,94	0,50	0,75	0,94	0,56	0,81	0,97	0,44	0,69	0,88

C18			C19			C20			C21			C22			C23			C24			C25			C26			C27			C28			C29			C30			C31			C32			C33			C34			C35		
a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,25
0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	0,50
0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,00	0,25	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	0,50
0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	1,00	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,25
0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	0,50
0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	0,50
0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	0,50
0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,25
0,47	0,72	0,94	0,50	0,75	0,91	0,50	0,75	0,94	0,50	0,75	0,94	0,50	0,75	0,94	0,44	0,69	0,88	0,50	0,75	0,91	0,41	0,66	0,84	0,19	0,41	0,66	0,56	0,81	0,94	0,53	0,78	0,94	0,50	0,75	0,88	0,56	0,81	0,97	0,41	0,66	0,88	0,31	0,53	0,78	0,44	0,69	0,94	0,47	0,72	0,94	0,41	0,66	0,41

Ek-3. Önem Sıralaması İçin Belirleyici Bir Değer Olan S_J Değerleri Tablosu

	C1			C2			C3			C4			C5			C6			C7			C8			C9			C10			C11			C12			C13			C14			C15			C16			C17		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
DM1	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00
DM2	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00
DM3	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,00	0,00	0,25	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00
DM4	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00
DM5	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50
DM6	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00
DM7	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75
DM8	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75
ORT	0,63	0,88	0,97	0,53	0,78	0,94	0,44	0,69	0,88	0,19	0,34	0,56	0,28	0,47	0,69	0,47	0,72	0,94	0,50	0,75	0,94	0,19	0,44	0,69	0,66	0,91	0,97	0,53	0,75	0,91	0,50	0,75	0,94	0,31	0,56	0,81	0,47	0,72	0,94	0,50	0,75	0,94	0,50	0,75	0,94	0,56	0,81	0,97	0,44	0,69	0,88
SJ	0,82			0,75			0,67			0,36			0,48			0,71			0,73			0,44			0,84			0,73			0,73			0,56			0,71			0,73			0,73			0,78			0,67		

	C18			C19			C20			C21			C22			C23			C24			C25			C26			C27			C28			C29			C30			C31			C32			C33			C34			C35		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,25
	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	0,50
	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,00	0,25	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	0,50
	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,25	0,50	0,75	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,25
	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,00	0,25	0,50	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	0,50
	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	0,50
	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	0,50
	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,50	0,75	1,00	0,75	1,00	1,00	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,25
0,47	**0,72**	**0,94**	**0,50**	**0,75**	**0,91**	**0,50**	**0,75**	**0,94**	**0,50**	**0,75**	**0,94**	**0,50**	**0,75**	**0,94**	**0,44**	**0,69**	**0,88**	**0,50**	**0,75**	**0,91**	**0,41**	**0,66**	**0,84**	**0,19**	**0,41**	**0,66**	**0,56**	**0,81**	**0,94**	**0,53**	**0,78**	**0,94**	**0,50**	**0,75**	**0,88**	**0,56**	**0,81**	**0,97**	**0,41**	**0,66**	**0,88**	**0,31**	**0,53**	**0,78**	**0,44**	**0,69**	**0,94**	**0,47**	**0,72**	**0,94**	**0,41**	**0,66**	**0,41**
0,71			**0,72**			**0,73**			**0,73**			**0,73**			**0,67**			**0,72**			**0,64**			**0,42**			**0,77**			**0,75**			**0,71**			**0,78**			**0,65**			**0,54**			**0,69**			**0,71**			**0,49**		

Ek-4. Görüş Birliği İçin Belirleyici Bir Değer Olan EA_j Değerleri Tablosu

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33	C34	C35
DM1	0,10	0,18	0,17	0,29	0,40	0,04	0,04	0,19	0,08	0,20	0,04	0,06	0,04	0,21	0,04	0,05	0,09	0,04	0,21	0,21	0,21	0,21	0,27	0,21	0,12	0,33	0,16	0,18	0,46	0,15	0,40	0,47	0,06	0,21	0,16
DM2	0,10	0,04	0,09	0,15	0,04	0,04	0,23	0,06	0,13	0,06	0,04	0,19	0,04	0,04	0,04	0,15	0,09	0,23	0,05	0,21	0,04	0,23	0,09	0,21	0,14	0,08	0,06	0,18	0,22	0,15	0,11	0,04	0,19	0,04	0,09
DM3	0,33	0,04	0,09	0,29	0,40	0,04	0,04	0,19	0,35	0,65	0,21	0,19	0,23	0,04	0,04	0,05	0,27	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,09	0,21	0,12	0,35	0,16	0,18	0,22	0,15	0,11	0,21	0,06	0,04	0,09
DM4	0,10	0,18	0,27	0,56	0,45	0,21	0,21	0,06	0,08	0,06	0,04	0,06	0,04	0,21	0,21	0,15	0,27	0,21	0,21	0,23	0,23	0,04	0,17	0,22	0,14	0,08	0,16	0,25	0,22	0,05	0,29	0,21	0,06	0,04	0,16
DM5	0,10	0,04	0,09	0,15	0,27	0,04	0,04	0,06	0,08	0,06	0,04	0,06	0,04	0,04	0,21	0,05	0,42	0,04	0,21	0,04	0,04	0,21	0,27	0,05	0,29	0,17	0,28	0,04	0,22	0,05	0,11	0,29	0,06	0,23	0,09
DM6	0,10	0,04	0,27	0,15	0,04	0,23	0,21	0,06	0,08	0,06	0,23	0,06	0,04	0,48	0,23	0,15	0,09	0,04	0,22	0,23	0,23	0,23	0,17	0,05	0,29	0,17	0,16	0,04	0,07	0,05	0,11	0,21	0,06	0,04	0,09
DM7	0,10	0,18	0,17	0,29	0,27	0,04	0,23	0,06	0,08	0,20	0,21	0,06	0,21	0,04	0,04	0,05	0,17	0,04	0,22	0,04	0,04	0,04	0,17	0,05	0,14	0,33	0,06	0,04	0,22	0,05	0,15	0,21	0,06	0,04	0,09
DM8	0,10	0,50	0,42	0,13	0,23	0,21	0,04	0,06	0,08	0,20	0,23	0,06	0,21	0,04	0,23	0,28	0,17	0,21	0,22	0,04	0,21	0,04	0,17	0,47	0,39	0,17	0,28	0,25	0,22	0,28	0,15	0,04	0,19	0,21	0,16
d	0,13	0,15	0,19	0,25	0,27	0,11	0,13	0,09	0,12	0,18	0,13	0,09	0,11	0,13	0,13	0,12	0,19	0,11	0,18	0,13	0,13	0,13	0,17	0,19	0,20	0,21	0,16	0,15	0,23	0,12	0,17	0,21	0,09	0,11	0,12
THd	0,15																																		
EJ	7	7	5	4	2	7	6	8	7	7	6	8	7	7	6	7	5	7	2	6	6	6	6	3	5	5	6	6	1	7	6	6	8	7	8
EAj	88%	88%	63%	50%	25%	88%	75%	100%	88%	88%	75%	100%	88%	88%	75%	88%	63%	88%	25%	75%	75%	75%	75%	38%	63%	63%	75%	75%	13%	88%	75%	75%	100%	88%	100%
SJ	0,82	0,75	0,67	0,36	0,48	0,71	0,73	0,44	0,84	0,73	0,73	0,56	0,71	0,73	0,73	0,78	0,67	0,71	0,72	0,73	0,73	0,73	0,67	0,72	0,64	0,42	0,77	0,75	0,71	0,78	0,65	0,54	0,69	0,71	0,49

Ek-5. Bulanık DEMATEL Anket Formu

1. Adınız ve Soyadınız?	
2. Yaşınız?	
3. Cinsiyetiniz?	
4. Eğitim Düzeyiniz?	
5. Çalışma Süreniz?	
6. Göreviniz?	

Etki Dereceleri

1: Etkisi Yok
2: Çok Az Etkili
3: Az Etkili
4: Fazla Etkili
5: Çok Fazla Etkili

		Egzoz Emisyonuna (NOx, SOx, PM, CO2)	Hava Kirliliğine	Makine Tipine	Yanmamış Metan Gazına	Emniyet Konularına	Güvenlik Konularına	Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketimine	Egzoz Temizleme Sistemi Gereksinimine	LNG Yakıtı Sermaye Maliyetine	LNG Yakıt Satış Fiyatına	Operasyon Maliyetine	Yakıt Tasarrufuna	Bakım Maliyetine	Sefer ve Rota Planlamasına	Yakıt İkmal Ağına	Operasyon Standartlarına	Rekabete	LNG Yakıt Transferi Kurallarına
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
Egzoz Emisyonunun (NOx, SOx, PM, CO2)	F1	-																	
Hava Kirliliğinin	F2		-																
Makine Tipinin	F3			-															
Yanmamış Metan Gazının	F4				-														
Emniyet Konularının	F5					-													
Güvenlik Konularının	F6						-												
Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketiminin	F7							-											
Karbon Azaltım Sistemi Gereksiniminin	F8								-										
LNG Yakıtı Sermaye Maliyetinin	F9									-									
LNG Yakıt Satış Fiyatının	F10										-								
Operasyon Maliyetinin	F11											-							
Yakıt Tasarrufunun	F12												-						
Bakım Maliyetin	F13													-					
Sefer ve Rota Planlamasının	F14														-				
Yakıt İkmal Ağının	F15															-			
Operasyon Standartlarının	F16																-		
Rekabetin	F17																	-	
LNG Yakıt Transferi Kurallarının	F18																		-

Ek-6. Bulanık Ortalama Direkt Etki Matrisi ($\tilde{Z}$)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
F1	(0.000,0.000,0.000)	(0.700,0.900,1.000)	(0.114,0.214,0.414)	(0.200,0.329,0.529)	(0.214,0.329,0.529)	(0.143,0.243,0.443)	(0.300,0.500,0.700)	(0.700,0.900,1.000)	(0.229,0.357,0.557)	(0.286,0.471,0.671)	(0.357,0.529,0.714)	(0.171,0.300,0.500)	(0.086,0.214,0.414)	(0.557,0.729,0.857)	(0.300,0.500,0.700)	(0.500,0.700,0.900)	(0.586,0.786,0.943)	(0.471,0.671,0.857)
F2	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.000,0.000)	(0.143,0.243,0.443)	(0.000,0.100,0.300)	(0.057,0.157,0.357)	(0.057,0.157,0.357)	(0.143,0.243,0.443)	(0.500,0.700,0.900)	(0.271,0.443,0.643)	(0.271,0.443,0.643)	(0.129,0.243,0.443)	(0.000,0.100,0.300)	(0.086,0.186,0.386)	(0.286,0.471,0.671)	(0.086,0.214,0.414)	(0.229,0.357,0.557)	(0.143,0.243,0.443)	(0.000,0.100,0.300)
F3	(0.700,0.900,1.000)	(0.471,0.671,0.871)	(0.000,0.000,0.000)	(0.700,0.900,1.000)	(0.500,0.700,0.900)	(0.200,0.300,0.500)	(0.643,0.843,0.971)	(0.614,0.814,0.957)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.671,0.871,0.986)	(0.614,0.814,0.957)	(0.614,0.814,0.957)	(0.500,0.700,0.900)	(0.057,0.157,0.357)	(0.314,0.471,0.657)	(0.700,0.900,1.000)	(0.000,0.100,0.300)
F4	(0.700,0.900,1.000)	(0.700,0.900,1.000)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.000,0.000)	(0.457,0.643,0.843)	(0.257,0.414,0.614)	(0.000,0.100,0.300)	(0.429,0.614,0.814)	(0.257,0.414,0.614)	(0.386,0.557,0.757)	(0.414,0.614,0.814)	(0.057,0.157,0.357)	(0.114,0.243,0.443)	(0.671,0.871,0.986)	(0.086,0.186,0.386)	(0.571,0.757,0.900)	(0.700,0.900,1.000)	(0.257,0.443,0.643)
F5	(0.057,0.157,0.357)	(0.000,0.100,0.300)	(0.157,0.271,0.471)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.000,0.000)	(0.643,0.843,0.971)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.243,0.414,0.614)	(0.357,0.529,0.714)	(0.314,0.471,0.671)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.529,0.729,0.914)	(0.557,0.757,0.929)	(0.643,0.843,0.971)	(0.214,0.386,0.586)	(0.671,0.871,0.986)
F6	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.443,0.643,0.843)	(0.000,0.000,0.000)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.086,0.186,0.386)	(0.143,0.243,0.443)	(0.114,0.214,0.414)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.329,0.500,0.700)	(0.414,0.614,0.814)	(0.414,0.614,0.814)	(0.200,0.357,0.557)	(0.357,0.557,0.757)
F7	(0.386,0.586,0.786)	(0.343,0.500,0.700)	(0.057,0.157,0.357)	(0.000,0.100,0.300)	(0.057,0.157,0.357)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.000,0.000)	(0.143,0.243,0.443)	(0.243,0.414,0.614)	(0.300,0.500,0.700)	(0.700,0.900,1.000)	(0.700,0.900,1.000)	(0.586,0.786,0.943)	(0.529,0.729,0.914)	(0.243,0.386,0.586)	(0.200,0.300,0.500)	(0.214,0.386,0.586)	(0.000,0.100,0.300)
F8	(0.443,0.643,0.829)	(0.371,0.557,0.757)	(0.071,0.186,0.386)	(0.000,0.100,0.300)	(0.057,0.157,0.357)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.000,0.000)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.414,0.586,0.786)	(0.057,0.157,0.357)	(0.257,0.386,0.586)	(0.200,0.329,0.529)	(0.000,0.100,0.300)	(0.243,0.414,0.614)	(0.614,0.814,0.957)	(0.000,0.100,0.300)
F9	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.114,0.243,0.443)	(0.086,0.214,0.414)	(0.086,0.214,0.414)	(0.143,0.243,0.443)	(0.157,0.271,0.471)	(0.000,0.000,0.000)	(0.700,0.900,1.000)	(0.614,0.814,0.957)	(0.086,0.186,0.386)	(0.100,0.214,0.414)	(0.271,0.443,0.643)	(0.529,0.729,0.900)	(0.243,0.386,0.586)	(0.471,0.671,0.871)	(0.000,0.100,0.300)
F10	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.157,0.300,0.500)	(0.000,0.100,0.300)	(0.057,0.157,0.357)	(0.057,0.157,0.357)	(0.214,0.329,0.529)	(0.214,0.329,0.529)	(0.500,0.700,0.900)	(0.000,0.000,0.000)	(0.700,0.900,1.000)	(0.200,0.300,0.500)	(0.243,0.357,0.557)	(0.700,0.900,1.000)	(0.529,0.729,0.914)	(0.171,0.300,0.500)	(0.643,0.843,0.971)	(0.000,0.100,0.300)
F11	(0.057,0.157,0.357)	(0.000,0.100,0.300)	(0.114,0.214,0.414)	(0.114,0.214,0.414)	(0.243,0.386,0.586)	(0.086,0.214,0.414)	(0.057,0.157,0.357)	(0.057,0.157,0.357)	(0.000,0.100,0.300)	(0.057,0.157,0.357)	(0.000,0.000,0.000)	(0.186,0.300,0.500)	(0.200,0.300,0.500)	(0.443,0.643,0.829)	(0.329,0.471,0.671)	(0.129,0.243,0.443)	(0.586,0.786,0.914)	(0.143,0.243,0.443)
F12	(0.214,0.357,0.557)	(0.214,0.357,0.557)	(0.029,0.129,0.329)	(0.114,0.243,0.443)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.614,0.814,0.957)	(0.229,0.357,0.557)	(0.200,0.329,0.529)	(0.271,0.443,0.643)	(0.700,0.900,1.000)	(0.000,0.000,0.000)	(0.557,0.757,0.929)	(0.643,0.843,0.971)	(0.386,0.557,0.757)	(0.000,0.100,0.300)	(0.271,0.414,0.614)	(0.000,0.100,0.300)
F13	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.286,0.443,0.643)	(0.000,0.100,0.300)	(0.100,0.214,0.414)	(0.043,0.157,0.357)	(0.229,0.357,0.557)	(0.171,0.271,0.471)	(0.257,0.414,0.614)	(0.271,0.443,0.643)	(0.700,0.900,1.000)	(0.157,0.271,0.471)	(0.000,0.000,0.000)	(0.357,0.529,0.729)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.029,0.129,0.329)	(0.000,0.100,0.300)
F14	(0.143,0.271,0.471)	(0.114,0.243,0.443)	(0.000,0.100,0.300)	(0.143,0.271,0.471)	(0.300,0.500,0.700)	(0.214,0.329,0.529)	(0.557,0.757,0.929)	(0.086,0.214,0.414)	(0.086,0.214,0.414)	(0.300,0.471,0.671)	(0.614,0.814,0.957)	(0.643,0.843,0.971)	(0.286,0.471,0.671)	(0.000,0.000,0.000)	(0.471,0.643,0.786)	(0.200,0.357,0.557)	(0.071,0.186,0.386)	(0.000,0.100,0.300)
F15	(0.286,0.414,0.614)	(0.229,0.357,0.557)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.500,0.700,0.900)	(0.500,0.700,0.900)	(0.086,0.214,0.414)	(0.000,0.100,0.300)	(0.500,0.700,0.900)	(0.614,0.814,0.957)	(0.586,0.786,0.929)	(0.443,0.643,0.843)	(0.214,0.386,0.586)	(0.700,0.900,1.000)	(0.000,0.000,0.000)	(0.143,0.243,0.443)	(0.443,0.643,0.843)	(0.443,0.643,0.843)
F16	(0.414,0.586,0.786)	(0.214,0.386,0.586)	(0.086,0.214,0.414)	(0.000,0.100,0.300)	(0.700,0.900,1.000)	(0.614,0.814,0.957)	(0.200,0.357,0.557)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.529,0.729,0.914)	(0.200,0.329,0.514)	(0.029,0.129,0.329)	(0.100,0.214,0.400)	(0.100,0.214,0.414)	(0.000,0.000,0.000)	(0.200,0.300,0.500)	(0.500,0.700,0.900)
F17	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.414,0.614,0.814)	(0.414,0.614,0.814)	(0.000,0.100,0.300)	(0.457,0.643,0.843)	(0.500,0.700,0.900)	(0.700,0.900,1.000)	(0.500,0.700,0.900)	(0.329,0.500,0.700)	(0.143,0.243,0.443)	(0.114,0.214,0.414)	(0.529,0.729,0.914)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.000,0.000)	(0.000,0.100,0.300)
F18	(0.286,0.443,0.643)	(0.171,0.271,0.471)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.586,0.786,0.943)	(0.343,0.529,0.729)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.000,0.100,0.300)	(0.057,0.157,0.357)	(0.186,0.300,0.500)	(0.029,0.129,0.329)	(0.029,0.129,0.329)	(0.129,0.243,0.443)	(0.557,0.757,0.929)	(0.414,0.614,0.786)	(0.157,0.271,0.471)	(0.000,0.000,0.000)

Ek-7. Bulanık Normalize Edilmiş Direkt Etki Matrisi ($\tilde{X}$)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
F1	(0.000,0.000,0.000)	(0.050,0.064,0.072)	(0.008,0.015,0.030)	(0.014,0.024,0.038)	(0.015,0.024,0.038)	(0.010,0.017,0.032)	(0.021,0.036,0.050)	(0.050,0.064,0.072)	(0.016,0.026,0.040)	(0.020,0.034,0.048)	(0.026,0.038,0.051)	(0.012,0.021,0.036)	(0.006,0.015,0.030)	(0.040,0.052,0.061)	(0.021,0.036,0.050)	(0.036,0.050,0.064)	(0.042,0.056,0.067)	(0.034,0.048,0.061)
F2	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.000,0.000)	(0.010,0.017,0.032)	(0.000,0.007,0.021)	(0.004,0.011,0.026)	(0.004,0.011,0.026)	(0.010,0.017,0.032)	(0.036,0.050,0.064)	(0.019,0.032,0.046)	(0.019,0.032,0.046)	(0.009,0.017,0.032)	(0.000,0.007,0.021)	(0.006,0.013,0.028)	(0.020,0.034,0.048)	(0.006,0.015,0.030)	(0.016,0.026,0.040)	(0.010,0.017,0.032)	(0.000,0.007,0.021)
F3	(0.050,0.064,0.072)	(0.034,0.048,0.062)	(0.000,0.000,0.000)	(0.050,0.064,0.072)	(0.036,0.050,0.064)	(0.014,0.021,0.036)	(0.046,0.060,0.069)	(0.044,0.058,0.068)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.048,0.062,0.071)	(0.044,0.058,0.068)	(0.044,0.058,0.068)	(0.036,0.050,0.064)	(0.004,0.011,0.026)	(0.022,0.034,0.047)	(0.050,0.064,0.072)	(0.000,0.007,0.021)
F4	(0.050,0.064,0.072)	(0.050,0.064,0.072)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.000,0.000)	(0.033,0.046,0.060)	(0.018,0.030,0.044)	(0.000,0.007,0.021)	(0.031,0.044,0.058)	(0.018,0.030,0.044)	(0.028,0.040,0.054)	(0.030,0.044,0.058)	(0.004,0.011,0.026)	(0.008,0.017,0.032)	(0.048,0.062,0.071)	(0.006,0.013,0.028)	(0.041,0.054,0.064)	(0.050,0.064,0.072)	(0.018,0.032,0.046)
F5	(0.004,0.011,0.026)	(0.000,0.007,0.021)	(0.011,0.019,0.034)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.000,0.000)	(0.046,0.060,0.069)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.017,0.030,0.044)	(0.026,0.038,0.051)	(0.022,0.034,0.048)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.038,0.052,0.065)	(0.040,0.054,0.066)	(0.046,0.060,0.069)	(0.015,0.028,0.042)	(0.048,0.062,0.071)
F6	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.032,0.046,0.060)	(0.000,0.000,0.000)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.006,0.013,0.028)	(0.010,0.017,0.032)	(0.008,0.015,0.030)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.024,0.036,0.050)	(0.030,0.044,0.058)	(0.030,0.044,0.058)	(0.014,0.026,0.040)	(0.026,0.040,0.054)
F7	(0.028,0.042,0.056)	(0.025,0.036,0.050)	(0.004,0.011,0.026)	(0.000,0.007,0.021)	(0.004,0.011,0.026)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.000,0.000)	(0.010,0.017,0.032)	(0.017,0.030,0.044)	(0.021,0.036,0.050)	(0.050,0.064,0.072)	(0.050,0.064,0.072)	(0.042,0.056,0.067)	(0.038,0.052,0.065)	(0.017,0.028,0.042)	(0.014,0.021,0.036)	(0.015,0.028,0.042)	(0.000,0.007,0.021)
F8	(0.032,0.046,0.059)	(0.027,0.040,0.054)	(0.005,0.013,0.028)	(0.000,0.007,0.021)	(0.004,0.011,0.026)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.000,0.000)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.030,0.042,0.056)	(0.004,0.011,0.026)	(0.018,0.028,0.042)	(0.014,0.024,0.038)	(0.000,0.007,0.021)	(0.017,0.030,0.044)	(0.044,0.058,0.068)	(0.000,0.007,0.021)
F9	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.008,0.017,0.032)	(0.006,0.015,0.030)	(0.006,0.015,0.030)	(0.010,0.017,0.032)	(0.011,0.019,0.034)	(0.000,0.000,0.000)	(0.050,0.064,0.072)	(0.044,0.058,0.068)	(0.006,0.013,0.028)	(0.007,0.015,0.030)	(0.019,0.032,0.046)	(0.038,0.052,0.064)	(0.017,0.028,0.042)	(0.034,0.048,0.062)	(0.000,0.007,0.021)
F10	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.011,0.021,0.036)	(0.000,0.007,0.021)	(0.004,0.011,0.026)	(0.004,0.011,0.026)	(0.015,0.024,0.038)	(0.015,0.024,0.038)	(0.036,0.050,0.064)	(0.000,0.000,0.000)	(0.050,0.064,0.072)	(0.014,0.021,0.036)	(0.017,0.026,0.040)	(0.050,0.064,0.072)	(0.038,0.052,0.065)	(0.012,0.021,0.036)	(0.046,0.060,0.069)	(0.000,0.007,0.021)
F11	(0.004,0.011,0.026)	(0.000,0.007,0.021)	(0.008,0.015,0.030)	(0.008,0.015,0.030)	(0.017,0.028,0.042)	(0.006,0.015,0.030)	(0.004,0.011,0.026)	(0.004,0.011,0.026)	(0.000,0.007,0.021)	(0.004,0.011,0.026)	(0.000,0.000,0.000)	(0.013,0.021,0.036)	(0.014,0.021,0.036)	(0.032,0.046,0.059)	(0.024,0.034,0.048)	(0.009,0.017,0.032)	(0.042,0.056,0.065)	(0.010,0.017,0.032)
F12	(0.015,0.026,0.040)	(0.015,0.026,0.040)	(0.002,0.009,0.024)	(0.008,0.017,0.032)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.044,0.058,0.068)	(0.016,0.026,0.040)	(0.014,0.024,0.038)	(0.019,0.032,0.046)	(0.050,0.064,0.072)	(0.000,0.000,0.000)	(0.040,0.054,0.066)	(0.046,0.060,0.069)	(0.028,0.040,0.054)	(0.000,0.007,0.021)	(0.019,0.030,0.044)	(0.000,0.007,0.021)
F13	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.020,0.032,0.046)	(0.000,0.007,0.021)	(0.007,0.015,0.030)	(0.003,0.011,0.026)	(0.016,0.026,0.040)	(0.012,0.019,0.034)	(0.018,0.030,0.044)	(0.019,0.032,0.046)	(0.050,0.064,0.072)	(0.011,0.019,0.034)	(0.000,0.000,0.000)	(0.026,0.038,0.052)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.002,0.009,0.024)	(0.000,0.007,0.021)
F14	(0.010,0.019,0.034)	(0.008,0.017,0.032)	(0.000,0.007,0.021)	(0.010,0.019,0.034)	(0.021,0.036,0.050)	(0.015,0.024,0.038)	(0.040,0.054,0.066)	(0.006,0.015,0.030)	(0.006,0.015,0.030)	(0.021,0.034,0.048)	(0.044,0.058,0.068)	(0.046,0.060,0.069)	(0.020,0.034,0.048)	(0.000,0.000,0.000)	(0.034,0.046,0.056)	(0.014,0.026,0.040)	(0.005,0.013,0.028)	(0.000,0.007,0.021)
F15	(0.020,0.030,0.044)	(0.016,0.026,0.040)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.036,0.050,0.064)	(0.036,0.050,0.064)	(0.006,0.015,0.030)	(0.000,0.007,0.021)	(0.036,0.050,0.064)	(0.044,0.058,0.068)	(0.042,0.056,0.066)	(0.032,0.046,0.060)	(0.015,0.028,0.042)	(0.050,0.064,0.072)	(0.000,0.000,0.000)	(0.010,0.017,0.032)	(0.032,0.046,0.060)	(0.032,0.046,0.060)
F16	(0.030,0.042,0.056)	(0.015,0.028,0.042)	(0.006,0.015,0.030)	(0.000,0.007,0.021)	(0.050,0.064,0.072)	(0.044,0.058,0.068)	(0.014,0.026,0.040)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.038,0.052,0.065)	(0.014,0.024,0.037)	(0.002,0.009,0.024)	(0.007,0.015,0.029)	(0.007,0.015,0.030)	(0.000,0.000,0.000)	(0.014,0.021,0.036)	(0.036,0.050,0.064)
F17	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.030,0.044,0.058)	(0.030,0.044,0.058)	(0.000,0.007,0.021)	(0.033,0.046,0.060)	(0.036,0.050,0.064)	(0.050,0.064,0.072)	(0.036,0.050,0.064)	(0.024,0.036,0.050)	(0.010,0.017,0.032)	(0.008,0.015,0.030)	(0.038,0.052,0.065)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.000,0.000)	(0.000,0.007,0.021)
F18	(0.020,0.032,0.046)	(0.012,0.019,0.034)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.042,0.056,0.067)	(0.025,0.038,0.052)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.000,0.007,0.021)	(0.004,0.011,0.026)	(0.013,0.021,0.036)	(0.002,0.009,0.024)	(0.002,0.009,0.024)	(0.009,0.017,0.032)	(0.040,0.054,0.066)	(0.030,0.044,0.056)	(0.011,0.019,0.034)	(0.000,0.000,0.000)

Ek-8. Bulanık Toplam İlişki Matrisi (T̃)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
F1	(0.008,0.026,0.097)	(0.056,0.087,0.162)	(0.011,0.029,0.100)	(0.016,0.036,0.107)	(0.026,0.057,0.151)	(0.019,0.046,0.133)	(0.028,0.058,0.141)	(0.057,0.088,0.166)	(0.024,0.052,0.139)	(0.031,0.066,0.160)	(0.043,0.087,0.198)	(0.021,0.050,0.136)	(0.014,0.041,0.126)	(0.053,0.093,0.194)	(0.034,0.072,0.170)	(0.045,0.078,0.168)	(0.055,0.094,0.191)	(0.039,0.069,0.150)
F2	(0.003,0.021,0.087)	(0.003,0.013,0.065)	(0.011,0.025,0.079)	(0.001,0.015,0.070)	(0.008,0.028,0.103)	(0.007,0.025,0.094)	(0.013,0.030,0.095)	(0.038,0.062,0.128)	(0.022,0.045,0.113)	(0.023,0.048,0.122)	(0.018,0.045,0.134)	(0.004,0.023,0.091)	(0.010,0.027,0.094)	(0.026,0.056,0.139)	(0.011,0.034,0.112)	(0.020,0.040,0.111)	(0.017,0.039,0.119)	(0.002,0.018,0.083)
F3	(0.060,0.094,0.175)	(0.044,0.079,0.166)	(0.004,0.018,0.079)	(0.053,0.079,0.147)	(0.048,0.086,0.186)	(0.024,0.053,0.146)	(0.055,0.088,0.170)	(0.056,0.090,0.176)	(0.010,0.040,0.133)	(0.015,0.048,0.148)	(0.071,0.121,0.233)	(0.055,0.091,0.178)	(0.054,0.089,0.175)	(0.056,0.102,0.214)	(0.019,0.053,0.159)	(0.034,0.069,0.164)	(0.067,0.110,0.209)	(0.008,0.035,0.123)
F4	(0.055,0.086,0.163)	(0.056,0.087,0.162)	(0.003,0.022,0.093)	(0.002,0.014,0.070)	(0.044,0.079,0.172)	(0.028,0.059,0.145)	(0.007,0.031,0.114)	(0.040,0.070,0.154)	(0.027,0.056,0.143)	(0.039,0.073,0.166)	(0.047,0.092,0.204)	(0.013,0.039,0.126)	(0.014,0.041,0.126)	(0.062,0.103,0.203)	(0.020,0.052,0.150)	(0.051,0.084,0.170)	(0.063,0.102,0.195)	(0.026,0.056,0.137)
F5	(0.010,0.031,0.107)	(0.004,0.025,0.100)	(0.013,0.030,0.093)	(0.002,0.018,0.082)	(0.012,0.032,0.102)	(0.054,0.084,0.156)	(0.005,0.026,0.101)	(0.003,0.024,0.102)	(0.023,0.050,0.128)	(0.033,0.063,0.146)	(0.036,0.072,0.174)	(0.007,0.031,0.109)	(0.005,0.026,0.104)	(0.048,0.085,0.179)	(0.051,0.085,0.170)	(0.053,0.083,0.159)	(0.025,0.058,0.149)	(0.054,0.082,0.149)
F6	(0.003,0.021,0.089)	(0.002,0.020,0.087)	(0.001,0.015,0.071)	(0.001,0.014,0.071)	(0.038,0.066,0.141)	(0.007,0.020,0.076)	(0.003,0.020,0.087)	(0.002,0.019,0.088)	(0.010,0.029,0.098)	(0.015,0.037,0.112)	(0.016,0.043,0.135)	(0.004,0.024,0.094)	(0.002,0.020,0.089)	(0.030,0.059,0.145)	(0.036,0.065,0.144)	(0.034,0.061,0.133)	(0.019,0.046,0.128)	(0.030,0.055,0.120)
F7	(0.032,0.060,0.138)	(0.029,0.054,0.131)	(0.007,0.024,0.089)	(0.003,0.020,0.085)	(0.011,0.037,0.125)	(0.005,0.028,0.110)	(0.008,0.024,0.086)	(0.017,0.040,0.118)	(0.024,0.052,0.133)	(0.030,0.064,0.150)	(0.066,0.107,0.203)	(0.057,0.087,0.160)	(0.049,0.078,0.153)	(0.051,0.089,0.186)	(0.027,0.058,0.149)	(0.020,0.043,0.128)	(0.026,0.060,0.154)	(0.004,0.025,0.101)
F8	(0.034,0.058,0.124)	(0.029,0.053,0.119)	(0.007,0.022,0.078)	(0.001,0.016,0.072)	(0.009,0.031,0.107)	(0.004,0.024,0.094)	(0.003,0.021,0.088)	(0.006,0.018,0.072)	(0.004,0.023,0.093)	(0.006,0.027,0.103)	(0.037,0.069,0.160)	(0.008,0.028,0.098)	(0.021,0.041,0.110)	(0.021,0.047,0.134)	(0.006,0.028,0.108)	(0.021,0.045,0.118)	(0.049,0.079,0.156)	(0.003,0.021,0.087)
F9	(0.004,0.024,0.096)	(0.003,0.022,0.094)	(0.002,0.017,0.078)	(0.009,0.026,0.086)	(0.013,0.039,0.120)	(0.012,0.036,0.110)	(0.014,0.033,0.104)	(0.015,0.036,0.109)	(0.007,0.021,0.082)	(0.057,0.087,0.159)	(0.056,0.093,0.185)	(0.013,0.035,0.109)	(0.012,0.033,0.107)	(0.030,0.063,0.154)	(0.046,0.078,0.159)	(0.022,0.046,0.124)	(0.043,0.076,0.162)	(0.004,0.024,0.094)
F10	(0.005,0.026,0.102)	(0.004,0.024,0.100)	(0.013,0.032,0.095)	(0.002,0.019,0.082)	(0.013,0.038,0.123)	(0.011,0.034,0.112)	(0.021,0.043,0.117)	(0.020,0.042,0.119)	(0.042,0.071,0.148)	(0.011,0.030,0.099)	(0.065,0.104,0.197)	(0.024,0.047,0.124)	(0.024,0.047,0.123)	(0.061,0.097,0.184)	(0.048,0.081,0.167)	(0.017,0.042,0.123)	(0.056,0.090,0.175)	(0.004,0.024,0.098)
F11	(0.008,0.025,0.093)	(0.003,0.021,0.088)	(0.009,0.023,0.079)	(0.009,0.023,0.079)	(0.024,0.048,0.123)	(0.012,0.033,0.103)	(0.008,0.026,0.092)	(0.008,0.026,0.095)	(0.005,0.024,0.094)	(0.011,0.033,0.108)	(0.010,0.031,0.108)	(0.019,0.039,0.109)	(0.018,0.036,0.105)	(0.039,0.070,0.154)	(0.030,0.056,0.134)	(0.013,0.034,0.107)	(0.047,0.077,0.153)	(0.014,0.031,0.097)
F12	(0.020,0.044,0.121)	(0.020,0.044,0.119)	(0.005,0.021,0.085)	(0.010,0.028,0.092)	(0.007,0.032,0.118)	(0.005,0.027,0.107)	(0.049,0.077,0.147)	(0.022,0.046,0.123)	(0.021,0.046,0.125)	(0.028,0.060,0.144)	(0.065,0.105,0.199)	(0.010,0.026,0.091)	(0.047,0.076,0.150)	(0.058,0.095,0.186)	(0.036,0.068,0.157)	(0.006,0.029,0.112)	(0.030,0.061,0.152)	(0.003,0.024,0.099)
F13	(0.003,0.021,0.088)	(0.003,0.020,0.086)	(0.022,0.039,0.094)	(0.002,0.016,0.072)	(0.011,0.033,0.108)	(0.006,0.025,0.094)	(0.021,0.040,0.105)	(0.015,0.033,0.101)	(0.021,0.043,0.112)	(0.024,0.049,0.123)	(0.058,0.092,0.173)	(0.017,0.037,0.105)	(0.005,0.016,0.070)	(0.033,0.063,0.147)	(0.006,0.029,0.107)	(0.004,0.023,0.095)	(0.010,0.033,0.113)	(0.002,0.018,0.084)
F14	(0.015,0.039,0.115)	(0.013,0.036,0.111)	(0.002,0.019,0.083)	(0.012,0.030,0.093)	(0.028,0.060,0.145)	(0.021,0.045,0.123)	(0.045,0.073,0.145)	(0.011,0.034,0.112)	(0.013,0.038,0.116)	(0.030,0.060,0.145)	(0.058,0.098,0.195)	(0.053,0.082,0.155)	(0.028,0.056,0.132)	(0.014,0.039,0.121)	(0.043,0.074,0.159)	(0.020,0.048,0.130)	(0.016,0.045,0.137)	(0.005,0.026,0.101)
F15	(0.025,0.050,0.134)	(0.020,0.045,0.128)	(0.003,0.021,0.091)	(0.002,0.020,0.091)	(0.045,0.081,0.174)	(0.044,0.076,0.162)	(0.014,0.039,0.122)	(0.007,0.031,0.116)	(0.043,0.075,0.161)	(0.055,0.090,0.179)	(0.059,0.103,0.211)	(0.040,0.072,0.158)	(0.022,0.051,0.136)	(0.064,0.105,0.204)	(0.016,0.041,0.125)	(0.019,0.046,0.137)	(0.044,0.082,0.183)	(0.038,0.067,0.148)
F16	(0.033,0.058,0.131)	(0.019,0.044,0.116)	(0.008,0.025,0.087)	(0.002,0.017,0.079)	(0.057,0.088,0.162)	(0.050,0.079,0.149)	(0.018,0.041,0.113)	(0.005,0.025,0.100)	(0.005,0.026,0.102)	(0.007,0.031,0.113)	(0.047,0.084,0.181)	(0.019,0.042,0.117)	(0.006,0.026,0.101)	(0.018,0.048,0.140)	(0.017,0.045,0.130)	(0.008,0.025,0.090)	(0.022,0.049,0.138)	(0.042,0.069,0.139)
F17	(0.004,0.024,0.100)	(0.003,0.023,0.098)	(0.002,0.018,0.081)	(0.001,0.017,0.080)	(0.036,0.066,0.151)	(0.035,0.064,0.141)	(0.004,0.025,0.099)	(0.036,0.062,0.138)	(0.042,0.070,0.147)	(0.058,0.089,0.165)	(0.049,0.088,0.188)	(0.029,0.055,0.133)	(0.016,0.037,0.113)	(0.021,0.051,0.146)	(0.048,0.081,0.167)	(0.006,0.030,0.111)	(0.012,0.033,0.110)	(0.005,0.026,0.099)
F18	(0.023,0.046,0.114)	(0.015,0.033,0.101)	(0.002,0.016,0.073)	(0.001,0.015,0.073)	(0.049,0.077,0.151)	(0.031,0.058,0.128)	(0.003,0.021,0.089)	(0.003,0.021,0.091)	(0.005,0.024,0.096)	(0.010,0.032,0.109)	(0.022,0.051,0.143)	(0.006,0.026,0.098)	(0.005,0.023,0.093)	(0.018,0.045,0.132)	(0.046,0.076,0.154)	(0.035,0.063,0.134)	(0.018,0.043,0.126)	(0.007,0.019,0.072)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:	Orçun TOPRAKÇI
Yabancı Dili	:	İngilizce

Eğitim Durumu

Lise	:	Deniz Lisesi/Heybeliada
Lisans	:	Deniz Harp Okulu – Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans	:	Denizcilik İşletmeleri Yönetimi (Tezsiz)

Çalıştığı Kurum

2008-halen	:	Deniz Kuvvetleri Komutanlığı (Deniz Subayı)

Eserleri :

(1) Toprakçı, O. ve Ozan H. Arıcan (2025). "Analysing the Impact of LNG Fuelled Ships on Maritime Transport by Fuzzy Delphi Method". Ed. Mariana IVANOVA, Dragica ODZAKLIESKA, Rasim YILMAZ. Proceedings of XXIII. International Balkan and Near Eastern Social Sciences Congress Series on Economics, Business and Management-Plovdiv / Bulgaria, March 15-16, 2025: 565-573.
(2) Toprakçı, O. ve Ozan H. Arıcan (2025). "A Fuzzy-Based Assessment of LNG-Fuelled Ships' Impact on Maritime Logistics". Balkan and Near Eastern Journal of Social Sciences (BNEJSS), 11(1).
(3) Arıcan, O. H., Orçun Toprakçı, Ali U. Ünal ve Gönül K. Özbağ (2025). "Analyzing Carbon Regulation Impacts on Maritime Sector Using Fuzzy Delphi–DEMATEL–ISM Approach". Systems, 13(11): 955.
(4) Toprakçı, O. ve Ozan H. Arıcan (2025). "Denizyolu Ve Kıyı Yapılarında Yeni Yaklaşımların Çevresel Sürdürülebilirlik Perspektifinden Değerlendirilmesi". Ulaştırma ve Altyapı Dergisi, (3): 1-17.
(5) Toprakçı, Orçun (2025). "LNG Yakıtlı Gemilerin Deniz Taşımacılığına Etkisinin İncelenmesi". Yaz Yayınları, 71.