

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZCİLİĞİN KARBONSUZLAŞTIRILMASI YOL
HARİTASI:
ALTERNATİF YAKITLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HEDEFLERİNE ULAŞMAK İÇİN
KILAVUZ BİLGİLER

Furkan ÇITAKOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DENİZCİLİĞİN KARBONSUZLAŞTIRILMASI YOL
HARİTASI:
ALTERNATİF YAKITLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HEDEFLERİNE ULAŞMAK İÇİN
KILAVUZ BİLGİLER**

Furkan ÇITAKOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 22.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Asım Sinan KARAKURT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat Emre DEMİR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Denizciliğin Karbonsuzlaştırılması Yol Haritası: Alternatif Yakıtların Karşılaştırılması ve Sürdürülebilirlik Hedeflerine Ulaşmak İçin Kılavuz Bilgiler” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Furkan ÇITAKOĞLU



Asuman & Sümer'e

TEŞEKKÜR

Yeni maceralara yelken açmak, yeni deneyimlere açık olmak, yeni şeyler öğrenmek ve az gidilen yolda ilerlemek zamansız değerlerdir. Doğa ve tüm canlılar için daha iyi bir dünya dilemek ne kadar güzelse, eylemlerimizin olası sonuçları ve etkileri konusunda dikkatli olmak da o kadar önemlidir. Ne yazık ki, sorunlarımıza yönelik çözümleri bulma konusunda genellikle başarısız oluyoruz; oysa ki, bir araya geldiğimizde, her birimiz bir işin ucundan tuttuğumuzda bu çözümleri kolayca bulabiliriz.

Bir danışman, zihniyeti, tavrı ve bakış açısıyla öğrencilerine yol gösteren ve iyi bir örnek teşkil eden bir rol modelidir. Profesör Dr. Ahmet Dursun ALKAN, işte bu şekilde, öğrencilerine ilham veren, onları kendilerini geliştirmeye teşvik eden, örnek biridir. Bu nedenle, kendilerine içten teşekkürlerimi sunmak isterim; onun rehberliğinde çalışmak bir şerefti.

Ayrıca, aileme, özellikle annem Asuman'a, bana destek oldukları ve inandıkları için teşekkür ederim. Teşekkürler Sumer, teşekkürler Altuğ. Hayatımdaki varlıkları için Melek ve İlknur'a da teşekkür ederim.

En derin şükranlarım, sadece kurtarıcımız ve ulusal liderimiz değil, aynı zamanda zihin dünyamızı aydınlatan, bize yol gösteren ve bilimi, mantığı ve medeniyeti takip etmemizi vurgulayan büyüğümüz ve rol modelimiz Mustafa Kemal ATATÜRK'e ayrılmıştır.

Furkan ÇITAKOĞLU

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Denizcilik Faaliyetleri.....	1
1.2 Deniz Sevk Sistemlerinin Geçmişine ve Geleceğine Kısa Bir Bakış.....	8
1.2.1 Eski Uygulamalar: Rüzgar & İnsan Gücü	8
1.2.2 Buhar Gücü, Çarklar, Uskurlu Pervaneler & Kömür.....	11
1.2.3 Çağdaş Gemi Sevki.....	12
1.2.4 Yeşil İtke Gücü	15
2 TEMİZ YAKITLARIN İNCELENMESİ	27
2.1 Hidrojen	27
2.1.1 Hidrojen Depolama.....	30
2.1.2 Hidrojen Kullanımı.....	30
2.2 Metanol	32
2.2.1 Metanol Depolama.....	35
2.2.2 Alternatif Yakıt Olarak Metanol.....	36
2.2.3 Metanolün Yanma Profili.....	43
2.2.4 İçten Yanmalı Makinelerde Metanol.....	45
2.2.5 Denizcilik Alanındaki Metanol Yakıt Projeleri	55
2.2.6 Metanol ile Çalışan Gemi Makineleri.....	58
2.2.7 Metanol Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi	60
2.2.8 Karbon Yakalama ve Depolamanın Önemi.....	61

2.2.9	Metanol Ekonomisi	62
2.3	Amonyak.....	67
2.3.1	Amonyak Üretimi.....	67
2.3.2	Amonyak Depolanması.....	71
2.3.3	Alternatif Yakıt Olarak Amonyak.....	72
2.3.4	Amonyakın Yanma Profili.....	74
2.3.5	İçten Yanmalı Makinelerde Amonyak.....	77
2.3.6	Amonyak Emisyon Profili.....	82
2.3.7	Amonyakla Çalışan Gemi Makineleri	82
2.3.8	Amonyak Ekonomisi	84
2.4	Genel Özet.....	89
3	DEĞERLENDİRME & ÖNERİLER	92
3.1	Değerlendirme.....	92
3.1.1	Alternatif Yakıtlara Dayalı Bulguların Değerlendirilmesi.....	92
3.2	İleri Çalışmalar için Öneriler ve Fikirler.....	94
3.2.1	Toplu Taşıma Örneği: Turizm İstanbul & İzmir.....	94
3.2.2	Sürdürülebilir Turizm Örneği	97
3.2.3	Alternatif Yakıtların Yenilikçi Çözümlerle Birleştirilmesi	98
4	SONUÇ	100
	KAYNAKÇA	101
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	119

SİMGE LİSTESİ

NH_3	Amonyak
NO_x	Azot Oksitler
N_2O	Diazot Monoksit (Gülme Gazı)
CO_2	Karbon Dioksit
CO	Karbon Monoksit
SO_x	Kükürt Oksitler
Li_2CO_3	Lityum Karbonat
MeOH	Metanol
K_2CO_3	Potasyum Karbonat
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
Na_2CO_3	Sodyum Karbonat

KISALTMA LİSTESİ

AFC	Alkali Yakıt Pilleri / Alkali Fuel Cells
AI	Yapay Zeka / Artificial Intelligence
BDC	Alt Ölü Nokta / Bottom Dead Center
BSFC	Güç Etkin Yakıt Sarfıyatı / Brake Specific Fuel Consumption
BTE	İş Etkin Isıl Verimlilik / Brake Thermal Efficiency
CCS	Karbon Yakalama ve Depolama / Carbon Capture and Storage
CH ₂	Sıkıştırılmış Hidrojen / Compressed Hydrogen
CI	Sıkıştırılmalı Ateşleme / Compressed Ignition
DF	Çift Yakıt / Dual Fuel
DI	Doğrudan Enjeksiyon / Direct Injection
DISI	Doğrudan Enjeksiyonlu Kıvılcım Ateşlemesi
EGR	Makine Gazı Devridaimi / Engine Gas Recirculation
EPA	ABD Çevre Koruma Ajansı / Environmental Protection Agency
FC	Yakıt Pili / Fuel Cell
GHG	Sera Gazı / Greenhouse Gases
HCCI	Homojen Yük Sıkıştırılmalı Ateşleme
HFO	Kıvamlı Akar Yakıt / Heavy Fuel Oil
HTCGR	Yüksek Sıcaklıkta Silindir Gazı Devridaimi
IMO	Uluslararası Denizcilik Örgütü
İYM/ICE	İçten Yanmalı Motor / Internal Combustion Engine
LFL	Düşük Parlama Noktalı Sıvı
LH ₂	Sıvı Hidrojen
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LSFO	Düşük Sülfürlü Akar Yakıt
LTC	Düşük Sıcaklıkta Yanma
LTCS	Düşük Sıcaklıkta Yanma Stratejileri
MCFC	Erimiş Karbonatlı Yakıt Pilleri
MDO	Marine Diesel Oil
MEA	Membran Elektrot Düzeneği
MEF	Metanol Enerji Fraksiyonu

MeOH-W	Metanol ve su karışımı
MGO	Marine Gas Oil
MSF	Maritime Safety Forum
MSW	Kentsel Katı Atıklar / Municipal Solid Waste
NASA	Birleşik Devletler Havacılık ve Uzay Dairesi
NMHC	Metan olmayan hidrokarbon / Non-Methane Hydrocarbon
OCIMF	Oil Companies International Marine Forum
P/V	Basınç/Vakum
PCCI	Ön Karışımli Yük Sıkıştırılmalı Ateşleme
PEMFC	Proton Değişimli Membran Yakıt Pilleri
PFI	Port Yakıt Enjeksiyonu / Port Fuel Injection
PFI-SI	Port Yakıt Enjeksiyonlu Kıvılcımlı Ateşleme
PM	Partikül Maddeler
PPC	Kısmen Ön Karışımli Yanma
PRR	Basınç Artış Oranı / Pressure Rise Rate
RCCI	Tepkinlik Kontrollü Sıkıştırılmalı Ateşleme
SCR	Seçici Katalitik İndirgeme
SECA	Kükürt Emisyonu Kontrol Alanları
SI	Kıvılcımla Ateşleme / Spark Ignition
SKH/SDG	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri / Sustainable Development Goal
SOFC	Katı Oksit Yakıt Pilleri
SSAS	Katı hal amonyak sentezi
SMR	Buhar Metan Reformasyonu / Steam Methane Reforming
TDC	Üst Ölü Nokta / Top Dead Center
TRA	Transport Research Arena
TtW	Tanktan Pervaneye
ULSFO	Ultra Düşük Kükürtlü Akar Yakıt
USAF	Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri
WASP	Rüzgar Destekli İtke Sistemleri
WHR	Atık Isı Geri Kazanımı
WHTC	World Harmonized Transient Cycle (Emisyon Test Prosedürü)
WtW	Beşikten Mezara

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	M.S. 3.-4. Yüzyıllara tarihli Roma mozaïi	1
Şekil 1.2	Gemilerden havaya salınan kirletici/toksik maddeler.....	2
Şekil 1.3	Ülkelerin emisyon oranlarını gösteren görsel	4
Şekil 1.4	Sera gazı salımındaki çarpıcı artış.....	5
Şekil 1.5	Küresel ısınmanij artan nüfus arasındaki ilişkiye dair görsel.....	6
Şekil 1.6	Bir emisyon kontrol aday bölgesi olarak Akdeniz.....	8
Şekil 1.7	Mısır Uygarlığı'na ait geminin Nil Nehri üzerinde tasviri.....	9
Şekil 1.8	Antik Yunan gemileri	9
Şekil 1.9	16.yy bir Akdeniz ülkesine ait Kalyon.....	10
Şekil 1.10	Osmanlı muharip gemisi Mahmudiye.....	10
Şekil 1.11	Çarklı gemi örneïi.....	11
Şekil 1.12	RMS Titanik ve pervaneleri.....	12
Şekil 1.13	Gemi sevk ve tahrikinin basit şeması.....	12
Şekil 1.14	Dizel makinede yakıt girdisinden enerji çıkıtısına bir bakış.....	14
Şekil 1.15	İnsanlığın enerjeri ve güç üretiminde kat ettiïi ilerleme.....	16
Şekil 1.16	LTC kavramlarının İngilizce açılımlarının şeması.....	17
Şekil 1.17	CI, SI ve HCCI makinelerin farklarını yansıtan görsel.....	18
Şekil 1.18	Dizel yanma ve HCCI yanması.....	19
Şekil 1.19	Bir yakıt pilinin çalışma prensibinin görselleştirilmesi.....	22
Şekil 2.1	Hidrojen'in kimyasal özellikleri.....	28
Şekil 2.2	Deniz yakıtının yaşam döngüsü süreçleri.....	34
Şekil 2.3	Gazlama yoluyla biyo-metanol üretimini tasvir eden görsel.....	35
Şekil 2.4	Sandviç plaka sistemi teknolojisi.....	36
Şekil 2.5	Metanol yakıtının güçlü ve zayıf yönleri.....	37
Şekil 2.6	Benzinli makinede normal ve prematüre yanma.....	38
Şekil 2.7	Dizel makineler için metanol enjeksiyon stratejileri.....	45
Şekil 2.8	Dizel makinede çift yakıtlı çalışma ve port yakıt enjeksiyonu.....	47
Şekil 2.9	Alt ve üst ölü noktaları gösteren resim.....	47
Şekil 2.10	Metanolün SI makinelerde kullanım yöntemlerini gösteren şema.....	50
Şekil 2.11	SI ve CI makineler için blendler ve enjeksiyon yöntemleri.....	53
Şekil 2.12	Stena Germanica.....	57
Şekil 2.13	Metanol enjeksiyonu için yakıt takviye enjeksiyon valfleri.....	58

Şekil 2.14	ME-LGIM (sıvı gaz enjeksiyonlu metanol) çift yakıtlı makine.....	59
Şekil 2.15	Metanolün mevcut olduğu veya tedarik edilebildiği limanlar.....	62
Şekil 2.16	Dünyanın ilk e-metanol ile çalışan konteynerinin bilgi görseli.....	64
Şekil 2.17	Tutulmuş CO ₂ ve yenilenebilir kaynaklardan metanol üretimi.....	66
Şekil 2.18	Amonyak üretim yolları.....	68
Şekil 2.19	Farklı Haber-Bosch proseslerinin emisyon diyagramları.....	69
Şekil 2.20	Katı hal amonya sentez cihazı.....	70
Şekil 2.21	Erimiş tuzda amonyak eldesi	71
Şekil 2.22	Hava-yakıt oranı kavramlarının görsel anlatımı.....	73
Şekil 2.23	X-15 Roketinin 3D modeli ve kesit görünümü.....	77
Şekil 2.24	Lee ve Song tarafından önerilen yanma stratejisi.....	81
Şekil 2.25	Amonyak enerji çıktılarının görsel temsili.....	84
Şekil 2.26	Amonyak tedarik zincirinin üretime ve tüketime dönük kısımları	85
Şekil 2.27	Yenilenebilir enerji kaynaklarından yakıt üretimi.....	89
Şekil 3.1	İstanbul ve İzmir'deki vapur hatları ve iskelelerin konumları.....	95
Şekil 3.2	Anadolu Ajansı'ndan alınan rüzgar enerjisi ile ilgili bir infografik.....	96
Şekil 3.3	Çevre dostu deniz turizminin önemi.....	98

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Denizcilik faaliyetleri sonucu ortaya çıkan kirletici maddelerin dünya geneline vurulduğunda sorumlu olduğu yüzdeleri.....	2
Tablo 1.2	Kirletici maddeler, oluşma nedenleri ve açıklamalar.....	3
Tablo 1.3	Muhtelif yakıtların özelliklerinin mukayesesi ve salım etkileri.....	5
Tablo 1.4	Dizel ve benzinli makinenin çeşitli kriterlere göre mukayesesi.....	15
Tablo 1.5	LTC stratejilerinin karşılaştığı sorunlar listesi.....	17
Tablo 1.6	Reaksiyonlar tablosu.....	22
Tablo 1.7	Yakıt pili türlerinin geniş ölçekli karşılaştırması ve denizcilik uygulamaları için cazibe dereceleri.....	26
Tablo 2.1	Hidrojen elementlerinin özellikleri.....	28
Tablo 2.2	Hidrojen üretim yöntemlerinin emisyon ve maliyet yönünden değerlendirilmesi	29
Tablo 2.3	Farklı kriterlere göre en iyi yakıt/operasyon seçenekleri.....	32
Tablo 2.4	Metanolün kimyasal özellikleri.....	33
Tablo 2.5	Metanolün üretimi ve yanması ile ilişkili tepkimeler	33
Tablo 2.6	Çeşitli yakıtların kütlece içerikleri.....	37
Tablo 2.7	Metanol ve benzinin kıyası.....	40
Tablo 2.8	Yakıtların kendiliğinden tutuşma değerlerinin karşılaştırılması.....	42
Tablo 2.9	Çeşitli yakıtların setan numarası.....	44
Tablo 2.10	ABD’de satılan çeşitli kategorideki benzinlerin oktan sayısı.....	44
Tablo 2.11	Oktan ve setan sayılarının bir karşılaştırması.....	45
Tablo 2.12	Metanol ve suyun molar kütle ve moleküler yapıları.....	48
Tablo 2.13	Çeşitli oranlarda metanol su blendleri.....	49
Tablo 2.14	Metanol makine konseptleri	54
Tablo 2.15	Stena Germanica’nın temel karakteristikleri.....	57
Tablo 2.16	İlgili süperyatın temel karakteristikleri.....	60
Tablo 2.17	Sıfır emisyon için çabalayan şirketler, sektörleri, hedef yılları ve 2023 itibarıyla metanol ile çalışan gemi siparişleri durumu.....	63
Tablo 2.18	Yakıtların fiyat karşılaştırması için hazırlanan tablo.....	65
Tablo 2.19	Amonyagın özellikleri	67
Tablo 2.20	Çeşitli yakıtların karbon içerik ve yakıt katsayıları.....	90
Tablo 2.21	Muhtelif deniz yakıtlarının özellikleri.....	91
Tablo 2.22	Çeşitli yakıtların fizibilite bakımından karşılaştırılması	91

Denizciliğin Karbonsuzlaştırılması Yol Haritası: Alternatif Yakıtların Karşılaştırılması ve Sürdürülebilirlik Hedeflerine Ulaşmak için Kılavuz Bilgiler

Furkan ÇITAKOĞLU

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Bu literatür taraması çalışmasında, deniz taşımacılığının stratejik önemi vurgulanarak, gemilerin tarih boyunca taşıdığı kritik rolü ve bu süreçteki evrimi derinlemesine incelenmiştir. Sevk sistemlerinin tarih sahnesindeki yolculuğu, içten yanmalı makineler ve geleneksel yakıtların çevresel ve canlı sağlığı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi ile devam etmiş, yakıt pilleri kısa ve öz biçimde mercek altına alındıktan sonra da denizciliğin karbonsuzlaştırılması amacıyla sunulan çözümler alternatif yakıtlar merkeze alınarak tartışılmıştır. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri ve IMO'nun belirlediği net sıfır hedefleriyle uyumlu olma gayesiyle, metanol, amonyak ve hidrojen gibi alternatif yakıtlar detaylı bir şekilde ele alınarak; üretim, dağıtım, depolama, kullanım ve uygulanabilirlik boyutları güncel ve eski kaynaklardan araştırılmış ve derlenmiştir. Çevreci yakıtların mukayesesinin ardından, Türkiye'nin İstanbul ve İzmir gibi önemli deniz şehirleri için önerilerde bulunulmuş, sürdürülebilir deniz turizmine dikkat çekilmiş ve farklı akademik disiplinler arasındaki iş birliğinin önemiyle beraber gelecekteki araştırmalar için çeşitli paydaşların güç birliği yapmasının gerekliliği de öne

ıkarılmıştır. Yakıt ve g retimnin tarihsel gelişim süreçlerine, işletim ve çalışma prensiplerine, yakıtların sahip olduğu özelliklere yer verilen bu çalışma, evre dostu yakıtların ve sürdürülebilir denizcilik uygulamalarının güncel durumu ve gelişim süreçlerini irdelemek için geniş bir kılavuz niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif yakıtlar, karbonsuzlaştırma, metanol, amonyak, sürdürülebilirlik.



Decarbonisation of Shipping Roadmap: Comparison of Alternative Fuels and Guidelines for Achieving Sustainability Targets

Furkan ÇITAKOĞLU

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Naval Architecture and Marine Engineering Program

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

In this literature review study, the strategic importance of maritime transportation is emphasized, and the critical role ships have played throughout history and their evolution in this process are examined in depth. The journey of propulsion systems in history continued with the evaluation of the environmental and health impacts of internal combustion engines and traditional fuels, and then solutions offered for the decarbonization of maritime transportation were discussed, centering on alternative fuels, after a brief examination of fuel cells. In alignment with sustainable development goals and IMO's determined net zero targets, alternative fuels such as methanol, ammonia, and hydrogen are thoroughly scrutinized; their production, distribution, storage, usage, and feasibility aspects are researched and compiled from both recent and earlier scientific sources. Following the comparison of environmentally friendly fuels, recommendations are made for significant maritime cities in Türkiye, such as Istanbul and Izmir, drawing attention to sustainable maritime tourism, and the necessity of collaboration among various academic disciplines for future research endeavors is highlighted. Providing insight into the

historical development processes of fuel and power generation, operational and functional principles, and the characteristics of fuels, this study serves as a comprehensive guide to examining the current status and developmental processes of eco-friendly fuels and sustainable maritime practices.

Keywords: Alternative fuels, decarbonization, methanol, ammonia, sustainability.



1.1 Denizcilik Faaliyetleri

Denizcilik faaliyetleri antik çağlara kadar uzanır. Gemiler, insanlık tarihi boyunca ticaret, ulaşım, keşif ve deniz savaşlarının temel unsuru olarak varlık göstermiştir.



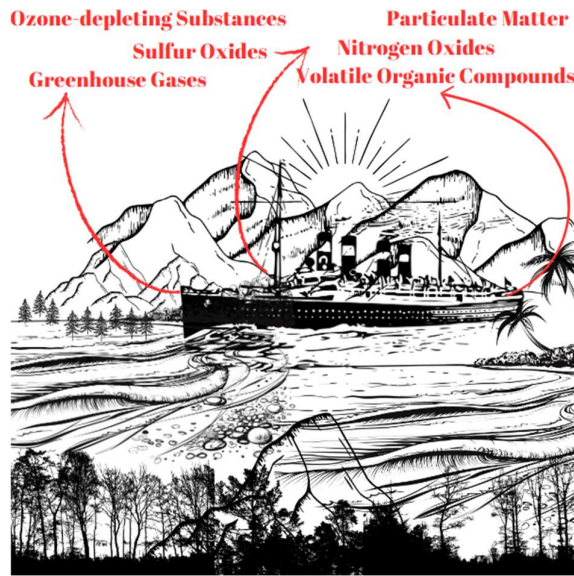
Şekil 1.1 Yukarıdaki Roma Mozaïği M.S. 3.-4. Yüzyıllara tarihlenmektedir. Bir filin gemiye bindirilerek taşınmasını tasvir eden eser denizciliğin ticaret ve taşımacılıkta tarih boyunca önemli yer tuttuğuna dair bir kanıttır[1].

Geçmişte deniz taşımacılığı insan gücüne ve rüzgara dayanmaktaydı. Ancak, teknolojik gelişmeler ve milletlerin üstünlük kurma çabası, daha yüksek verimlilik ve hıza ulaşma hedefleri denizcilik sektöründe önemli düzeyde değişikliklere yol açtı. Bu durum, tekneleri hareket ettirmek için çeşitli mekanik sistemlerin ve yakıtların ortaya çıkmasıyla sürmüştür. Eş zamanlı olarak, insan nüfusu artış göstermiş; ticaret, turizm ve ulaşımın hacmi de genişlemiştir. Böylelikle, limanlar ve sahil kentleri çevresinde yoğun yerleşimler ve deniz trafikleri gözlemlenebilmiştir. Denizcilik faaliyetleri yoğunlaştıkça ve gemiler hızlandıkça, çevre kirliliği ve emisyonlar önemli bir endişe kaynağı haline gelmiş ve doğal yaşamı tehdit etmeye başlamıştır. Denizcilik teknolojisindeki gelişmeler kuşkusuz küresel ticareti ve ulaşımı kolaylaştırmış olsa da, dikkatli bir değerlendirme ve düzenleme gerektiren çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Erik Fridell'in raporunda[2] belirtildiği üzere, denizcilik faaliyetleri, kullanılan motor ve yakıt türüne bağlı olarak NO_x , SO_x , CO_2 , partikül maddeler(PM), organik bileşikler ve eser miktardaki metaller gibi kirletici maddeler yayabilmektedir. Küresel ısınma, çevre kirliliği, iklim değişikliği, buzulların erimesi, hızla artan insan nüfusunun faaliyetlerinin bir sonucudur. W.D. Fletcher ve C.B. Smith tarafından hazırlanan raporda[3] da belirtildiği gibi, küresel ısınma önemli ve ciddi bir sorundur. Bu sorunu çözmek için atılacak en önemli adımlardan biri fosil yakıtların kullanımının

aşamalı olarak durdurulmasıdır. Günümüzde küresel ısınma ve iklim değişikliğinin gözlemlenebilir sonuçları arasında kuraklık, sağlığı tehdit eden yüksek sıcaklıklar ve olumsuz doğa olayları yer almaktadır. Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve küresel ısınmaya en büyük ölçüde sebebiyet veren ülkelerin bu tehdide karşı ortak hareket etmeleri bir zorunluluktur. Yazarlar, karbon salımlarına vergi getirilmesini önermekte ve en kirli yakıtlardan biri olan kömür kaynaklı elektrik üretimine birincil alternatif olarak güneş ve rüzgar enerjisinin devreye sokulmasını savunmaktadır. Günümüzde gemiler, kömürle çalışan buhar makinelerine sahip olmasa da, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunu arttıran fosil yakıtları kullanmaktadırlar.

Tablo 1.1 Denizcilik faaliyetleri sonucu ortaya çıkan kirletici maddelerin dünya geneline vurulduğunda sorumlu olduğu yüzdeleri[4].

Kirletici	Oran
CO ₂	3%
SO _x	13%
NO _x	15%



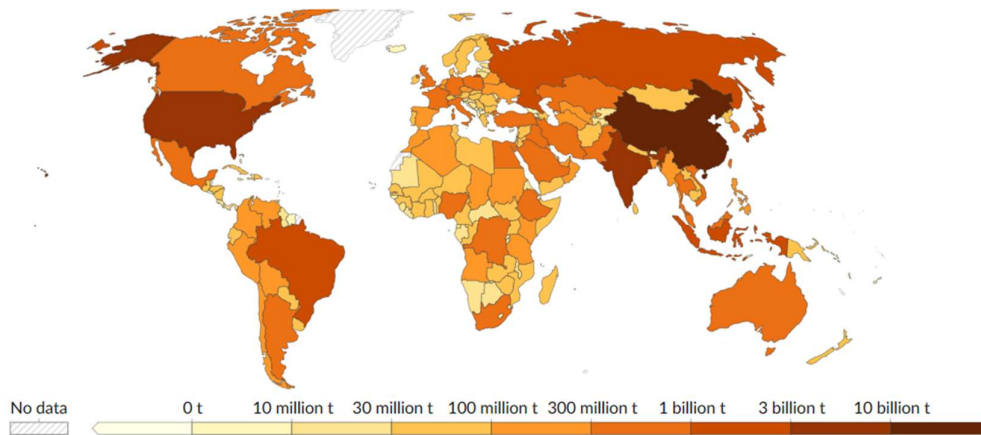
Şekil 1.2 Gemilerden havaya salınan kirletici/toksik maddeler.

Tablo 1.2 Kirletici maddeler, oluşma nedenleri ve açıklamalar. [2]'deki veriler ışığında hazırlanmıştır.

Kirletici	Oluşum Nedeni	Açıklamalar
CO ₂	Yakıt muhteviyatındaki karbon içeriğinin oksidasyonu(yanması).	Sera gazı denilince ilk akla gelendir. 1 kg yakıt yakıldığında 3.1 kg karbondioksit açığa çıkmakta ve havaya salınmaktadır.
SO _x	Yakıt muhteviyatındaki kükürt içeriğinin oksidasyonu.	Deniz yakıtları yüksek miktarda kükürt içerir. SOX emisyonu bu içeriğin miktarı ile doğru orantılıdır.
NO _x	Yüksek sıcaklık ve basınç havadaki oksijen ve azotun birleşerek NO _x oluşturmaya sebep olur.	NO _x emisyonu miktarı makine tasarımından ve yanma sıcaklığından etkilenmektedir.

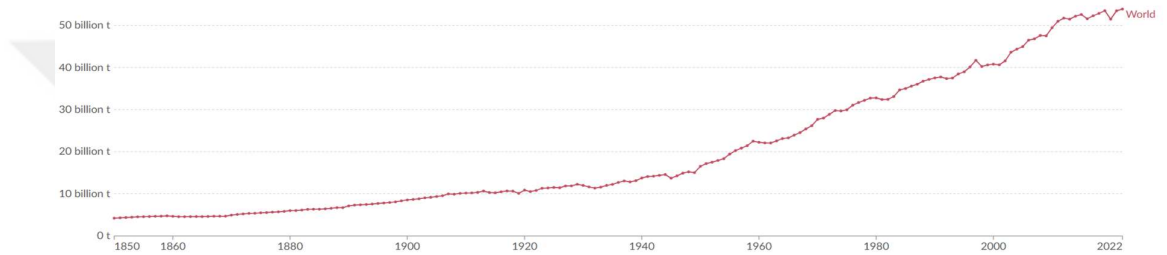
Andersson ve diğerleri[5] yaşam kalitesindeki iyileşme nedeniyle insan nüfusunun sanayi devriminden bu yana istikrarlı bir şekilde arttığını ve bu eğilimin 2050'lere kadar devam etmesinin beklendiğini belirtmiştir. Öte yandan, insanların sürdürülebilir bir yaşamın gereksinimlerine bilinçli biçimde dikkat etmedikleri gibi, fosil yakıtların yakılması da dahil olmak üzere faaliyetleriyle çevreye zarar verdikleri ifade edilmiştir. Yazarlar, denizcilik kaynaklı emisyonların %70'inin kıyılardan 400 km uzaklıkta meydana geldiğinin ve bunun da insan sağlığını olumsuz etkilediğinin altını çizmiştir. Fosil yakıtlar, CO₂'nin birincil kaynağıdır ve atmosferde ısı emici gazların birikmesinin sonucu olarak küresel ısınmaya yol açar[6]. Deniz taşımacılığında yaygın olarak kullanılan geleneksel yakıtlardan biri olan kıvamlı akar yakıt (HFO) viskozdur ve gemi motorlarında verimli bir biçimde kullanılabilmesi için akışkanlık kazanması amacıyla ısıtılması gerekir. HFO, ucuz

ancak çevre açısından tehlikeli bir yakıt seçeneğidir. HFO'dan kaynaklanan NO_x ve SO_x emisyonları asit yağmuru riskine yol açar ve insanlar için potansiyel sağlık tehlikeleri oluşturur[7]. HFO sülfür oksit içeriği bakımından farklılık gösterir; yüksek sülfürlü akar yakıt (HSFO) %3.5'e kadar, düşük sülfürlü akar yakıt (LSFO) en fazla %1'e kadar ve ultra düşük sülfürlü akar yakıt (LSFO) en fazla %1 oranına kadar sülfür içerir. Marine Gas Oil olarak da bilinen ultra düşük kükürtlü akar yakıt (ULSFO) maksimum %0.1 kükürt oksit içeriğine sahiptir[8]. Ham petrolden damıtılan benzin(gasoline), birim hacminde önemli miktarda enerji içerir; ancak karmaşık bir hidrokarbon bileşimi olarak CO_2 , SO_x , NO_x ve diğer emisyonlara yol açan zararlı unsurlar barındırır[9]. MDO gibi diğer yakıtlar, HFO'dan biraz daha düşük emisyonlar sergileyerek özellikle düşük devirli gemi dizel motorlarında kendine yer bulurken, LNG de önemli miktarda CH_4 ile birlikte CO_2 salmaya devam etmektedir[10]. Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) 2018 yılındaki 4. Sera Gazı (GHG) çalışmasına göre, HFO denizcilik faaliyetleri içindeki yakıt payında %79 ile ilk sırada yer almaktadır. Bununla birlikte, Marine Diesel Oil (MDO) ve Liquefied Natural Gas (LNG) kullanımı HFO'ya karşı artan bir eğilim gösterirken, Metanol yukarıda belirtilen yakıt seçeneklerinin ardından 4. yakıt olarak zikredilmiştir. Raporda ayrıca konteynerler, dökme yük gemileri ve petrol tankerlerinin diğer gemi türleri ve kategorilerine kıyasla daha fazla miktarda HFO yaktığı belirtilmiştir. Ayrıca, ana makinelerin ardından yardımcı makinelerin ve kazanların(boiler) gemi işletmeciliğinde birincil enerji tüketicileri olarak tanımlanmıştır[11].



Şekil 1.3 Ülkelerin emisyon oranlarını gösteren 2022 yılına ait görsel[12].

Trevor M. Letcher'ın makalesi [13] 18. yüzyıldan önce hava durumu ve iklimin daha iyi bir denge sergilediğini öne sürmektedir. Çalışma, sera gazlarının gezegenin sıcaklığı üzerindeki doğrudan etkisini vurgulamakta ve CO₂'nin bunlar arasında en yaygın olduğunu belirtmektedir. Ayrıca Letcher, okyanusların ısınmasıyla depolanan CO₂'nin atmosfere salınabileceğini belirtiyor. Letcher, sanayi devriminin başlangıcından bu yana sıcaklıklarda kademeli bir artış gözlemlendiğini de ilave etmiştir.



Şekil 1.4 1850'den sonra sera gazı salımındaki çarpıcı artış[12].

Tablo 1.3 Muhtelif yakıtların özelliklerinin mukayesesi ve salım etkileri[10]

Yakıt	Net Isı Değeri	Spesifik Yakıt Sarfıyatı	Yakıt Emisyon Faktörü (g/kWh)					
	MJ/kg	g/kWh	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO _x	NO _x	PM
LSFO	40.5	179	541	0.01	0.027	3.23	15.8	0.72
MDO	42.6	170	524	0.01	0.026	0.32	14.8	0.16
LNG	48.6	150	412	3.0	0.016	0.003	1.17	0.027
LH2	120	57	0	0	0	0	0	0
Metanol	20	381	522	0	0	0	3.05	0



Şekil 1.5 Küresel ısınma ve iklim değişikliği artan insan nüfusunun bilinçsiz faaliyetlerinin ve fosil yakıtların kullanılmasının sonucudur.

Çevre kirliliğinin ve küresel ısınmanın kök nedeni, denizcilik sektörünün sadece bir parçası olduğu insanoğlunun faaliyetleridir. Ancak denizcilik ve gemi inşa sektörünün çevre üzerindeki etkisi küçümsenemez. Mevcut manzara göz önüne alındığında, normal şartlar altında gelecekte insan nüfusunun artmaya devam edeceği, endüstrilerin genişleyeceği ve ticaret ağlarının daha da büyüyeceği öngörülebilir. Bu gelişmelere paralel olarak, teknolojiye ileri adımlar, alternatif yakıtların ortaya çıkması, enerji verimliliğinin artması ve enerji tasarrufu sağlayan aygıtların kullanılmaya başlanması çözüm olanakları sunmaktadır. Bu bakış açısını geliştirmek için uluslararası kabul görmüş kurallara, standartlara ve yönetmeliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yasaların sadece var olması değil, aynı zamanda şirketler, filo sahipleri ve ülkeler tarafından uyulması esastır. Neredeyse tüm ülkeler tarafından kabul edilen Paris Anlaşması, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir adım olarak 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak küresel sıcaklık artışını bu yüzyıl içinde 1.5°C ile sınırlamayı hedeflemektedir. Ayrıca anlaşma, daha zengin ülkelerin bu hedefi desteklemek için daha yoksul

ülkelere parasal ve teknik yardım sağlamasına yönelik hükümler içermektedir[14][15].

Birleşmiş Milletler'in özel bir birimi olan Uluslararası Denizcilik Örgütü, deniz taşımacılığının gelecekte sürdürülebilir bir ekonominin temel bir unsuru olduğunu kabul ederek ve Birleşmiş Milletler'in 2030 ajandasını sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu hale getirerek, küresel deniz taşımacılığının emniyetini, güvenliğini ve ekolojik etkisini düzenlemek için birincil küresel makam olarak faaliyet göstermektedir[16]. 17 maddeden oluşan ve insan yaşamının çeşitli yönlerini ve çağdaş zorlukları kapsayan Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri(SKH'ler), denizcilik sektörü ve deniz taşımacılığı ile ilişkilendirilebilecek çeşitli noktalara değinmektedir. IMO'nun çevrimiçi ortamda yayınlanan içeriğinde[17] görüldüğü üzere, SKH'ler ile denizciliğin örtüştüğü alanlar aşağıda belirtilmiştir:

- Deniz taşımacılığı, tasarruflu, düşük yakıt tüketimli ve uygun maliyetli bir yöntem olarak küresel ticaretin temel taşlarından birini oluşturmakta ve ihtiyaç sahibi ülkelere hammadde tedariki yoluyla onlara yarar sağlamaktadır. (SKH 1: Yoksulluğa son)
- Kıyılarının çevresinde yoğun bir nüfus yerleşimi izlenebilmektedir. Sağlık tehditlerinin önlenmesi ve bu risklerin hafifletilmesi için IMO tarafından gemilerden kaynaklanan emisyon miktarının keskin bir şekilde sınırlandırıldığı emisyon kontrol alanları ilan edilmiştir (SKH 3: İyi sağlık ve refah)
- IMO, denizcilik için bir karbonsuzlaştırma hedefi belirlemiştir ve yeşil yakıtlar ve verimli enerji uygulamaları üzerine araştırma faaliyetlerini desteklemektedir. (SKH 7: Erişilebilir ve Temiz Enerji)
- Diğer sanayi sektörleri arasında denizcilik sektörü, enerji verimliliğini ve çevre dostu uygulamaları geliştirmeyi amaçlayan küresel kurallara ilk uyum sağlayan sektörlerden biri olmuştur. (SKH 13: İklim eylemi)

IMO, 2030 ve sonrası için denizciliği önemli ölçüde karbonsuzlaştırmayı amaçlayan hedefler öngörmüştür[18]. IMO tarafından MARPOL sözleşmesi kapsamında oluşturulan ECA'lar ve SECA'lar, Baltık Denizi, Kuzey Denizi, Kuzey Amerika Denizi ve Karayip Denizi gibi belirli bölgelerde SO_x, NO_x ve PM emisyonlarını kısıtlamayı amaçlamaktadır. Bu alanlara giren gemiler daha sıkı

emisyon sınırlarına uymak zorundadır, bu da bu bölgelerde seyredirken daha temiz yakıtların kullanılmasını gerektirebilir[19].



Şekil 1.6 Akdeniz'e kıyısı olan ülkeler görünmektedir ve tüm ülkeler Barcelona Sözleşmesi'ne müdahildir. 1 Ocak 2025'ten itibaren, Akdeniz Kükürt Salımı Kontrol Alanı (SECA) olacaktır. Bu karar, gemi yakıtı kaynaklı müsaade edilen azami sülfür/kükürt içeriğinin %0.5'ten %0.1'e düşürülmesini gerektirmektedir[20].

Mevcut denizcilik hizmetlerinin çevresel etkilerine vurgu yapıldıktan ve mevcut durum gözden geçirildikten sonra, denizciliğin tarihi kısaca mercek altına alınacaktır.

1.2 Deniz Sevk Sistemlerinin Geçmişine ve Geleceğine Kısa Bir Bakış

Çeşitli malzemelerden inşa edilen gemiler ve deniz araçları, insanlığın dalgalara yelken açma ve uçsuz bucaksız mavi sularda yolculuk etme arzusunu somutlaştırır. İtici güç olmadan, bu gemiler sadece su üzerinde sürüklenen, yön ve amaçtan yoksun devasa kütlelerdir. Bu nedenle, tarih boyunca çeşitli tahrik yöntemleri kullanılmıştır. İnsanoğlunun daha hızlı ve güvenli seyrüsefer hedefleri, rakip devletler üzerinde hakimiyet kurma yönündeki emperyal arzularla birleşince, hem gemi yapımında kullanılan malzemelerde hem de kullanılan tahrik sistemlerinde önemli değişikliklere neden olmuştur.

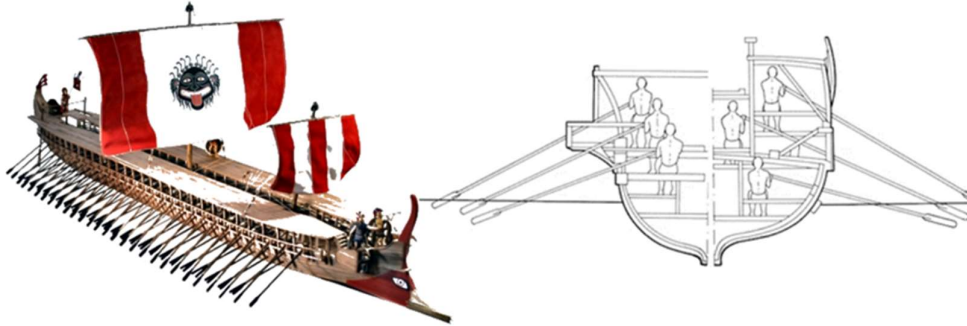
1.2.1 Eski Uygulamalar: Rüzgar & İnsan Gücü

MÖ 6000'li yıllara tarihlenen arkeolojik bulgular, Eski Mısır Uygarlığı'nın, çoğunlukla papirüs sazlarından inşa edilen ve kürekle hareket eden teknelerin bilinen en erken kullanıcılarından olduğunu göstermektedir[21].

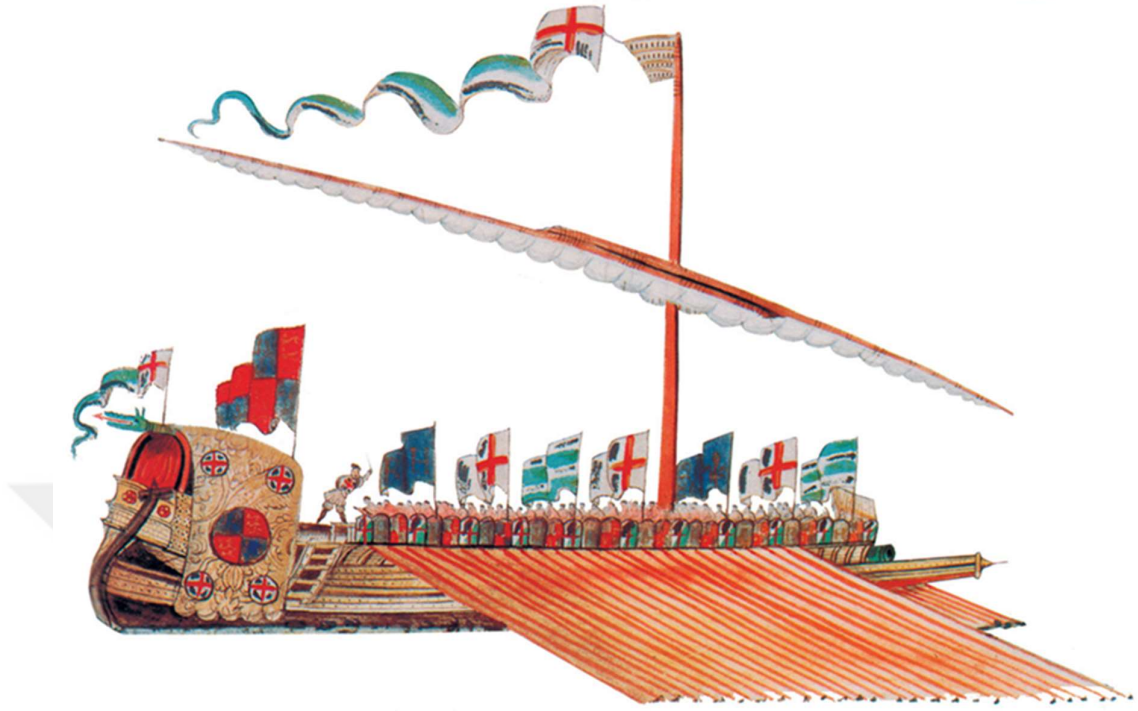


Şekil 1.7 İnsan gücüne dayanarak hareket eden Mısır Uygarlığı'na ait geminin Nil Nehri üzerinde tasviri [22].

İlk olarak ne zaman kullanılmaya başlandığı net olmayan rüzgar gücü, çok eskiden beri insanların dostudur. Yel değirmenlerinin ve su çekmenin yanı sıra rüzgar gemileri hareket ettirmede günümüzde de mevcut olan önemli bir yer kazanmıştır.



Şekil 1.8 Soldaki görsel[23], Antik Atina'lılara ait, MÖ 450'ye tarihlenen 'Andreaia' adlı trireme gemisinin 3D modelidir, mitolojik Gorgon Başı görünen yelkenleri, insan gücüne tabii küreklerle desteklenmiştir. Sağdaki görsel[24], yine bir trireme tipi geminin posta kesitini ve kürekçilerini gösterir.



Şekil 1.9 16.yy bir Akdeniz ülkesine ait Kalyon, rüzgar gücü ve insan gücü birleştirilmiştir. Kürekler ve yelkenler geminin hareket kabiliyetini tesis eder [25].



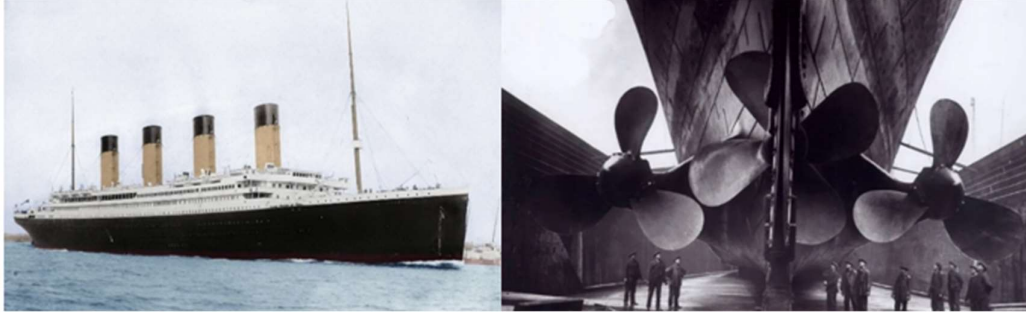
Şekil 1.10 İnşa edildiği 1828’de dünyanın en büyük yelkenlisi olan Osmanlı Muharip Gemisi Mahmudiye[26].

1.2.2 Buhar Gücü, Çarklar, Uskurlu Pervaneler & Kömür

Buhar gücünün kullanılması, hava ve deniz koşulları elverişli olmasa dahi okyanuslarda yolculuk edebilecek güçlü gemilerin önünü açmıştır. Deniz ulaşımında 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanan makineleşme evresinde, tipik olarak gemilerin yanına yerleştirilen uskurlu pervaneleri veya çarkları çalıştırmakla yükümlü pistonlu buhar makineleri ortaya çıkmıştır[27]. Buhar makineleri genellikle çarklarla ilişkilendirilse de, uskurlu pervanelerin daha iyi bir seçenek olarak ortaya çıkması çok uzun sürmemiş ve SS Great Britain 1845 yılında uskurlu pervanelerle hareket eden ilk okyanus gemisi olarak kayıtlara geçmiştir[28]. ABD Donanması'ndan emekli bir deniz subayı olan Thomas J. Cutler'a göre, pervaneleri çevirmek için kazanların ve türbinlerin devreye girdiği buhar gücü döneminde, odunun yakıt kaynağı olarak verimsizliği nedeniyle gemilerdeki buharla çalışan sistemlere güç sağlamak için kömür öncelikli seçenek olarak ortaya çıkmıştır; ancak kömüre bağlı kalmak önemli ölçüde insan işgücü gerektirmiş ve gemide kirlenme ve dağınıklığa yol açmıştır[29]. Robert Taggart 1958 tarihli raporunda[30] 19. yüzyılın başlarında başlayan çarklı gemiler döneminin sona ermekte olduğunu gözlemlemiş; ancak çarklı gemilerin yüksek hızlı motorlar ve uskurlu pervaneler gibi daha gelişmiş tahrik sistemlerine geçişte önemli bir rol oynadığını belirtmiştir.



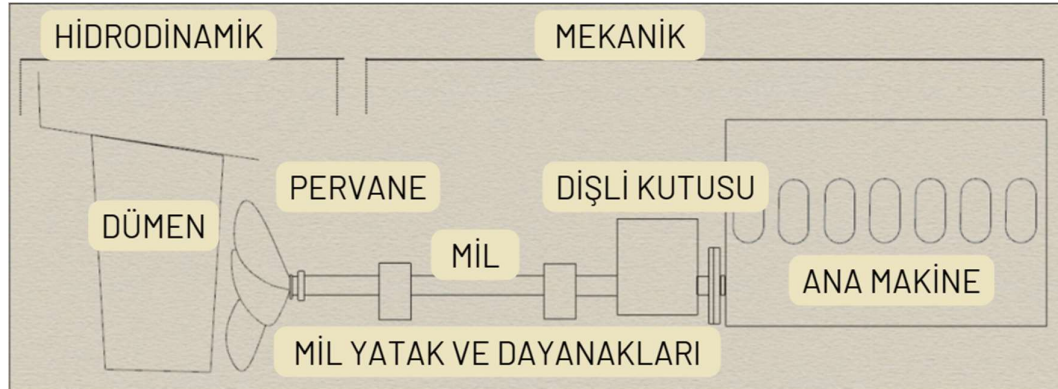
Şekil 1.11 Verimli olmalarına rağmen, hava ve su koşullarına karşı duyarlılıkları dolayısıyla çarkların yerini nihayetinde pervaneler almıştır. Ancak nehirler ve göller gibi iç sularda bir süre daha kullanılmaya devam edilmişlerdir [31].



Şekil 1.12 Zamanında inşa edilmiş en büyük yüzer makine olan 269 metre uzunluğundaki RMS Titanic gemisi, 40.5 mW güç üreten pistonlu buhar makineleri ve yüksek yolcu kapasitesi ile gerçekten de bir devdi. Çıktığı ilk seferde yüzleştiği trajik sonuyla tarihe geçen RMS Titanic adlı gemi 3 kanatlı pervanelere sahipti. [32] Sağdaki resim buhar ve kömürle çalışan Titanic'in pervanelerine yakından bir bakış sağlamaktadır[33].

1.2.3 Çağdaş Gemi Sevki

Çağdaş zamanlarda gemi sevk ve tahriki, çeşitli yakıtlarla beslenen ana makine tarafından üretilen gücün pervanelere asgari kayıpla verimli bir şekilde aktarılmasına dayanır. İtten yanmalı makineler, güç aktarım sistemleri ve pervaneler bu süreçte işbirliği içindedir. Hidrodinamik ve mekanik alt segmentlerden oluşan sistemin basit bir görsel temsili şekil 1.13'te sunulmuştur.

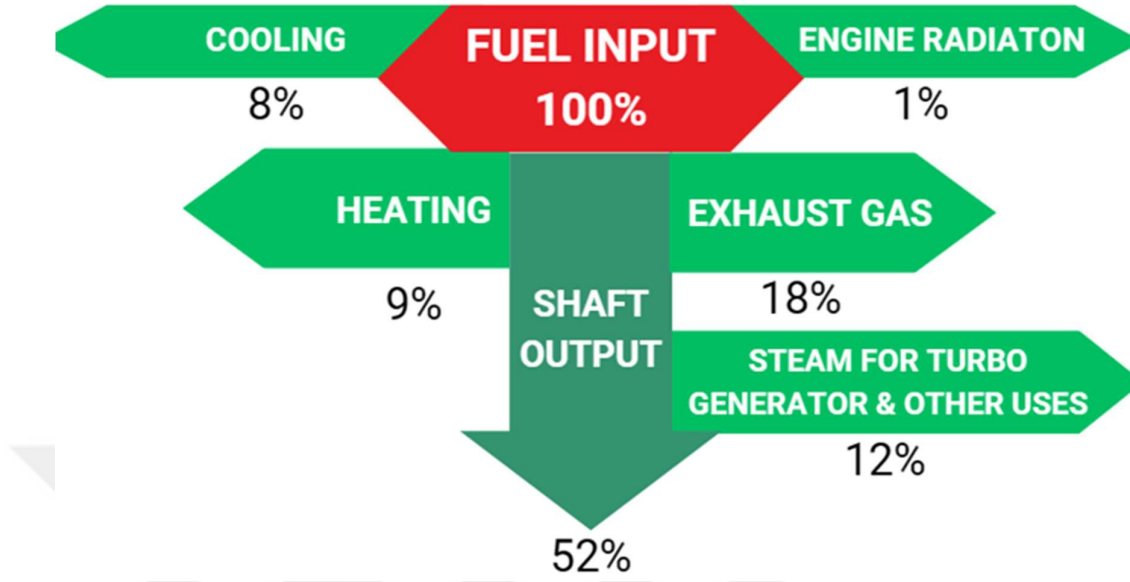


Şekil 1.13 Gemi sevk ve tahrikinin basit şeması. [34] baz alınarak yeniden çizilmiştir.

1.1.3.1 İçten Yanmalı Makineler

ABD Enerji Bakanlığı'nın web sitesinde bulunan makalede[35] açıklandığı üzere makine, mekanik enerji üretmek üzere yakıt ve hava karışımının tutuşması ve yanması için bir ortam işlevi görür. Silindir makinenin statik ve durağan bir elemanıdır, mili ve bu vesileyle pervaneleri döndüren pistonlar ise dinamik ve hareketlidir. İleride alternatif yakıtlarla çalışacağı beklenen içten yanmalı makineler(İYM) günümüzde ekseriyeten dizel ve benzinle çalışmaktadır. Günümüzde içten yanmalı makinelerin gemiler için birincil güç kaynağı olduğu açıktır. Bu makineler, sahip oldukları vuruş(stroke) sayısına göre iki stroklu ve dört stroklu makineler olarak sınıflandırılabilir. Bununla beraber, içten yanmalı makineler ateşleme türlerine göre de sınıflandırılabilir; bu da yaygın olarak dizel motorlar olarak bilinen sıkıştırarak ateşleyen (CI) makineler ile yaygın olarak benzinli makineler olarak adlandırılan kıvılcım(spark) ateşlemeli (SI) makineleri tanımlar. İki stroklu bir makinede iki vuruş bulunur: sıkıştırma ve yanmayı gerçekleştirmek için yukarı doğru bir vuruş ve de emme ile egzoz gazı boşaltımı için aşağı doğru bir vuruş. Buna karşılık, dört stroklu bir makine her bir işlem için ayrı vuruşlara sahiptir. Her çalışma döngüsünün kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır.

Dizel makinelerin gemilere güç sağlamada ön plana çıkmasının nedeni birkaç etmene bağlanabilir: yüksek ısı verimliliği, HFO gibi düşük kaliteli ve kıvamlı yakıtları yakabilme kabiliyeti, dişli kutusu ve kavrama ihtiyacının ortadan kalkması ve daha az sayıda hareketli bileşenlerdir[27]. M. Palocz-Andresen çalışmasında [36] gemi dizel motorlarını büyük, karmaşık ve yüksek verimli makineler olarak tanımlamakta ve büyük ticaret gemilerinin çoğunun, halihazırda deniz üzerinde seyreden gemilerin üçte ikisinin güç ihtiyacını karşılayan iki stroklu gemi makineleri kullandığını belirtmektedir. Daha küçük gemiler ise benzinle çalışan kıvılcım/buji ateşlemeli makineler ile donatılmıştır. Ayrıca, daha yüksek maliyetli gaz türbinleri özellikle harp gemileri veya daha yüksek hızlara erişmek gibi özel amaçları olan diğer teknelerde kullanılmaktadır.



Şekil 1.14 Şekil, yüksek verimli, iki stroklu, düşük devirli gemi dizel makinesinde yakıt girdisinden elde edilen enerji çıktısına bir bakış sunmaktadır. [36]’dan uyarlanmıştır.

Dizel makineler operasyonel devirlerine göre gruplandırılır, büyük iki stroklu makineler düşük devirli makineler olarak kabul edilir, 100 rpm veya daha düşük devirde çalışırlar ve özellikle gemi tahriki için uygundur[37]. MAN Energy Solutions tarafından hazırlanan “Gemi Tahrikinin Temel İlkeleri” başlıklı makaleden[38] dizel çevrimi ve makineleri ile ilgili önemli noktalar şunlardır:

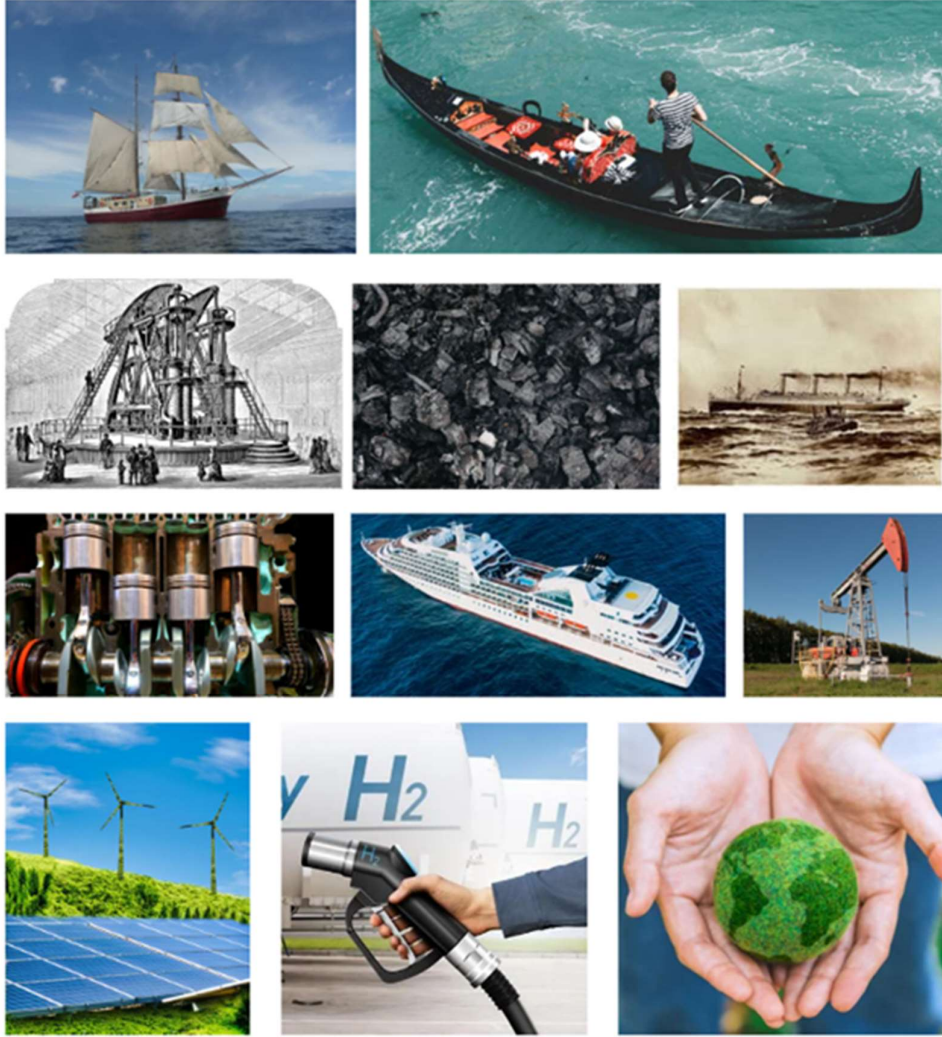
- Dizel çevrimi, operasyon çevrimlerinin arasında en yüksek verimliliği sergiler ve hem iki stroklu hem de dört stroklu prensiplere göre çalışarak yüksek sıkıştırma oranlarına ulaşabilir.
- Yakıt doğrudan yanma odasına enjekte edilir, içerideki hava basınçlandırılır ve vuruş nedeniyle ortamın sıcaklığı yükselir, bu da yakıtın verimli bir şekilde yanmasını kolaylaştırır.
- İki stroklu makineler büyüktür ve yeterince geniş ve yüksek bir yere ihtiyaç duyarlar, iyi bir yakıt ekonomisi sunarlar ve yanmanın silindirin en üst noktasında gerçekleşmesinden mütevellit yüksek performans gösterirler.

Tablo 1.4 Dizel ve benzinli makinenin çeşitli kriterlere göre mukayese edilmesi[37]

	Dizel Makine	Benzinli Makine
Güç Çıktısı	1 kW – 80 mW	1 kW – 6.5 mW
Efektif Verim	%30- %48	%28-%42
Sıkıştırma Oranı	14:1 – 25:1	8:1 – 12:1

1.2.4 Yeşil İtke Gücü

Bir sonraki aşama, mükemmelliğe bir adım daha yaklaşıldığını müjdelemektedir: Gemi makineleri, çevreye zarar vermeyen yeşil yakıtlarla çalıştırılacak ve deniz itki sistemlerinin gelişiminde teknolojik ilerleme ile desteklenen öncü bir evreyi temsil edecektir. Bu evre, sürdürülebilir denizcilik hedeflerine ulaşmada kritik basamaktır. İlerleyen bölümlerde, alternatif deniz yakıtları; hidrojen, metanol ve 1 BHK flat 1200 sqft for rent in ak, ayrı bölümlerde daha detaylı bir şekilde incelenecektir. Enerji verimliliği, maliyet ve çevresel etkiler tüm yakıtlar için önemli kriterlerdir. Ancak, bu konulara geçmeden önce, düşük sıcaklıkta yanma stratejileri (LTCS) ve yakıt pilleri, kısa ve öz bir biçimde değerlendirilecektir. LTCS ve yakıt pillerinin, denizcilikte karbon emisyonlarını azaltmada ve enerji verimliliğini artırmada sağlayabileceği avantajlar, bu teknolojilerin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı potansiyelini kavamak adına incelenecektir.

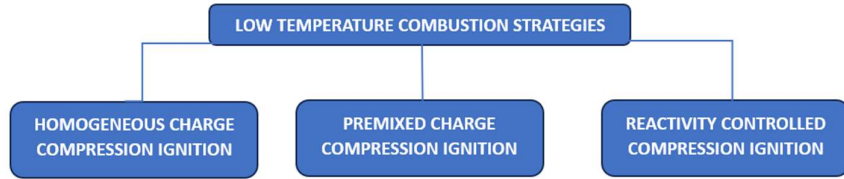


Şekil 1.15 İnsanlığın kat ettiği ilerlemeyi temsil etmektedir.

Bu ilerleme, teknolojik yenilikler ve toplumsal dönüşümlerle desteklenmiştir. Günümüzde ise, çevre dostu ve temiz yöntemlerle yüksek enerji verimliliği elde etmek temel hedef haline gelmiştir. Bu doğrultuda, fosil yakıt bağımlılığını azaltmak, yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmak ve enerji verimliliğini artırmak büyük önem taşımaktadır. Bu adımlar, hem günümüzün ihtiyaçlarını karşılamak hem de gelecek nesiller için sürdürülebilir ve yaşanabilir bir dünya oluşturmak açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, bu süreçte hükümetlerin, özel sektörün ve bireylerin birlikte hareket ederek sorumluluk alması gerekmektedir. Teknolojik gelişmelerin yanı sıra, yenilikçi politikalar ve toplumsal farkındalık da bu dönüşümün başarılı olmasında kilit rol oynamaktadır.

1.2.4.1 Düşük Sıcaklıklı Yanma Stratejileri

Düşük sıcaklıkta yanma (LTC) stratejileri arasında homojen yük sıkıştırılmalı ateşleme (HCCI), ön karışımli yük sıkıştırılmalı ateşleme (PCCI) ve tepkinlik kontrollü sıkıştırılmalı ateşleme (RCCI) bulunmaktadır. LTC, içten yanmalı makinelerde NO_x ve kurum salımlarını azaltmak amacıyla geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşen yanma süreçlerini ifade etmektedir.



Şekil 1.16 Öz Türkçe karşılıkları verilen LTC, HCCI, PCCI, RCCI gibi kavramların kısaltmalarının İngilizce açılımları gösterilmiştir.

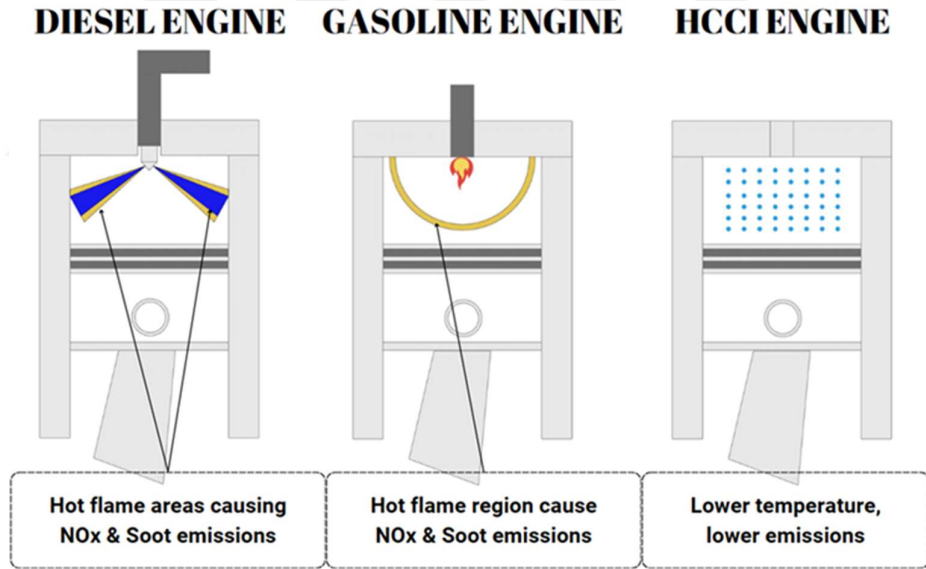
Sandia Araştırma Laboratuvarı'nın web sayfasından[39], elde edilen bilgilere göre, dizel makinelerin olumsuz etkilerini azaltmak için olası bir çözüm düşük sıcaklıkta yanma yaklaşımıdır. NO_x ve kurum/PM salımlarını önlemek için egzoz gazının devridaim ettirilerek yanma odası içindeki ısıнын bir kısmını emmesi, ve de daha iyi bir hava-yakıt karışımını mümkün kılmak maksadıyla yakıtın erken enjekte edilmesi yaklaşımın temelidir. Yakıt-zengin(rich-burn) bölgeleri bertaraf etmeyi ve verimlilik için yakıt-zayıf(lean-burn) yanma amaçlanmaktadır. Yakıt-zengin havanın görece az ve yakıtın fazla, yakıt-zayıf ise havanın görece fazla yakıtın az olduğu silindir içi yük durumudur.

Tablo 1.5 LTC stratejilerinin karşılaştığı sorunlar [40].

LTC Stratejilerinin Sorunları
A. Kıvılcım/buji veya yakıt enjeksiyonu olmadığı için yanmanın yönetilmesi ve başlatılmasında zorluklar. (Sıkıştırılmış hava içinde kendiliğinden yanması.)
B. Motor yükünün sınırlı aralığı ve bu aralığın genişletilmesi ihtiyacı.
C. Isı salım hızının yönetilmesi.
D. Yük dalgalanmaları ve ivmelenme gibi geçişlerde denetim problemleri.
E. Olası hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) salımlarının azaltılması.
F. Farklı yakıtlarla uyumluluğun araştırılması.

- **Homojen Yük Sıkıştırılmal Ateşleme (HCCI)**

Adından da anlaşılabileceği üzere, homojen yk sıkıştırılmal ateşleme, yakıt ve oksitleyicinin homojen bir silindir içi yük oluşturarak tamamen harmanlanmış bir karışım halinde sıkıştırıldığı ateşleme şeklidir. Gan ve diğerlerine göre HCCI, dizelin daha yüksek verimliliği ve benzinin kurumsuz yanması gibi benzinli ve dizel motorların olumlu yönlerini birleştirmektedir[41]. Sharma ve diğerleri tarafından yapılan literatür taramasına göre [42], Otto çevrimine dayalı HCCI yönteminde yakıt, silindir kapaklarına takılan enjektörler aracılığıyla emme stroku sırasında verilirken, hava bir emme plenumu yardımıyla ayrı olarak çekilmektedir. Bu yaklaşım, aynı güç çıktısının daha düşük yakıt sarfıyatı ve emisyonlarla elde edilmesini sağlar. Ancak, kendi kendine tutuşma özelliklerini kontrol edememe, soğuk marş kabiliyetinin zayıf olması ve yük kapasitesinin kısıtlı olması gibi zorluklar bu yöntemin yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir.

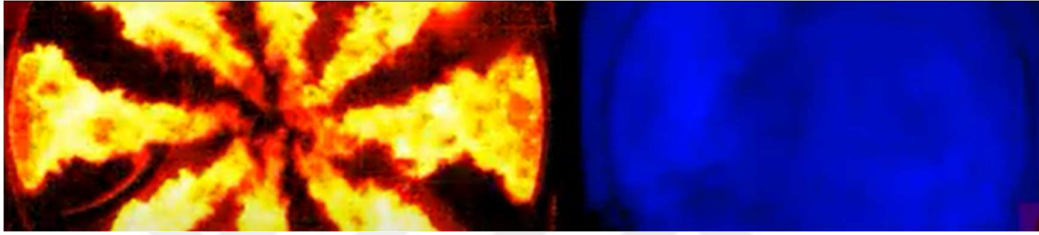


şekil 1.17 Dizel, benzin ve HCCI makinelerin farklarını yansıtan görseldir [43].

Fu ve diğerlerinin hidrojen enerjisi ve yapay zeka kullanarak HCCI teknolojisini araştırdıkları çalışmalarında[44], HCCI makinelerinin çalışmasının, valfler kapalı tutulurken ateşleyici, enjektör veya pşkrtme kullanılmadan yüksek sıcaklık ve sıkıştırma yoluyla kendi kendine tutuşan homojen bir yakıt ve hava karışımını içerdiği belirtilmiştir. Emme sıcaklığı ve basıncı, sıkıştırma ve karışım oranları gibi temel kıstaslar bu süreçte başat rol oynar. HCCI makinede ateşleme eşiği oldukça yüksektir ve bu nedenle motor soğukken marş yapmakta zorlanır. Yakıt zellikleri,

emme sıcaklığı ve basıncı, egzoz gazı devridaim oranları, yük ve hız gibi doğrusal olmayan değişkenlerin yer almasından ötürü HCCI motor işletimi için yapay zeka destekli araçlar önerilmektedir. Ancak, yapay zeka kullanımı için kapsamlı deneysel veriler gereklidir ve her makinenin özgün nitelikleri, her makineye uygun tek bir çözümü mümkün kılmamaktadır.

Yukarıdaki iki çalışmaya dayanarak, HCCI motorunun silindir kapağına takılan enjektörlerle veya enjektörsüz olarak işlev gösterebileceğini ve bunun bir tasarım meselesi olduğunu öğreniyoruz.



Şekil 1.18 Sol tarafta dizel yanma, enjektör tarafından püskürtülen 8 jet yakıt dalgası izlenebilmektedir. Sağ tarafta HCCI yanması, yanmanın öncesinde yakıt buharları hava ile karışmıştır. Görsel [40]'tan alıntıdır.

- **Ön Karışıklı Yük Sıkıştırılmalı Ateşleme (PCCI)**

Bharadwaz ve Kumari tarafından yapılan tarama çalışmasına[45] göre, HCCI ve standart dizel yanması arasında konumlandırılan PCCI kavramının temelinde ateşlemenin geciktirilmesi yatmaktadır ve üst ölü nokta(TDC)'dan önce gerçekleşen tutuşma, daha da geciken tutuşmadan daha avantajlıdır. Bu strateji emisyonları düzenleme ve termal verimliliği sürdürme kabiliyetini artırır. Daha yüksek makine devirlerinde PCCI yanmasını sürdürmek için motor gazı devridaim oranını artırmak çok önemlidir. Alternatif yakıtlar PCCI yanma verimliliğini artırarak emisyonları azaltabilir. Sayısal olarak simüle edilmiş optimize enjeksiyon stratejileri ve oksijenli yakıt karışımları ise daha da düşürebilmektedir. Yazarlar, zorluklara rağmen, yöntemin uygun yakıtların hassas motor parametre kontrolü ile birleştirildiğinde emisyon kontrolü için önemli bir seçenek olduğunu ileri sürmektedir. Pachinannan ve diğerlerinin derleme makalesinde[46] HCCI motora ilişkin dezavantajların araştırmacıları yeni konseptler keşfetmeye yönelttiği ifade edilmektedir. PCCI konsepti, geleneksel dizel motorlara kıyasla daha düşük NOx ve kurum emisyonları sergilemektedir. Ancak, anılan emisyonlar hala HCCI

motorlarkini aşarken, PCCI HCCI'dan daha az hidrokarbon ve karbon monoksit salmaktadır. Derlemede açıklandığı üzere, dizel motorlarda ön karışimli yanma aşaması süreci başlatmakta, bunu NOx ve PM emisyonlarına önemli ölçüde katkı yapan difüzyon fazı (kontrollü yanma) takip etmektedir. kritik bir rol oynayan ön karışimli yükün uzun yanma süresi, ateşleme gecikmesini artırmak için sıkıştırma önce silindire yakıt eklenmesiyle elde edilir.

- **Tepkinlik Kontrollü Sıkıştırma Ateşleme (RCCI)**

Wisconsin Mezunları Araştırma Vakfı'nın web sitesinde çevrimiçi olarak yayınlanan genel değerlendirmede[47] alınan bilgilere göre, aynı anda hem verimliliği korumak hem de NOx emisyonlarının ve kurum formasyonunun üstesinden gelmek zorlu bir meseledir. Zararlı emisyonları azaltmak için makineleri arıtma sistemleriyle donatmak maliyetlidir ve yakıt tüketimini olumsuz etkileyebilir. Wisconsin-Madison Üniversitesi'nden Profesör Reitz ve meslektaşları bu sorunu çözmek için bir yanma stratejisi önerdiler. Düşük reaktiviteye sahip bir yakıt önce silindire verilir, hava ve sirküle edilen egzoz gazı ile makul bir karışım oluşturduktan sonra yüksek reaktiviteye sahip diğer yakıt bir veya birden fazla enjektör aracılığıyla doğrudan enjekte edilir. Bu yaklaşıma “ Tepkinlik Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Yanma (RCCI)” adı verilmiştir, çünkü kendi kendine tutuşma ve tepkinlik özellikleri yanmanın gelişimi ve süreğenliğinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Splitter ve diğerlerinin çalışmasında[48] bildirildiği üzere, RCCI yöntemi, çift yakıtlı(dual-fuel) işletim için uyarlanmış bir heavy-duty dizel test makinesinde en yüksek toplam verimliliği %59 seviyesinde göstermiştir. Burada, hacimce %85 etil alkol ve %15 benzinden oluşan bir karışım olan E85, port yakıt enjeksiyonu yoluyla verilen düşük reaktif yakıt oldu. %3 oranında Etilheksil-Nitrat ve benzin içeren yüksek reaktif yakıt karışımı ise doğrudan enjekte edilen reaktif yakıt karışımı olmuştur.

- **Düşük Sıcaklıklı Yanma Stratejilerinin Mukayesesi**

Gupta ve Krishnasamy nispeten yeni olan söz konusu yanma stratejileri üzerine önemli bir çalışma yürütmüştür. Araştırmalarında[49] bu stratejileri alternatif yakıtların kullanımını da içerecek şekilde karşılaştırmışlar ve konvansiyonel yakıtların tek başına yeterince iyi performans gösteremeyeceğini belirterek bu

durumun önemini vurgulamışlardır. Çalışmada, test için gerekli tadilatlardan geçirilen tek silindirli zirai bir dizel motor kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen temel bulgular şunlardır:

- HCCI, PCCI ve RCCI gibi tüm düşük sıcaklıkta yanma yöntemlerinde ortak bir dezavantaj, sınırlı çalışma yükü aralığının beraberinde ateşleme zamanlamasının kontrol edilmesinin getirdiği zorluklardır. Ancak RCCI ötekilere nazaran daha geniş bir yük aralığında çalışma potansiyeline sahiptir.
- Tüm LTC yöntemleri daha düşük NO_x ve duman salımı sergilerken, geleneksel dizel yanmasına kıyasla daha yüksek yanmamış hidrokarbon açığa çıkarmıştır. Ek olarak, termal verimlilikleri geleneksel dizel yanmasınıninkini aşmıştır.

LTC yanma sistemlerinin ilginç potansiyelleri ile aktif bir araştırma ve geliştirme alanı olduğu yorumu yapılabilir.

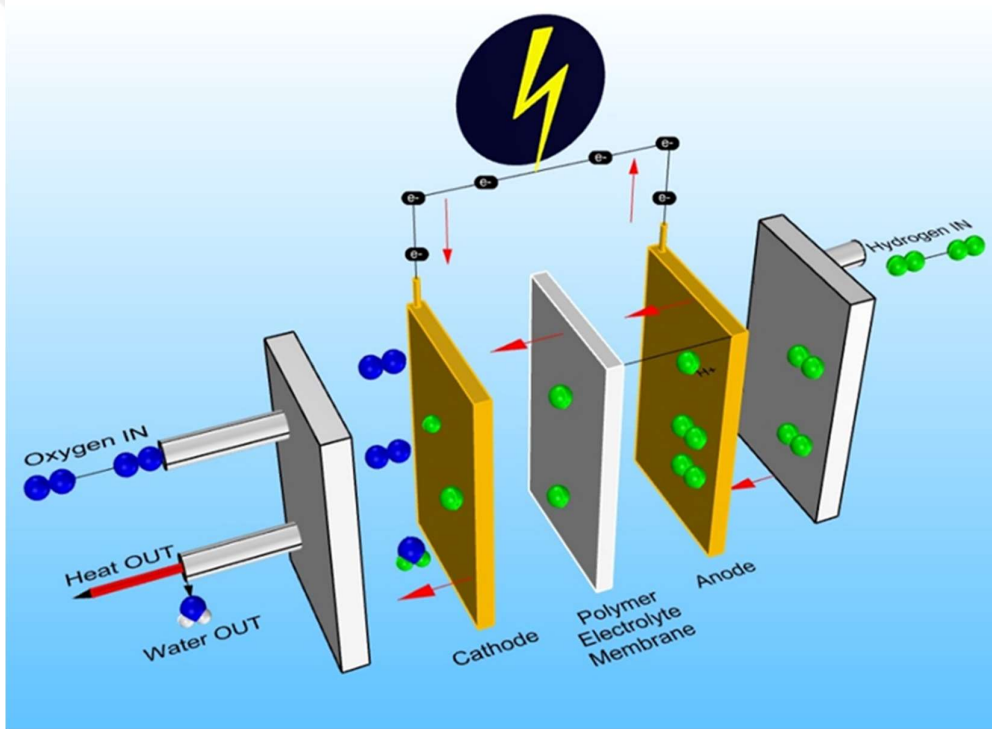
1.2.4.2 Yakıt Pilleri (Fuel Cell)

Yakıt pilleri, geleneksel makinelerin yerini almaya aday, gelecek vaat eden bir alternatif olabilir. Yakıt pilleri hidrojen ve oksijeni elektrik, ısı ve suya dönüştürür. Günümüzde belli bir popülerlik kazanmış olsa da, yakıt pillerinin tarihi 1838 yılına kadar uzanmaktadır ve ilk keşfeden kişi konusunda belirsizlik vardır. Ancak, 1933 yılında, hidrojen ve oksijen kullanan bir yakıt pili ile elektrik üretiminin, daha sonrasında Alkali Yakıt Hücreleri üzerinde çalışacak olan Thomas Francis Bacon tarafından başarıldığı bilinmektedir[50]. Kullandıkları elektrolit türüne göre kategorize edilen ve istifler halinde yapılandırılan yakıt pilleri hidrojen, alkoller veya hidrojen bakımından zengin hidrokarbonlarla beslenebilirken, termodinamik olarak ne kadar verimli oldukları Gibbs serbest enerjisindeki değişimin toplam entalpideki değişime oranıyla cevaplanabilir[51]. İyonların (anyonlar ve katyonlar gibi elektrik yüküne sahip atomlar veya moleküller) geçişine izin veren ancak elektron iletimine izin vermeyen bir ortam olan elektrolit, iki platin plaka arasında yer alır[52].

Tablo 1.6 [52]'den edinilen bilgilere göre oluşturulan reaksiyon tablosu.

Olay	Tepkime/Eşitlik
H ₂ moleküllerinin anot üzerinde ayrılması	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
O ₂ 'nin katotta h ⁺ ve e ⁻ almasıyla su oluşumu	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
Net reaksiyon	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{ISI} + \text{e}^-$
Elektrik üretimine işaret eden Gibbs serbest enerjisi	$\Delta H = T \Delta S + \Delta G$

ABD Enerji Bakanlığı, yakıt pillerini bir wattan megavatlara uzanan güç sağlamak konusunda yüksek kapasiteli olarak tanımlamaktadır[50].



Şekil 1.19 Bir yakıt pilinin çalışma prensibinin görselleştirilmesi. Çizim, [53]'teki veriler ve şekiller temel alınarak yeniden oluşturulmuştur.

Birçok yakıt pilinin tasarımında temel ilkeler ortaklık gösterir; ancak bu piller kullanılan yakıt türüne, çalışma sıcaklığına ve elektrolitin kimyasal özelliklerine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir[54]. Polimer elektrolit membran yakıt pilleri olarak da bilinen proton değişimli membran yakıt pillerinin (PEMFC) literatürde önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Polimerik membran teknolojisinin ortaya çıkışı, uzak ve elverişsiz alanlarda enerji sağlama ihtiyacına binaen olduğu düşünülebilir. Bu gelişme, altmışlı yılların ortalarında ABD

Donanması'nın elektronik departmanı ile işbirliği içinde bir araştırma programı için yakıt hücresi üzerinde çalışırken başarıyı yakalayan General Electric Company'ye mal edilebilir[50]. Öncelikli odağı ulaşım ile ilişkili olan ve geleceğin enerji tedariki için parlak bir potansiyele sahip olan PEMFC'nin temel bileşeni, Membran Elektrot Düzenegi (MEA) olarak adlandırılan anot ve katot arasında yer alan polimer elektrolit membran ve elektrotlarda bulunan katalizör, mikro gözenek ve gaz difüzyon katmanlarıdır. Ayrıca, hidrojen gazı, metanol veya etanolden ziyade PEMFC'ye yakıt sağlamak için daha uygun bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır[55]. Düşük sıcaklıklarda yakıt safsızlığına karşı düşük tolerans göstermenin yanı sıra, bir PEMFC'de su dengesini korumak zorlu bir iş haline gelebilir. Bu süreci kolaylaştırmak için 65-85°C sıcaklık aralığı gereklidir. Bu aralıkta, nem seviyesi katı polimer membranın proton transferine izin vermesi için yeterli nemi sağlarken aynı zamanda gaz difüzyon gözeneklerinin kuru kalmasını sağlamalıdır[56], [57]. Yüksek proton iletkenliğini sağlamak, yakıt çaprazlamasını en aza indirmek, güvenli mekanik bütünlüğü sağlamak, malzemeleri ve kalınlığı akıllıca seçmek ve minimum masrafla kimyasal ve termal olarak kararlı bir duruma ulaşmak bir PEMFC için temel kriterlerdir[58].

Bir diğer önemli yakıt pili türü ise, ısı motorlarına karşı sahip oldukları üstün elektriksel verimlilikleri ve 600-1000°C çalışma sıcaklık aralığındaki atık ısı geri kazanım kabiliyetleri ile bilinen Katı Oksit Yakıt Pilleri (SOFC), 1937 yılında İsviçreli bilim insanları Emil Bauer ve Hans Preis'in öncülüğünde elektrolit olarak zirkonya seramik, katot olarak Fe_3O_4 ve anot olarak karbon (C) içeren bir yakıt pili olarak tarihe geçmiştir[59]. Molaeimanesh ve Torabi'nin 'Yakıt Pili Modelleme ve Simülasyonu' kitabında belirtildiği gibi, katı oksit yakıt pilinde iletilen iyonun H_2 yerine O_2 olduğunu belirtmek önemlidir. Metanol ve doğal gaz gibi herhangi bir hidrokarbon, her ikisi de reformasyon yoluyla hidrojen ve CO'ya dönüştürülerek yakıt kaynağı olarak kullanılabilir. Diğer yakıt hücresi türlerinde bulunan benzer sistemleri içermesinin yanı sıra, SOFC sistemi ayrıca birkaç alt sistemden oluşur. Bunlar arasında anotta mekanik stresi önlemek için gelen yakıtı önceden ısıtmak üzere tasarlanmış bir yakıt işleme ünitesi, kullanılmayan yakıtın yakılması için bir son yakıcı, SOFC'nin DC çıkışını AC akımına dönüştürmek için bir voltaj düzenleme alt sistemi ve hücre sıcaklığını, kütle akış hızlarını, basıncı ve diğer

kritik parametreleri izlemekten sorumlu bir kontrol ve izleme sistemi bulunmaktadır. SOFC'ler bir istif oluşturmak için seri olarak birbirine bağlanır[60].

Erimiş karbonatlı yakıt pilleri (MCFC) denizcilik uygulamaları için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. İlk kez 1960'larda ortaya çıkan bu yüksek sıcaklık yakıt pili çeşidi, ilk prototipi geliştiren Hollandalı bilim insanları G.H.J. Broers ve J.A.A. Ketelaar'a atfedilebilir. MCFC'ler özellikle büyük ölçekli enerji üretimi ve durağan tesis uygulamaları için daha uygundur[61]. İbrahim Dinçer ve Yusuf Biçer, erimiş karbonatlı yakıt pillerinin 600°C'yi aşan sıcaklıklarda çalıştığını ve çeşitli yakıtları doğrudan hidrojene dönüştürebildiklerini belirtmektedir. Elektrolit kalitesini artırmak için kullanılan az miktarda “gibi eriyik tuzların bir karışımından oluşurlar. Yazarlara göre, MCFC'ler düşük emisyon, yüksek verimlilik ve bir dizi yakıt seçeneği gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, korozyon riskleri, daha kısa kullanım ömrü, yavaş oksijen redüksiyon kinetiği, düşük güç yoğunluğu ve yüksek maliyetler gibi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir[62].

İngiliz mucidine atfen “Bacon yakıt hücresi” olarak da anılan Alkali Yakıt Hücreleri (AFC), elektrolit olarak potasyum hidroksit kullanmaları ve kayda değer verimlilikleriyle bilinir; ancak saf hidrojene ihtiyaç duyarlar[63]. Tarihsel olarak uzun bir geçmişe sahip olan AFC, platin yerine daha ucuz ve daha uzun ömürlü nikelin kullanılmasına olanak sağlar; ancak diğer taraftan, elektrolitte katı maddelerin oluşmasına neden olan CO₂ toksisitesi sorunu çok saf H₂ kullanımını gerektirir, bu da onları istasyon/tesis benzeri durağan uygulamalar için daha uygun bir seçenek haline getirir[64].

PEMFC'nin bir varyasyonu olan doğrudan metanol yakıt hücreleri (DMFC) yakıt olarak metanol kullanır; yapısı itibarıyla düşük yakıt maliyeti, kolay taşıma ve bakım gibi birçok faydalı özelliğe sahiptir; ancak metanol çaprazlaması (yakıtın hücrenin yanlış tarafında reaksiyon vermesi kaynaklı elektrik üretmemesi), yüksek ekipman fiyatları, sıcaklıkla ilgili kısıtlamalar gibi dezavantajları da vardır[65].

ABD Enerji Bakanlığı'nın 2019 pazar raporuna göre[66], yakıt pili/hücreleri ve hidrojen teknolojileri giderek artan bir ilgi görmektedir. Kara, demiryolu ve deniz taşımacılığı bu ilginin başlıca paydaşlarıdır. Hidrojen, çeşitli sektörlerde temiz ve çevre dostu bir yakıt olarak kabul görmektedir. 2016-2019 yılları arasında, yakıt hücrelerinin güç kapasitesi münferit anlamda artmıştır. Kasım 2019 itibariyle, IPHE ülkelerinde yakıt ikmalini kolaylaştıran hidrojen istasyonları ağı sayesinde yakıt pili ile çalışan binlerce otomobil, otobüs ve kamyon bulunmaktadır.

DNV tarafından hazırlanan bir rapora göre[67], hidrojenin kimyasal enerjisinin elektriğe dönüştürülmesi söz konusu olduğunda yakıt pillerinin kullanımı ilk akla gelen konudur. Öte yandan, önemli yatırım gereksinimleri, yakıt hücresi kurulumlarının boyut özellikleri ve öngörülen operasyonel süreleri ile ilgili güçlükler büyük önem taşımaktadır. Yakıt pillerinin denizcilik sektöründe maliyet etkin bir şekilde öne çıkabilmesi için teknolojide büyük ilerlemeler kaydedilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi gerekmektedir.

Tablo 1.7 Farklı yakıt pili türlerinin geniş ölçekli karşılaştırması ve denizcilik uygulamaları için cazibe dereceleri. Veriler PEMFC, SOFC ve MCFC'nin en uygun seçenekler olduğunu göstermektedir. Tablo[68] 'den uyarlanmıştır.

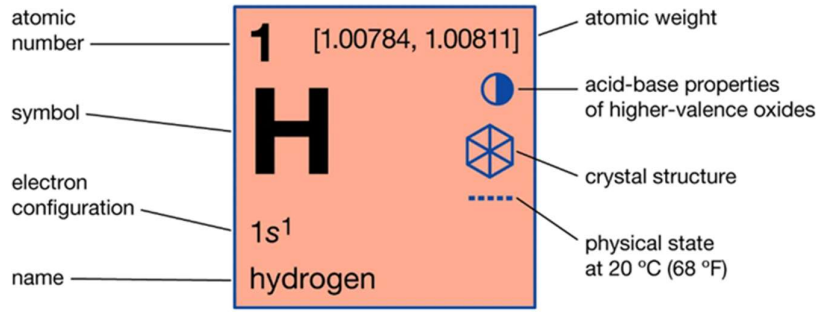
TYPE	Cost Comparison	Modular Power Range (kW)	Lifetime	Fuel	Size	Emissions	Efficiency	Materials			Electrochemical Reactions		Attractiveness Rank
								Anode	Cathode	Electrolyte	Anode	Cathode	
Alkaline fuel cell	Low	≤500	Moderate	Pure H ₂	Small	-	50-60 %	nickel	silver	potassium hydroxide	$2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$	5
Phosphoric acid fuel cell	Moderate	100-400	Excellent	LNG, MeOH Diesel, H ₂	Large	CO ₂ , NO _x	40 % 80 % (WHR)	platinum-carbon	platinum-carbon	phosphoric acid	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	6
Molten carbonate fuel cell	High	≤500	Good	LNG, MeOH Diesel, H ₂	Large	CO ₂ , NO _x	50 % 85 % (WHR)	nickel alloy	nickel oxide-lithium	molten carbonate salt	$2H_2 + 2CO_3^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^-$	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$	4
Solid oxide fuel cell	High	20-60	Moderate	LNG, MeOH Diesel, H ₂	Medium	CO ₂ , NO _x	60 % 85 % (WHR)	nickel alloy	lanthanum strontium manganite	porous ceramic material	$2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$	$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$	3
PEMFC	Low	≤120	Moderate	LNG, MeOH Diesel, H ₂	Small	-	50-60 %	platinum	platinum	water-based polymer membrane	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	1
High Temperature PEM	Moderate	≤30	-	LNG, MeOH Diesel, H ₂	Small	CO ₂ , NO _x	50-60 %	platinum	platinum	mineral acid-based polymer membrane	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	2
Direct methanol fuel cell	Moderate	≤5	Moderate	MeOH	Small	CO ₂	20%	platinum-ruthenium	platinum-ruthenium	water-based polymer membrane	$2CH_3OH + 2H_2O \rightarrow 12H^+ + 2CO_2 + 12e^-$	$3O_2 + 12H^+ + 12e^- \rightarrow 6H_2O$	7

2.1 Hidrojen

“Hidrojen” terimi “hidro” ve “gen” sözcüklerinden türemiştir ve “su oluşturan” anlamına gelmektedir. Hidrojen Robert Boyle tarafından 1671 yılında keşfedilmiş ve 1766 yılında Cavendish tarafından bir element olarak tanınmıştır[69]. Hidrojen oda sıcaklığında bir gaz hâlinde bulunur, renksiz ve kokusuzdur ve tüm gazlar arasında en düşük ağırlığa sahiptir. Uygulama alanları çok çeşitlidir ve pek çoğu onu gelecek için ümit veren bir yakıt olarak görmektedir. Tıpkı elektrik gibi hidrojenin de bir enerji taşıyıcısı olduğunu, çeşitli kaynaklardan üretilen enerjinin çeşitli pratik uygulamalara aktarılmasını ve dönüştürülmesini kolaylaştırdığını, fosil yakıtlar dışında yegane enerji depolama seçeneği olarak düşünülebileceğini ve bu nedenle 1970'lerin başlarında hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak potansiyelinin ulaşım, kimyasal sentez ve metalürjik uygulamalar dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için araştırıldığını belirtmekte fayda vardır[70]. Hidrojen ayrıca, geniş çaplı kullanımlar için bir hammadde ve kimya endüstrisinde gübre, amonyak, metanol, plastik ve çelik üretimindeki yerinin yanı sıra, yakıt rafinasyonunda da kullanılmaktadır. İçten yanmalı makinelerde (İYM/ICE) ve yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılabilmesi nedeniyle ulaşım dâhil olmak üzere çeşitli sektörlerde önemli bir potansiyele sahiptir. Hidrojen, gaz türbinlerini ve yakıt pillerini besleyerek enerji üretiminde ve de evsel ve endüstriyel ısı ihtiyaçlarını karşılamada önemlidir[71]. Hidrojen evrende en bol bulunan elementtir; güneşte, yıldızlarda ve de hidrojenden oluşan Jüpiter gezegeninde bulunmaktadır.

ABD'de üretilen hidrojenin %95'inin doğal gazdan dönüştürüldüğü(reformasyon) belirtilmiştir[72]. Uluslararası ölçekte, hidrojenin yalnızca %2'si elektroliz yoluyla üretilirken, baskın hammadde kaynağı %76 ile doğal gazdır; kömür gazlaştırma ise %22'lik bir paya sahiptir[73]. Bu nedenle, kullandığımız hidrojenin büyük bir kısmı doğal gazın buharla ısıtılmasıyla üretilir ve sonuçta hidrojen ve karbon monoksit karışımı elde edilir. Bu karışım daha sonra saf hidrojen elde etmek için ayrıştırılır. Alternatif olarak hidrojen, elektroliz yoluyla da üretilir; bu, suyu bileşenlerine ayırmak için elektrik kullanımını içeren bir süreçtir.

Hydrogen



Other nonmetals	Gas
Hexagonal	Equal relative strength

© Encyclopædia Britannica, Inc.

Şekil 2.1 Hidrojen'in kimyasal özellikleri, Encyclopedia Britannica'dan alıntıdır.

Tablo 2.1 Hidrojen elementlerinin özellikleri [74]–[76].

Atom Numarası	1
Erime Noktası	–259.16 °C
Kaynama Noktası	–252.879 °C
Yoğunluk (g/cm^3)	0.000082
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	120
Üst Isıl Değer (MJ/kg)	142
Kendiliğinden Tutuşma Noktası	536 °C

Hidrojen ekonomisinin uygulanabilirliğini sağlamak için geliştirilmesi gereklidir. Yaşam döngüsünün arkasındaki mantığın basitliğine rağmen, özellikle hidrojenin gelecekte doğal gazın yerini alması amaçlanıyorsa, çözüm bulunması gereken güçlükler bulunmaktadır. Buna ek olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen temiz elektrik ile gerçekleştirilen hidrojen üretiminde önemli bir artış gerekmektedir.

Royal Society of Chemistry'de yayınlanan bir rapor[77] günümüzde kullanılan hidrojenin %96'sının fosil yakıtlardan kaynaklandığını vurgulayarak hidrojen üretim yöntemlerini tartışmaktadır. Araştırılan yöntemlerden biri, metan ve suyun ısıyı soğuran bir işlem vasıtası ile hidrojen ve CO₂'ye dönüştürüldüğü metan reformasyonudur. Kuru reformasyon olarak bilinen bir başka yaklaşım ise metan ve CO₂'den hidrojen üretmek için 750°C gibi yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadır. Rapor ayrıca, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanabilen bir süreç olan suyun elektrolizinin taşıdığı potansiyelin altını çizmektedir. Bu süreç, enerjinin hidrojen formunda depolanmasına işaret ettiği için özellikle değerlidir ve değişen doğal koşullara bağlı olmaları nedeniyle yenilenebilir kaynaklardan elde edilen değişken enerji çıktısı için bir çözüm olabilir.

Tablo 2.2 Hidrojen üretiminin çeşitli yöntemleri [77]'deki verilere dayanarak emisyon ve maliyet yönünden değerlendirilmiştir.

Yöntem	Yönetici Tepkime	CO₂ Salımları (Gram/kWh)	Maliyet (ABD \$/kg)
Metan Reformasyonu	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ (1) $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (2)	270	0.91–1.69
Dizel Yakıt	-	277	-
Kuru Reformasyon	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ @750 °C	-	-
Su Elektrolizi	$\text{H}_2\text{O} + \text{Akım} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	Elektrik yeşil kaynaklardan sağlandıysa yoktur.	3.56– 9.08 (yel) 3.34–17.3(güneş)

Metan reformasyonu verimli ve oturmuş bir yöntem olmakla birlikte, karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri başarılı bir şekilde uygulanmadığı sürece istenmeyen CO₂ emisyonlarına neden olmaktadır. Öte yandan, çeşitli

elektroliz yöntemleri şu anda geliştirilme aşamasındadır ve her birinin kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, Alkali su elektroliz yöntemi nispeten uygun fiyatlarla endüstriyel kullanım için mevcuttur; ancak, daha düşük çalışma akımı yoğunluğu, hücre verimliliği ve gaz çapraz geçişi gibi kendi sorunlarını içerir[78].

2.1.1 Hidrojen Depolama

Hidrojenin depolanması, üretilmesini müteakip karşılaşılan zor hadisedir. Üretilen hidrojeni sonraki kullanım için güvenli ve verimli bir şekilde hazır tutmak çok önemlidir. Paul Breeze, Power System Energy Storage Technologies kitabının 8. bölümünde hidrojeni depolamak için kullanılan farklı yöntemlerin artı ve eksilerinden bahsetmiştir. Hidrojenin kütle biriminde yüksek, hacim biriminde düşük bir enerji yoğunluğuna sahip olduğu ve dolayısıyla sıkıştırılması gerektiği belirtilmiştir. Hidrojenin 350-700 bar civarında sıkıştırılması ve çelik ya da kompozit konteynerlerde depolanmasının özellikle küçük ölçekli sistemler için daha uygun olduğu belirtilmiştir. Hidrojenin çok düşük sıcaklıklarda (-263°C 'nin altında) sıvı olarak depolanması seçeneği de dile getirilmiş, ancak bunun sistemin bakımı için ek maliyetlere neden olacağı belirtilmiştir. Hidrojen adsorpsiyonu, metal hidritlerle interkalasyon ve yeraltı depolama mağaraları gibi başka alternatifler de araştırılmıştır. Son alternatif, daha büyük ölçekli depolamayı mümkün kılacak ve hidrojen ekonomisinin gelişimine katkıda bulunabilecek bir yöntem olarak gösterilmiştir[79].

Önümüzdeki yıllarda Norveç'in denizcilik sektöründeki hidrojen talebinin karşılanmasına yönelik bir strateji oluşturmayı ve yakıt ikmal olanaklarıyla altyapısını geliştirmeyi amaçlayan Ocean Hyway Cluster tarafından hazırlanan bir rapora[80] göre, sıkıştırılmış hidrojen (CH_2) hem ekonomik hem de teknik açıdan optimal seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Ancak bu, geminin gerekli bileşenlerle uygun şekilde donatılabilmesi koşuluna bağlıdır. Sıvı hidrojen (LH_2), boyut ve yakıt ikmal süresi kısıtlamaları nedeniyle CH_2 'nin uygun olmadığı senaryolar için düşünülmektedir.

2.1.2 Hidrojen Kullanımı

Bir sonraki adım, depolanan H_2 'yi faydalı işe dönüştürerek kullanmaktır. Günümüzde gemilerin çoğu içten yanmalı makinelerle çalışmaktadır. Bu nedenle

hidrojenin İYM ile donatılmış gemilerde yakıt olarak kullanılması olasılığını göz önünde bulundurmak faydalı olacaktır. Bir yakıt olarak hidrojen üç farklı kullanım alanına ayrılabilir: birincil yakıt olarak, çift yakıtlı(dual-fuel) bir sistemin parçası olarak ve yakıt katkısı(fuel additive) olarak. Zbigniew Stepień'e göre, Hidrojen kayda değer bir kütle-enerji oranına sahiptir ve bu da onu bu bağlamda oldukça değerli kılmaktadır. Diğer hidrokarbon yakıtlarla birleştirildiğinde verimliliği artırabilir ve yakıt tüketimini azaltabilir. Stepień incelemesinde, hidrojenin iki motor tipinde kullanımını ele almıştır: kıvılcım/buji ateşlemeli (SI) ve sıkıştırma ateşlemeli/dizel (CI). SI makineler, hidrojenin özelliklerinden istifade eder ve yanma sırasındaki yoğun ısı nedeniyle daha yüksek NO_x emisyonları üretmelerine rağmen, daha az enerjiyle daha hızlı ve kolay ateşlemeye neden olur. Öte yandan, hidrojenin tutuşma gereksiniminin daha yüksek olması nedeniyle, CI makineler yalnızca hidrojenle çalışamaz; ancak çift yakıt olarak kullanılabilir ve CI makinelerdeki yüksek difüzyon özelliği dizel spreylere yakıt karışımı tutarlılığını artırır. Çift yakıtlı makinelerde, hidrojen birincil yakıt olabilirken, dizel yanmayı tetikler ve toplam yakıt karışımının %10-30'unu oluşturur[81]. Shadidi ve diğerleri İYM'ye hidrojen sağlamak da dahil olmak üzere makinelerde hidrojen kullanımına yönelik çeşitli yaklaşımları araştırmıştır. Doğrudan enjeksiyon yöntemi(DI), motorun yanma mimarisinde değişiklik gerektirmesine rağmen bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Hidrojen ikincil bir yakıt olarak kullanıldığında, fosil yakıtların yerini tamamen alması da tüketimlerini azaltarak dönüşüme katkıda bulunabileceğinin altı çizilmiştir. Yazarlar, düşük güç çıkışı, NO_x emisyonları ve düzensiz yanma gibi sorunların üstesinden gelmek için hem yakıt iletiminde hem de yanma yapılarında değişikliğe gidilmesi gerektiğini vurgulamışlardır[82]. Yasin Karagöz ve diğerleri tek silindirli, dört stroklu bir araştırma makinesi kullanarak etkileyici bir deneysel çalışma[83] yürütmüştür. Tam yüklü durumda çeşitli motor hızlarında ve toplam enerji içeriğinin %25 ve %50'si kadarını hidrojen eklentisi teşkil edecek şekilde performans değerlendirmesi yapmışlardır. Çeşitli parametreleri ölçmek için çoklu ölçüm cihazları kullanılmıştır. Çalışma, %25 hidrojen ilavesi ile %8.1 ile %15.1 arasında bir güç kaybı gözlemlendiğini, %50 hidrojen senaryosunun ise %10.8 ile %25.4 arasında bir güç kaybına neden olduğunu ortaya koymuştur. Öte yandan, hidrojen ilavesi ilgili senaryolarda CO₂ emisyonlarının sırasıyla %20.4 ile %66.3 oranında azalmasını sağlamıştır. NO_x emisyonlarında artış kaydedilirken, egzoz gazı sıcaklığı, duman ve CO

emisyollarında da ise düşüş görölmüştür. Canan Acar ve İbrahim Dinçer, hidrojenin ulaşım bağlamındaki potansiyelini değerlendirmeyi amaçlayan dikkat çekici bir çalışma[84] yürüttüler. Ayrıca farklı yakıtlar kullanan araçların verimliliğini ve optimallliğini karşılaştırmayı amaçladılar. Çalışma, olumsuz çevresel etkilerin başlıca sebepleri olarak kabul gören CO₂ ve SO₂ salımlarına odaklanmıştır. Karbonun sosyal maliyeti, CO₂ emisyonlarının neden olduğu ekonomik zararlar ilgili olduğu için bir ölçüt olarak kullanılmıştır. Ayrıca, megajul (MJ) cinsinden 100 km başına enerji tüketimine dayalı bir yakıt sarfıyatı karşılaştırması yapılmıştır. Nihayetinde, enerji ve ekserji verimlilikleri toplandığında, çalışmanın kapsamlı sonucu, yakıt pillerinin ve ardından H₂ICE'nin en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Tablo 2.3 Farklı kriterlere göre en iyi seçenek vurgulanmıştır [84]

Değerlendirme Kriteri	En İyi Seçenek
CO ₂ Emisyonları	H ₂ ICE
SO ₂ Emisyonları	Yakıt Pili
Karbonun Toplumsal Maliyeti	H ₂ ICE
Yakıt Sarfıyatı (MJ/Km)	Elektrik
Enerji & Ekserji Verimliliği	Yakıt Pili
Yakıt Masrafı	Biyoyakıt
Sürüş Menzili	Hibrit
Genel Performans	Yakıt Pili

Özetle, bir İYM basit ve düşük maliyetli düzenlemelerle hidrojen yakıtıyla çalışabilir ve yukarıda açıklandığı gibi ilginç etkiler gözlemlenebilir. Bununla birlikte, hidrojen depolama ve sıkıştırma konusundaki zorluklar, daha kısa bir sürüş menzili ile sonuçlanmakta ve benzinli makinelerle karşılaştırıldığında toplam enerji tüketiminin daha yüksek olmasıyla sonuçlanabilmektedir.

2.2 Metanol

Metil alkol veya odun alkolü olarak da bilinen metanol, bir hidroksit grubuna (OH) bağlı bir metil grubundan (CH₃) oluşan renksiz bir sıvıdır. Geleneksel yakıtlara bir alternatif teşkil etmesinin ötesinde, metanol çeşitli uygulamalarda kullanım alanı

bulmaktadır. Mevcut durumda, çoğunlukla yüksek sıcaklık ve basınç altında hidrojen ve karbon monoksit içeren katalitik bir tepkime yoluyla üretilmektedir[85].

Metanol üretim sürecinin maliyeti, metanolün üretileceği hidrokarbon bileşenlerine bağlıdır ve nafta, metanol üretmek amaçlı CO₂ ve CO eldesi için kullanılan metanın sentezlenmesinde öneme sahip bir hammaddedir[86]. Metanol üretimi için en yaygın hammadde olan doğal gaz, küresel üretimin %90'ından fazlasını oluşturmakta ve üç aşamayı kapsamaktadır: sentez gazı(syngas) üretimi, metanol sentezi ve damıtma yoluyla metanol saflaştırma[87]. CO/CO₂/H₂ gazlarının bir karışımı olan sentez gazı, ağırlıklı olarak metan ve kömür gibi çeşitli hidrokarbonların kısmi oksidasyonunu takiben buhar ve ototermal reformasyon ile üretilir[88].

Tablo 2.4 Metanolün kimyasal özellikleri [89][90].

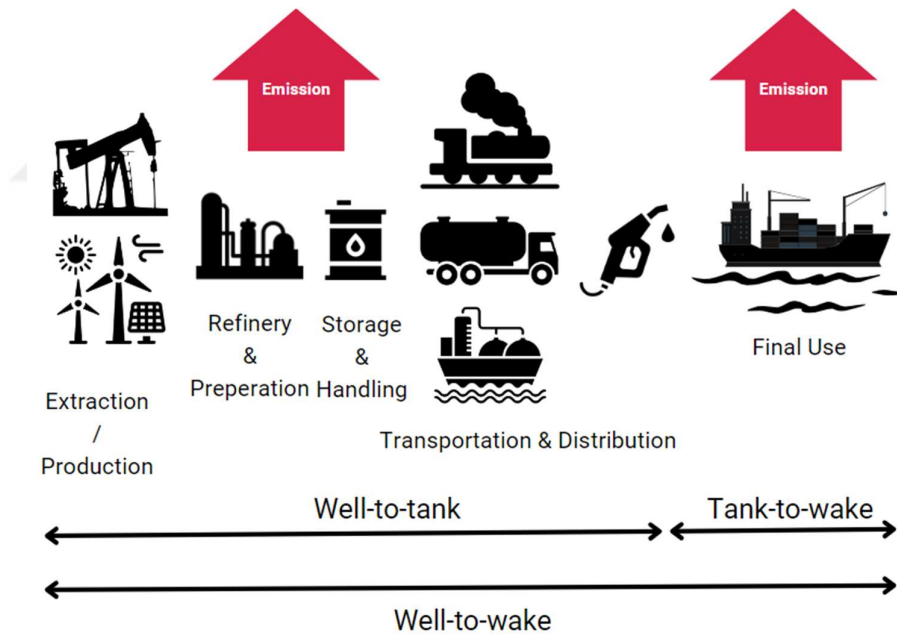
Formül	CH ₃ OH
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	464 °C
Kaynama Noktası	64.7 °C
Yoğunluk (Sıvı)	786.3 kg/m ³
Alt Isıl Değer	20 MJ/kg

Tablo 2.5 Metanolün üretimi ve yanması ile ilişkili tepkimeler [86][88]

Açıklama	Tepkime
Metan & Su Tepkimesi @1000 C° (Buhar Reformasyonu)	CH ₄ + H ₂ O <-> CO + 3H ₂
Su-gaz değişimi	CO + H ₂ O <-> CO ₂ + H ₂
CO / Syngas'dan metanol sentezi	CO + 2H ₂ -> CH ₃ OH
CO ₂ 'den metanol sentezi	CO ₂ + 3H ₂ -> CH ₃ OH + H ₂ O
Ototermal dönüşüm	CH ₄ + 2O ₂ -> CO ₂ + 2H ₂ O
Kısmi Oksidasyon	CH ₄ + 1/2O ₂ -> CO + 2H ₂

İYM'lerde veya yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılabilen metanol, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon içeriğine sahiptir. Bununla birlikte, metanolün çevre dostu yöntemlerle elde edilmesi iklim üzerindeki etkisini azaltmaktadır[91]. Metanol, üretim biçimine göre üç gruba ayrılabilir: doğal gaz ya da kömürden elde edilen gri metanol; karbon yakalama ve depolama yöntemiyle entegre üretilen mavi metanol ve de biyokütle, temiz elektrik ve yakalanmış CO₂ kullanılarak üretilen yeşil metanol[92]. CCS, endüstriyel faaliyetler esnasında üretilen CO₂ gazını

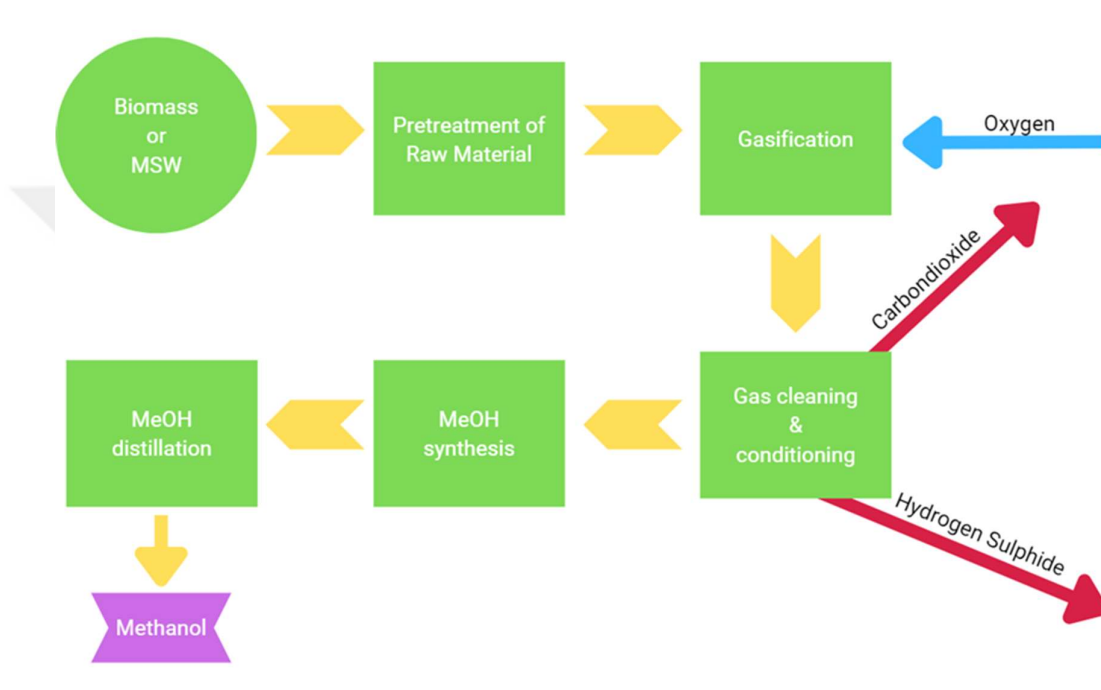
atmosfere salınmadan önce yakalayıp küresel ısınmayla mücadelede çevre dostu bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır[93]. Man Energy Solutions tarafından hazırlanan ‘Methanol in Shipping’ başlıklı rapora göre[94], yenilenebilir enerji kaynakları, çevre dostu hidrojen ve yakalanan CO₂'nin bir kombinasyonu, diğer bir deyişle tamamen yeşil metanol kullanımı, sera gazı (GHG) emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir ve beşikten mezara (WtW) anlayışı dikkate alındığında potansiyel olarak %90'lık bir azalmayı barındırır. Buna karşılık, gri metanol CO₂ emisyonlarında %5'lik bir azalma ile daha mütevazı bir iyileşme göstermektedir; ancak Port Fuel Injection (PFI) teknolojisi ile enjekte edildiğinde, tanktan pervaneye(TtW) süreç bağlamında geleneksel akaryakıtlara kıyasla kükürt oksitlerde (SO_x) %99, partikül maddede %95 ve azot oksitlerde (NO_x) %60 oranında azaltım gibi ciddi yararlar sağlamaktadır.



Şekil 2.2 Deniz yakıtının yaşam döngüsünde kaynaktan pervanedeki son kullanıma kadar, kaynaktan tanka ve nihai kullanıma kadar süreçlerin temsili.

Biyo-metanol, çevreci metanol türlerinden biri olma niteliğindedir. Biyo-metanol üretimi için izlenen tüm adımlar doğal gazdan metanol üretmek için kullanılanlardan çok farklı değildir; ancak bu durumda gazlaştırma için kullanılan hammadde biyokütle veya kentsel katı atıktır (MSW)[95]. E-metanol bir diğer

çevre dostu metanol türü olarak öne çıkmaktadır. Yenilenebilir elektrikten üretilen hidrojen ve tutulmuş CO₂, e-metanolün temel bileşenlerini oluşturmaktadır, bu nedenle bir elektro-yakıt olarak kabul edilmektedir. E-metanol üretmeye yönelik çeşitli yöntemler arasında en basit yaklaşım, yeşil elektrikle desteklenen elektroliz ve CO₂ ile katalitik tepkimenin gerçekleşmesidir.



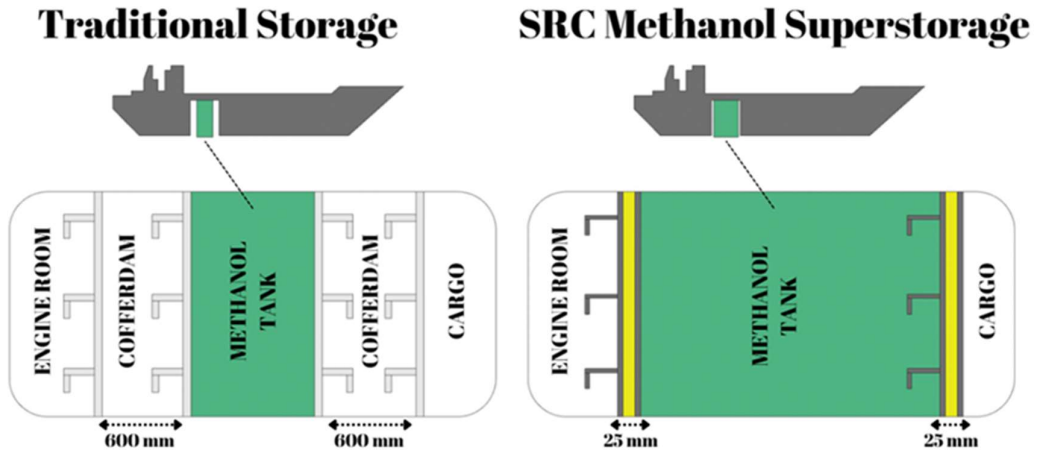
Şekil 2.3 Gazlama yoluyla biyo-metanol üretimini tasvir eden görsel.

[95]'ten uyarlanmıştır.

2.2.1 Metanol Depolama

Metanolün deniz yakıtı olarak kullanıma elverişliliği öne sürüldüğünde, odak noktası bu sefer bu maddenin güvenli bir şekilde depolanması, taşınması ve aktarılmasına yönelmektedir. Bu maddenin solunması veya yutulması körlüğe ve hatta ölüme yol açabileceğinden, yangınlık ve toksisite birincil endişelerdir, bu da maddenin az miktarlarda bile tehlikeli olmasına yol açar. Dolayısıyla, yeterli havalandırma şarttır[96]. Metanol Enstitüsü tarafından hazırlanan 'Methanol Safe Handling Guide' başlıklı yayına[97] göre, mavnalar, boru hatları, demiryolu ve kamyonların kullanıldığı sevkiyat hayati önem taşımaktadır. Metanol saflığının korunması birincil önceliktir ve kirlenmeye karşı sıkı önlemler alınmasını gerekir.

Sızıntı tespit ve alarm sistemlerinin kullanılması bunlara dahildir. Azot tamponu uygulaması, istenmeyen kimyasal reaksiyonları ve patlama riskini azaltmak için önemlidir. Geleneksel deniz yakıtlarıyla karşılaştırıldığında, okyanusa metanol sızmasının genellikle daha az tehlikeli olduğu değerlendirilmektedir. Oil Companies International Marine Forum (OCIMF) ve Maritime Safety Forum (MSF) tarafından yayımlanan bir yayına[98] göre, parlama noktası yaklaşık 11°C olan Düşük Parlama Noktalı Sıvı (LFL) olarak kabul edilen metanolün paslanmaz çelik veya uygun şekilde kaplanmış tanklarda depolanması gerekmektedir. Bu tanklar oksijen seviyesini %8'in altında tutmak için inert olmalıdır. Koruyucu bariyer olarak kullanılan koferdamlar su veya nitrojen ile doldurulmalıdır. Ayrıca, depolama tesisleri metanol gaz dedektörleri ve P/V (Basınç/Vakum) valfleri ile donatılmalıdır. Metanol tipik olarak önemli miktarda depolama alanı gerektirse de, son haberler[99] sandviç plaka sistemi teknolojisinin bu gereksinimi %85 gibi etkileyici bir oranda azaltabildiğini vurgulamaktadır. bu da daha değerli yüklerin taşınması veya başka kullanımlar için bir alan açmaktadır.



Şekil 2.4 Sandviç plaka sistemi teknolojisi [99]

2.2.2 Alternatif Yakıt Olarak Metanol

Bu bölümde metanol, metanol karışımları ve katkı maddelerini içeren alternatif bir yakıt olarak incelenmiştir. Literatür taramasının bir parçası olarak, içten yanmalı motorlarda metanol kullanımına ilişkin bilgiler not edilmiştir. Ayrıca, denizcilik yakıtı olarak metanol üzerine yapılan araştırma çalışmaları ve proje çalışmaları da dahil edilmiştir.

1977 yılında metanol, Amerikalı politikacı William Whitehurst tarafından benzinin yerini alabilecek önemli bir seçenek olarak dile getirilmiş, MIT'de yapılan testlerce yakıtı metanol eklenmesinin bir otomobilin kat edebileceği mesafeyi artırdığını göstermiş ve bir otomobilin yakıt deposunda önemli değişiklikler gerektirmeden yüzde 15 ila 30 oranında metanol bulunabileceği tespit edilmiştir[100].

Tablo 2.6 Çeşitli yakıtların kütlece içerikleri [101].

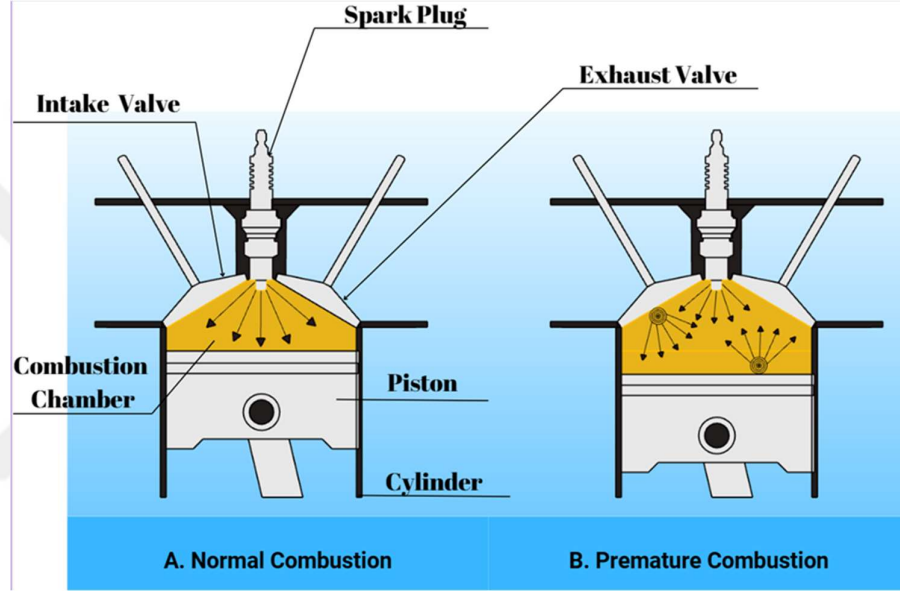
Yakıt Tipi	Yüzdelik Kütleli İçerik			
	Karbon	Hidrojen	Oksijen	Kükürt
Metanol	37.5	12.5	50	-
Benzin	85	15	-	-
Dizel	87	12.5	-	0.5



Şekil 2.5 [102]'den edinilen bilgiler ışığında hazırlanan bilgi görseli metanol yakıtının güçlü ve zayıf yönlerini gösterir.

Yukarıda hazırlanmış [102]'den uyarlanan bilgi görseli ışığında, alternatif yakıt olarak metanolün güçlü yönlerine ilişkin aşağıdaki saptamalarda bulunulabilir;

- **Yüksek oktan değeri** yakıt stabilitesi ile ilgili olduğundan yakıtlar için dikkate değer bir göstergedir ve yakıtın karakterini tanımlar. Stabil olmayan durum rastgele ateşlemeler, denotasyon ve vuruntu olarak kendini göstererek pistonlar, valfler ve rulmanlar da dahil olmak üzere makine parçalarında hasara yol açabilir [103][104].



Şekil 2.6 A. Benzinli bir makinedeki silindirde gerçekleşen normal üniform yanmayı gösterirken, B. Düşük oktan oranı nedeniyle meydana gelebilecek gelişigüzel yanma ve ön tutuşma durumunu göstermektedir[104]

- **Vuruntu direnci** oktan sayısı ile ilişkili bir terim olup, bir yakıtın sıkıştırılmaya maruz kaldığında erken veya kendi kendine tutuşmaya karşı koyma kapasitesiyle ilgilidir, bilindiği üzere hava-yakıt karışımı basınç altında kendiliğinden tutuşabilir[105].
- **Yüksek verimlilik**, yakıtın enerjisinin daha fazlasını işe dönüştürme kabiliyetine işaret eder ve bu da daha iyi yakıt ekonomisi anlamına gelir. Metanol verimli ve geleceği parlak bir alternatif yakıt olarak kabul edilmektedir. ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA)'na ait “Clean Automotive Technology Program” kapsamında yürütülen bir çalışmada[106], pratik ve ulaşılabilir bir sistemde verimliliği arttırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla 19 litrelik bir Volkswagen TDI dizel makinesi kullanılmıştır. Bu,

bir port fuel enjektörü ve bir bujinin entegrasyonu da dahil olmak üzere küçük çaplı değişikliklerin yapılmasını içermiştir. Çalışma hem emisyonların hem de verimliliğin ölçülmesine odaklanmıştır. Sonuç olarak, alkol yakıtı için tasarlanan optimize edilmiş makine, geleneksel yakıt kullanan eşdeğerinden daha iyi performans göstermiştir. Özellikle, en üst seviyede %43 verimlilik elde etmiş ve standart dizel makineye kıyasla yüksek verimlilikle daha geniş bir çalışma aralığı sunmuştur.

- **Dumansız yanma**, çok az veya hiç duman emisyonu olmadan temiz yanmayı ifade eder. Japon araştırmacılar tarafından 1981 yılında yapılan bir çalışmada[107] yardımcı bir enjeksiyon yöntemini ön yanma odasında kullanmışlardır. Bu uygulamada, enerji içeriğinin %95'ini metanol oluştururken, toplam karışımın %4-10'unu oluşturan az miktarda gaz yağı eklenmişti. Dikkat çekici bir şekilde, bu yaklaşım yüksek yükte çalışma sırasında bile dumansız yanma sağlamış ve hem gürültü seviyelerinde hem de NO_x emisyonlarında azalmaya yol açmıştır.
- **Düşük NO_x, CO ve CO₂ emisyonları** zararlı kirleticiler olmaları nedeniyle bir yakıt için önemli bir husustur. Çinli araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmada[108] farklı hacim oranlarında metanol içeren benzin karışımları (%10, %20, %30, %50 ve %75) deneysel yakıtlar olarak seçilmiş ve M0, M10, M20, M30, M50 ve M75 olarak adlandırılmıştır. Yüksek hızlı araçlarda benzinin metanol ile karıştırılması CO₂ salımlarının azaltılmasına yardımcı olmuştur, ancak düşük hız söz konusu olduğunda yakıt tüketiminin arttığı ve bu durumun daha yüksek emisyonlara yol açtığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma, benzinle metanol karışımının farklı hızlarda ve farklı karışım oranlarında emisyonları azaltma konusunda farklı sonuçlar gösterdiğini ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, Çinli akademisyenler tarafından yapılan bir diğer çalışmada[109] deney için ağır hizmet tipi bir araç ve bir metanol buji ateşlemeli motora ilişkin teknik özellikler hazırlanmıştır. Çalışma, gerçek hayattaki sürüş koşullarını simüle eden bir şasi dinamometresi, numune alma sistemleri, emisyon analizörleri, sensörler, dedektörler, veri kaydediciler, yakıt tüketim ölçerleri, akış ölçerlerin ve diğer aygıtların da bulunduğu çeşitli cihazları içermiştir. Test aracı ve motoru, emisyon profillerini analiz etmek için World Harmonized Transient Cycle (WHTC) testi üzerinden bir değerlendirmeye tabi

tutulmuştur. Bu değerlendirmeyi şehir içi, banliyö ve otoyol alanlarında yapılan gerçek bir yol testi izlemiştir. Çalışma, dizel ve benzinli muadillerine kıyasla metanol yakan motorda CO, NMHC, NO_x, HC ve PM emisyonlarında kayda değer düşüşler olduğunu ortaya koymuştur. Bu iyileşmeler, metanolün yüksek oksijen içeriğinin CO ve NMHC'nin oksidasyon yoluyla CO₂ ve H₂O'ya dönüşümünü kolaylaştırmasına bağlanabilir. Başka bir araştırma çalışmasında[110], bilim insanları metanol, etanol ve benzinin performansını karşılaştırmak için tek silindirli, dört stroklu bujili motor kullanarak bir deney gerçekleştirmiştir. Alkollü yakıtlar kullanıldığında, iş etkin ısı verimliliği (BTE), volumetrik verimlilik ve maksimum motor torkunda küçük ama dikkate değer gelişmeler olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, metanol kullanımı NO_x emisyonlarında %49 oranında önemli bir azalmaya yol açmıştır. Motor hızları değiştiğinde, metanolün hidrokarbon emisyonlarında %27.12'lik bir düşüşe ve karbon monoksit emisyonlarında %31.34'lük bir azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, karbondioksit emisyonlarında %4.4'lük bir artış görülmüş olup bu durum alkol yakıtların gelişmiş yanma özelliklerine bağlanabilir.

Tablo 2.7 [108]'den edinilen veriler ışığında metanol ve benzinin kıyası.

YAKITLAR		
Parametreler	Metanol	Gasoline/Benzin
Molekül Formülü	CH ₃ OH	C ₄ -C ₁₂
Oktan Sayısı	111	92
Gizli Buharlaşma Isısı (kJ/kg)	1170	180-373
Kaynama Noktası °C	65	35-215
Alt Isıl Değer (MJ/L)	19.93	43.40

- **Buharlaşma gizli ısı**sının yüksek olması, metanolün buharlaşma işlemi sırasında çevreden daha fazla ısı absorbe edeceğini gösterir. Bu özellik motor soğutma amaçları için faydalı olabilir. Metanolün özellikleriyle ilişkili yüksek buharlaşma gizli ısısı, PFI'lar ile çift enjeksiyon modunda gözlemlenen vuruntuyu önemli ölçüde azaltır[111].
- **Düşük egzoz sıcaklığı** kritik bir gösterge olarak kabul edilebilir, çünkü yüksek egzoz sıcaklıkları düşük motor verimliliği ile ilişkilidir. Çünkü

yüksek egzoz sıcaklıkları, ısıнын önemli bir kısmının faydalı bir işe katkıda bulunmadan boşa harcandığını gösterir[112]. Metanol yakıtı düşük egzoz sıcaklığı ile ilişkilendirilir. Bir çalışmada[82], dört stroklu, dört silindirli bir dizel makine, dizel yakıtta metanol eklenmesinin etkilerini araştırmak için teste tabi tutulmuştur. Çalışma, %10 metanol ve %90 dizel karışımının en düşük egzoz sıcaklığını gösterdiğini, %30'a kadar metanol içeren diğer karışımların ise saf dizel yakıtla çalışmaya kıyasla yine daha düşük egzoz sıcaklıkları sergilediğini ortaya koymuştur.

- **Yüksek uçuculuk** yakıtın buharlaşma yatkınlığını gösterir ve bu özellik çeşitli avantajlar sunabilir. Metanol uçucu bir bileşiktir[113]. Çinli araştırmacılar tarafından yapılan bir çalışma[114] sıkıştırma ateşlemeli bir içten yanmalı makinede yakıtın uçuculuğunun yanma ve emisyonlar üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamıştır. Yakıtın uçuculuğunu artırmak için farklı hacimlerde heptan dizel yakıtla karıştırılmıştır. Bulgular, artan yakıt uçuculuğunun daha düşük yakıt tüketimi ile bağlantılı olduğunu ve kurum emisyonu oranının motor yüküne bağlı olduğunu göstermiştir.
- **Talep ve arz döngüsü içinde rekabet etkin** olması metanol talebini karşılamak için yeterli üretim ve dağıtım kapasitesine sahip olmak anlamına gelir. Metanol üretim endüstrisi birkaç baskın üreticiden ziyade çok sayıda küçük üreticiden oluşurken, en büyük 10 üretici toplu olarak dünya metanol kapasitesinin %30'undan azını oluşturmaktadır ve metanol ilgisini çevreleyen dinamikler karmaşık olup çeşitli şartlara göre değişebilmektedir[115].

Metanol yakıtının zayıf yönlerine ilişkin aşağıdaki maddeler incelenmiştir;

- **Uzun ateşleme gecikmesi** ısı yayılım oranı, maksimum basınç, CO ve NO_x emisyonları da dahil olmak üzere motor performansının çeşitli yönlerini etkiler; metanolün yüksek buharlaşma gizli ısı ve düşük setan sayısı nedeniyle karşılaştığı bir durumdur; ancak ateşleme katkı maddelerinin kullanımı bu sorunu hafifletebilir[116].
- **Yüksek kendiliğinden tutuşma noktası**, metanolün diğer geleneksel yakıtlara göre daha yüksek tutuşma sıcaklığına sahip olduğunu gösteren bir özelliktir.

Tablo 2.8 Çeşitli yakıtların kendiliğinden tutuşma değerlerinin karşılaştırılması, metanolün geleneksel yakıtlardan daha yüksek bir kendiliğinden tutuşma noktasına sahip olduğunu göstermektedir [117].

YAKIT	KENDİLİĞİNDEN TUTUŞMA SICAKLIĞI (°C)
Dizel	210
Benzin (Gasoline)	246 - 280
Metanol	464
Hidrojen	500

- **Dizel ile düşük karışabilirlik** metanol ve dizelin iyi karışmadığı ve metanolün farklı bir katmana ayrılmasına neden olduğu bir durumu gösterir. Metanol bu tür karışımlarda faz ayrışmasına uğrama eğilimindedir[90]. n-dekanol gibi yardımcı çözücüler faz ayrışması sorununu ortadan kaldırmaya yardımcı olabilir[118]. Bir çalışmada[119], dizel yakıtta metanol katılmasının etkileri incelenmiştir. Deney, pnömatik soğutmalı tek silindirli, dört stroklu bir motor kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Metanol karışımında %7, %14 ve %21 hacimlerde bulunmuştur. Ek olarak, faz ayrımı sorunlarını önlemek için %1 dodekanol dahil edilmiştir. Saf dizel kullanımına kıyasla performanstaki en önemli artış, karışım %14 metanol içerdiğinde gözlenmiştir. Bu durum güç etkin yakıt sarfıyatı (BSFC), makine hızı (Ne), güç etkin enerji sarfıyatı (BSEC), BTE, gürültü seviyeleri, egzoz sıcaklığı, yakıt yoğunluğu ve viskozitede olumlu farklılıklara yol açmıştır.
- **Soğuk marş probleminin** metanol yakan makinelerde yaşanması, yakıtın yüksek gizli ısıyla ilişkilendirilebilir[120]. Ortam soğuk olduğunda metanollü makineleri çalıştırmak zor olabilir.
- **Aşındırıcılık** metanol kullanımının motor bileşenlerinde korozyona neden olması dezavantajıdır[121]. Çeşitli metallerden yapılmış numunelerin 40°C'lik bir ortamda en az 2000 saat boyunca M15 ve 85 metanol/benzin karışımlarına batırıldığı bir deney[122] gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kaybı bir gösterge olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, paslanmaz çeliğin ağırlık kaybı ve görünümde dikkate değer bir değişiklik göstermediğini, diğer birçok malzemenin ise önemli ölçüde bozulma gösterdiğini ortaya koymuştur.

- **Zayıf yağlama özelliği** makine bileşenlerinin daha hızlı aşınmasına yol açabilecek potansiyel bir soruna işaret etmektedir. Bir rapora göre [123], makine bileşenlerinde, özellikle de yataklarda, valf mekanizmalarında ve silindirlerde metanol kullanımı, benzinin neden olacağı aşınmaya kıyasla daha fazla aşınmaya yol açmaktadır. Sonuç olarak, performans ve dayanıklılık sorunlarını ortadan kaldırmak için metanol yakan makinelerde katkı maddeleri ve yağlayıcıların kullanılması gerekli görülmektedir.
- **Düşük viskozite** metanolün diğer bazı maddelere kıyasla sahip olduğu fiziksel özelliğidir. Kinematik viskozite, diğer birçok faktörün yanı sıra yakıt tüketimini etkileyebilir[124]. Daha yüksek yakıt viskozitesi daha az aşınmaya neden olurken, daha düşük viskozite püskürtme ve atomizasyonu olumlu yönde etkiler[125].

2.2.3 Metanolün Yanma Profili

Bir yakıt olarak metanolün artılarını ve eksilerini değerlendirdikten sonra, literatür taramasına dayanarak metanolün yanma profilini incelemekte fayda vardır. ABD Ulaştırma Bakanlığı Denizcilik İdaresi için hazırlanan raporda[126] metanolün halihazırda birkaç feribot ve tankerde kullanılmakta olduğu belirtilmiştir. Ufak düzenlemelerle, buji ateşlemeli motorlara doğrudan metanol yakıtı verilebilir veya metanol bir yakıt katkısı olarak kullanılabilir. Metanol ile çalışmak üzere tasarlanan yeni gemi makineleri, dizel motorlarla benzer başarımlar göstermektedir. Dierickx J. ve diğerleri tarafından 2018 yılında 7. Transport Research Arena (TRA) için hazırlanan makalede[127] gemilerin çoğunun Sıkıştırma Ateşlemeli motorlarla donatıldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, metanol tek başına veya benzinle harmanlandığında Kıvılcım Ateşlemeli (SI) motorlar için daha tercih edilebilir bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Yazarlar, CI motorları metanol kullanımına uyarlamak için dört farklı çift yakıtlı çalışma yönteminin altını çizmişlerdir. Bu çalışmada daha önce de geçtiği gibi, oktan ve setan sayıları yakıtların nasıl performans gösterdiğini anlamak için kıymetli göstergelerdir. Yüksek setan sayısı, dizel motorlar için yakıtlarda aranan bir özelliktir, çünkü otomatik ateşleme yatkınlığına işaret eder[128]. Bu noktadan hareketle, bu özellik sayesinde ateşleme gecikmelerinin ortadan kalkacağı ve böylece motorun daha sessiz ve daha istikrarlı çalışacağı sonucuna varılabilir. Oktan sayısı bir yakıtın vuruntu yapma eğilimine

ilişkin bir parametredir; daha yüksek değerler daha fazla sıkıştırma gerektirdiğinden bu yakıtları kıvılcım ateşlemeli/benzinli motorlar için uygun hale getirir; tersine, daha düşük oktan seviyeleri erken tutuşma riskine işaret eder[129]. Bir raporda[130], belirtildiği üzere, metanol yüksek oktan ve düşük setan sayısına sahip olduğu için SI motorlar için daha uygun görülmektedir. Ayrıca, sülfür içeriğine sahip değildir ve bileşiminde zaten bir miktar bulunduğundan LNG, dizel ve benzinden daha az oksijene ihtiyaç duyar. Çalışmada ayrıca metanolün CI makinelerde kullanılmasının birtakım değişiklikler gerektireceği belirtiliyor.

Tablo 2.9 Çeşitli yakıtların setan numarası[131][132][133].

Yakıt	Setan Numarası
Biyodizel	50-55
Metanol	3-5
Premium Dizel	47(min)

Tablo 2.10.ABD’de satılan çeşitli kategorideki benzinlerin oktan sayısı[134].

Benzin Kategorisi	Oktan Sayısı
Sıradan	87
Orta	89-90
Premium	91-94

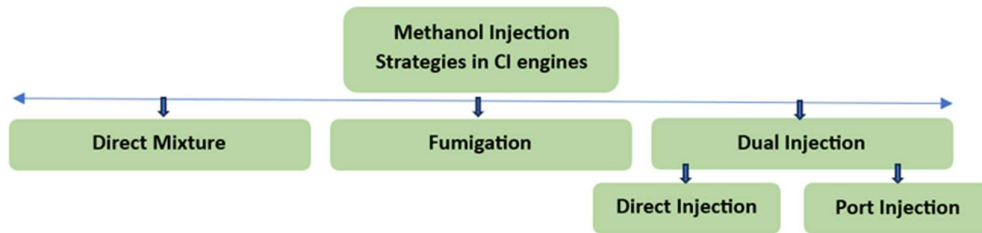
Tablo 2.11 Oktan ve setan sayılarının bir karşılaştırması.

	Setan Sayısı	Oktan Sayısı
Tanım	Dizel tutuşma kalitesine etkir.	Benzin tutuşma kalitesine etkir.
Yüksek Değer	Basınç altında daha kolay tutuşma.	Daha dengeli yakıt.
Düşük Değer	Yavaş tutuşma ve gecikmeler	SI makinelerde erken tutuşma

2.2.4 İçten Yanmalı Makinelerde Metanol

Metanol projeleri ile ilgili konu incelenmeye alınmadan önce, bu bölümde metanol/dizel/benzin/su karışımlarını içeren CI ve SI makinelerde metanolün yanmasına yönelik çeşitli yaklaşımlar sunulacaktır. SI makinelerde metanol kullanımına yönelik çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Metanol benzin veya su ile karıştırılabilir veya tek başına kullanılabilir. Denizcilik uygulamalarında yüksek metanol içeriğiyle veya sadece metanolla çalışan motorlar tipik olarak CI kökenlidir ancak SI çalışma özelliklerini benimseyecek şekilde modifiye edilmiştir. Bu nedenle, teorik olarak CI motorların karakteristik özelliği olan yüksek sıkıştırma avantajının korunduğu ve metanolün kendi kendine tutuşma sorununun kıvılcım/spark/buji ateşlemesi yoluyla çözüldüğü sonucuna varılabilir.

2.2.4.1 Dizel Makinelerde Metanol: Enjeksiyon, Yanma ve Blend Yakıtlar



Şekil 2.7 Sıkıştırılmalı ateşleme prensibi ile çalışan dizel makineler için metanol enjeksiyon stratejileri[135].

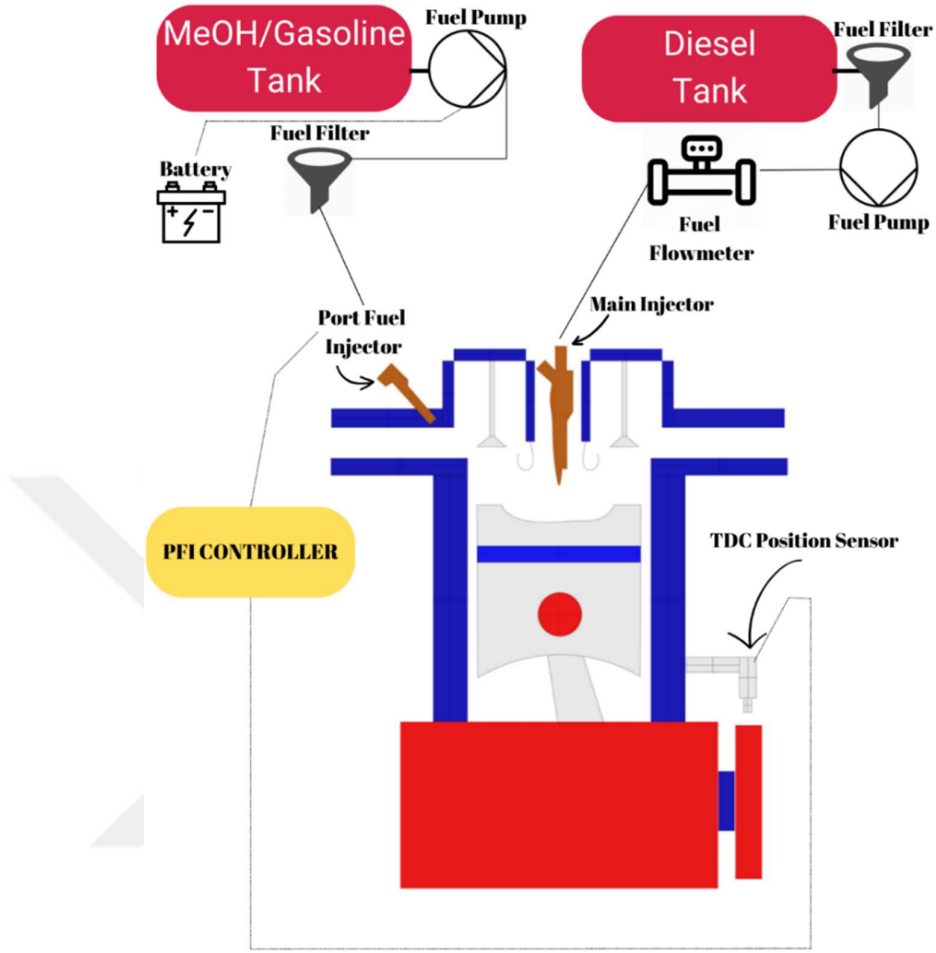
CI motorlarda metanol enjeksiyon yaklaşımlarına ilişkin aşağıdaki bilgiler Pardhe ve diğerlerinin çalışmasından[135] eldelenmiştir.

- **Direct Mixture Injection**(Doğrudan Karışım Enjeksiyonu) karmaşık değişikliklere ihtiyaç duymadan basit ve ekonomik bir yaklaşım sunar.

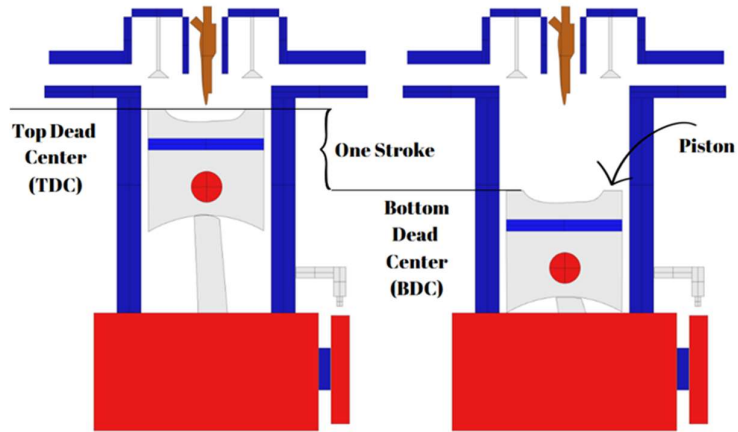
Metanol ve dizel, faz ayrışmasını önlemek için birkaç katkı maddesi eklenerek yakıt deposunda karıştırılır. Karışım daha sonra silindire enjekte edilir.

- **Fumigation** (Fümigasyon/buharlaştırma) ek bir buharlaştırma hattı ve metanol için bir tank gerekir. Buharlaştırılmış metanol hava ile karıştırılır ve emme manifoldundan içeri alınırken, dizel doğrudan yüksek basınçlı enjeksiyon sisteminden gelir. Daha düşük emisyonlar ve metanolün yakıt muhtevasının %50 oranını teşkil etmesi bu yaklaşımın avantajlarıdır.
- **Separately Direct Injection** (Doğrudan Münferit Enjeksiyon), çift yakıtlı(dual-fuel) yaklaşım olarak da adlandırılabilir. Bir orifis plakası tarafından kontrol edilen ayrı yakıt akışları aynı yakıt yolunda yer alarak hem metanolün hem de dizelin yanma odasına doğrudan enjeksiyonunu sağlar. Bu yöntemde yakıtların enjeksiyon zamanlaması çok önemlidir. Piston alt ölü noktadayken (BDC), reaksiyona girme eğilimi düşük olan metanol veya benzin gibi düşük setanlı yakıt içeri alınır. Bunu, piston üst ölü noktaya (TDC) ulaştığında dizel gibi yüksek setan sayısına ve daha fazla tepki verme isteğine sahip diğer yakıtın alınması izler. Yazarların da belirttiği gibi bu yöntem gelecek için parlak bir potansiyele sahiptir.
- **Port Injection** (Port Enjeksiyon) metanolü emme manifolduna almak için ana enjektörden başka bir port kullanılırken, dizel yüksek basınçta ana enjektörden alınır. Makine yapısındaki değişikliklerden kaynaklanan zorluklar ve masraflar nedeniyle, port yakıt enjeksiyonu yazarlar tarafından sınırlı bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Son olarak, yukarıdaki çalışmada Pardha ve diğerleri CI makinelerde yapılması gereken değişiklikler hakkında bilgi vermiştir. Bu değişiklikler arasında yakıt tedarik sistemindeki değişiklikler, akış kapasitesinde ve yakıt tedarik hızında artış gerekliliği, daha büyük nozul ve orifis alanlarına duyulan ihtiyaç, metanolün ön ısıtılması ve şartlandırılması için kızdırma bujisi teknolojisi adı verilen bir seçeneğin uygulanması ve alkollerin aşındırıcılığına karşı çinko ve nikel kaplamalı paslanmaz çelik bileşenlerin kullanılması yer almaktadır. Ayrıca, yanma odasını yalıtımak ve ısı kayıplarını ortadan kaldırmak için termal bariyer kaplama (TBCs) stratejisinin kullanılmasını önerdiler.



Şekil 2.8 Dizel makinede çift yakıtlı çalışma/port yakıt enjeksiyonu kavramlarını açıklamak için[136]'dan baz alınarak hazırlanmıştır.



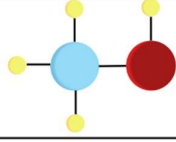
Şekil 2.9 Alt ve üst ölü noktaları gösteren resim. [137]ve [138]'deki figürlerden yola çıkarak hazırlanmıştır.

- **Metanol ve Su Yakıt Blendi**

Dizel makinelerde su-metanol karışımlarının kullanımı ilginç ve tetkik etmeye değer bir konudur.

Tablo 2.12 Metanol ve suyun molar kütle ve moleküler yapılarını göstermektedir.

Veriler [139]ve [140]’den eldelenmiştir.

	YAPI	MOLAR KÜTLE (g/mol)
Metanol		32.042
SU		18.015

Yakın tarihli bir araştırma çalışmasında[141], , bilim insanları farklı ağırlık oranlarına sahip çeşitli metanol-su karışımlarının etkilerini incelemişlerdir: %50 metanol ve %50 su (MeOH-50), %64 metanol ve %36 su (MeOH-64), %90 metanol ve %10 su (MeOH-90) ve %100 saf metanol (MeOH-100). Deneylerini, LeanShips projesinin bir ayağı olarak daha önceden metanol/dizel dual yakıtlı bir makineye dönüştürülmüş olan modifiye edilmiş bir Volvo Penta yüksek devirli deniz dizel makinesi kullanarak ve MeOH-W karışımı için ekstra bir tank ekleyerek gerçekleştirmişlerdir. Deneye salt dizel işletimle başlanmış ve azami uygulanabilir seviyeye ulaşılan kadar küçük artışlarla kademeli olarak MeOH-W eklenmiştir. Çalışmanın temel bulguları, MeOH-50'nin %45.9 ile en yüksek BTE oranına ulaştığını göstermiştir ki bu da giren yakıttan elde edilen faydalı güç çıkışını temsil etmektedir. Bu, yalnızca metanol işletiminden %3.3 ve yalnızca dizel işletiminden %4.9 daha yüksek bir değerdir. En yüksek metanol enerji fraksiyonu (MEF), metanolün alt ısı değeri metanolün kütle akışıyla çarpımının, hem dizel hem de metanolün alt ısı değerleri ve kütle akışlarının toplamına bölünmesiyle elde edilen oranı ifade etmektedir ve doğal olarak salt metanol kullanıldığında gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma, karışımdaki su içeriği arttıkça makine silindirlerinde daha fazla tekleme riski olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bir yandan da NO_x emisyonu azalmıştır. Sonuç olarak çalışma, suyun gelişmiş BTE, NO_x emisyonlarında azalma ve potansiyel maliyet tasarrufu gibi çeşitli faydalar sağlayabileceği sonucuna varmıştır.

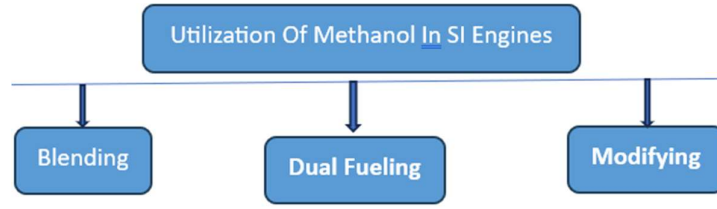
Tablo 2.13 [141]'den eldlenen veriler ışığında çeşitli oranlarda metanol su blendleri ile ilgili önemli açıklamalara yer verilmiştir.

BLEND	KÜTLESEL ORAN	AÇIKLAMA
MeOH-50	%50 metanol %50 Su	Çevreci yöntemlerle metanol üretilmesi sırasındaki ara ürünü temsil eder.
MeOH-64	%64 metanol %36 Su	$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$ tepkimesi kütlece %64 metanol ve %36 su oluşturur. Ham metanolü temsil eder.
MeOH-90	%90 metanol %10 Su	Doğal gaz ve biyokütle ile elde edilen ham metanole işaret eder.
MeOH-100	%100 metanol	Saf metanoldür.

Yeşil hidrojen ve atmosferden yakalanmış CO_2 'den metanol üretme sürecinde, her bir mol metanol için bir mol su üretilir. Bu ilişki yukarıdaki tablonun ikinci satırında gösterilmiştir. Bu çıktının kütlese anlamda dağılımı ise %64 metanol ve %36 su olmaktadır.

2.2.4.2 Kıvılcım Ateşlemeli Makinelelerde Metanol

Kowalewicz, makalesinde[101], metanolün SI makinelerde yalın kullanım için önemli bir potansiyel sergilediğini ve metanol işletimine uyarlama konusunda CI makinelere kıyasla daha az değişiklik gerektirdiğini ileri sürmüştür. Bununla birlikte, bir ateşleme iyileştirici(ignition improver) ve bir ısıtma mekanizmasının ilavesi gerekli olabilir. Metanol yakıtı, SI makinelerde benzine kıyasla daha yüksek sıkıştırma oranlarına erişilmesini sağlayabilir ve de yakıt-zayıf karışımların kullanılması gibi avantajlar sunabilir.



Şekil 2.10 Şema, metanolün SI makinelerde kullanım yöntemlerini göstermektedir[142]

Yellapragada ve Budda tarafından yapılan çalışmaya[142], SI makinelerde metanol kullanımına ilişkin temel bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Blend Yöntemi** benzin ve metanolün çeşitli oranlarda harmanlanması ile yakıt kompozisyonunda esneklik sağlanır. İstenen yakıt karışımlarını elde etmek için splash blending, sequential blending ve ratio blending gibi farklı blend yöntemleri kullanılabilir. Ancak stream blending, faz ayrımı sorunlarını azaltmadaki etkinliği nedeniyle tercih edilen bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.
- **Dual Fuel (Çift Yakıt)** metanol ve benzinin ortama ayrı ayrı verilmesini içerir ve faz ayrışması riski taşımaz. İstenen yakıt içeriği seviyelerini sağlamak için uygun ölçüm sistemleri çok önemlidir ve etkili uygulama için karbüratör ve yakıt enjeksiyon sistemlerinin kullanılması gereklidir.
- **Modifikasyon** Yakıt sistemlerinin modifiye edilmesi, M15 ve altı gibi düşük metanol içerikli karışımlar için gerekli olmasa da, gelişmiş verimlilik için retrofit uygulamasını içerir. M85 yakıtı gibi yüksek metanol içerikli yakıtlarda soğuk marş sorununu gidermek için genellikle n-heptan kullanılması gerekir. Etkili bir uygulama için hususi yakıt dağıtım sistemleri, marş motorları ve özel karbüratörler gerekli olabilir. Saf metanol kullanımı için, elektronik kontrol ünitesi ile entegre doğrudan enjeksiyon kızdırma bujisi (glow plug) soğuk marş gibi zorlukların üstesinden gelmek için önemlidir.

Yakıt karışımındaki metanol oranının düşük olduğu durumlarda, sınırlı etkileri gözlemlenebilir olsa da, makinede kompleks modifikasyonlara gerek yoktur. Malik ve diğerlerinin çalışmasında[143] gösterildiği gibi M12 karışımı, değişen motor yükleri boyunca benzine göre bir miktar daha yüksek tork ve etkin güç çıkışı(brake power) sergilemiştir. Bununla birlikte, daha yüksek CO₂ emisyonu da görülmüştür.

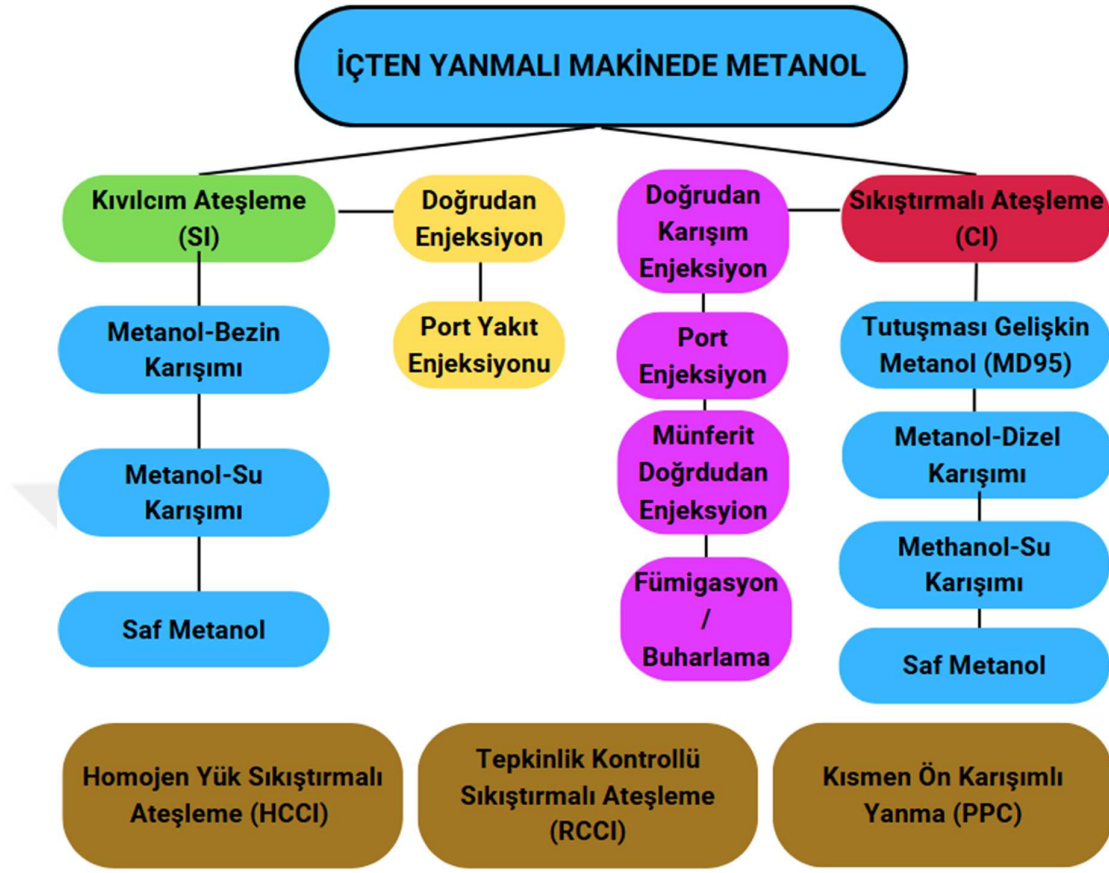
Artan CO₂ emisyonunun nedeni, metanol ilavesiyle birlikte ulaşılan iyileştirilmiş ve daha bütünlüklü yanmadır. Metanolün oksijen içeriği nedeniyle daha yakıt-zayıf bir yanma gerçekleşebilir. Su-metanol karışımları, SI makinede yanmaları bağlamında ilgi çekicidir. Karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşma fikri perspektifinde, Sileghem ve diğerleri saf metanol, metanol-su karışımı ve benzinin BTE ve emisyonlarını karşılaştırmak için bir değerlendirme çalışması[144] yürütmüştür. Metanol gibi sıvı alkol yakıtların dehidrasyonu ve damıtılması önemli maliyetler gerektirdiğinden, bu işlemlerin yapılmaması halinde ekonomik bir kazanç elde edileceği bir diğer önemli vurgu olmuştur. Metanolün kimyasal özellikleri nedeniyle, su ilavesine yanıt olarak daha yüksek soğutma etkisi, gizli buharlaşma ısısı ve vuruntu direncinin yanı sıra daha düşük NO_x emisyonlarının beklendiği ifade edilmiştir⁴ silindirli bir PFI-SI olan test makinesi alkol için uygun enjektörlerle donatılmış ve yakıt rayları için paslanmaz çelik kullanılmıştır. Su, üç farklı karışımında hacim olarak %2.5, %5 ve %10' u oluşturmuştur. Karışımlar arasındaki iş etkin ısı verimliliği farkı önemsiz olurken, tüm devir aralıklarında metanol ve karışımları benzine kıyasla %1-2 yüksek verimlilik göstermiştir. NO_x emisyonlarına gelince, hacimce %10 su içeren karışım hariç, saf metanol ve diğer karışımlar benzer sonuçlar göstermiştir. Yazarlar, metanolün üretim aşamasında tamamen kurutulmasına gerek olmadığı ve bunun da üretim maliyetlerini düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Hacmen %10 su içeren karışımın daha düşük NO_x yayma performansı, silindirlerdeki sıcaklığın daha düşük olmasına bağlanmaktadır.

2.2.4.3 İçten Yanmalı Makinelerde Methanol: Özet

B. Zincir ve C. Deniz, metanolün denizcilik endüstrisinde popüler hale geldiğini belirterek, motor performansını ve çevre dostu olma özelliğini geliştirmek için uygun bir yaklaşıma ihtiyaç duyulduğunu vurgulamışlardır. Raporlarında[145], metanolün yakıt olarak kullanımına yönelik stratejileri anlatmışlar ve aşağıdaki noktaların altını çizmişlerdir:

- MD95 yaklaşımının daha küçük gemiler için daha iyi bir seçenek olduğu vurgulanmıştır. Ancak, yüksek sıkıştırma ve malzeme dayanıklılığı ile ilgili zorluklar ifade edilmiştir.

- Dizel motorlarda küçük çaplı ayarlamalarla uygulanabilen bir yöntem olan PFI-SI, metanolün emme manifolduna enjekte edilmesini ve silindire ulaşmadan önce hava ile karıştırılmasını içermektedir.
- HCCI, NO_x emisyonlarını ve isi azaltırken performansı artırabilen daha düşük sıcaklıklarla karakterize edilen alternatif bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Bu, reaksiyonunu geciktirmek için hava-yakıt karışımının(yük) seyreltilmesiyle elde edilir. Bu avantajlara rağmen, düşük güç çıkışı, düzensiz yanma, HC ve CO emisyonlarının yanı sıra yüksek basınç artış oranı (PRR) gibi olası sakıncalar bu yaklaşımın uygulanmasını kısıtlamaktadır.
- Diğer bir yaklaşım olan çift yakıtlı yanma, yüksek oktan sayısına sahip bir yakıt ile yüksek setan sayısına sahip başka bir yakıtın birleştirilmesini içerir. Bu durumda birincil yakıt olan metanol daha yüksek oktan sayısına sahipken, pilot yakıt olarak kullanılan dizel daha yüksek setan sayısına sahiptir. Pilot yakıt olan dizel, toplam karışımın yaklaşık %1-2'sini oluşturur ve enjeksiyonu yanma zamanlamasının belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar.
- RCCI yöntemi hem HCCI hem de çift yakıtlı yanma ile benzerlikler gösterir ancak elverişli görülmemiştir.
- Doğrudan Enjeksiyonlu Kıvılcım Ateşlemesi (DISI), metanolün bir buji kullanılarak yakıldığı ve ardından alev yayılımının gerçekleştiği bir yöntemdir. Hazne içindeki hava-yakıt karışımı, kendi kendine tutuşmayı geciktirmek için yeterince seyreltilmelidir. Kademeli geç enjeksiyonla elde edilen yüksek verime rağmen, bu yöntem motor vuruntusu ve tekleme sorunları arasında sınırlı bir manevra alanında zorluklarla karşı karşıyadır.
- Kısmen ön karışimli yanma (PPC) yazarlar tarafından CI ve HCCI yaklaşımlarının bir karışımı olarak tanımlanmaktadır. Yanma öncesinde silindir içinde kısmen homojen bir hava-yakıt karışımı oluşturulur. Yazarlar, bilimsel araştırmalara dayandırarak, bu yaklaşımın CI makinelerle elde edilenden daha yüksek performans sağladığını, daha düşük NO_x ve CO₂ emisyonları sergilediğini ve PM emisyonlarının neredeyse sıfır olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte, motor düşük devirde altında çalıştığında bu avantajların gözlemlenemediği de belirtilmiştir.



Şekil 2.11 Görsel zihin haritası, SI ve CI makinelerde kullanılabilecek yakıt karışımlarını, kullanılabilecek enjeksiyon yöntemlerini ve diğer stratejileri göstermektedir.[133], [135], [146] 'dan alınan veriler kullanılarak hazırlanmıştır.

Verhelst ve diğerlerinin içten yanmalı makinelerde metanol kullanımına ilişkin kapsamlı raporundan[133] aşağıdaki bilgiler çıkarılabilir:

- M85 yakıtında (%85 metanol ve %15 benzin) olduğu gibi metanolün benzinle karıştırılması motor verimliliğini artırır. Metanol, SI motorlarda sadece benzin kullanımına kıyasla vuruntu direncini artırır ve 12:1'lik bir sıkıştırma oranına erişilmesine olanak tanır.
- Saf etanol (etil alkol) yakıtı, 13:1 sıkıştırma oranı ve tam yük altında port enjeksiyonlu kıvılcım ateşlemeli (PFI-SI) bir motorda, 92 oktan benzine kıyasla %7.9 daha yüksek termal verimlilik göstermiştir.
- Yazarlar, bir CI makinenin metanol kullanımı için bir SI makineye dönüştürüldüğü bir örnek sunmuşlardır. Metanol, 19.5:1'lik yüksek

sıkıştırma oranından yararlanarak önceki dizel örneğine göre %2 daha yüksek bir maksimum iş etkin ısı verimlilik göstermiştir. Dönüştürme işlemi bujilerin, port yakıt enjeksiyon sisteminin ve makine gazı devridaim (EGR) devresinin eklenmesini içermiştir.

- CI makineler için yazarlar, MD95'te olduğu gibi karışımın %5'ini oluşturan bir ateşleme geliştiriciye olan ihtiyacı vurgulamışlardır. Bu karışım sıkıştırma sırasında kendiliğinden tutuşmayı sağlamaya yardımcı olur. Bu karışımın enjeksiyonu karmaşık makine değişiklikleri gerektirmez ve doğrudan enjeksiyon ile uygulanabilir. Ancak, metanolün dizel ile karışmaması ve ilave yağlayıcılara ihtiyaç duyulması gibi zorluklar mevcuttur.
- CI makinelerde metanol kullanımı özel olarak tasarlanmış silindir kapakları ve enjektörler gerektirir.

Tablo 2.14 Metanol makine konseptleri. GEM, PC, LDV, HDV kısaltmaları sırasıyla benzin-etanol-metanol, yolcu arabası, hafif hizmet aracı, ağır hizmet aracını temsil eder. Marine ise deniz araçlarıdır[147].

Makine Türü	Enjeksiyon Modu	Yakıt Türü	Segment
Kıvılcım Ateşleme (SI)	Port Fuel Injection (PFI)	M0-M85, GEM	PC, LDV, HDV
	Direct Injection (DI)	M0-M85, GEM	PC, LDV, HDV
	Direct Injection (DI Lean)	M0-M85, GEM	PC, LDV, HDV
Sıkıştırılmalı Ateşleme (CI)	Dual Fuel (DF)	M0-M50	HDV, Marine
	Direct Injection (DI)	M100, MD95	HDV, Marine
	HCCL and PPC	M100	HDV, Marine
Yakıt Pili (FC)	-	M100	PC, LDV, HDV, Marine

Son olarak, kimyasal özellikleri metanolü genellikle SI makineler için daha uygun gösterse de, gerçek dünyadaki denizcilik uygulamaları çoğunlukla CI makinelerle ve CI makinelerin SI makine özelliği kazandığı uyarlamalarla gerçekleşmektedir. Dizel ile suyun metanol karışımlarında yer alma potansiyeli ilgi gören bir konudur. Bunun yanı sıra, CI makinelerde ateşleme unsuru olarak dizel ve birincil yakıt olarak metanolün kullanıldığı çift yakıtlı işletimin de önemli yer tuttuğunu belirtmek gerekir. Burada birincil amaç geleneksel yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve emisyonları düşürmektir, bu yüzden sürdürülebilir metanol üretiminin çevresel faydaları en üst düzeye çıkarmak için çok önemli olduğunu unutmamak gerekir.

2.2.5 Denizcilik Alanındaki Metanol Yakıt Projeleri

Çeşitli projeler metanolün gemiler için yakıt olarak kullanılmasını incelemeye odaklanmıştır. Bu bölümde, bu çalışmalardan birkaç örnek, örneklerdeki yöntemler ve de metanolün yanmasıyla ilgili olarak bu çalışmalardan elde edilen bilgiler aktarılmaktadır.

SUMMETH projesi kapsamında yürütülen çalışmalar kapsamında SI makine için PFI, CI makine için %95 oranında metanol içeren MD95 yakıtı, kısmi ön karışimli yanma ve doğrudan enjeksiyonlu kıvılcım ateşleme yaklaşımları sonuç raporunda yer aldı[148]. Aynı SUMMETH projesinin ayrıntılı bir raporunda[149] yazarlar, benzinli veya Otto çevrim makineleri olarak da tanımlanan SI makinelerin, yüksek oktan sayısı ve buharlaşma ısısına atfedilebilecek soğutucu etkisi nedeniyle metanolla çalışmaya elverişli olduğunu ve bunun da vuruntu ve erken tutuşma gibi sorunları azalttığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, yazarlar sıkıştırma oranının yükseltilebileceğini vurgulamışlardır.

SUMMETH proje raporlarında yer alan aşağıdaki hususlar dikkate değerdir

- Daha yüksek sıkıştırma oranını elde etme, özel bir yakıt enjeksiyon sistemi ve katalizör ilavesi, dizel çevrim/CI makinelerde alkol yakıtların kullanılması için yapılan değişiklikler ve gereklilikler arasındadır.
- En iyi performansın, dizel motorun başarımını geride bırakarak %53 verimlilikle saf metanol kullanılan kısmi ön karışimli yanma yaklaşımında görüldüğü bildirilmiştir. Hızlı yanma özelliğinin daha düzenli ve uygun olması için bölünmüş enjeksiyon veya geç difüzyon enjeksiyonuna ihtiyaç

duyulduğu düşünülmüştür. Ayrıca, soğuk marş problemi bu yaklaşımda önemli bir engel olarak kalmaya devam ederken PPC'nin daha da geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

- DI-SI için homojen ve kademeli enjeksiyonlar uygulanabilir. Kademeli enjeksiyon %51 verimlilik gösterirken, tekleme ve vuruntu riski ile sınırlandırılmış sınırlı bir çalışma aralığına tabidir.
- Eski CNG ve dizel makineler kıvılcım ateşleme ve port yakıt enjeksiyonu kullanılarak metanolle çalışacak şekilde değiştirilmiştir. Güvenlik donanımları, borular ve tanklar metanol kullanımına göre ayarlanmıştır. Her iki makine de Avrupa Birliği'nin iç sular için NOx emisyon sınırlamalarını karşıladı ve partikül madde salım değerleri belirlenen sınırların oldukça altında kaldı. Araştırma, metanol motorlarının dizel makinelerle benzer performans ve tork sağladığını ve gürültüde hafif bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Yazarlar, PFI-SI teknolojisinin maliyet etkinliğinin ve yerleşik geçmişinin altını çizerek, 1990'larda otomobillerde uygulandığını belirtmişlerdir. Bu da, söz konusu teknolojiyi kullanan uygulamaların entegrasyonunun karmaşık olmayabileceğini göstermektedir.

Daha önce anılan LeanShips ve SUMMETH projelerinin yanı sıra, metanolün bir deniz yakıtı olarak kullanımına odaklanan başka projeler de yürütülmüştür. İsveç İnovasyon Ajansı (Vinnova) tarafından desteklenen EffShip Projesi (2009-2013), düşük emisyonlu verimli gemicilik arayışıyla, erişilebilirlik, yerleşik altyapı ve deneyim, uygun fiyat, basit makine tasarımı gibi faktörler nedeniyle metanolün en iyi alternatif yakıt seçeneği olduğunu ileri sürmüştür[150]. Proje ayrıca atık ısı geri kazanımı ve rüzgar gücünden yararlanma gibi diğer yöntemler üzerinde de yoğunlaşmıştır.

SPIRETH Projesi, metanolün temiz bir deniz yakıtı olarak fizibilitesini gemi makinelerinde test ederek değerlendirmeyi hedeflemiştir. Stena Scanrail adlı ro-ro/yolcu feribotu metanol depolamak, kullanmak ve dağıtmak üzere donatılmıştır. Projenin nihai raporuna göre[151], maliyet ve performans hususları göz önünde bulundurularak, metanolden önce enjekte edilen pilot yakıt olarak dizel içeren bir yanma yaklaşımı benimsenmiştir. Aynı zamanda Stena Line, büyük bir ropax feribotu olan Stena Germanica'yı metanol operasyonu için dönüştürmeye karar

verdi. Stena Germanica'nın Wärtsilä markalı 4x6 MW kapasiteli makineleri de bir dönüşümden geçti. Metanol ile ilgili güvenlik endişelerini gidermek üzere, sızdırmazlık ve yağ kontrolü için çift cidarlı boru tesisatı uygulandı. Korozyon riskini azaltmak için metanol borularında paslanmaz çelik tercih edildi. Boru tasarımı, gerektiğinde boruların metanol muhtevsından arındırılmasına olanak sağlamış ve arındırma için dizel veya nitrojen kullanımı laboratuvar ortamında değerlendirilmiştir. Silindir kapakları değiştirilmiş ve egzoz valfleri metanolün neden olduğu daha yüksek aşınmaya dayanacak şekilde tadil edilmiştir. Proje den çıkan bir sonuç olarak, gemilerin metanol yakmaya uyarlanması olanaklı olduğu düşünülmektedir. Stena Germanica'nın tamamen metanolle çalışacak şekilde dönüştürülmesi İsveç Hükümeti tarafından teşvik edilmiştir[152].

Tablo 2.15 Stena Germanica'nın temel karakteristikleri [153].

Boy (m)	241
En	28.7
Su Çekimi (m)	6.15
Hız (knot)	21.5
İnşaa / Dönüşüm Yılı	2001/2007/2010
Kapasite	1300 yolcu ve 300 araç
Rota	Gothenburg-Kiel

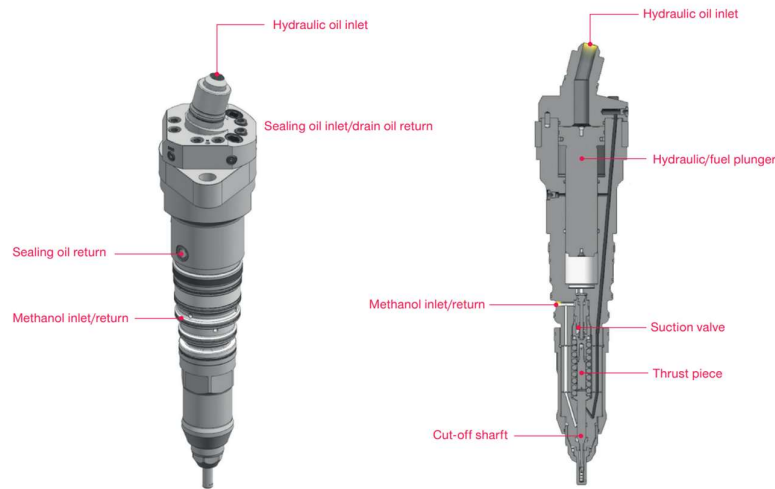


Şekil 2.12 Stena Germanica, kapsamlı bir yenilemenin ardından yeşil metanolle çalışan öncü gemi oldu. Fotoğraf [154]'ten alınmıştır.

45 ay süren MethaShip araştırma projesi Almanya Federal Ekonomi ve İklim Eylem Bakanlığı tarafından desteklenmiştir. Çeşitli disiplinler bir araya gelerek işbirliği yapmış ve metanolü bir deniz yakıtı olarak değerlendirmiştir[155]. Çevresel kaygılar, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik arayışı bu çalışmanın temel itici güçleri olmuştur. Metanolün sıvı fazı, gaz yakıtlara nazaran tercih edilebilir bir özellik olarak değerlendirilmiştir. Metanolün kıvamlı akaryakıt, dizel ve benzine göre daha çevre dostu olduğu ve biyolojik olarak parçalandığı için denizi kirlletme riskinin daha düşük olduğu belirtilmiştir. Metanolün yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesinin gerekliliğinin altı çizilirken, kömür veya doğal gazdan üretilmesinin büyük resimde fayda sağlamadığı vurgulanmıştır[156].

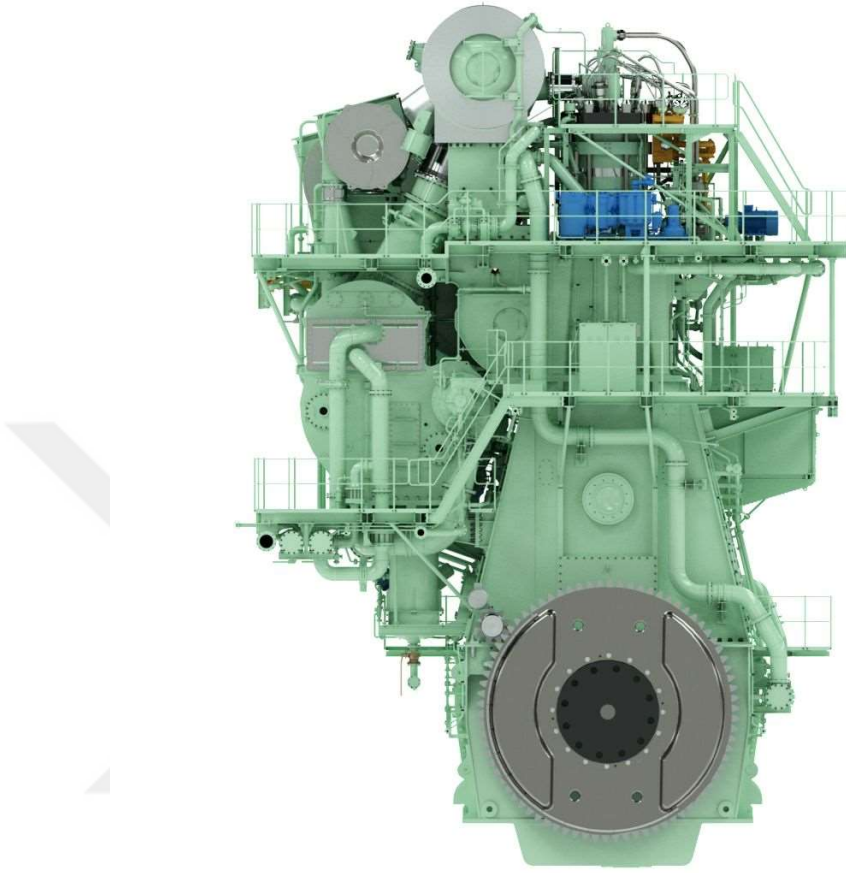
2.2.6 Metanol ile Çalışan Gemi Makineleri

Bu bölüm şu anda piyasada hazır ve geliştirilme aşamasında olan metanol makinelerine odaklanmaktadır. İki stroklu bir makine olan MAN B&W ME-LGI[157], düşük parlama noktalı sıvı yakıtların sıvı enjeksiyonuna izin verir ve şu anda bu makinelerden 26 adedi teknelerde kullanılmaktadır. NO_x emisyonlarını azaltmak ve Tier III gerekliliklerine uymak için tasarlanmış bir metanol-su karıştırma sistemine sahiptir. Sonuç olarak, egzoz gazı devridaimi veya seçici katalitik indirgeme (SCR) sistemlerine duyulan ihtiyaç giderilmiştir. Şu anda 150'den fazla ME-LGIM makinesi için siparişler veya mevcut durumda kurulumlar bulunmaktadır. Makine dizel yakıtla da çalışabilmektedir.



Şekil 2.13 Metanol enjeksiyonu için yakıt takviye enjeksiyon valfleri

(FBIV-M)'nin 3 boyutlu modeli ve kesiti[157]



Şekil 2.14 ME-LGIM (sıvı gaz enjeksiyonlu metanol) çift yakıtlı makineye ait görünüm[158].

Denizcilik sektörünün önemli aktörlerinden biri olan ve 2015 yılında Stena Germanica'nın makinelerinin metanolle çalışacak şekilde dönüştürülmesinde kilit rol oynayan Wärtsilä, ürün skalasında Wärtsilä 32 metanol makinesini de bulunduruyor. Bu makine birincil veya yardımcı makine olarak kullanılabilir ve metanol, MDO, HFO ve sıvı biyoyakıt dahil olmak üzere çeşitli yakıtlarla çalışabiliyor. Şu anda piyasada mevcut olan makine Tier II ile uyumludur ve SCR ile birleştirildiğinde Tier III ile uyumlu hale getirilebilir[159]. Wärtsilä 32 Metanol ürün kılavuzuna[160] göre, 4 stroklu makinenin metanol sisteminde yakıt dağıtımı için çift cidarlı yüksek basınçlı borular ve hortumlar, kontrol ve sızdırmazlık yağları, akış sigortası, enjeksiyon valfleri ve elektronik ray valfleri bulunmaktadır. Maksimum 750 rpm sürekli güçte çalışan makine, silindir konfigürasyonuna bağlı olarak 3480 ila 5220 kW güç aralığına sahiptir.

2.2.7 Metanol Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Metanol deniz yakıtının süperyatlar üzerindeki etkisinin yaşam döngüsü çerçevesinde incelenmesi önemli bir konudur. Wang ve diğerlerinin yürüttüğü bir çalışmada [161] 68 metrelik bir süperyatın 25 yıllık ömrü boyunca metanol de dahil olmak üzere çeşitli deniz yakıtlarının ekolojik külfet değerlendirilmiştir. Herhangi bir hizmet, mal veya mekanizmanın çevresel etkilerini değerlendirmek için yaygın olarak kabul gören bir yöntem olan yaşam döngüsü değerlendirmesi yönteminden yararlanılmıştır. Yazarlar, küçük süperyatların dahi çevresel sonuçları olduğunu vurgulamışlardır. Metanol için biri doğal gazdan diğeri yenilenebilir biyokütleden elde edilen iki farklı yol incelenmiştir. Analizde, metanolün CO₂ içeriği göz önünde bulundurularak Norveç'teki doğal gazdan elde edildiği varsayılmıştır. Metanolün Norveç'ten Birleşik Krallık'a taşınmasının, denizde MGO yakan bir tanker gemisi ile yapılacağı varsayılmıştır. Gazifikasyon ve saflaştırma süreçlerinden geçen biyokütleden elde edilen metanol için 200 kilometrelik ek bir yolculuk daha ilave edilmiştir. Çalışmanın amacı doğrultusunda, yatın %95 metanol ve %5 dizelden oluşan karışımla beslenen iki adet makineyle tahrik edilmesi öngörülmüş ve ilgili seyir koşulları için literatürden gerekli veriler elde edilmiştir. Yazarlar %75 makine yükü altında metanol ve dizel için spesifik yakıt tüketimlerini sırasıyla 327.2 g/kWh ve 17.2 g/kWh olarak kaydetmiştir. Çalışma, biyometanolün sıvılaştırılmış doğal gaz ve MGO'dan önemli ölçüde daha düşük küresel ısınma potansiyeli sergilediğini ortaya koymuştur. Biyometanol, sera gazı emisyonlarında %78.96'lık bir düşüş sağlama ihtimaliyle yatlara güç sağlamak için gelecek vaat eden bir aday olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2.16 Yukarıdaki çalışmaya konu olan süperyatın temel karakteristikleri.

Boy(m)	68
En(m)	12.5
Su Çekimi(m)	2.56
Ortalama Hız(knot)	12
Makine Gücü(kW)	1678
Jeneratör Gücü(kW)	565
Yıllık Çalışma Saati	860
Ömür Süresi(yıl)	25

2.2.8 Karbon Yakalama ve Depolamanın Önemi

Herzog, CCS'yi CO₂'yi yakalayabilen, iklim değişikliğine karşı mücadele eden araçlar olarak tanımlarken, yakalanan CO₂'nin petrolün geri kazanımı, bitki yetiştirme, yakıt sentezleme, yapı malzemeleri ve grafen ya da karbon fiber gibi fütüristik malzemelerin üretimi gibi çeşitli amaçlarla kullanılabileceğini belirtmektedir[162]. CCS teknolojisi, enerji santralleri ve çelik fabrikaları gibi büyük sanayi tesislerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını yakalayarak, ayrıştırarak ve daha sonra atmosfere geri karışmasını önleyerek oldukça uzun bir süre boyunca jeolojik oluşumların derinliklerinde güvenli bir şekilde depolayarak iklim değişikliğiyle mücadele etmeyi amaçlamaktadır[163]. Bu nedenle, CCS teknolojisi üç ana aşamaya ayrılabilir: endüstriyel kaynaklardan CO₂ emisyonlarının yakalanması, güvenli bir şekilde depolanması ve uzun vadeli zaptın gerçekleştirilmesi.

Hua ve diğerleri çalışmalarında[164], denizcilikte emisyonların azaltılması için hız sınırlamaları ve alternatif yakıtların düşünüldüğünü vurgulamıştır. Bununla birlikte, öncelikle termik santraller, çelik ve çimento endüstrileri için akıllara gelen CCS teknolojisi, denizcilik sektöründe henüz yaygın olarak benimsenmemiştir. Yazarlar, her birinin kendine özgü artıları ve eksileri olan, izlenebilecek üç farklı yöntemi tartışmışlardır. Bu yöntemlerden biri, CO₂'nin %90'ını bertaraf etme potansiyeline sahip olan yanma öncesi karbon yakalama yöntemidir. Bu strateji, CO₂ ve H₂ içeriğini ayırmak suretiyle fosil yakıtların yanmadan önce yeniden biçimlendirilmesini içermektedir. Bu işlem sonrasında H₂ bir hidrojen makinesine aktarılabilir, bu durum mevcut makine ve gemilerin modifiye edilmesinin pahalı olması nedeniyle gelecekteki gemiler için daha uygun bir yöntemdir. Oksi-yakıt yöntemi, yakıtın sadece oksijen içeren bir ortamda yanmasını müteakip, açığa çıkan su ve CO₂ yoğunlaştırılması yoluyla CO₂'nin muhafaza edilmesine dayanır. Ancak bu yöntem, kapsamlı modifikasyon ihtiyaçlarının öngörülen masrafları nedeniyle gemiler için uygun değildir. Enerji üretiminde halihazırda yaygın bir yöntem olan yanma sonrası yakalama, CO₂'nin yanma sonrasında muhafazası üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca gemi üzerindeki uygulamalar için daha pratik bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma sonrası yakalama; adsorpsiyon, membran ayrıştırma ve kimyasal absorpsiyon gibi varyasyonları kapsamaktadır.

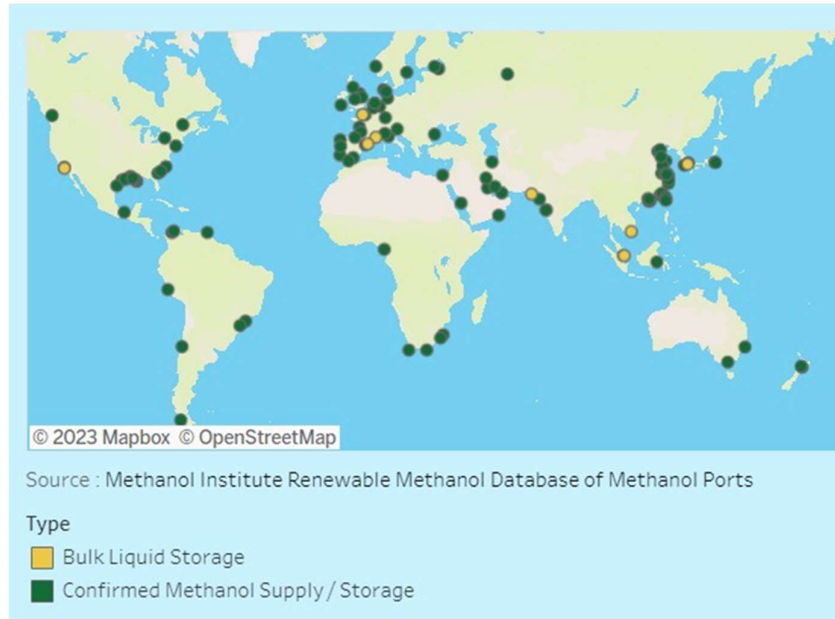
Turgut M. Gür, makalesinde[165], atmosferden doğrudan CO₂ yakalama kavramını mercek altına almıştır. Atmosferik CO₂ seviyelerini azaltma potansiyelini vurgularken, aynı zamanda uygulama ile ilgili teknik ve ekonomik zorlukları da dikkate almıştır. Yeni salımları önlemek için CCS sürecinin yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca CO₂'nin uzun mesafelerdeki depolama alanlarına taşınmasında boru hatları ve deniz taşımacılığının daha tercih edilebilir seçenekler olduğunun altını çizdi.

CCS, gemilerde başarılı bir şekilde uygulandığı takdirde daha temiz denizler ve daha yeşil bir geleceğin kapılarını açma potansiyeline sahiptir. Metanol gibi alternatif yakıtların kullanımı düşünüldüğünde önemi daha da belirginleşmektedir.

2.2.9 Metanol Ekonomisi

Bu bölüm, metanolün küresel bulunabilirliğine, dünya ekonomilerinin ve şirketlerinin metanol yakıtına yönelik tutumlarına odaklanmaktadır.

Wartsila'nın web sitesinden erişilen çevrimiçi bir article[166], metanolün dizelden daha pahalı bir yakıt olmasına rağmen, CII ve EEXI hedeflerini karşılayamayan gemilerin operasyon dışı kalacağı belirtilmiştir. Dolayısıyla konvansiyonel yakıtların maliyet avantajını artık koruyamayacağı yorumu yapılabilir.



Şekil 2.15 Metanol yakıtının halihazırda mevcut olduğu veya talep üzerine tedarik edilebildiği limanlar[167].

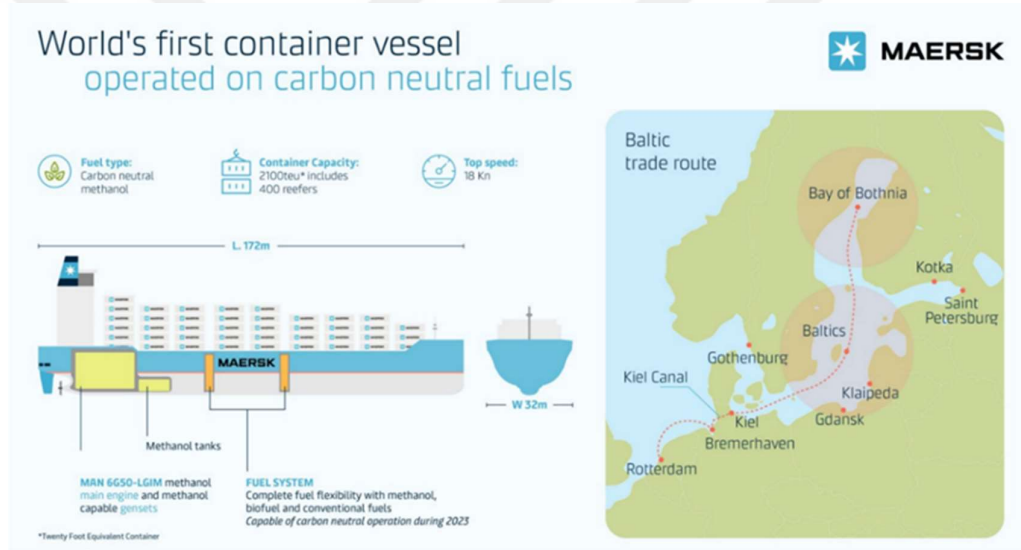
Gumber ve diğerlerinin raporunda[168] belirtildiği üzere alternatif yakıtlar üretmek için kömür ve fosil yakıtlar kullanmanın ve bunların yanında depolama ve taşıma aşamalarında önemli miktarda enerji israf etmenin bir çözüm getirmeyeceği açıktır. Yazarlar, arz miktarının fazlalığından ötürü doğal gazın yakın gelecekte metanol toplumuna birincil katkıyı yapacağını öngörmektedir. Hidrojen gelecek vaat eden bir yakıt olarak görünse de, elde edilmesi ve depolanmasıyla ilgili sorunlar yaygın kullanımını daha ileri bir tarihe ertelemektedir. Sonuç olarak yazarlar, enerji taşıma ve daha temiz bir yakıt olması açısından metanol ekonomisine odaklanılmasını önermektedir. Bernardo Burga'nın Bloomberg Terminal ve BNEF web sitesinde yayınlanan araştırmasında[169], aralarında Amazon, Ikea, Unilever ve Michelin'in de bulunduğu büyük ticaret şirketleri, lojistik faaliyetlerinde nakliye firmalarının çevre dostu yaklaşımlar benimsemesini savunuyor. Araştırma, Avrupa Birliği'nin emisyon sınırlarını aşan gemilere veya operatörlerine para cezası uygulamayı düşündüğünün altını çiziyor. Ancak, tamamen Avrupa sınırları içinde seyretmeyen gemiler için bu cezalar yarıya indirilecek. Her iki senaryoda, yenilenebilir metanol kullanan konteyner gemileri ekonomik bir avantaja sahip olacaktır. Ayrıca, 2050 projeksiyonunda gemilere güç sağlamak için metanol üretiminde önemli bir artışa ihtiyaç duyulduğu vurgulanmakta ve metanol üretim üsleri ile geleneksel yakıt ikmal merkezleri arasındaki mesafe önemli bir engel olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 2.17 Sıfır emisyon için çabalayan şirketler, sektörleri, hedef yılları ve 2023 itibarıyla metanol ile çalışan gemi siparişlerinin durumu[169][170]

Şirket	Merkez	Kategori	Net-Sıfır Hedefi	Metanol Gemi Siparişi
Maersk	Danimarka	Konteyner	2040	25
Evergreen	Tayvan	Konteyner	2050	24
Cosco Shipping	Çin	Konteyner, Kuru Yük, Tanker	2060	12
CMS CGM	Fransa	Konteyner, Tanker	2050	12
HMM	Güney Kore	Konteyner	2050	9

Maersk sürdürülebilirlik konusunda bütüncül bir yaklaşım benimsemekte, teslimatlar için elektrikli araçlar kullanmakta, yeşil liman ortakları tercih etmekte ve metanollü çift yakıtlı makinelerin tasarımı için MAN ile iş birliği yapmaktadır. Denizcilik faaliyetlerini yeşil hale getirmek için metanolü en uygun seçim olarak görmektedirler[170]. European Energy, Maersk'in gemilerine güç sağlamak üzere e-metanol üretmek için Danimarka'da bir tesis inşa ediyor[171].

Maersk tarafından işletilen dünyanın ilk yeşil metanolla çalışan konteyner gemisi, çevre dostu yakıt ikmalinde rol oynamak isteyen Mısır'ın Port Said limanından 6 saat içinde 500 ton yeşil metanol yakıtı alarak dolum sağlamıştır[172].



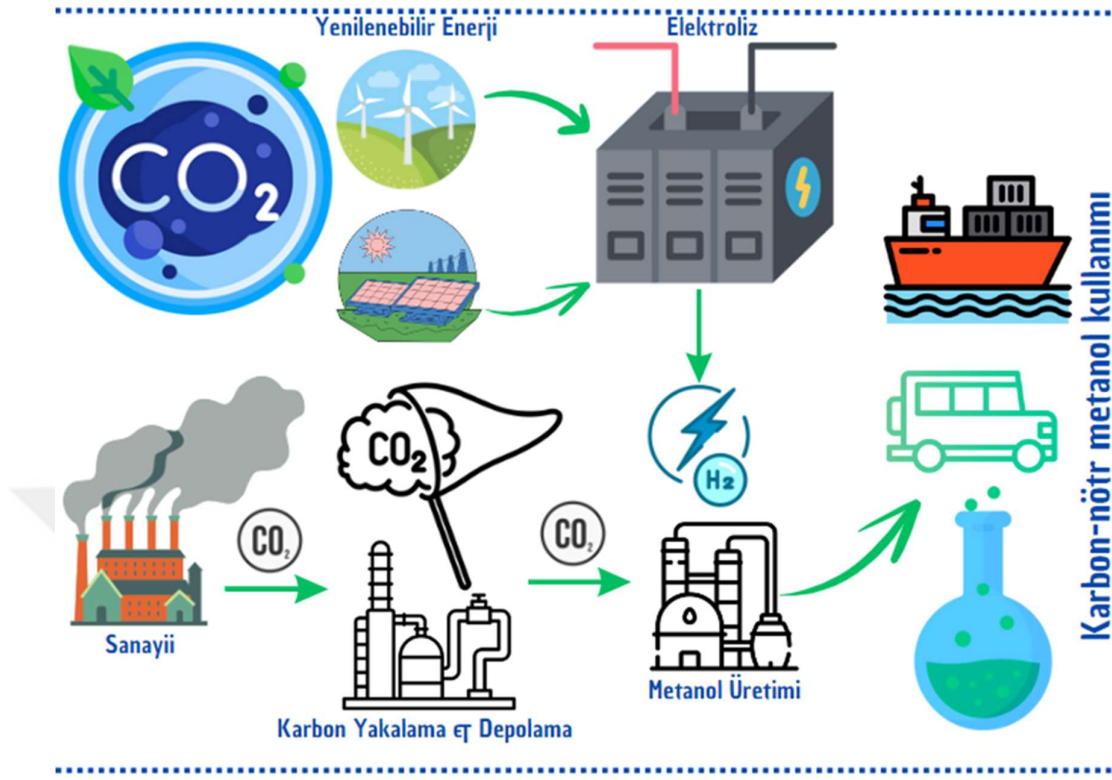
Şekil 2.16 Maersk tarafından işletilen ve e-metanol ile çalışan dünyanın ilk konteyner gemisi hakkında bilgilendirme görseli. Uzunluk, genişlik, hız, konteyner kapasitesi, motor konfigürasyonu ve rota gibi ayrıntıları içermektedir[173].

Lürssen ve Sanlorenzo gibi saygın yat üreticilerinin metanolü yatlara güç sağlamak için geleceğin yakıtı olarak görmeleri dikkat çekicidir [174][175]. Rolls Royce şu anda MTU 4000 serisini temel alan Otto çevrimini takip eden bir metanol makinesi geliştirmektedir. Bu girişim, şirketin bu teknolojinin ön saflarında yer alma kararlılığının bir yansımasıdır. Yeni makinenin 2026 yılında pazara sunulması beklenmektedir[176].

Tablo 2.18 Deniz yakıtlarının fiyat karşılaştırılması adına bir fikir oluşturmak adına 24.12.2023 tarihindeki bulgulara dayanarak hazırlanmıştır[177][178].

Yakıt	Maliyet(\$/Ton)	Bölge
Metanol	≈ 578	Avrupa
Metanol	575	Kuzey Amerika
Metanol	360	Çin
VLSFO	≈ 659.00	Avrupa & Orta Doğu (Ortalama)
MGO	≈ 882	Avrupa & Orta Doğu (Ortalama)
IFO380	≈ 521.5	Avrupa & Orta Doğu (Ortalama)

Yukarıdaki tablo, çeşitli deniz yakıtlarının fiyatlarını karşılaştırmak için çevrimiçi kaynaklardan elde edilen verilere dayanarak oluşturulmuştur. Yakıtın daha büyük ölçekteki maliyeti yüksek oranda yakıtın enerji yoğunluğuna bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, metanol geleneksel yakıtlardan daha düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir ve aynı enerji miktarını elde etmek için daha fazla hacimde metanol kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte, kirletici fosil yakıtların kullanımı için uygulanabilecek cezalar konunun bir başka yönü olmaya devam etmektedir. Pek çok saygın şirketin geleceklerini şimdiden metanol perspektifinde tasarladıkları özetlenebilir. Metanolün küresel olarak bulunabilirliği, satın alınabilirliği ve erişilebilirliği, metanolün yeni, temiz bir deniz yakıtı haline gelmesinde anahtar kavramlar olacaktır.



Şekil 2.17 Peppas ve diğerleri CO_2 kullanımı yoluyla metanol elde edilmesine yönelik artan eğilimi vurgulamaktadır[179]. Bu görsel araç, ęalışmalarının ana konseptini etkili bir şekilde yansıtmak için hazırlanmıştır. Burada yenilenebilir kaynaklardan metanol ¼retimi, tutulmuş karbondioksit, elektroliz gibi unsurlar kullanılarak karbon-n¼tr metanol eldesi ifade edilmektedir.

2.3 Amonyak

Amonyak (NH₃), oda sıcaklığında gaz halinde bulunan, alkali özelliklere sahip, renksiz, aşındırıcı bir kimyasaldır. Yaygın olarak üretilir ve günlük yaşamda çeşitli uygulamalarda geniş ölçüde kullanılır. En çok üretilen ikinci kimyasal olan amonyak, hidrojen ve nitrojenden oluşur[180]. Gübre, elyaf ve plastik hammaddesi olmasının yanı sıra, amonyağın önemi, soğutma için uygun sıkıştırılabilirlik, buharlaşma ve sıvılaşma sıcaklıklarına sahip çok yönlü bir soğutma sıvısı olarak da ortaya çıkmaktadır[181]. Amonyak aynı zamanda bir hidrojen/enerji taşıyıcısı olarak da değerlendirilebilir.

Tablo 2.19 Amonyagın özellikleri [182].

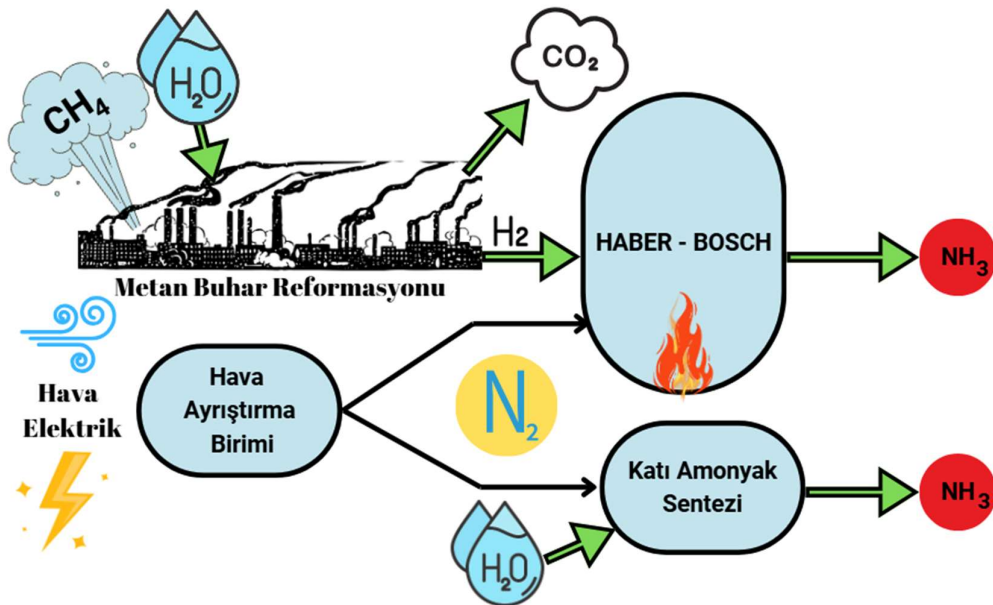
Özellik	Açıklama
Moleküler Gösterim	H ₃ N (NH ₃)
Moleküler Ağırlık	17.031 g/mol
Koku	Rahatsız edici
Kaynama Noktası	-33.35 °C
Erime Noktası	-77.7 °C
Parlama Noktası	132 °C
Yoğunluk (sıvı)	0.696 g/L
Yanma Isıl Değeri	382.8 kJ/mol (gaz)
Buharlaştırma Isısı	5.581 kcal/mol
Kimyasal Sınıf	Aşındırıcı Gaz

2.3.1 Amonyak Üretimi

Machaj ve diğerleri incelemelerinde[183], öncelikli olarak tarımda kullanılan amonyağın artan insan nüfusuyla doğru orantılı olarak üretiminin arttığını belirtmişlerdir. Bu geniş çaplı üretimin, sevkiyat ve depolama konusunda değerli bir deneyim kazandırdığını ve amonyak depolama maliyetinin hidrojenden 16 kat

daha az olduğunu vurgulamışlardır. Ağırlıkça % 17.6 hidrojen içeren ve etkili bir hidrojen taşıyıcısı olan amonyakın en büyük dört üretici ülkesi Çin, Rusya, Hindistan ve ABD'dir. Özellikle Çin ve Hindistan'ın, yüksek üretim oranlarına rağmen, hala amonyak ithal ettikleri araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir.

Dinçer ve Siddiqui yayınlarında[184], amonyak sentezi için temel teknik olarak Haber-Bosch sürecine işaret etmişlerdir; burada sera gazı salan doğal gaz (%70) ve kömür (%20), gerekli hidrojeni elde etmek için metan buhar reformasyonu için birincil hammadde görevi görmektedir. Çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif elde etmek için yazarlar, yeşil hidrojen üretmek üzere çeşitli su elektrolizi yöntemlerini ve yoğunlaşma yoluyla havadan saf nitrojen elde etmek için kriyojenik hava ayırıştırma işlemini tartışmışlardır. Yazarlar tarafından tartışılan son yöntem, suyun doğrudan reaktörün anot tarafına verildiği ve hidrojenin adsorpsiyon yoluyla elde edildiği katı hal amonyak sentezi yöntemidir. Bu yaklaşımda amonyak sentezini kolaylaştırmak için bir dizi elektrokimyasal reaksiyon kullanılmaktadır.

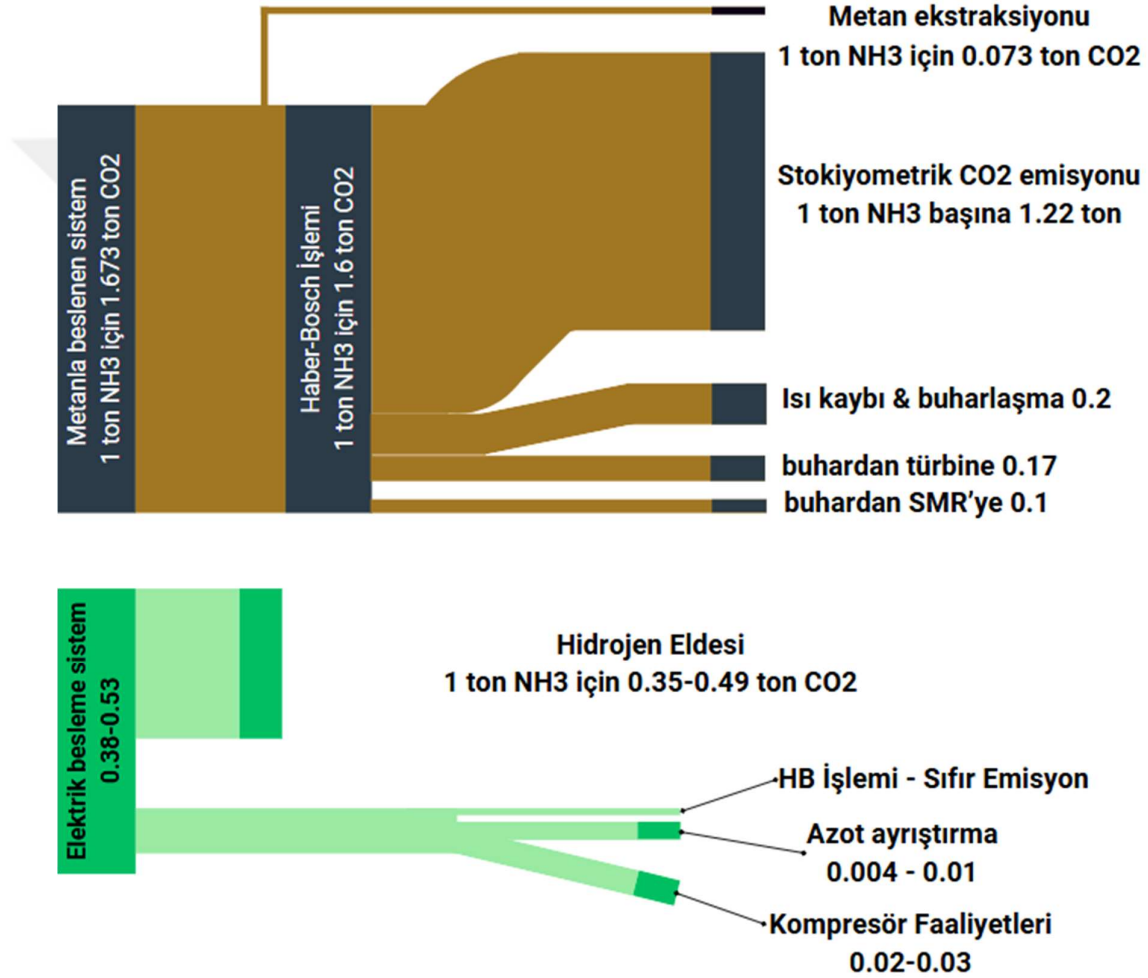


Şekil 2.18 Amonyak üretim yolları [184]

Yukarıdaki görselden de anlaşılacağı üzere, H₂ çevre dostu bir şekilde elde edilsin ya da edilmesin, Haber-Bosch prosesinin yeri yadsınamaz. Alman bilim adamı Fritz Haber, hidrojen ve azottan amonyak elde etmek için uygulanabilir bir yöntem geliştirdiği için 1918 yılında Nobel Ödülü'ne layık görülmüş, Carl Bosch ise

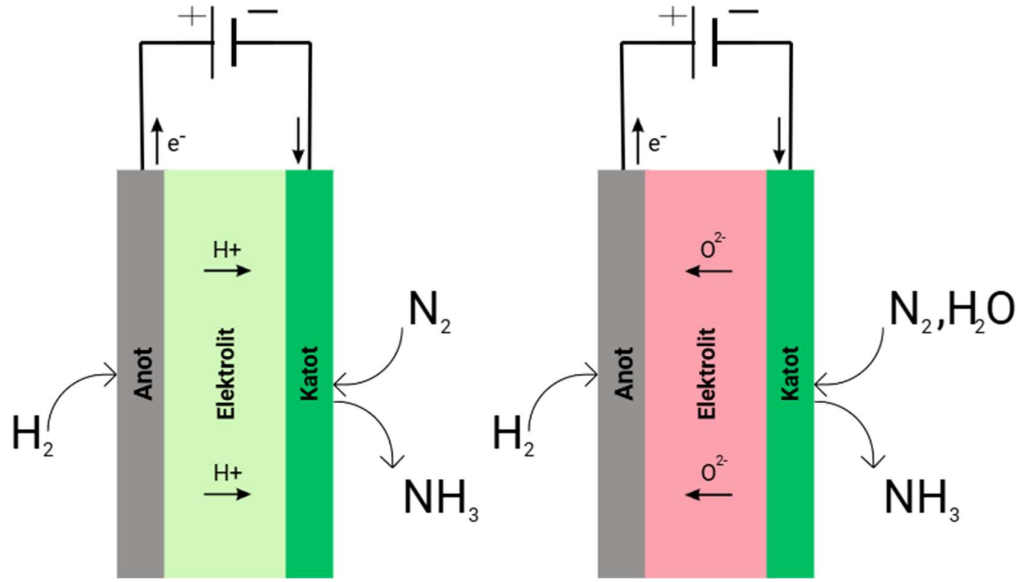
katalizör ilavesi ve yüksek basınç uygulamasıyla yönteme katkıda bulunmuştur[185].

Demir katalizörlerin sürece katkıda bulunduğu ve tepkenlerin %15'inin amonyağa dönüştürülüp geri kalanının geri kazanıldığı kimyasal reaktörde sıcaklık değerleri 300 ila 550 °C arasında değişirken, basınç 200 ila 300 bar arasında tutulmaktadır [186].



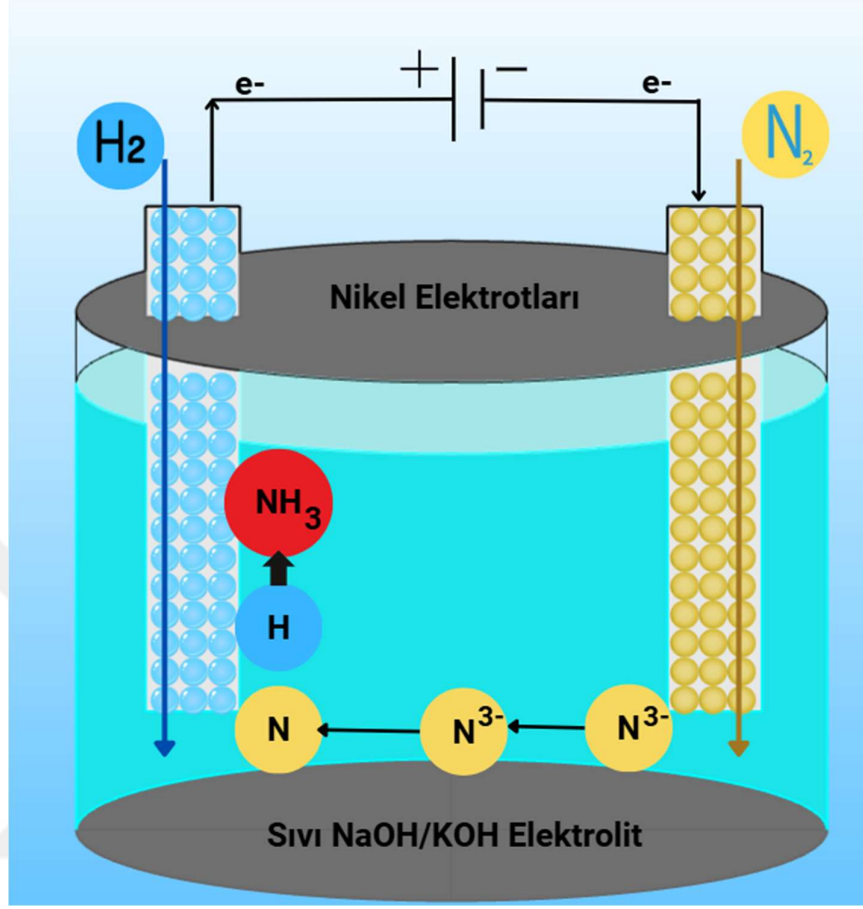
Şekil 2.19 Sankey Diyagramı, metanla ve elektrikle beslenen Haber-Bosch proseslerinin CO₂ emisyonlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Elektrik sistemi değerlerindeki dalgalanmalar rüzgar türbinlerinin performansındaki farklılıklara bağlanmaktadır. Değerler, ton NH₃ üretimi başına salınan ton CO₂'yi göstermektedir. Yeşil hidrojen ve yenilenebilir elektrik kullanımının emisyon profili üzerinde yadsınamaz bir etkisi olduğu sonucuna varılabilir, [187]'den uyarlamadır.

Nispeten yeni olan elektrokimyasal amonyak üretimi geleneksel yöntemlere daha sürdürülebilir bir alternatif sunabilir. 1998 yılında Marnellos ve Stoukides, katı hal proton iletkenleri ile amonyak sentezinin elektrik kullanarak ve yüksek basınca ihtiyaç duymadan mümkün olduğunu göstermiştir[188]. Katı hal amonyak sentezi (SSAS) katı bir elektrolit ve elektrot olarak gözenekli metal filmler içerir[189]. İki atomlu gaz molekülü H_2 protonlara dönüşür ve elektrokimyasal olarak katoda taşınır, burada iki atomlu gaz molekülü N_2 ile reaksiyona girerek NH_3 üretir[190]. Bu, daha temiz ve çevre dostu amonyak üretimi için ilgi uyandırıcı olabilir.



Şekil 2.20 Katı hal amonya sentez cihazı [191].

Yüksek basınca ihtiyaç duymadan amonyak sentezlemek için kullanılan bir diğer elektrokimyasal yöntem de erimiş tuz(molten salt) amonyak sentezidir. Bu süreçte N^{3-} anyonları, hidrojenle reaksiyon için erimiş bir tuz ortamında anot tarafına taşınır[192].



Şekil 2.21 H_2 ve N^{3-} iyonlarının tepkimeye girdiği erimiş tuzda NH_3 eldesi.
[193]'ten yeniden çizilmiştir.

2.3.2 Amonyak Depolanması

Amonyak, çevre dostu ve enerji verimli bir yöntemle sentezlendikten sonra, son kullanıcıya dağıtılana kadar depolanması söz konusu olacaktır. Mevcut altyapıya uygun olmasının avantajını bulunduran kimyasal gazın depolanması düşük sıcaklık ve yüksek basınç altında sıvı halde, katılara adsorpsiyonla, coğrafi bir formasyon olan mağara oyukları altında ve çeşitli kimyasal bileşikler halinde olabilir[194].

Amonyak dikkatle muamele edilmeli, kullanılmalı ve yaklaşılmalıdır. Yüksek amonyak konsantrasyonları cildi, akciğerleri ve gözleri ciddi şekilde etkileyebilir ve aşırı durumlarda ölüm riski doğurabilir[195].

Max Appl, Ullman's Encyclopedia of Chemicals'ın amonyağa tahsis edilen bölümünde[196] aşağıdaki noktaların altını çizmektedir:

- Ürünü sahadan kullanıcıya aktarmak için denizaşırı nakliye, depo vagonları, demiryolları ve boru hatları dahil olmak üzere çeşitli nakliye yöntemleri kullanılabilir.
- Amonyak çoğunlukla sıvı halde taşınır, ancak buhar halinde taşınması da mümkündür.
- Oda sıcaklığında amonyak, yüksek gerilimli veya ince taneli çeliklerden yapılmış küresel ve silindirik kaplarda basınç altında depolanabilir. Stres korozyonu çatlaması riski nedeniyle kaynak sonrası ısıtıl işlem gereklidir. Ayrıca, çevre sıcaklığı yüksekse, güneş radyasyonuna karşı dış yalıtım kullanılabilir.
- Basıncılı depolama daha düşük miktarlarda amonyak depolamak için daha uygundur. Atmosferik basınçta amonyak, yalıtımlı tek veya çift cidarlı kaplarda -33 santigrat derecede depolanabilir.
- Yeraltında depolama, kirlenme ve jeolojik uygunluk sorunları nedeniyle yaygın ancak Amerikan kimya şirketi DuPont ve Norveçli yenilenebilir enerji şirketi Norsk Hydro bu depolama yöntemiyle ilgili bir deneyime sahiptir.
- Amonyagin daha büyük ölçekte ve uzun mesafeler boyunca aktarılması için boru hatlarının kullanılması, mavnaların ve demiryollarının kullanılmasına göre daha uygun maliyete sahiptir.

2.3.3 Alternatif Yakıt Olarak Amonyak

Yanarak enerji açığa çıkaran yakıtların amacı, elektrik üretimi, gemilerin tahriki, odaların ısıtılması gibi çeşitli uygulamalar için gerekli ısı veya gücü sağlamaktır. Amonyak kullanımının ardındaki motivasyon, karbon içermeyen doğasıdır. Amonyak, İYM'lerde ve yakıt hücrelerinde kullanılma potansiyeline sahiptir.

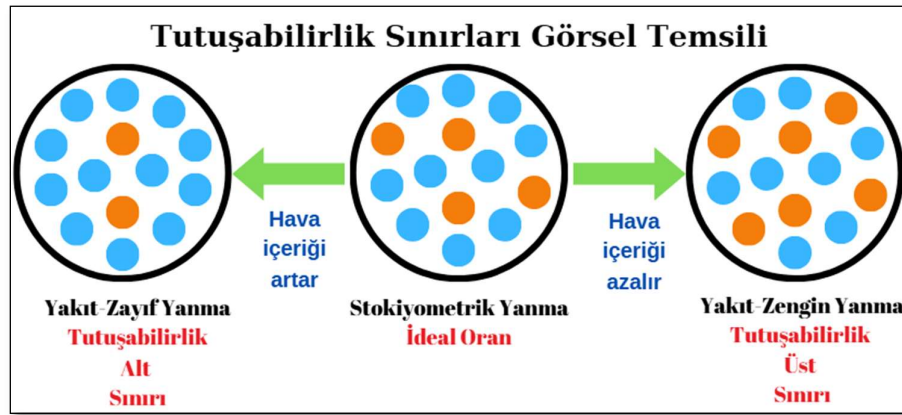
Yapıcıoğlu ve Dincer çalışmalarında[197] yakıtın bazı olumsuz özelliklerini aşağıdaki gibi ele almıştır;

- Yavaş alev hızı
- Düşük alev sıcaklığı
- Yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığı. (650 C°)

Yazarlar ayrıca amonyak yakıtının emisyon azaltıcı avantajlarını korumak için bir yanma destekleyicisi kullanılmasının gerekli olacağını belirtmişlerdir.

Garabedian ve Johnson tarafından 1966 yılında yayınlanan makaleden[198] amonyağın yakıt özelliklerine ilişkin aşağıdaki hususlar kayda değerdir:

- Amonyak oldukça yüksek bir kendiliğinden tutuşma sıcaklığına sahiptir. Yakıtın bu özelliği, kıvılcım ateşlenmeden önce daha yüksek bir sıkıştırma oranı elde edilebileceğinden, bir SI motor için faydalı olan gecikmelere neden olabilir. Ancak aynı özellik CI motorlar için uygun olmayabilir çünkü aşırı sıkıştırma oranları gerekebilir.
- Amonyak yüksek bir gizli buharlaşma ısısına sahiptir. Bu özellik yanma odasında sıcaklığın düşmesine neden olur ve bu nedenle özellikle CI makinelerde zorluklar çıkarır. Gizli buharlaşma ısısı, maddenin kendisinde bir sıcaklık değişikliğine neden olmadan bağlar oluşturarak ya da deforme ederek faz değişimine (yoğuşma/ buharlaşma) neden olan ısı enerjisi miktarını ifade eder.
- Amonyak yakıtı, SI motorlarda yanmayı zorlaştırabilecek dar bir yanıcılık aralığına sahiptir, ancak bu sorun uygun tasarımla ortadan kaldırılabilir. Buradaki dar yanıcılık aralığı veya yanıcılık sınırı, yanmayı sürdürebilen hava-yakıt karışımının çeşitli konsantrasyonlarını ifade eder.
- Yavaş alev hızı, amonyağın sahip olduğu özellikle SI makinelerde tamamlanmamış yanma sorununa yol açabilecek bir diğer unsurdur.



Şekil 2.22 Hava-yakıt oranı[199] tarafından tayin edilen tutuşabilirlik sınırlarının görselleştirilmesi, [200]’den esinlenilerek yeniden çizilmiştir. Bu görsel yakıt-zayıf yanma, stokiyometrik yanma ve yakıt-zengin yanma kavramları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yakıt-zayıf yanma, hava-yakıt karışımının stokiyometrik orana kıyasla daha yüksek oranda hava/oksijen içerdiği bir yanma sürecini ifade

eder. En yakıt-zayıf yanma sınırı aynı zamanda yakıtın alt yanıcılık sınırını temsil eder. Stokiyometrik yanma, hava-yakıt karışımı tam yanma için ideal orandayken, tüm yakıtın yeterli havanın varlığıyla yandığı durumda gerçekleşir. Stokiyometrik karışımdan daha yüksek miktarda yakıt içeren karışımlar yakıt-zengin yanmaya yol açar ve en zengin yanma eşiği üst yanıcılık sınırını oluşturur.

2.3.4 Amonyakın Yanma Profili

Yakıtın ısı ve basınca maruz kaldığında gösterdiği davranış, kimyasal ve fiziksel özelliklerinden etkilenen yanma profilini oluşturur. Bu yanma profilinin incelenmesi, amonyak da dahil olmak üzere herhangi bir yakıtın bir İYM'de kullanılması için değerlidir ve verimli kullanımına ilişkin yararlar ve içgörüler sunar.

Kobayashi ve diğerleri çalışmalarında[201], düşük yanma hızı sorununu gidermek için hidrojen ilavesiyle alev yayılımını iyi gerekliliğini vurgulamışlardır. Amonyakın ısı yollarla hidrojene dönüştürülebilmesi nedeniyle hidrojen ilavesinin harici bir hidrojen depolaması gerektirmediğine dikkat çekmişlerdir. Ayrıca, yanma oda-sındaki oksijen içeriğini zenginleştirerek daha yüksek alev sıcaklıkları ve daha iyi yayılma elde edilebileceğini öne sürmüşlerdir.

Elbaz ve diğerleri tarafından yürütülen çalışma[202] birkaç önemli noktaya vurgu yapmaktadır:

- Amonyak diğer yakıtlardan farklı olarak benzersiz bir yanma profili sergiler.
- Laminer yanma hızı, yanmanın istenen koşullar altında sürdürülmesinde büyük önem taşır.
- Amonyakta CO₂ bulunmaması alevin daha yavaş yayılmasına katkıda bulunur.
- Amonyak, kendiliğinden tutuşma için daha düşük bir eğilim gösterir, bu da tutuşma gecikmelerine neden olur ve tutuşma için daha yüksek sıkıştırma oranları gerektirir. Ancak, hidrojen ilavesi bu sorun için azaltıcı bir etmen olarak tanımlanmıştır.

Herbinet ve diğerleri önemli bilgiler içeren bir rapor[203] derlemişlerdir. Çalışmadan çıkarılan birkaç önemli husus aşağıdaki gibidir:

- Ayrıntılı bir kinetik model, olayın kimyasal yönlerine ilişkin değerli bilgiler sağlayabileceğinden, amonyak kinetiği çeşitli çalışmalarda dikkat toplamıştır. Yanma davranışını anlamaya yönelik güvenilir yaklaşımlar elde etmek için, bilgisayarların hesaplama gücü CFD kodlarını işlemek için kullanılabilir.
- Kuantum-kimyasal hesaplamalar ve deneysel veriler, gerekli termodinamik özellikleri ve kinetik katsayıları karşılayabilir. Bununla birlikte, amonyağın yanma olayını tam olarak anlamak için hala kaydedilmesi gereken ilerleme ve kapsamlı deney verilerine ihtiyaç vardır.
- NO_x emisyonları ve yanmamış NH₃ gibi dezavantajlar amonyağın yakılmasıyla ilişkilendirilir. Bu sorunlar, çift yakıtlı bir yöntemin uygulanması yoluyla aşılabılır.
- Amonyağa hidrojen eklenmesi, NO_x emisyonlarının artması riski nedeniyle dikkatle değerlendirilmelidir. Nihai amaç verimliliği artırmak ve emisyonları azaltmaktır.
- Aşamalı bir yanma stratejisi, katkı maddeleriyle amonyak yanmasında NO_x emisyonlarını azaltmada faydalı olabilir. Bu yaklaşımda, ilk aşamada yakıt-zengin yanma ve ardından kalan tepkenleri oksitlemek için yakıt-zayıf yanma gerçekleştirilir.
- Amonyak, yakıt pilleri için doğrudan bir besleme görevi görebilir veya hidrojen yakıt pillerini besleyen bir hidrojen taşıyıcısı olarak işlev görebilir.

Dimitriou ve Javaid tarafından yazılan bir inceleme makalesi [204] birkaç önemli noktayı vurgulamaktadır:

- Yazarlar hem yanma odasına doğrudan enjeksiyonu hem de emme manifolduna enjeksiyonu amonyak yakıtı sağlamak için geçerli yöntemler olarak kabul etmektedir.
- Yalın(yakıt-zayıf) veya düşük sıcaklıkta yanma stratejileri NO_x emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilir.
- İçten yanmalı bir motoru amonyakla çalışacak şekilde uyarlamak karmaşık geometrik değişiklikler gerektirmez, ancak yakıt dağıtım ve depolama sistemlerinde düzenlemeler yapılması gerekir.
- Bilhassa CI makinelerde çift yakıt stratejileri etkili olabilir ve amonyak yakıt karışımının % 95'ini oluşturabilir.

- İkincil yakıtın setan sayısı performans açısından önemlidir ve ikinci yakıtın enjeksiyon yöntemi NO_x emisyonlarını etkileyebilir.
- Amonyak yakıtlı makineler, depolama ve son işlem sistemleri için yer müsaitliğinden ötürü mevcut durumda denizcilik uygulamaları için daha uygundur.
- Bakır, nikel ve plastik gibi amonyak kaynaklı korozyona eğilimli malzemelerden kaçınılmalıdır.
- Yanma davranışı açısından amonyak metanolden daha iyi değildir; ancak karbon atomu içermemesi, önemli miktarda hidrojen içermesi ayrıca dağıtım ve depolama için elverişli olması onu kayda değer bir seçenek haline getirmektedir.

Tianxin Li ve diğerleri raporlarında[205], amonyağı karbon içermeyen yapısı nedeniyle gözde bir enerji taşıyıcısı olarak kabul etmektedir. Bu bağlamda çalışmalarında dikkat çekilen aşağıdaki hususlar önemlidir:

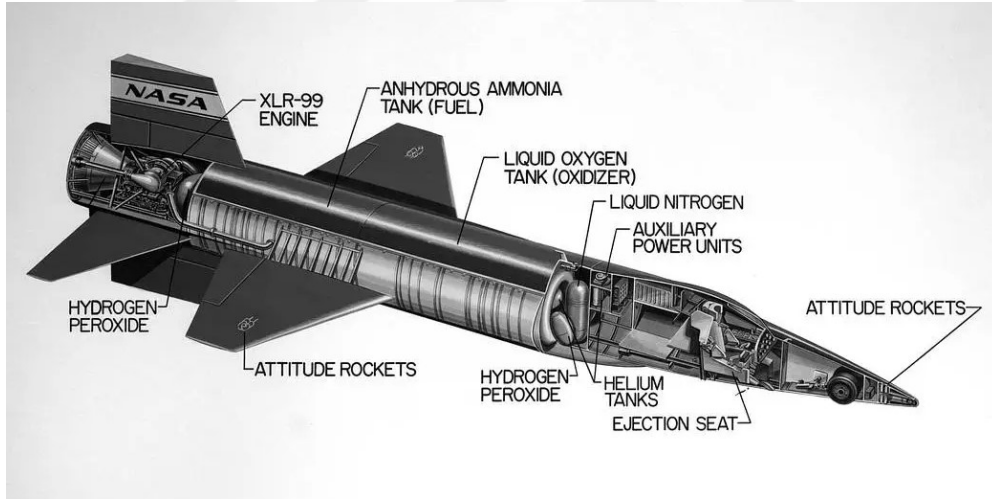
- Amonyağın yanma profilini gerçekçi bir şekilde anlamak için laminar yanma hızını ve tutuşma gecikme süresini incelemek çok önemlidir.
- Hidrojen/metan gibi yakıt katkıları, artan oksijen içeriği ve yüksek sıcaklıklar amonyağın yavaş yanma hızının telafi edilmesinde faydalı olabilir.
- Amonyağın tutuşma sıcaklığı, karışımdaki hidrojenin sadece % 5'lik mol oranı ile 100 K (173.15°C'ye eşdeğer) düşürülebilir. % 1'lik bir hidrojen içeriği bile bir fark yaratabilir.
- Amonyağın yanması ile ilgili önemli zorluklar arasında NO_x emisyonları, tutuşma gecikmesi ve yavaş laminar alev hızı yer almaktadır.

Özetlemek gerekirse, çeşitli çalışmalar amonyağın benzersiz yanma özellikleri sunduğunu ortaya koymuştur. Daha yavaş bir alev hızıyla yanmakta ve daha yüksek sıkıştırma oranlarına ihtiyaç duymaktadır. Tutuşma gecikmesi katkı maddeleri ile iyileştirilebilir. Ayrıca dar bir yanıcılık aralığına sahiptir. Amonyak bazlı yanma teknolojilerinin verimliliğinin artırılması ve NO_x oluşumunun azaltılması ana hedeflerdir.

2.3.5 İçten Yanmalı Makinelerde Amonyak

Amonyacı alternatif bir yakıt olarak değerlendirdikten ve yanma profilini kısaca inceledikten sonra, mevcut bölüm içten yanmalı motorlarda kullanımını araştırmayı içermektedir. Amaç, yeşil amonyacı verimli ve çevre dostu bir şekilde yanması yoluyla ısı enerjisi üretmektir.

Amonyacı bir yakıt olarak yanma odasına girmesi tarihte ilgi uyandırıcı bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. Kısıtlılar insanları farklı çözümler bulmaya itmiştir. Dizel yakıtın kısıtlı temin edilebildiğı 2. Dünya Savaşı sırasında Belçika'da Emeric Kroch tarafından yapılan, amonyak ve kömür gazıyla çalışan motorlara sahip otobüsler kullanılmıştır[206]. Amonyak ayrıca 1960'larda Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ve Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri (USAF) tarafından uzay uçuşu programlarının öncüsü olarak işletilen X-15 Hipersonik Araştırma Uçağı/Roketi'nin motorlarına güç sağlamak için kullanılmıştır[207].



Şekil 2.23 X-15 Roketinin NASA tarafından gösterilen 3D modeli ve kesit görünümü[207]

2024'e kadar amonyakla çalışması beklenen karayolu araçlarının gündemdeki konulardan biri olduğuna dikkat çekilebilir. Teknoloji haber platformu Gizmochina'ya göre, amonyacı yavaş yanma sorunu çözülmüş ve % 90 emisyon azaltma potansiyeline sahip, binek araçlara güç verebilecek bir motor Çin Devletine ait Guangzhou Automobile Group Co. ve Toyota ortaklığıyla geliştirilmiştir[208]. MAN ve Wartsilä gibi şirketler, yakıtın deniz taşımacılığında önemli bir seçenek

haline geleceğine inanıldığından, amonyakla çalışabilen gemi makineleri için çözümler geliştirmiştir. Bu şirketlerin faaliyetleri daha sonra kısaca ele alınacaktır. Kısa bir tarihsel arka planın ardından, içten yanmalı makinelerde amonyak kullanımı SI ve CI olarak ayrı ayrı ve daha derinlemesine incelenecektir.

2.3.5.1 Kıvılcım Ateşlemeli Makinelerde Amonyak

Benzinli veya Otto çevrimli makineler olarak da bilinen SI motorları, silindir içindeki bir buji tarafından ateşlenen hava-yakıt karışımının kontrollü yanması yoluyla güç üretir. Yüksek oktanlı yakıtlar için özellikle uygun olan SI makineleri, yanmayı başlatan bir buji ile donatıldıklarından, amonyağı hiçbir katkı olmaksızın yakmak için bir potansiyele sahiptir; ancak alternatif yakıtın reaksiyona girme konusundaki isteksizliği ve kaotik yanma sorunları hala aşılmayı beklemektedir[209]. Kendi kendine tutuşma isteksizliği nedeniyle SI makineler için uygun olmasına rağmen; amonyağın yüksek tutuşma sıcaklığı (651°C), yüksek gizli ısı, emisyon katkısında bulunan nitrojen içeriği, düşük kaynama noktası ve sonuç olarak literatüre göre benzine kıyasla % 20 daha düşük güç verimliliği dikkatli bir değerlendirme gerektirmektedir[210].

ABD Ordusunun fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmak amacıyla General Motors'un araştırma laboratuvarlarında tek ve çok silindirli SI makineler üzerinde yürütülen bir değerlendirme çalışması[211] aşağıda özetlenen bazı kayda değer bulgular ortaya koymuştur:

- Amonyak, sıradan otomotiv tipi bir ateşleme mekanizması kullanılarak ateşlenmiş ve tek silindirli SI test motorunda sınırlı hız aralığında çalışması sağlanmıştır.
- Tek silindirli SI motor çalışmaları sırasında amonyak yakıtının performansının nispeten düşük olduğu ve benzinin gerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Aynı SI test motorunda elde edilen en yüksek termal verimlilikler saf amonyak için % 21 ve benzin için % 38 olmuştur.
- Anılan performans sorununu ele almak için, boşluk boyutu ve diğer ateşleme mekanizması ayarlamaları yoluyla kıvılcım enerjisini artırmak, birden fazla noktadan ateşleme yapmak, düz ve kademeli başlı pistonlar kullanarak daha yüksek sıkıştırma oranları elde etmek, süper şarj ve

hidrojen gibi yakıt katkı maddeleri kullanmak dahil olmak üzere çeşitli çözümler önerilmiştir

- Beklentilerin aksine, çok silindirli çalışmalar, amonyak yakıtlı motorların güç çıkışının, süper şarjlı olsa bile, geniş hız aralıkları arasında normal koşullar altında benzinle çalışan motorların altında kaldığını ortaya koymuştur.
- Çalışma, yüksek oktan sayısına sahip amonyağın SI motorlarda kullanılabileceğini, ancak ateşleme destekleyicilerinin eklenmesi ya da modifikasyonlar yoluyla performansının artırılması gerektiğini vurgulamıştır.

Tornatore ve diğerlerine göre, son çalışmalar yanmayı iyileştirmek ve tüm yük aralıklarında çalışmayı sağlamak için birincil yakıt olarak amonyağın yanına hidrojen veya metan eklenmesinin tercih edildiğini göstermektedir; ayrıca, lojistik veya depolama ile ilgili zorluklar nedeniyle ayrı olarak depolamak yerine amonyağın ayrıştırılması yoluyla hidrojen elde edilmesi tercih edilmektedir ve motorun egzoz gazı gerekli ısı enerjisini sağlayabilmektedir[212].

Çalışmalarında[213], Frigo ve Gentili, hidrojen ilavesiyle birlikte esas olarak amonyakla çalışan 4 stroklu kıvılcım ateşlemeli makinenin performansını araştırmayı ve aynı zamanda tüm makine hızı ve yükleri boyunca uygun enjeksiyon zamanlamaları ve besleme hattı basınçları hakkında bilgi edinmeyi amaçlamıştır. Çalışmalarından aşağıdaki noktalar aktarılabilir:

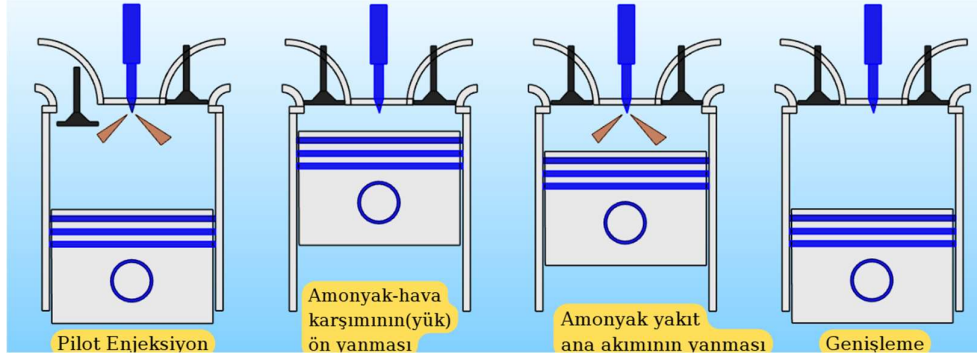
- Makinede değişikliğe uğrayan tek bileşen emme manifoldu olup, burada gaz halindeki amonyak ve hidrojenin girişini kolaylaştırmak için elektro-enjektörler (LPG uygulamalarında kullanılanlara benzer ancak düzenlenmiş iç parçalara sahip) eklenmiştir.
- Özellikle soğuk marş koşullarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Amonyak katalitik reformasyonu gerekli miktarda hidrojen sağlayamadığından, daha sonra yeniden doldurulabilecek bir kaptaki belirli miktarda hidrojen depolanması gerekmiştir.
- Yazarlar, amonyaktan elde edilebildiği ve yanma sürecini hızlandırdığı için hidrojenin amonyak alternatif yakıtına en uygun katkı maddesi olduğu sonucuna varmışlardır.

- Çalışma, amonyak-hidrojen birlikteliğinin benzinle çalışmaya kıyasla daha düşük performans gösterdiğini bildirmiştir.

Özetle, amonyak SI makinelerde yakıt olarak tek başına kullanılabilse de, verimliliği beklentileri karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Dolayısıyla, bir yanma destekleyicisinin eklenmesi gereklidir. Bu destekleyiciler arasında hidrojen en temiz seçenek olarak öne çıkmaktadır ve amonyağın kendisinden üretilir.

2.3.5.2 Sıkıştırma Ateşlemeli Makinelerde Amonyak

Bu bölümde ilk olarak CI makinelerin salt amonyakla çalıştırılmasına yönelik stratejilere odaklanılacaktır. Kimyasal özellikleri nedeniyle salt amonyak yakıtıyla çalışmak CI makineler için elverişli değildir. Salt amonyak yakıtının ateşlenmesi 35:1 gibi yüksek bir sıkıştırma oranı gerektirmektedir ve bu oran setan sayılarına bağlı olarak pilot yakıtların kullanılmasıyla 12:1'e düşürülebilmektedir[214]. Amonyağın hem salt yakıt hem de pilot yakıt olarak kullanıldığı ilginç bir çalışma dikkat çekmektedir. Lee ve Song, çalışmalarında[215], amonyak için bir yanma stratejisinin ana hatlarını çizmiştir. Lee ve Song amonyak için bir yanma stratejisinin ana hatlarını çizmiştir. Bu yaklaşım, başlangıçta emme stroku sırasında az miktarda amonyak püskürten bir 'pilot enjeksiyonu' ve ardından silindir içinde yakıt-zayıf homojen bir karışım olan ön karışımlı bir yük(hava-yakıt karışımı) oluşumunu içermektedir. Homojen yakıt-zayıf karışım daha sonra sıkıştırma stroku sırasında kendi kendine ateşlenerek yanma odasındaki ana saf amonyak akışını yakmak için uygun bir ortam yaratır. Çalışmada makineyi simüle etmek için literatürdeki mevcut püskürtme, kimyasal reaksiyon ve termodinamik modeller kullanılmıştır. 'Pilot enjeksiyon' miktarının her türlü makine operasyonunu önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Daha fazla 'pilot enjeksiyon' enjekte edilmesi, içeride daha yüksek ulaşılabilir sıcaklıklara yol açmıştır. Bununla birlikte, daha da yüksek miktarlarda 'pilot enjeksiyon', muhtemelen gecikmiş ön-yanmadan ötürü, amonyak ana yakıt akımının soğutma etkisi ile birleşerek tutuşmayı geciktirmiştir.



Şekil 2.24 Lee ve Song tarafından önerilen yanma stratejisi görselleştirilmesi[215]

Zhen Lu ve diğerleri tarafından yürütülen bir başka kayda değer sayısal simülasyon çalışmasında[216], yüksek sıcaklıkta silindir gazı devridaim (HTCGR) stratejisi kullanılmıştır. Bu strateji, yakıtı ısıtmak için yakıt enjeksiyonundan önce sıkıştırma stroku sırasında sıcak egzoz gazının silindire girmesine olanak tanımaktadır. Ek olarak, egzoz strokundan önce, kızdırma bujisi, valfler ve basınç sensörü de içeren sisteme sıcak gazı yeniden doldurmak için sabit basınç tankına giden bir valf açılır. Bunu düşük hızlı iki stroklu bir deniz dizel makinesine entegre ederek, yalnızca amonyakla çalıştırıldığında performansını değerlendirmek için bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, yakıt enjeksiyonu sırasında 926.85°C 'lik ortam sıcaklığında amonyak yakıtının tam oksidasyonu sayesinde normal dizel makinelerle yarışacak % 50'lik bir termal verimliliğe ulaşmanın mümkün olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bununla birlikte, bu stratejide tespit edilen önemli bir sorun, daha yüksek türbülans seviyesi ve başlangıç sıcaklığı nedeniyle artan ısı transferi kayıplarıdır. Silindir duvarları etrafında yakıt birikimini azaltmak için yakıt püskürtme açılarını ve enjeksiyon zamanlamalarını ayarlayarak bu sorunu ele alma çabalarına rağmen, çalışmada ısı transferi kayıplarının normalden 3.4 kat daha fazla olduğu bildirilmiştir. Özetle, bu çalışma, amonyağın kendiliğinden tutuşma sıcaklığını aşan yüksek silindir içi sıcaklığa sahip normal bir dizel makinenin sıkıştırma oranının sağlanmasına ilişkin bilgiler sunmaktadır.

Amonyaklı çift yakıtlı yanma stratejileriyle ilgili olarak, Nadimi ve diğerleri dizel yakıtın amonyakla ikame edilmesinin etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma[217] yürütmüştür. Tek silindirli 4 stroklu bir dizel makine kullanmışlar, amonyak yakıtın port enjeksiyonunu mümkün kılmak için gerekli modifikasyonlar yapılmış ve dizel ile değiştirilen amonyak yakıt miktarını kademeli olarak artırmışlardır. Amonyak tarafından sağlanan maksimum enerji payı %84.2 olarak

bildirilmiştir, bu da amonyaktan elde edilen nihai enerji oranını göstermektedir. Amonyak miktarı zirveye ulaştığında, yanma modu difüzyondan ön karışımli yanmaya geçmiştir. Amonyak miktarındaki artışla CO₂ emisyonları azalırken, azot oksit (N₂O) emisyonları artmıştır. Bununla birlikte, toplam sera gazı emisyonları maksimum amonyak enerji payı için 243 g/kWh olarak raporlanırken, sadece dizel işletimi için 727 g/kWh olarak raporlanmıştır.

Wang ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada[218], 4 stroklu bir CI makinenin güvenilir bir CFD simülasyon modeli kullanılarak enjeksiyon zamanlamasının çeşitli açılardan etkilerinin araştırılmasına odaklanılmıştır. Simülasyonda, dizel yakıt kalorifik değerin %10'unu oluşturmuş ve sağlıklı bir yanma için tutuşma sağlayıcı olarak görev yaparken, kalan yakıt bileşimi ise kütle ve alt ısı değer çarpımı sonucunda ortaya çıkan 70/30 oranındaki amonyak/hidrojen karışımından oluşmuştur. Özellikle enjeksiyon zamanlaması, amonyağın yüksek gizli buharlaşma ısısı nedeniyle kritik bir faktör olarak görülmüştür. Erken enjeksiyon sıcaklık düşüşüne yol açarak tutuşmayı riske atabileceği ve enjeksiyon zamanlamasının da NO_x emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmiştir.

2.3.6 Amonyak Emisyon Profili

Amonyağın karbon içeriğinden yoksun olduğu ve dolayısıyla CO₂ salımı yapmadığı bilinmektedir. Bununla birlikte, NO_x ve N₂O emisyonları için bir kaynak görevi gören azot içerir. Gülme gazı olarak da bilinen azot oksit, tatlı bir kokuya sahiptir ve küçük miktarlarda solunduğunda gülmeye neden olabilir; ancak yüksek konsantrasyonlara uzun süre maruz kalmak ölümcül olabilir[219]. Bu gaz, etkileri yaygın olarak bilinmeyen yüksek bir tehlike potansiyeline sahiptir, ancak CO₂'den neredeyse 300 kat daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, amonyak yakıtının neden olduğu N₂O emisyonları daha dikkatli değerlendirilmelidir.

2.3.7 Amonyakla Çalışan Gemi Makineleri

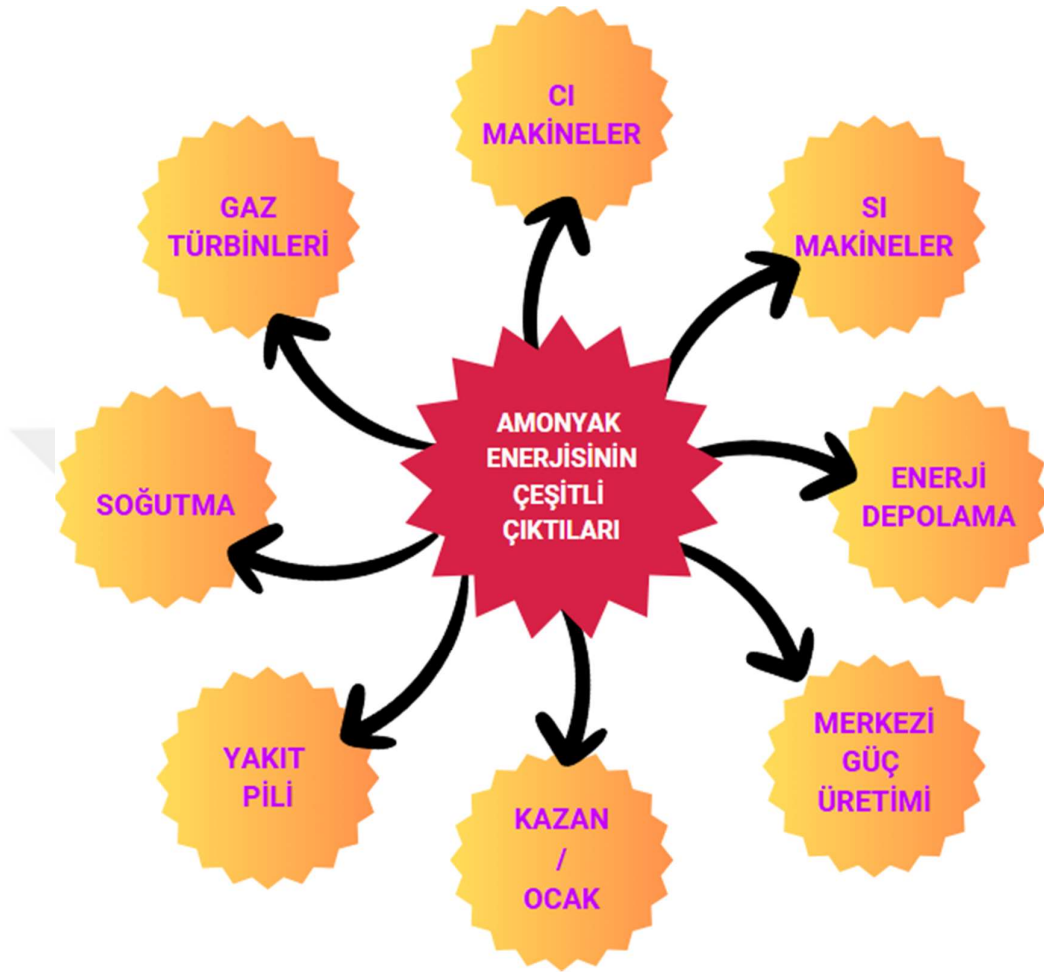
Wärtsilä şirketi, sera gazı emisyonlarını azaltma hedefinden hareketle, çift yakıtlı amonyak modunda çalışabilen 4 stroklu bir makine olan Wärtsilä 25'i, 'AmmoniaPac' yakıt dağıtım sistemi, amonyak salımı azaltma sistemi ve NO_x

azaltıcı ile birlikte pazara sunmuştur. Bu sistemin sera gazı emisyonlarında en az %70 düşüş sağlayacağı belirtilmiştir[220].

Kompakt tasarımı, dizel ve amonyak ile birlikte çift yakıt modlarında çalışabilme özelliği olan makine, 1,7 ila 3,4 MW arasında değişen bir güç kapasitesine sahiptir[221]. Makine aynı zamanda ortak dağıtım raylı yüksek basınçlı yakıt enjeksiyon sistemine sahiptir ve sahip olduğu NO_x azaltıcı sayesinde Tier III yönetmeliklerine uyum sağlayabilmektedir[222]. MAN, amonyak kullanabilen iki stroklu bir makine geliştirmeye odaklanmıştır. Sistem, amonyağı ısıtmak ve ana depoda kirlenmeyi önlemek için bir devridaim sistemi, gerekli basınç ve sıcaklıkta yakıt sağlamaktan sorumlu bir yakıt ikmal sistemi, makineyi kapatma ve nitrojen arındırma sırasında güvenlik amaçlı bir yakıt valfi sistemi, makineyi arındırmak için bir nitrojen sistemi, sızıntıları tespit etmek ve ortadan kaldırmak için çift cidarlı bir havalandırma sistemi, bir amonyak yakalama ve SCR sistemi gibi bazı anahtar unsurlardan oluşmaktadır. MAN bu seçeneği 2024 yılında pazara sunmayı ve 2025 yılında mevcut makinelerin iyileştirilmesine yönelik çözümlerin kullanılabilirliğini artırmayı hedeflemektedir[223].

Amonyakla çalışan makineler, ilgili yönetmelikleri ihlal etmeden çalışmaları için SCR sistemine ihtiyaç duyarlar. Bu sistemler ilk olarak Euro 5 ve Euro 6 emisyon yönetmelikleriyle uyumluluğun sağlanması ve egzoz kaynaklı NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla kullanılmaya başlanmıştır[224].

2.3.8 Amonyak Ekonomisi

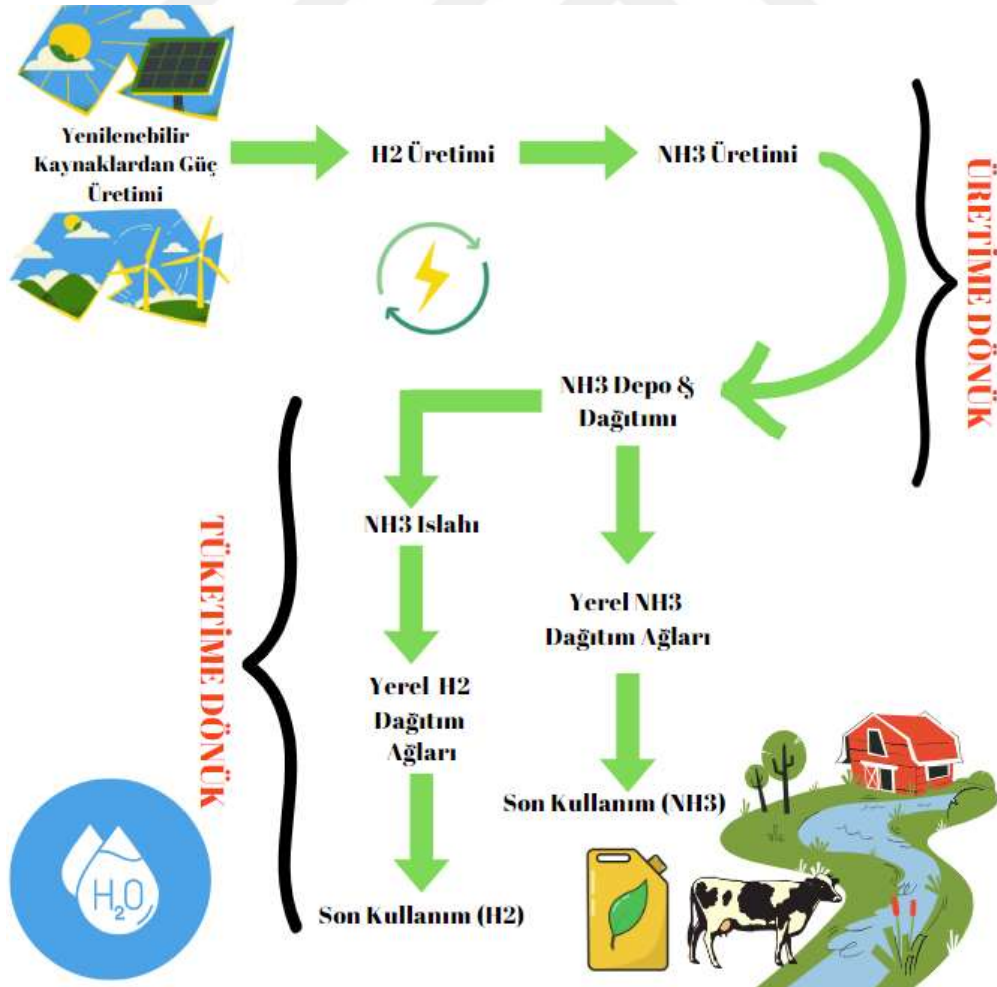


Şekil 2.25 Amonyak enerji çıktılarının görsel temsili [184]’ten uyarlanmıştır.

Amonyak ekonomisi kavramı, üretim, dağıtım, güvenlik ve hem doğrudan hem de dolaylı kullanım dahil olmak üzere çeşitli yönleri kapsar ve her biri ayrı öğeler olarak kapsamlı analiz ve değerlendirme gerektirir. Amonyakın doğrudan uygulamalarının yanı sıra önemli bir enerji/hidrojen taşıyıcısı olarak da değerlendirildiğini belirtmek önemlidir. Bu aşamada amonyağın çevreci bir şekilde üretilmesi ve dağıtılmasına öncelik verilmesi büyük anlam taşırken, karbon tutma sistemleri geleneksel yöntemlerle amonyak üretimi için geçici çözümler olarak kullanılabilir.

Geleneksel amonyak üretim yöntemi önemli ölçüde fosil yakıt kullanımıyla bağlantılı olsa da amonyak emisyonu da bir tehdittir[225]. Avrupa ülkeleri,

özellikle tarımsal faaliyetlerden ve büyükbaş hayvanlardan kaynaklanan amonyak emisyonlarının biyoçeşitliliğe tehdit oluşturma riskiyle karşı karşıyadır[226]. Öte yandan, amonyak üretiminde tüketilen su hacmi, tüm canlıların yaşamı için gerekli bir kaynak olması nedeniyle ciddi bir mesele olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, olası su kıtlığı varsayımlarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi elzemdir. Yenilenebilir enerjilere dayalı veya yalnızca elektrodüksiyon kullanarak sudan amonyak üretmek gibi çevreci amonyak üretim yöntemleri belirgin miktarda su tüketimi gerektirmekte, deniz suyunu kullanabilmek içinse tuzdan arındırma işlemi ilave masraflara yol açmaktadır[227][228]. Amonyak ve hidrojen arasında birbirlerine dönüşümleri açısından önemli bir bağlantı vardır. Hidrojen amonyak üretiminde kullanılır ve üretilen amonyak belirli bir süre depolandıktan sonra son kullanım için tekrar hidrojene dönüştürülebilir. Amonyakın daha kolay depolanması, hidrojen yakıt pillerinin kullanımı için bir fırsat sunmaktadır, zira amonyak hidrojen açığa çıkarmak üzere ayrıştırılabilmektedir[229].



Şekil 2.26 Hanxin Zhao'nun çalışmasından[230] uyarlanan gösterim, hem üretime dönük hem de tüketime dönük unsurlarını içeren yeşil bir amonyak tedarik zincirinin yapısını sunmaktadır. Üretime dönük faaliyetler hidrojen ve amonyak üretimi ve nakliyesini içerirken, tüketime dönük faaliyetler talebi ve son kullanımı karşılamaktadır. Çalışma, verimli hidrojen transferini kolaylaştırmak için hidrojen ve amonyak üretim tesislerinin yakın konumlandırılmasını önermektedir. Görsel, amonyağın gübre, kimyasallar veya çevreci yakıt gibi doğrudan kullanım için veya çeşitli endüstriyel veya ısıtma uygulamaları için hidrojene dönüştürülen bir enerji taşıyıcısı olarak çeşitli işlevler gördüğü hidrojen ve amonyak arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Dikkat çekici bir çalışmada[231], Emre Demir ve İbrahim Dinçer, sundukları güneş ısısı enerjisiyle çalışan bir trijenerasyon sistemini termodinamik olarak incelemiştir. Çalışmanın önemi, amonyak sentezinin elektrik üretimi, güç üretimi ve deniz suyundan tatlı su üretimi ile entegre edilebileceğini göstermesinde yatmaktadır. Çalışmanın birincil amacı merkezden uzak bir bölgede, en az 10.000 kişinin çeşitli temel ihtiyaçlarını karşılayan, dayanıklı ve uzun vadeli uygulanabilir bir ekonominin geliştirilmesine yönelik talebi karşılamaktır. Yazarlar, amonyağın hidrojene göre daha kolay depolama ve dağıtım avantajları sunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, trijenerasyon sistemi teorik olarak bölge sakinlerinin elektrik ve tatlı su taleplerini karşılamaktadır. Çalışmada güneş ışımasını 7,43 kWh/m²/gün kabul edilmiş, amonyak üretim oranı 12 saatte 36,7 ton olarak belirlenmiş ve sistemin maksimum enerji verimliliği %70 olarak bildirilmiştir.

Birleşik Krallık Hükümeti “Amonyaktan Yeşil Hidrojene Projesi” başlıklı bir fizibilite raporu[232] yayınladı. Bu kapsamlı çalışmada amonyağın hem avantajlı bir hidrojen taşıyıcısı hem de güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji için bir depolama aracı olduğu vurgulanmıştır. Çalışma, amonyağın üretimden hidrojen formundaki nihai kullanımına kadar olan yolculuğu için iki farklı yolu tartışmaktadır: merkezi ve merkeziyetsiz yaklaşımlar. Merkeziyetsiz yaklaşım, amonyağın daha kolay depolanması ve taşınması, ardından nihai kullanımına daha yakın bir yerde hidrojene dönüştürülmesi avantajlarını içermektedir. Üretim üssünden nihai kullanım alanına olan mesafe uzadıkça, merkeziyetsiz yöntem daha da uygun maliyetli hale gelmektedir. Ayrıca, İngiltere

ekonomisi için yeşil enerjiyi yurt içinde üretmek yerine Orta Doğu'dan amonyak olarak ithal etmenin daha karlı olduğu düşünülmüştür. Çalışma, Avustralya, Kuzey Afrika ve Orta Doğu gibi bölgelerin, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra entegre karbon yakalama ve depolama ile doğal gazdan uygun maliyetli yeşil hidrojen üretimi için gelecek vaat eden yerler olduğunu öne sürmektedir. Dolayısıyla, çalışmadan anlaşılabileceği üzere, hidrojen ve amonyak arasındaki dönüşüm ilişkisi ve bunların yakıt olarak kullanılabilmesi, hem amonyak hem de hidrojen ekonomileri için karşılıklı itici güç görevi görmektedir.

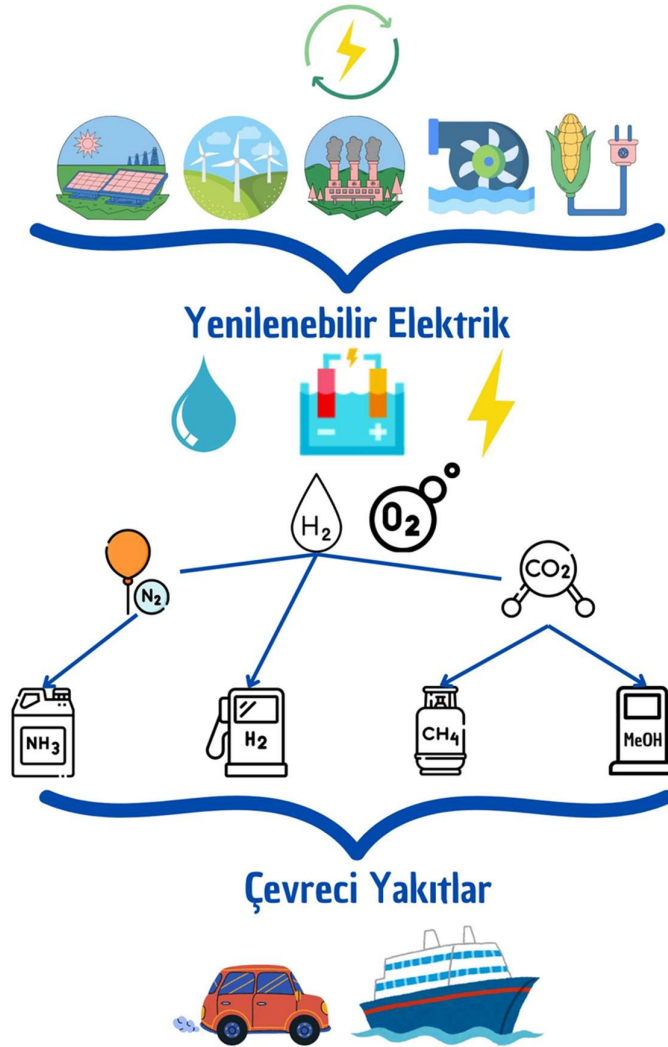
Takip eden raporda, karbon-nötr hidrojen taşıyıcısı olan amonyak ticaretinin önemi, özellikle Avustralya ve Almanya'ya odaklanılarak incelenmektedir. Rapor, amonyak ticaretinin dünya çapında farklı coğrafi konumlara, gelişmişlik düzeylerine ve önceliklere sahip ülkeler arasında ticari bağlar kurulmasını teşvik edebileceğini göstermektedir. Egerer ve diğerleri tarafından yürütülen bu çalışma[233], farklı ülkelerdeki yenilenebilir enerji potansiyellerinin çeşitliliğinin yanı sıra vatandaşların ve endüstrilerin ihtiyaçlarına dayalı farklı gereksinimleri, yeşil enerjinin amonyak formunda taşınmasını artıracaklarını vurgulamaktadır. Çalışma, Avustralya'nın fosil yakıt ihraç etme modelini yenilenebilir amonyakla değiştirebileceğini ve potansiyel olarak kendisini bu geçişte lider ülkelerden biri olarak konumlandırabileceğini öne sürüyor. Buna karşılık, gelişmiş ve sanayileşmiş bir ülke olarak Almanya, çeşitli iç ihtiyaçlarını karşılamak için amonyak formunda yeşil enerji ithalatına olumlu bakabilir. Bu senaryo, yeşil enerji ticaretine karşılıklı ilgi duyan iki ülke arasında iş birliği için bir yol açmaktadır. 2030 projeksiyonuna ilişkin olarak çalışma, Avustralya'daki üretim maliyetleri ve Almanya'ya teslimat dahil olmak üzere amonyak için megavat-saat başına ortalama 109.39 Avro maliyet öngörmektedir.

Natalia Morlanés ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmada[234] belirtildiği üzere, halihazırda ekonomi ve mevcut altyapı ile entegrasyon, uygun fiyatlı nakliye ve hidrojene kıyasla daha kolay depolama seçenekleri, makul hacimsel ve gravimetrik enerji yoğunlukları, enerji üretiminde doğrudan kullanım veya hidrojen veya elektrige dönüştürülebilme potansiyeli, hidrojenin önemli bir enerji taşıyıcısı olarak taşıdığı değerin altını çizmektedir. Ayrıca, çalışmadan aşağıdaki bazı temel tespitler de çıkarılabilmektedir:

- Ton amonyak üretimi başına tüketilen megawatt enerji açısından, en önemli verimlilik artışları 1910'lar ve 1930'lar arasında gözlemlenebilir; ancak amonyak üretimindeki hafif verimlilik artışları 2010 yılına kadar takip edilebilir.
- Üretim giderleri doğal gaz fiyatları ve diğer hammaddelerle sıkı sıkıya bağlantılıdır. Mevcut durumda Orta Doğu ve ABD bir ton amonyağı diğer bölgelere göre daha ucuza üretmektedir.
- 2050 projeksiyonunda elektrolizin kömürden daha yüksek ancak doğal gazdan daha düşük verimliliğe sahip olması öngörülmektedir. CCS ile kombine edilmiş buhar metan reformasyonu (SMR), doğal gaza dayanan günümüz amonyak üretimi kadar verimli olacaktır.
- Bir kez daha, 2050 senaryosunda, karbon-nötr elektroliz teknolojisinin 2020'dekinden % 25 daha verimli olması beklenmektedir.

2.4 Genel Özet

Alternatif yakıtlarla ilgili literatür taramasını tamamladıktan sonra bu bölüm, önceki çalışmalardan elde edilen bulgularla desteklenen fikirlerden yararlanarak alternatif yakıtların karşılaştırılmasına odaklanmaktadır.



Şekil 2.27 Yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak çevreci yakıtlara hayat vermek küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunlarıyla mücadelenin temel mantığıdır.

Jerzy Herdzik'in makalesinde[235] sunulan fikirlere göre aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Etanol birçok ülkede bilinen bir otomobil yakıtı haline gelirken, metanol hem SI hem de CI makinelerde denenerek çeşitli projeler çerçevesinde bir deniz yakıtı olarak araştırılmıştır. Ancak toksiktir, yanıcıdır ve insanlar için risk teşkil etmektedir. Aynı enerji çıkışını sağlamak için dizel yakıtla kıyasla neredeyse iki kat daha fazla yakıt muhtevası ve depolama hacmi gerektirmektedir.
- Temiz bir yanma profiline sahip olan ve daha fütüristik bir çözüm olarak kabul edilen amonyağı sentezlemek için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bununla birlikte, düşük yanma hızı, çok yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığı ve daha düşük alt ısı değer gibi dezavantajlar mevcuttur.
- Hidrojen, yandığında tek ürünü su olduğu için en temiz seçenek olarak kabul edilir. Ayrıca, hidrojen yüksek bir alt ısı değer ve yüksek gravimetrik enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak, pratik kullanım için uygun koşullarda depolanması birçok kritik engelle karşı karşıyadır. Hidrojenin ısı makinelerinde kullanımı, yolculuğun ortası olarak görülmekte ve yakıt hücrelerinde kullanımının daha yaygın olması beklenmektedir.

Tablo 2.20 Verilerin [235]’ten alındığı tablo çeşitli yakıtların karbon içerik ve yakıt katsayılarını göstermektedir.

Yakıt Tipi	Karbon İçeriği (m/m)	Yakıt Katsayısı (kg CO ₂ /kg yakıt)
Marine Gas Oil (MGO)	0.875	3.206
Marine Diesel Oil (MDO)	0.875	3.206
Metan	0.75	2.75
Metanol	0.375	1.375
Etanol	0.522	1.913
Amonyak	0	0

Tablo 2.21 [236]'den alınan verilerle muhtelif deniz yakıtlarının özellikleri listelenmiştir.

YAKIT TİPİ	MGO	LNG	LH ₂	CH ₂	Metanol	Amonyak
Hacimsel enerji yoğunluğu (MJ/L)	37	22	10	6	16	13
Gravimetrik enerji yoğunluğu (Mj/kg)	43	49	120	120	20	18
Saklama basıncı (bar)	Ortam	10	10	700	Ortam	Ortam
Saklama sıcaklığı °C	Ortam	-166	-265	Ortam	Ortam	-33
Yoğunluk(kg/m ³) @saklama şartlarında	850	430	71	40	790	700

Hellström ve diğerleri raporlarında[237] alternatif yakıtların yakında daha yaygın bir şekilde kullanılmasının beklendiğini belirtmişlerdir. Metanol, daha yüksek enerji yoğunluğu ve sıvı halde olması nedeniyle diğer temiz deniz yakıtı alternatiflerine göre daha uygulanabilirliğiyle öne çıkmaktadır. Metanolün 2030 ve 2050 yılları arasında çeşitli gemi türleri ve operasyon kategorilerini kapsayan deniz taşımacılığı için en uygun yakıt olacağı öngörülmektedir.

Tablo 2.22 Çeşitli yakıtların fizibilite bakımından karşılaştırılması [237]

Kategori	Yakıt Sıralaması	Projeksiyon
Kısa Mesafe (Feribot, RoRo, Ropax)	1.Metanol 2.Hidrojen 3.Batarya	2030 - 2050
Uzun Mesafe (Tanker, Konteyner)	1.Metanol 2.Amonyak 3.Biyogaz	
Kruvaziyer Taşımacılığı	1.Metanol 2.Biyogaz 3.Biyodizel	
Kısa Mesafe Kargo (Kuru Yük, Yemleme)	1.Metanol 2.Amonyak 3.Hidrojen	

3

DEĞERLENDİRME & ÖNERİLER

3.1 Değerlendirme

Hidrojen, metanol ve amonyakı kapsayan literatürdeki mevcut bilgiler, karşılaştırma için temel fikirler oluşturmak üzere yeterli bilgi kaynağı sağlamaktadır. Öncelikle, enerjinin insanoğlu için vazgeçilmez bir gereksinim olduğunu ve yaşamın sürdürülebilmesi için zorunlu olduğunu belirtmek önemlidir. İnsanlığın bugüne kadar ulaştığı teknolojik gelişimin mevcut durumu göz önüne alındığında, temiz enerjiler, enerji verimliliği ve emisyonları azaltma çabaları, insanlığı bir sonraki seviyeye taşımak için önemli hedefleri oluşturmaktadır.

Alternatif yakıtların karakteristikleri, kimyasal yapıları, davranımları, yanma dinamikleri, üretim yöntemleri ve kullanımları ayrıntılı bir şekilde incelenmeye değer son derece karmaşık konulardır. Bu konularda tatmin edici bilgiler mevcut olsa da, alternatif yakıtların menşinden nihai kullanımına kadar her yönüyle ilgili daha derin bir bilgi kültürü oluşturmak için büyük bir fırsat bulunmaktadır. Alternatif yakıtların giderek daha fazla benimsenmesi, insan yaşamında bir paradigma değişimini ve ticaret, turizm, ulaşım ve endüstriyel üretim gibi birçok faaliyet için daha temiz, daha yeşil bir dönemin başlangıcını müjdeleyen sembolik bir bayrak olarak görülebilir. Küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadele ederken alternatif yakıtlardan yararlanma ortak hedefleri doğrultusunda, hükümetler, yetkililer ve bu alanlarda çalışan çok çeşitli bilimsel disiplinler arasında önemli bir işbirliği potansiyeli de bulunmaktadır.

3.1.1 Alternatif Yakıtlara Dayalı Bulguların Değerlendirilmesi

Hidrojen, metanol ve amonyak bu çalışmada araştırılan ana temalardır ve son ikisi üzerinde daha fazla durulmuştur. Enerji kaynağı olan hidrojenin depolanması ve taşınması şu an için mümkün görünmediğinden, literatürde kolaylıkla depolanabildiği ve taşınabildiği için amonyak ve metanolün hidrojen taşıyıcısı olarak kullanılması fikrine rastlanmıştır. Saf hidrojenin, örneğin amonyak formunda depolanması ve nihai kullanımına kadar taşınması yoluyla kullanılmasının daha kolay olduğu sonucuna varılabilir. Amonyakın sıvılaştırılması

hidrojene göre daha elverişlidir, çünkü hidrojen ya -253°C civarında kriyojenik sıcaklıklar ya da 350 ila 700 bar arasında değişen yüksek basınçlar gerektirir. Öte yandan metanol zaten sıvı fazdadır. İnsanoğlu onu nasıl depolayacağını ve taşıyacağını, ayrıca toksisitesiyle nasıl başa çıkacağını bilmektedir. Hidrojen ve amonyağın aksine, metanol yapısında karbon içerir, ancak karbon-karbon bağları yoktur ve yanmayı artıran oksijen içerir. Mükemmele yakın bir metanol üretiminden söz edebilmek için yenilenebilir enerji kaynakları ve yakalanan karbon kullanılmalıdır. Bu yaklaşımla atmosfere ilave karbon salınmayacak ve atmosferdeki mevcut karbon veya geri dönüştürülmüş karbon kullanılabilir. Metanolün birçok limanda halihazırda erişilebilir olması, hava kalitesini olumsuz etkileyen diğer emisyonları azaltması ve mevcut altyapıya uyumluluğu onu önemli bir çözüm haline getirmektedir. Her yakıtın kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Ancak metanolün kullanımı diğerlerine kıyasla daha kolayken, hidrojen atık olarak sadece su üreterek en temiz seçenek olarak öne çıkar. Ancak mevcut tabloda metanol daha erken bir çare gibi görünmektedir. Amonyak metanol ve hidrojen arasında bir yerde yer alırken, metanol ve amonyağın üretim ve dağıtım maliyetleri nihayetinde hangi yakıtın daha yaygın hale geleceğini belirleyecektir.

3.1.1.1 Metanol Üzerine Nihai Değerlendirme

Bilimsel kaynaklardan elde edilen bulgu ve görüşlere göre, metanol geleneksel yakıtlara karşı müstakbel bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Çift yakıt teknolojisi halihazırda mevcut olup, metanolla çalışan gemiler yeni inşa projelerine dahil edilmektedir. Metanol üretimi ve yaşam döngüsü için, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanarak çevresel sürdürülebilirliğe öncelik vermek çok önemlidir. Metanolün üretimi, depolanması, transferi ve yakıt ikmali de dahil olmak üzere tüm süreç, yeni iş sektörlerinin ortaya çıkması için fırsatlar sunmaktadır. Gemiler metanol kullanarak emisyon düzenlemelerine tabi olmadan çalışabilir, bu da potansiyel olarak emisyonların azaltılması yoluyla insan sağlığının iyileştirilmesine ve çevre dostu deniz seyahatinin teşvik edilmesine yol açar. Bu vizyonu gerçekleştirmek için endüstriler, şirketler, üniversiteler ve hükümetler arasında devam eden iş birliği çabaları, metanolü daha uygun fiyatlı ve yaygın olarak erişilebilir bir deniz yakıtı haline getirmek için kaçınılmazdır.

3.1.1.2 Amonyak Üzerine Nihai Değerlendirme

Literatürde ve amonyakla ilgili çeşitli kaynaklarda, amonyağın insan yaşamında önemli bir rol oynadığı açıkça belirtilmektedir. Dolayısıyla amonyak için karbon nötr ve daha az maliyetli üretim yöntemlerine ulaşma konusunda artan bir ilgi söz konusudur. Ayrıca, bir deniz yakıtı olmasının yanı sıra, amonyak bir hidrojen taşıyıcısı olarak da önemli bir potansiyele sahiptir. İçten yanmalı makinelerde bir geçmişe sahip olsa da, gemi makinelerini amonyakla çalıştırmadaki ilerleme, metanolla çalışan gemi makinelerinin gerisindedir.

3.1.1.3 Hidrojen Üzerine Nihai Değerlendirme

Hidrojen, bol miktarda bulunması ve yüksek gravimetrik enerji yoğunluğu ile umut verici bir temiz yakıt alternatifi olarak görülmektedir. Ancak yaygın kullanımı, uygun maliyetli depolama ve taşıma yöntemlerinin geliştirilmesine bağlıdır. Avantajlarına rağmen, hidrojenin enerji alanındaki potansiyelinin hayata geçirilmesi önemli teknolojik ilerlemeler gerektirmektedir. Yine de, sürdürülebilir enerji arayışında hidrojen, akademik araştırma ve inovasyon için kilit bir odak noktası olmaya devam ediyor ve muhtemelen bir gün gelecekteki enerji sistemlerinde çok önemli bir rol oynayacak.

3.2 İleri Çalışmalar için Öneriler ve Fikirler

Denizcilik sektöründe alternatif yakıtlara geçiş, sürdürülebilir toplu taşıma ve turizme odaklanma ile önemli ölçüde desteklenebilir. Emisyonları azaltan ve yenilikçiliği teşvik eden bu yaklaşım, en yeni çözümlerle birleştirilebilir. Dolayısıyla, yenilikçi enerji tasarrufu çözümlerinin alternatif yakıtlarla bütünleştirilmesi bir başka çalışma konusu olabilir. Bu bölümde toplu taşıma, turizm ve daha fazla çalışma için fikirler alternatif yakıtlar ışığında ele alınmaktadır.

3.2.1 Toplu Taşıma Örneği: İstanbul & İzmir

Her ülkede bazı şehirler hareketli yaşamları, güçlü ekonomileri ve yüksek nüfuslarıyla öne çıkar. Bu şehirler çok sayıda endüstriyel faaliyete ev sahipliği yapar ve trafikleri kesintisizdir. İnsanlar her gün işe ve okula gidip gelirler. Eğer bu şehirler kıyı veya sahil şehirleri ise, deniz ulaşımı toplu taşımada önemli bir rol oynar. Burada sunulan fikir, Türkiye'nin iki önemli şehri etrafında

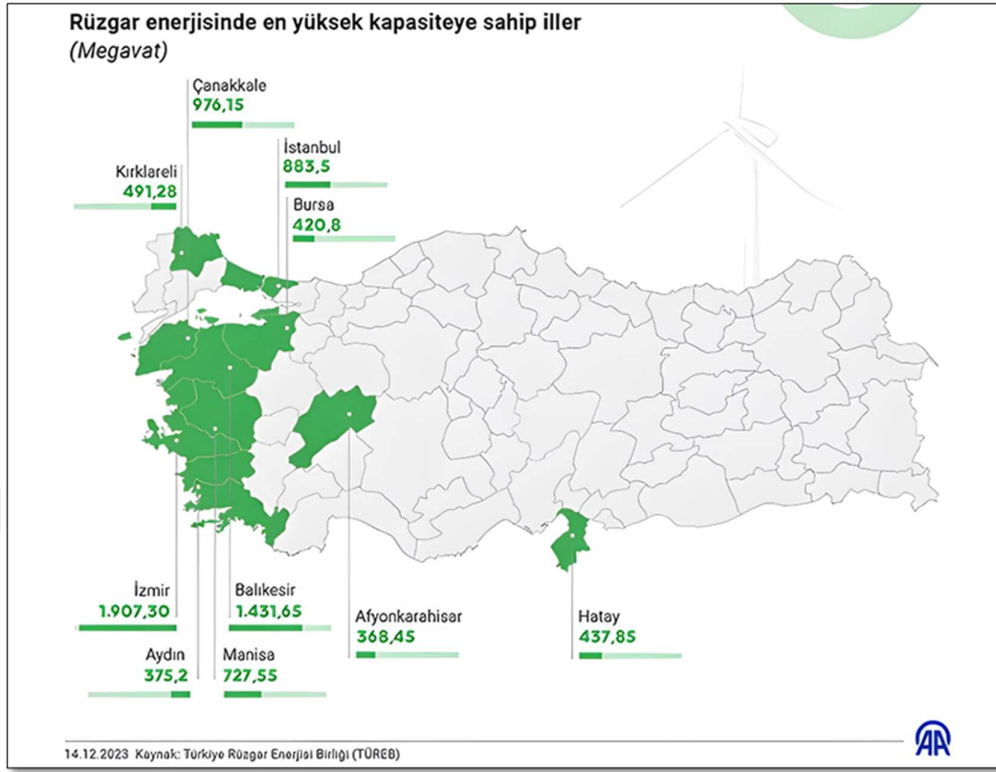
şekillenmektedir: Şehirlerin Kraliçesi İstanbul ve Ege'nin İncisi İzmir. Bu şehirler tarihi öneme sahiptir ve hem ekonomik hem de sosyo-kültürel açıdan hayati merkezlerdir. Deniz taşımacılığı ile güçlü bağları olan dinamik metropoller olup, yerel toplu taşımacılığın yanı sıra uluslararası deniz ticaretine de ev sahipliği yapan liman ve iskelelere sahiptirler. Bu büyük şehirleri hava kirliliği ve emisyonlardan kurtarmak ve alternatif yakıtların kullanımı ile tanıştırmak için kentsel gelişim bağlamında kapsamlı çabalar gerekebilir. Bu da altyapı, nüfus dağılımı, sanayi alanları ve hem mevcut hem de potansiyel ulaşım güzergahlarına odaklanmayı gerektirecektir. Ayrıca, hükümet ve belediye birimleri ile yapılacak kapsamlı yatırım ve iş birliklerine de ihtiyaç duyulabilir. Aşağıdaki vapur ve feribot rotaları incelendiğinde, bu kentlerin deniz taşımacılığının karbonsuzlaştırılmasında neden önemli bir yer tutacağı daha net anlaşılabilir.



Şekil 3.1 İstanbul ve İzmir'deki vapur hatları ve iskelelerin konumları[238][239].

Belediyelerin websitelerinden alınan bu hat görselleri şehirlerdeki yoğun deniz trafiğinin göstergesidir.

Hem lojistik nedenler hem de kayıpların asgari düzeyde tutulması için yeşil yakıt üretiminin son kullanım alanlarına ve dağıtım merkezlerine yakın olması çok önemlidir. Bu bağlamda, İstanbul ve İzmir hem son nokta hem de dağıtım noktası olarak düşünülebilir. Toplu ulaşımı sağlayan vapurlar yeşil yakıtlarla çalıştırılırken, bunker gemileri İstanbul ve İzmir'deki limanlardan yakıt taşıyabilecektir. Ayrıca alternatif yakıtlarla çalışan gemiler de depolarını bu limanlarda doldurabilirler. Bu senaryoyu gerçeğe dönüştürmek için yenilenebilir kaynaklardan temiz yakıtlar üretmek gerekir. Nitekim Türkiye'de yenilenebilir kaynaklardan üretilen temiz elektriğin büyük bir kısmının İstanbul ve İzmir'e yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2 Anadolu Ajansı'ndan alınan bir infografik[240], İzmir'in rüzgâr enerjisi yoluyla yeşil elektrik üretiminde başı çektiğini göstermektedir. Ayrıca İstanbul, komşu şehirlerle birlikte önemli miktarda elektrik üretimiyle öne çıkmaktadır. Bu bulgular, İzmir ve İstanbul'un kapasiteleri ve limanları sayesinde yeşil yakıt üretimi, kullanımı ve dağıtımı konusunda yıldız şehirler olma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Toplu Ulaşım Örneği: İstanbul ve İzmir” başlıklı bölümde aşağıdaki hususlar vurgulanabilir:

- İzmir'de Karşıyaka, Bostanlı, Alsancak ve Konak iskelelerinden düzenli olarak önemli deniz seferleri yapılmaktadır.
- İzmir Büyükşehir Belediyesi'nin deniz taşımacılığı birimi olan İZDENİZ A.Ş., gemilerini tier 2 standartlarına uygun 4 stroklu dizel makinelerle işletmektedir. Gemilerde ultra düşük kükürtlü dizel yakıt kullanılmaktadır.
- İstanbul'da Üsküdar, Beşiktaş, Karaköy, Eminönü ve Kadıköy gibi ilçeler, Boğaziçi, Haliç ve Adalar'daki diğer hatların yanı sıra yoğun şehir içi deniz trafiğine ev sahipliği yapmaktadır.

- Bahsi geçen ilçeler aynı zamanda yoğun bir nüfusa sahiptir. Bu nedenle, şehir içi deniz ulaşımının çevre dostu yakıtlarla sağlanması, nüfusun sağlığına olumlu katkıda bulunabilir ve sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet edebilir.
- İstanbul ve İzmir, uluslararası ticari limanları ve liman işletmeleri ile uluslararası deniz ticaretinde öne çıkan şehirlerdir. Küresel olarak beklenen çevre dostu yakıtlara geçişin ardından, gerekli altyapının bu şehirlere kazandırılmasıyla birlikte, uluslararası ticari ve yolcu gemilerine alternatif yakıt tedarik edilmesi suretiyle önemli bir gelir elde edilebilir. Türk hükümetinin bu politikayı uygun görmesi halinde, gerekli altyapının hayata geçirilmesinin ardından bu iki şehir alternatif yakıt üretim, tedarik ve yakıt ikmal merkezlerine dönüşebilir.
- İstanbul ve İzmir, hem yerli hem de yabancı turistlerin ilgisini çeken, tarihi ve turistik profili yüksek şehirlerdir. Çevre dostu alternatif yakıtlarla çalışan turistik yolcu feribotlarının devreye alınmasıyla bu şehirlerde sürdürülebilir turizmin önü açılabilir.

Özetle, İstanbul ve İzmir öncelikli olmak üzere Türkiye Cumhuriyeti için temiz deniz yakıtlarının plana dahil edilmesi ekonomi, ticaret ve turizm sektörlerini derinden etkileyebilir. Şehirlere çeşitli avantajlar getirebilecek potansiyeli barındıran alternatif yakıtlar, sürdürülebilirlik ve çevre hedeflerine de katkı sağlayabilir.

3.2.2 Sürdürülebilir Turizm Örneği

Küresel turizmin önemli bir bölümünü oluşturan deniz turizmi, kıyı yerleşimleri ve adalar için hem önemli bir emisyon kaynağı hem de önemli bir gelir kaynağıdır[241]. Sürdürülebilir turizm faaliyetlerini başlatırken, çevresel ve kültürel mirası korumaktan ödün vermeksizin ekonomik uygunluğun ön planda tutulması çok önemlidir. Deniz turizminin karbondan arındırılması ve buna bağlı kirliliğin azaltılması, kıyı bölgeleri ve denizler boyunca deniz ekosistemlerini ve insan sağlığını derinlemesine etkileyebilir. Yolcu gemileri gibi deniz araçlarında çevreci yakıtlara geçiş, şüphesiz çevrenin korunması ve emisyonların azaltılması üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecektir. Kruvaziyer gemiler binlerce turisti ağırlayan yüzer otellerdir. Yüzer kentler olarak da görülebilen bu gemilerde, verimli sevk sistemleri, çevreci yakıtlar, tasarruf sağlayan uygulamalar ve enerji

verimliliği önemli karşılıkları olacak konulardır. Kruvaziyer geminin ekolojik ayakizi daha geniş ölçekte ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınabilecek bir konudur.



Şekil 3.3 Çevre dostu deniz turizmi sadece daha temiz bir ulaşım şekli sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tarihi ve kültürel açıdan önemli şehirleri birbirine bağlayan bir köprü görevi de görür. Bu sürdürülebilir yaklaşım turizmi canlandırabilir ve kültürel etkileşimleri teşvik edebilir. Örneğin Akdeniz, bu tür sürdürülebilir deniz seferlerinden istifade edebilir.

3.2.3 Alternatif Yakıtların Yenilikçi Çözümlerle Birleştirilmesi

Çevresel sorunları ele almak ve sürdürülebilirliği teşvik etmek için alternatif yakıtların yanı sıra diğer yenilikçi çözümlerin uygulanması da düşünülebilir.

Yeşil yakıtlarla çalışan gelecekteki gemilerin aşağıdaki yaklaşım ve yöntemlerle entegre edilmesinin ekonomik fizibilitesini, uygulanabilirliğini, ve verimliliğini araştırmak için daha ileri bir çalışma yapılabilir:

- Rüzgar Destekli İtici Sistemleri (WAPS)
- Tekne Formu Optimizasyonu
- Tekne Kaplama, Boyama ve Temizleme (Hull Coating & Cleaning)

- Atık Isı Geri Kazanımı (WHR)
- Air Lubrication (Tekne altı hava kabarcıkları)
- Hava Durumu Yönlendirmesi (Weather Routing)
- Güneş Enerjisi Sistemleri
- Enerji Tasarruflu Aydınlatma Sistemleri
- Yapay Zeka (AI)

Yukarıda sıralandığı üzere, enerji verimliliğini artırmayı ve yakıt tüketimini azaltmayı ve aynı zamanda çevresel etkiyi iyileştirmeyi amaçlayan daha ileri çalışmaların bir parçası olarak alternatif deniz yakıtı kullanımı ile çeşitli yöntemler bir arada değerlendirilebilir.

Bu çalışmada, deniz taşımacılığının önemi vurgulanarak, deniz araçlarının tarih boyunca oynadığı önemli işleve dikkat çekilmiştir. Gemilerin evrimine ilişkin kısa bir araştırma yapılarak gelişim süreçlerine ışık tutulmuştur. İçten yanmalı makineler ve geleneksel yakıtlara dayanan küresel deniz taşımacılığının çevresel etkileri detaylandırılmıştır. Denizcilik endüstrisini karbonsuzlaştırmayı amaçlayan ve BM tarafından ortaya konan sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin yanı sıra IMO tarafından belirlenen net sıfır hedefleriyle uyumlu olan yeşil tahrik kavramına açıklık getirilmiştir. Ayrıca, düşük sıcaklıkta yanma teknolojileri ve yakıt pili teknolojileri bu çalışmanın başlangıcında kısaca irdelenmiştir. Daha sonra, alternatif yakıtlar, literatür taraması metodolojisine dayalı olarak çevresel kaygılar ve verimlilik perspektifinden kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu alternatif yakıtlar arasında metanol ve amonyak günümüz ve yakın gelecek için en umut verici denizcilik yakıtları olarak öne çıkarken, hidrojen de uzun vadede beklenen potansiyel bir çözüm olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, alternatif yakıtlar ve ilgili konular için önemli bir başvuru kaynağı niteliğindedir. Türkiye'nin iki şehri olan İstanbul ve İzmir için eylem önerileri ile tamamlanan bu çalışma, alternatif yakıtların benimsenmesini teşvik edecek ve deniz turizminin sürdürülebilirliğini artıracak girişimler önermiştir. Alternatif yakıtların kullanımıyla birleştirilebilecek çeşitli yenilikçi çözümler ortaya konmuş ve bu çözümlerin daha ileri bir çalışma düzeyinde araştırılması önerilmiştir.

Sonuç olarak, gemilerin kullandığı yakıt, çevresel etkilerinin birincil belirleyicisidir. Daha çevreci deniz yakıtlarına geçiş yapmak artık bir gerekliliktir. Daha yeşil bir geleceğe doğru giden bu yolculukta iş birliği kilit önem taşımaktadır. Kimya ve fizik gibi çeşitli bilim dallarının yanı sıra gemi inşaatı, deniz mühendisliği, makine mühendisliği, deniz bilimleri ve çevre bilimleri gibi farklı disiplinler güçlerini birleştirmelidir. Ayrıca, bu bulmacayı tamamlamak için üniversiteler, akademiler, yetkililer, hükümetler ve benzeri çeşitli paydaşlar, sürdürülebilir bir geleceğe doğru yelken açmak için bir araya gelmelidir.

- [1] “Ships in the Ancient Mediterranean (Image Gallery) p. 13 - World History Encyclopedia.” https://www.worldhistory.org/collection/84/ships-in-the-ancient-mediterranean/13/#gallery_wrapper (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [2] E. Fridell, “Emissions and Fuel Use in the Shipping Sector,” in *Green Ports*, Elsevier, 2019, pp. 19–33.
- [3] W. D. Fletcher and C. B. Smith, “Addressing global warming,” in *Reaching Net Zero*, Elsevier, 2020, pp. 9–17.
- [4] A. K. Jagerbrand, A. Brutemark, J. Barthel Sveden, and I.-M. Gren, “A review on the environmental impacts of shipping on aquatic and nearshore ecosystems,” *Sci. Total Environ.*, vol. 695, p. 133637, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133637.
- [5] K. Andersson, F. Baldi, S. Brynolf, J. F. Lindgren, L. Granhag, and E. Svensson, “Shipping and the Environment,” in *Shipping and the Environment*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 3–27.
- [6] K. Andersson, “The shipping industry and the climate,” in *Sustainable Energy Systems on Ships*, Elsevier, 2022, pp. 3–25.
- [7] J. Fritt-Rasmussen *et al.*, *Heavy Fuel Oil (HFO)*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2018.
- [8] “Heavy Fuel Oil (HFO) | Lubmarine TotalEnergies.” <https://lubmarine.totalenergies.com/faq/glossary/heavy-fuel-oil-hfo> (Erişim: 15 Nisan 2024).
- [9] C. Zamfirescu and I. Dincer, “Using ammonia as a sustainable fuel,” *J. Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 459–465, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.02.097.
- [10] P. Gilbert, C. Walsh, M. Traut, U. Kesieme, K. Pazouki, and A. Murphy, “Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 855–866, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.165.
- [11] International Maritime Organization, “Fourth IMO Greenhouse Gas Study: Executive Summary,” *IMO Greenh. Gas Study*, vol. 4, no. 1, p. 46, 2020.
- [12] “Greenhouse gas emissions - Our World in Data.” <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> (Erişim: 16 Nisan 2024).
- [13] T. M. Letcher, “Global warming—a complex situation,” in *Climate Change*, Elsevier, 2021, pp. 3–17.
- [14] “The Paris Agreement | UNFCCC.” <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (Erişim: 17 Nisan 2024).
- [15] “The Paris Agreement | MIT Climate Portal.” <https://climate.mit.edu/explainers/paris-agreement> (Erişim: 17 Nisan 2024).

- [16] “Introduction to IMO.” <https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx> (Erişim: 17 Nisan 2024).
- [17] “IMO and the Sustainable Development Goals.” <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/SustainableDevelopmentGoals.aspx> (Erişim: 18 Nisan 2024).
- [18] “IMO’s work to cut GHG emissions from ships.” <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx> (Erişim: 18 Nisan 2024).
- [19] “Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter (PM) – Regulation 14.” [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)—Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)—Regulation-14.aspx) (Erişim: 18 Nisan 2024).
- [20] “Sulphur emission control area (SECA) in Mediterranean Sea in 2025 | Marine & Offshore.” <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/sulphur-emission-control-area-seca-mediterranean-sea-2025> (Erişim: 18 Nisan 2024).
- [21] “Egyptian Ships - Ages of Exploration.” <https://exploration.marinersmuseum.org/watercraft/egyptian-ships/> (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [22] “Ship - Maritime, Navigation, Exploration | Britannica.” <https://www.britannica.com/technology/ship/History-of-ships> (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [23] “Athenian Trireme being rigged - The Art of Age of Sail.” <http://www.ageofsail.net/trireme6.asp> (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [24] “This ancient Greek warship ruled the Mediterranean.” <https://www.nationalgeographic.com/history/history-magazine/article/navy-warship-triremes-ancient-greece-athens-mediterranean> (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [25] “Marine Propulsion - National Maritime Historical Society.” <https://seahistory.org/sea-history-for-kids/marine-propulsion/> (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [26] “Ottoman ship Mahmudiye - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Ottoman_ship_Mahmudiye (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [27] N. Xiros, *Robust Control of Diesel Ship Propulsion*. London: Springer London, 2002.
- [28] “19th C Ships.” https://www.iro.umontreal.ca/~vaucher/History/Ships/Ships_19thC/index.html (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [29] “Moving Ships through the Water | Naval History Magazine - August 2020 Volume 34, Number 4.” <https://www.usni.org/magazines/naval-history-magazine/2020/august/moving-ships-through-water> (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [30] R. TAGGART, “THE ROLE OF THE PADDLE-WHEEL IN MARITIME HISTORY,” *J. Am. Soc. Nav. Eng.*, vol. 70, no. 3, pp. 443–462, Aug. 1958,

doi: 10.1111/j.1559-3584.1958.tb01750.x.

- [31] “Paddle wheel | Steam-powered, Rotary, Propeller | Britannica.” <https://www.britannica.com/technology/paddle-wheel> (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [32] “RMS Titanic - World History Encyclopedia.” https://www.worldhistory.org/RMS_Titanic/ (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [33] “Titanic: The Experience | Museums in London.” <https://www.timeout.com/london/museums/titanic-the-experience> (Erişim: 10 Nisan 2024).
- [34] L. BIRK, “Introduction to Ship Propulsion,” in *Fundamentals of Ship Hydrodynamics*, Wiley, 2019, pp. 389–397.
- [35] “Internal Combustion Engine Basics | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/internal-combustion-engine-basics> (Erişim: 13 Nisan 2024).
- [36] M. Palocz-Andresen, “Marine Diesel Engines,” 2013, pp. 159–172.
- [37] P. Breeze, “Diesel Engines,” in *Piston Engine-Based Power Plants*, Elsevier, 2018, pp. 47–57.
- [38] MAN Energy Solutions, “Basic principles of ship propulsion - Future in the making,” *MAN Energy Solut.*, pp. 1–68, 2018.
- [39] “How low-temperature combustion enables cleaner, more efficient engines – Combustion Research Facility.” <https://crf.sandia.gov/how-low-temperature-combustion-enables-cleaner-more-efficient-engines/> (Erişim: 21 Ocak 2024).
- [40] “Advanced Combustion Strategies | Department of Energy,” 2017. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/advanced-combustion-strategies> (Erişim: 20 Ocak 2024).
- [41] S. Gan, H. K. Ng, and K. M. Pang, “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion: Implementation and effects on pollutants in direct injection diesel engines,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 3, pp. 559–567, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.09.005.
- [42] T. K. Sharma, G. A. P. Rao, and K. M. Murthy, “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines: A Review,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 623–657, Dec. 2016, doi: 10.1007/s11831-015-9153-0.
- [43] D. K. M. CHITTHAARTH.M.R, CHARLES, DHONYNAVEEN.I.A, SUNIL KUMAR.G, “A study and analysis on hcci engine’s inlet valve,” *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. Volume 3, no. 3, pp. 545–554, 2012, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://iaeme.com/Home/article_id/IJMET_03_03_048.
- [44] Y. Fu, E. Hu, and Z. Xia, “HCCI technology using hydrogen energy and artificial intelligence,” *Appl. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 167–173, Sep. 2023, doi: 10.54254/2755-2721/11/20230226.
- [45] Y. D. Bharadwaz and A. S. Kumari, “PCCI combustion of low-carbon alternative fuels: a review,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 148, no. 12, pp.

5179–5207, Jun. 2023, doi: 10.1007/s10973-023-12108-1.

- [46] T. Pachianan, W. Zhong, S. Rajkumar, Z. He, X. Leng, and Q. Wang, “A literature review of fuel effects on performance and emission characteristics of low-temperature combustion strategies,” *Appl. Energy*, vol. 251, p. 113380, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113380.
- [47] “WARF Advances in Clean Tech | January 2024 - WARF.” <https://www.warf.org/technologies/summary/P100054US01/> (Erişim: 20 Ocak 2024).
- [48] D. Splitter, M. Wissink, D. Delvescovo, and R. Reitz, “RCCI engine operation towards 60% thermal efficiency,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2, 2013, doi: 10.4271/2013-01-0279.
- [49] S. K. Gupta and A. Krishnasamy, “A relative comparison of HCCI, PCCI, and RCCI combustion strategies: an alternative fuels perspective,” *Int. J. Engine Res.*, 2024, doi: 10.1177/14680874231216664.
- [50] J. M. Andújar and F. Segura, “Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2309–2322, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.03.015.
- [51] N. Rajalakshmi, R. Balaji, and S. Ramakrishnan, “Recent developments in hydrogen fuel cells: Strengths and weaknesses,” in *Sustainable Fuel Technologies Handbook*, Elsevier, 2021, pp. 431–456.
- [52] A. A. Kulikovskiy, “Fuel cell basics,” in *Analytical Modeling of Fuel Cells*, vol. 1, Elsevier, 2019, pp. 1–33.
- [53] U. D. of Energy, “Fuel Cells Fact Sheet,” *FUEL CELL Technol. Off.*, 2015, Erişim: 07 Eylül 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/fuel-cells-fact-sheet>.
- [54] M. İnci and Ö. Türksöy, “Review of fuel cells to grid interface: Configurations, technical challenges and trends,” *J. Clean. Prod.*, vol. 213, pp. 1353–1370, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.281.
- [55] Y. Wang, D. F. Ruiz Diaz, K. S. Chen, Z. Wang, and X. C. Adroher, “Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review,” *Mater. Today*, vol. 32, no. February, pp. 178–203, 2020, doi: 10.1016/j.mattod.2019.06.005.
- [56] L. van Biert, M. Godjevac, K. Visser, and P. V. Aravind, “A review of fuel cell systems for maritime applications,” *J. Power Sources*, vol. 327, no. X, pp. 345–364, 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.007.
- [57] C. Spiegel, “Water Management For PEM Fuel Cells.” <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/water-management-pem-fuel-cells> (Erişim: 08 Eylül 2023).
- [58] W. Dai *et al.*, “A review on water balance in the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 23, pp. 9461–9478, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.017.
- [59] K. Huang and J. B. Goodenough, “Introduction to solid oxide fuel cells (SOFCs),” *Solid Oxide Fuel Cell Technol.*, pp. 1–9, 2009, doi: 10.1533/9781845696511.1.

- [60] G. R. Molaeimanesh and F. Torabi, “Solid oxide fuel cells,” in *Fuel Cell Modeling and Simulation*, vol. 2, Elsevier, 2023, pp. 237–267.
- [61] “Molten carbonate fuel cells (MCFCs).” https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/mcfc_history.php (Erişim: 11 Eylöl 2023).
- [62] I. Dincer and Y. Bicer, “4.22 Electrochemical Energy Conversion,” in *Comprehensive Energy Systems*, vol. 4–5, Elsevier, 2018, pp. 856–894.
- [63] E. GÜLZOW and M. SCHULZE, “Alkaline fuel cells,” in *Materials for Fuel Cells*, Elsevier, 2008, pp. 64–100.
- [64] O. S. Burheim, “Hydrogen for Energy Storage,” in *Engineering Energy Storage*, Elsevier, 2017, pp. 147–192.
- [65] Y. N. Sudhakar, M. Selvakumar, and D. K. Bhat, “Biopolymer Electrolytes for Fuel Cell Applications,” in *Biopolymer Electrolytes*, Elsevier, 2018, pp. 151–166.
- [66] U.S. Department of Energy, “2019 Fuel cell technologies market report,” no. July, p. 69, 2020, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/2011_market_report.pdf.
- [67] DNV GL, “Alternative Fuels For Naval Vessels,” pp. 1–69, 2022, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.dnv.com/maritime/publications/alt-fuels-navy.html>.
- [68] T. Tronstad, L. Langfeldt, H. Å. Høgmoen, and G. P. Haugom, “STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS IN SHIPPING EMSA European Maritime Safety Agency Summary of Identified Gaps,” 2017, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://emsa.europa.eu/csn-menu/items.html?cid=14&id=2921>.
- [69] “Hydrogen - New World Encyclopedia.” <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Hydrogen#History> (Erişim: 29 Ağustos 2023).
- [70] G. Palmer and J. Floyd, *Energy storage and civilization: A systems approach*, vol. 40. 2020.
- [71] UNECE, “Technology Brief: Hydrogen,” 2021, Erişim: 30 Ağustos 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://unece.org/sites/default/files/2021-10/Hydrogen_brief_EN_final_0.pdf.
- [72] “Hydrogen Production: Natural Gas Reforming | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming> (Erişim: 02 Eylöl 2023).
- [73] T. D. of Energy, “Hydrogen Fact Sheet: Production of Low-Carbon Hydrogen - Center on Global Energy Policy at Columbia University SIPA | CGEP,” *FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE*.
- [74] “Hydrogen - Element information, properties and uses | Periodic Tablo.” <https://www.rsc.org/periodic-Tablo/element/1/hydrogen> (Erişim: 17 Ağustos 2023).
- [75] “hydrogen autoignition temperature - Wolfram|Alpha.” <https://www.wolframalpha.com/input/?i=hydrogen+autoignition+temperatu>

re (Erişim: 01 Eylöl 2023).

- [76] S. Verhelst and T. Wallner, “Hydrogen-fueled internal combustion engines,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, no. 6, pp. 490–527, 2009, doi: 10.1016/j.pecs.2009.08.001.
- [77] L. Van Hoecke, L. Laffineur, R. Campe, P. Perreault, S. W. Verbruggen, and S. Lenaerts, “Challenges in the use of hydrogen for maritime applications,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 815–843, 2021, doi: 10.1039/d0ee01545h.
- [78] S. S. Kumar and H. Lim, “An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13793–13813, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.127.
- [79] P. Breeze, “CHAPTER 8 Hydrogen Energy Storage,” *Power Syst. Energy Storage Technol.*, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-812902-9.00008-0.
- [80] “2030 Hydrogen Demand in the Norwegian Domestic Maritime Sector,” Erişim: 27 Ağustos 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.oceanhywaycluster.no/membersarea>.
- [81] Z. Stępień, “A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: Achievements and future challenges,” *Energies*, vol. 14, no. 20, 2021, doi: 10.3390/en14206504.
- [82] B. Shadidi, G. Najafi, and T. Yusaf, “A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines,” *Energies 2021, Vol. 14, Page 6209*, vol. 14, no. 19, p. 6209, Sep. 2021, doi: 10.3390/EN14196209.
- [83] Y. Karagöz, T. Sandalel, L. Yüksek, A. S. Dalkılıç, and S. Wongwises, “Effect of hydrogen-diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 8, pp. 1–13, 2016, doi: 10.1177/1687814016664458.
- [84] C. Acar and I. Dincer, “The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 5, pp. 3396–3406, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.149.
- [85] “Methanol | Properties, Production, Uses, & Poisoning | Britannica.” <https://www.britannica.com/science/methanol> (Erişim: 25 Eylöl 2023).
- [86] “PHYSICAL PROPERTIES OF METHANOL- Cetiner Engineering.” <https://cetinerengineering.com/Properties.htm> (Erişim: 01 Ekim 2023).
- [87] S. Sepahi and M. R. Rahimpour, “Methanol production from syngas,” in *Advances in Synthesis Gas: Methods, Technologies and Applications*, Elsevier, 2023, pp. 111–146.
- [88] F. Dalena, A. Senatore, A. Marino, A. Gordano, M. Basile, and A. Basile, “Methanol Production and Applications: An Overview,” in *Methanol*, Elsevier, 2018, pp. 3–28.
- [89] “Methanol - Thermophysical Properties.” https://www.engineeringtoolbox.com/methanol-methyl-alcohol-properties-CH3OH-d_2031.html (Erişim: 28 Eylöl 2023).
- [90] “AMF.” https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/methanol (Erişim: 28 Eylöl 2023).

- [91] “Maritime Fuels - Green Ammonia & Methanol.” <https://lee-enterprises.com/maritime-fuels-green-ammonia-methanol/> (Erişim: 04 Ekim 2023).
- [92] “A step forward for ‘green’ methanol and its potential to deliver deep GHG reductions in maritime shipping - International Council on Clean Transportation.” <https://theicct.org/a-step-forward-for-green-methanol-and-its-potential-to-deliver-deep-ghg-reductions-in-maritime-shipping/> (Erişim: 04 Ekim 2023).
- [93] K. W. Bandilla, “Carbon Capture and Storage,” in *Future Energy*, Elsevier, 2020, pp. 669–692.
- [94] MAN Energy Solutions, “Methanol in shipping,” pp. 1–12, 2022, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q3-2023/Download/methanol-in-shipping/d8358bd6-c66e-4dce-8656-4237259c5338/Methanol-Paper-SF>.
- [95] S. Ajdari, “Biomethanol Production and Use as Fuel,” pp. 1–15, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://etipbioenergy.eu/images/ETIP_Bioenergy_Biomethanol_production_and_use_as_fuel.pdf.
- [96] “Methyl Alcohol Safety Safety Tips for Using Methyl Alcohol in School Laboratories,” 2016.
- [97] “Methanol Safe Handling Manual,” 2013, Erişim: 16 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.methanol.org.
- [98] OCIMF and the Maritime Safety Forum (MSF), “The Carriage of Methanol in Bulk Onboard Offshore Vessels,” 2020, Erişim: 17 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.ocimf.org.
- [99] “Methanol Superstorage Solution For Existing Ships Earns.” <https://www.marinelink.com/news/methanol-superstorage-solution-existing-508456> (Erişim: 17 Ekim 2023).
- [100] G. W. WHITEHURST, “Methanol as an Energy Source,” 1977. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GPO-CRECB-1977-pt3/pdf/GPO-CRECB-1977-2-3.pdf> (Erişim: 20 Ekim 2023).
- [101] A. Kowalewicz, “Methanol as a Fuel for Spark Ignition Engines: A Review and Analysis,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 207, no. 1, pp. 43–52, Jan. 1993, doi: 10.1243/PIME_PROC_1993_207_158_02.
- [102] P. Bansal and R. Meena, “Methanol as an Alternative Fuel in Internal Combustion Engine: Scope, Production, and Limitations,” *Energy, Environ. Sustain.*, pp. 11–36, 2021, doi: 10.1007/978-981-16-1224-4_2/ŞEKİLS/12.
- [103] “Gasoline explained - octane in depth - U.S. Energy Information Administration (EIA).” <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/octane-in-depth.php> (Erişim: 20 Ekim 2023).
- [104] Saylor Academy, *General Chemistry: Principles, Patterns, and Applications*. 2012.
- [105] “Oiltanking: Octane Number (RON, MON) & Knock Resistance.”

<https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/octane-number-ron-mon-knock-resistance.html> (Erişim: 20 Ekim 2023).

- [106] M. Brusstar, M. Stuhldreher, D. Swain, and W. Pidgeon, “High efficiency and low emissions from a port-injected engine with neat alcohol fuels,” Oct. 2002, doi: 10.4271/2002-01-2743.
- [107] T. Chikahisa, N. Miyamoto, and T. Murayama, “Smokeless, low NO_x, and low noise diesel combustion with methanol as a main fuel,” 1981, doi: 10.4271/811375.
- [108] Z. Zhang *et al.*, “Effects of Methanol Application on Carbon Emissions and Pollutant Emissions Using a Passenger Vehicle,” *Processes*, vol. 10, no. 3, p. 525, Mar. 2022, doi: 10.3390/pr10030525.
- [109] X. Duan, L. Feng, H. Liu, P. Jiang, C. Chen, and Z. Sun, “Experimental investigation on exhaust emissions of a heavy-duty vehicle powered by a methanol-fuelled spark ignition engine under world Harmonized Transient Cycle and actual on-road driving conditions,” *Energy*, vol. 282, p. 128869, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128869.
- [110] M. K. Balki, C. Sayin, and M. Canakci, “The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine,” *Fuel*, vol. 115, pp. 901–906, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.020.
- [111] R. Daniel, C. Wang, H. Xu, G. Tian, and D. Richardson, “Dual-Injection as a Knock Mitigation Strategy Using Pure Ethanol and Methanol,” *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 5, no. 2, pp. 772–784, Apr. 2012, doi: 10.4271/2012-01-1152.
- [112] C. C. Enweremadu and H. L. Rutto, “Combustion, emission and engine performance characteristics of used cooking oil biodiesel—A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 2863–2873, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.036.
- [113] National Center for Biotechnology Information, “Methanol,” *PubChem Compound Summary for CID 887*, 2023. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methanol> (Erişim: 30 Ekim 2023).
- [114] H. Liu, Z. Zheng, L. Yue, L. Kong, and M. Yao, “Effects of Fuel Volatility on Combustion and Emissions over a Wide Range of EGR Rates in a Diesel Engine,” Oct. 2014, doi: 10.4271/2014-01-2659.
- [115] “Methanol - Chemical Economics Handbook (CEH) | S&P Global.” <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/methanol-chemical-economics-handbook.html> (Erişim: 01 Kasım 2023).
- [116] C. Cheng, R. Faurskov Cordtz, T. D. Pedersen, K. Winther, N. L. Førby, and J. Schramm, “Investigation of Combustion Characteristics, Physical and Chemical Ignition Delay of Methanol Fuel in a Heavy-duty Turbo-charged Compression Ignition Engine,” Erişim: 02 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://ssrn.com/abstract=4313214>.
- [117] “Fuels and Chemicals - Autoignition Temperatures.” <https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-ignition-temperatures->

d_171.html (Erişim: 02 Kasım 2023).

- [118] A. I. EL-Seesy, M. S. Waly, A. Nasser, and R. M. El-Zoheiry, “Improvement of the combustion, emission, and stability features of diesel-methanol blends using n-decanol as cosolvent,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, p. 18963, Nov. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-20326-0.
- [119] Q. H. Hassan, G. Shaker Abdul Ridha, K. A. H. Hafedh, and H. A. Alalwan, “The impact of Methanol-Diesel compound on the performance of a Four-Stroke CI engine,” *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 1993–1999, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.247.
- [120] B. Shen, Y. Su, H. Yu, Y. Zhang, M. Lang, and H. Yang, “Experimental study on the effect of injection strategies on the combustion and emissions characteristic of gasoline/methanol dual-fuel turbocharged engine under high load,” *Energy*, vol. 282, p. 128925, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128925.
- [121] T. Sathish Kumar and B. Ashok, “Material compatibility of SI engine components towards corrosive effects on methanol-gasoline blends for flex fuel applications,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 296, p. 127344, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.127344.
- [122] R. J. Lash, “The Corrosion Behavior of Metals, Plated Metals, and Metal Coatings in Methanol/Gasoline Fuel Mixtures,” Oct. 1993, doi: 10.4271/932341.
- [123] W. H. Buck, J. R. Lohuls, and J. A. Murphy, “Lubrication Studies in a Methanol-Fueled Spark Ignition Engine,” Sep. 1989, doi: 10.4271/892156.
- [124] H. Yaman, M. K. Yesilyurt, R. M. Raja Ahsan Shah, and H. S. Soyhan, “Effects of compression ratio on thermodynamic and sustainability parameters of a diesel engine fueled with methanol/diesel fuel blends containing 1-pentanol as a co-solvent,” *Fuel*, vol. 357, p. 129929, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129929.
- [125] B. Rajesh Kumar and S. Saravanan, “Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 84–115, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.085.
- [126] J. J. Corbett and J. J. Winebrake, “Lifecycle Analysis of the Use of Methanol for Marine Transportation,” *Us Dot*, no. August, 2018, Erişim: 09 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.maritime.dot.gov/sites/marad.dot.gov/files/docs/innovation/menta/11056/marine-methanol-report-20180810final-002.pdf>.
- [127] J. Dierickx *et al.*, “Strategies for introducing methanol as an alternative fuel for shipping,” *Transp. Res. Arena*, pp. 1–10, 2018.
- [128] “Cetane | McKinsey Energy Insights.” <https://www.mckinseyenergyinsights.com/resources/refinery-reference-desk/cetane/> (Erişim: 05 Aralık 2023).
- [129] A. M. Helmenstine, “Octane Number Definition and Example,” 2019. <https://www.thoughtco.com/definition-of-octane-number-604586> (Erişim: 05 Aralık 2023).
- [130] Maritime Knowledge Centre, TNO, and TU Delft, “Methanol as an

alternative fuel for vessels,” 2018.

- [131] R. Li, Z. Wang, P. Ni, Y. Zhao, M. Li, and L. Li, “Effects of cetane number improvers on the performance of diesel engine fuelled with methanol/biodiesel blend,” *Fuel*, vol. 128, pp. 180–187, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.03.011.
- [132] J. Bacha *et al.*, “Diesel Fuels Technical Review,” 2007.
- [133] S. Verhelst, J. W. Turner, L. Sileghem, and J. Vancoillie, “Methanol as a fuel for internal combustion engines,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 70, pp. 43–88, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.pecs.2018.10.001.
- [134] “Gasoline Octane Ratings Explained | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/energysaver/gasoline-octane-ratings-explained> (Erişim: 07 Aralık 2023).
- [135] S. Pardhe, J. Ahamad, I. Singh, P. Kumar, and A. Dhar, “Strategies for Efficient Utilization of Methanol in Compression Ignition Engines,” *Energy, Environ. Sustain.*, vol. 2023, pp. 161–182, 2023, doi: 10.1007/978-981-99-1392-3_6.
- [136] M. R. Saxena, R. K. Maurya, and P. Mishra, “Assessment of performance, combustion and emissions characteristics of methanol-diesel dual-fuel compression ignition engine: A review,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 8, no. 5, pp. 638–680, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JTTE.2021.02.003.
- [137] “Top Dead Center - Is When The Piston, Is At The Top Of Its Stroke.” <https://dannysengineportal.com/top-dead-center-is-when-the-piston-is-at-the-top-of-its-stroke/> (Erişim: 07 Aralık 2023).
- [138] “TDC and BDC piston positions. | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/Şekil/TDC-and-BDC-piston-positions_fig3_320762946 (Erişim: 07 Aralık 2023).
- [139] “Water | H₂O | CID 962 - PubChem.” <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/water> (Erişim: 10 Aralık 2023).
- [140] “Methanol | CH₃OH | CID 887 - PubChem.” <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/887> (Erişim: 10 Aralık 2023).
- [141] J. Dierickx, Q. Dejaegere, J. Peeters, L. Sileghem, and S. Verhelst, “Performance and emissions of a high-speed marine dual-fuel engine operating with methanol-water blends as a fuel,” *Fuel*, vol. 333, p. 126349, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126349.
- [142] D. B. Yellapragada and G. R. Budda, “Methanol—A Sustainable Fuel for SI Engine,” in *Energy, Environment, and Sustainability*, Springer Nature, 2021, pp. 103–137.
- [143] M. A. Ijaz Malik, M. Usman, N. Hayat, S. W. H. Zubair, R. Bashir, and E. Ahmed, “Experimental evaluation of methanol-gasoline fuel blend on performance, emissions and lubricant oil deterioration in SI engine,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 6, p. 168781402110252, Jun. 2021, doi: 10.1177/16878140211025213.
- [144] L. Sileghem, T. Huylebroeck, A. Van den Bulcke, J. Vancoillie, and S.

- Verhelst, “Performance and Emissions of a SI Engine using Methanol-Water Blends,” Apr. 2013, doi: 10.4271/2013-01-1319.
- [145] B. Zincir and C. Deniz, *Methanol as a Fuel for Marine Diesel*. Springer Singapore, 2021.
- [146] B. Zincir and C. Deniz, “Methanol as a Fuel for Marine Diesel Engines,” 2021, pp. 45–85.
- [147] J. Schröder, F. Müller-Langer, P. Aakko-Saksa, K. Winther, and W. Baumgarten FNR Magnus Lindgren STA, “Annex 56 A Report from the Advanced Motor Fuels Technology Collaboration Programme Methanol as Motor Fuel Summary Report,” 2020. Erişim: 11 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex Reports/AMF_Annex_56.pdf](https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_56.pdf).
- [148] J. Ellis *et al.*, “SUMMETH SUMMETH-Sustainable Marine Methanol Deliverable D6.2 Final Report-Summary of the SUMMETH Project Activities and Results CO-FUNDED BY,” 2018.
- [149] M. Tunér, P. Aakko-Saksa, and P. Molander, “SUMMETH SUMMETH-Sustainable Marine Methanol Deliverable D3.1 Engine Technology, Research, and Development for Methanol in Internal Combustion Engines CO-FUNDED BY,” 2018.
- [150] FCBI Energy, “METHANOL AS A MARINE FUEL REPORT,” *FCBI-Report-Handout-Web-Version*, 2016. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/07/FCBI-Report-Handout-Web-Version.pdf> (Erişim: 16 Kasım 2023).
- [151] J. Ellis and S. Partners, “SPIRETH-End of Project Report Activities and Outcomes of the SPIRETH (Alcohol (Spirits) and Ethers as Marine Fuel) Project.”
- [152] “Riviera - News Content Hub - Industry project assesses methanol as a future fuel.” <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/industry-project-assesses-methanol-as-a-future-fuel-39754> (Erişim: 21 Kasım 2023).
- [153] “Stena Germanica – StenaLine.com.” <https://stenaline.com/about-us/our-ships/stena-germanica/> (Erişim: 16 Kasım 2023).
- [154] “Stena Germanica - Reference case - Wärtsilä.” <https://www.wartsila.com/marine/customer-segments/references/ferry/stena-germanica> (Erişim: 16 Kasım 2023).
- [155] MeyerWerft, “‘MethaShip’ - new fuel with potential. Meyer Werft,” 2018. https://www.meyerwerft.de/en/press/press_detail/methaship_new_fuel_with_potential.jsp (Erişim: 20 Kasım 2023).
- [156] Meyer Werft, “Evaluation of Methanol - Methaship - methanol as fuel for engines in passenger shipping,” 2018. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/04/evaluation-of-methanol-daniel-sahnen.pdf> (Erişim: 20 Kasım 2023).
- [157] MAN B&W LGIM Engine, “The Methanol-fuelled MAN B&W LGIM Engine Application, service experience and latest development of the ME-LGIM engine MAN Energy Solutions The methanol-fuelled MAN B&W

- LGIM engine 2 Future in the making 3,” 2021. Erişim: 23 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0172_online-1.pdf?sfvrsn=212d3731_20.
- [158] “World’s First Methanol-Fuelled Engine Ordered for VLCC Segment.” <https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2023/11/22/world-s-first-methanol-fuelled-engine-ordered-for-vlcc-segment> (Erişim: 26 Kasım 2023).
- [159] Wärtsilä Corporation, “The Wärtsilä 32 Methanol Engine,” 2023. Erişim: 26 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/Wartsila-32-Methanol-leaflet.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w32&utm_content=brochure&utm_campaign=mp-engines-and-generating-sets-brochures.
- [160] WÄRTSILÄ FINLAND OY, “Wärtsilä 32 Methanol Engine Product guide,” 2023. Erişim: 26 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://brandhub.wartsila.com/m/62cdb6ccf84e6134/original/Wartsila-32-Methanol-Engine-Product-guide.pdf?utm_source=engines&utm_medium=future-fuel-engines&utm_term=marine-power&utm_content=productguide&utm_campaign=mp-engines-and-generating-sets-gated.
- [161] Y. Wang, H. Maidment, V. Boccolini, and L. Wright, “Life cycle assessment of alternative marine fuels for super yacht,” *Reg. Stud. Mar. Sci.*, vol. 55, p. 102525, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rsma.2022.102525.
- [162] H. Herzog, “Carbon Capture | MIT Climate Portal,” *Carbon Capture*, 2023. <https://climate.mit.edu/explainers/carbon-capture> (Erişim: 30 Kasım 2023).
- [163] H. Herzog and D. Golomb, “Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use,” in *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 2004, pp. 277–287.
- [164] W. Hua, Y. Sha, X. Zhang, and H. Cao, “Research progress of carbon capture and storage (CCS) technology based on the shipping industry,” *Ocean Eng.*, vol. 281, p. 114929, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114929.
- [165] T. M. Gür, “Carbon Dioxide Emissions, Capture, Storage and Utilization: Review of Materials, Processes and Technologies,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 89, p. 100965, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.pecs.2021.100965.
- [166] Wartsila, “Methanol as marine fuel – the solution you are looking for?,” 2023. <https://www.wartsila.com/insights/article/methanol-fuel-for-thought-in-our-deep-dive-q-a> (Erişim: 23 Aralık 2023).
- [167] Methanol Institute, “Marine | METHANOL INSTITUTE,” 2022. <https://www.methanol.org/marine/> (Erişim: 23 Aralık 2023).
- [168] S. Gumber and A. V. P. Gurumoorthy, “Methanol Economy Versus Hydrogen Economy,” in *Methanol*, Elsevier, 2018, pp. 661–674.
- [169] “Green Methanol Makes a Splash in Quest for Net-Zero Shipping | BloombergNEF.” <https://about.bnef.com/blog/green-methanol-makes-a-splash-in-quest-for-net-zero-shipping/> (Erişim: 23 Aralık 2023).

- [170] “All the way to net zero | Sustainable shipping | Maersk.” <https://www.maersk.com/sustainability/all-the-way-to-net-zero> (Erişim: 23 Kasım 2023).
- [171] E. Vikjær-Andresen, “E-methanol for Maersk’s first vessel,” *European Energy*, 2022. <https://europeanenergy.com/2022/03/14/e-methanol-for-maersks-first-vessel/> (Erişim: 23 Kasım 2023).
- [172] “PHOTOS: World’s 1st green methanol-powered boxship receives methanol in Egypt - Offshore Energy.” <https://www.offshore-energy.biz/photos-worlds-1st-green-methanol-powered-boxship-receives-methanol-in-egypt/> (Erişim: 23 Aralık 2023).
- [173] “Maersk signs shipbuilding contract for world’s first container vessel fueled by carbon neutral methanol 01,” no. February, pp. 1–5, 2021, Erişim: 23 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.maersk.com/news/articles/2021/07/01/container-fueled-by-carbon-neutral-methanol>.
- [174] “Rolls-Royce and Lürssen to focus on methanol propulsion for large yachts.” <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/pressreleases/2022/rolls-royce-and-luerssen-to-focus-on-methanol-propulsion-for-lar.html> (Erişim: 26 Kasım 2023).
- [175] “Rolls-Royce and Sanlorenzo team up for methanol propulsion in luxury yachts.” <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/pressreleases/2022/rolls-royce-and-sanlorenzo-team-up-for-methanol-propulsion-in-luxury-yachts.html> (Erişim: 26 Kasım 2023).
- [176] “Methanol engine, fuel cells, hybrid systems - Rolls-Royce presents new mtu propulsion solutions for ships at SMM.” <https://www.mtu-solutions.com/na/en/pressreleases/2022/Methanol-engine-fuel-cells-hybrid-systems-Rolls-Royce-presents-new-mtu-propulsion-solutions-for-ships-at-SMM.html> (Erişim: 26 Kasım 2023).
- [177] “Pricing - Methanex | Methanex.” <https://www.methanex.com/about-methanol/pricing/> (Erişim: 10 Aralık 2023).
- [178] “World Bunker Prices - Ship & Bunker.” <https://shipandbunker.com/prices#VLSFO> (Erişim: 10 Aralık 2023).
- [179] A. Peppas, S. Kottaridis, C. Politi, and P. M. Angelopoulos, “Carbon Capture Utilisation and Storage in Extractive Industries for Methanol Production,” *Eng*, vol. 4, no. 1, pp. 480–506, Feb. 2023, doi: 10.3390/eng4010029.
- [180] G. Ojo and K. Camarda, “Sustainable Ammonia Production via Electrolysis and Haber-Bosch Process,” 2022, pp. 229–234.
- [181] R. Steinberger-Wilckens and B. Sampson, “Market, Commercialization, and Deployment—Toward Appreciating Total Owner Cost of Hydrogen Energy Technologies,” in *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*, Elsevier, 2019, pp. 383–403.
- [182] “Ammonia _ NH3 _ CID 222 - PubChem,” Erişim: 25 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ammonia#section=Chemical-Classes>.

- [183] K. Machaj *et al.*, “Ammonia as a potential marine fuel: A review,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 44, p. 100926, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100926.
- [184] I. Dincer and O. Siddiqui, “Types of fuels,” in *Ammonia Fuel Cells*, Elsevier, 2020, pp. 33–76.
- [185] The Editors of Encyclopaedia Britannica, “Haber-Bosch process | Definition, Conditions, Importance, & Facts | Britannica,” *Britannica*, 2020. <https://www.britannica.com/technology/Haber-Bosch-process> (Erişim: 28 Ocak 2024).
- [186] A. Klerke, C. H. Christensen, J. K. Nørskov, and T. Vegge, “Ammonia for hydrogen storage: challenges and opportunities,” *J. Mater. Chem.*, vol. 18, no. 20, p. 2304, 2008, doi: 10.1039/b720020j.
- [187] C. Smith, A. K. Hill, and L. Torrente-Murciano, “Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 331–344, 2020, doi: 10.1039/C9EE02873K.
- [188] G. Marnellos and M. Stoukides, “Ammonia Synthesis at Atmospheric Pressure,” *Science (80-.)*, vol. 282, no. 5386, pp. 98–100, Oct. 1998, doi: 10.1126/science.282.5386.98.
- [189] I. Garagounis, V. Kyriakou, A. Skodra, E. Vasileiou, and M. Stoukides, “Electrochemical Synthesis of Ammonia in Solid Electrolyte Cells,” *Front. Energy Res.*, vol. 2, 2014, doi: 10.3389/fenrg.2014.00001.
- [190] Garagounis, Vourros, Stoukides, Dasopoulos, and Stoukides, “Electrochemical Synthesis of Ammonia: Recent Efforts and Future Outlook,” *Membranes (Basel)*, vol. 9, no. 9, p. 112, Aug. 2019, doi: 10.3390/membranes9090112.
- [191] I. A. Amar, R. Lan, C. T. G. Petit, and S. Tao, “Solid-state electrochemical synthesis of ammonia: a review,” *J. Solid State Electrochem.*, vol. 15, no. 9, pp. 1845–1860, Sep. 2011, doi: 10.1007/s10008-011-1376-x.
- [192] L. Klaas, D. Guban, M. Roeb, and C. Sattler, “Recent progress towards solar energy integration into low-pressure green ammonia production technologies,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 49, pp. 25121–25136, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.063.
- [193] Y. Bicer and I. Dincer, “Electrochemical Synthesis of Ammonia in Molten Salt Electrolyte Using Hydrogen and Nitrogen at Ambient Pressure,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 164, no. 8, pp. H5036–H5042, May 2017, doi: 10.1149/2.0091708jes.
- [194] H. Ishaq and C. Crawford, “Review and evaluation of sustainable ammonia production, storage and utilization,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 300, p. 117869, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117869.
- [195] “Ammonia | NIOSH | CDC.” <https://www.cdc.gov/niosh/topics/ammonia/default.html> (Erişim: 15 şubat 2024).
- [196] M. Appl, “Ammonia, 1. Introduction,” in *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley, 2011.
- [197] A. Yapicioglu and I. Dincer, “Experimental investigation and evaluation of

- using ammonia and gasoline fuel blends for power generators,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 154, pp. 1–8, May 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.072.
- [198] J. H. Garabedian, C. G. Johnson, “Theory of operation of an ammonia-burning internal combustion engine,” *U.S.C.F.S.T.I., AD Rep.; (United States)*.
- [199] “Air–fuel ratio - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Air–fuel_ratio (Erişim: 25 Şubat 2024).
- [200] A. Z. Mendiburu, J. A. Carvalho, and Y. Ju, “Flammability Limits: A Comprehensive Review of Theory, Experiments, and Estimation Methods,” *Energy & Fuels*, vol. 37, no. 6, pp. 4151–4197, Mar. 2023, doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c03598.
- [201] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, and E. C. Okafor, “Science and technology of ammonia combustion,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 37, no. 1, pp. 109–133, 2019, doi: 10.1016/j.proci.2018.09.029.
- [202] A. M. Elbaz, S. Wang, T. F. Guiberti, and W. L. Roberts, “Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications,” *Fuel Commun.*, vol. 10, p. 100053, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jfueco.2022.100053.
- [203] O. Herbinet, P. Bartocci, and A. Grinberg Dana, “On the use of ammonia as a fuel – A perspective,” *Fuel Commun.*, vol. 11, p. 100064, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jfueco.2022.100064.
- [204] P. Dimitriou and R. Javaid, “A review of ammonia as a compression ignition engine fuel,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 11, pp. 7098–7118, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.209.
- [205] T. Li, Y. Duan, Y. Wang, M. Zhou, and L. Duan, “Research progress of ammonia combustion toward low carbon energy,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 248, p. 107821, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.fuproc.2023.107821.
- [206] “Introduction to NH₃ Fuel - NH₃ Fuel Association.” <https://nh3fuelassociation.org/introduction/> (Erişim: 01 Şubat 2024).
- [207] “X-15 Hypersonic Research Aircraft - NASA.” <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/x-15/#hds-sidebar-nav-1> (Erişim: 29 Şubat 2024).
- [208] “GAC announces the world’s first engine powered by Ammonia - Gizmochina.” <https://www.gizmochina.com/2023/06/29/gac-announces-worlds-first-engine-powered-ammonia/> (Erişim: 29 Şubat 2024).
- [209] J. A. M. Chavando, V. B. Silva, L. A. da Cruz Tarelho, J. S. Cardoso, M. J. Hall, and D. Eusébio, “Ammonia as an alternative,” *Combust. Chem. Carbon Neutral Futur. What will Next 25 Years Res. Require?*, pp. 179–208, 2023, doi: 10.1016/B978-0-323-99213-8.00008-4.
- [210] C. W. Gross and S.-C. Kong, “Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia–DME mixtures,” *Fuel*, vol. 103, pp. 1069–1079, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.08.026.
- [211] W. Cornelius, L. W. Huellmantel, and H. R. Mitchell, “Ammonia as an

- Engine Fuel,” Feb. 1965, doi: 10.4271/650052.
- [212] C. Tornatore, L. Marchitto, P. Sabia, and M. De Joannon, “Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 8, Jul. 2022, doi: 10.3389/fmech.2022.944201.
 - [213] S. Frigo and R. Gentili, “Analysis of the behaviour of a 4-stroke Si engine fuelled with ammonia and hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 3, pp. 1607–1615, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.10.114.
 - [214] J. T. Gray, E. Dimitroff, N. T. Meckel, and R. D. Quillian, “Ammonia Fuel - Engine Compatibility and Combustion,” Feb. 1966, doi: 10.4271/660156.
 - [215] D. Lee and H. H. Song, “Development of combustion strategy for the internal combustion engine fueled by ammonia and its operating characteristics,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 1905–1925, Apr. 2018, doi: 10.1007/s12206-018-0347-x.
 - [216] Z. Lu *et al.*, “Numerical study of the compression ignition of ammonia in a two-stroke marine engine by using HTCGR strategy,” *Energy*, vol. 276, p. 127578, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127578.
 - [217] E. Nadimi, G. Przybyła, M. T. Lewandowski, and W. Adamczyk, “Effects of ammonia on combustion, emissions, and performance of the ammonia/diesel dual-fuel compression ignition engine,” *J. Energy Inst.*, vol. 107, p. 101158, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.joei.2022.101158.
 - [218] H. Wang, B. Wang, C. Yang, D. Hu, B. Duan, and Y. Wang, “Study on dual injection strategy of diesel ignition ammonia/hydrogen mixture fuel engine,” *Fuel*, vol. 348, p. 128526, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128526.
 - [219] “Nitrous oxide | Definition, Formula, Uses, Effects, & Facts | Britannica.” <https://www.britannica.com/science/nitrous-oxide> (Erişim: 17 Mart 2024).
 - [220] “Wärtsilä Introduces First Commercial 4-Stroke Ammonia Dual-Fuel Engine.” <https://maritime-executive.com/article/waertsilae-introduces-first-commercial-4-stroke-ammonia-dual-fuel-engine> (Erişim: 18 Mart 2024).
 - [221] “Wärtsilä 25 marine engine.” <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-25> (Erişim: 18 Mart 2024).
 - [222] W. Marine, “Wärtsilä 25 brochure,” Erişim: 18 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.wartsila.com.
 - [223] “MAN B&W ammonia engine development.” <https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/ammonia-engine> (Erişim: 19 Mart 2024).
 - [224] R. Vignesh and B. Ashok, “Selective catalytic reduction for NO_x reduction,” in *NO_x Emission Control Technologies in Stationary and Automotive Internal Combustion Engines*, Elsevier, 2022, pp. 285–317.
 - [225] A. M. Gujarathi, R. Al-Hajri, Z. Al-Ani, M. Al-Abri, and N. Al-Rawahi, “Towards technology, economy, energy and environment oriented simultaneous optimization of ammonia production process: Further analysis of green process,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, p. e21802, Nov. 2023, doi:

10.1016/j.heliyon.2023.e21802.

- [226] R. Singh *et al.*, “Advancement in integrated ammonia synthesis, and its techno-economic analysis, emission index, and contribution to the hydrogen 2.0 economy,” *Fuel*, vol. 364, p. 131030, May 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.131030.
- [227] S. Ghavam, M. Vahdati, I. A. G. Wilson, and P. Styring, “Sustainable Ammonia Production Processes,” *Front. Energy Res.*, vol. 9, Mar. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.580808.
- [228] D. R. MacFarlane *et al.*, “A Roadmap to the Ammonia Economy,” *Joule*, vol. 4, no. 6, pp. 1186–1205, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.04.004.
- [229] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W. I. F. David, and P. J. Bowen, “Ammonia for power,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 69, pp. 63–102, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.peccs.2018.07.001.
- [230] H. Zhao, “Green ammonia supply chain and associated market structure,” *Fuel*, vol. 366, p. 131216, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.131216.
- [231] M. E. Demir and I. Dincer, “Development and assessment of a solar driven trigeneration system with storage for electricity, ammonia and fresh water production,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 245, p. 114585, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114585.
- [232] C. Jackson *et al.*, “Ammonia to green hydrogen project,” *Feasibility study*, vol. 1, no. 0, pp. 1–70, 2020.
- [233] J. Egerer, V. Grimm, K. Niazmand, and P. Runge, “The economics of global green ammonia trade – ‘Shipping Australian wind and sunshine to Germany,’” *Appl. Energy*, vol. 334, p. 120662, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120662.
- [234] N. Morlanés *et al.*, “A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies,” *Chem. Eng. J.*, vol. 408, p. 127310, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127310.
- [235] J. Herdzyk, “Decarbonization of marine fuels—the future of shipping,” *Energies*, vol. 14, no. 14, 2021, doi: 10.3390/en14144311.
- [236] Adam Forsyth, “ALL AT SEA METHANOL AND SHIPPING,” *Ind. Backgr. FROM LONGSPUR Res.*, p. 1, 2022.
- [237] M. Hellström, R. Rabetino, H. Schwartz, A. Tsvetkova, and S. H. U. Haq, “GHG emission reduction measures and alternative fuels in different shipping segments and time horizons – A Delphi study,” *Mar. Policy*, vol. 160, p. 105997, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.marpol.2023.105997.
- [238] İZDENİZ A.Ş., “İzmir Deniz İşletmeciliği A.Ş.,” 2021. <https://www.izdeniz.com.tr/tr/hatlar/24/24> (Erişim: 18 Kasım 2023).
- [239] Şehir Hatları A.Ş., “Şehir Hatları A.Ş. Sefer Haritası,” 2023. <https://sehirhatlari.istanbul/tr> (Erişim: 18 Kasım 2023).
- [240] “Anadolu Ajansı.” <https://www.aa.com.tr/tr/yesilhat/yesil-ekonomi/ruzgar-sektorunde-hedef-yil-sonunda-12-bin-500-megavat-kapasiteye-ulasmak/1821975> (Erişim: 18 Aralık 2023).

- [241] E. Northrop *et al.*, “OPPORTUNITIES FOR TRANSFORMING COASTAL AND MARINE TOURISM Towards Sustainability, Regeneration and Resilience COORDINATING LEAD AUTHOR.”



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. F. ÇITAKOĞLU And A. D. ALKAN, "Sailing into Sustainability: Exploration of Methanol's Impact on Maritime Activities," The second International Graduate Studies Symposium on Maritime Science and Technology , vol.1, İstanbul, Turkey, pp.1, 2023
2. A. D. ALKAN And F. ÇITAKOĞLU, "Greening the Seas for a Bright Future: A Review Study on Alternative Fuels & Energy Efficiency in Maritime Industry," 4th International Naval Architecture and Maritime Symposium , vol.1, İstanbul, Turkey, pp.285-292, 2023
3. F. ÇITAKOĞLU And A. D. ALKAN, "A Review Study on EEXI and Green Shipping" International Graduate Research Symposium: IGRS'22 Fulltext Proceedings Book: June 1-3, 2022 İTÜ, İstanbul, Türkiye