

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DENİZ TAŞIMACILIĞI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR BİYORYAKIT
DEĞERLENDİRME MODELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağatayhan SEVİM

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DENİZ TAŞIMACILIĞI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR BİYORYAKIT
DEĞERLENDİRME MODELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Çağatayhan SEVİM
(512201005)**

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Burak ZİNCİR

HAZİRAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 512201005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Çağatayhan SEVİM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DENİZ TAŞIMACILIĞI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR BİYORYAKIT DEĞERLENDİRME MODELİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Burak ZİNCİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Cengiz DENİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Görkem KÖKKÜLÜNK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 23 Mayıs 2023
Savunma Tarihi : 07 Haziran 2023





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın tamamlanması sürecinde tespitleri, yapıcı eleştirileri ve tavsiyeleri ile çalışmama değer katan danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Burak ZİNCİR hocama, manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve kıymetli eşim Gülçin SEVİM'e teşekkür ederim.

Bu çalışma; İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince desteklenmiştir. Proje numarası: MYL-2022-43655

Haziran 2023

Çağatayhan SEVİM
Gemi Makineleri İşletme Müh.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Deniz Taşımacılığında Mevcut Durum	1
1.2 Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) Aksiyonları	3
1.3 Denizcilik Sektöründe Emisyonları İnceleme ve Raporlama Altyapısı	9
1.4 Alternatif Yakıtlara Geçiş Süreci	11
1.4.1 Geçiş sürecinde biyoyakıtların rolü	11
1.4.2 Denizcilik sektöründe biyoyakıt uygulamaları	12
2. BİYOYAKITLAR	15
2.1 Biyodizeller	16
2.1.1 Fatty acid methyl ester (FAME)	16
2.1.2 Hydrotreated vegetable oil (HVO)	17
2.1.3 Fischer-Tropsch (FT) dizel	17
2.1.4 Dimethyl ether (Bio-DME)	17
2.2 Biyoalkoller	18
2.2.1 Bioethanol	18
2.2.2 Biomethanol	19
2.3 Biyoyağlar	19
2.3.1 Straight vegetable oil (SVO)	20
2.3.2 Pyrolysis oil	20
2.3.3 Hydrothermal liquefaction (HTL) biyoyağ	21
2.3.4 Solvolysis oil	21
2.4 Biyogazlar	22
2.5 Biyoyakıtların Jenerasyonları	23
3. SÜRDÜRÜLEBİLİR BİYOYAKIT SEÇİMİ İÇİN DEĞERLENDİRME MODELİ	25
3.1 Değerlendirme Modelinin Motivasyonu	25
3.2 Değerlendirmeye Alınacak Biyoyakıtların Belirlenmesi	25
3.3 Değerlendirme Modeli Aracı	27
3.4 Literatürde AHP Çalışmaları	28
3.5 Değerlendirme Kriterlerinin ve Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi	30
3.5.1 Kriterlerin açıklanması ve alternatiflerin kriterler üzerindeki performansı	32

3.5.1.1 Teknolojik olgunluk seviyesi (TRL indeksi).....	32
3.5.1.2 Maliyet	33
3.5.1.3 Hammadde mevcudiyeti.....	35
3.5.1.4 Uyumluluk.....	36
3.5.1.5 Emniyet	37
3.5.1.6 ILUC etkisi	38
3.5.1.7 WTW emisyon	39
4. DEĞERLENDİRME MODELİNİN SONUÇLARI.....	43
4.1 Kriterlerin Ağırlıkları	43
4.2 Biyoyakıt Alternatiflerinin Kriterler Üzerindeki Performans Ağırlıkları	45
4.2.1 Biyoyakıtların TRL indeks kriterindeki performans ağırlıkları	45
4.2.2 Biyoyakıtların maliyet kriterindeki performans ağırlıkları	47
4.2.3 Biyoyakıtların hammadde mevcudiyeti kriterindeki performans ağırlıkları	49
4.2.4 Biyoyakıtların uyumluluk kriterindeki performans ağırlıkları	50
4.2.5 Biyoyakıtların emniyet kriterindeki performans ağırlıkları	52
4.2.6 Biyoyakıtların ILUC etkisi kriterindeki performans ağırlıkları	54
4.2.7 Biyoyakıtların WTW emisyon kriterindeki performans ağırlıkları.....	55
4.3 Biyoyakıtların Toplam Performans Skorları	57
4.4 Duyarlılık Analizi.....	58
5. SONUÇ	63
5.1 Değerlendirme	66
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
AHP	: Analitik Hiyerarşı Prosesi
ARGE	: Araştırma ve Geliştirme
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
CI	: Consistency Index (Tutarlılık İndeksi)
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
CR	: Consistency Ratio (Tutarlılık Oranı)
DCS	: Data Collection System (Veri Toplama Sistemi)
DME	: Dimethyl Ether
EEA	: European Environment Agency (Avrupa Çevre Ajansı)
EEDI	: Energy Efficiency Design Index (Enerji Verimliliği Dizayn indeksi)
EEOI	: Energy Efficiency Operating Indicator (Enerji Verimliliği Operasyon Göstergesi)
EFTA	: European Free Trade Association (Avrupa Serbest Ticaret Birliği)
FAME	: Fatty Acid Methyl Ester (Yağ Asidi Metil Esteri)
FT-DİZEL	: Fischer-Tropsch Dizel
GHG	: Greenhouse Gas (Sera Gazları)
GIA	: Global Industry Alliance (Küresel Endüstri İttifakı)
GJ	: Gigajoule
GLERL	: Great Lakes Environmental Research Laboratory (Büyük Göller Çevre Araştırma Laboratuvarı)
GMN	: Global MTCC Network (Küresel MTCC Ağı)
H₂	: Hidrojen
HC	: Hidrokarbon
HFO	: Heavy Fuel Oil (Ağır yakıt)
HTL	: Hydrothermal Liquefaction (Hidrotermal Sıvılaştırma)
HVO	: Hydrotreated Vegetable Oil (Hidroişlenmiř Bitkisel Yağ)
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)

ILUC	: Indirect Land Use Change (Dolaylı Tarım Arazisi Değişimi)
IMO	: International Maritime Organization (Uluslararası Denizcilik Örgütü)
JEN	: Jenerasyon
LBM	: Liquefied Biomethane (Sıvılaştırılmış Biyometan)
LCA	: Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Analizi)
LNG	: Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz)
LPG	: Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
MCDM	: Multiple Criteria Decision Making (Çok Kriterli Karar Verme)
MDO	: Marine Diesel Oil (Deniz Dizel Yakıtı)
MEPC	: Marine Environment Protection Committee (Deniz Çevresini Koruma Komitesi)
MGO	: Marine Gas Oil (Deniz Gaz Yakıtı)
MRV	: Monitoring, Reporting and Verification (İzleme, Raporlama ve Doğrulama)
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration (Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi)
NO_x	: Nitrojen Oksitleri
PM	: Partikül Madde
SEEMP	: Ship Energy Efficiency Management Plan (Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı)
SO_x	: Kükürt Oksitler
SVO	: Straight Vegetable Oil (Saf Bitki Yağı)
TRL	: Technological Readness Level (Teknolojik Olgunluk Seviyesi)
TTW	: Tank-to-wake
UCO	: Used Cooking Oil (Kullanılmış Pişirme Yağı)
ULSFO	: Ultra-Low Sulphur Fuel Oil (Ultra Düşük Kükürtlü Ağır Yakıt)
UNCTAD	: United Nations Conference on Trade and Development (Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı)
VLSFO	: Very Low Sulphur Fuel Oil (Çok Düşük Kükürtlü Ağır Yakıt)
WTT	: Well-to-tank
WTW	: Well-to-wake

SEMBOLLER

a_i	: i tipi kriter veya alternatif satırının toplamı
V_b	: En iyi alternatif değeri
V_{dif}	: Alternatifler arasındaki en yüksek fark değeri
V_{int}	: İkili karşılaştırmanın aralık değeri
V_w	: En kötü alternatif değeri
W_i	: i tipi kriter veya alternatifin performans ağırlıklandırması
λ_{max}	: Matrisin maksimum özdeğeri



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : EEDI fazları.....	5
Çizelge 1.2 : Konteyner gemileri için faz 3 azaltma oranları.....	5
Çizelge 1.3 : IMO'nun ilk sera gazı strateji planı aday önlemleri.....	7
Çizelge 1.4 : MRV ve DCS sistemlerinin özellikleri.....	10
Çizelge 1.5 : Mevcut gemilerin yaş dağılımı.....	12
Çizelge 3.1 : AHP uygulama adımları.....	27
Çizelge 3.2 : Göreceli önem ölçeği.....	28
Çizelge 3.3 : Random indeks değerleri.....	28
Çizelge 3.4 : Teknolojik olgunluk seviyeleri (TRL indeks).....	32
Çizelge 3.5 : TRL indeks puanları.....	33
Çizelge 3.6 : Maliyet puanları.....	34
Çizelge 3.7 : Hammadde mevcudiyeti puanları.....	36
Çizelge 3.8 : Uyumluluk puanları.....	37
Çizelge 3.9 : Emniyet puanları.....	38
Çizelge 3.10 : ILUC etkisi puanları.....	39
Çizelge 3.11 : WTW emisyon puanları.....	41
Çizelge 4.1 : Uzmanların kriter puanları.....	43
Çizelge 4.2 : Kriterler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.....	44
Çizelge 4.3 : Aralıklara göre kriterlerin ikili karşılaştırma ölçeği.....	44
Çizelge 4.4 : Kriter ağırlıkları.....	45
Çizelge 4.5 : TRL indeks kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.....	46
Çizelge 4.6 : TRL indeks kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.....	46
Çizelge 4.7 : Biyoyakıtların TRL indeks performansı ağırlıkları.....	47
Çizelge 4.8 : Maliyet kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.....	47
Çizelge 4.9 : Maliyet kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.....	48
Çizelge 4.10 : Biyoyakıtların maliyet performansı ağırlıkları.....	48
Çizelge 4.11 : Hammadde mevcudiyeti kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.....	49
Çizelge 4.12 : Hammadde mevcudiyeti kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.....	49
Çizelge 4.13 : Biyoyakıtların hammadde mevcudiyeti performansı ağırlıkları.....	50
Çizelge 4.14 : Uyumluluk kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.....	51
Çizelge 4.15 : Uyumluluk kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.....	51
Çizelge 4.16 : Biyoyakıtların uyumluluk performansı ağırlıkları.....	52
Çizelge 4.17 : Emniyet kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.....	52
Çizelge 4.18 : Emniyet kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.....	53
Çizelge 4.19 : Biyoyakıtların emniyet performansı ağırlıkları.....	53
Çizelge 4.20 : ILUC etkisi kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.....	54
Çizelge 4.21 : ILUC etkisi kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.....	54
Çizelge 4.22 : Biyoyakıtların ILUC etkisi performansı ağırlıkları.....	55

Çizelge 4.23 : WTW emisyon kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.....	56
Çizelge 4.24 : WTW emisyon kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.....	56
Çizelge 4.25 : Biyoyakıtların WTW emisyon performansı ağırlıkları.	57
Çizelge 4.26 : Biyoyakıtların toplam performans skorları.	58
Çizelge 4.27 : Senaryolara göre yeni kriter ağırlıkları.....	59
Çizelge 4.28 : Senaryolara göre toplam skorlar.....	60



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Küresel emisyon verileri	3
Şekil 2.1 : Biyoyakıtların gruplandırılması.....	15
Şekil 2.2 : Biyodizel türleri ve üretim prosesleri.....	16
Şekil 2.3 : Biyoalkol türleri ve üretim prosesleri.....	18
Şekil 2.4 : Biyoyağ türleri ve üretim prosesleri.....	20
Şekil 2.5 : Biyogaz üretim prosesleri.....	22
Şekil 3.1 : Seçilen biyoyakıtlar.....	26
Şekil 3.2 : Değerlendirme kriterleri.....	31
Şekil 4.1 : Farklı senaryolarda duyarlılık analizi.....	61



DENİZ TAŞIMACILIĞI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR BİYOYAKIT DEĞERLENDİRME MODELİ

ÖZET

Küresel ısınma ve iklim değişikliği, küresel ölçekte insanlığın karşı karşıya olduğu ciddi sorunlardır. Bu sorunların derinleşmesinin önemli nedenlerinden biri, küresel ölçekte artan enerji ihtiyacını karşılamak için atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının da artmasıdır. Taşımacılık sektörü küresel ekonominin ve uluslararası ticaretin önemli bir parçası halindedir ve enerji ihtiyacı yüksek bir sektördür. Deniz taşımacılığı ise dünya ticaretinin çok büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Deniz taşımacılığı yapan gemilerin büyük çoğunluğunun içten yanmalı dizel makinelere sahip olması ve fosil yakıtların yaygın olarak kullanılması nedeniyle atmosfere önemli miktarda sera gazı salınmaktadır. Salınımı yapılan bu egzoz emisyonlarının çevreye olan zararının yanı sıra insan üzerinde de olumsuz etkilere sahip olduğu bilinmektedir. Denizcilik sektöründeki bu sorunun üstesinden gelmek için Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) bir strateji planı benimsemiş ve araştırmacılar, çalışmalarını alternatif deniz yakıtları üzerine yoğunlaştırmıştır. Farklı alternatif deniz yakıtı seçenekleri olmasına rağmen biyoyakıtlar alternatif deniz yakıtları arasında karakteristik özellikleri sebebiyle önemli bir konuma sahiptir. Bu sebeple bu tez çalışması biyoyakıtlar üzerinde yapılmıştır.

Tezin birinci bölümünde deniz taşımacılığındaki mevcut durum hakkında genel bilgiler verilmiştir. Daha sonra IMO'nun denizcilik sektörünü karbosuzlaştırmak adına aldığı aksiyonlar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Denizcilik sektöründe emisyonları inceleme ve raporlama altyapısı incelenmiş ve mevcut sistemler kendi arasında karşılaştırılmıştır. Ayrıca mevcut emisyon raporlama ve izleme sistemlerinin küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi sorunlara kalıcı çözüm getirmekte yetersiz kaldığı tespit edilmiş ve bu sistemlerin yerine yeni bir yaklaşım olan Yaşam Dönüsü Analizi (LCA) bakış açısı ile izleme ve raporlama sistemi önerilmiştir. Bunların yanı sıra sektörün alternatif yakıtlara geçiş sürecinden bahsedilmiş ve biyoyakıtların bu geçiş sürecindeki rolü hakkında bilgilere yer verilmiştir. Denizcilik sektöründeki biyoyakıt uygulamalarına da yer vererek biyoyakıtların potansiyeline dikkat çekilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde biyoyakıtların gruplandırılması yapılmış ve jenerasyonları hakkında bilgiler verilmiştir. Biyoyakıt alternatiflerinin üretim yöntemleri, hammadde seçenekleri gibi konular detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde deniz taşımacılığı için sürdürülebilir biyoyakıt değerlendirme modeli oluşturulmuştur. Değerlendirme modeli olarak çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılmıştır. AHP yöntemi tanıtılmış, uygulama adımları hakkında bilgiler verilmiş ve literatürdeki AHP çalışmalarına da değinilmiştir. Değerlendirmeye tabi tutulacak biyoyakıtların belirlenmesinde her grup ve her jenerasyondan seçimler yapılmıştır. Değerlendirme kriterleri belirlenirken, denizcilik sektörü için daha önceki çalışmalarda yaygın olarak

kullanılan emniyet, teknolojik olgunluk (TRL indeksi), hammadde mevcudiyeti, ve maliyet seçilmiş, bu kriterlerin yanı sıra biyoyakıtların alternatif yakıtlara geçiş sürecinde drop-in özelliğinin etkisini gözlemlemek için uyumluluk (mevcut gemi altyapısı ile), çalışmada LCA yaklaşımı benimsendiği için well-to-wake emisyon performansı (WTW), ve biyoyakıtlara özgü ILUC etkisi kriterleri çalışmaya dahil edilmiştir. Değerlendirme kriterleri açıklanmış ve biyoyakıtların her bir kriter üzerindeki performansları belirlenmiştir. Belirlenen performans puanları çizelgeler halinde verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde ise AHP yönteminin uygulaması yapılmıştır. Kriterlerin ağırlıklarının tespiti için sektör deneyimi olan 15 uzmandan görüş alınmıştır. Toplanan veriler ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Emniyet kriteri 0,388 ile en yüksek ağırlığı, WTW emisyon ise 0,279 ile ikinci sırayı almıştır. Sonraki sıraları, sırasıyla uyumluluk, hammadde mevcudiyeti, maliyet, TRL indeksi ve ILUC etkisi kriterleri almıştır. Daha sonra biyoyakıt alternatiflerinin her bir değerlendirme kriteri üzerindeki performans ağırlıkları AHP yöntemi ile hesap edilmiştir. Son aşamada ise biyoyakıtların toplam performans skorları yine AHP yöntemi ile hesaplanmış ve nihai sonuç ortaya çıkarılmıştır. Nihai sonuca göre, değerlendirme modelinde karşılaştırılan biyoyakıtlardan deniz taşımacılığı için en uygun ve sürdürülebilir olanı FT-dizel olarak tespit edilmiştir. İkinci ve üçüncü sırada sırasıyla HVO 3. jenerasyon ve HVO 2. jenerasyon yer almıştır. Son iki sırada ise FAME 1. jenerasyon ve SVO konumlanmıştır.

Kriter ağırlıklandırma aşamasında uzman görüşleri alınarak yapılan bu değerlendirmenin sonucunun, farklı uzmanlar ile yapılması durumunda değişebilme ihtimali olduğu için, değerlendirme modeline duyarlılık analizi çalışması yapılmıştır. Yapılan duyarlılık analizinde 14 farklı senaryo oluşturulmuş ve temel senaryo ile karşılaştırılmış ve grafik olarak verilmiştir. Çıkan sonuca göre değerlendirme modeli tutarlı ve güvenlidir.

Biyoyakıtlar denizcilik sektörünün karbonsuzlaşmasında önemli bir potansiyele sahiptir. Bu potansiyelin kullanılması için biyoyakıtlar üzerine çalışmaların artırılması gerekmektedir. Çalışmada ilk sırayı alan FT-dizel yakıtının TRL indeksinin 9 olması için çalışmaların yoğunlaştırılması, yakıt üreticilerinin bu noktada teşvik edilmesi ve ekonomik olarak desteklenmesi ile maliyetinin düşürülmesinin fayda sağlayacağı kanaatindeyim. Benzer şekilde, ikinci sırada yer alan, üretiminde tarım arazisi ihtiyacı dahi gerektirmeyen HVO 3. jenerasyon üzerine çalışmaların yoğunlaştırılması denizcilik sektörünün geleceğine karbonsuzlaşma konusunda ciddi bir katkı sağlayacağını düşünmekteyim.

SUSTAINABLE BIOFUEL ASSESSMENT MODEL FOR MARITIME TRANSPORTATION

SUMMARY

Global warming and climate change are serious problems facing humanity on a global scale. One of the important reasons for the deepening of these problems is the increase in greenhouse gas emissions into the atmosphere to meet the increasing energy demand on a global scale. The transportation sector is an important part of the global economy and international trade and is a sector with high energy demand. Maritime transportation constitutes a very large part of world trade. Due to the fact that the vast majority of ships engaged in maritime transportation have internal combustion diesel engines and fossil fuels are widely used, a significant amount of greenhouse gases are emitted into the atmosphere. It is known that these exhaust emissions have negative effects on humans as well as the environment. To overcome this problem in the maritime sector, the International Maritime Organization (IMO) has adopted a strategy plan and researchers have focused their efforts on alternative marine fuels. Although there are different alternative marine fuel options, biofuels have an important position among alternative marine fuels due to their characteristics. For this reason, this thesis is focused on biofuels.

In the first part of the thesis, general information about the current situation in maritime transportation is given. Then, the actions taken by IMO to decarbonize the maritime sector are examined in detail. Emissions monitoring and reporting infrastructure in the maritime sector is examined and the existing systems are compared among themselves. In addition, it has been determined that the existing emission reporting and monitoring systems are insufficient to provide permanent solutions to problems such as global warming and climate change, and a new approach, a monitoring and reporting system with a Life Cycle Analysis (LCA) perspective, has been proposed instead of these systems. In addition, the transition process of the sector to alternative fuels is mentioned and information about the role of biofuels in this transition process is included. The potential of biofuels is highlighted by including biofuel applications in the maritime sector.

In the second part of the thesis, biofuels are grouped and information about their generations is given. Biofuels for marine transportation are examined in four groups: biodiesels, bioalcohols, biooils and biogases. Biodiesels are FAME, HVO, FT-diesel and Bio-DME. Bioalcohols are biomethanol and bioethanol. Biodiesels and bioalcohols are alternatives to replace distillate marine fuels. Bio-oils are SVO, pyrolysis oil, HTL and solvolysis oil and are alternatives to replace heavy marine fuels. LBM as biogas is an alternative that can replace gaseous fuels. These biofuel groups can be produced from many different feedstocks through different production processes. Biofuels are also analyzed in three generations. Basically, biofuels produced from edible feedstock are classified as Generation 1, those produced from waste vegetable and animal oils and non-edible lignocellulosic biomass are Generation

2, and biofuels produced from microalgae biomass are Generation 3. Biofuel alternatives are explained in detail, including production methods and raw material options, using visual figures.

In the third part of the thesis, a sustainable biofuel evaluation model for maritime transportation is developed. Analytic Hierarchy Process (AHP) method, which is one of the multi-criteria decision making methods, was used as the evaluation model. The AHP method is introduced, information about the application steps is given and AHP studies in the literature are also mentioned. In determining the evaluation criteria, safety, technological maturity (TRL index), feedstock availability, and cost, which are commonly used in previous studies for the maritime sector, were selected. In addition to these criteria, compatibility (with existing ship infrastructure) to observe the impact of the drop-in feature of biofuels in the transition process to alternative fuels, well-to-wake emission performance (WTW) since the LCA approach was adopted in the study, and biofuels-specific ILUC impact criteria were included in the study. The evaluation criteria were explained and the performance of biofuels on each criterion was determined. The performance scores are given in charts.

In the fourth part of the thesis, the AHP method was applied. In order to determine the weights of the criteria, 15 experts with sector experience were consulted. Criteria weights were calculated with the collected data. The safety criterion received the highest weight with 0.388 and WTW emission ranked second with 0.279. Compatibility, raw material availability, cost, TRL index and ILUC impact criteria were next in order. Then, the performance weights of biofuel alternatives on each evaluation criterion were calculated by AHP method. In the last stage, the total performance scores of biofuels were calculated again with the AHP method and the final result was obtained.

According to the final result, of the biofuels compared in the evaluation model, FT-diesel was the most suitable and sustainable for maritime transportation with a total score of 0.159. In second place was Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) 3rd generation with a total score of 0.150 and in third place was HVO 2nd generation with a total score of 0.125. The HVO 1st generation ranked fourth with a total score of 0.107. Biomethanol ranked fifth with a total score of 0.091. In sixth, seventh and eighth place, with close scores, are Bio Dimethyl Ether (Bio-DME) with a total score of 0.084, FAME 2nd generation with a total score of 0.081 and Liquefied Biomethane (LBM) with a total score of 0.079. In ninth place is the FAME 1st generation with a total score of 0.063. In last place is Straight Vegetable Oil (SVO) with a total score of 0.060.

Since there is a possibility that the results of this evaluation, which was made by gathering expert opinions at the criterion weighting stage, may change if the evaluation is made with different experts, a sensitivity analysis study was performed for the evaluation model. In the sensitivity analysis, 14 different scenarios were created and compared with the baseline scenario and presented graphically. According to the result, the evaluation model is consistent and reliable.

Safety was the most important criterion in the thesis. As a result, biofuels with low safety scores did not make it to the front rank. The second most important criterion was WTW emission. Although WTW emission performance is affected by the production method and type of fuel, it is more affected by the feedstock used to produce the biofuel. As a result, biofuels derived from edible plant oils did not make it into the top three. The third most important criterion was compatibility. The top two

ranked fuels have in common the highest weights for safety, WTW emissions and compatibility.

Biofuels have a significant potential for decarbonization of the maritime transportation. In order to utilize this potential, studies on biofuels should be increased. I believe that it would be beneficial to intensify the studies for the TRL index of FT-diesel fuel, which ranks first in the study, to be 9, to encourage fuel producers at this point and to reduce its cost by supporting it economically. Similarly, I believe that intensifying studies on the HVO 3rd generation, which ranks second and does not even require agricultural land in its production, will make a considerable contribution to the future of the maritime transportation in terms of decarbonization.





1. GİRİŞ

Birbiriyle doğrudan ilişkili olan küresel ısınma, iklim değişikliği ve hava kirliliği, özellikle son yıllarda tüm dünya ve insanlık için kritik bir konuma ulaşmıştır. Ulaşım sektörünün enerji talebini karşılamak için artan fosil yakıt tüketimi, atmosferik bileşimdeki ve hava kirliliğindeki değişikliklerden doğrudan sorumludur (Kampa ve Castanas, 2008).

Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan emisyonlar, çevrenin yanı sıra insan üzerinde de olumsuz etkilere sahiptir. İçten yanmalı makinelerin emisyonları arasında insan sağlığına ve ekosisteme en zararlı olanları karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO₂), kükürt oksitler (SO_x), nitrojen oksitler (NO_x) ve partikül maddelerdir (PM) (Sadeghinezhad diğ, 2013). Bu gazlara aşırı maruz kalınması insanlarda akciğer kanseri, bronşit, pnömoni, astım vb. gibi akut veya kronik hastalıklara neden olmaktadır (Kampa ve Castanas, 2008). Bu gazların emisyonları ağırlıklı olarak endüstriyel tesisler, tarım ve hayvancılık, insanların barınma ve ısınma ihtiyaçları ile ulaşım sektörlerinden kaynaklanmaktadır.

Taşımacılık, küresel ekonominin ve uluslararası ticaretin en önemli parçalarından biridir. Aynı zamanda enerji ihtiyacı yüksek bir sektördür. Küresel enerji tüketiminin yaklaşık %19'u ulaştırma sektörüne aittir (Inal ve diğ, 2022). Ulaştırma sektörü havayolları, demiryolları, karayolları ve deniz taşımacılığını içermektedir. Deniz taşımacılığı ise dünya ticaret taşımacılığının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır (Deniz ve Zincir, 2016). Avrupa Birliği'nin (AB) dış ticaretinin yaklaşık %90'ı, iç ticaretinin ise %40'ı deniz taşımacılığı ile gerçekleştirilmektedir (Fan ve diğ, 2018).

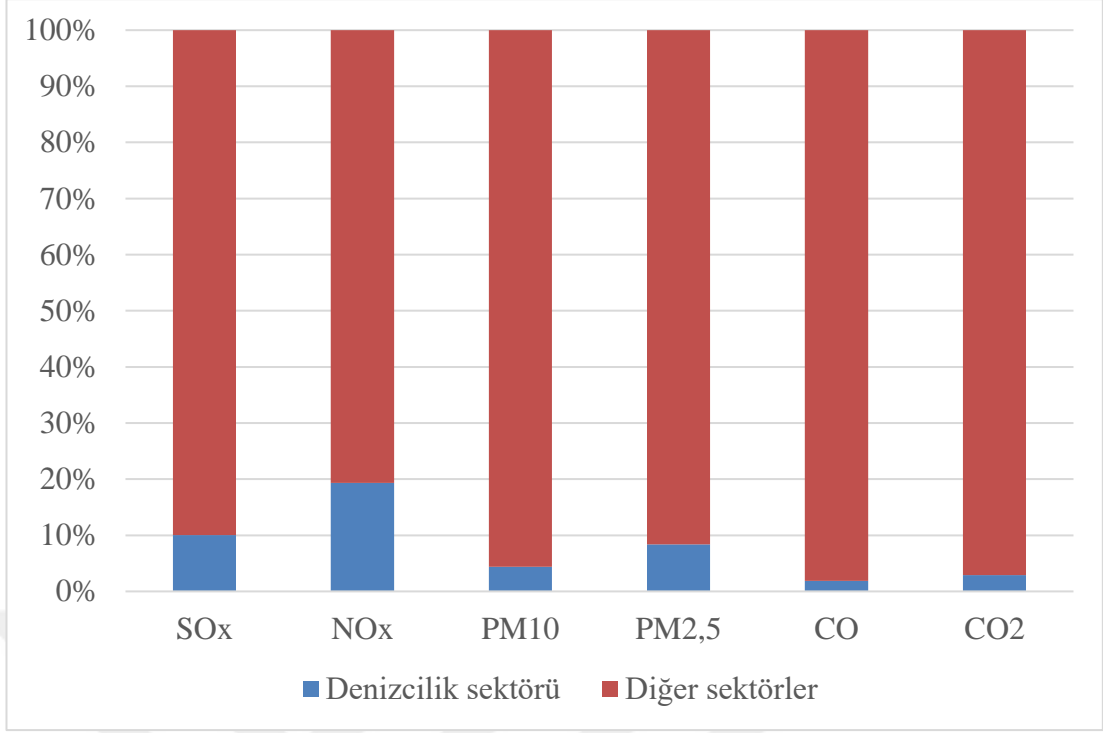
1.1 Deniz Taşımacılığında Mevcut Durum

Deniz taşımacılığı, içten yanmalı dizel makinelerin diğer makinelere göre daha verimli olması nedeniyle dizel makineler ile gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, gemi dizel makinelerinden yayılan egzoz gazlarının hava kirliliğinin başlıca nedenlerinden biri olduğu sonucuna varılabilir.

Gelişen küresel ekonominin de etkisiyle deniz taşımacılığı ile taşınan ürün miktarı 1990'lardan bu yana %150'den fazla artış göstermiştir (Baldi ve diğ., 2020). Bir diğer yandan, Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı (UNCTAD) verilerine göre, ticari deniz filosu 1 Ocak - 31 Aralık 2021 tarihleri arasında %3 artmıştır. Ayrıca Ocak 2022 itibariyle 100 gros ton ve üzeri gemi sayısı 102899'a ulaşmıştır (UNCTAD, 2022). Bunlara ek olarak deniz ticaret filosunun 2024 yılına kadar 2019'a göre %3,4 oranında genişleyeceği tahmin edilmektedir (UNCTAD, 2020).

Deniz taşımacılığı diğer taşımacılık sektörlerine göre uygun maliyetli olmasının yanı sıra mevcut gemilerin %99'u içten yanmalı makinelerle sahiptir ve petrol türevi yakıtlar kullanılarak işletilmektedir (Rattazzi ve diğ., 2021). Deniz taşımacılığındaki yakıt tüketim miktarları incelendiğinde, Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) 2020 yılı dördüncü sera gazı çalışmasına (GHG) göre, yıllık bazda 2018 yılı için toplam yakıt tüketimi balıkçılık ve iç nakliye dahil 339 milyon ton olup, bu rakam 2012 yılı için yaklaşık 309 milyon tondur (IMO, 2020b). IMO dördüncü GHG çalışması verilerine göre, ağır fuel oil (HFO) tüketiminde küçük bir düşüş görülürken, deniz dizel oil (MDO), sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ve metanol tüketiminde artış gözlenmektedir. Bu yakıt türlerinin tüketimindeki artışın nedeni IMO tarafından uygulamaya konulan yeni emisyon kuralları ve düzenlemelerinin etkisini göstermeye başlamış olmasındandır. Üçüncü IMO GHG çalışmasına göre deniz taşımacılığında tüketilen yakıt miktarı küresel yakıt tüketiminin %7'sine ve enerji talebinin %3'üne karşılık gelmektedir (IMO, 2014).

Gemiler tarafından tüketilen petrol türevi yakıtların %72'sini HFO, %26'sını MDO ve %2'sini LNG oluşturmaktadır (Gray ve diğ., 2021). Petrol türevi yakıt tüketimine bağlı olarak deniz taşımacılığı önemli miktarda sera gazı (GHG) yaymakta ve sera gazlarının en büyük çoğunluğunu karbondioksit oluşturmaktadır. Avrupa Çevre Ajansı'na (EEA) göre gemiler dünya çapındaki CO emisyonlarının yüzde 0,61'ini, SO_x emisyonlarının yüzde 9,84'ünü, NO_x emisyonlarının yüzde 14,74'ünü ve PM_{2,5} ve PM₁₀ emisyonlarının sırasıyla yüzde 6,75 ve yüzde 3,56'sını yaymaktadır (URL-1). Ayrıca, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) dördüncü sera gazı çalışmasında küresel CO₂ emisyonlarının %2,89'unun denizcilikten kaynaklandığını belirtmiştir (IMO, 2020a). Denizcilik sektöründen kaynaklanan emisyonların küresel emisyonlar içindeki payı şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Küresel emisyon verileri (IMO, 2020a).

1.2 Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) Aksiyonları

Deniz taşımacılığında karbonsuzlaşma, Kyoto Protokolü ve Paris İklim Anlaşması'nın etkisiyle son yıllarda daha da önem kazanmıştır. Günümüzde ulaşım için kullanılan yakıtların neredeyse tamamı karbon atomu içermektedir. Yanma sonucunda bu karbon atomları, büyük çoğunluğu karbondioksit (CO₂) molekülü olmak üzere, karbonmonoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) molekülleri olarak atmosfere salınmaktadır.

IMO, CO₂ emisyonu konusundaki çalışmalarına, 1997 yılında gemilerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarına ilişkin 8 sayılı kararı içeren MARPOL Ek-6'nın kabul edilmesinden sonra başlamıştır. Ayrıca bu düzenleme IMO'dan, CO₂ emisyonlarının küresel envanterinin bir parçası olarak gemilerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının hacmini ve göreceli yüzdesini belirlemek amacıyla Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ile işbirliği içinde bir çalışma yürütmesi talep edilmiştir.

Gemi Sera Gazı Emisyonlarına ilişkin İlk IMO Sera Gazı Çalışması 2000 yılında MEPC'nin kırk beşinci oturumunda yayımlanmış ve uluslararası ticaretle bağlantılı gemilerin 1996 yılında küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %1,8'inden sorumlu

olduğunu öngörmüştür (URL-2). Bu çalışmayla birlikte gemilerden yayılan sera gazlarına ilişkin çalışmalar hız kazanmıştır.

IMO ilk sera gazı çalışmasının ardından, 2009 yılında ikinci sera gazı çalışmasını yayınlamıştır. İkinci sera gazı çalışmasında, karbondioksitin gemiler tarafından salınan en önemli sera gazı olduğu sonucuna varılmıştır. IMO'nun ikinci sera gazı çalışması verilerine göre, 2007 yılında toplam gemicilik 1050 milyon ton CO₂ yaymıştır ve bu da küresel CO₂ emisyonlarının %3,3'üne karşılık gelmektedir. Emisyon senaryoları, herhangi bir önlem alınmadığı takdirde denizcilikteki genişlemenin bir sonucu olarak 2050 yılına kadar gemi emisyonlarının %150 ila %250 oranında (2007 yılındaki emisyonlara kıyasla) artabileceğini göstermektedir. Çalışmada, gemi tasarımını ve işletimini değiştirerek enerji verimliliğini arttırmak ve emisyonları azaltmak için yeni tasarım tekne ve üst yapı, yeni güç ve tahrik sistemi, hız ve kapasitenin optimize edilmesi, sefer optimizasyonu ve düşük karbonlu yakıtların kullanılması gibi çeşitli alternatifler tanımlanmıştır. Öte yandan, emisyonları azaltmaya yönelik olarak tanımlanan bu alternatif yöntemlerin gerçek anlamda hayata geçirilmesini sağlamak amacıyla bir dizi politika seçeneği tartışılmıştır.

Bu politika seçeneklerinden bazıları Enerji Verimliliği Operasyonel Göstergesi (EEOI), Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI), Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planıdır (SEEMP). Bu politikalardan EEDI ve SEEMP zorunludur ve bunlara uyulmaması halinde sorumlular cezalandırılacaktır. Ancak EEOI isteğe bağlıdır ve uygulanması emisyonları azaltmasının yanı sıra enerji verimliliğine olumlu katkı sağlar (Buhaug ve diğ., 2009). Bu politikalar arasında EEDI, 2011 yılında 400 gros ton ve üzeri tüm yeni gemiler ve büyük bir dönüşüm geçiren mevcut gemiler için IMO Deniz Çevresini Koruma Komitesi'nin (MEPC) 62. oturumunda kabul edilmiştir. Ayrıca, her geminin kendi SEEMP'ine sahip olması gerekmektedir.

EEDI, yeni gemilerin veya büyük bir dönüşüm geçiren gemilerin enerji verimli makine, yardımcı makine ve ekipmanlarla donatılmasını amaçlayan bir endekstir. Daha verimli makine ve ekipmanlar daha az yakıt tüketimi anlamına gelir ve bu da atmosfere salınan CO₂ emisyonlarını doğrudan azaltır. EEDI, gemi inşasının tasarım sürecinden itibaren o gemi tipi için belirlenen enerji verimliliği seviyesini karşıladığı sürece kullanılacak teknoloji, makine ve ekipmanın seçimini ve uygulamasını tamamen serbest bırakan bir mekanizmadır. Bu nedenle EEDI, gemi inşa ve gemi

makineleri endüstrisinin daha verimli ürünler üretmesi için teşvik edici bir teknik mekanizmadır. EEDI, 1 Ocak 2013 tarihinde uygulamaya konulmuş olup dört aşamadan oluşmaktadır. İlk 2 yılı kapsayan Faz 0, inşa edilecek yeni geminin o gemi tipi için belirlenen referans seviyesini karşılama zorunlu kılıyor. Diğer EEDI fazları ise ilk belirlenen referans değer baz alınarak limit sürekli azalacak şekilde belirlenmiş ve Çizelge 1.1'de verilmiştir

Çizelge 1.1 : EEDI fazları.

Faz	Geçerli yıl	Azaltma oranı
0	2013-2015	Baz değer
1	2015-2020	%10
2	2020-2025	%20
3	2025-	%30

Daha sonra Mayıs 2019'daki MEPC 74. oturumunda, bir sonraki oturumda kabul edilmek üzere, MARPOL Ek VI'da Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI) "faz 3" gerekliliklerini önemli ölçüde güçlendirecek değişiklikler onaylandı.

Taslak değişiklikler, LPG taşıyıcıları, genel kargo gemileri ve LNG taşıyıcıları da dahil olmak üzere çeşitli gemi türleri için faz 3'ün yürürlüğe giriş tarihini 2025'ten 2022'ye çekmektedir. Bu, o tarihten itibaren inşa edilen yeni gemilerin, temel çizgiden önemli ölçüde daha enerji verimli olması gerektiği anlamına geliyor.

Ayrıca bu değişiklik ile konteyner gemileri için EEDI azaltma oranı, daha büyük gemi boyutları için önemli ölçüde arttırılmıştır. Bu oranlar Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2 : Konteyner gemileri için faz 3 azaltma oranları.

Gemi boyutu	Yeni yürürlüğe giriş tarihi	Azaltma oranı
10.000 ile 15.000 DWT arası	2022	%15-30
15.000 ile 40.000 DWT arası	2022	%30
40.000 ile 80.000 DWT arası	2022	%35
80.000 ile 120.000 DWT arası	2022	%40
120.000 ile 200.000 DWT arası	2022	%45
200.000 DWT ve yukarısı	2022	%50

SEEMP, uluslararası taşımacılıkta kullanılan mevcut gemilerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını uygun maliyetli bir şekilde azaltmak için oluşturulmuştur. Tüm gemiler için zorunlu bir strateji olup, enerji verimli gemi operasyonlarını teşvik etmeyi ve artırmayı amaçlamaktadır. SEEMP aynı zamanda uluslararası denizcilik sektörüne,

izleme ve değerlendirme aracı olarak EEOI gibi isteğe bağlı araçları kullanarak gemi ve filo verimlilik endeksini takip etme ve yönetme yolu sağlar. EEOI, operatörlerin bir geminin mevcut yakıt verimliliğini ve daha sık pervane temizliği veya gelişmiş sefer planlaması gibi operasyonel değişikliklerin veya yeni bir pervane tasarımı veya atık ısı geri kazanım sistemleri gibi teknolojik çözümlerin uygulanmasının etkisini değerlendirmelerinin yolunu açmaktadır (Zincir ve Deniz, 2021).

IMO daha sonra 2014 yılında üçüncü sera gazı çalışmasını yayınlamıştır. IMO'nun üçüncü sera gazı çalışmasına göre, denizcilik sektörü 2007-2012 yılları arasında yılda ortalama 1015 milyon ton CO₂ salınımı gerçekleştirmiştir ve bu da küresel CO₂ salınımının %3,1'ine tekabül etmektedir (IMO, 2014). Bu çalışma ayrıca, herhangi bir önlem alınmadığı takdirde, küresel ekonomik büyümeye bağlı olarak artan lojistik ve enerji talebi nedeniyle denizcilik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının artmaya devam edeceğini göstermiştir.

Avrupa Birliği, IMO düzenlemelerinin uluslararası deniz taşımacılığında kaynaklanan emisyonları kabul edilebilir seviyelere indirmek için yetersiz olduğuna inanmaktadır. Sonuç olarak 2009 yılında AB, Temmuz 2015'te yürürlüğe giren MRV yönetmeliği olarak bilinen CO₂ emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanmasına dayalı yeni bir strateji uygulamaya çalışmıştır. Avrupa Birliği, gemi yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesini amaçlayan yeni bir düzenleyici çerçeve olan MRV aracılığıyla IMO'nun önünü açmaya çalışmıştır (Boviatsis ve Tselentis, 2019).

Bir diğer yandan, IMO Ekim 2014'te gemi yakıt tüketimi için bir veri toplama sistemi (DCS) kurulmasına karar vermiştir ve bu sistem üç adımdan oluşmaktadır; veri toplama, veri analizi ve karar verme. Ekim 2016'da onaylanan MEPC.278(70) sayılı kararlarla IMO, gemilerin akaryakıt kullanımlarını kaydetmeleri ve raporlamaları için MARPOL Ek-VI gerekliliklerini zorunlu hale getirmiştir ve bu gereklilik 1 Mart 2018'de yürürlüğe girmiştir (Boviatsis ve Tselentis, 2019). Bu sistemin amacı 5000 gros tonaj ve üzerindeki gemilerin yıllık yakıt tüketimini kayıt altına almak ve alınacak daha ileri tedbirler için zemin hazırlamaktır. Bu sistemler arasındaki en belirgin fark, EU MRV sadece AB ve Avrupa Serbest Ticaret Birliği (EFTA) limanlarını kapsarken IMO DCS'nin dünya çapındaki tüm limanları kapsamasıdır (Zincir ve Deniz, 2021).

Bu çalışmaların ardından IMO, Nisan 2018'de gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik bir strateji planı kabul etmiş (IMO ilk Sera Gazı Strateji Planı) ve MEPC de 72. oturumunda bu strateji planını onaylayarak yürürlüğe koymuştur. IMO'nun ilk sera gazı strateji planının hedefi, 2008 yılına kıyasla, birim taşıma işi başına CO₂ emisyonlarının 2030 yılına kadar en az %40 azalmasını sağlamak, 2050 yılına kadar ise %70 azalmasını sağlamak ve bu noktada çabaların sürdürülmesidir (Psaraftis, 2019; Rutherford ve Comer, 2018).

Strateji planının uygulanması için kısa, orta ve uzun vade için bazı yol gösterici ilkeler ve aday tedbirler üzerinde çalışılmış ve bir yol haritası olarak paylaşılmıştır. Kısa vadeli planlar 2018-2023 yılları arasında, orta vadeli planlar 2023-2030 yılları arasında, son olarak uzun vadeli planlar ise 2030 ve sonrasında kapsamaktadır. Çizelge 1.3'te aday tedbirler detaylı olarak gösterilmiştir (IMO, 2018).

Çizelge 1.3 : IMO'nun ilk sera gazı strateji planı aday önlemleri.

Dönem	Önlem	Hedef
Kısa	EEDI ve SEEMP geliştirilerek mevcut enerji verimliliği çerçevesinin iyileştirilmesi.	Yeni inşa ve mevcut gemiler
Kısa	Yıllık Verimlilik Oranı (AER), Hizmet Saati Başına Enerji Verimliliği (EESH), Bireysel Gemi Performans Göstergesi (ISPI), Yakıt Azaltma Stratejisi (FORS) gibi teknik ve operasyonel enerji verimliliği önlemlerinin geliştirilmesi	Yeni inşa ve mevcut gemiler
Kısa	Mevcut bir Filo Geliştirme Programının oluşturulması	Mevcut gemiler
Kısa	Hız optimizasyonunun değerlendirilmesi ve analizi	Mevcut gemiler
Kısa	Metan ve uçucu organik bileşik emisyonları için önlemler	Makineler
Kısa	Denizcilikten kaynaklanan sera gazı emisyonlarını ele almak için ulusal eylem planlarının geliştirilmesi ve güncellenmesi	Hükümetler
Kısa	Teknik işbirliği ve kapasite geliştirme faaliyetlerini ilerletmek ve geliştirmek	Tüm sektör
Kısa	Altyapı dahil olmak üzere yenilenebilir kaynaklar ve alternatif düşük karbonlu yakıtlar kullanarak küresel olarak liman gelişimine yönelik önlemler	Limanlar
Kısa	Deniz tahriki, alternatif düşük karbonlu ve sıfır karbonlu yakıtları ele alan araştırmaların başlatılması. Gemilerin enerji verimliliğini daha da artırmak için yenilikçi teknolojileri başlatmak	Tersaneler ve yakıtlar
Kısa	İlk hareket edenlerin yeni ilerlemeler yaratması ve benimsemesi için itici güçler, teşvikler	Hükümetler
Kısa	Tüm yakıt türleri için, sağlam yaşam döngüsü sera gazı/karbon yoğunluğu kılavuzları geliştirmek (özellikle düşük karbonlu ve sıfır karbonlu yakıtlar için)	Yakıtlar

Çizelge 1.3 (devam) : IMO'nun ilk sera gazı strateji planı aday önlemleri.

Dönem	Önlem	Hedef
Orta	Ulusal eylem planlarının güncellenmesi de dâhil olmak üzere, alternatif düşük karbonlu ve sıfır karbonlu yakıtların etkin bir şekilde benimsenmesine yönelik uygulama programı	Yakıtlar
Orta	Gemilerin enerji verimliliği performansını göstermek ve iyileştirmek için kullanılacak operasyonel enerji verimliliği önlemleri	Yeni inşa ve mevcut gemiler
Orta	Teknik işbirliği ve kapasite geliştirme faaliyetlerinin sürdürülmesi ve geliştirilmesi	Tüm sektör
Orta	Tedbirlerin uygulanmasına ilişkin öğrenilen örneklerin incelenmesini ve bilgi alışverişi yoluyla paylaşılmasını sağlamak için bir geri bildirim mekanizmasının geliştirilmesi	Tüm sektör
Uzun	Karbondan arındırılmış bir deniz taşımacılığını mümkün kılmak için sıfır karbonlu veya karbonsuz yakıtların araştırılması ve geliştirilmesini sağlamak	Yakıtlar
Uzun	Diğer olası yeni/yenilikçi emisyon azaltım mekanizmalarının genel olarak benimsenmesini teşvik etmek ve kolaylaştırmak	Tüm sektör

IMO'nun Sera Gazı stratejisi hedeflerini destekleyen önemli uluslararası projeler bulunmaktadır. Bu projeler; Düşük Karbonlu Denizciliği Desteklemek için Küresel Endüstri İttifakı (GIA), Küresel Denizcilik Teknolojisi İşbirliği Merkezleri ağı (GMN), GreenVoyage2050 ve Sera Gazı konusunda çok bağışçılı güven fonu (GHG TC-Trust Fund). Her bir proje bu hedefe ulaşılmasına önemli katkı sağlamaktadır. Bu büyük projeler IMO'nun ilk strateji planına teknolojik işbirliği, kapasite geliştirme, teknoloji geliştirme, veri toplama, teknolojik çözüm üretme ve finansal destek alanlarında önemli katkılar sağlamaktadır (URL-3).

IMO'nun ilk sera gazı stratejisi operasyonel tedbirleri, politika tedbirlerini ve daha genel olarak teknoloji temelli tedbirleri içermektedir. Alternatif deniz yakıtlarının veya yakıt hücrelerinin kullanımı bu stratejilerden biridir, ancak tek strateji değildir. Diğer adımlar arasında durum izleme, verimli gemi operasyonları ve daha verimli gemi tasarımları yer almaktadır (Dere ve Deniz, 2020). Kısa, orta ve uzun vadeli önlemlerde yaygın olan teknoloji tabanlı önlem, geleneksel fosil yakıtların yerine alternatif yakıtların kullanılmasıdır. Strateji, kısa vadede alternatif düşük karbonlu ve sıfır karbonlu yakıtların uygulanmasını teşvik etmekte ve orta vadede bu yakıtlarla ilgili girişimleri desteklemektedir. Daha sonra uzun vadede fosilsiz veya sıfır karbonlu yakıtların geliştirilmesi ve uygulanması için çalışmaktadır. Emisyonlarla ilgili tüm bu yeni kurallar, düzenlemeler, teşvikler ve ölçümlerin bir sonucu olarak araştırmacılar

temiz ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen alternatif deniz yakıtları araştırmaya yönlendirilmiştir.

Karbonsuzlaştırılmış deniz taşımacılığı, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), metanol, etanol, hidrojen, amonyak, tamamen elektrikli makineler ve biyoyakıtlar gibi çeşitli alternatif yakıtlar kullanılarak gerçekleştirilebilir (Ryste ve diğ., 2019). Her bir alternatif yakıt türünün kendine has karakteristik özellikleri nedeniyle gemilerde kullanımı söz konusu olduğunda avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin bu yakıtlardan etanol ve metanol gibi alkol yakıtları, tıpkı biyoyakıtlar gibi yakıt katkı maddesi olarak kullanılarak karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir (Shamun Sam ve Belgiorno, 2020). Dolayısıyla kısa, orta ve uzun vadede deniz taşımacılığında hangi alternatif yakıtların kullanılabileceği konusunda karakteristik özellikler en belirleyici faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alternatif yakıtlar arasında biyoyakıtlar gemi dizel makinelerinde büyük değişiklikler yapılmadan kullanılabilmesi ve petrol türevi deniz yakıtlarıyla karıştırılabilmesi gibi benzersiz özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu sebeple bu tez çalışması biyoyakıtlar üzerine yapılmıştır ve bölüm 2’de biyoyakıtlar hakkında detaylı bilgi verilmektedir.

1.3 Denizcilik Sektöründe Emisyonları İnceleme ve Raporlama Altyapısı

Gemilerdeki yanmadan kaynaklanan egzoz emisyonları, deniz taşımacılığındaki mevcut izleme ve raporlama altyapısının ana odak noktasıdır. Deniz taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması güncel olarak iki yönetmelikle düzenlenmektedir. Bunlardan ilki Avrupa Birliği MRV Yönetmeliğidir (EU MRV). MRV yönetmeliği 1 Temmuz 2015 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Avrupa Birliği, MRV düzenlemeleri ile birlikte IMO'ya yasal çerçeve içerisinde daha etkin çözümler üretme konusunda da öncülük etmiştir (Boviatsis ve Tselentis, 2019)

Bir diğer yöntem ise IMO Veri Toplama Sistemidir (IMO DCS). IMO, gemilerin yakıt tüketimlerini izlemeleri ve raporlamaları için bir düzenleme kabul etmiş ve 1 Mart 2018 tarihinde IMO DCS yürürlüğe girmiştir (Rony ve diğ., 2019). Çizelge 1.4’te MRV ve DCS sistemlerinin özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 1.4 : MRV ve DCS sistemlerinin özellikleri.

	IMO DCS	EU MRV
Yürürlüğe Giriş	1 Mart 2018	1 Temmuz 2015
İlk İzleme Dönemi	2019	2018
Prosedür	Veri toplama planı	İzleme planı
Doğrulama	Yetkili kuruluşlar veya bayrak devleti idareleri	Bağımsız olarak akredite edilmiş kurumlar
Hedef Gemiler	Brüt tonajı 5000 ve daha fazla gemiler	Brüt tonajı 5000 ve daha fazla gemiler
Kapsam	Uluslararası	AB ve EFTA limanları
Merkezi Yakıt Tüketim Veritabanı	IMO yakıt tüketimi yönetim veritabanı (GISIS) <ul style="list-style-type: none">• Toplam yakıt tüketimi	EMSA veritabanı (THETIS) <ul style="list-style-type: none">• Yakıt tüketimi (liman ve seyir)
Raporlama	<ul style="list-style-type: none">• Kat edilen mesafe• Seyirde geçen süre• Tasarım tonajı	<ul style="list-style-type: none">• Karbon emisyonları• Taşınan yük• Seyir mesafesi

MRV ve DCS sistemlerinin uygulamaya konulması, denizciliğin karbonsuzlaştırılması konusunda önemli bir veri kaynağı oluşturmuş ve gelecekte atılacak adımlara ışık tutmuştur. Çizelge 1.4'te görüldüğü üzere MRV ve DCS aynı çizgidedir. En çarpıcı fark, DCS'nin uluslararası tüm limanlarda uygulanırken, MRV'nin sadece AB ülkeleri ve EFTA limanlarında uygulanmasıdır.

Çizelge 1.4'te de görüldüğü üzere yürürlükteki karbon emisyonları izleme sistemleri sadece gemi makinelerinde yanma sonucu açığa çıkan egzoz gazlarına odaklanmıştır. Henüz resmi olarak zorunluluk olmasa bile, yakıtların net karbon emisyonlarını bir Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) yaklaşımı kullanarak değerlendirmek daha mantıklıdır. Çünkü temel amaç küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi sorunları çözmektir ve bu sorunları çözmek için atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun artmaması gerekir. Atmosferdeki sera gazı sorununu sadece yanma sonucu oluşan egzoz emisyonları dikkate alınarak çözülemez. IMO'nun LCA yaklaşımı ile ilgili çalışmaları henüz yürürlüğe girmesede çalışmalar büyük ölçüde yapılmış ve MEPC 80. oturumunda kabul edileceği düşünülmektedir. LCA yaklaşımı sadece yanma sonucu ortaya çıkan egzoz emisyonlarını değil, yakıtın tüm üretim sürecini, nakliyesini ve yanma sonucu ortaya çıkan emisyonları da değerlendirmektir (Osman ve diğ., 2021). LCA yaklaşımı hakkında detaylı bilgi bölüm 3.5.1.7'de verilmiştir.

1.4 Alternatif Yakıtlara Geçiş Süreci

Günümüzde en çok kullanılan denizcilik yakıtları HFO ve MDO'dur. HFO ve MDO'dan sonra LNG, deniz taşımacılığı için tercih edilen üçüncü yakıttır. Ayrıca son yıllarda sektörün ilgisinin arttığı metanol ise gemilerde tüketilen en yaygın dördüncü alternatif yakıt olarak öne çıkmaktadır (Deniz ve Zincir, 2016). Yeni inşa edilmek üzere sipariş edilen alternatif yakıtlı gemilerin sipariş edilen tüm gemilere oranı Mayıs 2019'da %6 iken Haziran 2021'de neredeyse %12'ye yükselmiştir. Deniz taşımacılığı sektöründe saygın bir klas kuruluşu olan DNV GL'ye göre, 216 LNG yakıtlı gemi aktif olarak ticari faaliyetini sürdürüyorken, 399 adet gemi daha sipariş edildi. 10 metanol yakıtlı gemi aktif olarak hizmette iken, 29 tane daha sipariş edildi. Faal olan 6 adet LPG yakıtlı gemi varken, 90 tane daha sipariş edildi (Linda S. Hammer ve diğ, 2021). Tüm bunları göz önünde bulundurduğumuzda, denizcilik sektöründe alternatif yakıtlara geçişin başladığını ve hızla arttığını görebiliriz.

Alternatif yakıtlara geçiş yeni inşa edilecek gemiler için daha kolay olacak olsa da mevcut gemiler için kolay bir süreç olmayacaktır. Mevcut gemilerin çok büyük çoğunluğu, günümüzde halen yaygın olarak kullanılan HFO ve MDO'nun depolanması ve tüketimine uygun makine ve sistemlere sahiptir (Linda S. Hammer ve diğ, 2021). Bu gemilerin farklı bir alternatif yakıtla çalışmasını sağlamak, kullanılacak yakıtın niteliğine bağlı olarak ana makine, yardımcı makineler ve diğer sistemlerde (güvenlik, depolama, transfer, filtre ve ayrıştırma gibi konularda) değişiklikler gerektirebilir. Biyoyakıtlar bu anlamda öne çıkmaktadır. Çünkü biyoyakıtlar, petrol türevi konvansiyonel yakıtlarla harmanlanabilmeleri ve mevcut gemi altyapısında doğrudan drop-in olarak kullanılabilmesi sayesinde deniz taşımacılığının karbonsuzlaştırılması için alternatif yakıtlara geçişte önemli bir avantaja sahiptir. IEA (Uluslararası Enerji Ajansı), drop-in biyoyakıtları işlevsel olarak petrol yakıtlarına eşdeğer olan ve mevcut petrol altyapısıyla tamamen uyumlu sıvı biyo hidrokarbonlar olarak tanımlamaktadır (Van Dyk ve diğ, 2019).

1.4.1 Geçiş sürecinde biyoyakıtların rolü

IMO'nun sera gazı hedeflerine ulaşabilmesi için sıfır karbonlu alternatif yakıtlarla (hidrojen amonyak gibi) uyumlu dizel makineler ve gemiler denizcilik sektörünün gelecek planları arasında yer almaktadır. Ancak hidrojen ve amonyak gibi yakıtların mevcut gemilerde kullanılması kolay bir iş değildir. Çünkü geminin makine ve

sistemlerinde büyük değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bu modifikasyonlar yüksek maliyetli işlemlerdir. Halihazırda çalışan gemilere harcanan sermayenin en verimli şekilde kullanılabilmesi için bu gemilerin ömürlerinin sonuna kadar yeni yönetmelik ve kurallara uygun olarak çalışması sağlanmalıdır. Bir geminin ortalama ömrü 30 yıl olarak kabul edilmektedir (Laso ve diğ, 2018). Bu açıdan bakıldığında, mevcut gemilerin çoğunun daha uzun yıllar çalışır durumda olması gerekmektedir. UNCTAD'ın deniz taşımacılığı 2021 raporuna göre, mevcut gemilerin neredeyse yarısı 14 yaş ve altındadır. Çizelge 1.5'te gemi türlerine göre yaş dağılımı verilmiştir.

Çizelge 1.5 : Mevcut gemilerin yaş dağılımı (UNCTAD, 2021).

Gemi Türü	Gemi Yaşı (%)				
	0-4	5-9	10-14	15-19	20 ve üzeri
Dökme Yük	18	37	24	10	10
Konteyner	14	19	32	17	17
Genel Kargo	5	10	16	9	59
Petrol Tankeri	14	17	21	13	35
Diğer Gemiler	10	17	17	9	47
Tüm Gemiler	11	18	19	10	41

Çizelge 1.5'te görüldüğü üzere gemilerin büyük çoğunluğu dizel makineye sahip gemilerdir. Bu gemilerin yaşlı olanları ömürlerini tamamladıktan sonra gemi söküme gidebilir ancak genç olanların yeni kural ve yönetmeliklere uygun olarak çalıştırılması, harcanan sermayenin etkin bir şekilde kullanılması bakımından bir hayli önemli konudur. Bu gemileri yeni kurallara uygun olarak çalıştırmamanın etkili yollarından biri de bir geçiş yakıtı kullanmaktır.

Biyoyakıtların bazıları drop-in olarak kullanılabilen alternatif deniz yakıtlarıdır (ABS, 2021b). İki zamanlı veya dört zamanlı gemi dizel makinelerinde çok az değişiklikle veya hiç değişiklik yapmadan kolayca kullanılacak biyoyakıtların bulunması, IMO'nun emisyon azaltma hedeflerine yönelik geçiş çözümlerinden biridir. Bu nedenle, giderek artan sayıda denizcilik şirketi biyoyakıtları veya bunların karışımlarını test etmeye başlamıştır.

1.4.2 Denizcilik sektöründe biyoyakıt uygulamaları

Denizcilik sektöründe biyoyakıt uygulamaları 1998 yılında Kuzey Amerika Büyük Göller bölgesinde başlamıştır (Mohd Noor ve Mamat, 2018). Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA), Büyük Göller Çevre Araştırma Laboratuvarı'nın (GLERL) 10 küçük araştırma gemisini soya fasulyesi yağından elde edilen B100 biyodizel ile

çalıştırarak test çalışmasını yürütmüştür. B100 biyodizele geçtikten sonra GLERL, filosunun petrol türevi dizele kıyasla emisyonları önemli ölçüde azalttığını bildirdi. Azalma oranı CO'da %48, PM'de %59, NOx'te %7, SOx'te %74 ve HC'de %77 olarak bildirilmiştir. Ayrıca, biyodizelin temizleme özellikleri nedeniyle bakım maliyetlerinde %20 ila %40 oranında azalma olduğu bildirilmiştir (ABS, 2021b).

Mediterranean Shipping Company (MSC) 2019 yılında biyoyakıtlardan faydalanacağını duyurmuş ve B10 biyodizelin test etmiştir. Kullanılan biyoyakıt, kullanılmış yemeklik yağdan elde edilen biyodizeldi ve toplam 100.000 ton yakıt tedarik edildi. MSC, 30.000 ton CO₂ tasarrufu sağladığını tahmin etmektedir. Başarılı test sürecinin ardından MSC, %30 biyodizel karışımları kullanarak CO₂ emisyonlarını %15 oranında azaltmayı hedeflemektedir (ABS, 2021b).

Alexander von Humboldt bir başka biyoyakıt test gemisidir. Jan De Nul Group 2020 yılında bu gemide ikinci nesil %100 biyoyakıt ile 2000 saat çalıştıklarını açıklamış ve geminin CO₂ emisyonlarını % 85 oranında azalttığını bildirilmiştir. Ayrıca Jan De Nul Group, ikinci nesil biyoyakıtın denizcilik endüstrisinin emisyon hedeflerini karşılayabilecek bir drop-in yakıt olarak kullanılmaya hazır olduğunu da belirtmiştir (Deruyck ve diğ, 2020).

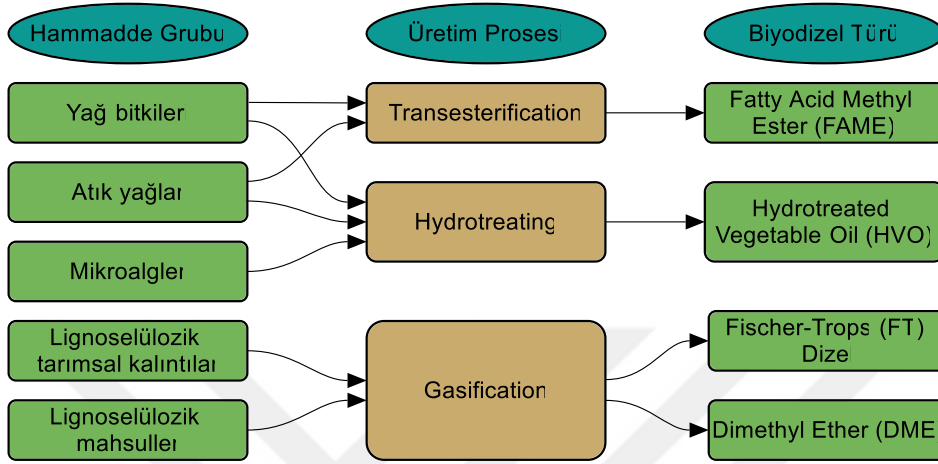
Bir diğer biyoyakıt uygulaması ise Stena Bulk denizcilik şirketi tarafından Good Fuels işbirliği ile Nisan 2020'de 10 gün süreyle yapıldı. 49646 deadweight tonluk tanker gemisi normal operasyonunda %100 biyoyakıt ile çalışmış ve sera gazı emisyonlarında %83 kazanç sağlandığı rapor edilmiştir. Ayrıca düşük karbonlu deniz taşımacılığına kısa sürede ulaşılacağını gösterilmiştir. (Stena Bulk, 2020).

Ocean Network Express (ONE) şirketi tarafından da M/V MOL gemisinde yine tedarikçi Good Fuels ile başarılı bir deneme yapılmış ve raporu Nisan 2021'de yayınlanmıştır. Uygulamada atık yağ ve kalıntılardan elde edilen %100 biyoyakıt kullanılmıştır. Uygulama performansı, sürdürülebilir biyoyakıtların gelecekteki olasılığının var olduğunu göstermektedir. ONE böylece IMO'nun 2030 ve 2050 hedeflerine ulaşmada biyoyakıtların önemini altını çizmiştir (Network ve diğ, 2021).



2.1 Biyodizeller

Biyodizeller çeşitli hammaddelerden, farklı üretim prosesleri ile üretilebilmektedir. Şekil 2.2'de hammadde grupları ve üretim proseslerine göre biyodizel çeşitleri verilmiştir.



Şekil 2.2 : Biyodizel türleri ve üretim prosesleri.

2.1.1 Fatty acid methyl ester (FAME)

Türkçesi yağ asidi metil esteri en yaygın biyodizel türüdür. Karayolu taşımacılığı sektöründe yaygın olarak kullanılır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi bir transesterifikasyon (kimyasal dönüşüm) işlemi kullanılarak biyo-y yağlar (trigliseritler) ve metanol veya etanolden üretilir. Gliserol ve su bu işlemin yan ürünleridir. Avrupa'da FAME üretmek için en yaygın olarak kullanılan biyokütle hammaddeleri, kolza tohumu yağı, ayçiçek yağı ve kullanılmış yemeklik yağdır. Diğer hammaddeler arasında soya fasulyesi (ABD ve Güney Amerika'da yaygın), mısır ve hindistancevizi (Pasifik Adalarında yaygın) bulunur. Donyağı ve kümes hayvanı çöpü gibi hayvansal yağlar da kullanılır. Yaygın olarak bulunabilen bir potansiyel hammadde olan algler, bir transesterifikasyon işlemi yoluyla FAME üretmek için kullanılabilir, ancak lipidlerin önceden alg biyokütlesinden çıkarılması gerekir (IEA Bioenergy, 2017).

FAME dizel makineler için, saf bitki yağlarından (SVO) daha uygun bir yakıttır. Dizel makinelerde MDO ve MGO yerine yakıt olarak kullanılabilir, ancak bunun için makine modifikasyonları ve makine üreticisinin onayı gerekebilir.

2.1.2 Hydrotreated vegetable oil (HVO)

Suyla işlenmiş bitkisel yağ, yaygın olarak yenilenebilir dizel olarak bilinen HVO, bir biyodizeldir. Yağ asitlerinden hidrokarbona hidro-işleme olarak bilinen bir hidro-işlem (hydrotreating) süreciyle rafine edilmiş, bitkisel yağların ve kullanılmış yemeklik yağın (UCO) bir ürünüdür. Hidro-işlem sürecinde hidrojen, trigliserit bitkisel yağ moleküllerinden oksijeni çıkarmak ve trigliseridi üç zincire bölmek için kullanılır. Bu, mevcut dizel yakıt bileşenleriyle aynı olan hidrokarbonlar ile sonuçlanır. Bu durum HVO'nu dizel makinelerde kaliteden taviz vermeden istediğiniz oranda karışım yaparak veya %100 olarak kullanılabilmesini sağlar (Moreno J ve Hurtado A, 2018).

HVO, yeni ve mevcut dizel makineler ve yakıt sistemleri ile son derece uyumludur. HVO, daha düşük yoğunluk hariç EN 590 dizel yakıt standartlarını da karşılar, ASTM D975'i dizel yakıt standartlarını ise tam olarak karşılar (Sevim ve Zincir, 2022).

2.1.3 Fischer-Tropsch (FT) dizel

FT dizel, Fischer-Tropsch sentezi ile birlikte gazlaştırma (gasification) kullanılarak üretilir. Gazlaştırma işleminde, biyokütle esas olarak hidrojen ve karbon monoksitin bir kombinasyonu olan bir sentez gazı üretir. İşlem yüksek sıcaklık ve basınçta (yaklaşık 900°C) gerçekleştirilir. Biyokütleyi temel bileşenlerine (CO, H₂ ve CO₂) ayrıştırır. Gaz daha sonra çim ve katranı gidermek için temizlenir. FT sentez işleminde, sentez gazı bir katalizör üzerinden reaksiyona girer ve çeşitli uzunluklarda karbon zincirleri oluşturur (IEA Bioenergy, 2017).

Tarımsal atıklar ve lignoselülozik biyokütle dahil olmak üzere çeşitli biyokütle hammaddeleri kullanılabilir. Lignoselülozik biyokütle türleri arasında ormancılık kalıntıları, miscanthus ve söğüt gibi hızlı büyüyen odunsu ürünler ve mısır koçanı ve buğday samanı gibi tarımsal kalıntılar bulunur. FT dizel, saf olarak kullanılabilen (yani fosil dizelin tamamen yerini alabilir) veya makine modifikasyonları olmadan fosil dizel ile yüksek bir yüzdeye kadar karıştırılabilen drop-in yakıttır (Zhou ve diğ, 2020).

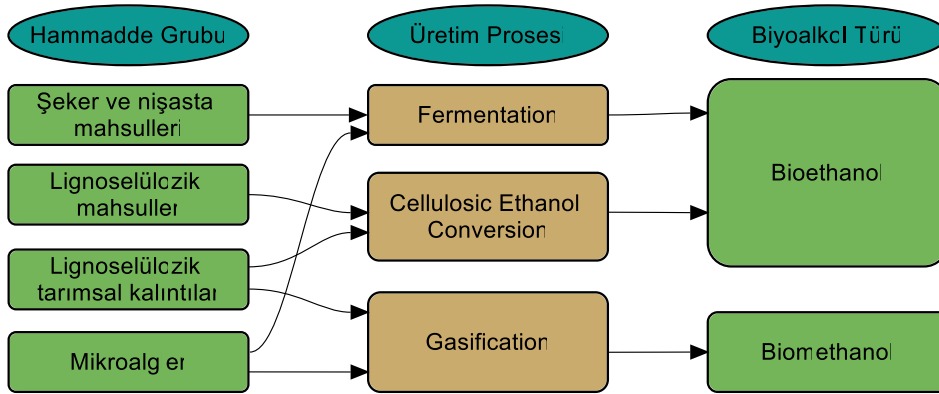
2.1.4 Dimethyl ether (DME)

DME, biyokütlenin gazlaştırılması ve ardından katalitik yakıt sentezi ile üretilir. Gazlaştırma işlemi sırasında, biyokütle, doğrudan DME üretmek için kullanılabilen sentez gazına bölünür veya gaz önce bir ara ürün olarak metanole dönüştürülür,

ardından metanol dehidrasyonu yapılır. DME, makinede gerekli modifikasyonlar yapıldıktan sonra MGO veya MDO ile karıştırılarak kullanılabilir, ancak karışım yüzdesi oldukça düşük olduğu için CO₂ emisyonu azaltımı açısından sınırlı kabiliyete sahip olduğu anlaşılmaktadır. DME LPG ile de karıştırılarak kullanılabilir ancak %30 üzerindeki karışımlar için ek modifikasyonlar, ilave depolama tankları ve yakıt besleme sistemleri gerektirmektedir. DME'yi temiz bir yakıt olarak kullanmak için özel makine ve sistemler gerektirdiği için drop-in olarak değerlendirmek mümkün değildir (Yuanrong Zhou, 2020).

2.2 Biyoalkoller

Biyoalkoller, çeşitli hammaddelerden ve üretim yollarından üretilen bir diğer sıvı biyoyakıt grubudur. Bunlar aşağıdaki Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Deniz sektörüyle en alakalı biyoalkoller, her ikisi de damıtılmış ürünlerin yerine kullanılabilen biyometanol ve biyoetanoldür. Biyokütleden üretilen biyometanolün, metanolla çalışacak şekilde özel olarak tasarlanmış veya dönüştürülmüş gemi makinelerinde, bu yakıtta özel tankları ve yakıt besleme sistemleri olan gemilerde kullanılabilir. Bu sebeple drop-in yakıt olarak sınıflandırılması mümkün değildir (Laursen ve Barcarolo, 2022).



Şekil 2.3 : Biyoalkol türleri ve üretim prosesleri.

2.2.1 Bioethanol

Bioethanol buğday, şeker kamışı ve mısır veya algler gibi şeker ve nişasta mahsullerinin (glikoz bazlı hammaddeler) fermente edilmesiyle üretilir. Bu tür biyoethanol için genellikle geleneksel bioethanol ifadesi kullanılmaktadır. Ayrıca lignoselülozik biyokütlenin selülozik etanol dönüşümü yoluyla bioethanol üretmek

için kullanılan üç ana adım ön işlem, hidroliz ve fermantasyondur. Ön arıtma, karbonhidratları biyokütleden çıkarır. Selüloz ve hemiselülozun hidrolizi, daha sonra fermente edilen şekerler üretir. Her biri kendi avantaj ve dezavantajlarına sahip farklı hidroliz türleri (enzimatik hidroliz, asitlerin kullanımı ve sıcak su veya buharla muamele dahil) vardır (Laursen ve Barcarolo, 2022).

Bioethanol, deniz taşımacılığı için drop-in olarak değerlendirilemez, ancak biomethanolde olduğu gibi (bir sonraki bölümde), makinenin, yakıt tanklarının ve yakıt besleme sistemlerinin modifikasyonlarını gerektirecektir. Methanol ile çalışan 2 zamanlı ve 4 zamanlı gemi makineleri şu anda hizmette olmasına rağmen, gemi makinelerinde etanol kullanımına ilişkin yeterli uygulama bulunmamaktadır. Ancak makine üreticileri metanol uyumlu makinelerde yapılacak minör modifikasyonlar ile gelecekte bu yakıtın kullanılmasını muhtemel olduğunu düşünmektedir.

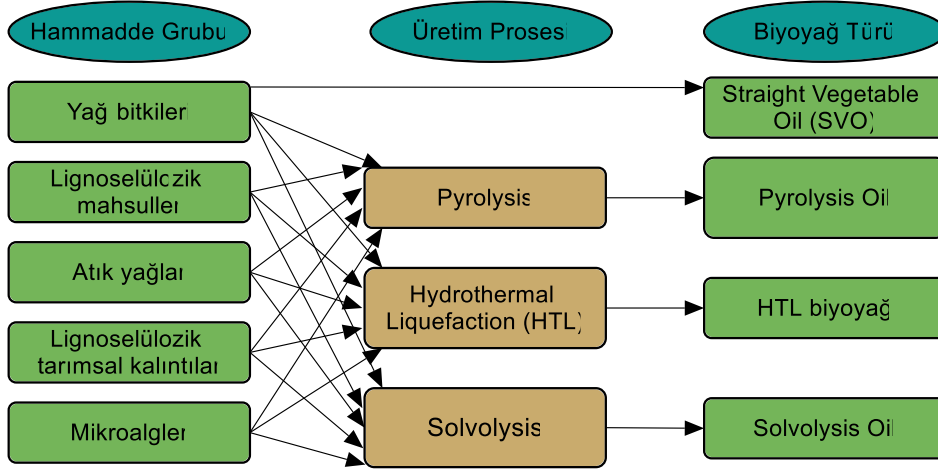
2.2.2 Biomethanol

Biomethanol, biyokütlenin gazlaştırılması ve elde edilen sentez gazının methanole sentezlenmesi yoluyla üretilir. Sentez adımında, sentez gazı basınçlandırılır ve bir metal katalizör varlığında methanole dönüştürülür, ardından su ve safsızlıklar giderilir. Methanol dönüşümü, yüksek basınç ve düşük sıcaklıklarda (50-100 bar ve 220-275°C), alümina üzerindeki bakır ve çinko oksitlerin katalizöründe yapılır (IEA Bioenergy, 2017).

Gemi makinelerinde kullanılmak üzere MDO ile sınırlı miktarda biomethanol karıştırılabilir. Ayrıca uyarlanmış veya çift yakıtlı makinelerde (dual-fuel engine) daha yüksek oranlarda veya doğrudan methanol yakıt hücrelerinde %100 methanol yakıtı olarak kullanılabilir (Paulauskiene ve diğ., 2019).

2.3 Biyoyağlar

Biyoyağlar, biyolojik kökenli rafine edilmemiş sıvılardır. HFO ve türevlerinin yerini alması beklenen biyoyakıtlardır. Saf bitkisel yağın yanı sıra pirolize edilmiş, termolize edilmiş ve solvolize edilmiş biyokütle içerirler (Laursen ve Barcarolo, 2022). Şekil 2.4'te, biyoyağ üretim prosesleri ve türleri, kullanılabilen hammadde grupları ile birlikte verilmiştir.



Şekil 2.4 : Biyoyağ türleri ve üretim prosesleri.

2.3.1 Straight vegetable oil (SVO)

SVO, yalnızca biyokütleden yağ çıkarılarak üretilen bir biyokrüttür. Kimyasal bir işlemle geçmeden elde edilir. Yağ tohumları temizlenip preslenerek yağı çıkartılıp filtre edildikten sonra elde edilen üründür. Gemi dizel makinelerinde kısa dönem operasyonlarında doğrudan veya fosil yakıtlar ile karışım halinde kullanılabilir ancak uzun dönem kullanımları kesinlikle önerilmez. Ayrıca biyodizel üretimi için hammadde olarak kullanılabilir. Dizel yakıt standartlarını da karşılamaz (NREL, 2021).

2.3.2 Pyrolysis oil

Piroliz yağı, bir piroliz işlemiyle elde edilen bir biyo-yağ veya biyolojik hammadde. Bu süreçte, biyokütle besleme stoğu, oksijen yokluğunda yüksek sıcaklıkta (genellikle 300° ile 650°C arasında) birkaç saniye ısıtılır. Hammadde yakılmak yerine yanıcı gazlara ve odun kömürüne ayrışır. Bazı gazlar yoğunlaşarak piroliz yağı oluşturur. Farklı gaz kombinasyonları, piroliz yağı ve odun kömürü üreten farklı işlemler vardır. İki ana üretim süreci türü, yavaş piroliz ve hızlı pirolizdir. Yavaş pirolizde, düşük ısıtma hızları ve 500° ile 600°C sıcaklıklar, yüksek bir kömür verimine ve daha düşük bir biyo-yağ üretim hacmine (ağırlıkça %10 ila %15) yol açar. Hızlı pirolizde, biyokütle, ortam basıncında yüksek nitrojen içeriğine sahip inert bir atmosferde hızla 400° ile 600°C'ye ısıtılır. Bu tür bir işlemde, ağırlıkça yaklaşık %70'lik bir sıvı ürün verimi, ağırlıkça %15 ile 30'luk bir su içeriği ve ağırlıkça %35 ile 40'luk bir oksijen içeriği ile biyo yağ verimi çok daha yüksektir. Piroliz yağının

fiziksel ve kimyasal özellikleri, büyük ölçüde kullanılan biyokütle besleme stoğuna ve özellikle sıcaklık, basınç, ısıtma hızı ve kalma süresi gibi işlem koşullarına bağlıdır. Elemental bileşim, kullanılan biyokütleninkine benzer (Nami ve diğ, 2021).

Piroliz yağı mevcut gemi makineleri ile zayıf bir uyumluluğa sahiptir . Drop-in yakıt değildir ve kullanımı, gemi makinelerinin ve yakıt sistemlerinin değiştirilmesini gerektirir. Piroliz yağı, bitkisel veya petrol yağlarından farklı özelliklere sahiptir; asidik ve aşındırıcıdır. Piroliz yağının viskozitesi depolama sırasında arttığı için (bu durum eksik yanmaya ve makine hasarına yol açan partikül tortularına yol açabilir), birkaç aydan fazla depolanmamalıdır (Yuanrong Zhou, 2020).

2.3.3 Hydrothermal liquefaction (HTL) biyoyağ

HTL biokrüt, hidrotermal sıvılaştırma teknolojisi kullanılarak biyokütleden üretilen ham petrol benzeri bir biyo-yağdır. Üretim süreci, 20 ila 60 dakika boyunca 5-25 Mpa basınçlarla 250° ila 550°C arasındaki sıcaklıkları kullanır. Katalizörler, üretim verimini en üst düzeye çıkarmak için kullanılır. Su, kritik altı veya süper kritik hale gelir ve işlem sırasında bir çözücü, reaktan ve katalizör görevi görür. Biyokütledeki oksijen, dehidrasyon veya dekarboksilasyon yoluyla uzaklaştırılır (IEA Bioenergy, 2017).

Piroliz işleminin aksine, HTL ıslak biyokütleyi işleyebilir. İşlenmemiş tarımsal artıklar ve lignoselülozik biyokütle, kömürleşme riskini azaltmak için bir karbonhidrat ve düşük lignin içeriği karışımı sundukları için ideal hammaddelerdir. Algler ayrıca bir hammadde olarak kullanılabilir (Laursen ve Barcarolo, 2022).

HTL biokrüt, mevcut gemi makineleri ile zayıf uyumluluğa sahiptir ve drop in yakıt olarak kabul edilmez. Ancak ağır yakıtlarla kısıtlı oranlarda karışım halinde makinelerde kullanılabilir.

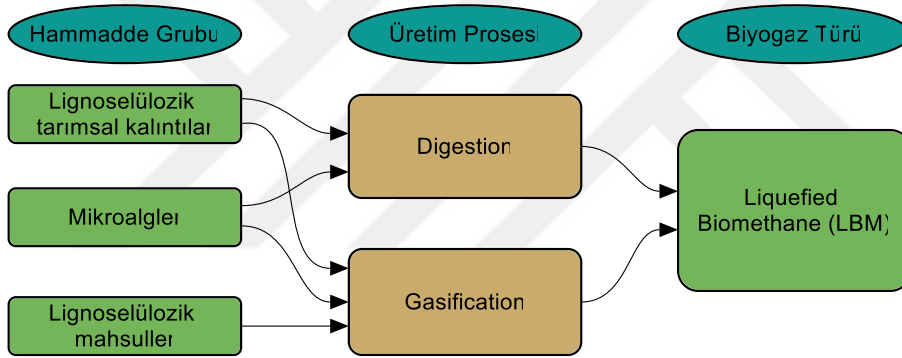
2.3.4 Solvolysis oil

Solvoliz, hidrotermal sıvılaştırma ile karşılaştırılabilir bir proses teknolojisidir, ancak 300°-450°C sıcaklıkta basınç altında süperkritik bir organik çözücü kullanır. Bu, biyokütlenin sıvılaştırılarak MDO ile karıştırılabilen veya daha sonra düşük oksijen içeriğine sahip bir drop-in yakıtla dönüştürülebilen bir biyo-yağa dönüştürüldüğü bir termal işlemdir.

Karıştırma için bir ön koşul olarak hidro-işlem gerekli değildir. Ayrıca solvoliz işleminde herhangi bir katalizöre gerek yoktur. Solvolizin ana avantajı, lignin açısından zengin biyokütle besleme stoklarının kullanılabilmesidir. Ayrıca biyo-etanol üretim tesislerinde hidroliz işlemi sırasında yan ürün olarak üretilen lignin, hammadde olarak kullanılabilir ve biyo-etanol üretimi ile olası bir sinerji sağlar (Sebhat ve diğ., 2020).

2.4 Biyogazlar

Gaz halindeki biyoyakıt biyometandır. Üretim yolu Şekil 2.5'te gösterilmiştir. LNG uyumlu gemi makineleri için drop-in yakıt olarak kabul edilir. Biyometan iki ana üretim yolu ile üretilir. Bunlar sindirim (digestion) ve gazlaştırma (gasification) prosesleridir.



Şekil 2.5 : Biyogaz üretim prosesleri.

Digestion prosesinde, biyokütle anaerobik ortamda bakteriler tarafından sindirilerek esas olarak metan ve karbondioksitten oluşan biyogaz oluşturulur. CO₂'yi metandan ayırmak, tipik olarak %80'i aşan bir metan içeriğine sahip olan biyometan oluşturur. Bu işlem için ıslak biyokütle besleme stoklarına ihtiyaç vardır; odunsu biyokütle kullanılamaz. Yaygın hammaddeler, lignoselülozik enerji mahsulleri, tarımsal artıklardır. Mikroalgler, sıvı biyoyakıtlar üretmek için lipitler çıkarıldıktan sonra orijinal biyokütle veya artık kütle olarak kullanılabilir. Reaktöre bağlı olarak, iklim açısından istenmeyen ve kaçınılması gereken metan kaçabilir.

Gasification prosesi, digestion prosesine göre daha yüksek bir dönüşüm verimliliğine sahiptir, ancak daha düşük bir teknolojiye hazır olma düzeyine (TRL) sahiptir. Gazlaştırma adımı, biyokütle sentez gazına dönüştürülür. Ardışık bir metanlama

işleminde (Sabatier işlemi olarak da bilinir), sentez gazındaki H₂, CO ve CO₂, 300° ila 400°C arasındaki sıcaklıklarda biyometan oluşturmak üzere birbirleriyle reaksiyona girer (IEA Bioenergy, 2017).

2.5 Biyoyakıtların Jenerasyonları

Birinci, ikinci ve üçüncü olmak üzere üç biyoyakıt nesli vardır. Birinci nesil biyoyakıtın temel hammaddesi soya fasulyesi, palmiye yağı, kolza tohumu, ayçiçeği, şeker kamışı gibi yenilebilir gıda ürünleridir. Birinci nesil biyoyakıtlar ticari üretime kadar olgunlaşmıştır ve şu anda deniz taşımacılığı da dahil olmak üzere ulaşım sektörlerinde kullanılmaktadır.

İkinci nesil biyoyakıtlar çoğunlukla lignoselülozik malzemelerden ve yenilebilir olmayan bitki yağlarından elde edilir. Örneğin miscanthus, mısır koçanı, jatropha yağı, kastor yağı veya pongamia yağı gibi. Yenilebilir olup olmasına bakılmaksızın atık bitkisel veya hayvansal yağlardan elde edilen biyoyakıtlar yine ikinci jenerasyon olarak kabul edilir. İkinci nesil biyoyakıtlara örnek olarak FT-dizel (Fischer-Tropsch), Piroлиз Yağı ve biyometanol verilebilir. Bitkilerin lignoselülozunu parçalamanın zorluğu nedeniyle ikinci nesil biyoyakıtlarda geliştirilmiş işleme teknolojileri kullanılmaktadır. Bu işlemler daha kararlı bir yakıt sağlar, ancak kullanılan biyokütlenin türüne bağlı olarak değişen özel teknolojiler gerektirir ve sonuç olarak üretim maliyeti artar (ABS, 2021b; Kesharwani ve diğ, 2019).

Birinci nesil biyoyakıtların, tarım arazilerinin büyük ölçekli kullanımı ve gıda ile rekabet nedeniyle, ikinci nesil biyoyakıtların ise kaynakları şu anda ticari olarak olgun olmaması ve maliyetlerinin genel olarak yüksek olması nedeni ile araştırmacılar üçüncü nesil biyoyakıtlar üzerinde çalışmalarını başlamıştır. Üçüncü nesil biyoyakıtlar mikroalglerden elde edilmektedir. Mikroalgler biyokütlesi, üretim için kaliteli tarım arazisi gerektirmemesi, aynı yüzey alanında geleneksel ürünlere göre daha fazla biyokütle elde edilmesi, yüksek büyüme hızı ve kısa hasat döngüsü gibi avantajları nedeniyle sürdürülebilir bir biyoyakıt olma potansiyeli yüksektir. Üçüncü nesil biyoyakıt çalışmaları halen devam etmektedir (Chowdhury ve Loganathan, 2019).



3. SÜRDÜRÜLEBİLİR BİYİYAKIT SEÇİMİ İÇİN DEĞERLENDİRME MODELİ

Tezin bu bölümünde değerlendirme modelinde kullanılacak biyoyakıtlar belirlenmiştir. Değerlendirilmesi yapılacak biyoyakıtlar belirlendikten sonra değerlendirme kriterleri belirtilerek değerlendirme modeli oluşturulur. Kriter ağırlıklandırmaları uzman görüşleri alınarak, kriterler için biyoyakıtların ağırlıklandırmaları ise literatür araştırmasından elde edilen bulgular ile belirlenmektedir. Son olarak, Bölüm 4'te değerlendirmeye tabi tutulan biyoyakıtların nihai performansı ortaya koyulacaktır.

3.1 Değerlendirme Modelinin Motivasyonu

Denizcilik sektöründe kullanılan ve kullanılması muhtemel olan çeşitli biyoyakıt türleri vardır. Biyoyakıt çeşitlerinin eldesinde kullanılan hammaddeye ve üretim prosesine göre farklı son ürünler ortaya çıkmaktadır. Gemisini veya filosunu, içinde bulunduğumuz alternatif yakıtlara geçiş sürecinde, biyoyakıt kullanarak emisyon hedeflerini tutturmak ve işletmesini aksatmadan devam ettirmek isteyen kişi veya kurumlar biyoyakıtlar arasında tercih yapmak istediğinde her bir seçeneğin olumlu ve olumsuz yanlarını bilmesi ve birbirleri ile karşılaştırması gerekmektedir. Biyoyakıtları değerlendirecek, bu biyoyakıtların güçlü ve zayıf yanlarını gösterecek ve karar verme sürecinden önce karar vericilere yardımcı olacak bir araca ihtiyaç vardır. Popüler çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan analitik hiyerarşi süreci (AHP), çoklu karşılaştırma yaparak her bir değerlendirme kriterinde hangi alternatif yakıtın diğerinden daha güçlü veya daha zayıf olduğunu gösterebilir. Kriterler doğru seçilirse ve değerlendirme yapısı iyi oluşturulursa, değerlendirmede hangi biyoyakıtın denizcilik sektörü için daha uygun olduğu net bir şekilde ortaya koyulabilir.

3.2 Değerlendirmeye Alınacak Biyoyakıtların Belirlenmesi

Değerlendirmeye alınacak biyoyakıtların belirlenmesinde biyoyakıtların jenerasyonları, üretiminde kullanılan biyokütle hammaddesi ve üretim prosesi göz

önüne alınmıştır. Biyoyakıtlar birçok farklı hammadde ve farklı metotlar ile üretiltikleri için çok fazla sayıda ve özellikle biyoyakıtların karşılaştırılması güç olacaktır. Bu sebeple değerlendirme modelinde kullanılacak biyoyakıtların seçiminde benzeri biyoyakıtlar için de gösterge olacak şekilde, her bir biyoyakıt jenerasyonundan seçim yapılmıştır. Ayrıca mevcut dizel makineli gemi altyapısı düşünülerek, alternatif yakıtlara geçiş sürecindeki performansını net olarak ortaya koyabilmesi adına hem drop-in biyoyakıtlardan hem de drop-in olmayanlardan seçim yapılmıştır. Yine benzer şekilde sürdürülebilir biyoyakıt seçiminde hammadde önemli bir noktadır. Bu sebeple aynı üretim prosesi ile farklı hammadde kullanılarak elde edilen son ürünün aynı olduğu biyoyakıtlar seçilmiştir. Son olarak, sektör ilgisi çok düşük olan biyoyakıtlar potansiyel vadedmediği için çalışmaya dahil edilmemiştir. Böylelikle alternatif yakıtlara geçiş sürecinde biyoyakıtları her açıdan değerlendirmek ve karşılaştırmak hedeflenmiştir.

Bu bilgiler ışığında değerlendirme modelinde kullanılmak üzere seçilen biyoyakıtlar jenerasyonu, hammaddesi ve üretim yöntemi ile birlikte Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Yakıt Türü	Jenerasyon	Hammadde	Üretim Yöntemi
FAME	1. JEN.	Soya ve palm yağı	Transesterification
HVO	1. JEN.	Soya ve palm yağı	Hydrotreating
SVO	1. JEN.	Soya ve palm yağı	
FAME	2. JEN.	Atık yağ	Transesterification
HVO	2. JEN.	Atık yağ	Hydrotreating
Biomethanol	2. JEN.	Miskantus ve mısır koçanı	Gasification
FT-Dizel	2. JEN.	Miskantus ve mısır koçanı	Gasification
Bio-DME	2. JEN.	Miskantus ve mısır koçanı	Gasification
LBM	2. JEN.	Miskantus ve mısır koçanı	Gasification
HVO	3. JEN.	Mikroalgler	Hydrotreating

Şekil 3.1 : Seçilen biyoyakıtlar.

3.3 Değerlendirme Modeli Aracı

Multi-criteria decision making (MCDM) (Çok kriterli karar verme) yöntemleri, karar vermek, performans değerlendirmek, birçok alternatif arasından öge seçmek vb. gibi durumlarda faydalı araçlardır. Çok özellikli fayda teorisi, analitik hiyerarşi süreci (AHP), bulanık küme teorisi, vaka tabanlı akıl yürütme, veri zarflama analizi, basit çok özellikli derecelendirme tekniği, hedef programlama, basit toplama ağırlıklandırma ve bu yöntemlerin kombinasyonunu gibi çeşitli çok kriterli karar verme yöntemleri vardır. AHP, birçok avantajı olan, kullanımı kolay, alternatifleri ve kriterleri ikili olarak karşılaştıran, veri yoğun olmayan ve çeşitli problemlerde rahatlıkla kullanılabilen popüler MCDM yöntemlerinden biridir (Velasquez ve Hester, 2013).

Bu tez çalışmasında Saathy tarafından bulunan AHP yardımıyla değerlendirme yapılmıştır. AHP, karmaşık, çok kriterli problemler için güçlü bir karar verme aracıdır. Verilerin hem nicel hem de nitel olması veya kriter ağırlıklarının uzman görüşlerine göre verilmesi yararlıdır (Zincir, 2019). AHP bu çalışmanın ana konusu olan performans tipi bir karar verme sürecine kolayca uyum sağlayabilir (Velasquez ve Hester, 2013). Çizelge 3.1 AHP yönteminin karar verme problemine uygulama adımlarını göstermektedir.

Çizelge 3.1 : AHP uygulama adımları.

1. Adım: Kriter için ağırlıkların geliştirilmesi
<ul style="list-style-type: none">• Tek bir ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulması• Basit tutarlılık testinin yapılması• Her satırın değerlerinin normalleştirilmesi• Her satırın ortalamasını alarak ağırlıkların hesaplanması• Tutarlılık oranının (CR) kontrol edilmesi
2. Adım: Alternatifler için ağırlıkların geliştirilmesi
<ul style="list-style-type: none">• Tek bir ikili karşılaştırma matrisi oluşturun• Basit tutarlılık testinin yapılması• Her satırın değerlerinin normalleştirilmesi• Her satırın ortalamasını alarak ağırlıkların hesaplanması• Tutarlılık oranının (CR) kontrol edilmesi
3. Adım: Kararın ağırlıklı ortalama derecelendirmesine göre hesaplanması

Birinci adım için tek bir ikili karşılaştırma matrisi oluştururken, hangi ögenin diğerlerinden daha önemli olduğunu belirlemek için göreceli önem ölçeği kullanılır. Çizelge 3.2 göreceli önem ölçeğini göstermektedir.

Çizelge 3.2 : Göreceli önem ölçeği.

Ölçek	Tanım	Not
1	Eşit önemde	i ile j eşit derecede önemlidir
3	Biraz daha önemli	i j'den biraz daha önemlidir
5	Oldukça önemli	i j'den oldukça önemlidir
7	Çok önemli	i j'den çok önemlidir
9	Son derece önemli	i j'den son derece önemlidir
2,4,6,8	Ara değerler	i'nin j'ye göre öneminin tek rakamlar arasındaki değerleri

AHP tablosunun tutarlılığını hesaplamak için denklem (3.1), (3.2) ve (3.3) kullanılır (Zincir, 2019). W_i , i tipi kriter veya alternatifin performans ağırlıklandırmasıdır. a_i , i tipi kriter veya alternatif satırının toplamıdır. CI (Consistency Index) tutarlılık indeksidir, RI (Random Index) random indeks ve CR (Consistency Ratio) tutarlılık oranıdır. RI, Saathy tarafından geliştirilmiştir ve CR hesaplaması yapılırken onun Random indeks tablosu kullanılmaktadır ve hesaplanan CR 0,10'dan küçükse matris tutarlıdır ve AHP yöntemi uygulanmaya devam edilir (Saaty, 2008). Random index tablosu Çizelge 3.3'te verilmiştir.

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot \sum_{i=1}^n a_i) \quad (3.1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.3)$$

Çizelge 3.3 : Random indeks değerleri.

Matriks Sırası	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Random İndeks (RI)	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58

3.4 Literatürde AHP Çalışmaları

Tayvan'daki otobüsler için en iyi alternatif yakıt modunu belirlemek için bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada kriterlerin ağırlıklarını bulmak için AHP methodu kullanılmıştır (Tzeng ve diğ., 2005). Çalışmanın kriterleri; enerji arzı, enerji verimliliği, hava kirliliği, gürültü kirliliği, endüstriyel ilişki, uygulama maliyetleri, bakım maliyetleri, araç kapasitesi, yol kolaylığı, trafik akış hızı ve konfor duygusudur. Çalışma için alternatif yakıt modları, konvansiyonel dizel motor, alternatif yakıt modu, elektrikli araç ve hibrit elektrikli araç altında toplanmıştır. Yapılan değerlendirme

sonucunda hibrit elektrikli otobüsün en uygun alternatif yakıt modu olduğu sonucuna varılmıştır.

Tsita ve Pilavachi, çalışmalarında Yunanistan karayolu taşımacılığı sektörü için alternatif yakıtlar üzerinde çalışma yapmışlardır. İçten yanmalı motor, 1. nesil biyoyakıtlar, 2. nesil biyoyakıtlar, hidrojen yakıt hücreleri, hibrit araç, plug-in hibrit araç ve elektrikli araçta kullanılan yedi alternatif yakıtı değerlendirdiler. Değerlendirme kriterleri, uygulama maliyeti, teknoloji uygunluk maliyeti ve enerji maliyeti alt kriterleri ile maliyet ana kriterleri ve CO₂ emisyonları, enerji güvenliği, istihdam ve sosyal refah alt kriterleri ile politika ana kriterleri olmuştur. AHP sonuçlarına göre, 1. ve 2. nesil biyoyakıtlarla harmanlanmış yakıtı içten yanmalı motorlarda kullanmayı en uygun alternatif yakıt seçeneği olarak tespit etmişlerdir (Tsita ve Pilavachi, 2012).

Yakın zamanda yapılan bir diğer çalışma ise, gemilerde kullanılmak üzere alternatif deniz yakıtlarını karşılaştırmayı amaçlamıştır. Bu çalışmada metanol, etanol, LNG ve hidrojen AHP yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır (Deniz ve Zincir, 2016). Değerlendirme kriterleri güvenlik, küresel kullanılabilirlik, bunker kapasitesi, dayanıklılık, mevcut gemilere uyarlanabilirlik, motor performansı üzerindeki etki, motor emisyonları üzerindeki etki, emisyon düzenlemelerine uygunluk, motor yanma odası bileşenleri üzerindeki etki, ticari etkiler ve maliyetlerdir.

Başka bir çalışmada alternatif deniz yakıtları AHP kullanılarak değerlendirilmiştir (Månsson, 2017). Çalışmaya dahil edilen alternatif yakıtlar ise LNG, doğal gazdan elde edilen metanol, biyo-metanol ve elektroliz ile elde edilen hidrojen olmuştur. Değerlendirme ana kriterleri, yakıt fiyatı, işletme maliyeti, sevk için yatırım maliyeti alt kriterleri ile maliyet, mevcut altyapı alt kriterleri ile teknik, güvenilir yakıt temini alt kriterleri ile çevre, asitlenme alt kriterleri ile çevre, iklim değişikliği, güvenlik ve gelecek mevzuat alt kriterleri ile sağlık etkisi ve sosyal olarak belirlenmiştir. Sonuç elektroliz ile elde edilen hidrojenin en yüksek puanı aldığını göstermiştir.

İspanya'da taşımacılık sektöründe kullanılan LNG, HVO MDO yakıtlarını değerlendirmek için bir çalışma yapılmıştır. İlk olarak, önceki AHP tabanlı çalışmalarda kullanılan değerlendirme kriterlerini araştırmışlardır. Teknik/operasyonel, ekonomik, çevresel, sosyal ve güvenlik kriterlerinin değerlendirme çalışmaları için en yaygın kriterler olduğunu bulmuşlardır. Daha sonra

çalışmalarında ekonomik, çevresel ve sosyal kriterleri kullanmışlardır. Ekonomik ana kriterde güvenilirlik, yatırım ve işletme maliyetleri ve mevzuat alt kriterlerini tercih etmişlerdir. Çevresel ana kriterde sera gazı emisyonları, hava kirleticileri (NO_x ve PM) ve gürültü alt kriterlerini kullanmışlardır. Son olarak sosyal ana kriterde istihdam, sosyal faydalar ve sosyal kabul edilebilirlik alt kriterlerini kullanarak çalışmalarını yürütmüşlerdir (Osorio-Tejada ve diğ, 2017).

Diğer bir çalışmada kamu hizmeti şirketi için alternatif yakıt seçimi üzerine bir çalışma yapılmış ve AHP yöntemlerinden faydalanılmıştır. Alternatif yakıt seçenekleri olarak biyodizel, elektrik, etanol, hidrojen, doğal gaz ve propan kullanılmıştır. Değerlendirme kriterleri, maliyet ana kriterleri altında satın alma maliyeti ve işletme maliyeti, güvenlik ve performans ana kriterleri altında güvenlik, algılanan kalite ve performans, yakıt kolaylığı ana kriterleri altında benzin istasyonu mevcudiyeti, dolum süresi ve sürüş menzili, sera gazı emisyonu ve sosyal çevresel ve sosyal ana kriterler altında refah etkisi, pazar olgunluğu ana kriterleri altında pazara giriş ve ikincil pazar gelişimi olarak ele alınmıştır. Çalışmada en iyi alternatif yakıtın doğal gaz olduğu sonucuna varılmıştır (Oztaysi ve diğ, 2017).

3.5 Değerlendirme Kriterlerinin ve Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Alternatif yakıtların değerlendirilmesi, gemiler, alternatif yakıt sistemi veya alternatif yakıtların özellikleri ile ilgili çeşitli hususlar dikkate alınarak yapılabilir. Bu çalışmadaki değerlendirme kriterleri belirlenirken, literatürde daha önce yapılmış çalışmalar incelenerek, bu çalışmaların genel perspektifine odaklanarak, alternatif bir deniz yakıtı için en önemli noktalar tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca çalışmamızda biyoyakıtların değerlendirilmesi yapılacağı için biyoyakıtların sahip olduğu karakteristik özelliklerin net etkisinin görülebilmesi hedeflenmiş ve bu bağlamda kriterler belirlenmiştir.

Daha önceki yapılmış çalışmaların birçoğunda yaygın olarak kullanılan kriterlerden olan emniyet, teknolojik olgunluk seviyesi (TRL indeks), hammadde mevcudiyeti ve maliyet kriterleri tez çalışmasının değerlendirme modelinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu kriterlere ek olarak değerlendirme modelinde LCA yaklaşımı benimsendiği için WTW (well-to-wake) emisyon performansı da dahil edilmiştir. Biyoyakıtların alternatif yakıtlara geçiş sürecinde önemli bir konumu olmasından dolayı konvansiyonel deniz yakıtları için drop-in özelliğine sahip olan ve olmayan

biyoyakıtların etkisini net olarak görebilmek adına mevcut dizel makineli gemilere uyumluluk kriteri de dahil edilmiştir. Son olarak bazı biyoyakıtların hammadde eldesinde tarım arazisi ihtiyacı olduğundan dolayı, biyoyakıtların net karbon emisyonuna önemli derecede etki edebilecek olan ILUC (indirect land use change) etkisi bir diğer kriter olarak çalışmaya dahil edilmiştir. Değerlendirme modelinde kullanılacak kriterler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Değerlendirme kriterleri.

Her bir kriterdeki her bir alternatifin göreceli önem ölçeği, bir kriter için en iyi alternatif ile en kötü alternatif arasındaki farkın elde edilmesiyle belirlenir. En iyi ve en kötü alternatif, bir değerlendirme kriteri üzerindeki literatürden elde edilen değerlere veya etkilere göre bulunur. Daha sonra en iyi ve en kötü arasındaki fark değeri dokuz bölünerek 1'den 9'a kadar göreceli önem ölçeği oluşturulur (Çizelge 3.2). Alternatiflerin karşılaştırılması için her zaman küçük değer büyük değerden çıkarılarak, elde edilen değer bir önceki aşamada oluşturulan göreceli önem ölçeğinde hangi değere denk geliyor ise, o değer ikili karşılaştırma matrisine yazılır. Son olarak matrisin ağırlıkları ve CR hesaplanır. İkili karşılaştırma aralıklarını belirlemek için (3.4) ve (3.5) denklemleri kullanılır (Deniz ve Zincir, 2016).

$$Vdif = Vb - Vw \quad (3.4)$$

$$Vint = \frac{Vdif}{9} \quad (3.5)$$

Burada Vb en iyi alternatif değeri, Vw en kötü alternatif değeri, Vdif alternatifler arasındaki en yüksek fark değeri ve Vint ikili karşılaştırmanın aralık değeridir.

3.5.1 Kriterlerin açıklanması ve alternatiflerin kriterler üzerindeki performansı

Bu bölümde Şekil 3.2’de verilen değerlendirme kriterlerinin detaylı açıklamasına yer verilmiştir. Ayrıca değerlendirmeye alınacak her bir alternatif biyoyakıtın değerlendirme kriterleri üzerindeki performansını bulurken hangi etki, özellik ve değerlere göre analiz yapıldığı ifade edilmiştir.

3.5.1.1 Teknolojik olgunluk seviyesi (TRL indeks)

Tüm biyoyakıt seçenekleri aynı olgunluk seviyesine sahip değildir. Olgunluk seviyesi ticari olarak mevcut biyoyakıtlar ile daha yenilikçi gelişmiş üretim yöntemlerine sahip biyoyakıtlar arasında değişir. Aynı yakıt türünü ve sınıfını üretmek için farklı üretim yolları vardır ancak üretimden sonraki tedarik zinciri aynı tür biyoyakıtlar için aynıdır.

Yeni üretim yöntemleri için TRL indeksi bir ürünün yada teknolojinin olgunluğunu ölçer. TRL 0 seviyesi fikir aşamasıdır. TRL 1-3 seviyeleri araştırma aşamasını, TRL 4-6 geliştirme aşamasını, TRL 7-8 ise alt sistemleri geliştirme ve endüstriyel çevreye yayılma aşamasını belirtir. TRL 9 seviyesi ise kanıtlanmış olgun teknoloji anlamına gelir ve ürün veya teknolojinin ticari olarak pazarda bulunduğunu ifade eder. TRL indeksin seviyeleri Çizelge 3.4’te verilmiştir (URL-4).

Çizelge 3.4 : Teknoloji olgunluk seviyeleri (TRL indeksi).

TRL indeksi	Açıklama
0	Fikir. Kanıtlanmamış konsept, herhangi bir test yapılmamıştır.
1	Temel araştırma. İlkeler varsayılmış ve gözlemlenmiştir ancak deneysel kanıt mevcut değildir.
2	Teknoloji formülasyonu. Konsept ve uygulama formüle edilmiştir.
3	Uygulamalı araştırma. İlk laboratuvar testleri yapılmıştır.
4	Küçük ölçekli prototip laboratuvar ortamında geliştirilmiştir. (adi prototip)
5	Büyük ölçekli prototip hedeflenen ortamda test edilmiştir.
6	Prototip sistem, beklenen performansa yakın olarak amaçlanan ortamda test edilmiştir.
7	Ticari öncesi ölçekte operasyonel ortamda gösteri ve yayılım.
8	Üretim sorunları çözülmüştür. Türünün ilk örneği ticari olarak çıkmıştır.
9	Tamamen ticari uygulamaya geçilmiştir. Müşteriler için pazarda yerini almıştır.

Değerlendirme modelinde karşılaştırması yapılacak biyoyakıtlar için literatürdeki bilgilerden faydalanılmıştır. Güncel kullanımda olan biyoyakıt ve üretim yöntemlerine ek olarak potansiyeli olan ve gelecekte kullanılması muhtemel biyoyakıt ve üretim yöntemleri de değerlendirmeye dahil edilmiştir (HVO 3. Jenerasyon). Seçilen biyoyakıtların günümüzdeki teknolojik olgunluk seviyeleri tespit edilmiştir (Laursen

ve Barcarolo, 2022). Buna ek olarak, seçilen biyoyakıtların son yıllardaki TRL indeks gelişimine göre yapılan 2030 yılı TRL indeks tahminleri de (Verbeek ve diğ, 2020) değerlendirmeye alınmıştır. Seçilen biyoyakıtların TRL indeks kriterindeki performans puanı bu iki değer toplamı olarak kullanılmıştır. Çizelge 3.5'te değerlendirme modelinde karşılaştırmak için seçilen biyoyakıtların TRL indeks verileri ifade edilmiştir.

Çizelge 3.5 : TRL indeks puanları.

Biyoyakıt	Üretim Yöntemi	Güncel TRL indeks	2030 TRL indeks	Puan
FAME 1. Jen.	Transesterification	9	9	18
HVO 1. Jen.	Hydrotreating	9	9	18
SVO	-	9	9	18
FAME 2. Jen.	Transesterification	9	9	18
HVO 2. Jen.	Hydrotreating	9	9	18
Biomethanol	Gasification	6	8	14
FT-dizel	Gasification	6	8	14
Bio-DME	Gasification	6	8	14
LBM	Gasification	6	8	14
HVO 3. Jen.	Hydrotreating	4	5	9

3.5.1.2 Maliyet

Maliyet ticari olarak faaliyet sürdüren her sektörün belirleyici kriterleri arasında olduğu gibi denizcilik sektöründe de önemli bir konumdadır. Deniz taşımacılığındaki maliyetlerin artması her türlü mal ve hizmetin nihai tüketici için artmasına yol açabilir. Çünkü deniz taşımacılığı küresel ticaretin büyük bir kısmını oluşturur.

Biyoyakıtların üretim maliyetleri çok geniş bir yelpazeye sahiptir. Bunun nedenlerinden bir tanesi, biyoyakıtlar birçok farklı hammaddeden elde edilebildiği için hammadde fiyatlarının birbirinden çok farklı olabilmesidir. Dünya üzerinde bölgesel olarak bile hammadde fiyatları çeşitlilik göstermektedir. Bir diğer neden üretim yöntemleri. Farklı üretim prosesleri için farklı yatırım ve işletme maliyetleri vardır. Bu sebeple seçilen biyoyakıtların maliyet kriterindeki puanlamaları üretim yöntemleri ve hammadde konuları göz önüne alınarak yapılan geniş literatür araştırmasına dayandırılarak (Van Der Kroft ve Pruyn, 2021; Nelissen ve diğ, 2020; Saddler ve diğ, 2020; Verbeek ve diğ, 2020) 1-5 arasında yapılmıştır. 5 puan en düşük maliyetli biyoyakıtı 1 puan en yüksek maliyetli biyoyakıtı ifade etmektedir.

SVO biyokütleden ekstraksiyonu yapılan yağdır. FAME ise tek transesterification prosesi gerektirir ve buna rağmen uygun üretim teknolojisi sayesinde uygun maliyetlidir. Van Der Kroft ve Pruyn (2021) maliyetini 6,5€ / GJ hesaplamıştır. Zhou ve diğ, (2020) FAME ve SVO'yu diğer biyoyakıtlar arasında en uygun olarak belirtmiştir. HVO ise hydrotreating prosesi gerektirir. Zhou ve diğ, (2020) biyoyakıtların karşılaştırmalı çalışmasında FAME'den daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Van Der Kroft ve Pruyn (2021) ise HVO'nun üretim prosesleri maliyetini 10,3€ / GJ olarak hesaplamıştır. Biomethanol, Bio-DME ve FT-dizel yakıtlarında ise ilk olarak gasification prosesi vardır. Van Der Kroft ve Pruyn (2021) gasification prosesinin maliyetini 9,4€ / GJ olarak hesaplamıştır. Bio-DME ve biomethanol daha sonra ikincil bir yakıt sentezi prosesine girmektedir ve ikincil proses ise 8-16€ / GJ arasında hesaplanmıştır. Zhou ve diğ, (2020) ise karşılaştırmalı çalışmasında bu yakıtların maliyetleri orta derecede değerlendirmiştir. FT-dizel ise ikincil bir Fischer-Tropsch sentezi prosesine girmektedir. Van Der Kroft ve Pruyn (2021) bu maliyeti 22,2€ / GJ olarak hesaplamıştır. Zhou ve diğ, (2020) ise FT-dizeli yüksek maliyetli biyoyakıt sınıfında değerlendirmiştir. Gasification yöntemi ile elde edilen LBM ise maliyeti ise Nelissen ve diğ, (2020) tarafından yaklaşık 36€ / GJ olarak tespit edilmiştir. 3. jenerasyon mikroalgler kaynaklı biyoyakıt ise hydrotreatment öncesinde biyokütleden yağ eldesi prosesi, düşük TRL indeksi ve ARGE çalışmalarının hala devam ediyor olmasından sebep en yüksek maliyetli biyoyakıt olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.6 değerlendirme modelinde kullanılacak biyoyakıtların maliyet kriterindeki performanslarını göstermektedir.

Çizelge 3.6 : Maliyet puanları.

Biyoyakıt	Üretim yöntemi	Puan
FAME 1. Jen.	Transesterification	5
HVO 1. Jen.	Hydrotreating	4
SVO	-	5
FAME 2. Jen.	Transesterification	5
HVO 2. Jen.	Hydrotreating	4
Biomethanol	Gasification	3
FT-dizel	Gasification	2
Bio-DME	Gasification	3
LBM	Gasification	2
HVO 3. Jen.	Hydrotreating	1

3.5.1.3 Hammadde mevcudiyeti

Biyoyakıtların sürdürülebilirliği genellikle sürdürülebilir hammaddelerin mevcudiyeti ile birlikte tartışılmaktadır. Bu hammaddelere yönelik talep, sürdürülebilir şekilde tedarik edilebilecek hacimleri aştığında, sürdürülebilir olmayan uygulamalar ortaya çıkmakta ve ormansızlaşma ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi olumsuz çevresel etkilere neden olmaktadır. Kullanılabilirlik sorunlarının analizi önemlidir çünkü birçok sanayi sektörü iklim değişikliği hedeflerine ve döngüsel, biyo-temelli bir ekonomiye ulaşmak için biyokütle kullanmayı düşünmektedir. Diğer sektörlerden gelen talep, henüz geliştirilmesi gerekebilecek alternatifler de dahil olmak üzere biyokütle kullanımına yönelik alternatiflerine bağlıdır. Bazı gözlemciler biyokütle için rekabetin 2030'dan sonra artacağını, bunun da biyokütlenin fiyatını yükselteceğini ve özellikle e-yakıtlar kullanıma sunulduğunda biyoyakıtları denizcilik sektörü için rekabet edilemez hale getireceğini tahmin etmektedir (Hendriksen ve diğ, 2021).

Tüm bu konular, belirli bir sektör için biyokütle veya biyoyakıt kullanılabilirliği konusunda kesin sonuçlara ulaşmayı da zorlaştırmaktadır. Dünyanın üretebileceği biyokütle miktarına ilişkin tahminler kabul edilebilir bir belirsizlik aralığına sahip olabilirken, sürdürülebilirlik kriterlerinin dikkate alınması belirsizliği önemli ölçüde artırmaktadır ve tüm sektörlerin talep fonksiyonlarının analizi neredeyse imkansızdır. Deniz taşımacılığının gelecekteki enerji talepleri, özellikle de karayolu taşımacılığı ile karşılaştırıldığında, hammaddelerin mevcudiyeti konusunda endişelere yol açmaktadır. Fakat karbonsuzlaştırma konusunda daha az seçeneği olan sektörlerde biyokütle kullanımı da gerekliliktir.

Değerlendirme modelinde karşılaştırması yapılan biyoyakıtların hammadde mevcudiyeti kriterindeki puanları hesaplanırken literatürdeki bilgilerden faydalanılmıştır (Hoefnagels ve Germer, 2020; Van Der Kroft ve Pruyn, 2021; Laursen ve Barcarolo, 2022). Sürdürülebilir biyoyakıt seçiminde en iyi kararı verebilmek için hammadde olarak kullanılacak biyokütlenin sadece günümüzdeki mevcudiyeti değil, gelecekte elde edilebilirliği de göz önüne alınmıştır. Puanlama 1-5 arasında yapılmıştır. 1 puan en kötü, 5 puan en iyi skoru belirtir. Seçilen her bir biyoyakıtın hammadde mevcudiyeti kriterindeki puanı, günümüz ve gelecek için aldığı puanların toplamı olarak kullanılmıştır. Çizelge 3.7'de değerlendirme modelinde kullanılmak üzere seçilen biyoyakıtların hammadde mevcudiyeti kriterindeki performansları verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Hammadde mevcudiyeti puanları.

Biyoyakıt	Hammadde	Güncel puan	Gelecekteki tahmini puan	Toplam puan
FAME 1. Jen.	Soya ve palm yağı	1	2	3
HVO 1. Jen.	Soya ve palm yağı	1	2	3
SVO	Soya ve palm yağı	1	2	3
FAME 2. Jen.	Atık yağlar	1	3	4
HVO 2. Jen.	Atık yağlar	1	3	4
Biomethanol	Miskantus ve mısır koçanı	3	5	8
FT-dizel	Miskantus ve mısır koçanı	3	5	8
Bio-DME	Miskantus ve mısır koçanı	3	5	8
LBM	Miskantus ve mısır koçanı	3	5	8
HVO 3. Jen.	Mikroalgler	1	5	6

3.5.1.4 Uyumluluk

Denizcilik sektörünün alternatif yakıtları geçiş süreci kolay olmayacaktır. Sektörün alternatif yakıtlara geçişinde aşılması gereken birçok engel vardır. En önemli unsurlardan birisi de, alternatif yakıtın dünya deniz ticaret filosunda aktif olarak çalışan gemilerin mevcut altyapısıdır. Bu gemiler ve sistemleri için harcanan sermayenin boşa gitmemesi için bu gemilerin ömürlerinin sonuna kadar işletilmesi önemli bir konudur. Günümüzde gelecek için birçok alternatif yakıt veya tahrik sistemi üzerinde çalışmalar olsa da bazıları mevcut gemi altyapısı ile daha uyumlu veya tam uyumlu olabilmektedir. Biyoyakıtların bu noktadaki kabiliyetleri öne çıkmaktadır. Bu sebeple seçilen biyoyakıtların uyumluluk kriterindeki performansları özellikle alternatif yakıtlara geçiş sürecinde mevcut gemilerin verimli değerlendirilebilmesi adına önemli bir kıstastır.

Dünya üzerindeki mevcut gemilerin %98.8'i konvansiyonel deniz yakıtları (HFO, MDO, MGO) ile uyumludur (Eirik Ovrum ve diğ., 2022). Bu sebeple konvansiyonel yakıtlara drop-in olarak kullanılabilen biyoyakıtların uyumluluk kriterindeki puanı daha yüksektir. Uyumluluk kriterindeki en yüksek puanı ise ASTM D975 dizel yakıt standartlarını karşılayan yakıtlar almıştır.

Değerlendirme modelinde karşılaştırması yapılan biyoyakıtların uyumluluk kriterindeki puanı hesaplanırken literatürdeki bilgilerden faydalanılmıştır (ABS,

2021b; Eirik Ovrum ve diğ, 2022; Laursen ve Barcarolo, 2022; Ryste ve diğ, 2019; Sevim ve Zincir, 2022; Verbeek ve diğ, 2020). FT-dizel ve HVO ASTM D975 dizel yakıt standartlarını karşıladığı için uyumluluk performansları çok iyidir. FAME yakıt standartını karşılamasa da, distile yakıtlara yüksek oranlarda drop-in olarak kullanılabilirdiği için görece yüksek performans sergiler. SVO düşük karışım oranlarında drop-in olarak kullanılabilirdiği için orta derece bir performans sergilemiştir. Bio-DME distile yakıtlar ile düşük oranlarda kullanılabilirliği sebebiyle çok az uyumlu olarak değerlendirilmiştir. Bio-DME'nin çift yakıtlı makinelerde LPG yerine kullanılabilmesi, bu tip gemilerin çok az olmasından dolayı performansına olumlu yönde etki edememiştir. Biomethanol ve LBM ise distile yakıtlar ile karışım halinde kullanılamaması sebebi ile en düşük performansı sergilemiştir. Puanlama 1-5 arasında yapılmıştır. 1 puan en kötü, 5 puan en iyi skoru belirtir. Çizelge 3.8 değerlendirme modelinde kullanılmak üzere seçilen biyoyakıtların uyumluluk kriterindeki puanlarını göstermektedir.

Çizelge 3.8 : Uyumluluk puanları.

Biyoyakıt	Üretim yöntemi	Fosil yakıt karşılığı	Puan
FAME 1. Jen.	Transesterification	MDO, MGO	4
HVO 1. Jen.	Hydrotreating	MDO, MGO	5
SVO	-	HFO	3
FAME 2. Jen.	Transesterification	MDO, MGO	4
HVO 2. Jen.	Hydrotreating	MDO, MGO	5
Biomethanol	Gasification	Methanol	1
FT-dizel	Gasification	MDO, MGO	5
Bio-DME	Gasification	MDO, MGO, LPG	2
LBM	Gasification	LNG	1
HVO 3. Jen.	Hydrotreating	MDO, MGO	5

3.5.1.5 Emniyet

Emniyet açısından bakıldığında, biyoyakıtlar MGO ve MDO gibi geleneksel yakıtlarla benzerlikleri fazladır ve yapısal yangından korunma, güvenlik, yangınla mücadele, yangın ve gaz algılama, güvenli elleçleme, depolama ve yakıt ikmali için mevcut IMO ve klas kuruluşu kuralları bu biyoyakıtlara uygulanmak için yeterli görünmektedir. Ancak bu durum tüm biyoyakıtlar için geçerli değildir. Bio-DME, Biomethanol ve LBM konvansiyonel yakıtlardan birçok özelliği ile ayrılmaktadır.

Değerlendirme modelinde karşılaştırılan biyoyakıtların emniyet kriterindeki performansları HAZID (Hazard Identification Study) metodolojisi ile biyoyakıtlar üzerinde yapılan bir risk değerlendirme çalışmasına ve literatürdeki bilgilere dayandırılmıştır (Laursen ve Barcarolo, 2022; Sevim ve Zincir, 2022). HAZID çalışmasında yangın ve patlama tehlikeleri, kimyasal reaktivite tehlikeleri, toksisite tehlikeleri, asit riskleri, oksidasyon riskleri, mikrobiyal risk gibi birçok etki göz önüne alınmıştır. Puanlama 1-5 arasında yapılmıştır. 1 puan en kötü, 5 puan en iyi skoru belirtmektedir. Çizelge 3.9 değerlendirme modelinde kullanılmak üzere seçilen biyoyakıtların emniyet kriterindeki puanlarını göstermektedir.

Çizelge 3.9 : Emniyet puanları.

Biyoyakıt	Fosil yakıt karşılığı	Puan
FAME 1. Jen.	MDO, MGO	4
HVO 1. Jen.	MDO, MGO	5
SVO	HFO	4
FAME 2. Jen.	MDO, MGO	4
HVO 2. Jen.	MDO, MGO	5
Biomethanol	Methanol	3
FT-dizel	MDO, MGO	5
Bio-DME	MDO, MGO, LPG	2
LBM	LNG	1
HVO 3. Jen.	MDO, MGO	5

3.5.1.6 ILUC etkisi

Biyoyakıtları değerlendirirken göz önünde bulundurulması gereken bir diğer nokta da ILUC etkisidir. ILUC, daha önce gıda ve yem için ayrılan tarım arazileri biyokütle hasadı için kullanıldığında ortaya çıkmaktadır. İnsanların ve hayvanların gıda talebinde bir azalma olmayacağından, bu talebi karşılamak için yeni tarım arazilerine ihtiyaç duyulacaktır. Yeni tarım arazilerine duyulan ihtiyaç, ormanların ve sulak alanların tarım arazisine dönüştürülmesiyle sonuçlanacaktır (Juncker, 2019). Ancak ormanlar, fotosentez sayesinde biyojenik karbon yakalama kabiliyeti ile doğanın karbon döngüsünde kritik bir rol oynamaktadır. Ormanların tarım arazisine dönüştürülmesi bu nedenle istenmeyen bir durumdur ve ILUC faktörü yakıtın yaşam döngüsü emisyonları üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Finkbeiner, 2014).

ILUC biyoyakıtın hammaddesi ile ilişkilidir bir etkidir. Eğer spesifik biyoyakıtın eldesinde kullanılacak biyokütle hammaddesi, sulak tarım arazilerine ihtiyaç duyuyor ve gıda endüstrisi ile kesişiyorsa ILUC etkisi yüksektir ve kötü performans sergilediği

anlamına gelir. Eğer tarım arazilerine ve gıda endüstrisine herhangi bir etkisi yok ise ILUC etkisi yoktur ve ortalama performans sergilediği anlamına gelir. Ancak eğer biyokütle hasadı için seçilen hammadde sulak tarım arazilerine ihtiyaç duymuyor ve gıda endüstrisini olumsuz etkilemiyorsa ve daha önceden biyokütle hasadı için kullanılan tarım arazilerinin gıda endüstrisine tekrar kazandırılmasını sağlıyor ise ILUC etkisi olumlu yönde vardır ve iyi performans sergilediği anlamına gelir. Değerlendirme modelinde karşılaştırılan biyoyakıtların ILUC etkisi kriterindeki puanları 1-4 arasında yapılmıştır. 1 puan en kötü, 4 puan en iyi skoru belirtir. Çizelge 3.10 değerlendirme modelinde kullanılmak üzere seçilen biyoyakıtların ILUC etkisi kriterindeki puanlarını göstermektedir.

Çizelge 3.10 : ILUC etkisi puanları.

Biyoyakıt	Hammadde	Puan
FAME 1. Jen.	Soya ve palm yağı	1
HVO 1. Jen.	Soya ve palm yağı	1
SVO	Soya ve palm yağı	1
FAME 2. Jen.	Atık yağlar	2
HVO 2. Jen.	Atık yağlar	2
Biomethanol	Miskantus ve mısır koçanı	3
FT-dizel	Miskantus ve mısır koçanı	3
Bio-DME	Miskantus ve mısır koçanı	3
LBM	Miskantus ve mısır koçanı	3
HVO 3. Jen.	Mikroalgler	4

3.5.1.7 WTW emisyon performansı

Değerlendirme modelinde, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi sorunlara kalıcı çözümler üretilebilmesi adına LCA yaklaşımı benimsenmiştir. LCA yaklaşımı ile değerlendirilen yakıtların net karbon emisyonları tahmin edilebilmektedir.

Yakıtların net karbon emisyonlarını belirlemek için kullanılan LCA yaklaşımı iki bölümde analiz edilmektedir. Yakıtların makinede yanması sonucu oluşan emisyonlar tank-to-wake (TTW) emisyonlar olarak bilinirken, yakıtın sıfırdan nihai tüketiciye ulaşana kadarki süreçte oluşan emisyonlar well-to-tank (WTT) emisyonları olarak bilinmektedir. WTT ve TTW emisyonlarının toplanmasıyla elde edilen değer yakıtın net karbon emisyonu etkisidir ve well-to-wake (WTW) olarak adlandırılır (Sevim ve Zincir, 2023).

Prensipite, biyoyakıtlar karbon nötr bir çözüm olarak görülebilir, çünkü kullanım ömürleri boyunca hammadde tarafından emilen biyojenik CO₂, yanma sonrasında

atmosfere geri döner. Bu sebeple biyokütle elde edilirken hasat zamanına kadar atmosferden emilen CO₂, WTT hesaplamasında negatif emisyonlar olarak değerlendirilir.

Eğer biyoyakıtın yaşam döngüsünde, salımandan daha fazla karbon depolanırsa, örneğin karbon yakalama ve depolama teknolojileri kullanılarak, WTW karbon emisyonları negatif sonuçlanabilir. Fakat karbon negatif olabilmesi pek mümkün değildir. Çünkü tedarik zincirindeki nakliye, üretim gibi aşamalarda ek karbon emisyonları söz konusudur.

Değerlendirme modelinde karşılaştırması yapılan biyoyakıtların WTW emisyon kriterindeki puanı hesaplanırken literatürdeki bilgilerden faydalanılmıştır (ABS, 2021b, 2021a; Francisco ve diğ, 2009; Van Der Kroft ve Pruyn, 2021; Laursen ve Barcarolo, 2022; Saranya ve Ramachandra, 2020; Zhou ve diğ, 2020). Biyoyakıtların net karbon emisyonu performansını belirleyen en önemli faktör biyokütle olarak kullanılacak hammadde ve ona bağlı üretim prosesidir. (Laursen ve Barcarolo, 2022) lignoselülozik biyokütleden elde edilen biyoyakıtların karbon emisyonu azaltma potansiyelini yüksek bulurken, atık yağlardan elde edilenleri orta derecenin biraz üzerinde, yenilebilir bitki yağlarından elde edilenleri ise çok düşük bulmuştur. Benzer şekilde (Zhou ve diğ, 2020) enerji bitkileri ve tarımsal artıklardan elde edilen biyoyakıtların karbon emisyonlarını azaltma potansiyelini yüksek bulurken, yenilebilir bitki yağlardan elde edilen biyoyakıtların potansiyelini çok düşük tespit etmiştir. Literatürdeki benzer diğer çalışmaların çoğu bu görüşü destekler niteliktedir.

Puanlama 1-5 arasında yapılmıştır. 1 puan en kötü, 5 puan en iyi skoru belirtir. Çizelge 3.9 değerlendirme modelinde kullanılmak üzere seçilen biyoyakıtların WTW emisyon performansı kriterindeki puanlarını göstermektedir.

3. jenerasyon mikroalgler kaynaklı biyoyakıtların araştırma geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Literatürde net karbon emisyonlarına ilişkin somut örnekler veya karşılaştırmalar henüz yeterli değildir. Fakat biyokütle eldesinde tarım arazisi gerektirmeden, su ekosisteminde hızlı bir şekilde çoğalabilme kabiliyeti ve fotosentez kabiliyetiyle CO₂ döngüsünde olumlu yönde katkı sağlaması sayesinde gelecekte ciddi bir potansiyele sahiptir.

Çizelge 3.11 : WTW emisyon puanları.

Biyoyakıt	Hammadde	Puan
FAME 1. Jen.	Soya ve palm yağı	1
HVO 1. Jen.	Soya ve palm yağı	1
SVO	Soya ve palm yağı	1
FAME 2. Jen.	Atık yağlar	4
HVO 2. Jen.	Atık yağlar	4
Biomethanol	Miskantus ve mısır koçanı	5
FT-dizel	Miskantus ve mısır koçanı	5
Bio-DME	Miskantus ve mısır koçanı	5
LBM	Miskantus ve mısır koçanı	5
HVO 3. Jen.	Mikroalgler	5*

*Gelecek tahminidir.



4. DEĞERLENDİRME MODELİNİN SONUÇLARI

Bu bölümde kriterlerin ağırlıklandırması hesaplanır. Ağırlıkların hesaplanmasında AHP yöntemi kullanılmaktadır. Ağırlıkların belirlenmesinden sonra alternatif yakıtların nihai performansları tespit edilmektedir.

4.1 Kriterlerin Ağırlıkları

Kriterlerin ağırlıklarını hesaplamak için bir anket hazırlanmış ve on beş uzmana sorulmuştur. Bu uzmanlardan iki tanesi uzakyol başmühendisi, iki tanesi uzakyol ikinci mühendisi, beş tanesi uzakyol vardiya mühendisi, 6 tanesi ise İstanbul Teknik Üniversitesi ve Yıldız Teknik Üniversitesi'nin denizcilik fakültelerinde görevli akademisyenlerdir. Akademisyenlerin bir tanesi profesör, bir tanesi doçent, bir tanesi doktor öğretim üyesi ve diğer ikisi ise araştırma görevlisidir.

Çizelge 4.1 : Uzmanların kriter puanları.

Uzman kodu	TRL indeks	Maliyet	Hammadde Mevcudiyeti	Uyumluluk	Emniyet	ILUC etkisi	WTW emisyon performansı
U1	2	4	4	2	3	4	5
U2	4	3	3	4	5	3	5
U3	3	5	4	5	5	4	4
U4	3	2	3	4	5	4	5
U5	4	2	2	5	3	2	5
U6	4	2	4	5	5	3	5
U7	5	5	5	4	5	3	3
U8	4	5	5	5	5	4	4
U9	3	4	4	3	5	3	3
U10	3	5	5	4	5	4	4
U11	3	1	2	4	5	1	4
U12	4	3	5	4	4	3	5
U13	2	5	5	3	4	3	4
U14	3	4	4	2	4	3	4
U15	5	3	2	4	5	3	5
Toplam	52	53	57	58	68	47	65

Ankette kriterlere ve kriterlerin doğru anlaşılabilmesi için kriterler ile ilgili tanımlayıcı ve açıklayıcı bilgilere yer verilmiş ve uzmanlardan her bir kriter için 1'den 5'e kadar

puan vermeleri istenmiştir. Sürdürülebilir bir biyoyakıtın tespit edilmesi ve gemilerde kullanılmasında seçilen her bir kriteri, önem derecelerine göre puanlamaları istenmiştir. 1 en az önemli ve 5 en çok önemli kriter puanını ifade etmektedir. Uzmanlar önem derecesinin aynı olduğunu düşündüğü kriterlere aynı puanı verebilmekte özgürdü. Uzmanların vermiş olduğu puanlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Her bir kriter için uzman puanları toplandıktan sonra, en yüksek puandan en düşük puan çıkarılarak kriterler arasındaki en yüksek puan farkı bulunur. Bulunan bu değer 9’a bölünerek göreceli önem ölçeği puan aralıkları belirlenmiştir. Puan aralıklarınının 9’a bölünerek yapılmasının nedeni göreceli önem ölçeğinde 9 değerinin olmasından kaynaklıdır (Çizelge 3.2.). Bu yöntem, kriterler arasında ikili karşılaştırma yapılmasına yardımcı olmuştur ve daha önceki çalışmalarda da kullanılmıştır (Deniz ve Zincir, 2016; Zincir ve Deniz, 2018). Çizelge 4.2 Kriterler arası en yüksek farkı ve ikili karşılaştırma aralığını gösterir.

Çizelge 4.2 : Kriterler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.

Kriter	Puan	En yüksek fark	İkili karşılaştırma aralığı
Emniyet	68		
WTW emisyon performansı	65		
Uyumluluk	58		
Hammadde Mevcudiyeti	57	21	2,33
Maliyet	53		
TRL indeks	52		
ILUC etkisi	47		

İkili karşılaştırma aralığı bulunan kriterlerin göreceli önem ölçeğindeki konumunu tespit etmek için aralıklara göre kriterlerin ikili karşılaştırma ölçekleri belirlenir. Çizelge 4.3 aralıklara göre kriterlerin ikili karşılaştırma puanlarını göstermektedir.

Çizelge 4.3 : Aralıklara göre kriterlerin ikili karşılaştırma ölçeği.

Aralık	İkili karşılaştırma ölçeği
0 – 2,33	1
2,34 – 4,66	2
4,67 – 6,99	3
7,00 – 9,32	4
9,33 – 11,65	5
11,66 – 13,98	6
13,99 – 16,31	7
16,32 – 18,64	8
18,65 – 21,00	9

Daha sonra bir kriterin diğer bir kritere göre göreceli önemi, aralarındaki puan farkına göre Çizelge 4.3'ten faydalanılarak bulunmuştur. Örneğin emniyet (68 puan) ile maliyet (53 puan) arasındaki puan farkı 15'tir. 15 puan aralık Çizelge 4.3'te 7 ölçeğine denk gelmektedir. Tüm ikili karşılaştırmalar verilen örnekteki gibi yapılmıştır.

Son olarak tespit edilen ikili karşılaştırma ölçekleri AHP yöntemindeki matrise yazılır ve Çizelge 3.1'deki AHP uygulama adımları kullanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanır. Hesaplanan kriter ağırlıkları Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Kriter ağırlıkları.

Kriter	Emniyet	WTW emisyon performansı	Uyum-luluk	Hammadde mevcudiyeti	Maliyet	TRL indeks	ILUC etkisi	Ağırlık
Emniyet	1,00	2,00	5,00	5,00	7,00	7,00	9,00	0,388
WTW emisyon performansı	0,50	1,00	4,00	4,00	6,00	6,00	8,00	0,279
Uyumluluk	0,20	0,25	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	0,108
Hammadde mevcudiyeti	0,20	0,25	1,00	1,00	2,00	3,00	5,00	0,101
Maliyet	0,14	0,17	0,33	0,50	1,00	1,00	3,00	0,051
TRL indeks	0,14	0,17	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,049
ILUC etkisi	0,11	0,13	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,025

$\lambda_{maks} = 7,267$ & $CI = 0,044$ & $CR = 0,033 < 0,10$

Çizelge 4.4'ten görüldüğü üzere önem derecesi en yüksek kriter 0,388 ağırlık ile emniyettir. Uzmanlar için ikinci en önemli kriter 0,279 ağırlık ile WTW emisyon performansı, üçüncü ise 0,108 ağırlık ile uyumluluk olmuştur. Dördüncü ve sonrakiler ise sırasıyla 0,101 ağırlık ile hammadde mevcudiyeti, 0,051 ağırlık ile maliyet, 0,049 ağırlık ile TRL indeks ve son olarak 0,025 ağırlık ile ILUC etkisi kriteridir.

4.2 Biyoyakıt Alternatiflerinin Kriterler Üzerindeki Performans Ağırlıkları

Bu bölümde değerlendirilmek üzere seçilen biyoyakıtların her bir değerlendirme kriterindeki ağırlıkları hesaplanmıştır. Kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için kullanılan yöntem, biyoyakıtların her bir kriterdeki performans ağırlıklarını bulmak için de kullanılmıştır.

4.2.1 Biyoyakıtların TRL indeks kriterindeki performans ağırlıkları

Seçilen biyoyakıtların TRL indeks kriterindeki performanslarını hesaplamak için Bölüm 3 Çizelge 3.5'teki puanları kullanılmıştır. Öncelikle alternatifler arasındaki en

yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı hesaplanmıştır. Çizelge 4.5 TRL indeks kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı verilmiştir.

Çizelge 4.5 : TRL indeks kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.

Biyoyakıt	Puan	En yüksek fark	İkili karşılaştırma aralığı
FAME 1. Jen.	18		
HVO 1. Jen.	18		
SVO	18		
FAME 2. Jen.	18		
HVO 2. Jen.	18	9	1,00
Biomethanol	14		
FT-dizel	14		
Bio-DME	14		
LBM	14		
HVO 3. Jen.	9		

İkili karşılaştırma aralığı bulunan alternatiflerin göreceli önem ölçeğindeki konumunu tespit etmek için aralıklara göre biyoyakıtların ikili karşılaştırma ölçekleri belirlenir. Çizelge 4.6 biyoyakıtların TRL indeks kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçeklerini göstermektedir.

Çizelge 4.6 : TRL indeks kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.

Aralık	İkili karşılaştırma ölçeği
0 - 1,00	1
1,01 - 2,00	2
2,01 - 3,00	3
3,01 - 4,00	4
4,01 - 5,00	5
5,01 - 6,00	6
6,01 - 7,00	7
7,01 - 8,00	8
8,01 - 9,00	9

Daha sonra bir biyoyakıtın diğer bir biyoyakıtına göre TRL indeks kriterindeki ölçeği, aralarındaki puan farkına göre Çizelge 4.6'ten faydalanılarak bulunmuştur.

Son olarak tespit edilen ikili karşılaştırma ölçekleri AHP yöntemindeki matrise yazılır ve Çizelge 3.1'deki AHP uygulama adımları kullanılarak her bir biyoyakıtın TRL indeks kriterindeki performans ağırlıkları hesaplanır. Hesaplanan TRL indeks kriterindeki performans ağırlıkları Çizelge 4.7'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : Biyoyakıtların TRL indeks performansı ağırlıkları.

Biyoyakıt	FAME 1. Jen.	HVO 1. Jen.	SVO	FAME 2. Jen.	HVO 2. Jen.	Biomet hanol	FT-dizel	Bio-DME	LBM	HVO 3. Jen.	Ağırlık
FAME 1. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	9,00	0,162
HVO 1. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	9,00	0,162
SVO	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	9,00	0,162
FAME 2. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	9,00	0,162
HVO 2. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	9,00	0,162
Biomethanol	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	0,045
FT-dizel	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	0,045
Bio-DME	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	0,045
LBM	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	0,045
HVO 3. Jen.	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,20	0,20	0,20	0,20	1,00	0,014

$\lambda_{\text{maks}} = 10,133$ & $CI = 0,015$ & $CR = 0,010 < 0,10$

Çizelge 4.7’de görüldüğü üzere FAME 1. jenerasyon, HVO 1. jenerasyon, SVO, FAME 2. jenerasyon ve HVO 2. jenerasyon 0,162 performans ağırlığı ile TRL indeks kriterinde en yüksek skoru almıştır. Biomethanol, FT-dizel ve Bio-DME 0,045 ile ikinci sırada yer almaktadır. HVO 3. jenerasyon ise 0,014 performans skoru ile son sırada yer alır.

4.2.2 Biyoyakıtların maliyet kriterindeki performans ağırlıkları

Seçilen biyoyakıtların maliyet kriterindeki performanslarını hesaplamak için Bölüm 3 Çizelge 3.6’daki puanları kullanılmıştır. Öncelikle alternatifler arasındaki en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı hesaplanmıştır. Çizelge 4.8’de maliyet kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Maliyet kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.

Biyoyakıt	Puan	En yüksek fark	İkili karşılaştırma aralığı
FAME 1. Jen.	5		
SVO	5		
FAME 2. Jen.	5		
HVO 1. Jen.	4		
HVO 2. Jen.	4		
Biomethanol	3	4	0,44
Bio-DME	3		
FT-dizel	2		
LBM	2		
HVO 3. Jen.	1		

İkili karşılaştırma aralığı bulunan alternatiflerin göreceli önem ölçeğindeki konumunu tespit etmek için aralıklara göre biyoyakıtların ikili karşılaştırma ölçekleri belirlenir. Çizelge 4.9 biyoyakıtların maliyet kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçeklerini göstermektedir.

Çizelge 4.9 : Maliyet kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.

Aralık	İkili karşılaştırma ölçeği
0 - 0,44	1
0,44 - 0,88	2
0,89 - 1,32	3
1,33 - 1,76	4
1,77 - 2,20	5
2,21 - 2,64	6
2,65 - 3,08	7
3,09 - 3,52	8
3,53 - 4,00	9

Daha sonra bir biyoyakıtın diğer bir biyoyakıtta göre maliyet kriterindeki ölçeği, aralarındaki puan farkına göre Çizelge 4.9'dan faydalanılarak bulunmuştur.

Son olarak tespit edilen ikili karşılaştırma ölçekleri AHP yöntemindeki matrise yazılır ve Çizelge 3.1'deki AHP uygulama adımları kullanılarak her bir biyoyakıtın maliyet kriterindeki performans ağırlıkları hesaplanır. Hesaplanan maliyet kriterindeki performans ağırlıkları Çizelge 4.10'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 : Biyoyakıtların maliyet performansı ağırlıkları.

Biyoyakıt	FAME 1. Jen.	SVO	FAME 2. Jen.	HVO 1. Jen.	HVO 2. Jen.	Biomet hanol	Bio-DME	FT-dizel	LBM	HVO 3. Jen.	Ağırlık
FAME 1. Jen.	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	5,00	7,00	7,00	9,00	0,209
SVO	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	5,00	7,00	7,00	9,00	0,209
FAME 2. Jen.	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	5,00	7,00	7,00	9,00	0,209
HVO 1. Jen.	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	5,00	7,00	0,101
HVO 2. Jen.	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	5,00	7,00	0,101
Biomet hanol	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	0,051
Bio-DME	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	0,051
FT-dizel	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,026
LBM	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,026
HVO 3. Jen.	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,015

$\lambda_{maks} = 10,436$ & $CI = 0,048$ & $CR = 0,033 < 0,10$

Çizelge 4.10'da görüldüğü üzere, FAME 1. jenerasyon, SVO ve FAME 2. jenerasyon 0,209 performans ağırlığı ile maliyet kriterinde en yüksek skoru, HVO 1. ve 2. jenerasyon 0,101 performans ağırlığı ile ikinci yüksek skoru almıştır. Biometanol ve

Bio-DME 0,051 performans ağırlığı ile üçüncü sırada, FT-dizel ve LBM ise 0,026 performans ağırlığı ile maliyet kriterinde son sırayı paylaşmaktadır.

4.2.3 Biyoyakıtların hammadde mevcudiyeti kriterindeki performans ağırlıkları

Seçilen biyoyakıtların hammadde kriterindeki performanslarını hesaplamak için Bölüm 3 Çizelge 3.7'deki puanları kullanılmıştır. Öncelikle alternatifler arasındaki en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı hesaplanmıştır. Çizelge 4.11'de hammadde mevcudiyeti kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Hammadde mevcudiyeti kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.

Biyoyakıt	Puan	En yüksek fark	İkili karşılaştırma aralığı
Biomethanol	8		
Bio-DME	8		
FT-dizel	8		
LBM	8		
HVO 3. Jen.	6	5	0,56
FAME 2. Jen.	4		
HVO 2. Jen.	4		
FAME 1. Jen.	3		
HVO 1. Jen.	3		
SVO	3		

İkili karşılaştırma aralığı bulunan alternatiflerin göreceli önem ölçeğindeki konumunu tespit etmek için aralıklara göre biyoyakıtların ikili karşılaştırma ölçekleri belirlenir. Çizelge 4.12 biyoyakıtların hammadde mevcudiyeti kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçeklerini göstermektedir.

Çizelge 4.12 : Hammadde mevcudiyeti kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.

Aralık	İkili karşılaştırma ölçeği
0 - 0,56	1
0,57 - 1,12	2
1,13 - 1,68	3
1,69 - 2,24	4
2,25 - 2,80	5
2,81 - 3,36	6
3,37 - 3,92	7
3,93 - 4,48	8
4,49 - 5,00	9

Daha sonra bir biyoyakıtın diğer bir biyoyakıtına göre hammadde mevcudiyeti kriterindeki ölçüğü, aralarındaki puan farkına göre Çizelge 4.12'den faydalanılarak bulunmuştur.

Son olarak tespit edilen ikili karşılaştırma ölçekleri AHP yöntemindeki matrise yazılır ve Çizelge 3.1'deki AHP uygulama adımları kullanılarak her bir biyoyakıtın hammadde mevcudiyeti kriterindeki performans ağırlıkları hesaplanır. Hesaplanan hammadde mevcudiyeti kriterindeki performans ağırlıkları Çizelge 4.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 : Biyoyakıtların hammadde mevcudiyeti performansı ağırlıkları.

Biyoyakıt	Biomet hanol	Bio- DME	FT- dizel	LBM	HVO 3. Jen.	FAME 2. Jen.	HVO 2. Jen.	FAME 1. Jen.	HVO 1. Jen.	SVO	Ağırlık
Biomethanol	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	8,00	8,00	9,00	9,00	9,00	0,201
Bio-DME	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	8,00	8,00	9,00	9,00	9,00	0,201
FT-dizel	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	8,00	8,00	9,00	9,00	9,00	0,201
LBM	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	8,00	8,00	9,00	9,00	9,00	0,201
HVO 3. Jen.	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	4,00	4,00	6,00	6,00	6,00	0,083
FAME 2. Jen.	0,13	0,13	0,13	0,13	0,25	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	0,029
HVO 2. Jen.	0,13	0,13	0,13	0,13	0,25	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	0,029
FAME 1. Jen.	0,11	0,11	0,11	0,11	0,17	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	0,019
HVO 1. Jen.	0,11	0,11	0,11	0,11	0,17	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	0,019
SVO	0,11	0,11	0,11	0,11	0,17	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	0,019

$\lambda_{\text{maks}} = 10,248$ & $CI = 0,028$ & $CR = 0,018 < 0,10$

Çizelge 4.13'te görüldüğü üzere Biomethanol, Bio-DME, FT-dizel ve LBM 0,201 performans ağırlığı ile hammadde mevcudiyeti kriterinde en yüksek skoru, HVO 3. jenerasyon ise 0,083 performans ağırlığı ile ikinci yüksek skoru almıştır. FAME 2. jenerasyon ve HVO 2. jenerasyon 0,029 performans ağırlığı ile üçüncü sırada yer almaktadır. FAME 1. jenerasyon, HVO 1. jenerasyon ve SVO 0,019 performans ağırlığı ile en düşük skoru paylaşmaktadır.

4.2.4 Biyoyakıtların uyumluluk kriterindeki performans ağırlıkları

Seçilen biyoyakıtların uyumluluk kriterindeki performanslarını hesaplamak için Bölüm 3 Çizelge 3.8'deki puanları kullanılmıştır. Öncelikle alternatifler arasındaki en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı hesaplanmıştır. Çizelge 4.14'te uyumluluk kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı verilmiştir.

Çizelge 4.14 : Uyumluluk kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.

Biyoyakıt	Puan	En yüksek fark	İkili karşılaştırma aralığı
HVO 1. Jen.	5		
HVO 2. Jen.	5		
HVO 3. Jen.	5		
FT-dizel	5		
FAME 1. Jen.	4	4	0,44
FAME 2. Jen.	4		
SVO	3		
Bio-DME	2		
Biomethanol	2		
LBM	1		

İkili karşılaştırma aralığı bulunan alternatiflerin göreceli önem ölçeğindeki konumunu tespit etmek için aralıklara göre biyoyakıtların ikili karşılaştırma ölçekleri belirlenir. Çizelge 4.15 biyoyakıtların uyumluluk kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçeklerini göstermektedir.

Çizelge 4.15 : Uyumluluk kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.

Aralık	İkili karşılaştırma ölçeği
0 - 0,44	1
0,44 - 0,88	2
0,89 - 1,32	3
1,33 - 1,76	4
1,77 - 2,20	5
2,21 - 2,64	6
2,65 - 3,08	7
3,09 - 3,52	8
3,53 - 4,00	9

Daha sonra bir biyoyakıtın diğer bir biyoyakıtına göre uyumluluk kriterindeki ölçeği, aralarındaki puan farkına göre Çizelge 4.15'ten faydalanılarak bulunmuştur.

Son olarak tespit edilen ikili karşılaştırma ölçekleri AHP yöntemindeki matrise yazılır ve Çizelge 3.1'deki AHP uygulama adımları kullanılarak her bir biyoyakıtın uyumluluk kriterindeki performans ağırlıkları hesaplanır. Hesaplanan uyumluluk kriterindeki performans ağırlıkları Çizelge 4.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16'da görüldüğü üzere HVO 1,2 ve 3. jenerasyon ile FT-dizel 0,180 performans ağırlığı ile uyumluluk kriterinde en yüksek skoru almışlardır. FAME 1 ve 2. jenerasyon 0,083 performans ağırlığı ile ikinci sırada yer almaktadır.

Çizelge 4.16 : Biyoyakıtların uyumluluk performansı ağırlıkları.

Biyoyakıt	HVO 1. Jen.	HVO 2. Jen.	HVO 3. Jen.	FT-dizel	FAME 1. Jen.	FAME 2. Jen.	SVO	Bio-DME	Biomet hanol	LBM	Ağırlık
HVO 1. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	7,00	7,00	9,00	0,180
HVO 2. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	7,00	7,00	9,00	0,180
HVO 3. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	7,00	7,00	9,00	0,180
FT-dizel	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	7,00	7,00	9,00	0,180
FAME 1. Jen.	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	5,00	5,00	7,00	0,083
FAME 2. Jen.	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	5,00	5,00	7,00	0,083
SVO	0,20	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	3,00	5,00	5,00	0,049
Bio-DME	0,14	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,33	1,00	1,00	3,00	0,024
Biomet hanol	0,14	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,20	1,00	1,00	3,00	0,024
LBM	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	0,20	0,33	0,33	1,00	0,014

$\lambda_{\text{maks}} = 10,483$ & $CI = 0,054$ & $CR = 0,036 < 0,010$

SVO 0,049 performans ağırlığı ile üçüncü sırada konumlanmıştır. Bio-DME ve Biometanol 0,024 performans ağırlığı ile sondan ikinci sırada yer almıştır. LBM ise 0,014 performans ağırlığı ile son sırada konumlanmıştır.

4.2.5 Biyoyakıtların emniyet kriterindeki performans ağırlıkları

Seçilen biyoyakıtların emniyet kriterindeki performanslarını hesaplamak için Bölüm 3 Çizelge 3.9'daki puanları kullanılmıştır. Öncelikle alternatifler arasındaki en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı hesaplanmıştır. Çizelge 4.17'de emniyet kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı verilmiştir.

Çizelge 4.17 : Emniyet kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.

Biyoyakıt	Puan	En yüksek fark	İkili karşılaştırma aralığı
HVO 1. Jen.	5		
HVO 2. Jen.	5		
HVO 3. Jen.	5		
FT-dizel	5		
FAME 1. Jen.	4		
FAME 2. Jen.	4	4	0,44
SVO	4		
Biometanol	3		
Bio-DME	2		
LBM	1		

İkili karşılaştırma aralığı bulunan alternatiflerin göreceli önem ölçeğindeki konumunu tespit etmek için aralıklara göre biyoyakıtların ikili karşılaştırma ölçekleri belirlenir.

Çizelge 4.18 biyoyakıtların emniyet kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçeklerini göstermektedir.

Çizelge 4.18 : Emniyet kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.

Aralık	İkili karşılaştırma ölçeği
0 - 0,44	1
0,44 - 0,88	2
0,89 - 1,32	3
1,33 - 1,76	4
1,77 - 2,20	5
2,21 - 2,64	6
2,65 - 3,08	7
3,09 - 3,52	8
3,53 - 4,00	9

Daha sonra bir biyoyakıtın diğer bir biyoyakıtı göre emniyet kriterindeki ölçeği, aralarındaki puan farkına göre Çizelge 4.18’den faydalanılarak bulunmuştur.

Son olarak tespit edilen ikili karşılaştırma ölçekleri AHP yöntemindeki matrise yazılır ve Çizelge 3.1’deki AHP uygulama adımları kullanılarak her bir biyoyakıtın emniyet kriterindeki performans ağırlıkları hesaplanır. Hesaplanan emniyet kriterindeki performans ağırlıkları Çizelge 4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19 : Biyoyakıtların emniyet performansı ağırlıkları.

Biyoyakıt	HVO 1. Jen.	HVO 2. Jen.	HVO 3. Jen.	FT-dizel	FAME 1. Jen.	FAME 2. Jen.	SVO	Biometanol	Bio-DME	LBM	Ağırlık
HVO 1. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	7,00	9,00	0,176
HVO 2. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	7,00	9,00	0,176
HVO 3. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	7,00	9,00	0,176
FT-dizel	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	7,00	9,00	0,176
FAME 1. Jen.	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	3,00	5,00	7,00	0,075
FAME 2. Jen.	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	3,00	5,00	7,00	0,075
SVO	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	3,00	5,00	7,00	0,075
Biometanol	0,20	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	0,33	1,00	3,00	5,00	0,038
Bio-DME	0,14	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,20	0,33	1,00	3,00	0,022
LBM	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	0,14	0,20	0,33	1,00	0,014

$\lambda_{\text{maks}} = 10,359$ & $CI = 0,040$ & $CR = 0,027 < 0,010$

Çizelge 4.19’da görüldüğü üzere HVO 1,2 ve 3. jenerasyon ile FT-dizel 0,176 performans ağırlığı ile emniyet kriterinde en yüksek skoru almıştır. FAME 1 ve 2. jenerasyon ile SVO 0,075 performans ağırlığı ile ikinci sırayı paylaşmaktadır. Son üç sırada ise sırasıyla 0,038 performans ağırlığı ile Biometanol, 0,022 performans ağırlığı ile Bio-DME ve 0,014 performans ağırlığı ile LBM yer almıştır.

4.2.6 Biyoyakıtların ILUC etkisi kriterindeki performans ağırlıkları

Seçilen biyoyakıtların ILUC etkisi kriterindeki performanslarını hesaplamak için Bölüm 3 Çizelge 3.10'daki puanları kullanılmıştır. Öncelikle alternatifler arasındaki en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı hesaplanmıştır. Çizelge 4.20'de ILUC etkisi kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı verilmiştir.

Çizelge 4.20 : ILUC etkisi kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.

Biyoyakıt	Puan	En yüksek fark	İkili karşılaştırma aralığı
HVO 3. Jen.	4		
Biomethanol	3		
FT-dizel	3		
Bio-DME	3		
LBM	3		
FAME 2. Jen.	2	3	0,33
HVO 2. Jen.	2		
FAME 1. Jen.	1		
HVO 1. Jen.	1		
SVO	1		

İkili karşılaştırma aralığı bulunan alternatiflerin göreceli önem ölçeğindeki konumunu tespit etmek için aralıklara göre biyoyakıtların ikili karşılaştırma ölçekleri belirlenir. Çizelge 4.21 biyoyakıtların ILUC etkisi kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçeklerini göstermektedir.

Çizelge 4.21 : ILUC etkisi kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.

Aralık	İkili karşılaştırma ölçeği
0 - 0,33	1
0,34 - 0,66	2
0,67 - 0,99	3
1,00 - 1,32	4
1,33 - 1,65	5
1,66 - 1,98	6
1,99 - 2,31	7
2,32 - 2,64	8
2,65 - 3,00	9

Daha sonra bir biyoyakıtın diğer bir biyoyakıtına göre ILUC etkisi kriterindeki ölçeği, aralarındaki puan farkına göre Çizelge 4.21'den faydalanılarak bulunmuştur.

Son olarak tespit edilen ikili karşılaştırma ölçekleri AHP yöntemindeki matrise yazılır ve Çizelge 3.1'deki AHP uygulama adımları kullanılarak her bir biyoyakıtın ILUC etkisi kriterindeki performans ağırlıkları hesaplanır. Hesaplanan ILUC etkisi kriterindeki performans ağırlıkları Çizelge 4.22'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.22 : Biyoyakıtların ILUC etkisi performansı ağırlıkları.

Biyoyakıt	HVO 3. Jen.	Biomet hanol	FT-dizel	Bio-DME	LBM	FAME 2. Jen.	HVO 2. Jen.	FAME 1. Jen.	HVO 1. Jen.	SVO	Ağırlık
HVO 3. Jen.	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	7,00	7,00	9,00	9,00	9,00	0,328
Biomethanol	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	7,00	7,00	7,00	0,129
FT-dizel	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	7,00	7,00	7,00	0,129
Bio-DME	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	7,00	7,00	7,00	0,129
LBM	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	7,00	7,00	7,00	0,129
FAME 2. Jen.	0,14	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	0,049
HVO 2. Jen.	0,14	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	0,049
FAME 1. Jen.	0,11	0,14	0,14	0,14	0,14	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	0,019
HVO 1. Jen.	0,11	0,14	0,14	0,14	0,14	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	0,019
SVO	0,11	0,14	0,14	0,14	0,14	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	0,019

$\lambda_{maks} = 10,476$ & $CI = 0,053$ & $CR = 0,035 < 0,010$

Çizelge 4.22'den görüldüğü üzere HVO 3. jenerasyon 0,328 performans ağırlığı ile ILUC etkisi kriterinde en yüksek skoru almıştır. Biomethanol, FT-dizel, Bio-DME ve LBM 0,129 performans ağırlığı ile ikinci sırayı paylaşmaktadır. FAME 2. jenerasyon ve HVO 2. jenerasyon 0,049 performans ağırlığı ile üçüncü sırada yer almaktadır. FAME 1. jenerasyon, HVO 1. jenerasyon ve SVO ise 0,019 performans ağırlığı ile son sırayı paylaşmıştır.

4.2.7 Biyoyakıtların WTW emisyon performansı ağırlıkları

Seçilen biyoyakıtların WTW emisyon kriterindeki performanslarını hesaplamak için Bölüm 3 Çizelge 3.11'deki puanları kullanılmıştır. Öncelikle alternatifler arasındaki en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı hesaplanmıştır. Çizelge 4.23'te WTW emisyon kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı verilmiştir.

İkili karşılaştırma aralığı bulunan alternatiflerin göreceli önem ölçeğindeki konumunu tespit etmek için aralıklara göre biyoyakıtların ikili karşılaştırma ölçekleri belirlenir. Çizelge 4.24 biyoyakıtların WTW emisyon kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçeklerini göstermektedir.

Çizelge 4.23 : WTW emisyon kriterinde alternatifler arası en yüksek fark ve ikili karşılaştırma aralığı.

Biyoyakıt	Puan	En yüksek fark	İkili karşılaştırma aralığı
Biomethanol	5		
FT-dizel	5		
Bio-DME	5		
LBM	5		
HVO 3. Jen.	5	4	0,44
FAME 2. Jen.	4		
HVO 2. Jen.	4		
FAME 1. Jen.	1		
HVO 1. Jen.	1		
SVO	1		

Çizelge 4.24 : WTW emisyon kriterinde aralıklara göre ikili karşılaştırma ölçekleri.

Aralık	İkili karşılaştırma ölçeği
0 - 0,44	1
0,44 - 0,88	2
0,89 - 1,32	3
1,33 - 1,76	4
1,77 - 2,20	5
2,21 - 2,64	6
2,65 - 3,08	7
3,09 - 3,52	8
3,53 - 4,00	9

Daha sonra bir biyoyakıtın diğer bir biyoyakıtta göre WTW emisyon kriterindeki ölçeği, aralarındaki puan farkına göre Çizelge 4.24'ten faydalanılarak bulunmuştur.

Son olarak tespit edilen ikili karşılaştırma ölçekleri AHP yöntemindeki matrise yazılır ve Çizelge 3.1'deki AHP uygulama adımları kullanılarak her bir biyoyakıtın WTW emisyon kriterindeki performans ağırlıkları hesaplanır. Hesaplanan WTW emisyon kriterindeki performans ağırlıkları Çizelge 4.25'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.25'te görüldüğü üzere FT-dizel, Biomethanol, Bio-DME, LBM ve HVO 3. jenerasyon 0,161 performans ağırlığı ile WTW emisyon kriterindeki en yüksek skoru almışlardır. Akabinde 0,073 performans ağırlığı ile FAME 2. jenerasyon ve HVO 2. jenerasyon yer almaktadır. Son sırayı ise 0,016 performans ağırlıkları ile FAME 1. jenerasyon, HVO 1. jenerasyon ve SVO paylaşmaktadır.

Çizelge 4.25 : Biyoyakıtların WTW emisyon performansı ağırlıkları.

Biyoyakıt	Biomet hanol	FT- dizel	Bio- DME	LBM	HVO 3. Jen.	FAME 2. Jen.	HVO 2. Jen.	FAME 1. Jen.	HVO 1. Jen.	SVO	Ağırlık
Biometha nol	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	9,00	9,00	9,00	0,161
FT-dizel	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	9,00	9,00	9,00	0,161
Bio-DME	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	9,00	9,00	9,00	0,161
LBM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	9,00	9,00	9,00	0,161
HVO 3. Jen.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	9,00	9,00	9,00	0,161
FAME 2. Jen.	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	7,00	7,00	7,00	0,073
HVO 2. Jen.	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	7,00	7,00	7,00	0,073
FAME 1. Jen.	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	1,00	1,00	1,00	0,016
HVO 1. Jen.	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	1,00	1,00	1,00	0,016
SVO	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	1,00	1,00	1,00	0,016

$\lambda_{\text{maks}} = 10,223$ & $CI = 0,025$ & $CR = 0,017 < 0,10$

4.3 Biyoyakıtların Toplam Performans Skorları

Biyoyakıtların emniyet, WTW emisyon, uyumluluk, hammadde mevcudiyeti, maliyet, TRL indeks ve ILUC etkisi kriterlerine göre karşılaştırılması, biyoyakıtların gemilerde kullanımı için toplam performansını değerlendirmek için yapılmıştır. Her alternatif biyoyakıt seçeneğinin güçlü ve zayıf yanları vardır. Çizelge 4.26 kriterlerin ağırlıklarını, her bir kriter için alternatif yakıt performans ağırlıklandırmalarını ve biyoyakıt alternatiflerinin toplam skorunu göstererek, gemide biyoyakıt kullanılmak istendiğinde, en uygun ve sürdürülebilir olanları tespit etmek için oluşturulmuştur. Sonuçların net okunabilmesi için toplam skoru en yüksek olandan en düşük olana göre sıralanmıştır. Denklem (4.1) alternatif yakıtların toplam performans skorlarını hesaplamak için kullanılır.

$$TS = (WKE * WEi) + (WKW * WWi) + (WKU * WUi) + (WKH * WHi) + (WKM * WMi) + (WKT * WTi) + (WKI * WIi) \quad (4.1)$$

Denklemde TS toplam skoru ifade eder. WKE emniyet kriterinin ağırlığını, WKW WTW emisyon kriterinin ağırlığını, WKU uyumluluk kriterinin ağırlığını, WKH hammadde kriterinin ağırlığını, WKM maliyet kriterinin ağırlığını, WKT TRL indeks kriterinin ağırlığını ve WKI ise ILUC etkisi kriterinin ağırlığını ifade eder. WEi i tipi alternatif biyoyakıtın emniyet kriterindeki performans ağırlığını, WWi i tipi alternatif biyoyakıtın WTW emisyon kriterindeki performans ağırlığını, WUi i tipi alternatif biyoyakıtın uyumluluk kriterindeki performans ağırlığını, WHi i tipi alternatif biyoyakıtın hammadde mevcudiyeti kriterindeki performans ağırlığını, WMi i tipi

alternatif biyoyakıtın maliyet kriterindeki performans ağırlığını, WT_i i tipi alternatif biyoyakıtın TRL indeks kriterindeki performans ağırlığını ve W_{Li} i tipi alternatif biyoyakıtın ILUC etkisi kriterindeki performans ağırlığını ifade eder.

Çizelge 4.26 : Biyoyakıtların toplam performans skorları.

Biyoyakıt	Emniyet 0,388	WTW emisyon 0,279	Uyumluluk 0,108	Hammadde mevcudiyeti 0,101	Maliyet 0,051	TRL indeks 0,049	ILUC etkisi 0,025	Toplam Skor
FT-dizel	0,176	0,161	0,180	0,201	0,026	0,045	0,129	0,159
HVO 3. Jen.	0,176	0,161	0,180	0,083	0,015	0,014	0,328	0,150
HVO 2. Jen.	0,176	0,073	0,180	0,029	0,101	0,162	0,049	0,125
HVO 1. Jen.	0,176	0,016	0,180	0,019	0,101	0,162	0,019	0,107
Biomethanol	0,038	0,161	0,024	0,201	0,051	0,045	0,129	0,091
Bio-DME	0,022	0,161	0,024	0,201	0,051	0,045	0,129	0,084
FAME 2. Jen.	0,075	0,073	0,083	0,029	0,209	0,162	0,049	0,081
LBM	0,014	0,161	0,014	0,201	0,026	0,045	0,129	0,079
FAME 1. Jen.	0,075	0,016	0,083	0,019	0,209	0,162	0,019	0,063
SVO	0,075	0,016	0,049	0,019	0,209	0,162	0,019	0,060

AHP yöntemi ile değerlendirilen biyoyakıtların nihai toplam performans skor hesabına göre FT-dizel 0,159 ile en yüksek skora sahiptir. Bu FT-dizel yakıtının gemilerde biyoyakıt kullanılması durumunda en uygun alternatif olduğu anlamına gelir. HVO 3. jenerasyon ise FT-dizele yakın bir skor olan 0,150 ile ikinci en uygun yakıt olarak tespit edilmiştir. Üçüncü sırada ise 0,125 skoru ile HVO 2. jenerasyon tespit edilmiştir. Akabinde HVO 1. jenerasyon, Biomethanol, Bio-DME, FAME 2. jenerasyon ve LBM sırasıyla 4,5,6,7 ve 8. sırada yer almaktadır. FAME 1. jenerasyon ve SVO ise son iki sırada yer almaktadır.

4.4 Duyarlılık Analizi

Tez çalışmamda kriterlerin ağırlıkları 15 adet uzmanın görüşlerine göre belirlenmiştir. Uzmanların görüşleri kendi fikirlerine ve tecrübelerine göre şekillendiği için öznel olarak değerlendirilebilir. Bu sebeple farklı uzman görüşleri ile yapılan anketlerde kriter ağırlıklarının değişmesi mümkündür. Bu nedenle, oluşturulan değerlendirme modelinin güvenilirliğini test etmek için kriter ağırlıkları üzerinde bir duyarlılık analizi yapılmıştır.

Kriter ağırlıklandırmalarındaki değişikliklerin biyoyakıt alternatiflerinin toplam performans skoru üzerindeki etkisini gözlemlemek için 14 senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryoların ilk 7 tanesinde sırayla bir kriterin ağırlığı %20 arttırılmış, diğer kriterlerin ağırlıkları oransal olarak düşürülmüştür. Diğer senaryolarda (8-14) ise

sırayla bir kriterin ağırlığı %20 düşürülmüş, diğer kriterlerin ağırlıkları oransal olarak artırılmıştır. Çizelge 4.27 oluşturulan senaryolardaki yeni kriter ağırlıklarını göstermektedir.

Çizelge 4.27 : Senaryolara göre yeni kriter ağırlıkları.

Senaryo	Emniyet	WTW emisyon	Uyumluluk	Hammadde mevcudiyeti	Maliyet	TRL indeks	ILUC etkisi	Açıklama
Temel	0,388	0,279	0,108	0,101	0,051	0,049	0,025	-
1	0,465	0,243	0,094	0,088	0,045	0,043	0,022	Emniyet + %20
2	0,358	0,335	0,099	0,093	0,047	0,045	0,023	WTW + %20
3	0,378	0,272	0,129	0,098	0,050	0,048	0,024	Uyumluluk + %20
4	0,379	0,273	0,105	0,121	0,050	0,048	0,024	Hammadde + %20
5	0,384	0,276	0,106	0,099	0,061	0,049	0,025	Maliyet + %20
6	0,384	0,276	0,106	0,099	0,051	0,059	0,025	TRL + %20
7	0,386	0,277	0,107	0,100	0,051	0,049	0,030	ILUC + %20
8	0,310	0,314	0,121	0,113	0,058	0,055	0,028	Emniyet - %20
9	0,418	0,223	0,116	0,108	0,055	0,053	0,027	WTW - %20
10	0,397	0,285	0,086	0,103	0,052	0,050	0,026	Uyumluluk - %20
11	0,396	0,285	0,110	0,080	0,052	0,050	0,026	Hammadde - %20
12	0,392	0,282	0,109	0,102	0,041	0,050	0,025	Maliyet - %20
13	0,392	0,282	0,109	0,102	0,052	0,039	0,025	TRL - %20
14	0,390	0,280	0,108	0,101	0,051	0,049	0,020	ILUC - %20

Senaryolara göre elde edilen yeni kriter ağırlıkları ile her bir senaryo için biyoyakıtların toplam performans skorları denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Yeni kriter ağırlıkları ile elde edilen skorlar Çizelge 4.28’de verilmiştir.

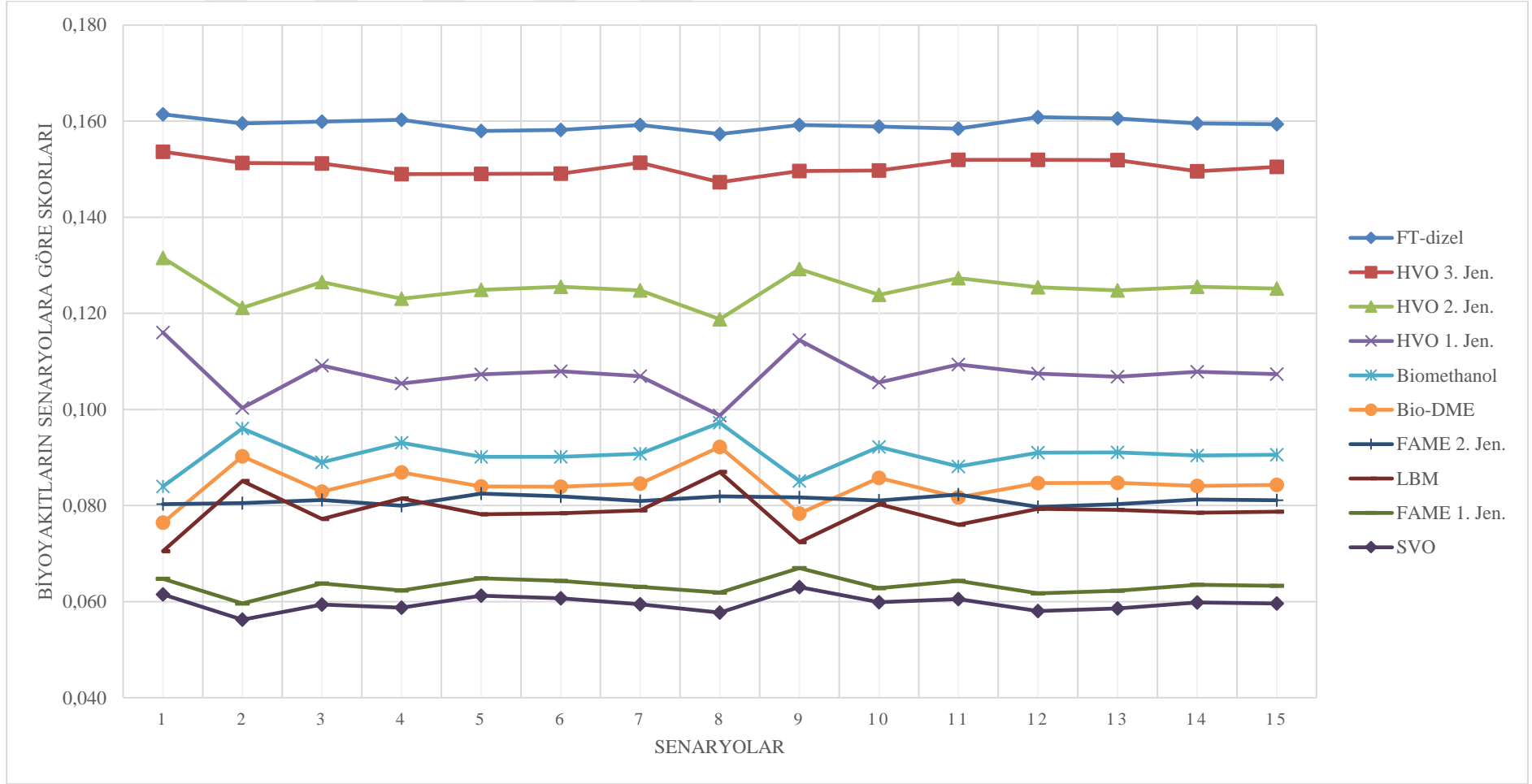
Çizelge 4.8’deki veriler kullanılarak her bir senaryodaki biyoyakıt alternatiflerinin skorları grafik haline getirilerek Şekil 4.1’de verilmiştir. Grafikteki 15. sütun, tez çalışmam kapsamında uzman görüşü toplanarak elde edilen temel kriter ağırlıkları ile hesaplanan performans skorlarıdır.

İlk beş sırada olan sırasıyla FT-dizel, HVO 3. Jenerasyon, HVO 2. Jenerasyon, HVO 1. Jenerasyon ve Biomethanol tüm senaryolarda sırasını koruyabilmiştir. Son iki sırayı alan FAME 1. Jenerasyon ve SVO’da aynı şekilde mevcut konumlarında kalmışlardır. Bio-DME, FAME 2. Jenerasyon ve LBM, senaryo 1,2,4,8 ve 9’da temel senaryoya göre değişim göstermişlerdir. Bu biyoyakıtların toplam performans skorlarının birbirine çok yakın olması kriter ağırlıklarının değişiminden etkilenebilmesine yol açmıştır. Ancak bu değişimler minimal olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan bu duyarlılık analizi, oluşturulan değerlendirme modelinin güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.28 : Senaryolara göre toplam skorlar.

Biyoyakıt	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4	Senaryo 5	Senaryo 6	Senaryo 7	Senaryo 8	Senaryo 9	Senaryo 10	Senaryo 11	Senaryo 12	Senaryo 13	Senaryo 14
FT-dizel	0,161	0,160	0,160	0,160	0,158	0,158	0,159	0,157	0,159	0,159	0,158	0,161	0,161	0,160
HVO 3. Jen.	0,154	0,151	0,151	0,149	0,149	0,149	0,151	0,147	0,150	0,150	0,152	0,152	0,152	0,150
HVO 2. Jen.	0,132	0,121	0,126	0,123	0,125	0,126	0,125	0,119	0,129	0,124	0,127	0,125	0,125	0,126
HVO 1. Jen.	0,116	0,100	0,109	0,105	0,107	0,108	0,107	0,099	0,114	0,106	0,109	0,107	0,107	0,108
Biomethanol	0,084	0,096	0,089	0,093	0,090	0,090	0,091	0,097	0,085	0,092	0,088	0,091	0,091	0,090
Bio-DME	0,076	0,090	0,083	0,087	0,084	0,084	0,085	0,092	0,078	0,086	0,082	0,085	0,085	0,084
FAME 2. Jen.	0,080	0,080	0,081	0,080	0,082	0,082	0,081	0,082	0,082	0,081	0,082	0,080	0,080	0,081
LBM	0,071	0,085	0,077	0,081	0,078	0,078	0,079	0,087	0,072	0,080	0,076	0,079	0,079	0,078
FAME 1. Jen.	0,065	0,060	0,064	0,062	0,065	0,064	0,063	0,062	0,067	0,063	0,064	0,062	0,062	0,064
SVO	0,062	0,056	0,059	0,059	0,061	0,061	0,059	0,058	0,063	0,060	0,061	0,058	0,059	0,060



Şekil 4.1 : Farklı senaryolarda duyarlılık analizi.



5. SONUÇ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunları daha da derinleşmeden önüne geçilmesi gereken küresel sorunlardır. Bu sorunların üstesinden gelmek için atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının önüne geçilmesi gerekmektedir. Birçok sektörde olduğu gibi denizcilik sektöründe de bu konuda çalışmalar başlamış ve denizcilik sektörünün karbonsuzlaşması için IMO strateji planı belirlemiştir.

Denizcilik sektörü IMO'nun her geçen gün sıkılaştırdığı karbon emisyonu kuralları ve uygulamaya aldığı regülasyonlar ile alternatif yakıtlara geçiş sürecine girmiş bulunmaktadır. Sektörün, karbon emisyonlarını azaltmak ve karbon nötr bir noktaya getirmek için sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), metanol, etanol, hidrojen, amonyak ve biyoyakıtlar vs. gibi birçok alternatif yakıt seçeneği vardır. Her bir alternatif yakıt seçeneğinin olumlu ve olumsuz özellikleri, kısa orta ve uzun vadede deniz taşımacılığında hangi alternatif yakıtın kullanılabileceği konusunda belirleyici faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Biyoyakıtlar, gemi dizel makinelerinde büyük değişiklikler yapılmadan kullanılabilmesi ve petrol türevi deniz yakıtlarıyla karıştırılabilmesi gibi benzersiz özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu sebeple tez çalışması özellikle kısa ve orta vadede ciddi bir potansiyele sahip olması sebebiyle biyoyakıtlar üzerine yapılmıştır.

Deniz taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması güncel olarak iki yönetmelikle düzenlenmektedir. Bunlar EU MRV ve IMO DCS yönetmelikleridir. Birbirine benzer olan bu yönetmelikler gemilerde yanma sonucu açığa çıkan egzoz gazlarına odaklanmıştır. Bu yaklaşımın mevcut sorunlara kalıcı çözümler getirmek konusunda yetersiz kalacağı öngörülmüş ve yerine yeni bir yaklaşım olan Yaşam Dönüsü Analizi (LCA) bakış açısı ile izleme ve raporlama sistemi önerilmiştir. IMO'nun LCA yaklaşımı ile ilgili çalışmaları henüz yürürlüğe girmiş olmasa da çalışmalar büyük ölçüde yapılmış ve MEPC 80. oturumunda kabul edileceği düşünülmektedir. LCA yaklaşımı sadece yanma sonucu ortaya çıkan egzoz emisyonlarını değil, yakıtın tüm üretim sürecini, nakliyesini ve yanma sonucu ortaya çıkan emisyonların hepsini değerlendirmektedir.

Halihazırda ticari faaliyetlerini sürdüren gemilere harcanan sermayenin en verimli şekilde kullanılabilmesi için bu gemilerin ömürlerinin sonuna kadar yeni yönetmelik ve kurallara uygun olarak çalışmasını sağlamak önem arz eden bir konudur. Bu noktada drop-in özelliği bulunan biyoyakıtların mevcut gemilerin karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli öne çıkmaktadır. Çünkü biyoyakıtların hammaddesi temel olarak biyokütledir ve biyokütlerin eldesinde rol oynayan bitkiler fotosentez sayesinde biyojenik karbon yakalama kabiliyeti ile doğanın karbon döngüsünde olumlu bir rol oynamaktadır. Bu nedenle giderek artan sayıda denizcilik şirketi biyoyakıtları veya konvansiyonel yakıt ile biyoyakıt karışımlarını test etmeye başlamıştır.

Deniz taşımacılığı için biyoyakıtlar; biyodizeller, biyoalkoller, biyoyağlar ve biyogazlar olarak dört grupta incelenmiştir. Biyodizeller; FAME, HVO, FT-dizel ve Bio-DME'dir. Biyoalkoller ise biomethanol ve bioethanoldür. Biyodizeller ve biyoalkoller damıtılmış deniz yakıtlarının yerini alabilecek alternatiflerdir. Biyoyağlar; SVO, pyrolysis oil, HTL ve solvolysis oil'dir ve ağır deniz yakıtlarının yerini alabilecek alternatiflerdir. Biyogaz olarak LBM ise gaz yakıtların yerini alabilecek alternatiftir. Bu biyoyakıt grupları birçok farklı hammaddeden farklı üretim prosesleri ile üretilmektedirler. Biyoyakıtlar ayrıca üç jenerasyonda incelenir. Temel olarak yenilebilir hammaddeden üretilen biyoyakıtlar 1. jenerasyon, atık bitkisel ve hayvansal yağlardan ve yenilebilir olmayan lignoselülozik biyokütleden üretilenler 2. jenerasyon, mikroalgler biyokütlesinden üretilen biyoyakıtlar ise 3. jenerasyon olarak ayrışmaktadır.

Değerlendirme modelinde kullanılan biyoyakıtlar jenerasyonları, biyokütle hammaddesi, üretim prosesi ve grupları dikkate alınarak seçilmiştir. Seçilen biyoyakıtlar FAME 1. ve 2. jenerasyon, HVO 1. 2. ve 3. jenerasyon, SVO, LBM, FT-dizel, Biometanol, Bio-DME'dir. Değerlendirme modeli olarak çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan AHP yöntemi kullanılmıştır. Değerlendirme kriterleri belirlenirken, denizcilik sektörü için daha önceki çalışmalarda yaygın olarak kullanılan emniyet, teknolojik olgunluk (TRL indeksi), hammadde mevcudiyeti, ve maliyet seçilmiş, bu kriterlerin yanı sıra biyoyakıtların alternatif yakıtlara geçiş sürecinde drop-in özelliğinin etkisini gözlemlemek için uyumluluk (mevcut gemi altyapısı ile), çalışmada LCA yaklaşımı benimsendiği için well-to-wake emisyon

performansı (WTW), ve biyoyakıtlara özgü ILUC etkisi kriterleri çalışmaya dahil edilmiştir.

Seçilen biyoyakıtların kriterler üzerindeki performansları literatürdeki bilgi ve veriler kullanılarak puanlama yoluyla belirlenmiştir. Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklarını tespit etmek için sektör deneyimi olan 15 uzmandan görüş alınmıştır. Toplanan veriler üzerinde AHP yöntemi uygulanarak kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. 0,388 emniyet, 0,279 WTW emisyon, 0,108 uyumluluk, 0,101 hammadde mevcudiyeti, 0,051 maliyet, 0,049 TRL indeks ve 0,025 ILUC etkisi kriterinin ağırlığı olarak hesap edilmiştir. Daha sonra biyoyakıt alternatiflerinin her bir değerlendirme kriteri üzerindeki performans ağırlıkları AHP yöntemi ile hesap edilmiştir. Son aşamada ise biyoyakıtların toplam performans skorları yine AHP yöntemi ile hesaplanmış ve nihai sonuç ortaya çıkarılmıştır. Nihai sonuca göre, değerlendirme modelinde karşılaştırılan biyoyakıtlardan deniz taşımacılığı için en uygun ve sürdürülebilir olanı toplam 0,159 puanla FT-dizel olmuştur. İkinci sırada 0,150 toplam puanla HVO 3. nesil ve üçüncü sırada 0,125 toplam puanla HVO 2. nesil yer almıştır. HVO 1. nesil toplam 0.107 puanla dördüncü sırada yer almıştır. Biomethanol 0.091 toplam puanla beşinci sırada yer almıştır. Altıncı, yedinci ve sekizinci sıralarda, birbirine yakın puanlarla, toplam 0,084 puanla Bio-DME, toplam 0,081 puanla FAME 2. nesil ve toplam 0,079 puanla LBM yer almaktadır. Dokuzuncu sırada toplam 0.063 puanla FAME 1. nesil yer almaktadır. Son sırada ise toplam 0,060 puanla SVO konumlanmıştır.

Son olarak değerlendirme modelinin güvenilirliğini ve tutarlılığını kontrol etmek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Çünkü kriter ağırlıklandırmalarının hesaplanmasında kullanılan veriler 15 uzmanın görüşleri ile oluşturulmuştur. Daha fazla sayıda görüş alınması veya farklı uzmanlardan görüş alınması durumunda kriter ağırlıklarının değişmesi mümkündür. Yapılan duyarlılık analizinde 14 farklı senaryo oluşturulmuş ve her bir senaryo için biyoyakıtların toplam skorları hesaplanmıştır. Son olarak bu senaryolar temel senaryo ile karşılaştırılmıştır grafik haline getirilmiştir. Çıkan sonuca göre değerlendirme modelinin tutarlı ve güvenli olduğu tespit edilmiştir.

Emniyet kriteri tez çalışmasındaki en önemli kriterdi. Bunun bir sonucu olarak emniyet puanı düşük olan biyoyakıtlar ilk sıralara yerleşemedi. İkinci en önemli kriter ise WTW emisyonu. WTW emisyon performansı, yakıtın üretim yöntemi ve türünden etkilense de, biyoyakıtı üretmek için kullanılan hammaddeden daha çok etkilenmektedir. Bunun bir sonucu olarak yenilebilir bitki yağlarından elde edilen

biyoyakıtlar ilk üç sraya girememiştir. Üçüncü en önemli kriter ise uyumluluktur. İlk iki sırayı alan yakıtların ortak özelliği emniyet, WTW emisyon ve uyumluluk kriterlerinde en yüksek ağırlıklara sahip olmasıdır. İlk iki sırayı alan sırasıyla FT-dizel ve HVO 3. jenerasyon biyoyakıtlarının üzerine yapılan çalışmaların arttırılması, yakıt üreticilerinin teşvik edilmesi ve ekonomik olarak desteklenmesi ile maliyetlerin düşürülmesi ve arzın arttırılması ile denizcilik sektörünün karbonsuzlaşmasında kayda değer bir etki alanı bulacağı kanaatindeyim. Diğer biyoyakıtlardan drop-in özelliğine sahip olanların konvansiyonel yakıtlarla uygun miktarlarda karışım halinde kullanılması, özellikle içinde bulunduğumuz alternatif yakıtlara geçiş sürecinde, atmosfere salınan net karbon emisyonlarını azaltarak sektörün karbonsuzlaşmasına katkı sağlayacaktır.

5.1 Değerlendirme

IMO yeni inşa gemilerde uygulamaya koyduğu EEDI'ye benzer bir önlem olan Mevcut Gemilerde Enerji Verimliliği Endeksi (EEXI), 1 Kasım 2022'de yürürlüğe koymuştur. Gemiler, en geç 2023 yılındaki ilk periyodik sörveyde olmak üzere, ömürleri boyunca bir kez EEXI onayı almak zorundadır. Gerekli EEXI değeri gemi tipine, geminin kapasitesine ve sevk prensibine göre belirlenir.

IMO EEXI ile bağlantılı olarak, Karbon Yoğunluğu Göstergesi (CII) uygulamasını 1 Ocak 2023 tarihinden itibaren yürürlüğe koymuştur. CII 5.000 gros tonaj üzerindeki bir geminin mal veya yolcuları ne kadar verimli taşıdığını ölçer ve yük taşıma kapasitesi ve deniz mili başına salınan CO2 gramı cinsinden verilir. CII'nin 2023 verilerine dayanan ilk raporlamasının en geç 31 Mart 2024 tarihine kadar yapılması gerekmektedir. Gemiler A, B, C, D veya E derecelendirmesi alacaktır. Derecelendirme eşikleri 2030'a doğru giderek daha katı hale gelecektir. Üç yıl üst üste D veya E olarak derecelendirilen bir geminin bir düzeltici eylem planı geliştirmesi gerekecektir.

Bu uygulamalar, denizcilik sektöründe faaliyet gösteren firmaları mevcut gemilerin işletilmesi noktasında zorlamaktadır. IMO'nun LCA konusundaki çalışmalarının MEPC'nin 80. oturumunda neticelenmesi ile birlikte, denizcilik sektöründe biyoyakıtların kullanımı, mevcut gemilerin CII performansına olumlu yönde etki edeceği kanaatindeyim.

KAYNAKLAR

ABS. 2021a. ‘Low Carbon Shipping Setting the Course To Pathways To Sustainable Shipping’.

ABS. 2021b. ‘Sustainability Whitepaper - Biofuels as Marine Fuel’. (May):28.

Baldi, F., Moret, S., Tammi, K., Maréchal, F. 2020. ‘The Role of Solid Oxide Fuel Cells in Future Ship Energy Systems’. *Energy* 194. doi: 10.1016/j.energy.2019.116811.

Boviatsis, M., Tselentis, B. 2019. ‘A Comparative Analysis between EU MRV and IMO DCS – the Need to Adopt a Harmonised Regulatory System’. *16th International Conference on Environmental Science and Technology* (September):2018–19.

Chowdhury, H., Loganathan, B. 2019. ‘Third-Generation Biofuels from Microalgae: A Review’. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 20:39–44. doi: 10.1016/j.cogsc.2019.09.003.

Deniz, C., Zincir, B. 2016. ‘Environmental and Economical Assessment of Alternative Marine Fuels’. *Journal of Cleaner Production* 113(X):438–49. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.089.

Dere, C., Deniz, C. 2020. ‘Effect Analysis on Energy Efficiency Enhancement of Controlled Cylinder Liner Temperatures in Marine Diesel Engines with Model Based Approach’. *Energy Conversion and Management* 220:113015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113015>.

Deruyck, M., PatricE, M., Nul, J.D. 2020. ‘Hopper Dredger First to Sail 2 , 000 Hours on 100 % Sustainable Marine Biofuel’. 2–4.

DyK, V.S., Su, J., Mcmillan, J.D., Saddler, J.N. 2019. ‘*DROP-IN*’ *BIOFUELS: The Key Role That Co-Processing Will Play in Its Production*.

Fan, Y.V., Perry, S., Klemeš, J.J., Lee, C.T. 2018. ‘A Review on Air Emissions Assessment: Transportation’. *Journal of Cleaner Production* 194:673–84. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.151.

Fernandez-Villamil J.M., Hurtado, A. 2018. ‘Preliminary Design of the Green Diesel Production Process by Hydrotreatment of Vegetable Oils’.

Finkbeiner, M. 2014. ‘Indirect Land Use Change - Help beyond the Hype?’ *Biomass and Bioenergy* 62:218–21. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.01.024.

Francisco, Ę. C., Jacob-Lopes, E., Neves, D.B., Franco, T.T. 2009. ‘Microalgae as Feedstock for Biodiesel Production: Carbon Dioxide Sequestration, Lipid Production and Biofuel Quality’. *New Biotechnology* 25:S278–79. doi: 10.1016/j.nbt.2009.06.630.

Gray, N., McDonagh, S., O’Shea, R., Smyth, B., Murphy J.D. 2021. ‘Decarbonising Ships, Planes and Trucks: An Analysis of Suitable Low-Carbon Fuels

for the Maritime, Aviation and Haulage Sectors'. *Advances in Applied Energy* 1:100008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100008>.

Gwo-Hshiong, T., Cheng-Wei, L., Serafim, O. 2005. 'Multi-Criteria Analysis of Alternative-Fuel Buses for Public Transportation'. *Energy Policy* 33(11):1373–83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.12.014>.

Hammer, L.S., Eide, M.S., Leisner, M., Longva, T., Endresen, Ø., Rivedal, H.N. Ovrum, E., Sekkesæter, Ø. 2021. *Maritime Forecast to 2050, Energy Transition Outlook*.

Hendriksen, P. V., Sørensen, T.A., Anker, Münster, M. 2021. *General Rights MarE-Fuel: Sustainable Maritime Fuels-Executive Summary Report*.

Hoefnagels, R., Germer, S. 2020. *Supply Potential, Suitability and Status of Lignocellulosic Feedstocks for Advanced Biofuels D2.1 Report on Lignocellulosic Feedstock Availability, Market Status and Suitabil-Itly for RESfuels*.

IEA Bioenergy. 2017. *IEA Bioenergy Annual Report 2017*.

IMO. 2009. 'The Second IMO Greenhouse Gas Study'. *International Maritime Organization (IMO)* 220.

IMO. 2014. 'The Third IMO Greenhouse Gas Study 2014'. *International Maritime Organization (IMO)* 327. doi: [10.1007/s10584-013-0912-3](https://doi.org/10.1007/s10584-013-0912-3).

IMO. 2018. 'Adoption of the Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions From Ships and Existing Imo Activity Related To Reducing Ghg Emissions in the Shipping Sector'. *Mepc* 72 27.

IMO. 2020a. 'Fourth IMO Greenhouse Gas Study: Executive Summary'. *IMO Greenhouse Gas Study* 4(1):46.

IMO. 2020b. *The Fourth IMO GHG Study*.

Inal, Ö.B., Zincir, B., Deniz, C. 2022. 'Investigation on the Decarbonization of Shipping: An Approach to Hydrogen and Ammonia'. *International Journal of Hydrogen Energy* 47(45):19888–900. doi: [10.1016/j.ijhydene.2022.01.189](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.189).

Juncker, J. 2019. 'ILUC'. *European Comission Delegated Regulation, C(2019) 2055 Final* 2013–15.

Kampa, M., Castanas, E. 2008. 'Human Health Effects of Air Pollution'. *Environmental Pollution* 151(2):362–67. doi: [10.1016/j.envpol.2007.06.012](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012).

Katerina G., T., Petros A., P. 2012. 'Evaluation of Alternative Fuels for the Greek Road Transport Sector Using the Analytic Hierarchy Process'. *Energy Policy* 48:677–86. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.079>.

Kesharwani, R., Sun, Z., Dagli, C., Xiong, H. 2019. 'Moving Second Generation Biofuel Manufacturing Forward: Investigating Economic Viability and Environmental Sustainability Considering Two Strategies for Supply Chain Restructuring'. *Applied Energy* 242(March):1467–96. doi: [10.1016/j.apenergy.2019.03.098](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.098).

Kroft, V.D., Douwe F. A., Pruyn, J.E.J. 2021. 'A Study into the Availability, Costs and GHG Reduction in Drop-in Biofuels for Shipping under Different Regimes between 2020 and 2050'. *Sustainability (Switzerland)* 13(17). doi: [10.3390/su13179900](https://doi.org/10.3390/su13179900).

- Laso, J., Vázquez-Rowe, I., Margallo, M., Crujeiras, R.M., Irabien, A., Aldaco, R.** 2018. 'Life Cycle Assessment of European Anchovy (*Engraulis encrasicolus*) Landed by Purse Seine Vessels in Northern Spain'. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 23(5):1107–25. doi: 10.1007/s11367-017-1318-7.
- Laursen, R., Barcarolo, D.** 2022. *Update on Potential of Biofuels for Shipping Authors: Legal Notice: Copyright Notice.*
- Månsson, S.** 2017. *Prospects for Renewable Marine Fuels A Multi-Criteria Decision Analysis of Alternative Fuels for the Maritime Sector.*
- Mohd Noor, C. W., Noor, M. M., Mamat, R.** 2018. 'Biodiesel as Alternative Fuel for Marine Diesel Engine Applications: A Review'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94(February 2017):127–42. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.031.
- Nami, H., Butera, G., Campion, N., Frandsen, H.L., Hendriksen, P.V.** 2021. *MarE-Fuel: Energy Efficiencies in Synthesising Green Fuels and Their Expected Cost.*
- Nelissen, D., Faber, J., Veen, R., Grinsven, A., Shanthi, H., Toorn, E.** 2020. *Availability and Costs of Liquefied Bio-and Synthetic Methane. The Maritime Shipping Perspective.*
- Network, Ocean, and Express Pte.** 2021. 'ONE Conducts Successful Second Trial Use of Sustainable Biofuel for Decarbonization'.
- NREL.** 2021. *Straight Vegetable Oil as a Diesel Fuel?*
- Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A.M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb A. H., Rooney, D.W.** 2021. *Conversion of Biomass to Biofuels and Life Cycle Assessment: A Review.* Vol. 19. Springer International Publishing.
- Osorio-Tejada, J. L., Llera-Sastresa, E., Scarpellini S.** 2017. 'A Multi-Criteria Sustainability Assessment for Biodiesel and Liquefied Natural Gas as Alternative Fuels in Transport Systems'. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 42:169–86. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.046>.
- Ovrum, E., Tore, L., Hammer, L.S., Rivedal, N.H., Endresen, Ø., Magnus S. E.** 2022. *Maritime Forecast to 2050, Energy Transition Outlook.*
- Oztaysi, B., Onar, S.Ç. Kahraman, C., Yavuz, M.** 2017. 'Multi-Criteria Alternative-Fuel Technology Selection Using Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets'. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 53:128–48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.003>.
- Paulauskiene, T., Bucas, M., Laukinaite, A.** 2019. 'Alternative Fuels for Marine Applications: Biomethanol-Biodiesel-Diesel Blends'. *Fuel* 248:161–67. doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.082.
- Psaraftis, H. N.** 2019. *Sustainable Shipping: A Cross-Disciplinary View.*
- Rattazzi, D., Rivarolo, M., Massardo, A. F.** 2021. 'An Innovative Tool for the Evaluation and Comparison of Different Fuels and Technologies Onboard Ships'. in *E3S Web of Conferences.* Vol. 238. EDP Sciences.
- Rony, A. H., Kitada, M., Dalaklis, D., Ölçer, A.I., Ballini, F.** 2019. 'Exploring the New Policy Framework of Environmental Performance Management for Shipping: A Pilot Study'. *WMU Journal of Maritime Affairs* 18(1):1–24. doi: 10.1007/s13437-019-00165-z.

- Rutherford, D., Bryan C.** 2018. ‘International Maritime Organization’s Initial Greenhouse Gas Strategy’. *International Council on Clean Transportation (ICCT)* (April 2018):8.
- Ryste, J.A., Wold, M., Sverud, T.** 2019. ‘Comparison of Alternative Marine Fuels’. 1–65.
- Saaty, T. L.** 2008. ‘Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons Are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors the Analytic Hierarchy/Network Process’. *RACSAM - Revista de La Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas* 102(2):251–318. doi: 10.1007/BF03191825.
- Saddler, J., Ebadian, M., and Mcmillan, J.D.,** 2020. *Advanced Biofuels-Potential for Cost Reduction*.
- Sadeghinezhad, E., Kazi, S. N., Badarudin, A., Oon, C. S., Zubir, M. N. M., Mehrali, M.** 2013. ‘A Comprehensive Review of Bio-Diesel as Alternative Fuel for Compression Ignition Engines’. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28:410–24. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.003.
- Sam, S., Giacomo, B. and Gabriele Di., B.** 2020. ‘Engine Parameters Assessment for Alcohols Fuels Application in Compression Ignition Engines’. Pp. 125–39 in *Alternative Fuels and Their Utilization Strategies in Internal Combustion Engines*, edited by Y. C. and M. N. N. and A. A. K. Singh Akhilendra Pratap and Sharma. Singapore: Springer Singapore.
- Saranya, G., Ramachandra, T.V.** 2020. ‘Life Cycle Assessment of Biodiesel from Estuarine Microalgae’. *Energy Conversion and Management: X* 8(December):100065. doi: 10.1016/j.ecmx.2020.100065.
- Sevim, C., Zincir, B.** 2022. ‘Biodiesel and Renewable Diesel as a Drop-in Fuel for Decarbonized Maritime Transportation’. Pp. 319–45 in *Potential and Challenges of Low Carbon Fuels for Sustainable Transport*, edited by A. K. Agarwal and H. Valera. Singapore: Springer Singapore.
- Sevim, C., Zincir, B.** 2023. ‘Lifecycle Emissions of Fossil Fuels and Biofuels for Maritime Transportation: A Requirement Analysis’. Pp. 27–44 in *Decarbonization of Maritime Transport*, edited by P. C. and A. A. K. Zincir Burak and Shukla. Singapore: Springer Nature Singapore.
- Stena Bulk.** 2020. ‘Stena Bulk and GoodFuels Successfully Complete Trial of Sustainable Marine Biofuel’. 2.
- UNCTAD.** 2020. *Review of Maritime Transport 2020*.
- UNCTAD.** 2021. *Review of Maritime Report 2021*.
- UNCTAD.** 2022. *Review of Maritime Transport 2022*.
- Velasquez, M., Patrick T. H.** 2013. *An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods*. Vol. 10.
- Verbeek, R. Hart, P., Pruyn, J. F. J., Bergsma, J.** 2020. *Assessment of Alternative Fuels for Seagoing Vessels Using Heavy Fuel Oil Final Report: Assessment of Alternative Fuels for Seagoing Vessels Using Heavy Fuel Oil Project Data Maritime Knowledge Centre, TNO and TU Delft Project Title: Final Report: Assessment of Alternative Fuels for Seagoing Vessels Using Heavy Fuel Oil*.

Woldemichael, S., Ayman, E., Agnès, C., Catherine, L., Denilson D.S., P., Stéphane M., Cédric C., A., Léa, V., Laurent, D., Pascal, F. 2020. ‘Comparative Study of Solvolysis of Technical Lignins in Flow Reactor’. *Biomass Conversion and Biorefinery* 10(2):351–66. doi: 10.1007/s13399-019-00435-z.

Zhou, Y., Pavlenko, N., Rutherford, V., Liudmila Osipova, and Bryan Comer. 2020. ‘The Potential of Liquid Biofuels in Reducing Ship Emissions’. *International Council on Clean Transportation* 1(September):31.

Zhou, Y., Pavlenko, Y. 2020. ‘The Potential of Liquid Biofuels in Reducing Ship Emissions | International Council on Clean Transportation’. *International Council on Clean Transportation* (September).

Zincir, B. 2019. *An Alternative Fuel Assessment Model For Ships And Experiments on The Effect of Methanol on Diesel Engines.*

Zincir, B., Deniz C. 2021. ‘Methanol as a Fuel for Marine Diesel Engines’. Pp. 45–85 in *Alcohol as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines*, edited by P. C. Shukla, G. Belgiorno, G. Di Blasio, and A. K. Agarwal. Singapore: Springer Singapore.

Zincir, B., Deniz C. 2018. ‘Assessment of Alternative Fuels from the Aspect of Shipboard Safety’. *JEMS Maritime Sci* 6(3):199–214. doi: 10.5505/jems.2018.71676.

URL-1<<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-8>>, erişim tarihi 12.12.2022.

URL2<<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Historic%20Background%20GHG.aspx>> erişim tarihi 06.01.2023

URL-3<<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>> erişim tarihi 17.11.2022

URL-4<<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/technology-readiness-levels>> erişim tarihi 17.03.2023



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Çağatayhan SEVİM

Doğum Tarihi ve Yeri :

ÖĞRENİM DURUMU :

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deniz Ulaştırma Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM :

- 2017 - 2018 Uzakyol Vardiya Mühendisi, Arkas Denizcilik ve Nakliyat A.Ş.
- 2020 - ... Araştırma Görevlisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR :

- **Sevim, Ç., & Zincir, B.,** (2022). Comparison of Biofuels for Decarbonized Maritime Transportation . International Symposium on Energy Management and Sustainability (ISEMAS) 2022, Turkey
- **Sevim, Ç., & Zincir, B.,** (2022). Biodiesel and Renewable Diesel as a Drop-in Fuel for Decarbonized Maritime Transportation. Potential and Challenges of Low Carbon Fuels for Sustainable Transport (pp.319-345), Singapore: Springer Nature.
- **Sevim, Ç., & Zincir, B.,** (2023). Lifecycle Emissions of Fossil Fuels and Biofuels for Maritime Transportation: A Requirement Analysis. Decarbonization of Maritime Transport (pp.27-44), Singapore: Springer Nature.