

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİLERDE HİBRİT TAHRİK SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Şükrü Onur BAŞODA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Enstitü Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan ADATEPE

**2025
GİRESUN**

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİLERDE HİBRİT TAHRİK SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şükrü Onur BAŞODA

Enstitü Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Bu tez 03/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.
Hakan ADATEPE
Üye

Doç.Dr.
Egemen SULUKAN
Jüri Başkanı

Dr. Öğr. Üyesi
Selçuk ATASOY
Üye

Dr. Öğr. Üyesi
Kıvanç Ali ANIL
Üye

Dr. Öğr. Üyesi
Musa DEMİR
Üye

Prof. Dr. Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Şükrü Onur BAŞODA

../../2025

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında emeği geçen, katkı sunan ve desteklerini esirgemeyen herkese teşekkürlerimi sunarak başlamak istiyorum.

Öncelikle, bu tez çalışmasını yönlendiren, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak her aşamada bana rehberlik eden kıymetli danışman hocalarım Prof. Dr. Hakan ADATEPE ve Doç. Dr. Egemen SULUKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Hocalarım, akademik disiplini, araştırma yöntemleri konusundaki derin bilgisi ve her zaman teşvik edici yaklaşımıyla bu tezin şekillenmesinde ve başarıyla tamamlanmasında belirleyici bir rol oynamıştır.

Ayrıca, lisansüstü eğitimim boyunca akademik gelişimime büyük destek sağlayan ve bu süreçte yapıcı eleştirileriyle çalışmamın daha sağlam bir temele oturmasına yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ATASOY ve Dr. Öğr. Üyesi Musa DEMİR'e teşekkür ederim. Eğitimim boyunca bana kazandırdıkları bilgi birikimi ve yönlendirmeleri, bu tezin tamamlanmasına önemli katkılar sunmuştur.

Bu akademik yolculukta her zaman yanımda olan, manevi desteklerini hiç esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Özellikle babam Kazım BAŞODA ve annem Ferda Leyla BAŞODA, bana sağladığınız huzurlu ortam, sabır ve sevgi dolu desteğiniz olmasaydı bu süreçte ilerlemek mümkün olmayabilirdi. Sizin verdiğiniz güven ve moral, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde en büyük motivasyon kaynağım oldu.

Tezin hazırlanması sürecinde desteklerini esirgemeyen herkese en derin minnettarlığımı sunarım. Sizlerin varlığı, bu akademik yolculuğu daha anlamlı ve değerli kılmıştır.

İÇİNDEKİLER

BEYAN	i
TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı.....	2
1.2. Araştırmanın Önemi.....	2
1.3. Literatür Taraması ve Metodolojik Yaklaşım	3
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Gemiler İçin Yakıt Hücre Tiplerinin Değerlendirilmesi	5
2.1.1. Yakıt Hücresi Tipleri.....	6
2.1.1.1. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC).....	6
2.1.1.2. Alkalın Yakıt Hücresi (AFC)	7
2.1.1.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)	8
2.1.1.4. Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC).....	9
2.1.1.5. Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)	9
2.1.2. Yakıt Hücrelerinin Karşılaştırma Kriterleri	10

2.1.2.1. Maliyet	11
2.1.2.2. Yakıt Tipleri	12
2.1.2.3. Verimlilik	15
2.1.2.4. Emisyonlar	16
2.1.2.5. Boyut	17
2.1.2.6. Güvenlik	18
2.1.2.7. Güç Kapasitesi	19
2.1.2.8. Ömür	20
2.1.3. Yakıt Hücresi Seçimi ve Tartışma	20
2.2. Denizciliğin Dekarbonizasyonunun İncelenmesi: Hidrojen ve Amonyak Yaklaşımı	27
2.2.1. Metodoloji	27
2.2.1.1. Karbon Nötr Denizcilik Yollarının Ön Değerlendirmesi	28
2.2.1.2. Karar Verme	33
2.2.2. Sonuç ve Tartışma	34
2.2.2.1. Kriter Ağırlıkları	34
2.2.2.2. Amonyak ve Hidrojenin Kriter Performans Puanları	36
2.2.2.3. Nihai Sonuçlar ve Duyarlılık Analizi	39
2.3. Gemiler İçin Hibrit Güç ve Tahrik Sistemleri: Mevcut Durum ve Gelecekteki Zorluklar	41
2.3.1. Elektrikli ve Hibrit Gemilere Uygun Enerji Depolama Sistemleri	41
2.3.1.1. Bataryalar	41
2.3.1.2. Süperkapasitörler	43
2.3.1.3. Volanlar (Flywheels)	45
2.3.2. Güç Üretim Teknolojileri	46
2.3.2.1. İçten Yanmalı Motorlar	47
2.3.2.2. Yakıt Hücreleri	49
2.3.2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Diğer Karbonsuz Kaynaklar	51
2.3.3. Hibrit Tahrik Sistemi Mimarileri	52
2.3.3.1. Seri Konfigürasyon	53
2.3.3.2. Paralel Konfigürasyon	53
2.3.3.3. Seri-Paralel Konfigürasyon	54

2.3.4. Enerji Yönetim Stratejileri	55
2.3.4.1. Kural Tabanlı Kontrol Stratejisi.....	56
2.3.4.2. Optimizasyon Tabanlı Kontrol Stratejisi	57
2.3.5. Tartışma.....	58
2.3.5.1. Mimari Tasarım Metodolojisi	58
2.3.5.2. Sistem Seçim Metodolojisi	59
2.4. Günümüzde Gemilerde Kullanılan Gemi Tahrik Sistemleri.....	62
2.4.1. Kombine Dizel veya Gaz (CODOG)	63
2.4.2. Kombine Dizel Elektrik ve Gaz (CODLAG).....	64
2.4.3. Kombine Dizel ve Dizel (CODAD).....	65
2.4.4. Kombine Buhar ve Gaz (COSAG).....	65
2.4.5. Kombine Gaz ve Gaz (COGAG)	66
 BÖLÜM 3. METERYAL VE METOD.....	 68
3.1. Temel Özellikleri	68
3.1.1. Modüler Yapı	68
3.1.2. Gerçek Zamanlı Simülasyon	70
3.1.3. Gelişmiş Modelleme Araçları	71
3.1.4. Enerji Tüketimi ve Emisyon Analizi	73
3.2. Uygulama Alanları	75
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	 78
4.1. Alt Sistemler	78
4.2. Enerji Akışı	79
4.3. Modelin Amacı ve Önemi.....	80
4.4. Geminin Temel Fiziksel ve Hidrodinamik Parametreleri	80
4.5. Yardımcı Sistem ve Çevresel Parametrelerin Tanımlanması.....	81
4.6. Yakıt Hücresi 1	83
4.6.1. Batarya Davranışı.....	83
4.6.2. Güç Kaynakları	84

4.6.3. Güç Tüketicileri	85
4.6.4. Pervane Karakteristikleri.....	86
4.7. Yakıt Hücresi 2	87
4.7.1. Batarya Davranışı.....	88
4.7.2. Güç Kaynakları	89
4.7.3. Güç Tüketicileri	90
4.7.4. Pervane Karakteristikleri.....	91
4.8. Yakıt Hücresi 3	91
4.8.1. Batarya Davranışları.....	92
4.8.2. Güç Kaynakları	93
4.8.3. Güç Tüketicileri	94
4.8.4. Pervane Karakteristikleri.....	95
 BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	 96
 KAYNAKLAR	 98
ÖZGEÇMİŞ	106

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

CO	: Carbon Monoxide (Karbonmonoksit)
CO ₂	: Carbon Dioxide (Karbondioksit)
H ₂	: Hydrogen (Hidrojen)
H-B	: Haber-Bosch
NH ₄ ⁺	: Amonyum İyonları
NH ₄ OH	: Amonyum Hidroksit
NMC	: Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
NO _x	: Nitrogen Oxides

Kısaltmalar

ACOA	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu
AFC	: Alkalın Yakıt Hücresi
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci
ANN	: Yapay Sinir Ağı
CapEx	: Sermaye Harcamaları
CNG	: Sıkıştırılmış Doğal Gaz
COA	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu
DEA	: Farklı Evrim Algoritması
DPA	: Dinamik Programlama Algoritması
ESS	: Enerji Depolama Sistemleri
GA	: Genetik Algoritma
GO	: Küresel Optimizasyon
IGF	: Uluslararası Gaz Yakıt Kodları
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
LHV	: Alt Isıl Değer (Lower Heating Value)

LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
MCFC	: Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi
OpEx	: İşletme Harcamaları
PAFC	: Fosforik Asit Yakıt Hücresi
PEMFC	: Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi
PSO	: Parçacık Sürüşü Optimizasyonu
RTO	: Gerçek Zamanlı Optimizasyon
SAA	: Simüle Edilmiş Tavlama Algoritması
SOFC	: Katı Oksit Yakıt Hücresi
SWOT	: Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar, Tehditler



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1 : Yakıt hücre türlerinin özeti	11
Tablo 2 : Değerlendirme ölçekleri	11
Tablo 3 : Yakıt Hücreleri için Yakıt Alternatiflerinin Özellikleri	15
Tablo 4: Farklı yakıt türlerine bağlı olarak rapor edilen yakıt hücrelerinin elektriksel verimlilikleri.....	16
Tablo 5 : Yakıt hücresi tiplerinin güç yoğunluğu karşılaştırması	17
Tablo 6 : Gemide Kullanım İçin Yakıt Hücresi Özelliklerinin Ağırlıklandırılmasını Bulmak Amacıyla Yapılan Anket Sonuçları.....	21
Tablo 7 : Göreceli Önem Ölçeği (Ren ve Sovacool, 2015)	22
Tablo 8 : Uzman sıralama farkı aralıklarına göre göreceli önem ölçeği eşdeğeri	22
Tablo 9 : Kriterlerin karşılaştırma matrisi.....	23
Tablo 10 : Yakıt Hücrelerinin Maliyetlerine Göre Sıralaması.....	24
Tablo 11 : Nihai karşılaştırma matrisi.....	24
Tablo 12 : Hidrojen ve amonyak özellikleri	32
Tablo 13 : Literatürdeki önceki çalışmaların karşılaştırma kriterleri.....	34
Tablo 14 : Uzman görüşlerine göre gemilerde yakıt hücreleri için alternatif yakıtlar üzerindeki sonuçlar.	35
Tablo 15 : Uzman görüşlerine göre göreceli önem ölçekleri	36
Tablo 16 : Kriterlerin ağırlık matrisi	36
Tablo 17 : Her kriterde alternatif yakıtların performans puanları.....	39
Tablo 18 : Farklı durumlarda kriter ağırlıkları	40
Tablo 19 : Popüler pil türlerinin özellikleri	42
Tablo 20 : Enerji depolama seçeneklerinin karşılaştırma tablosu.....	46
Tablo 21 : Yakıt tüketimi ile CO ₂ emisyonu arasındaki dönüşüm faktörü.....	48
Tablo 22 : Gemi Türlerine Göre Sistem Değerlendirmesi	59

Tablo 23 : Geminin Temel Fiziksel ve Hidrodinamik Parametreleri.....	81
Tablo 24 : Yardımcı Sistem ve Çevresel Parametreleri ve Açıklamaları	82
Tablo 25. Analiz Edilen Üç Sistemin Karşılaştırılması	96



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 : Combined Diesel or Gas (CODOG)	63
Şekil 2 : Combined Diesel Electric and Gas (CODLAG).....	64
Şekil 3 : Combined Diesel and Diesel (CODAD).....	65
Şekil 4 : Combined Steam and Gas (COSAG)	66
Şekil 5 : Combined Gas and Gas (COGAG).....	67
Şekil 6: AVL CRUISE M Gemi Modeli	78
Şekil 7 : Batarya Davranışı	84
Şekil 8 : Güç Kaynakları	85
Şekil 9 : Güç Tüketicileri	86
Şekil 10 : Pervane Karakteristikleri	87
Şekil 11 : Batarya Davranışı	88
Şekil 12 : Güç Kaynakları	89
Şekil 13 : Güç Tüketicileri	90
Şekil 14 : Pervane Karakteristikleri	91
Şekil 15 : Batarya Davranışları	92
Şekil 16 : Güç Kaynakları	93
Şekil 17 : Güç Tüketicileri	94
Şekil 18: Pervane Karakteristikleri	95

GEMİLERDE HİBRİT TAHRİK SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

ÖZET

Bu tez, denizcilik sektöründe enerji verimliliğini artırmak ve karbon ayak izini azaltmak amacıyla hibrit tahrik sistemlerinin dinamik modelleme, simülasyon tabanlı analiz ve optimizasyon süreçlerini incelemektedir. Çalışma, özellikle PowerCell MS-100, Ballard FCwave™ ve Ballard FCveloCity®-MD 100 yakıt hücresi modellerini içeren hibrit sistemlerin performansını değerlendirmeye ve en uygun sistem entegrasyonunu belirlemeye odaklanmaktadır. Araştırma kapsamında, bu spesifik yakıt hücresi sistemlerinin dinamik modelleri oluşturulmuş ve ileri düzey simülasyon teknikleri kullanılarak enerji yönetimi stratejileri ve çevresel etkileri analiz edilmiştir. Simülasyonlar, her bir yakıt hücresi modelinin farklı operasyonel senaryolardaki davranışlarını, güç üretim kapasitelerini ve batarya sistemleri ile etkileşimlerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, PowerCell MS-100 sisteminin kompakt yapısı ve ani yük taleplerine hızlı yanıt verme yeteneğiyle düşük tonajlı gemi tipleri için uygun olduğunu; Ballard FCwave™ sisteminin yüksek güç üretim kapasitesiyle uzun süreli ve yoğun enerji tüketen görev profilleri için öne çıktığını; ve Ballard FCveloCity®-MD 100 sisteminin ise orta ölçekli uygulamalar için dengeli bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Simülasyon tabanlı değerlendirme, bu spesifik yakıt hücresi modellerinin enerji verimliliği ve emisyon kontrolü açısından uygulanabilirliklerini ortaya koyarak, gemi tahrik sistemleri tasarımına yönelik kritik bilgiler sağlamıştır. Bu bağlamda, bu tez, PowerCell MS-100, Ballard FCwave™ ve Ballard FCveloCity®-MD 100 gibi spesifik yakıt hücresi teknolojilerinin hibrit denizcilik sistemlerine entegrasyonuna yönelik analizler sunarak, denizcilik sektöründe sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesine yol gösterici bir rehber niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit Tahrik Sistemleri, Yakıt Hücreleri, Denizcilik, Enerji Yönetimi, Karbon Emisyonları, Simülasyon, Optimizasyon.

MODELING OF HYBRID PROPULSION SYSTEMS IN SHIPS

ABSTRACT

This thesis examines the dynamic modeling, simulation-based analysis, and optimization processes of hybrid propulsion systems, aiming to increase energy efficiency and reduce the carbon footprint of the maritime sector. The study specifically focuses on evaluating the performance of hybrid systems incorporating PowerCell MS-100, Ballard FCwave™, and Ballard FCveloCity®-MD 100 fuel cell models and determining the optimal system integration. Within the scope of the research, dynamic models of these specific fuel cell systems were created, and energy management strategies and environmental impacts were analyzed using advanced simulation techniques. Simulations were employed to evaluate the behavior, power generation capacities, and interactions with battery systems of each fuel cell model under different operational scenarios. The findings indicate that the PowerCell MS-100 system is suitable for low-tonnage vessel types due to its compact structure and rapid response capability to sudden load demands; that the Ballard FCwave™ system stands out for long-duration and high-energy-consuming duty profiles with its high power generation capacity; and that the Ballard FCveloCity®-MD 100 system offers a balanced solution for medium-scale applications. The simulation-based evaluation revealed the applicability of these specific fuel cell models in terms of energy efficiency and emission control, providing critical insights for marine propulsion system design. In this context, this thesis serves as a guiding framework for the development of sustainable energy solutions in the maritime sector by presenting analyses on the integration of specific fuel cell technologies such as PowerCell MS-100, Ballard FCwave™, and Ballard FCveloCity®-MD 100 into hybrid maritime systems.

Keywords: Hybrid Propulsion Systems, Fuel Cells, Maritime, Energy Management, Carbon Emissions, Simulation, Optimization.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Denizcilik sektörü, küresel ticaretin temel taşı olarak ekonomik ve sosyal yaşam üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Dünya ticaretinin yaklaşık %90'ı deniz taşımacılığıyla gerçekleştirilirken, sektörde enerji verimliliği ve çevresel etkilerle ilgili artan endişeler, daha sürdürülebilir çözümlere olan ihtiyacı artırmıştır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) gibi kuruluşlar, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik katı düzenlemeler getirmiş, bu durum da gemi tahrik sistemlerinde yenilikçi teknolojilere olan talebi artırmıştır. Özellikle son yıllarda, enerji tüketimini azaltmayı, karbon ayak izini düşürmeyi ve operasyonel maliyetleri optimize etmeyi hedefleyen hibrit tahrik sistemleri, denizcilik sektöründe dikkat çeken çözümlerden biri haline gelmiştir.

Hibrit tahrik sistemleri, geleneksel içten yanmalı motorları yenilikçi enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları ve yakıt hücreleri ile entegre ederek çalışır. Bu sistemler, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda operasyonel verimliliği artırır ve gemi operasyonlarının esnekliğini geliştirir. Hibrit tahrik sistemlerinin tasarımı ve uygulanabilirliği, farklı gemi tipleri ve operasyonel gereksinimlere bağlı olarak değişmekte olup, bu alandaki çalışmalar daha spesifik ve detaylı araştırmaları gerekli kılmaktadır. Dinamik modelleme, simülasyon tabanlı analiz ve optimizasyon teknikleri, hibrit sistemlerin etkinliğini artırmak ve en uygun tasarım çözümlerini sunmak için kritik bir rol oynar.

Bu bağlamda, gemilerde hibrit tahrik sistemlerinin modellenmesi, enerji yönetimi ve karbon emisyonlarının azaltılması konularında yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesine olanak sağlar. Hibrit sistemlerin uygulanmasıyla elde edilen enerji verimliliği ve çevresel faydalar, yalnızca denizcilik sektörüne değil, aynı zamanda küresel çevre

hedeflerine de önemli katkılar sunmaktadır. Ancak, bu sistemlerin karmaşıklığı ve maliyet-etkinliği gibi faktörler, detaylı bir teknik inceleme ve çok yönlü analiz gerektirir. Bu çalışma, hibrit tahrik sistemlerinin performansını değerlendirmeye, enerji yönetimi stratejilerini optimize etmeye ve çevresel etkileri azaltmaya yönelik kapsamlı bir yaklaşım sunmayı hedeflemektedir.

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu tezin temel amacı, gemilerde enerji verimliliğini artırmak ve karbon ayak izini azaltmak doğrultusunda, PowerCell MS-100, Ballard FCwave™ ve Ballard FCveloCity®-MD 100 yakıt hücresi modellerini içeren hibrit tahrik sistemlerinin dinamik modelleme, simülasyon tabanlı analiz ve optimizasyon süreçlerini incelemektir. Çalışma, belirtilen bu spesifik yakıt hücresi modellerini barındıran hibrit sistemlerin performansını değerlendirmeye ve farklı operasyonel senaryolarda en uygun sistem entegrasyon çözümlerini belirlemeye odaklanmaktadır.

Araştırma kapsamında, bu spesifik yakıt hücresi sistemlerinin dinamik modelleri oluşturulmuş ve ileri düzey simülasyon araçları kullanılarak enerji yönetimi stratejileri ile çevresel etkileri analiz edilmiştir. Mevcut literatürün genellikle hibrit tahrik sistemlerinin tekil bileşenlerine odaklandığı göz önüne alındığında, bu tez, PowerCell MS-100, Ballard FCwave™ ve Ballard FCveloCity®-MD 100 modellerini içeren hibrit sistemlerin tüm bileşenlerini bir arada ele alarak sektörel uygulamalar için daha bütünsel ve geniş bir perspektif sunmayı amaçlamaktadır. Dinamik modelleme ve simülasyon tabanlı analiz tekniklerinin kullanımı, bu spesifik hibrit sistemlerin performansını artırmak ve denizcilikteki uygulanabilirliğini geliştirmek için kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır.

1.2. Araştırmanın Önemi

Hibrit tahrik sistemleri, denizcilik sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için stratejik bir çözüm sunmaktadır. Özellikle, karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması, bu sistemlerin geliştirilmesindeki temel itici güçlerdir.

Hibrit sistemlerin uygulanması, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda gemi operasyonlarında daha yüksek bir verimlilik ve esneklik sağlar. Bu bağlamda, hibrit tahrik sistemlerinin enerji yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi, sektörde daha çevre dostu ve maliyet etkin çözümler için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Yakıt hücreleri, hibrit sistemlerin en kritik bileşenlerinden biridir ve bu çalışmada detaylı bir şekilde ele alınmıştır. PEMFC, düşük sıcaklıkta çalışma esnekliği ve hızlı tepki verme yeteneği ile dikkat çekerken, SOFC ve MCFC, yüksek sıcaklıkta çalışma avantajlarıyla uzun vadeli performans sunmaktadır. Bu yakıt hücrelerinin performansı, enerji dönüşüm verimliliği, maliyet ve çevresel etkiler açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca, enerji depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyon imkânları, hibrit sistemlerin daha geniş bir kullanım alanına hitap etmesini sağlamaktadır.

1.3. Literatür Taraması ve Metodolojik Yaklaşım

Literatür taraması, hibrit tahrik sistemleri ve yakıt hücrelerinin denizcilik sektöründeki uygulanabilirliği üzerine yapılan çalışmaların artışını göstermektedir. Bununla birlikte, mevcut çalışmalar genellikle tek bir bileşene veya enerji yönetimi stratejisine odaklanmaktadır. Bu tez, hibrit tahrik sistemlerini bütünsel bir yaklaşımla ele alarak, farklı bileşenlerin entegrasyonunu ve bu sistemlerin performansını bir arada değerlendirmektedir.

Tez kapsamında, analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak, farklı yakıt hücrelerinin performansı analiz edilmiştir. Ayrıca, dinamik modelleme ve simülasyon araçları ile hibrit sistemlerin enerji yönetimi stratejileri optimize edilmiştir. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan metodolojik yaklaşımlar, hem teorik hem de pratik açıdan önemli katkılar sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez, gemilerde hibrit tahrik sistemlerinin dinamik modelleme, simülasyon tabanlı analiz ve optimizasyon süreçlerini detaylı bir şekilde ele alarak,

enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için yenilikçi çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, hibrit tahrik sistemlerinin denizcilik sektöründeki uygulanabilirliğini artırmak ve sektörel dönüşüme katkıda bulunmak için kapsamlı bir rehber niteliği taşımaktadır.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Gemiler İçin Yakıt Hücre Tiplerinin Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde, gemilerde kullanılabilecek yakıt hücre tiplerinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması üzerine kapsamlı bir analiz sunulacaktır. İlk olarak, yakıt hücrelerinin farklı türleri ele alınacak olup, Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC), Alkalın Yakıt Hücresi (AFC), Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC), Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC) ve Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC) gibi başlıca yakıt hücresi türlerinin tanıtımı yapılacaktır. Bu türlerin çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelenecektir.

Ardından, yakıt hücrelerinin karşılaştırma kriterleri üzerinden bir değerlendirme yapılacaktır. Bu kriterler arasında maliyet, yakıt tipleri (hidrojen, LNG, dizel yağı gibi), verimlilik, emisyon değerleri, boyut, güvenlik, güç kapasitesi ve ömür gibi önemli faktörler yer alacaktır. Bu kriterler, yakıt hücrelerinin gemilerde kullanım potansiyelini anlamak ve uygun yakıt hücresi tipini belirlemek açısından kritik öneme sahiptir.

Son olarak, yakıt hücresi seçimine yönelik bir tartışma gerçekleştirilecektir. Bu kısımda, farklı yakıt hücresi tiplerinin avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurularak, gemiler için en uygun yakıt hücresi türü önerilecek ve bu seçimin gerekçeleri ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

2.1.1. Yakıt Hücresi Tipleri

Bu bölümde, gemilerde kullanılabilecek yakıt hücresi türleri ele alınacaktır. İlk olarak, Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC), Alkalın Yakıt Hücresi (AFC), Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC), Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC) ve Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC) olmak üzere beş farklı yakıt hücresi türü incelenecektir. Her bir hücrenin temel özellikleri, avantajları ve dezavantajları ile birlikte gemilerde kullanılabilirlik potansiyelleri tartışılacaktır.

Bu başlık altında, her yakıt hücresi tipinin gemilerdeki uygulamalarına uygunluğu, verimlilik, maliyet ve operasyonel avantajları açısından karşılaştırılacak ve gemi endüstrisi için en uygun yakıt hücresi türleri değerlendirilecektir.

2.1.1.1. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC)

PEMFC, en esnek yakıt hücresi türüdür ve uygulama alanında en geniş kullanım yelpazesine sahiptir. Bu nedenle, en umut verici yakıt hücresi olarak uygulamalarda yaygınlaşması beklenmektedir (Sharaf ve Orhan, 2014). PEM tipi yakıt hücresinde platin bazlı elektrotlar kullanılır ve elektrolit olarak bir iyon değişim membranı bulunur. Bu membran, protonları mükemmel bir şekilde aktarırken elektrik yalıtkan bir işlev görür (Tronstad vd., 2017). Çalışma sıcaklığı genellikle 65 - 85 °C arasında değişmekte olup, yakıt hücresi 100 °C'nin altında çalışmalıdır çünkü su, katot tarafında oluşur (Dai vd., 2009). Protonların geçirgenliği için membranın nemli kalması gerekmektedir. PEM, yakıt olarak hidrojen kullanır ve oksijenle reaksiyona girerek su üretir, ayrıca bu süreçte elektrik ve ısı açığa çıkar (egzotermik bir reaksiyon).

Proton değişim membranlı yakıt hücresinin nispeten düşük bir çalışma sıcaklığı vardır, bu da esnek çalışma sağılar ve malzeme gereksinimlerini daha az katı hale getirir. Bu özellikler, araştırma ve geliştirme çalışmalarının odak noktasıdır. PEMFC sisteminin verimliliği yaklaşık %50-60 civarındadır (Tronstad vd., 2017). PEMFC'nin verimli bir şekilde çalışabilmesi için saf hidrojen hücreye verilmelidir çünkü platin katalizörü karbon monoksit tarafından zehirlenebilir (Baschuk ve Li, 2001). Hidrokarbonlar yakıt

olarak kullanılabilir ancak karbon toleransı düşük olduğu için bu yakıtların bir buhar reformlama ünitesinden geçmesi gerekir ve yakıtın saflığını sağlamak için bir su-gaz kaydırma sistemi kullanılır (Sasank vd., 2016). PEM yakıt hücrelerinin dezavantajları arasında platin katalizör ihtiyacı, hücrede su yönetiminin zorluğu ve saf hidrojenin yakıt olarak kullanılması yer almaktadır. PEM yakıt hücreleri genellikle otomotiv ve taşınabilir uygulamalarda kullanılır.

PEMFC için bir diğer önemli gelişme, yüksek sıcaklık versiyonunun geliştirilmesidir. Bu tür, düşük sıcaklık seçeneğine göre daha az gelişmiş olmasına rağmen 200 °C'ye kadar çalışabilir ve karbon içeren yakıtlara karşı daha az hassastır. Yüksek sıcaklık türü, geleneksel PEM türlerinin bazı sorunlarını çözmektedir; bunlar arasında safsızlıklara karşı hassasiyet ve su yönetimi bulunmaktadır (Tronstad vd., 2017). Yüksek sıcaklık, safsızlıklara karşı olan etkiyi azaltır ve reformlama ünitesinden hidrojen çıkarıldıktan sonra karbon içeren yakıtların beslenmesini sağlar. Bu, dizel, LNG veya metanol gibi karbon içeren yakıtların kullanımına olanak tanır. Ayrıca, suyun yüksek sıcaklık nedeniyle gaz fazına geçmesi su yönetimini basitleştirir.

Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC), düşük çalışma sıcaklığı ve esneklik avantajları ile geniş bir uygulama yelpazesinde önemli bir yer tutar. Yüksek verimlilik ve düşük sıcaklıkta çalışabilme kapasitesi, araştırmaların odak noktası olmaya devam ederken, yüksek sıcaklık versiyonları su yönetimi ve karbon içeren yakıtların kullanımına dair gelişmeleri beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, gemi tahrik sistemlerinin dinamik modelleme ve simülasyon tabanlı analizi için PEMFC teknolojisinin sağladığı esneklik, gemilerde sürdürülebilir enerji çözümleri için büyük bir potansiyele işaret etmektedir.

2.1.1.2. Alkalın Yakıt Hücresi (AFC)

Alkalın yakıt hücresi, ilk olarak 1939 yılında Bacon tarafından geliştirilmiş olup, genellikle 1-5 kW güç çıkışı sağlamakta, ancak bazı test raporlarında 200 kW'a kadar ulaşabildiği görülmektedir (Tronstad ve diğerleri, 2017). AFC'nin elektroliti alkalın olup, anot olarak nikel ve katot olarak gümüş kullanır. Yakıt hücresinin adı, potasyum

hidroksit (KOH) gibi alkalın bir çözeltinin elektrolit olarak kullanıldığını ifade eder ve çalışma sıcaklığı genellikle 100°C'nin altındadır (De-Troya ve diğerleri, 2016). CO₂ toleransı düşüktür ve hücredeki verimliliği olumsuz etkileyen potasyum karbonat üretimine neden olur.

Bu yakıt hücrelerinin her biri, gemi tahrik sistemleri için farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Düşük sıcaklıkta çalışan PEMFC esnekliği ve verimliliği ile dikkat çekerken, AFC daha düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır.

PAFC ise yüksek sıcaklıklarda verimliliği artırmakla birlikte, düşük enerji yoğunluğu gibi sınırlamalara sahiptir. Bu hücrelerin dinamik modelleme ve simülasyon tabanlı analiz süreçlerinde optimizasyonları, gemi tahrik sistemlerinde verimliliği artırmaya yönelik önemli katkılar sunabilir.

2.1.1.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)

Fosforik asit yakıt hücresi, 150 ila 220°C arasındaki yüksek sıcaklıklarda çalışır (Saxena ve Anurag, 2015). PAFC, elektrolit olarak sıvı formda fosforik asit kullanır. Bu yakıt hücresi türünde, anot tarafına giren yakıt iyonize olur ve katalizör yardımıyla protonlar (H⁺) katot tarafına doğru hareket eder. Protonlar, fosforik asit elektroliti aracılığıyla katoda doğru taşınır. Oksijen varlığında ve dış devreden gelen elektronlarla birlikte, katotta su üretirler. Deneylerden elde edilen verilere göre, elektriksel performans yaklaşık %38 - %40 ve termal performans ise yaklaşık %40 - %45'tir. Bu nedenle, birleşik sistemlerde toplam performans %85'e kadar çıkabilir (De-Troya ve diğerleri, 2016).

Fosforik asit yakıt hücreleri, gemi tahrik sistemleri için yüksek sıcaklıklarda çalışabilme yetenekleri ve ısı geri kazanım sistemleri sayesinde daha verimli olabilen bir seçenek sunar. Ancak, düşük enerji yoğunluğu ve yavaş başlangıç süresi gibi dezavantajları göz önünde bulundurularak, bu hücrelerin dinamik modelleme ve simülasyon tabanlı analizlerde optimizasyonları gerekmektedir. Bu süreçler, denizcilik tahrik sistemlerinin verimliliğini artırma potansiyeli taşıyan önemli adımlar olacaktır.

2.1.1.4. Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC)

Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC), yaklaşık 600–700 °C sıcaklıkta çalışan, yüksek verimli ve çevreci bir yakıt hücresi türüdür. Elektrolit olarak erimiş lityum, potasyum ve/veya sodyum karbonat tuzları içeren bu sistemler, hem hidrojen hem de karbon monoksit gibi hidrokarbon türevli gazlarla çalışabilmektedir (Larminie & Dicks, 2003). Yüksek çalışma sıcaklığı sayesinde doğal gaz ve biyogaz gibi alternatif yakıtların doğrudan kullanımına olanak tanıyarak yeniden biçimlendirme (reforming) işlemini hücre içinde gerçekleştirebilir (Singhal & Kendall, 2003). Aynı zamanda bu yüksek sıcaklık seviyesi, sistemin atık ısısının geri kazanımını kolaylaştırır ve kojenerasyon (CHP) sistemleriyle entegre çalışmasına imkân verir (O'Hayre et al., 2016).

MCFC sistemleri, özellikle sabit güç üretimi ve denizcilik gibi uygulamalarda, düşük emisyon ve yüksek verimlilik avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. Bu sistemlerin karbon emisyonlarını düşürmedeki potansiyeli, karbon dioksit geri devrimi prensibine (CO₂ recirculation) dayanmaktadır (EG&G Technical Services, 2004). Ayrıca, düşük NO_x emisyonları ve fosil yakıtlarla uyumlu çalışma yetenekleri sayesinde MCFC'ler, Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) 2050 yılına kadar karbon emisyonlarını %50 azaltma hedefiyle (IMO, 2018) uyumlu sürdürülebilir çözümler arasında değerlendirilmektedir. Bu bağlamda MCFC teknolojisi, denizcilikteki hibrit tahrik sistemlerinde ileriye dönük stratejik bir rol üstlenme potansiyeline sahiptir.

2.1.1.5. Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)

Katı oksit yakıt hücresi, yüksek sıcaklıkta çalışan bir yakıt hücresidir ve 800 - 1000°C arası sıcaklıklarda çalışır (Marefati ve Mehrpooya, 2019; Mench, 2008). Katı oksit yakıt hücreleri, elektrolit olarak katı hâlde itriyum stabilize edilmiş zirkonyum oksit kullanır. Molten karbonat yakıt hücrelerinde olduğu gibi, katı oksit yakıt hücrelerinde de anot olarak nikel alaşımları kullanılırken, katot olarak lantan stronsiyum manganit tercih edilir (Tronstad ve ark., 2017).

Katı oksit yakıt hücrelerinin elektriksel verimliliği %50 ile %60 arasında değişirken, yüksek sıcaklık sayesinde MCFC'de olduğu gibi bu hücreler de ısı birleşik sistemlerde kullanılabilir ve toplam verimlilik %75 - %80 seviyelerine çıkabilir (Tronstad ve ark., 2017). Bu yüksek sıcaklık sonucunda, SOFC hücrelerinin PEMFC kadar pahalı katalizörlere ihtiyaç duymadığı belirtilmektedir.

Yukarıda belirtilen tüm yakıt hücrelerinin avantajları ve dezavantajları göz önüne alındığında, SOFC'lerin özellikle yüksek verimlilikleri, geniş yakıt seçenekleri ve yüksek sıcaklıklarda çalışma yetenekleri nedeniyle gemi tahrik sistemlerinde kullanıma uygun olduğu söylenebilir. Bu hücreler, düşük maliyetli katalizör gereksinimi ve yüksek enerji yoğunluğu avantajlarıyla, özellikle uzun süreli yüksek enerji talep eden gemi sistemlerinde tercih edilebilecek alternatifler arasında yer almaktadır.

2.1.2. Yakıt Hücrelerinin Karşılaştırma Kriterleri

Gemi üzerindeki kullanım için yakıt hücrelerini karşılaştırmak amacıyla öncelikle kriterler belirlenmiş ve her bir kriter için yakıt hücresi türleri değerlendirilip sıralanmıştır. İkinci olarak, değerlendirme ölçekleri dikkate alınarak bir matris tablosu oluşturulmuştur. Her karşılaştırma kriteri için beş değerlendirme ölçeği mevcuttur ve bu ölçekler tablo 1'de verilmiştir. Karşılaştırma kriterleri maliyet, verimlilik, yakıt türü, emisyon, güvenlik, boyut, güç kapasitesi ve kullanım ömrü dikkate alınarak seçilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler ışığında, gemi tahrik sistemlerinde kullanılacak yakıt hücrelerinin seçimi, sadece maliyet ve verimlilik açısından değil, aynı zamanda çevresel etkiler, güvenlik ve uzun vadeli performans kriterleri açısından da titizlikle ele alınmalıdır. Bu kapsamda, her yakıt hücresinin sunduğu avantajlar ve dezavantajlar, gemi sistemlerinin gereksinimlerine göre analiz edilerek en uygun çözüm belirlenmelidir.

Tablo 1 : Yakıt hücre türlerinin özeti

Yakıt Hücresi Türü	Yakıt Seçenekleri	Emisyonlar	Verimlilik	Çalışma Sıcaklıkları
Alkalın Yakıt Hücresi (AFC)	Hidrojen	Su	%50-60	50 - 230 °C
Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)	Doğal Gaz, Dizel, Hidrojen	Karbon içeren yakıt kullanılırsa CO ₂ emisyonu	%40-50	150 - 220 °C
Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC)	Doğal Gaz, Dizel, Hidrojen	Karbon içeren yakıt kullanılırsa CO ₂ emisyonu	%30-70	600 - 700 °C
Proton Değişim Membran Yakıt Hücresi (PEMFC)	Hidrojen	Su	%40-60	50 - 130 °C
Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)	Doğal Gaz, Dizel, Hidrojen	Karbon içeren yakıt kullanılırsa CO ₂ emisyonu	%40-70	500 - 1000 °C

Tablo 2 : Değerlendirme ölçekleri

Değerlendirme Ölçeği	Gösterge
1	En Kötü
2	Daha Kötü
3	Orta
4	Oldukça İyi
5	En İyi

2.1.2.1. Maliyet

Yakıt hücreleri, dizel motorlara kıyasla yüksek maliyetlerinden dolayı öne çıkan bir pazar payına sahip değildir, ancak birçok şirket bu maliyeti azaltma potansiyelini görmektedir (Garche ve Jörisen, 2015; van Biert ve diğerleri, 2016). Bu bağlamda, ABD Enerji Bakanlığı'nın tahminlerine göre, doğrudan hidrojen Proton Değişim Membranı (PEM) yakıt hücre yığınlarının maliyetleri, yılda 100.000 birim üretim hacmi ile 45\$/kW'a ve yılda 500.000 birim üretim ile 2020 ve 2025 yılları arasında 45\$/kW seviyesine indirilebilecektir (Marcinkoski ve diğerleri, 2017). Bu maliyet düşüşü, yakıt hücrelerinin gelecekte dizel motorlarla rekabet edebileceğini göstermektedir (Pratt ve Klebanoff, 2016).

OpEx, bakım maliyetleri ve yakıt maliyetini içerir. Yakıt maliyeti, yıllık olarak yakıt hücresi türleri arasında oldukça düşük olup bakım maliyetleri daha yüksektir (Steward

ve diğerleri, 2009). Ancak LNG, denizcilikte daha az tercih edilen bir yakıt türü iken, dizel yakıt depolama açısından önemli avantajlara sahiptir. Öte yandan, hidrojen depolaması yüksek maliyetli bir süreçtir ve bu da sermaye harcamalarını artırmaktadır. Sonuç olarak, yakıt hücreleri gemi tahrik sistemlerinde kullanım potansiyeli açısından ciddi bir gelişim göstermektedir. Ancak bu teknolojilerin uygulanabilirliği, sermaye ve işletme maliyetleri ile yakıt türü seçimine bağlıdır. Hidrojen ve LNG gibi alternatif yakıtlar, depolama ve işleme maliyetlerinden dolayı başlangıçta daha yüksek yatırım gerektirse de, uzun vadede çevresel faydaları ve maliyet avantajları yakıt hücrelerini cazip bir seçenek haline getirmektedir. Bu bağlamda, hidrojen üretim maliyetlerini düşürmek, yakıt hücrelerinin ticari gemicilikte daha yaygın kullanılmasının önünü açacak önemli bir adım olacaktır.

2.1.2.2. Yakıt Tipleri

Her ne kadar yakıt hücrelerinin ana yakıtı hidrojen olsa da, daha önce belirtildiği gibi, bazı türler dizel yakıt ve LNG (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz) kullanabilmektedir. Bu nedenle, yakıt olasılığı olarak üç tür yakıt incelenmiştir.

Sonuç olarak, gemi tahrik sistemlerinde yakıt hücresi teknolojilerinin kullanımı, kullanılan yakıt türüne göre değişiklik göstermektedir. Hidrojen, LNG ve dizel gibi farklı yakıtların avantajları ve dezavantajları göz önüne alındığında, gemi uygulamaları için en uygun yakıtın seçimi, yakıtın maliyeti, çevresel etkisi ve teknik performansına bağlıdır. Bu üç yakıt seçeneğinin detaylı analiz edilmesi, gemi tahrik sistemlerinin dinamik modellemesi ve optimizasyonu çalışmalarında önemli bir rol oynamaktadır.

Hidrojen

Hidrojen, evrende en bol bulunan element olmasına rağmen saf yapısında nadiren bulunur (Schlapbach ve Züttel, 2001). Hidrojen, yakıt hücreleri için ana yakıt seçeneğidir ve dizel yakıt, doğal gaz, biyokütle veya elektroliz gibi çeşitli kaynaklardan elde edilebilir. Hidrojenin düşük bir depolama yoğunluğu vardır ve bu,

lojistik yakıt perspektifinden büyük bir dezavantajdır. Hidrojen genellikle yüksek basınçlı tanklarda veya -253 °C'de kriyojenik olarak depolanır (Durbin ve Malardier-Jugroot, 2013). Alternatif olarak, iki diğer yöntem; metal hidritler ve kimyasal bileşikler halen araştırılmaktadır ve ticari olarak ticaret gemileri için mevcut değildir (van Biert ve diğerleri, 2016). Diğer yandan, LNG ve dizel yakıt, yakıt hücreleri için dolaylı kullanımları ve yakıt işleme özellikleri nedeniyle hidrojen taşıyıcıları olarak görülmelidir.

Sonuç olarak, hidrojen, yakıt hücresi teknolojisinde önemli bir yakıt kaynağı olmasına rağmen, düşük depolama yoğunluğu ve yüksek maliyetli depolama sistemleri gibi zorluklar mevcuttur. LNG ve dizel gibi alternatif yakıtların dolaylı olarak hidrojen taşıyıcısı olarak kullanılması, özellikle gemi tahrik sistemlerinde yakıt tedarik zincirini optimize etmek için önemli avantajlar sağlayabilir.

Bu yakıtların işlenmesi ve kullanımı, gemi tahrik sistemlerinin dinamik modelleme ve simülasyon tabanlı analizlerinde dikkate alınması gereken unsurlardandır.

LNG

Doğal gaz, metan, etan, propan ve bütan gibi parafinik hidrokarbonları içerir (Deniz ve Zincir, 2016). İki fiziksel durumu vardır; sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), doğal gazın -162 °C'ye kadar soğutulması ile oluşur ve sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), 250 bar basınç uygulayarak elde edilir (Elgohary ve diğerleri, 2014). Ancak LNG ve CNG'nin depolanması için gereken alanlar dikkate alındığında, LNG, gemilerde çoğunlukla kullanılan yakıt haline gelmiştir. LNG'nin hidrokarbonlar, CO₂ ve NO_x emisyonlarını içerdiği göz önüne alındığında, emisyonlar meydana gelebilir. Buna rağmen, LNG kullanan yakıt hücrelerinde emisyonlar, geleneksel dizel motorlara göre önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca LNG, karbon monoksit hariç olmak üzere zararlı emisyonları azaltmakta ve geleneksel motorlara kıyasla çevresel faydalar sağlamaktadır. LNG, kısa vadede gemi emisyon kurallarını karşılamak için makul çevresel faydalar sunmaktadır (Balcombe ve diğerleri, 2019).

Sonuç olarak, LNG'nin gemi tahrik sistemlerinde kullanımı, dizel motorlara kıyasla hem çevresel açıdan hem de emisyonları azaltma noktasında önemli faydalar sunmaktadır. LNG'nin düşük zararlı emisyon özellikleri ve gemi yakıt hücreleri ile olan entegrasyonu, çevre dostu ve verimli bir enerji kaynağı olarak denizcilik sektöründe geniş çapta kullanılmasını sağlayabilir. Bu nedenle, LNG ve CNG'nin depolanması ve kullanımı, denizcilik yakıt seçenekleri arasında gelecekteki sürdürülebilirlik hedefleri açısından dikkate alınmalıdır.

Dizel Yağı

PEMFC, en esnek yakıt hücresi türü olarak bilinir ve uygulama alanı en geniş olanıdır. Bu hücre tipi, platin bazlı elektrotlar ve protonları etkili bir şekilde ileten bir elektrolit olan iyon değişim membranı içerir. Çalışma sıcaklığı genellikle 65 - 85 °C arasında olup, hücrede üretilen su nedeniyle 100 °C'nin altında çalışmak zorundadır. PEM yakıt hücresi hidrojen yakıtı kullanır ve oksijenin varlığında su, elektrik ve ısı üretir. Verimlilik %50-60 civarındadır ve saf hidrojen kullanılması gerekir. Karbon monoksit ve hidrokarbonlar zehirleyici etkiye sahip olabilir.

MCFC, yüksek sıcaklıkta çalışır ve 600 - 700 °C arasında bir çalışma sıcaklığına sahiptir. Nikel anot ve nikel oksit katot kullanılır. Elektriksel verimlilik %30-70 arasında değişir, ancak birleşik sistemlerle %85'e ulaşabilir. MCFC'nin en büyük avantajı hidrokarbonları yakıt olarak kullanabilmesidir.

SOFC, 800 - 1000 °C sıcaklıklarda çalışan bir yakıt hücresidir. Elektrolit olarak itriyum ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit kullanılır. Elektriksel verimlilik %50-60 civarındadır ve birleşik sistemlerle %75-80'e kadar çıkabilir. SOFC, platin gibi pahalı katalizörlere ihtiyaç duymaz.

Sonuç olarak, her yakıt hücresi teknolojisi, gemi tahrik sistemleri için farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. PEMFC, esnek yapısı ve düşük çalışma sıcaklığı ile öne çıkarken; SOFC, yüksek verimliliği ve daha düşük maliyetli katalizör gereksinimi ile dikkat çeker. MCFC ise hidrokarbon yakıtları kullanabilmesiyle avantaj sağlar. Bu

yakıt hücrelerinin her biri, gemi tahrik sistemlerinin dinamik modelleme ve simülasyon tabanlı analizlerinde dikkate alınmalıdır.

Tablo 3 : Yakıt Hücreleri için Yakıt Alternatiflerinin Özellikleri

Birim	Dizel Yakıt	LNG	Hidrojen
Yoğunluk (Kg/m ³)	833-881	450	0,0838
Alt Isıl Değer (Mj/Kg)	42,5	46-50,2	119,9
Stokiyometrik Hava-Yakıt Oranı	14,5	17,2	34,3
Karbon İçeriği (Ağırlık %)	85	75	0
Hidrojen İçeriği (Ağırlık %)	15	25	100
Oksijen İçeriği (Ağırlık %)	0	0	0
Kükürt İçeriği (Ağırlık %)	<350 Ppm	0	0

2.1.2.3. Verimlilik

Genel olarak, yakıt hücrelerinin verimliliği geleneksel dizel motorlardan daha yüksektir (De-Troya ve ark., 2016). Yakıt hücrelerinin toplam elektriksel verimliliği %50-65 arasında değişmektedir (Barbir, 2005). Dizel motorların aksine, yakıtın kimyasal enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi, yakıt hücrelerinin daha yüksek verimliliğinin temelini oluşturur. Bu, sırasıyla termal ve mekanik enerjinin dönüştürülmesinden ziyade, kimyasal enerjinin doğrudan elektriğe dönüştürülmesidir. Verimlilik avantajı, SOFC ve MCFC gibi yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerinde, farklı kojenerasyon birimleri ile daha da büyük olabilir (Tronstad ve ark., 2017). Yakıt hücresi tarafından üretilen sıcak hava, egzoz gazı anlamında, ek elektrik üretimi için gaz türbini veya buhar türbini sistemleri aracılığıyla kullanılabilir. Bu durumda, sistemin toplam verimliliği %70-80'e ulaşabilir (De-Troya ve ark., 2016). Bu tip yakıt hücreleri, hidrojen dışındaki doğal gaz ve dizel yakıt gibi diğer yakıt alternatiflerine de sahiptir. LHV'ye dayalı ve yakıt tipine bağlı olarak rapor edilen elektriksel verimlilikler tablo 4'te verilmiştir.

Sonuç olarak, yakıt hücreleri, dizel motorlardan daha yüksek elektriksel verimlilik sunarken, farklı yakıt seçenekleri ve kojenerasyon sistemleri ile birleştirildiğinde toplam verimlilik daha da artırılabilir. Özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan SOFC ve MCFC gibi yakıt hücreleri, enerji dönüşümü açısından büyük potansiyele sahiptir ve gelecekte gemi tahrik sistemlerinde önemli bir rol oynayabilir.

Tablo 4: Farklı yakıt türlerine bağlı olarak rapor edilen yakıt hücrelerinin elektriksel verimlilikleri

Yakıt Hücresi	Dizel Yağı (%)	Doğal Gaz (%)	Hidrojen (%)
PEMFC (Van Biert ve ark., 2016)	30 – 40	35 – 45	40 – 60
MCFC (Van Biert ve ark., 2016)	29 – 54	40 - 55	-
SOFC (Aguilar ce ark., 2008; Van Biert ve ark., 2016; Kazempoor ve ark., 2009; Lanzini ve ark., 2017)	45 – 55	45 – 60	42 - 67

2.1.2.4. Emisyonlar

Emisyon, denizcilikte yakıt hücrelerinin kullanımındaki kilit faktördür. Alternatif yakıt hücreleri, kullanılan yakıtlara bağlı olarak emisyonlar üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. Hidrojen kullanılarak çalışan yakıt hücreleri yalnızca su buharı üretirken, SOFC, PAFC veya MCFC gibi yakıt hücreleri, karbon içeren yakıtların kullanılması durumunda (dizel veya LNG gibi) emisyon üretir. Hidrokarbonlar kullanılarak yakıt esnekliği sağlanmakta ve bu, hidrojene kıyasla maliyet açısından daha uygun görünmektedir (Mohammed ve ark., 2019). Ayrıca, gemi üzerindeki depolama koşulları hidrojenden daha kolay ve kanıtlanmış yöntemlerdir. Bu durumda CO₂ ve düşük seviyelerde NO_x emisyonu, su ve ısıya ek olarak ortaya çıkar (Choudhury ve ark., 2013). Özellikle alkali yakıt hücreleri ve proton değişim membranı yakıt hücrelerinde hidrojene ve hava saflığına büyük önem verilir. Karbon içeren yakıtların kullanılması durumunda, elektrolit tepki verir ve yakıt hücresinin verimliliği azalır. Hidrojen depolama zorlukları nedeniyle, yakıt esnekliği daha cazip hale gelmektedir. Bu nedenle denizcilik uygulamaları için SOFC, MCFC veya PAFC, diğer yakıt hücresi türlerine göre daha avantajlı görünmektedir.

Yakıt hücreleri, denizcilik sektörü için emisyonları azaltma potansiyeli sunan yenilikçi çözümlerden biridir. Hidrojen, emisyon açısından en temiz yakıt kaynağı olarak öne çıksa da, depolama ve maliyet sorunları nedeniyle hidrokarbon bazlı yakıtlar (dizel ve LNG gibi) esneklik sağlayarak daha uygun bir alternatif sunmaktadır.

2.1.2.5. Boyut

Yakıt hücrelerinin boyutlarını karşılaştırmanın iki yolu vardır: ya özgül güç ya da güç yoğunluğu. Denklem (2.1) ve denklem (2.2), sırasıyla özgül gücü ve güç yoğunluğunu göstermektedir.

$$\text{Özgül Güç: } kW/kg = \frac{\text{Çıktı Gücü}}{\text{Kütle}}$$

$$\text{Güç Yoğunluğu: } kW/m^3 = \frac{\text{Çıktı Gücü}}{\text{Hacim}}$$

Amaç, her iki durumda da maksimum değere ulaşmaktır. Bu, yakıt hücresinin nispeten daha az kütleyle sahip olmasını ve küçük bir hacimde maksimum güç çıktısı sağlamasını ifade eder. Yakıt hücreleri, pompalar, üfleyiciler, güç koşullandırma ekipmanı gibi yardımcı ekipmanlara ihtiyaç duyar ve bu, üreticiler tarafından sistem olarak adlandırılır. Bu nedenle, sistem hesaplamaları, gemi uygulamaları için doğru özgül güç ve güç yoğunluğunu belirlemek açısından daha kesin olacaktır. Yakıt hücresi tiplerinin güç yoğunluğu karşılaştırması, Tablo 5'de gösterilmiştir. Çeşitli çalışmalar, PEMFC'nin en yüksek güç yoğunluğuna sahip olduğunu, PAFC ve SOFC'nin ise en düşük değerlere sahip olduğunu göstermiştir.

Tablo 5 : Yakıt hücresi tiplerinin güç yoğunluğu karşılaştırması

Yakıt Hücresi Türü	Göreceli Güç Yoğunluğu (kW/m ³)
PEMFC	Çok Yüksek
SOFC	Düşük
MCFC	Orta
AFC	Yüksek
PAFC	Düşük

Yakıt hücrelerinin boyutu konusunda bir diğer bakış açısı, yakıt işleme ve yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri için hidrojen elde etme sistemlerini içerir. MCFC veya SOFC, dizel yakıtı veya LNG'yi yakıt olarak kullanmak için ek bir yakıt düzenleme sistemine ihtiyaç duyar ve bu da hem hacmi hem de kütleyi artırarak güç yoğunluğunu azaltır.

Sonuç olarak, yakıt hücrelerinin boyutu ve verimliliği, kullanılan yakıt türüne ve sistemdeki ek bileşenlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerinin hacim ve kütle bakımından daha büyük olması, genel güç yoğunluğunu düşürmektedir. Bu nedenle, gemi tahrik sistemlerinde yakıt seçimi ve bu yakıtın işleme yöntemleri, sistem verimliliği ve performansını önemli ölçüde etkiler.

2.1.2.6. Güvenlik

Yakıt hücrelerinde en önemli güvenlik sorunu, yüksek sıcaklıkta oluşan egzoz gazları ve elektrik üretimiyle ilgilidir. Özellikle SOFC ve MCFC yakıt hücrelerinde, egzoz gazlarının sıcaklığı diğer yakıt hücrelerine kıyasla oldukça yüksektir.

Yakıt hücresinden çıkan egzoz gazları sırasında, boruların çift katmanlı olması ve herhangi bir sızıntıyı önlemek amacıyla etkili bir şekilde yalıtılması gerekmektedir (Pratt ve Klebanoff, 2016). Buna ek olarak, membran, elektrolit ve elektrot gibi iç ekipmanların maksimum verimlilik ve güvenli operasyon için iyi durumda tutulması gerekmektedir. Yakıt hücresi ünitesinden elektrolit sızıntısı olursa, insan sağlığı için tehlikeli olacaktır.

İkinci olarak, saf hidrojen kullanan yakıt hücrelerinde ek bir önlem olarak, depolama tankı ve yakıtın iletim borularının yalıtılması gerekmektedir. Hidrojenin fiziksel özellikleri nedeniyle uçucu ve oldukça patlayıcı olduğu için, depolama tankı ile yakıt hücresinin anot tarafı arasında gerçekleşen transferin iki bariyer ilkesine uygun olması gerekir. Bu ya havalandırma ya da gaz geçirmez muhafaza ile sağlanmalıdır (Vogler ve Würsig, 2011). Ayrıca, yakıt dökülmelerini önlemek için güvenlik önlemlerinin alınması, sınırlı alanlara yeterli havalandırma sağlanması ve yakıt toplamının önceden belirlenebilmesi için kapalı alanların taranması beklenmektedir (Klebanoff ve

diğerleri, 2017). Güvenlik açısından düşük sıcaklıklı yakıt hücreleri, güvenli operasyon yetenekleri nedeniyle avantajlıdır. Ancak hidrojen üretim birimleri daha fazla düzenleme ve standarda ihtiyaç duyar.

Sonuç olarak, yakıt hücrelerinin güvenliğine yönelik standartlar ve düzenlemeler, gemi üzerindeki kullanım yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

2.1.2.7. Güç Kapasitesi

Yakıt hücrelerinin güç çıkış kapasitesi genellikle kW düzeyinde olmakla birlikte, özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri için MW seviyesinde örnekler de bulunmaktadır (van Biert ve diğerleri, 2016). Gemi tahrik sistemlerinde güç çıktısı anlamında en umut verici yakıt hücresi türleri MCFC ve SOFC'dir. Ayrıca, MCFC ve SOFC, daha yüksek egzoz gazı sıcaklıklarına sahip olan kojenerasyon sistemleri için uygun yakıt hücreleridir ve bu hücrelerin toplam verimliliği buhar ya da gaz türbinleri ile artırılabilir.

Diğer taraftan, yüksek pazar değeri ve teknolojik olgunluğu, PEMFC'yi modülerlik ve toplam güç çıktısı açısından önemli bir alternatif yapmaktadır. Ancak, sınırlı güç çıkış kapasitesi nedeniyle, büyük gemilerde ana tahrik güç jeneratörü olarak AFC ve PEMFC kullanımı zor görünmektedir, ancak elektrik üretimi için uygun olabilir. AFC için araştırma ve geliştirme, PEMFC'ye kıyasla önemli ölçüde azalmıştır, bu nedenle denizcilik sektöründe ticari cazibesini kaybetmişlerdir ve güç kapasiteleri de azalmıştır (Pratt ve Klebanoff, 2016).

Sonuç olarak, yakıt hücrelerinin gemi tahrik sistemlerinde kullanılabilirliği, türlerine ve uygulama alanlarına bağlı olarak büyük farklılıklar göstermektedir. MCFC ve SOFC, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme ve kojenerasyon sistemlerinde kullanılabilme avantajları ile öne çıkarken, PEMFC daha modüler yapısı ve yüksek pazar değeri ile tercih edilmektedir. Bununla birlikte, AFC ve PEMFC'nin sınırlı güç kapasiteleri, büyük gemilerde ana tahrik sistemi olarak kullanımını zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, gemi tahrik sistemlerinin optimizasyonu, yakıt hücresi türü ve uygulanabilirlik dikkate

alınarak dinamik modelleme ve simülasyonlarla detaylı analizlere ihtiyaç duymaktadır.

2.1.2.8. Ömür

Yakıt hücrelerinin ömrü, çalışma sıcaklığına bağlıdır çünkü bu sıcaklık, termal gerilmeler nedeniyle malzemenin kullanım ömrünü sınırlandırır ve bu da operasyonlar sırasında yorgunluğa yol açar (Dodds ve diğerleri, 2015). Ayrıca, yüksek işletme sıcaklığı nedeniyle sistemin başlatma ve kapatma hassasiyeti artar. Bu nedenle, güç çıkışını azaltmak ve yığılı sıcak tutmak denizcilik için bir çözüm olabilir ancak bu işlem yakıt hücresi sisteminin dayanıklılığını düşürür. Örneğin, MCFC veya SOFC gibi yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri sınırlı bir ömre sahiptir (Remick ve diğerleri, 2010). Son bulgular, SOFC yığınlarının 30.000 saate kadar dayanabildiğini ve tek hücrelerin 90.000 saate kadar çalışabildiğini göstermektedir.

Ayrıca, Avrupa Birliği'nde bazı konut sistemleri 10.000 – 20.000 saatlik garantili bir ömre sahiptir (Ellamla ve diğerleri, 2015). Öte yandan, PEMFC üreticileri, yakıt hücresi sistemlerinin dayanıklılığındaki gelişimin son on beş yıl içinde üstel olarak arttığını belirtmektedir (Ellamla ve diğerleri, 2015; Staffell, 2015). Bu bakış açısından, yakıt hücrelerinin ömrü teknolojik gelişmelerle artmakta ve bu teknoloji, denizcilik için yakın gelecekte umut verici görünmektedir.

Sonuç olarak, yakıt hücrelerinin denizcilik uygulamalarında kullanımı, dayanıklılık ve ömür açısından teknolojik gelişmelerle birlikte önemli avantajlar sunmaktadır. SOFC ve PEMFC gibi sistemlerin uzun ömürlü performansları ve teknolojik ilerlemelerle yakıt hücrelerinin verimliliği arttıkça, gemi tahrik sistemlerinde bu teknolojinin uygulanabilirliği giderek artan bir potansiyele sahip olmaktadır.

2.1.3. Yakıt Hücresi Seçimi ve Tartışma

Bu çalışmanın amacı, denizcilik için en uygun yakıt hücresi tipini bulmaktır. AHP yöntemi kullanılarak seçim kriterlerinin ağırlıklandırılmasını bulmak için Tablo 6

oluşturulmuştur. Sekiz farklı kriter belirlenmiş ve açıklanmıştır; güvenlik, emisyonlar, verimlilik, maliyet, ömür, güç çıkışı, yakıt türü ve boyut. Her kriterin ağırlık noktası, gemilere yakıt hücresi sisteminin entegrasyonu ve işletimi sırasında önemine göre, akademisyenler, gemi kaptanları, deniz mühendisleri, teknik yöneticiler ve gemi mimarlarından oluşan on dört uzman tarafından bir ile üç puan arasında değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, gemilere yakıt hücresi entegrasyonu için güvenlik, maliyet ve verimlilik gibi kritik kriterlerin önemine dayalı bir yöntem sunarak, en uygun yakıt hücresi türünü belirlemeyi amaçlamaktadır. Analizler, uzmanların deneyimleri ve sektördeki ihtiyaçlara göre bu kriterlerin önceliklendirildiğini göstermektedir.

Tablo 6 : Gemide Kullanım İçin Yakıt Hücresi Özelliklerinin Ağırlıklandırılmasını Bulmak Amacıyla Yapılan Anket Sonuçları

Kriter Notasyonu	Özellikler	Toplam Puan
C1	Güvenlik	40
C2	Emisyonlar	37
C3	Verimlilik	36
C4	Maliyet	35
C5	Ömür	33
C6	Güç Çıkışı	32
C7	Yakıt Türü	32
C8	Boyut	26

Akademisyenlerin çeşitli araştırma alanları vardır; hibrit-elektrikli tahrik sistemleri, gemi emisyonları ve deniz motorları için metanol ve etanol gibi alternatif yakıtlar. Nakliye şirketlerinde on yıldan fazla süredir gemilerde çalışan veya çalışmaya devam eden baş mühendisler, kaptanlar ve teknik yöneticiler bu çalışmaya dahil edilmiştir. Uzmanlar profesyonel geçmişlerine göre farklı sıralanmıştır. Endüstriyel perspektiften bakıldığında; maliyet, güvenlik ve emisyonlar diğer kriterlere göre daha fazla puan almıştır. Güvenlik sıralamanın en üstünde yer almış ve C1 olarak not edilmiş, boyut ise sıralamanın en altında C8 olarak not edilmiştir. Uzmanların cevaplarına göre önem sıralaması bu şekilde oluşmuştur.

Sonuç olarak, yakıt hücresi sistemlerinin denizcilikte kullanımında güvenlik, emisyonlar ve verimlilik gibi kriterler, gemi operasyonlarının sürdürülebilirliğini ve

etkinliğini artırmak için öncelikli olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, gemi tahrik sistemlerinin geliştirilmesinde hibrit ve alternatif yakıt sistemlerinin entegrasyonu, hem çevresel etkileri azaltma hem de güvenlik standartlarını yükseltme potansiyeli taşımaktadır.

Kapsamlı bir değerlendirme sonucunda, gemi mühendisleri ve kaptanlar tarafından öncelik verilen kriterler dikkate alınarak gemi tahrik sistemlerinin optimizasyonu ve simülasyonları, gelecekte deniz taşımacılığında daha etkin ve çevre dostu çözümler sunacaktır.

Tablo 7 : Göreceli Önem Ölçeği (Ren ve Sovacool, 2015)

Ölçek	Tanım	Not
1	Eşit Önem	i, j ile eşit derecede önemlidir.
3	Orta Derecede Önem	i, j'ye göre orta derece önemlidir.
5	Esaslı Önem	i, j'ye göre esas derecede önemlidir.
7	Çok Güçlü Önem	i, j'ye göre çok güçlü derecede önemlidir.
9	Mutlak Önem	i, j'ye göre mutlak derecede önemlidir.
2, 4, 6, 8	Ara Değerler	i ve j'nin göreceli önemi bitişik değerlendirmeler arasında yer alır.

Tablo 8 : Uzman sıralama farkı aralıklarına göre göreceli önem ölçeği eşdeğeri

Ölçek	Sıralama Farkı Aralıkları
1	0-1,55
2	1,56-3,10
3	3,11 – 4,66
4	4,67 – 6,22
5	6,23 – 7,78
6	7,79 – 9,34
7	9,35 – 10,90
8	10,91 – 12,46
9	12,47 – 14,00

Kriterlerin göreceli önemi, her iki kriter için uzman puanlarının farklılaştırılması yoluyla hesaplanmaktadır. Kriterlerin ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) kullanılarak hesaplanmıştır. Kıyaslama matrisi, tüm kıyaslama kriterleri için uzmanlardan elde edilen puanlar kullanılarak Tablo 9'da oluşturulmuştur.

Sonuç olarak bu çalışmada, gemi tahrik sistemlerinde kullanılacak yakıt hücresi türlerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile kriterlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Kriterler arasında güvenlik,

emisyonlar ve verimlilik gibi faktörlerin öne çıktığı görülmektedir. Bu değerlendirme yöntemi, optimal yakıt hücresi seçimini sağlayarak gelecekteki gemi tahrik sistemlerinin daha verimli ve çevre dostu olmasına katkı sağlayacaktır.

Tablo 9 : Kriterlerin karşılaştırma matrisi

Karşılaştırma Kriterleri	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Ağırlık Puanları (Wp)
C1 (Güvenlik)	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	6,00	9,00	0,337
C2 (Emisyonlar)	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	4,00	4,00	8,00	0,187
C3 (Verimlilik)	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	3,00	3,00	7,00	0,144
C4 (Maliyet)	0,25	0,50	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	6,00	0,112
C5 (Ömür)	0,20	0,33	0,50	1,00	2,00	1,00	1,00	5,00	0,084
C6 (Güç Çıkışı)	0,17	0,25	0,33	0,50	1,00	1,00	1,00	4,00	0,058
C7 (Yakıt Türü)	0,17	0,25	0,33	0,50	1,00	1,00	1,00	4,00	0,058
C8 (Boyut)	0,11	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,25	1,00	0,020

$\lambda_{\max} = 8,573$ (maksimum özdeğer)

CI = 0,082 (tutarlılık indeksi)

CR = 0,058 < 0,1 (tutarlılık oranı)

Bu karşılaştırma matrisinde, her bir kriterin ağırlığı hesaplandı, ardından maksimum özdeğer ($\lambda_{\max}$) ve tutarlılık indeksi tutarlılık kontrolü için hesaplandı. Ortalama rastgele indeks 1.41 olarak alınmıştır (Ren ve Sovacool, 2015). Tutarlılık oranı 0.058 bulunmuş olup, bu değer 0.1'den küçüktür ve kural ile uyumlu olduğu görülmektedir. Yakıt hücresi sisteminin maliyeti, sermaye harcamaları (CapEx) ve işletme harcamaları (OpEx) olarak önceki bölümlerde ayrılmıştır. Bu nedenle, her bir yakıt hücresinin toplam maliyetinin doğru ağırlık noktasını bulmak için CapEx ve OpEx dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak, kriterlerin karşılaştırılmasında hesaplanan tutarlılık oranı ve uzman görüşleri doğrultusunda, gemi tahrik sistemleri için en uygun yakıt hücresi tiplerinin belirlenmesi adına maliyet, verimlilik, emisyonlar gibi önemli faktörler dikkate alınmıştır. Yakıt hücresi teknolojileri, özellikle CapEx ve OpEx bileşenleri açısından dikkatlice analiz edilmelidir, çünkü bu maliyetlerin dengelenmesi sistemin uzun vadede sürdürülebilirliğini ve verimliliğini doğrudan etkileyecektir.

Tablo 10 : Yakıt Hücrelerinin Maliyetlerine Göre Sıralaması

Yakıt Hücresi	CapEx (Yatırım Harcamaları) %70	OpEx (İşletme Harcamaları) %30	Ortalama
PEMFC	5	2	4,1
AFC	2	2	2
PAFC	3	2	2,7
D/O MCFC	4	4	4
LNG MCFC	2	3	2,3
D/O SOFC	4	4	4
LNG SOFC	2	3	2,3

Yakıt hücresi türlerinin karşılaştırma kriterlerine göre toplam karşılaştırma puanları formül (2.3) ile hesaplanmaktadır. Maksimum toplam puan olan 5.000, formül (2.4) kullanılarak hesaplanır ve CP_TOT maksimum toplam karşılaştırma puanıdır. CP_ij, i yakıt hücresinin j karşılaştırma kriterine göre karşılaştırma puanıdır. CP_ij, yakıt hücresi türlerinin sıralanması için ana unsurdur, her bir kriterden yakıt hücresinin puanını gösterir. WP_i, i karşılaştırma kriterinin ağırlık puanı ve RP_ji, j yakıt hücresinin i karşılaştırma kriterindeki sıralama puanıdır.

Formüller:

- $CP_{ij} = WP_i \cdot RP_{ji}$
- $CP_{TOT} = \sum (WP_i \cdot RP_{ji})$

Tablo 11 : Nihai karşılaştırma matrisi.

Yakıt Hücresi	RP C1	RP C2	RP C3	RP C4	RP C5	RP C6	RP C7	RP C8	CP TOT
WP	0.337	0.187	0.144	0.112	0.084	0.058	0.058	0.02	5.000
PEMFC	4	5	4	4.1	4	4	3	3	4.044
AFC	4	5	2	3	3	3	2	3	3.301
PAFC	4	5	3	2.7	2	4	2	4	3.535
D/O MCFC	4	3	5	4	4	5	4	4	4.053
LNG MCFC	3	4	5	2.3	4	5	4	5	3.766
D/O SOFC	4	3	5	4	4	5	4	4	3.969
LNG SOFC	3	4	5	2.3	4	5	4	5	3.571

Güvenlik, uzmanlar tarafından en önemli kriter olarak görülmüştür. Yakıt hücresi teknolojisi henüz gemilerde yaygın olarak uygulanmadığından, güvenlik gereksinimleri tam olarak bilinmemektedir. Ancak, IGF Kodu veya Class ve Lloyd'un patlayıcı kargoların taşınmasına yönelik güçlü referanslarımız vardır. Bu nedenle,

herhangi bir yakıt hücresi türü bu kriterden beş puan alabilir. Ancak, yakıt hücrelerinde LNG kullanımı, daha düşük otomatik tutuşma sıcaklığı ve hidrojene kıyasla daha yüksek yoğunluğu nedeniyle hidrojen kullanımından daha riskli kabul edilmektedir. Depolama tankından ya da yakıt hücresinden herhangi bir sızıntı durumunda, hidrojen hızla dağılırken LNG kalıcı olacaktır.

Emisyon, yakıt hücrelerinin seçiminde ikinci önemli kriterdir. Yakıt hücrelerinin ana motivasyonu, gemi tabanlı emisyonları azaltmaktır. Bu bağlamda, doğrudan hidrojen kullanımı en avantajlı ve yakıt hücreleri arasında en çok tercih edilen seçenektir.

Bu sayede yeni emisyon düzenlemelerine tam uyum sağlanarak, gemi seferleri sırasında herhangi bir CO, CO₂, SO_x ve NO_x emisyonu olmadan operasyon yapılabilir. PEMFC, PAFC ve AFC bu kriterden beş puan almıştır. Diğer yakıt hücreleri, LNG ve dizel yağ kullanımı için yakıt koşullandırma ve işleme ünitesine ihtiyaç duyar. Bu durumda, fosil yakıtlar hidrojen çıkarımı sırasında CO₂ yayar. Fiziksel özellikleri nedeniyle LNG, dizel yağa kıyasla daha az emisyon üretir ve dizel yağa kıyasla bir puan daha fazla almıştır. Ayrıca, tehlikeli emisyonlarına rağmen, yakıt hücrelerinin geleneksel içten yanmalı motorlara kıyasla daha avantajlı olduğu belirtilmelidir.

Verimlilik, yakıt hücrelerinin seçiminde üçüncü önemli kriterdir ve yakıt hücresi türleri literatüre dayanarak değerlendirilir. Yakıt hücresi verimliliğini etkileyen ana unsurlardan biri çalışma sıcaklığıdır. Daha yüksek sıcaklık, hücre biriminin çekirdeğindeki konsantrasyon kayıplarını azaltmaya olanak tanır. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta çalışan hücreler, yüksek sıcaklıkta çıkan egzoz gazlarını kullanarak kojenerasyon sistemlerine uyarlanabilirlikleri ile daha verimli bulunmuştur. Verimlilik, yakıt türüne göre önemli ölçüde değişiklik göstermez. Bu nedenle, tüm MCFC ve SOFC türleri aynı puanı almış ve düşük sıcaklıkta çalışan türlere kıyasla daha yüksek puan elde etmiştir.

Maliyet, CapEx (Sermaye Harcamaları) ve OpEx (İşletme Harcamaları) başlıkları altında değerlendirilmiştir. CapEx perspektifinden bakıldığında, otomotiv

endüstrisinin katkısıyla PEMFC, ana araştırma ve geliştirme konusu olduğundan, yakıt hücreleri arasında maksimum CapEx verimliliğine sahip türdür. Ancak OpEx açısından bakıldığında, saf hidrojen ihtiyacı ve depolama maliyeti, PEMFC'nin gemi üzerinde kullanımında dezavantajlar olarak görünmektedir. Diğer önemli yakıt hücresi türleri olan MCFC ve SOFC, CapEx'e yakınlıkları ve neredeyse aynı OpEx seviyeleri nedeniyle aynı puanları almıştır. OpEx açısından ana fark, yakıt türlerine göre belirlenir; LNG'nin dizel yağa karşı sağladığı yakıt fiyat avantajına rağmen, zorlu yakıt depolama koşulları ve LNG'nin yönetim sistemleri ile küresel yakıt ikmali imkanları sistemin CapEx'ini artırmaktadır, bu nedenle dizel yağı seçeneğine kıyasla daha düşük puan almışlardır.

CapEx ve OpEx değerlendirmelerinde, PEMFC'nin araştırma ve geliştirme aşamalarındaki verimliliği öne çıkarken, operasyonel açıdan saf hidrojen ve depolama maliyetleri önemli dezavantajlar sunmaktadır. LNG'nin yakıt fiyatı avantajına rağmen, depolama ve yönetim sistemlerinin yüksek maliyetleri, dizel yağına göre daha düşük bir tercih olmasına neden olmuştur.

Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri, kojenerasyon sistemleri için uygundur; bu nedenle SOFC ve MCFC, güç çıkışı kapasitesinde önemli bir avantaja sahiptir. Ancak, sistem yalnızca gemi üzerindeki elektrik üretimi için kullanılsa bile, PEMFC veya PAFC de gemiler için yeterli güç üretebilir. Bu çalışmada, yakıt hücreleri esas olarak tahrik ünitesi için dikkate alınmıştır, bu nedenle yüksek sıcaklık sistemleri önemli bir önceliğe sahiptir.

Yakıt türü, yakıt hücrelerinin seçiminde bir diğer önemli kriterdir. Bu nedenle, lojistik yakıtlar bir seçenek olarak değerlendirilir; gemiler için yakıt ikmali ve depolama uygulanabilirliği, karaya dayalı tesislerden çok daha önemlidir. Küresel ölçekte yakıt ikmal olanakları, gemide kolay ve güvenli depolama dikkate alınır, bu nedenle sırasıyla dizel yağ, LNG ve hidrojen sıralanmıştır. Dizel yağ, kanıtlanmış geleneksel bir deniz yakıtı olduğundan, diğer yakıt seçeneklerine göre daha yüksek bir puana sahiptir. Ancak, ana hedef sürdürülebilir temiz enerji üretmek olduğunda, biyodizel dikkate alınmalıdır. Biyodizel kullanıldığında, yakıt esnekliğinden ziyade emisyon

avantajı daha büyük ve tatmin edici olacaktır. LNG ise büyüyen bir yakıt seçeneği olmasına rağmen, denizcilik tecrübesi ve yakıt ikmal istasyonu seçenekleri açısından dizel yağdan hala zayıftır. Gemilerde hidrojen kullanımı, zayıf ikmal istasyon ağı ve -253°C'deki sert kriyojenik depolama koşulları nedeniyle yakın gelecekte zor görünmektedir. Elektroliz yoluyla gemide hidrojen üretimi bir çözüm olabilir, ancak üretim ve tüketim oranı iyi analiz edilmeli ve her gemi tipi ve rota için değişebilir olmalıdır.

Sonuç olarak, LNG'nin büyüyen potansiyeli ve hidrojenin gelecekteki olasılıkları, gemi tahrik sistemlerinin uzun vadeli planlamasında dikkatle analiz edilmelidir.

2.2. Denizciliğin Dekarbonizasyonunun İncelenmesi: Hidrojen ve Amonyak Yaklaşımı

2.2.1. Metodoloji

Geleneksel deniz yakıtlarının yetersizliği göz önünde bulundurularak, karbon emisyonlarını azaltmayı amaçlayan gemiler için yakıt ve güç seçeneklerinin ilk değerlendirmesi yapılmıştır. Hidrojen ve amonyak, uygulanabilir seçenekler gibi görünmektedir ve en olası yol belirlendikten sonra bu amaç doğrultusunda özellikleriyle birlikte açıklanıp incelenmiştir. İkinci olarak, güvenlik, maliyet, depolama, çevresel etki ve sürdürülebilirlik, yakıt ikmali ve küresel bulunabilirlik anlamında değerlendirilerek seçilen seçeneklerin uyarlanması için kritik kriterler olarak belirlenmiştir. Her bir kriter için hidrojen ve amonyağın ağırlıkları, denizcilik alanında uzmanlara sorularak analitik hiyerarşi süreci kullanılarak kararlaştırılmıştır. Üçüncü olarak, yakıtlar sıralanmış ve bulguların duyarlılık analizi izlenerek daha iyi bir seçenek bulunmuştur. İzlenen metodolojinin ayrıntılı açıklamaları ise sonraki bölümlerde verilmiştir.

Sonuç olarak, geleneksel deniz yakıtlarının sürdürülebilir olmayan doğası göz önüne alındığında, hidrojen ve amonyak gibi alternatif yakıtlar, karbon salınımını azaltmayı amaçlayan gemi tahrik sistemleri için gelecek vadede seçenekler olarak öne

çıkılmaktadır. Güvenlik, maliyet, depolama ve sürdürülebilirlik gibi kriterler göz önüne alındığında, bu seçeneklerin titizlikle analiz edilmesi, gemi operasyonlarının daha çevreci bir yaklaşıma dönüşmesine yardımcı olacaktır.

2.2.1.1. Karbon Nötr Denizcilik Yollarının Ön Değerlendirmesi

Gemileri güçlendirmek için farklı yöntemler vardır ve bu çalışmanın kapsamı ve amacı doğrultusunda sıfır karbonlu gemicilik sunan seçenekleri detaylandırmaktadır. İlk adımda, yakıt hücreleri, dizel motorlar, yenilenebilir enerji ve piller gibi farklı ana başlıklar altında güç kaynakları verilmiştir.

Daha sonra, bu seçenekler yakıt kullanımlarına göre alt başlıklara ayrılmıştır. İkinci olarak, yakıt türlerinin karbon içeriği ve geminin seyir menzili ile ilgili kullanışlılıkları referans olarak incelenmiştir. Bu bağlamda, üç farklı ölçek belirlenmiştir; en iyisi uzun seyir menziline sahip sıfır karbonu simgeleyen yeşil ışık, kısa menzil kapasitesine sahip sıfır karbonu simgeleyen sarı ışık ve uzun menzilde karbon içeriğine sahip olan kırmızı ışık. Bu makalenin ana motivasyonu sıfır karbonlu seçenekleri karşılaştırmaktır; bu nedenle, karbon içeren yakıtlar kırmızı ışıkla işaretlenmiş ve makalenin sonraki aşamalarında bir seçenek olarak kabul edilmemiştir.

İlk olarak, yakıt hücrelerinden başlarsak, altı farklı yakıt seçeneği göz önünde bulundurulmuştur, ancak karbon içermeyen seçenekler yalnızca amonyak ve hidrojendir. Yakıt hücresi türleri genel bir yaklaşımla ele alınmış ve tüm yakıt türleri bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Diğer yandan, dizel motoru için beş yakıt türü değerlendirilmiştir ve bilindiği üzere amonyak dışındaki tüm bu yakıtların karbon içeriği bulunmaktadır. Ancak dizel motor, doğrudan amonyağı ateşleyemez ve pilot yakıt olarak dizel yağına ihtiyaç duyar; bu nedenle, deniz dizel motorları için sıfır karbon elde etmek imkânsızdır. Amonyağın, dizel yağına kıyasla CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı iyi bilinmektedir, ancak sıfır karbon emisyonuna ulaşmak mümkün değildir. Son olarak, yenilenebilir enerji (güneş ve rüzgâr) ve bataryalar, sınırlı kapasiteleri nedeniyle hibrit tahrik için gemilerde ek güç kaynakları olarak değerlendirilmektedir (Tang vd., 2018). Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel

koşullara yüksek bağımlılığı ve okyanus aşan gemilerde bataryaların sınırlı kapasiteleri, bu enerji kaynaklarının geniş ölçekte kullanımını kısıtlamaktadır. Kısa deniz seferlerinde sıfır emisyonlu tamamen elektrikli gemiler geliştirilmesine rağmen, günümüz teknolojisinin olgunluk seviyesi, ticari gemiler için bir çözüm olarak değerlendirilmesini mümkün kılmamaktadır.

Amonyak

Amonyak, havada 5 ppm'de tespit edilebilen keskin bir kokuya sahip renksiz bir gazdır (Ayvalı ve diğerleri, 2021). Amonyak, karbon içermeyen bir yapıya sahip bir bileşiktir. Bir nitrojen atomu ve üç hidrojen atomundan oluşur. Amonyak, %17,6 hidrojen içeriğiyle bir hidrojen enerji taşıyıcısıdır ve sıvı amonyağın hacimsel enerji yoğunluğu, sıvı hidrojenden daha yüksektir (Dimitriou ve Javaid, 2020).

Amonyağın toksisitesi, gemilerde depolama ve kullanım için önemli bir sorundur. Amonyak, metanol ve benzinden üç kat daha toksiktir (Morlanes ve diğerleri, 2021). Amonyağın toksisitesi iyi bilinmektedir ve denize dökülmesi sucul yaşam için ciddi riskler oluşturabilir. Amonyak suya karışarak amonyum hidroksit (NH_4OH) ve amonyum iyonları (NH_4^+) oluşturur (de Vries, 2019; Ayvalı ve diğerleri, 2021). Amonyak uzun vadede biyolojik olarak parçalanabilir, ancak doğrudan maruz kalınması organizmalar için ölümcül sonuçlara yol açar. Sucul yaşam, nitrojen döngüsü sayesinde kendini uzun vadede yeniler. Amonyağın diğer önemli bir özelliği ise aşındırıcı olmasıdır. Amonyak bazı maddelerle uyumsuzdur. Bu maddeler arasında alüminyum, pirinç, bakır, magnezyum ve çinko alaşımları yer almaktadır (Klüssmann ve diğerleri, 2020). Ayrıca, amonyak diğer potansiyel alternatif deniz yakıtlarına kıyasla düşük yangın riski taşır. Amonyağın hacimce %16-25 arasında dar bir yanıcılık aralığı vardır ve 2-3 kat daha fazla tutuşma enerjisi sağlar, düşük yanma hızı (metandan dört kat daha düşük) bulunur (ABS, 2020). Bununla birlikte, amonyak denizcilik topluluğu tarafından iyi bilinen bir maddedir; gemilerde soğutucu olarak ve seçici katalitik reaktörlerde (SCR) NO_x azaltma maddesi olarak kullanılır, ayrıca sıvılaştırılmış gaz kargosu olarak da taşınmaktadır (Kim K. ve diğerleri, 2020).

Gemilerde depolama ve kullanım için prosedürler ve güvenlik önlemleri geliştirilmiştir.

Amonyak, denizcilikte potansiyel bir yakıt olarak önemli avantajlara sahip olmasına rağmen, yüksek toksisite, aşındırıcı özellikler ve güvenlik riskleri gibi önemli dezavantajlar da taşımaktadır. Amonyakın denizcilikte güvenli kullanımını sağlamak için gelişmiş prosedürler ve güvenlik önlemleri geliştirilmiş olsa da, bu yakıtın geniş çapta uygulanabilirliği, potansiyel tehlikeleri minimize edecek önlemlere bağlı olacaktır.

Amonyak, hidrojen taşıma kapasitesi nedeniyle yakıt hücreleri için tercih edilen yakıtlardan biridir. Alkalın yakıt hücreleri (AFC'ler) ve katı oksit yakıt hücreleri (SOFC'ler), amonyağı doğrudan yığınlarında elektrik üretmek için kullanabilir. AFC'ler, havadaki CO₂'den düşük dayanıklılık nedeniyle etkilenir (Wan ve diğerleri, 2021). SOFC'ler ise yakıt esnekliği ve yüksek güç kapasitesine sahiptir (İnal ve Deniz, 2021). Bu nedenle, SOFC'ler amonyakla ilgili çalışmalarda tercih edilmiştir. İlk doğrudan amonyaklı SOFC, 1980 yılında işletildi (Vayenas ve Farr, 1980). Son zamanlarda, doğrudan amonyaklı SOFC uygulaması Kishimoto ve diğerleri (2020) tarafından yapılmıştır. Onlar, 1 kW güç çıkışına ve %57 verime sahip 30 hücreli bir amonyak-SOFC'yi araştırdılar. Bu uygulama, 1000 saatlik bir çalışma süresine ulaştı. Doğrudan amonyaklı SOFC'ler ticari olarak mevcut değildir ve şu anda geliştirilme aşamasındadır. Amonyaklı SOFC projesi ShipFC devam etmektedir. Projenin amacı, Viking Energy adlı geminin jeneratörlerinden birini amonyakla çalışan bir SOFC'ye dönüştürmektir. 100 kW'lık amonyakla çalışan SOFC'nin ilk testleri karada yapılacak ve ölçeklenmiş SOFC, 2023'ün sonlarında gemiye kurulacaktır (Brinks ve Hektor, 2020).

Sonuç olarak, SOFC'ler, amonyak gibi karbon içermeyen yakıtları doğrudan kullanarak enerji üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir. Mevcut teknolojiler ticari olarak tam anlamıyla kullanılabilir olmasa da, SOFC'lerin gelecekte denizcilik sektöründe düşük emisyonlu ve verimli bir çözüm sunma potansiyeli oldukça yüksektir. Geliştirilmekte olan projeler, SOFC'lerin kullanımını genişletmekte ve bu

teknoloji gelecekte gemi tahrik sistemlerinin karbonsuzlaştırılması için önemli bir adım olacaktır.

Hidrojen

Hidrojen, evrendeki en bol ve en hafif elementtir, ancak genellikle saf olmayan formda bulunur. Gaz halinde bir enerji taşıyıcısıdır. Doğal olarak karbon içermeyen bir yapıya sahiptir. Bu durum, politika yapıcılar, araştırmacılar ve denizcilik endüstrisindeki şirketler tarafından büyük ilgi görmesine neden olmaktadır. Hidrojenin denizcilikteki potansiyeli, diğer ulaşım sektörlerinde, özellikle otomotivde kullanımının artışına paralel olarak önemli ölçüde büyümektedir.

Sonuç olarak, hidrojen, karbon içermeyen yapısı ve bol bulunabilirliği ile denizcilik endüstrisinde sürdürülebilir enerji çözümleri için önemli bir seçenek haline gelmektedir. Ulaşım sektöründeki artan kullanımıyla birlikte, hidrojenin denizcilik uygulamalarında da geniş çapta benimsenmesi, sektörün karbonsuzlaştırılması açısından büyük bir fırsat sunmaktadır.

Hidrojen üretimi için hammaddeler dizel yağı, doğal gaz, kömür ve biyokütledir (İnal ve Deniz, 2020). Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak suyun elektrolizi yoluyla da üretilir. Hidrojen üretiminin %51'i amonyak üretimi için, %31'i ise petrol rafinasyonu için yapılmaktadır. %10'u metanol üretimi ve %8'i diğer uygulamalar içindir. Hidrojen, farklı hammaddelerden üretilir ve bu hammaddelerin %96'sı fosil yakıtlardan oluşmaktadır (doğal gaz %48, petrol %30 ve kömür %18) ve %4'ü ise yenilenebilir kaynaklardan elde edilmektedir. Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi, yüksek verimlilikle ve düşük maliyetle yapılabilir (Baykara, 2018). Suyun ayrışması ise başka bir hidrojen üretim yoludur ve üç yöntemle yapılabilir: elektroliz, termoliz ve foto-elektroliz. Suyun ayrıştırılmasıyla üretilen hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretildiğinde en temiz enerji kaynağıdır (Nikolaidis ve Poullikkas, 2017). Son olarak, biyokütleden elde edilen hidrojen, yenilenebilir üretim yoludur.

Sonuç olarak, hidrojenin üretimi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretiminin avantajları dikkate alındığında, hidrojenin denizcilik endüstrisinde önemli bir enerji kaynağı olma potansiyeli açıkça görülmektedir.

Tablo 12 : Hidrojen ve amonyak özellikleri

Özellikler	Gaz Hidrojen	Sıvı Hidrojen	Amonyak
Otomatik tutuşma sıcaklığı (°C)	571	571	651
Parlama noktası (°C)	N/A	N/A	132
Yanıcılık limitleri (Hacim %)	4,75	4,75	16 - 25
Alev hızı (m/s)	3,51	3,51	0,15
Düşük ısı değeri (MJ/kg)	120	120	18,6
Oktan sayısı	>130	>130	110
Yoğunluk (kg/m ³)	17,5 – 20,54	70,85 – 71,1	602,8
Enerji yoğunluğu (MJ/m ³)	2101	8539	11333
Depolama türü	Sıkıştırılmış gaz	Kriyojenik Sıvı	Sıkıştırılmış sıvı
Depolama sıcaklığı (°C)	25	-253	25
Depolama basıncı (bar)	300	1	10
Gemide depolama maliyeti (€/kWh)	1,29 – 1,71	0,29 – 0,33	0,23 – 0,29
Yakıt maliyeti (€/kWh)	153	-	120
“ Well to wheel” yaşam döngüsü emisyonları (gCO ₂ /MJ)	Grid Elektriği: 139	Grid Elektriği: 173	Grid Elektriği: 120
	Rüzgar Elektriği: 2,59 – 20,74	Rüzgar Elektriği: 3,24 – 25,93	Güneş PV Elektriği: 8,33 – 83,33
	Güneş PV Elektriği: 6,67 – 66,67		

Biyokütleden hidrojen üretimi için iki ana kategori bulunmaktadır. Bunlardan biri termokimyasal süreç, diğeri ise biyolojik süreçtir. Termokimyasal sürecin alt kategorileri piroliz ve gazlaştırmadır. Biyolojik süreç ise biyo-fotoliz, karanlık fermantasyon ve foto-fermantasyonu içermektedir. Biyokütleden hidrojen üretimi için çeşitli yollar olmasına rağmen, tekniklerin çoğu henüz yeterince gelişmiş değildir ve hidrojen üretim oranı, fosil yakıtlara alternatif olacak seviyede değildir.

Biyokütleyle dayalı hidrojen üretiminde çeşitli yöntemler olmasına rağmen, bu tekniklerin gelişim seviyesi henüz yeterince olgunlaşmamıştır ve fosil yakıtların yerini almak için hidrojen üretim hızları yeterli değildir.

Denizcilik endüstrisinde karbon azaltımı hedeflerine ulaşmak için daha gelişmiş ve verimli üretim tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç olarak, hidrojenin düşük enerji yoğunluğu, denizcilik sektörü gibi enerji yoğun endüstriler için bazı sınırlamalar getirirse de, toksik olmayan yapısı ve geniş yanıcılık limitleri, güvenli ve verimli bir enerji kaynağı olarak kullanılması konusunda önemli avantajlar sunmaktadır. Hidrojenin deniz taşımacılığına entegrasyonu, yeni depolama teknolojileri ve daha yüksek enerji yoğunluğu sağlayacak süreçlerin geliştirilmesiyle ilerletilebilir.

2.2.1.2. Karar Verme

Bu çalışma, bu iki sıfır karbonlu alternatif yakıtın pozisyonunu anlamayı ve gemilerde kullanılacak en iyi seçeneği belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada kullanılacak kriterlerin belirlenmesi, karar alma sürecinin önemli bir adımıdır. Bu nedenle, literatürdeki çeşitli çalışmaların kriterleri incelenmiştir.

Bu çalışmadaki kriterler, literatürdeki önceki çalışmalarda belirtilen kriterlerin yardımıyla belirlenmiştir. Bu yaklaşımda, güvenlik, maliyet, depolama, sürdürülebilirlik ve çevresel etki, en umut verici seçeneği belirlemek için ana kategoriler olarak belirlenmiştir. Takip eden bölümler, izlenen metodoloji perspektifinden kriterlerin ayrıntılarını vermektedir.

Sonuç olarak, literatürde yer alan çalışmaların detaylı incelenmesi sonucunda, sıfır karbonlu alternatif yakıtlar arasında en uygun olanı belirlemek için güvenlik, maliyet, depolama, sürdürülebilirlik ve çevresel etki gibi ana kriterler öne çıkmaktadır. Bu kriterler doğrultusunda yapılan değerlendirmeler, denizcilik sektöründe hangi yakıtın daha avantajlı olduğunun belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Tablo 13 : Literatürdeki önceki çalışmaların karşılaştırma kriterleri.

Yıl	Kriterler	Çalışma Alanı	Yazarlar
2016		Gemide Hidrojen Üretimi	Zincir ve Deniz
2016		Alternatif Yakıtlar	Deniz ve Zincir
2017		Alternatif Yakıtlar	Ren ve Liang
2017		Alternatif Yakıtlar, Nükleer Enerji, Rüzgar Enerjisi	Ren ve Lützen
2018		Alternatif Yakıtlar	Kirstein ve Diğerleri
2019		Alternatif Yakıtlar	Balcombe ve Diğerleri
2019		Alternatif Yakıtlar, Yakıt Hücreleri	Brahim ve Diğerleri
2019		Alternatif Yakıtlar, Rüzgar Destekli Yakıtlar, Bataryalar	DNV GL
2019		Alternatif Yakıtlar	Hansson ve Diğerleri
2020		Yakıt Hücreleri	İnai ve Deniz
2020		Alternatif Yakıtlar	Kim H, ve Diğerleri
2020		Alternatif Yakıtlar	Andersson ve Diğerleri
2021		Alternatif Yakıtlar	Rattazzi ve Diğerleri
2021		Alternatif Yakıtlar	Xing ve Diğerleri
2021		Alternatif Yakıtlar	Gray ve Diğerleri

2.2.2. Sonuç ve Tartışma

Bu bölüm, uzman görüşlerine göre kriter ağırlıklarını, amonyak ve hidrojenin kriter performans puanlarını ve farklı durumlarda yapılan hassasiyet analizi ile birlikte amonyak ve hidrojenin nihai performans ağırlıklarını içermektedir. uzman görüşlerine dayalı olarak kriterlerin ağırlıklarını belirlemiş ve amonyak ile hidrojenin performanslarını karşılaştırarak hangi yakıtın denizcilik tahrik sistemlerinde daha etkili olacağını incelemiştir. Farklı senaryolarda gerçekleştirilen hassasiyet analizleri, alternatif yakıtların çeşitli performans ölçütlerine göre değerlendirilmesini sağlamıştır.

2.2.2.1. Kriter Ağırlıkları

Kriter ağırlıkları, bir anket çalışmasıyla uzman görüşleri alınarak bulunmuştur. On iki uzmanın görüşlerine göre C1'den C5'e kadar olan kriterler puanlanmıştır. Uzmanlara göre C1 (güvenlik) ve C2 (çevresel etki), gemilerde yakıt hücreleri kullanılırken en önemli kriterler olup 60 puan almıştır. Diğer kriterler için kalan puanlar ise C3 (sürdürülebilirlik) 44 puan, C4 (depolama) 39 puan ve C5 (maliyet) 36 puandır. Kriter

puanları arasındaki farklara göre, göreceli önem ölçekleri belirlenmiş ve bir ağırlık matrisi oluşturulmuştur.

Sonuç olarak, uzman görüşlerine dayalı olarak kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş ve bu ağırlıklar, yakıt hücrelerinin gemilerde kullanımı için alternatif yakıtların değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Güvenlik ve çevresel etki, uzmanların en önemli bulduğu kriterler olarak öne çıkmış ve maliyet gibi kriterlerle birlikte bir değerlendirme matrisine dönüştürülmüştür. Bu, karar verme sürecine yönelik önemli bir metodolojik katkı sunmaktadır.

Tablo 14 : Uzman görüşlerine göre gemilerde yakıt hücreleri için alternatif yakıtlar üzerindeki sonuçlar.

Kısaltma	Kriter	Uzman Toplam Puan
C1	Güvenlik	60
C2	Çevresel etki	60
C3	Sürdürülebilirlik	44
C4	Depolama	39
C5	Maliyet	36

Ağırlık matrisinin tutarlılık oranı 0.014'tür ve bu oran, maksimum kabul edilebilir sınır olan 0.1'den daha düşüktür. C1 (güvenlik) ve C2 (çevresel etki) kriterleri, 0.413 ağırlık değerini alırken, C3 (sürdürülebilirlik), C4 (depolama) ve C5 (maliyet) kriterleri sırasıyla 0.086, 0.053 ve 0.036 ağırlıklarını almıştır.

Bu ağırlıklandırma analizi, gemilerde yakıt hücreleri için alternatif yakıtların seçimi ve değerlendirilmesinde güvenlik ve çevresel etki kriterlerinin en yüksek önceliğe sahip olduğunu göstermektedir. Sürdürülebilirlik, depolama ve maliyet gibi diğer kriterler ise daha düşük önceliklere sahiptir, ancak yine de dikkate alınmalıdır. Bu analiz, karar verme sürecinde belirli kriterlerin göreceli önemine dayalı olarak daha stratejik bir yaklaşım sağlamaktadır.

Tablo 15 : Uzman görüşlerine göre göreceli önem ölçekleri.

Ölçekler	Aralık Puanları
1	0 - 2,67
2	2,68 – 5,34
3	5,35 – 8,01
4	8,02 – 10,68
5	10,69 – 13,35
6	13,36 – 16,02
7	16,03 – 18,69
8	18,70 – 21,36
9	21,37 – 24,00

Tablo 16 : Kriterlerin ağırlık matrisi.

Kriterler	C1	C2	C3	C4	C5	Ağırlıklandırma
C1 (Güvenlik)	1,00	1,00	6,00	8,00	9,00	0,413
C2 (Çevresel etki)	1,00	1,00	6,00	8,00	9,00	0,413
C3 (Sürdürülebilirlik)	0,17	0,17	1,00	2,00	3,00	0,086
C4 (Depolama)	0,13	0,13	0,50	1,00	2,00	0,053
C5 (Maliyet)	0,11	0,11	0,33	0,50	1,00	0,036

$$\lambda_{\max} = 5.063, CI = 0.016, CR = 0.014 < 0.1$$

2.2.2.2. Amonyak ve Hidrojenin Kriter Performans Puanları

Kriter ağırlıkları önceki bölümde hesaplanmıştır. Karar alma sürecindeki bir sonraki adım, her bir kriterde amonyak ve hidrojenin performans puanlarını belirlemektir.

Güvenlik sorunları, farklı düzeylerde bazı tehditler veya etkiler yaratmaktadır ve bunlar personel, ekipman ve çevre olarak sınıflandırılmaktadır. İnsan yaralanması veya yaşam kaybı riski personel tehditleri arasında yer almakta olup, patlama ve yangın riskleri en büyük personel risk tetikleyicileri olarak değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, patlama ve yangın olaylarının sonuçları, yakıtların depolanması veya kullanımı sırasında meydana gelen hatalar nedeniyle çevre üzerinde yıkıcı etkiler yaratabilir. Bu bağlamda, hidrojen amonyağa kıyasla dezavantajlı görünmektedir. Öte yandan, toksisite, personel yaşamı ve çevresel etki açısından ikinci bir risk düzeyini oluşturmaktadır. Ekipman açısından bakıldığında, her iki yakıt da uygun malzemelerin kullanılması durumunda etkili ve umut verici bir şekilde kullanılabilir.

Çevresel Etki (C2)

Çevresel etki kriteri, amonyak ve hidrojenin üretim aşamasındaki emisyonları dikkate alır, çünkü amonyak ve hidrojen, yakıt hücreleri için sıfır karbonlu alternatif yakıtlardır. Amonyak, yaşam döngüsü boyunca 173 gCO₂/MJ, 3.24 – 25.93 gCO₂/MJ ve 8.83 – 83.33 gCO₂/MJ emisyon üretirken; hidrojen, elektrik üretiminde grid elektriği kullanılarak 139 gCO₂/MJ, rüzgar enerjisi kullanılarak 2.59 – 20.74 gCO₂/MJ ve güneş PV elektriği kullanılarak 6.67 – 66.67 gCO₂/MJ emisyon üretir. Hidrojen, daha düşük yaşam döngüsü emisyonlarına sahip olmasına rağmen, daha yüksek bir ısı değer sunar. Hidrojenin üretim sürecinde amonyağa kıyasla MJ başına daha düşük yaşam döngüsü emisyonu sağladığı göz önüne alındığında, hidrojen bu kriterde 5 puan alırken, amonyak 4 puan almıştır.

Sonuç olarak, hidrojenin çevresel etki açısından amonyaktan daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Hidrojenin daha düşük CO₂ emisyonlarına sahip olması, çevre dostu bir yakıt seçeneği olarak değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu değerlendirme, çevresel faktörlerin yakıt seçimindeki önemini vurgulayarak, alternatif yakıtların sürdürülebilirlik hedeflerine nasıl katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Sürdürülebilirlik (C3)

Sürdürülebilirlik kriteri, küresel yakıt bulunabilirliği ve ikmal altyapısına bağlıdır. Amonyak, dünyada en çok üretilen maddelerden biridir ve üretilen hidrojenin yarısı amonyak üretiminde kullanılmaktadır. Bu nedenle, yakıt bulunabilirliği açısından amonyak ve hidrojen benzer konumlara sahiptir. Amonyak ve hidrojenin ikmal altyapısı, performans puanları açısından belirleyicidir. Hidrojenin ikmal altyapısında, kriyojenik depolama ve patlama/yangın riski gibi zorluklar bulunmaktadır. Öte yandan, amonyak daha kolay idare edilebilir özelliklere sahiptir; çünkü kriyojenik depolama riski yoktur ve patlama/yangın riski hidrojene göre daha düşüktür.

Bu nedenle, uygun altyapıya sahip daha fazla ikmal limanına sahip olan amonyak, daha sürdürülebilir bir yakıt olabilir. Amonyak için verilen performans puanı 4, hidrojen için ise 3'tür.

Sonuç olarak, sürdürülebilirlik açısından amonyak, kriyojenik depolama ve yangın/patlama risklerinin daha düşük olması ve daha geniş bir iklim altyapısına sahip olması nedeniyle hidrojene göre daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu, gemi tahrik sistemlerinde uzun vadeli yakıt tedarik stratejilerini şekillendiren önemli bir değerlendirme kriteridir.

Depolama (C4)

Amonyak ve hidrojenin depolama kriterlerine göre verilen performans puanları, depolama yöntemleri ve hacimsel enerji yoğunluğu dikkate alınarak hesaplanmıştır. Amonyakın iki depolama seçeneği vardır; bunlardan biri sıkıştırılmış depolama, diğeri ise sıvı depolamadır. Hidrojenin ise dört farklı depolama seçeneği bulunmaktadır (sıkıştırılmış, sıvı, katı hâlde ve alternatif taşıyıcılar). Ancak, gemi üzerindeki en uygun depolama seçenekleri sıkıştırılmış ve sıvı depolama yöntemleridir. Hem amonyak hem de hidrojen, gemi üzerinde aynı depolama seçeneklerine sahip olduğundan, bu kriter için hacimsel enerji yoğunluğu performans puanları açısından belirleyicidir. Amonyakın hacimsel enerji yoğunluğu 11333 MJ/m³ iken, gaz hâlindeki hidrojen ve sıvı hidrojenin sırasıyla 2101 MJ/m³ ve 8539 MJ/m³ hacimsel enerji yoğunlukları vardır. Amonyak ve hidrojenin hacimsel enerji yoğunlukları, geleneksel deniz yakıtları ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Bu nedenle, bu kriterde amonyağa 3 puan, hidrojene ise 2 puan verilmiştir.

Sonuç olarak, depolama kriteri açısından amonyak, daha yüksek hacimsel enerji yoğunluğu sayesinde hidrojene göre avantajlı bir yakıt olarak değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme, denizcilik endüstrisinde alternatif yakıtların depolanabilirliği ve gemi üzerindeki verimliliği hakkında önemli ipuçları sunmaktadır.

Maliyet (C5)

Maliyet kriterine göre, amonyak ve hidrojenin performans puanları yakıt maliyeti ve gemi üzerindeki depolama maliyetleri dikkate alınarak verilmektedir. Hidrojenin yakıt maliyeti 153 €/kWh iken, amonyağın yakıt maliyeti 120 €/kWh'dir. Ayrıca, gemi

üzerindeki depolama işletme maliyetleri hidrojen için 1.29 – 1.71 €/kWh ve amonyak için 0.23 – 0.29 €/kWh arasında değişmektedir. Bu nedenle, hidrojenin yakıt maliyeti amonyağa göre daha yüksektir. Amonyak, denizcilik endüstrisinde en ucuz yakıt seçeneği olmasa da, bu kriterde amonyağa 4 puan verilmiştir. Hidrojen, amonyaktan daha yüksek yakıt maliyeti ve gemi üzerindeki depolama maliyetine sahip olduğundan, hidrojene 2 puan verilmiştir.

Sonuç olarak, maliyet kriterine göre amonyak, yakıt ve depolama maliyetleri açısından hidrojenle karşılaştırıldığında daha avantajlıdır. Bu, denizcilik sektöründe sürdürülebilir yakıtların ekonomik uygulanabilirliği açısından önemli bir değerlendirme sunmaktadır.

Tablo 17 : Her kriterde alternatif yakıtların performans puanları.

Alternatif Yakıtlar	Güvenlik	Maliyet	Depolama	Sürdürülebilirlik	Çevresel Etki
Amonyak	3 (,600)	4 (,667)	3 (,600)	4 (,571)	4 (,444)
Hidrojen	2 (,400)	2 (,333)	2 (,400)	3 (,429)	5 (,556)

2.2.2.3. Nihai Sonuçlar ve Duyarlılık Analizi

Uzman görüşleri subjektif olabileceğinden ve bu çalışmaya dahil edilen uzmanlar farklı olsaydı kriter ağırlıkları değişebileceğinden, duyarlılık analizi yapılmıştır.

Duyarlılık analizi, kriter ağırlıklarının değişiminin amonyak ve hidrojenin performans ağırlıkları üzerindeki etkilerini gösterir. Bunu yapmak için altı ek durum eklenmiştir.

Sonuç olarak, amonyak ve hidrojenin performans değerlendirmelerinde, duyarlılık analizi sonuçları, kriter ağırlıklarındaki değişimlerin her iki yakıtın da genel performansı üzerindeki önemli etkilerini göstermektedir. Bu analiz, farklı uzman görüşlerine dayalı kriterlerin önceliklendirilmesiyle alternatif yakıtlar için daha sağlam bir karar alma sürecine katkı sağlamaktadır.

Tablo 18 : Farklı durumlarda kriter ağırlıkları.

Senaryolar	Kriter Ağırlıkları					Tanım
	C1	C2	C3	C4	C5	
I	0,413	0,413	0,086	0,053	0,036	Temel (Baz)
II	0,516	0,340	0,071	0,044	0,030	C1 + %25
III	0,340	0,516	0,071	0,044	0,030	C2 + %25
IV	0,403	0,403	0,108	0,052	0,035	C3 + %25
V	0,407	0,407	0,085	0,066	0,035	C4 + %25
VI	0,409	0,409	0,085	0,053	0,045	C5 + %25
VII	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	Eşit

Hesaplamalar, temel durumda amonyağın daha yüksek bir ağırlığa (0.536) sahip olduğunu, hidrojenin (0.465) daha üstün olduğunu göstermektedir. Amonyak ve hidrojenin IV, V ve VI. durumlarındaki performans ağırlıkları, temel durum ile aynı kabul edilebilir. C3 (sürdürülebilirlik), C4 (depolama) ve C5 (maliyet) kriterlerindeki varyasyonun performans ağırlıklarını etkilemediği söylenebilir.

Bunun nedeni, bu kriterlerin ağırlıklarının C1 (güvenlik) ve C2 (çevresel etki) kriterlerinden önemli ölçüde düşük olmasıdır. II. durumda C1'in (güvenlik) ağırlığının artması, amonyak ve hidrojen arasındaki ağırlık farkını artırmaktadır. Yeni ağırlıklar, amonyak için 0.547, hidrojen için 0.454 olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni, yakıt hücreleri kullanımında amonyağın daha güvenli yakıt özelliklerine sahip olması nedeniyle C1 (güvenlik) kriterinde hidrojenden daha yüksek performans puanına sahip olmasıdır. III. durum, amonyak ve hidrojenin ağırlıklarının en yakın olduğu durumdur; sırasıyla 0.520 ve 0.481. Hidrojen, C2 (çevresel etki) kriterinde amonyaktan daha yüksek performans puanına sahip olduğundan, iki yakıt arasındaki ağırlık farkı kapanmıştır. VII. durum, tüm kriterlerin eşit ağırlıklara sahip olduğu aşırı bir durumdur. Bu, amonyak ve hidrojen arasındaki ağırlık farkının en büyük olduğu durumdur, sırasıyla 0.576 ve 0.424. Bu marjinal durum olmasına rağmen, çalışmanın iyi sonuç vermesi açısından yakıtların sıralamasını etkilememektedir. Tüm durumlarda, VII. durum hariç olmak üzere, amonyak gemi üzerinde yakıt hücresi için en uygun yakıt olarak görülmektedir ve performans ağırlıkları temel duruma yakın kalmaktadır.

Sonuç olarak, duyarlılık analizi sonuçları, amonyağın, güvenlik ve çevresel etki kriterleri nedeniyle hidrojenle karşılaştırıldığında daha uygun bir yakıt seçeneği

olduğunu göstermektedir. Farklı ağırlık senaryoları, yakıtların genel performansında önemli bir değişikliğe neden olmamakla birlikte, amonyak tüm durumlarda genel olarak üstünlük sağlamaktadır.

2.3. Gemiler İçin Hibrit Güç ve Tahrik Sistemleri: Mevcut Durum ve Gelecekteki Zorluklar

2.3.1. Elektrikli ve Hibrit Gemilere Uygun Enerji Depolama Sistemleri

Enerji depolama sistemleri (ESS) entegrasyonu, hibrit gemiler için önemli bir noktadır. İlk etapta, ESS entegrasyonu, bir içten yanmalı motorun yakıt tüketimini ve zararlı emisyonları en aza indirmek için en verimli aralıkta çalışmasına olanak tanır. Bu yük dengeleme tekniği, ani yük değişimleri olan operasyon profiline sahip gemiler için son derece önemlidir. Enerji depolama sistemlerini kullanarak gerekli gücün büyük bir kısmını üretmek gereklidir ve bu, dizel motorun düşük yüklerde yakıt tüketiminin ve emisyonlarının artacağı yerlerde değil, yüksek verimlilikle çalıştığı bölgelerde çalışmasına izin verir. ESS seçimleri, kombinasyonları, boyutlandırılması ve küresel sistem tasarımı ve kontrolü, görev kısıtlamaları ve görev profili dikkate alınarak maksimum verimlilik sağlamak için operasyonel taleplere yanıt vermek üzere yapılmalıdır.

Sonuç olarak, hibrit gemilerde enerji depolama sistemlerinin doğru entegrasyonu, operasyonel verimliliği artırmak ve emisyonları en aza indirmek için kritik bir rol oynamaktadır. Görev kısıtlamaları dikkate alınarak en verimli sistemin seçimi ve yönetimi, geminin sürdürülebilir operasyonlarına katkı sağlayacaktır.

2.3.1.1. Bataryalar

Piller, diğer enerji depolama teknolojilerine göre nispeten daha yüksek enerji yoğunlukları, daha düşük maliyetleri ve diğer teknolojilere kıyasla daha uzun bir olgunluk seviyesinde oldukları için lider enerji depolama teknolojisidir.

Ayrıca, diğer ulaşım sektörlerinden elde edilen tecrübeler de pillerin denizcilik sektöründe kullanımını artırmıştır. Yapısal olarak, piller elektrotlar, elektrolitler ve ayırıcılar olarak adlandırılan bileşenlerden oluşur ve performansları bu materyallerin özelliklerine dayanır (Meng ve ark. 2017). Denizcilik sektöründe, ticari olarak uygulanabilecek çeşitli pil türleri bulunmaktadır. Bu nedenle, gemilerde kullanılacak pil tipinin seçimi verimli, etkin ve doğru uygulamaya bağlıdır. İlerleyen yıllarda pil teknolojisinin daha da gelişeceği düşünülse de, enerji depolama sistemlerine (ESS) ilişkin incelemeler, Li-ion pillerin yüksek enerji yoğunlukları ve uzun ömürleri (döngü) sayesinde denizcilik için uygun olduğunu göstermektedir (Chen ve ark. 2009; Georgescu, Godjevac, ve Visser 2018; Luo ve ark. 2015). Ayrıca, Li-ion pillerin maliyeti son yıllarda önemli ölçüde düşmüştür (DNV-GL 2020). Bu nedenle, bu çalışmada daha ileri analizler için Li-ion pil özellikleri dikkate alınmıştır.

Sonuç olarak, pil seçiminde enerji yoğunluğu, maliyet ve uzun ömür gibi faktörler dikkate alınarak Li-ion pillerin denizcilik sektöründe öne çıktığı görülmektedir. Bu nedenle, çalışma gemilerde Li-ion pillerin avantajlarını daha yakından incelemektedir.

Tablo 19 : Popüler pil türlerinin özellikleri

Pil Türü	Enerji Yoğunluğu (kWh/kg)	Güç Yoğunluğu (kWh/kg)	Verimlilik	Ömür (döngü)	Sermaye Maliyeti (\$/kWh)
Kurşun-Asit	30-50x10 ⁻³	75-300x10 ⁻³	%70-90	500-1000	70
Nikel-Kadmiyum	50-70x10 ⁻³	150-300x10 ⁻³	%60-65	2000-2500	300
Nikel Metal Hidrit	60-100x10 ⁻³	200-1500x10 ⁻³	%65-90	750-3500	300-500
Lityum İyon	100-200x10 ⁻³	80-2000x10 ⁻³	%85-90	600-2000	200-700

Bataryalar, gemiler için önemli bir hibritleştirme çözümü sunduğundan, birçok analiz farklı stratejiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örneğin, bir kıyı gemisi için Li-iyon bataryalarının PEMFC ile hibritleştirilmesi, güç ve enerji yoğunluğu, ömür ve maliyet gibi çeşitli kısıtlamalar göz önünde bulundurularak fizibilite ve fayda açısından analiz edilmiştir (Wu ve Bucknall, 2020). Bir diğer çalışmada, bir gemideki bataryanın şarj durumu ve kapasitesinin tahmin edilmesi için gerekli parametrelerin tanımlanmasına yönelik bir öneri incelenmiştir (Misyris ve ark., 2017). Küresel kuru yük taşıyan bir gemide hibrit batarya-dizel elektrikli tahrik sisteminin egzoz gazı emisyonları üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve sera gazı emisyonunda %14'lük bir azalma

potansiyeli bulunmuştur (Dedes ve ark., 2012). Alternatif olarak, hibrit batarya-dizel jeneratörlerinin farklı yapılandırmalarının emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Görev profiline uyum sağlayan belirli yapılandırmaların, emisyon azaltımı açısından daha iyi sonuçlar elde edebileceği belirlenmiştir (Vieira ve ark., 2017). Diğer yandan, tam elektrikli gemi tahrik projeleri de incelenmektedir. Örneğin, MF Ampere, bu alanda tam elektrikli sıfır emisyonlu gemilere geçişte önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilen bir projedir.

Sonuç olarak, dünyanın ilk tam elektrikli feribotu olan bu proje, gemi tahrik sistemlerinde sıfır emisyonlu çözümler için önemli bir örnek teşkil etmektedir. Proje, lityum batarya teknolojisi ile büyük miktarda yakıt tasarrufu sağlamış ve çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltmıştır. Bu tür projeler, gelecekte denizcilik endüstrisinde sıfır emisyonlu tahrik sistemlerinin uygulanabilirliğini göstermekte ve bu alanda önemli ilerlemeler kaydedildiğini ortaya koymaktadır.

2.3.1.2. Süperkapasitörler

Süper kapasitörler, daha yüksek kapasitans, daha yüksek güç yoğunluğu ve daha iyi çevrim kapasitesi anlamında, geleneksel kapasitörlerin teknolojik olarak geliştirilmiş versiyonlarıdır. Bu iyileştirmeler, daha yüksek elektrot yüzey alanı ve daha ince dielektrik malzemelerle sağlanır.

Süper kapasitörlerin hızlı şarj ve deşarj yetenekleri, güç sistemindeki yük dalgalanmalarını tamponlamak için iyi bir seçenek haline getirir (Zhou et al. 2013). Buna karşın, sınırlı enerji yoğunluğu, önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkar ve bu tür çözümler, uzun vadeli sürdürülebilir bir operasyon için başka bir enerji depolama sistemi (ESS) veya güç üretim sistemi gerektirir. Bu arada, kısa süre içinde yüksek güç iletiminin gerektiği durumlarda, güç yoğunluğu daha fazla önem kazanır, bu nedenle süper kapasitörler ve belirli bir dereceye kadar volanlar, bataryalara kıyasla çözümler olarak ortaya çıkar (Hebner et al. 2015). Dolayısıyla, süper kapasitörler, bir gemi güç sisteminin operasyon profiline göre hibritleşmesini optimize etmek için kilit bir role sahip olabilirler. Örneğin, Nebb et al., farklı operasyon profilleri için bir deniz

destek gemisinde yakıt tüketiminin azaldığını ve hibrit bir süper kapasitör-batarya enerji depolama sistemi ile yük değişimlerinin sağlandığını göstermiştir (Nebb et al. 2015).

Süper kapasitörlerin gemi tahrik sistemlerindeki kullanımına yönelik teknik ve ekonomik analizler, önemli maliyet avantajları ve performans iyileştirmeleri sağlamaktadır. Elektrikli feribotlar ve diğer deniz taşıtlarında enerji depolama çözümlerinin optimize edilmesi, yakıt tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayarak, deniz taşımacılığında sürdürülebilir bir geleceğin önünü açacaktır. Bu doğrultuda, süper kapasitörler gibi yenilikçi enerji depolama teknolojilerinin daha fazla araştırılması ve uygulanması, hem operasyonel verimlilik hem de çevresel faydalar açısından kilit bir rol oynamaktadır.

Ticari bir uygulama olarak, tamamen elektrikli tahrik sistemine sahip gemilerde enerji depolama cihazı olarak süper kapasitörlerin kullanımı, yolcu gemisi Ar Vag Tredan üzerinde uygulanmıştır. 22 metre uzunluğundaki katamaran feribot, Fransa'nın Lorient Körfezi'nde kısa mesafeli bir ulaşım aracı olarak görev yapmaktadır ve en fazla 10 knot hızla hareket etmektedir. Feribot, yolcuların iniş ve binişi sırasında kıyı bağlantısından şarj edilmektedir (RAE, 2013).

Sonuç olarak, süper kapasitörlerin tamamen elektrikli gemilerde enerji depolama cihazı olarak kullanılması, ticari uygulamalarda başarıyla uygulanmaktadır.

Özellikle kısa mesafeli deniz ulaşımı için geliştirilen bu sistemler, enerji verimliliğini artırmakta ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak çevresel etkileri minimuma indirmektedir. Bu teknolojinin yaygınlaşması, denizcilik sektöründe sürdürülebilir enerji çözümlerine olan ihtiyacı karşılayacak potansiyele sahiptir. Süper kapasitörlerin pratikte kullanımı, gelecekte deniz taşımacılığında daha geniş bir uygulama alanına sahip olabilir.

2.3.1.3. Volanlar (Flywheels)

Volanlar (Flywheels), dönen bir rotor aracılığıyla kinetik enerji biçiminde enerji depolayan elektromekanik cihazlardır. Volanın dönme hızı, enerji depolama kapasitesiyle ilişkilidir. Bir volan için kinetik enerji miktarı, formül (1) ile ifade edilmektedir. Bu formülde, I eylemsizlik momentini ve ω ise açısal hızı temsil eder (Bolund, Bernhoff ve Leijon 2007).

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Eğer dönen cisim bir disk ise, depolanan enerji, formül (2) ile ifade edilebilir. Burada m diskin kütleini, r ise diskin yarıçapını ifade eder (Bolund ve diğerleri 2007).

Flywheels (Volanlar), bataryalardan daha yüksek enerji yoğunluğu ve süperkapasitörlerden daha yüksek güç yoğunluğu sunarak bir dengeleme çözümü sunmaktadır (Bolund ve diğerleri 2007; Hou, Sun ve Hofmann 2018). Güç yoğunluğu diğer enerji depolama sistemlerinden (ESS'lerden) daha yüksek olmasına rağmen, enerji yoğunluğu daha düşüktür (Farhadi ve Mohammed 2016). Bu nedenle, jiroskopların temel kullanım alanı, kesintisiz güç kaynakları (UPS) gibi yük dalgalanmalarını dengelemek içindir (Park, Kalev ve Hofmann 2008; Zhou ve diğerleri 2013). Sürtünme kayıpları ana dezavantajlardan biridir; ancak manyetik yataklar, sürtünmeyi önemli ölçüde azaltarak sistemin verimliliğini %30'un üzerine çıkarabilmektedir (Aneke ve Wang 2016).

Volanlar, sıcak bir sıcaklık aralığında kapasite ve performans bozulması olmadan çok yüksek döngü yeteneklerine sahip olmaları sayesinde bataryalara göre daha uzun ömür sunar (Bolund ve diğerleri 2007; Hou ve diğerleri 2018). Ayrıca, volanlar kısa şarj süresi ve çevre dostu malzemeler kullanarak ölçeklenebilir bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir.

Sonuç olarak, volanlar, gemi tahrik sistemlerinde enerji depolama ve güç dalgalanmalarının dengelenmesi için uygun bir çözüm sunmaktadır. Yüksek güç

yoğunluğu, düşük sürtünme kayıpları ve uzun ömür gibi özellikleriyle bu teknoloji, sistem verimliliğini artırma ve çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahiptir.

Tablo 20 : Enerji depolama seçeneklerinin karşılaştırma tablosu

ESS	Enerji Yoğunluğu (kWh/kg)	Güç Yoğunluğu (kW/kg)	Kapasite (kW)	Verimlilik (%)	Çevrim Ömrü
Pil (Li-ion)	75-200x10 ⁻³	200-315x10 ⁻³	En Fazla 100	85-90	1,000-10,000+
Süperkapasitör	2,5-15x10 ⁻³	500-5000x10 ⁻³	En Fazla 300	90-95	100,000+
Volan (Flywheels)	10-30x10 ⁻³	400-1500x10 ⁻³	En Fazla 2500	93-95	20,000+

Volanların uzun vadeli işletim optimizasyonu, araçlarda kullanılmak üzere hâlâ araştırılmaktadır (Luo ve ark. 2015). Ancak, güvenlik sebepleri bu sistemlerin gemilerde uygulanmasını sınırlayabilir; buna rağmen, askeri gemilerde darbe yüklerinin karşılanması amacıyla kullanılmaları mümkündür (Mutarraf ve ark. 2018). Yüksek hızda dönen disk nedeniyle, özel koruyucu muhafazaların kullanılması gereklidir ve bu sistemlerin güvenli bir şekilde işletilmesi için gemi operatörlerinin belirli niteliklere sahip olması zorunludur.

Yaygın enerji depolama yöntemleri; piller, süperkapasitörler ve volanlar bu bölümde açıklanmakta olup, her birinin ayrıntıları sunulmaktadır. Güç üretim teknolojileri ise üçüncü bölümde ele alınacaktır (İnal, Dere ve ark. 2021).

2.3.2. Güç Üretim Teknolojileri

Denizcilik endüstrisi için gemi üzerindeki güç üretim teknolojisi seçenekleri sınırlıdır. Büyük çoğunluğu içten yanmalı motorlardan (özellikle deniz dizel motorları) oluşmakla birlikte, yakıt hücreleri ve yenilenebilir enerji kaynakları da temiz enerji üretim kapasiteleri ve küresel çevresel kaygılar nedeniyle birkaç örnekte yer almaktadır. Hibrit sistemlerin avantajı ise, birden fazla enerji kaynağına sahip olmaları sayesinde geleneksel tahrik sistemlerine göre daha esnek olmalarıdır. Bu nedenle, bu bölümde hibrit sistemlerde yaygın olarak kullanılan güç üretim teknolojileri incelenmektedir.

2.3.2.1. İçten Yanmalı Motorlar

Gemi tahrik sistemleri ve elektrik yükleri için gemi üzerinde güç üretmenin en geleneksel ve yaygın yöntemi içten yanmalı motorlardır. 19. ve 20. yüzyıllarda, gemiler için kullanılan tahrik motorları buhar motorlarından ve buhar türbinlerinden dizel motorlara ve gaz türbinlerine (özellikle savaş gemileri ve yüksek güç üretimi gerektiren durumlar için) geçiş yapmıştır (Geertsma ve ark. 2017). Bununla birlikte, ekonomik açıdan bakıldığında, dizel motorlar günümüzde gemilerde kullanılan ana tahrik motorlarıdır. Dizel motorların tercih edilmesinin başlıca nedeni, yüksek basınçlı buhar türbinlerine göre daha yüksek verimlilik sunmalarıdır. Yüksek basınçlı buhar türbinleri %35-37 verim aralığında çalışırken, dizel motorlar %48-52 verim aralığında çalışmaktadır (Nguyen ve ark. 2020; Provataris ve ark. 2017).

Dizel motorların CO₂ emisyonları Otto çevrimli motorlara göre daha düşük olsa da, daha yüksek verimlilikleri nedeniyle daha yüksek NO_x emisyonlarına sahiptirler. Bu durum, dizel motorların yüksek sıkıştırma oranı ve daha yüksek yanma sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır (Dere ve Deniz 2020; Özgül ve Bedir 2019). Ayrıca, CO₂, NO_x, SO_x ve partikül madde (PM) emisyonlarını azaltmak amacıyla sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), LNG taşıyıcılarında kullanılan çift yakıtlı dizel motorlar (DFDE) aracılığıyla umut verici bir çözüm sunmaktadır. DFDE motorlar, kriyojenik depolamanın ısı transferi nedeniyle basınçlı tanklarda oluşan gazı kullanır. DFDE hem geleneksel yakıtlarla (deniz dizel yağı (MDO) ve ağır yakıt yağı (HFO)) hem de göreceli olarak yeni bir yakıt olan LNG ile çalışabilmektedir. IMO Deniz Çevresi Koruma Komitesi (MEPC) tarafından NO_x ve SO_x sınırlarına yönelik MARPOL Ek IV yönetmeliklerinin revize edilmesinden sonra LNG'nin deniz taşımacılığında kullanılma olasılığı yüksek talep görmektedir.

IMO Deniz Çevresi Koruma Komitesi (MEPC) tarafından NO_x ve SO_x limitleriyle ilgili MARPOL Ek IV yönetmeliklerinin revize edilmesinden sonra LNG'nin deniz taşımacılığında kullanılma olasılığı yüksek talep görmektedir. Örneğin, LNG taşıyıcıları için yapılan bir Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi (EEDI) analizi, yanmamış metan dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Ekanem Attah ve Bucknall

2015). Başka bir çalışmada ise çift yakıtlı motorlar kullanılarak LNG'nin ekonomik analizleri yapılmış ve farklı projeler bağlamında maliyet-etkinlik açısından değerlendirilmiştir (Ge ve Wang 2016). Ancak, LNG'nin LNG taşıyıcıları dışında kullanımında yüksek depolama tankı maliyetleri ve güvenlik riskleri gibi bazı sorunlar devam etmektedir (Wang ve Notteboom 2014). Bu bağlamda, LNG'nin yakıt olarak deniz taşımacılığı pazarında gelişimini etkileyen beş boyut; çevresel, sosyal, altyapı/teknoloji, ekonomik fiyat ve denizcilik talebi olarak tanımlanmaktadır (Thomson, Corbett ve Winebrake 2015).

Öte yandan, biyoyakıtlar denizcilik endüstrisi için temiz enerjiye geçişte oldukça etkilidir (Mofor, Nuttall ve Newell 2015). Biyoyakıtların ana avantajı, mevcut gemi altyapısı ile uyumlu olmalarıdır; deniz dizel yağı veya ağır yakıt yağları ile çalışabilmektedirler (Tandekar 2019). Emisyon azaltımı açısından değerlendirildiğinde, biyoyakıtların çevre üzerindeki etkisi, deniz dizel yağı veya ağır yakıt yağı gibi fosil yakıtlara kıyasla oldukça düşüktür (Chuah ve ark. 2017).

Bununla birlikte, zararlı emisyonları kontrol etmek ve azaltmak için; egzoz gazı arıtıcılar, egzoz gazı geri dolaşım sistemleri, seçici katalitik indirgeme, değişken enjeksiyon zamanlaması ve egzoz gazı temizleme sistemleri gibi birçok seçenek bulunmaktadır (Lee ve ark. 2020). Gemi ömrü açısından yüksek yatırım maliyetleri ve sınırlı fosil yakıtlar, alternatif yakıtlar ile hibrit tahrik sistemlerini cazip çözümler olarak öne çıkarmaktadır (Deniz ve Zincir 2016; Hansson ve ark. 2019; Zincir ve ark. 2019).

Tablo 21 : Yakıt tüketimi ile CO₂ emisyonu arasındaki dönüşüm faktörü

Yakıt Türü	Referans	Karbon İçeriği	Dönüşüm Faktörü
Dizel/Gaz Yağı	ISO 8217 Grades DMX through DMB	0,8744	3,206
Hafif Yakıt Yağı (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0,8594	3,151
Ağır Yakıt Yağı (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0,8493	3,114
Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG)	-	0,75	2,750

Ancak, deniz dizel motorları, yakıt yağı maliyeti ve daha yüksek güvenilirlik avantajları sayesinde tahrik sistemlerinin hibritleştirilmesinde önemli bir rol

oyunmaktadır (Bassam 2017). Deniz dizel motorları, kısmi yüklerde verimsiz çalışır, bu nedenle yakıt tüketimleri ve emisyonları artar. Emisyon sınırlamalarına uyum sağlamak ve deniz ticaretinde rekabetçiliği korumak açısından yakıt tüketimini minimize etmek en önemli hedef haline gelmiştir. Bu bağlamda, dizel motorların temel çalışma özellikleri göz önünde bulundurulduğunda; çoğu motor üreticisi, motorların maksimum sürekli oranının %60 yükün üzerinde çalıştırılmasını önermektedir (Nguyen ve ark. 2020).

2.3.2.2. Yakıt Hücreleri

Yakıt hücreleri, yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan doğru akıma (DC) dönüştürerek hücre ünitesine iletir (Barbir 2005). İçten yanmalı motorlarda olduğu gibi yanma işlemleri ortadan kaldırıldığından, enerji dönüşümü yalnızca bir adımdan oluşur ve toplam verimlilik, deniz dizel motorlarına göre göreceli olarak daha yüksektir (Bicer ve Dincer 2018). Yakıt hücreleri, genellikle ana yakıt olarak hidrojen kullanır ve bu sayede dizel motorlara kıyasla daha temiz bir şekilde çalışabilir (Han, Charpentier ve Tang 2012). Bu doğrultuda, katı emisyon düzenlemeleri göz önüne alındığında, yakıt hücreleri gelecekteki gemilerin enerji ihtiyacını karşılamak için çevre üzerindeki düşük etkileriyle oldukça umut verici bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Yan ve ark. 2020).

Yakıt hücrelerini diğer enerji depolama sistemlerinden ayıran temel fark, şarj gerektirmeden, yakıt sağlandığı sürece elektrik üretebilmeleridir. Kullanılan elektrolit türüne göre sınıflandırılan yakıt hücrelerinin ticari olarak beş türü mevcuttur: Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC), alkali yakıt hücresi (AFC), fosforik asit yakıt hücresi (PAFC), erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC) ve katı oksit yakıt hücresi (SOFC). En yaygın kullanılan tür, yüksek teknolojik olgunluğu ve denizcilik ile diğer enerji uygulamalarında yaygın kullanımı nedeniyle PEMFC'dir (De-Troya ve ark. 2016). Teknolojik olgunluk, maliyet açısından avantaj sağlarken, operasyonel deneyim açısından da üstünlük sunmaktadır. Ancak, PEMFC'nin en büyük dezavantajı, yüksek saflıkta hidrojen gerektirmesidir; aksi takdirde, karbon monoksit zehirlenmesi nedeniyle hücre ünitesi çalışmayı durdurur (Baschuk ve Li 2001).

Farklı yakıt hücresi türlerinin çalışma özelliklerindeki temel değişiklikler çalışma sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır; yüksek ve düşük sıcaklıklarda çalışan yakıt hücreleri farklı özellikler göstermektedir. MCFC, PAFC ve SOFC yüksek sıcaklık türlerindendir. Ayrıca, PEMFC'nin yüksek sıcaklık versiyonu olan HT-PEMFC de bulunmaktadır; bu versiyonda, perflorosülfonik asit (Nafion) membran malzemesi polybenzimidazole (PBI) ile değiştirilerek daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme sağlanmıştır (Rosli ve ark. 2017).

HT-PEMFC, PEMFC'de karşılaşılan katot tarafındaki su yönetimi ve yakıt safsızlıklarına yüksek hassasiyet gibi bazı problemleri ele almaktadır (Tronstad ve ark. 2017).

Yüksek sıcaklıklardan elde edilen egzoz gazları, toplam sistem verimliliğini ve güç çıkışını artırmak amacıyla kombine bir türbin sistemiyle kullanılabilir (İnal ve Deniz 2020). En uygun yakıt hücresi türünün hibritleştirme için seçimi büyük ölçüde geminin operasyon profiline bağlıdır. Yapılan projelerden elde edilen veriler, PEMFC, MCFC ve SOFC'nin diğer türlere göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yüksek güç gereksinimi varsa ve gemide hidrojen depolamak zorlayıcı ise, SOFC ve MCFC tercih edilmektedir. Emisyon yönünden ise yüksek güç yoğunluğu ve teknolojik olgunluk PEMFC'nin güçlü yönleridir. Ancak, PEMFC'nin yakıt olarak yüksek saflıkta hidrojene ihtiyaç duyması, uzun deniz yolculukları için ekonomik olmayan bir seçenek olarak kalmasına neden olmaktadır.

Denizcilikte farklı yakıt hücresi türlerinin kullanımı üzerine çeşitli araştırma ve geliştirme projeleri yürütülmektedir. Bu pilot projelerden biri olan FellowSHIP, hibrit ve ayrık batarya-yakıt hücresi teknolojisinin bir Offshore Tedarik Gemisi (OSV) olan "Viking Lady" üzerinde kullanımını araştırmayı hedeflemiştir. Proje, 2003'ten 2018'e kadar gerçekleştirilmiş olup, geminin yardımcı güç ihtiyaçları için 320 kW'lık LNG yakıtlı bir MCFC sisteminin kurulumu ile yakıt hücresinin gemi üzerinde test edilmesi ve ölçüm yapılması amaçlanmıştır. Sistem, NO_x, SO_x veya partikül madde (PM)

emisyonu olmadan 18.500 saat boyunca sabit yükte çalıştırılmıştır (İnal ve Deniz 2018).

2.3.2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Diğer Karbonsuz Kaynaklar

Yenilenebilir enerji kaynaklarının (RES) tasarımı ve stratejisi hem geleneksel hem de hibrit elektrikli tahrik sistemine sahip gemilere uygulanabilir. Teknolojik gelişmeler ve kolayca erişilebilen çözümler, denizcilik endüstrisinin dikkatini sıfır emisyon ve karbon salımı olmayan gemi taşımacılığına giden yolda RES kullanımına çekmektedir. Denizcilik endüstrisi için RES kullanımı esas olarak güneş enerjisi (Karatuğ ve Durmuşoğlu 2020; Wang ve ark. 2019), rüzgar enerjisi (Fagiano ve ark. 2012; Kim ve Park 2010; Leloup ve ark. 2014; Talluri, Nalianda ve Giuliani 2018), dalga enerjisi (Alujević ve ark. 2019) ve biyoyakıtlar (Hansson ve ark. 2019) üzerine odaklanmaktadır. Bu kaynaklar hibrit sistemlerde uygulanmaktadır (Tang, Wu ve Li 2018).

Fotovoltaik hücrelerin amacı, geminin tahrik sistemi veya elektrik yükleri için ek elektrik enerjisi sağlamaktır. Güneş enerjisi, geminin yardımcı güç ihtiyacı düşünüldüğünde faydalıdır; ancak sürüş sistemi göz önüne alındığında, PV (fotovoltaik) panellerin uygulanabileceği yüzey alanıyla sınırlı olması ve metrekaresine başına düşük güç seviyesi nedeniyle çıktı gücü oldukça sınırlıdır (birkaç yüz W/m²). Güç üretimi, enlem, açı, güneş radyasyonu, konveksiyon-iletim ısı kayıpları veya PV panellerin konumu gibi atmosferik ve coğrafi koşullara bağlıdır (Strušnik ve ark. 2020). Bu durum, sisteme kararlı güç sağlama zorunluluğu nedeniyle güç dalgalanmalarına yol açmaktadır. Bu nedenle, güneş enerjisinin bir enerji depolama cihazına ihtiyacı vardır ve genellikle gemiler için hibrit bir sistemin tamamlayıcı bir unsuru olarak ele alınmaktadır.

Örneğin, PV, dizel ve batarya sisteminin kombinasyonundan oluşan bir hibrit sistem tasarımı Lan ve ark. tarafından ele alınmıştır. Bu sistem, çevresel etkiler dikkate alınarak sistem boyutunun optimize edilmesi ve dizel motorların enerji verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması için tasarlanmıştır (Lan ve ark. 2015). Ayrıca, geminin

fiziksel hareketleri de hibrit PV-ESS sisteminin verimliliğini etkilemektedir. Örneğin, salınım etkisi Wen ve ark. tarafından incelenmiştir (Wen ve ark. 2016). Deniz koşullarında PV paneller için kararlı güç üretimi zor bir konudur. Tuz spreyi ve deniz suyu gibi çevresel etkiler, verimliliklerini ciddi şekilde etkileyebilir. Her ikisinin birleşik etkisi, %6'ya varan bir verim kaybına neden olabilir (Zhang ve Yuan 2021). Güneş panellerinin sınırlı kapasitesi ve verimlilik için yüksek temizlik gereksinimleri, güneş enerjisinin gemilerde yardımcı ve tamamlayıcı güç kaynağı olarak uygulanabilirliğini sınırlamaktadır.

2.3.3. Hibrit Tahrik Sistemi Mimarileri

Öte yandan, rüzgar enerjisi, ana motorun yükünü azaltarak tahrik gücüne destek olabilecek çeşitli formlarda mevcuttur. Rüzgar enerjisinin kinetik enerjisini dönüştürmek için tipik teknikler Flettner rotoru, yelkenler, rüzgar türbinleri ve kanat yelkenleridir. Flettner rotorlarının icadı 1920'lere dayanmaktadır. Teorik olarak, Magnus etkisini kullanır ve rüzgar rotor üzerinden geçerken, rüzgar yönüne dik bir itme kuvveti oluşturulur (De Marco ve ark. 2016). Flettner rotorları, gemi hızının rüzgar hızından yüksek olduğu durumlarda bile güç üretebilir ve hızdan çok rüzgar yönünden etkilenir. Ayrıca, simülasyon sonuçları, Flettner rotorlarının yakıt tüketimini %20'ye kadar azaltabileceğini göstermektedir (Talluri ve ark. 2016).

Yumuşak yelkenler ve uçurtmalar, rüzgar gücünün doğrudan kullanımıyla daha basit ve daha eski yöntemler olarak görünmektedir. Performansları büyük ölçüde rüzgarın gücü ve yönü ile ilişkili olup, sistemin hemen hemen tüm gemi türlerine ekstra alan gerektirmeden uygulanabilmesine olanak tanır. Uçurtma sisteminin sağladığı kazanım, hava ve deniz durumuna bağlı olarak Beaufort 7'de %50'ye ulaşabilir (Leloup ve ark. 2016).

Bir diğer seçenek ise rüzgar türbinidir. Rüzgar türbinlerinin yatay ve dikey eksen konfigürasyonlarına göre detaylı bir analiz yapılmıştır (Talluri ve ark. 2016). Dikey eksenli rüzgar türbinleri, yatay eksenlilere kıyasla daha az karmaşık yapıya, daha düşük işletme ve sermaye maliyetlerine, daha düşük kütle merkezi sayesinde gemide

stabilite açısından kolay kurulum avantajlarına sahiptir. Denizcilik sektörü açısından bu avantajlara rağmen, yatay eksenli türbinler daha yüksek verimlilik ve daha yüksek güç üretim kapasitesine sahiptir.

2.3.3.1. Seri Konfigürasyon

Gemiler için hibrit tahrik sistemlerinin seri konfigürasyonu, diğer konfigürasyonlara göre nispeten olgun bir yapıya sahiptir (Geertsma 2019). Bu sistemde, tüm güç jeneratörleri (yakıt hücreleri, yenilenebilir enerji kaynakları (RES) veya dizel jeneratörler) ve enerji depolama kaynakları (ESS) olarak piller veya süperkapasitörler gibi bileşenler, ilgili dönüştürücüler ile ana elektrik şebekesine bağlanır. Diğer dağıtılmış elektrik tüketicileri (klima, otel yükleri, navigasyon ekipmanları ve diğer sistemler gibi) de ana şebekeye bağlanır. Bu konfigürasyon ile birçok güç kaynağı ve enerji depolama sistemi kombinasyonu kullanılabilir ve geminin özelliklerine bağlı olarak yapılandırılabilir. Bu çalışmada, tasarım sürecinde kullanılabilecek farklı alternatifleri göstermek için uygulanabilir tüm seçenekler açıklanmıştır.

Seri konfigürasyonun en büyük avantajı, çeşitli çalışma modlarından elde edilmesidir. Sistem içerisindeki toplam elektrik enerjisi toplanıp dağıtılması için ortak bir bara kullanılır (Lashway, Elsayed ve Mohammed 2016). Tek bir kaynak kullanarak (örneğin, sadece pil gücü) veya birden fazla kaynağın kombinasyonu (örneğin, yakıt hücresi-pil, ICE-süperkapasitör gibi) çalıştırmak mümkündür. Bu diğer enerji kaynakları (ESS, FC veya RES gibi) dizel motorların düşük verimlilik gösterdiği düşük yük bölgesinde yardımcı olarak, dizel motorların yüksek verimlilik bölgesinde çalışmasını sağlar (Bayındır, Gözüküçük ve Teke 2011).

2.3.3.2. Paralel Konfigürasyon

Paralel konfigürasyonun ana farkı, içten yanmalı motorlar ile pervaneler arasındaki doğrudan mekanik bağlantının bir kısmının korunmasıdır. Pratik olarak, sistemin elektrik üretimi ve depolama tarafı seri konfigürasyona oldukça benzerdir; ancak itki ve yük tarafında farklılık gösterir. Bu nedenle, enerji depolama sistemi, diğer enerji

kaynakları ve şanzımana bağlı ek elektrik motoru, itkiyi destekleyerek performansı artırmayı amaçlamaktadır. Başka bir deyişle, desteklenen elektrik motoru, içten yanmalı motorun termal yükünü azaltır ve böylece azalan yük, daha az yakıt tüketimi ve emisyonu yol açar.

Paralel konfigürasyonun en büyük avantajı, hem elektriksel hem de mekanik itki özelliklerini ve bunların faydalarını içermesidir. Örneğin, mekanik tahrikin neden olduğu sınırlı manevra kabiliyeti, elektrikli tahrik sayesinde ortadan kaldırılabilir. Başka bir örnek olarak; dizel motor, yardımcı elektrik motorunun desteği sayesinde termal yük nedeniyle sorun yaşamadan yüksek verimlilik ve düşük yakıt tüketimi spektrumunda çalışabilir. Ancak, tahrik ünitesine mekanik ve elektriksel bağlantılar arasındaki dengenin dikkatle ele alınması gerekir. Bu nedenle, bu konfigürasyon için kontrol stratejisi önem kazanmakta ve farklı güç talepleri için yüksek verimliliğe ulaşmak amacıyla optimum bir nokta bulunmasına olanak tanımaktadır (Geertsma ve ark. 2017). Bir diğer avantaj olarak, ICE'nin geçici yüksek güç taleplerini karşılayabilmesi sayesinde, elektrik bileşenlerinin güç kapasitesinde azalma sağlanabilir.

2.3.3.3. Seri-Paralel Konfigürasyon

Paralel konfigürasyonun ana farkı, içten yanmalı motorlar ile pervaneler arasındaki doğrudan mekanik bağlantının bir kısmının korunmasıdır. Pratik olarak, sistemin elektrik üretimi ve depolama tarafı seri konfigürasyona oldukça benzerdir; ancak itki ve yük tarafında farklılık gösterir. Bu nedenle, enerji depolama sistemi, diğer enerji kaynakları ve şanzımana bağlı ek elektrik motoru, itkiyi destekleyerek performansı artırmayı amaçlamaktadır (Liu 2020). Başka bir deyişle, desteklenen elektrik motoru, içten yanmalı motorun termal yükünü azaltır ve böylece azalan yük, daha az yakıt tüketimi ve emisyonu yol açar.

Paralel konfigürasyonun en büyük avantajı, hem elektriksel hem de mekanik itki özelliklerini ve bunların faydalarını içermesidir. Örneğin, mekanik tahrikin neden olduğu sınırlı manevra kabiliyeti, elektrikli tahrik sayesinde ortadan kaldırılabilir. Başka bir örnek olarak; dizel motor, yardımcı elektrik motorunun desteği sayesinde

termal yük nedeniyle sorun yaşamadan yüksek verimlilik ve düşük yakıt tüketimi spektrumunda çalışabilir. Ancak, tahrik ünitesine mekanik ve elektriksel bağlantılar arasındaki dengenin dikkatle ele alınması gerekir. Bu nedenle, bu konfigürasyon için kontrol stratejisi önem kazanmakta ve farklı güç talepleri için yüksek verimliliğe ulaşmak amacıyla optimum bir nokta bulunmasına olanak tanımaktadır (Geertsma ve ark. 2017). Bir diğer avantaj olarak, ICE'nin geçici yüksek güç taleplerini karşılayabilmesi sayesinde, elektrik bileşenlerinin güç kapasitesinde azalma sağlanabilir.

Sistem uygunluğu, büyük ölçüde CAPEX, OPEX ve diğer özelliklerle ilgili uzlaşmalara bağlıdır. Ancak genel bakış açısından, karmaşıklığı ve yüksek maliyetine rağmen, seri-paralel konfigürasyonlar çok sayıda gemi için daha iyi çözümler sunmaktadır. Bu bölümde üç hibrit tahrik konfigürasyonu; seri, paralel ve seri-paralel, avantajları ve dezavantajlarıyla birlikte açıklanmış ve karşılaştırılmıştır. Bir sonraki bölüm, hibrit gemi tahrik sistemlerinin enerji yönetimi sistemi ve kontrol stratejileri hakkında olacaktır.

2.3.4. Enerji Yönetim Stratejileri

Gerçek zamanlı enerji yönetimi akıllı stratejisinin uygulanması, hibrit tahrik sistemlerine sahip gemilerde sistem ve bileşenlerin verimliliğini artırmak, ekonomik, güvenli ve güvenilir operasyonları sürdürmek açısından son derece önemlidir. Hibrit güç sistemleri birden fazla enerji kaynağı ve çok sayıda tüketici içerdiğinden, farklı türdeki operasyonlar sırasında farklı dinamik özellikler ortaya çıkabilir. Bu nedenle, enerji yönetim sistemi (EMS), sistemin değişen dinamik gereksinimlerine net bir yanıt verecek şekilde iyi organize edilmeli ve uygulanmalıdır; böylece gemi yardımcı yükleri ve tahrik sistemlerine güvenli bir enerji sağlanabilir. Uygun bir EMS, enerji verimliliğini artırabilir ve her bir güç kaynağını kontrol ederek yakıt tüketimini azaltarak optimum operasyonel koşullara ulaşılmasını sağlayabilir. Genel olarak, gemiler için gözden geçirilebilecek iki tür EMS bulunmaktadır: kural tabanlı ve optimize edilmiş kontrol stratejileri (Balsamo ve ark. 2017; Yuan ve ark. 2020).

2.3.4.1. Kural Tabanlı Kontrol Stratejisi

Kural tabanlı kontrol sistemi, statik bir kontrol stratejisidir ve geçmiş deneyimlerden ve uzman bilgisine dayalı olarak elde edilen pratik kontrol kuralları sağlayarak güçlü bir sağlamlık ve gerçek zamanlı performans sunar. Ancak, zayıf dinamik değişiklik yanıtı nedeniyle optimizasyon kapasitesi sınırlıdır. Kural tabanlı kontrol genellikle mantık eşik değerleri ile kullanılır (Da Rù ve ark. 2016), ve benzer yaklaşımı izleyen farklı kontrol stratejileri, çok enerjili hibrit sistemler için önerilmiştir. Örneğin, güneş panelleri, rüzgar türbinleri, bataryalar ve yakıt hücrelerinden oluşan bir hibrit sistem için hiyerarşik bir enerji yönetim sistemi ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak sunulmuştur (Torreglosa ve ark. 2014). Bu çalışmada, EMS, ana ve bağımlı kontrol stratejilerinden oluşur; ana kontrol, sistem verimliliğini istenilen değerlerde tutmak için ana ve ikincil referans noktalarını tanımlar, bağımlı kontrol ise alt sistemlerin çalışma noktalarını ana kontrolün komutlarına göre ayarlar. PI kontrolörlerden oluşan kademeli kontrol kullanımı, kural tabanlı bir kontrol stratejisinde mantık eşik değerlerini kullanmanın bir örneğidir.

Diğer taraftan, kural tabanlı kontrol stratejisi deneyime oldukça bağımlı olduğundan, daha karmaşık ve dinamik sistemler için optimal noktayı bulmak zor hale gelmektedir. Denizcilik ortamı, deniz ve rüzgar etkileri gibi dış etkenlere açık olduğundan ve öngörülemez koşullara sahip olduğundan, çoklu model ve çok amaçlı kontrol gerektiren dinamik, zamanla değişen doğrusal olmayan problemlerde en akıllı kontrol stratejileri önem kazanmaktadır. Bulanık mantık kontrolü, toleranslı bir hata ile kesin matematiksel modele ihtiyaç duymadığı için yapay zeka kontrol sistemleri arasında yer alan bir tekniktir. PV, batarya, dizel hibrit RORO gemisinin enerji yönetimi için bulanık mantık tabanlı bir kontrol metodu geliştirilmiştir (Yuan ve ark. 2018). Araştırma sonucunda, gerçek gemi verileri ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla toplam gemi performansının iyileştirilmesi ile yakıt tüketimi ve emisyonlarda azalma sağlanmıştır. Orta voltaj DC tamamen elektrikli gemi güç sistemleri için bulanık mantık ve orantısal-integral kontrol tabanlı EMS arasındaki bir diğer karşılaştırma yapılmıştır (Khan, Faruque ve Newaz 2017). Her iki EMS de gemi güç sistemine farklı güç taleplerinde başarıyla enerji sağlamakla birlikte, bulanık

mantık kontrolü, batarya yönetiminde şarj ve deşarj hızlarını değiştirerek daha iyi performans göstermiştir.

Ancak, bulanık kuralların oluşturulması, sistem yönetimi ve davranış tahmini konusunda güçlü bir uzmanlık gerektirir. Gemiler dinamik sistemlerdir ve stabil bir lineer matematiksel modele uymaları zordur. Optimize edilmiş kontrol stratejileri, çok enerjili gemiler için, farklı operasyonel unsurlara duyarlılıkları ve karmaşık sistemlere uygunlukları sayesinde, kural tabanlı kontrol stratejilerinden çok daha etkilidir (Al-Falahi ve ark. 2018).

2.3.4.2. Optimizasyon Tabanlı Kontrol Stratejisi

Optimize edilmiş kontrol stratejisi, iki başlık altında incelenebilir; küresel optimizasyon (GO) ve gerçek zamanlı optimizasyon (RTO). Öncelikle, küresel optimizasyon, tüm sistem modellerini ve koşullarını teorik taban ile birlikte kullanarak belirli bir süre içerisinde çevrimdışı olarak genel bir optimizasyon işlemini gerçekleştirmek için doğru matematiksel denklemlerden faydalanır. GO, dinamik programlama algoritması (DPA) (Kanellos, Tsekerous, ve Hatziargyriou 2014), genetik algoritma (GA) (Ancona ve ark. 2018), yapay sinir ağı (ANN) (Tarelko ve Rudzki 2020), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Divyajot, Kumar ve Fozdar 2018), karınca kolonisi optimizasyon algoritması (ACOA) (Xiang ve Yang 2021), benzetimli tavlama algoritması (SAA) (Wang ve ark. 2017) ve farklı evrim algoritmaları (DEA) (Wu ve ark. 2011) gibi diğer gelişmiş optimizasyon algoritmalarını içerebilir. DPA, optimizasyon sorununa dair tüm bilgilerin önceden belirlenmesini gerektirir. Elektrikli bir gemi için DPA kullanılarak yapılan güç üretimi planlama optimizasyonu araştırmasında, sera gazı emisyonları veya seyahat planı gibi operasyonel kısıtlamalar göz önünde bulundurularak, gemi yük değişiklikleri tahmin edilebilirken, operasyonel maliyetlerin ve sera gazı emisyonlarının azalması sağlanabilir (Kanellos ve ark. 2014). GA ise düşük algoritma karmaşıklığı ile geniş bir uyarlanabilirlik ve geniş bir uygulanabilirlik yelpazesine sahiptir.

Örneğin, Ancona ve ark. bir kruvaziyer gemisi için enerji kaynaklarının farklı konfigürasyonlarıyla yük dağılımını optimize ederek yakıt tüketimini en aza indirmek amacıyla GA tabanlı bir optimizasyon önermiştir. Hibrit sistemler ekonomik ve çevresel parametreler gibi tüm analiz edilen parametreler arasında en iyi performansı göstermiştir (Ancona ve ark. 2018). Başka bir optimizasyon stratejisi olarak, Xiang ve Yang tarafından dizel-elektrik hibrit bir gemide ECMS ile birlikte ACOA'nın uygulanması analiz edilmiştir ve amaç, yakıt tüketimini ve bataryadaki şarj durumu dalgalanmalarını azaltmaktır (Xiang ve Yang 2021). ACOA tabanlı optimize edilmiş enerji yönetim sistemi, yakıt tüketiminde sırasıyla %6,9 ve %12,1 oranında bir azaltma sağlayarak kural tabanlı optimizasyon versiyonunun neredeyse iki katına çıkmıştır. Divyajot ve ark. tarafından yapılan başka bir araştırmada, bir tanker için güneş panellerinin, ESS'nin ve dizel jeneratörlerin optimum boyutlandırılması analiz edilmiştir ve ESS olmadan hibrit güneş-dizel konfigürasyonunun ekonomik olarak uygun olmadığı bulunmuştur (Divyajot ve ark. 2018).

Optimize edilmiş kontrol stratejisi iki ana başlıkta incelenebilir: küresel optimizasyon (GO) ve gerçek zamanlı optimizasyon (RTO). İlk olarak, küresel optimizasyon tüm sistem modellerini ve koşullarını kullanarak teorik temele dayalı ve doğru matematiksel denklemler aracılığıyla belirli bir zaman diliminde çevrimdışı bir genel optimizasyon gerçekleştirir. GO'ya dahil olan algoritmalar, dinamik programlama algoritması (DPA), genetik algoritma (GA), yapay sinir ağı (ANN), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), karınca kolonisi optimizasyonu (ACOA), simüle edilmiş tavlama algoritması (SAA) ve farklı evrim algoritması (DEA) gibi gelişmiş optimizasyon algoritmalarını içerir.

2.3.5. Tartışma

2.3.5.1. Mimari Tasarım Metodolojisi

Hibrit tahrik sistemi mimarisi, gemi özellikleri ve görev profillerine saygı gösterilerek tasarlanmıştır, çünkü farklı rotalara, görevlere ve işlevlere sahip çok çeşitli gemi türleri bulunmaktadır. Hibrit konfigürasyon ve buna karşılık gelen EMS tasarımı çok kriterli bir sorundur. Bu nedenle, gemilerin tahrik sistemini yapılandırmak için birçok farklı

güç kaynağı seçeneği vardır. Bu yüzden, incelemeye alınan geminin operasyon profiline göre, enerji üretim yöntemleri ve tahrik tekniği büyük önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, belirli bir gemi tipi için mükemmel hibrit tahrik sisteminin belirli bir türü olmadığını belirtmek önemlidir.

Bu nedenle, mühendislerin gemi için en uygun tahrik ve güç kaynağı sistemini değerlendirmek için çeşitli kriterlere ihtiyacı vardır. Örneğin, bir yolcu gemisi ile okyanus ötesi bir yük gemisi, hibritleşme teknolojisi seçimlerini sınırlandıran farklı güç gereksinimlerine sahiptir. Bu nedenle, gemiler için güç sistemlerinin değerlendirme kriterleri operasyon profilini göz önünde bulundurmalıdır (Nguyen ve ark., 2020).

Bu örnek gemi için en uygun çözümü bulmayı amaçlayan çalışma, geminin standartlaştırılmış operasyonunun modellenmesi ve simülasyonu ile yapılmıştır (Vu ve ark., 2015).

2.3.5.2. Sistem Seçim Metodolojisi

Doğru güç kaynağını ve hibrit konfigürasyonu bulmak, gemi tipi açısından kapsamlı bir analiz gerektirir. Sistemler, farklı güç taleplerine ve entegrasyon kısıtlamalarına bağlıdır; dolayısıyla mimarileri, operasyonel özelliklerini sağlamak amacıyla şekillendirilmiştir. Bu nedenle, her sistem, gemi tipine göre farklı bir role sahiptir. Güç üretimi, enerji depolama ve tahrik topolojilerinin gözden geçirilmesi sonucunda, gemiye özel bir yaklaşım hazırlanmış olup, farklı enerji depolama, güç üretim sistemleri ve tahrik mimarilerinin nasıl faydalı olabileceği konusunda genel bir rehberlik sağlanmaktadır.

Tablo 22 : Gemi Türlerine Göre Sistem Değerlendirmesi

Gemi Türü	Enerji Depolama Sistemi	Güç Üretim Sistemi	Tahrik Mimarisi
	Bat	FW	SC
Römorkör	+++	++	++
Feribot	+++	+++	+++
Yat	+++	++	+
Balıkçı Gemisi	+++	+	++
Kısa Mesafe Gemisi	++	+	++
Açık Deniz Gemisi	+++	++	++
Yolcu Gemisi	+++	++	+++
OSV	+++	++	+++

Çekici botlar, operasyonel özellikleri nedeniyle yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyar. Genel olarak, çekici botlar büyük gemilerin manevrası sırasında liman bölgesinde çalışır. Bu nedenle, çekici botların çalışma sıklığı, limanın ne kadar yoğun olduğuna bağlıdır ve genel olarak çekici botların görev profili, yardım ettiği geminin manevrasına karşılık gelen kısa süreli yüksek güç piklerini içerir (Kalikatazarakis ve ark. 2018). Elektrik enerjisi depolama, çekici botlar için bu güç talebi piklerini azaltmak ve içten yanmalı motorun gücünü nispeten düşük tutmak için ilginç bir seçenektir. Dizel jeneratörlerin azaltılması ve enerji depolama sistemlerinin (ESS) kullanılması, yakıt tüketimini ve emisyonları iyileştirir; ayrıca, bu botların operasyon konumu limanlara yakın olduğundan, elektrik depolama için kıyı gücü kullanımı, gemi bazlı emisyonlar üzerinde olumlu etkiler sağlar. Bir yandan, hibrit ve batarya destekli endüstriyel olarak kanıtlanmış çekici botlarla, sera gazı emisyonlarında yaklaşık %35'lik bir azalma ve yakıt tüketiminde iyileşme sağlanabilir (Damen 2015). Diğer yandan, bir çekici bot için hibrit dizel-elektrik konseptinin kullanımı üzerine yapılan bir incelemeye göre, şarjın kamu şebekesi kullanılarak yapılması, dizel motorlarla şarj etmeye kıyasla maliyet etkin performans sağlar (Völker 2015). Hibrit güç sistemleri, kritik operasyonlar sırasında güç üretimindeki esneklikleri sayesinde tamamen elektrikli sistemlere kıyasla üstün performans gösterir.

Bu çalışmada, feribotlar hem yolcu hem de araç taşıyan feribotlar olarak değerlendirilmektedir ve denizde veya nehirde çalışabilirler. Tamamen batarya destekli veya hibrit tahrik uzun süredir uygulanmakta olup operasyonları tahmin edilebilir, kısa ve sabit bir rotada neredeyse bir yıl boyunca gerçekleştirilmiştir. Enerji depolama açısından, bataryalar, yüksek enerji depolama kapasiteleri ile diğer alternatiflere kıyasla uygulanabilir seçeneklerdir. Ancak, sınırlı batarya kapasitesi durumunda, batarya yeterli menzili sağlayamıyorsa, bir dizel motor veya yakıt hücresi ile hibritizasyon da bir seçenek olabilir. Batarya ve yakıt hücresi kombinasyonu veya tamamen elektrikli feribotlar, sıfır emisyon ve %100 yakıt tasarrufu için güçlü bir seçenek olarak görülmektedir. Her iki hibrit topoloji, toplam motor odası hacmine ve tahrik tasarımına bağlı olarak kabul edilebilir. Feribotlar için en büyük zorluk, bataryaların şarjı için sınırlı liman konaklama süresidir. Bu nedenle, uzun menzilli operasyonlar için enerji depolama sistemine tamamen güvenmek yerine hibrit güç

üretimi tercih edilmektedir. Endüstriyel bir örnek olarak, MS Color Hybrid feribotu, yolculuğunun bir kısmında sıfır emisyon sağlayan tam batarya gücü seçeneği ile bir plug-in dizel-elektrik hibrit kullanımının temsilcisidir.

Balıkçı gemileri, elektrikli ve hibrit tahrik sistemleri için potansiyel olarak uygundur. Buradaki ana sorun, geminin boyutu ve güç gereksinimleri olup, yalnızca elektrikli ya da seri konfigürasyon mümkün olsa da, yüksek güç ihtiyaçları durumunda hibritleşme daha güçlü bir seçenek olarak öne çıkar. Balıkçı gemilerinin operasyonel profilini göz önünde bulundurursak, bu gemiler ekonomik hızlarda seyahat eder ve balıkçılık, yükleme-boşaltma ya da hazırlık işlemleri sırasında vinç gibi yardımcı ekipmanlar kullanır. Balıkçılık operasyonları sırasında enerji depolama sistemlerinden enerji sağlanması stratejisi, manevralar sırasında yedek enerjinin sağlanmasında önemli bir rol oynayarak emisyonları azaltır ve enerji verimliliğini artırır. Ayrıca, radyal ses ve titreşimlerin azaltılması hibrit ve elektrikli tahrik sistemleri için bir diğer önemli avantajdır. Yenilenebilir enerji kullanımı ise geminin mimari yapısı ve operasyonel profilinden dolayı sınırlı kalmaktadır.

Kısa mesafe deniz taşımacılığı yapan gemiler, küçük konteyner gemileri, bunker gemileri, küçük tankerler ve kıyı sularında ulusal veya kıyısız alanlarda sefer yapan genel kargo gemileridir. Kısa mesafe deniz taşımacılığı, açık deniz taşımacılığına kıyasla daha kısa seferlere ve daha sık liman ziyaretlerine sahiptir. Bu nedenle, kıyı bağlantısı ve ESS (Enerji Depolama Sistemi) şarjı, tümüyle elektrikli ve hibrit tahrik sistemleri için batarya veya diğer enerji depolama cihazlarının kullanımını çekici bir seçenek haline getirmektedir. Diğer taraftan, yükleme-boşaltma ekipmanları (ör. vinçler, yüksek basınçlı hidrolik sistemler) ve diğer elektrik yükleri (navigasyon, HVAC vb.), toplam gemi güç kapasitesinde önemli tüketiciler olarak öne çıkar. Bu nedenle, dizel jeneratörler yerine bataryalar seyir veya liman sırasında gereken güç talebini sağlayabilir. Kısa mesafe deniz taşımacılığında hibrit ESS'li yakıt hücreleri de kullanılabilir ve bu durumda sıfır emisyon özellikle iç su yollarında ulaşılabilir hale gelir. Paralel ve seri hibrit tahrik konfigürasyonları bu gemilerde güvenilir bir çözüm olarak kullanılabilir.

Okyanus aşırı gemiler için enerji depolama mevcut teknoloji ile oldukça zorlu bir gereksinim olup, uzun ve sabit seyirler ile yüksek enerji gereksinimlerinden dolayı ticari açıdan yakın gelecekte uygulanabilir görünmemektedir. Bununla birlikte, belirli operasyonel koşullarda hibrit güç üretim ve tahrik sistemlerinin uygulanabilir olduğu belirtilmektedir (Dedes ve diğerleri, 2016). Yakıt hücreleri ve yenilenebilir enerji kaynakları, derin deniz taşımacılığında uygulanabilir alternatifler olarak öne çıkmaktadır. İçten yanmalı motorlar (ICE) ve yakıt hücrelerinde alternatif yakıtların ya da yenilenebilir enerjinin kullanımı, emisyon azaltımı için önemli bir etken olarak görülmektedir. Her iki sistemin hibridizasyonu, özellikle sabit seyir hızlarına sahip sürekli yolculuklar için çekici bir çözüm sunmaktadır. Hibrit ve paralel konfigürasyonlar, güvenilirlik ve alternatif tahrik seçenekleri (örneğin mekanik veya elektriksel sürüş) anlamında büyük avantajlar sunmaktadır. Ayrıca hibrit ve elektrikli tahrik sistemleri, geminin komutlara hızlı tepki vererek manevra kapasitesini ve verimliliğini artırmaktadır.

2.4. Günümüzde Gemilerde Kullanılan Gemi Tahrik Sistemleri

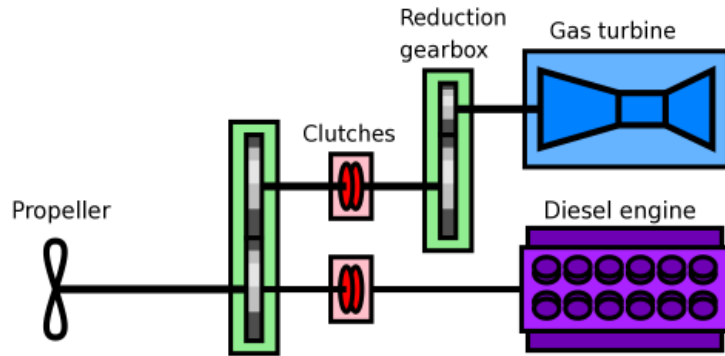
Gemi tahrik sistemi; Geminin hareketi için gerekli olan sevk gücü emniyetli, güvenilir ve yeterli bir şekilde sağlayan, birçok ana ekipmanın birleşiminden oluşan entegre bir sistemdir. Gemi tahrikli sistemler, denizcilik işlemlerinde kritik bir rol oynar ve bu sistemlerin etkinliği, gemilerin güvenliği ve verimlilik açısından büyük önem taşır. Gemi tahrik sistemleri genel olarak iki ana kategoriye ayrılır: mekanik tahrik sistemleri ve elektrikli tahrik sistemleri. Mekanik tahrikli sistemler genellikle dizel veya ağır yakıtlı motorlar ile çalıştırılırken, elektrikli tahrikli sistemler elektrik motorları ve enerji depolama sistemleri ile çalışır. Mekanik tahrikli sistemler, gemilerin geleneksel güç kaynaklarıdır ve genellikle yüksek güç çıkışı sunarlar. Bu sistemler dizel motorlar boyunca çalışır ve genellikle daha düşük yakıt maliyetleri ile birleştirilir. Ancak bu sistemlerin olumsuz etkileri, özellikle emisyon salımıdır (Kaya ve Yılmaz, 2018). Ayrıca mekanik sistemler, bakım sistemleri ve arıza durumlarında daha fazla sorun yaratma potansiyeline sahiptir (Yıldırım ve Demir, 2021). Bununla birlikte, elektrikli tahrikli sistemler daha az ses ve seçim ile gemilerin konforunu artırmaktadır (Çelik ve Aydın, 2020). Elektrikli sistemler, ayrılabilir enerji kaynakları ile entegre edilebilme

potansiyeline sahip olmaları nedeniyle sürdürülebilirlik açısından da avantaj sağlamaktadır (Öztürk ve Şahin, 2019).

2.4.1. Kombine Dizel veya Gaz (CODOG)

CODOG (Combined Diesel or Gas) tahrik sistemi, denizcilik alanında önemli bir yer tutan hibrit bir güç ortamına sahiptir. Bu sistem, hem dizel motorların hem de gaz türbinlerinin avantajlarını bir araya getirerek gemilerin donanımını arttırmayı hedefler. CODOG sisteminin temel bileşenleri motorlar ve gaz türbinleridir. Bu parçaların optimal bir şekilde eşleştirilmesi, geminin verimliliği ve performans açısından kritik öneme sahiptir (IMarEST, 2020). CODOG sisteminin en önemli kadrosundan biri, farklı çalışma koşullarına göre geminin gücüne uygun güç sağlamasıdır. Dizel motorlar düşük hızlarda yüksek tork sağlarken, gaz türbinleri yüksek hızlarda daha verimli çalışmaktadır. Bu nedenle CODOG sistemi, geminin hız ve tork sınırlarına göre uygun güç seçenekleri sunmaktadır (Wang vd., 2018). Ayrıca CODOG sistemleri, enerji tüketimi ve emisyonların azaltılması amacıyla tasarlanmıştır. Bu bağlamda, CODOG sonuçlarının performans analizi, pervane, gemi gövdesi ve motor arasındaki uyumun sürdürülebilirliği önemlidir (Wang vd., 2018; Zhang vd., 2019).

Sonuç olarak, CODOG tahrik sistemi, denizcilik sektöründe önemli bir alternatif güç kaynağı olarak öne çıkıyor. Dizel motorlar ve gaz türbinlerinin çeşitleri, gemilerin miktarının artırılması ve genişleme potansiyellerini geliştirme imkanı sunulmaktadır.

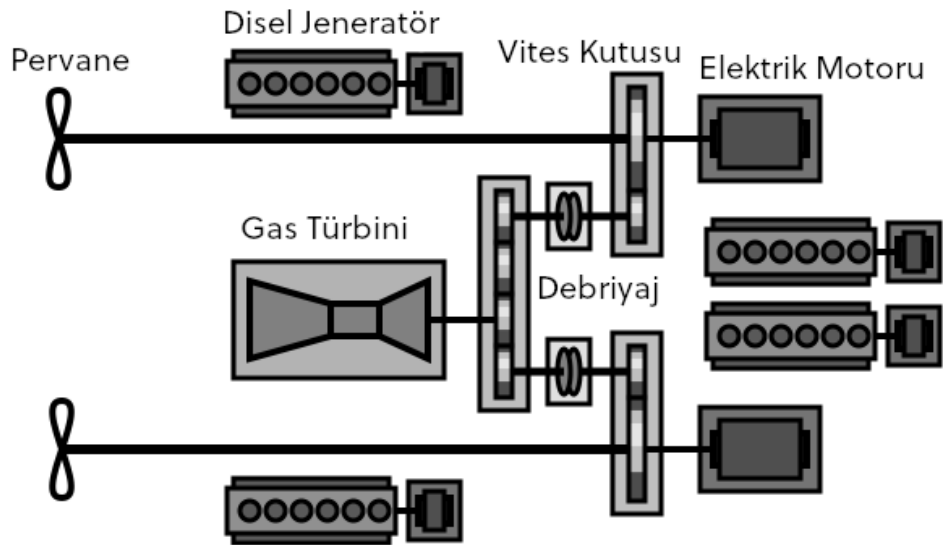


Şekil 1 : Combined Diesel or Gas (CODOG)

2.4.2. Kombine Dizel Elektrik ve Gaz (CODLAG)

CODLAG (Combined Diesel Electric and Gas) destekli sistem, denizcilik uygulamaları giderek daha fazla tercih edilen bir hibrit güç sistemidir. Bu sistem, dizel jeneratörler ve gaz türbinlerinin bir arada kullanılmasıyla gemilerin enerji aralığını artırmaktadır. CODLAG sisteminin temel bileşenleri, dizel motorlar tarafından üretilen elektrik enerjisi ile çalışan elektrik motorları ve gaz türbinleridir. Bu sistem, geminin farklı hız ve yük koşullarında optimum performans sergilemesini sağlar (Kovačić ve Vukić, 2020; Vukić vd., 2018). CODLAG sisteminden en önemli çekirdeklerden biri, enerji kesintilerinin artmasıdır. Dizel jeneratörler düşük yük altında yüksek verim sağlarken, gaz türbinleri yüksek hızlarda daha güçlü çalışmaktadır (Vukić vd., 2018). Ayrıca CODLAG sistemleri emisyonları azaltma potansiyeline sahip olup sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sağlamaktadır (Zhang vd., 2023).

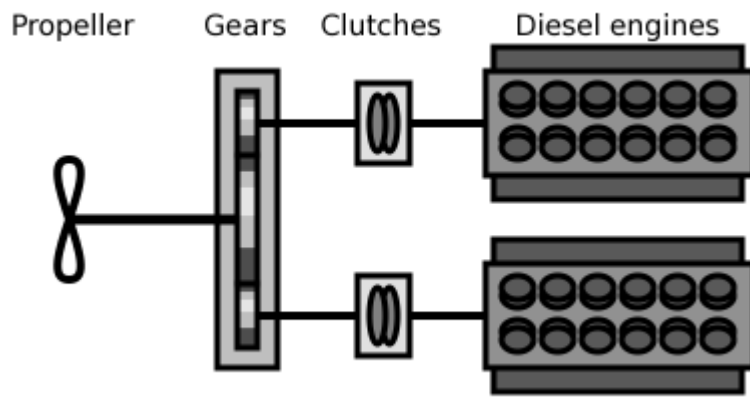
Sonuç olarak, CODLAG tahrik sistemi, denizcilik sektöründe önemli bir alternatif güç kaynağı olarak öne çıkıyor. Dizel ve gaz türbinlerinin birleşimi, gemilerin çoğalmasını artırma ve genişleme potansiyellerini geliştirme imkanı sunmaktadır.



Şekil 2 : Combined Diesel Electric and Gas (CODLAG)

2.4.3. Kombine Dizel ve Dizel (CODAD)

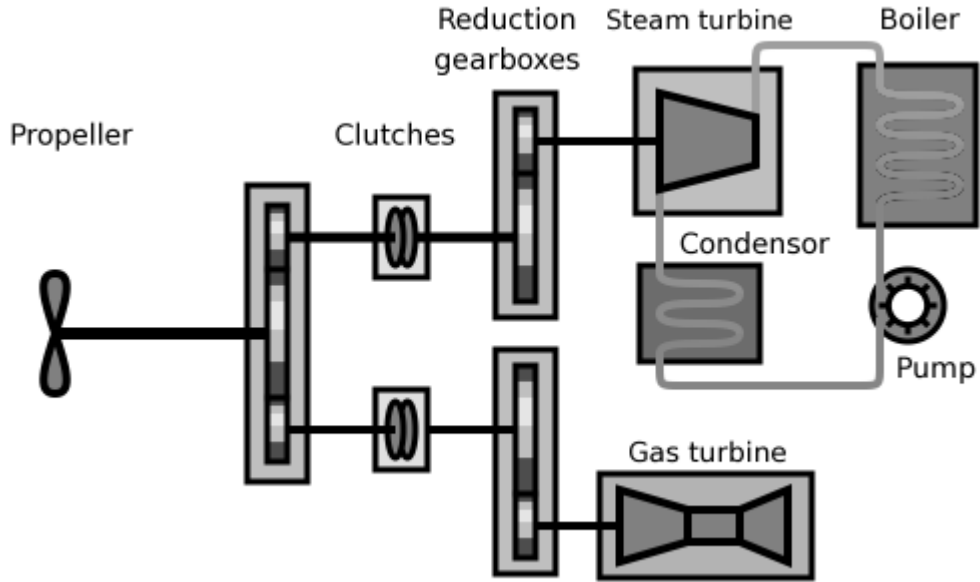
CODAD (Combined Diesel and Diesel) tahrik sistemi, gemilerin bölümlerinin genişliği ve bölümün artırılması için birden fazla dizel motor kullanan önemli bir deniz mühendisliği çözümüdür. Bu sistem, güvenilir, yakıt verimliliği ve çalıştırılması nedeniyle finansal ve ticari gemiler için özellikle avantajlıdır. CODAD sistemi, genellikle geminin özelliklerine bağlı olarak bağımsız veya birlikte çalışabilen iki veya daha fazla dizel motordan oluşur. Bu işletim, güç yönetimi önemli bir çok yönlülük sağlayarak geminin hızı ve görev profiline göre yakıt tüketiminin optimize edilmesini sağlar. Örneğin, düşük hızlı çalışma sırasında, özgül yakıt tüketimi (SFC) ve bir motor mevcutken, her iki motorun da çalıştırılabilmesi için daha yüksek hızlarda gerekli olması sağlanır (Wang ve diğerleri, 2011). CODAD sisteminin temel personelinin biri yüksek verimliliklidir. Dizel motorlar, gaz türbinleri ve diğer motor türlerine kıyasla yakıt verimlilikleriyle bilinmektedir. Birden fazla motor çalıştırma yeteneği, daha iyi yakıt yönetimi sağlar ve daha düşük oranlarda yol açılabilir (Zhang vd., 2020). Ayrıca, birden fazla motora sahip olmanın yedeklilik, destekli sistemin dayanıklılığını artırarak bir motor arızalansa bile geminin çalışmasının devam etmesini sağlar (Wang ve diğerleri, 2011). CODAD sistemi ayrıca çeşitli modülleri destekleyerek gemilerin görev özelliklerine göre farklı güç ayarları arasında geçiş yapılmasına olanak sağlar.



Şekil 3 : Combined Diesel and Diesel (CODAD)

2.4.4. Kombine Buhar ve Gaz (COSAG)

COSAG (Combined Steam and Gas) sistemi, verimlilik artışı ve emisyonların azaltılması için hem gaz hem de buhar türbinlerini entegre eden gelişmiş bir güç üretimini temsil eder. Bu hibrit sistem, gaz türbininden gelen atık ısıyı buhar üretimi için kullanır ve bu buharlı bir buhar türbinini çalıştırır. Böylece yakıttan enerji çıkarımı en üst düzeyde çıkarılır. COSAG verimliliği %60'a kadar ulaşılabilir ve geleneksel güç üretim yöntemleri önemli ölçüde aşılabılır. Bu, gaz türbininden gelen egzoz ısını yakalayan ve buhar türbini için buhara dönüştürülen bir Isı Geri Kazanım Buhar Jeneratörü (HRSG) aracılığıyla atık ısının etkili bir şekilde kazanılmasından geri kazanılmasındandır (Zhang vd., 2023; Wang vd., 2010).

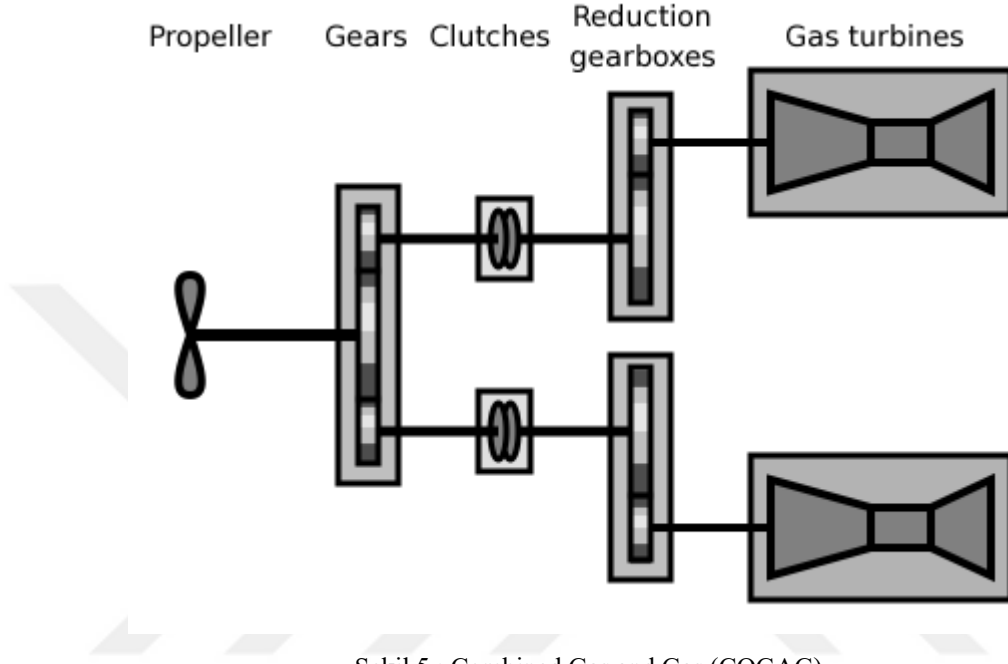


Şekil 4 : Combined Steam and Gas (COSAG)

2.4.5. Kombine Gaz ve Gaz (COGAG)

COGAG(Combined Gas and Gas) tahrik sistemi, deniz ve ticari gemilerin bölümleri ve kapsamının artırılması için birden fazla gaz türbini kullanan geliştirilmiş bir deniz teknolojisidir. Bu sistem, yüksek güç yoğunluğu, mükemmel manevra kapasitesi ve kapasitesi nedeniyle özellikle kapasitesidir. Geminin özelliklerine bağlı olarak veya bağımsız olarak birlikte çalışabilen iki veya daha fazla gaz türbininden oluşur. Bu konfigürasyon, güç yönetimi önemli bir çok yönlülük sağlayarak geminin hız ve görev

profiline göre yakıt tüketiminin optimize edilmesini sağlar. Örneğin, düşük çalışma sırasında yakıt tüketimi ve bir türbinin indirilmesi için bir türbin mevcutken, onun iki türbininin satın alınması için daha yüksek hızlarda gerekliliği sağlamak (Wang ve diğerleri, 2021; Zhang ve diğerleri, 2018).



Şekil 5 : Combined Gas and Gas (COGAG)

BÖLÜM 3. METERYAL VE METOD

AVL Cruise M, otomotiv mühendisliği ve enerji sistemleri alanında kullanılan, geliştirilmiş bir simülasyon ve analiz yazılımıdır. Bu yazılım, özellikle araç dinamikleri, güç dağıtım organları, enerji tüketimi ve emisyon analizi gibi genel kapsamlı temizlemeler yapma imkanı sunar.

AVL Cruise M, hem içten yanmalı motorlar hem de elektrikli ve hibrit araçlar için tasarım ve değişim süreçlerini barındırıyor. Bu çalışma, AVL Cruise M programının temel özelliklerini, uygulama aralıklarını ve ayrıntılarını ayrıntılı bir şekilde incelemeyi sağlamaktadır.

3.1. Temel Özellikleri

3.1.1. Modüler Yapı

AVL Cruise M, hibrit test sonuçlarının modellenmesi ve değiştirilmesi için güçlü bir araç olarak modüler bir yapı sunmaktadır. Bu modüler yapı, kullanıcıların sistem tasarımını ve analizini daha esnek ve özel olarak bir şekilde gerçekleştirmesine olanak tanır. Modüler yapı, farklı birimler ve alt sistemlerin bağımsız olarak modellenmesine ve daha sonra bu birimlerin bir araya getirilmesiyle bütünsel sistem bir simülasyonu sağlayan olanak tanınır (Taheri, 2014).

Bu yaklaşım, özellikle hibrit tahrikli sistemler gibi karmaşık ve çok disiplinli sistemlerin modellenmesinde büyük avantaj sağlar. Hibrit destekli sistemler, içten yanmalı motorlar, elektrik motorları, bataryalar, güç elektroniği ve kontrol sistemleri gibi birden fazla alt sistemin entegrasyonunu gerektirir. AVL Cruise M'nin modüler

yapısı, bu alt sistemlerin her birinin ayrı ayrı modellenmesine ve ardından sistemin genel olarak analiz edilmesi için birleştirilmesine olanak sağlar. Modüler yapı, aşağıdaki kişileri sunar (Talluri VD., 2016):

- **Esneklik:** Kullanıcılar, sistemin yapısına göre farklı modüllerin katmanlarını ve özelleştirilebilir. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, batarya yönetim sistemi veya elektrik motoru gibi belirli bir şekilde yoğunlaştırılmak mümkündür.
- **Yeniden Kullanılabilirlik:** Modüler yapı sayesinde, bir seferde bir model veya alt sistem, farklı projelerde tekrar kullanılabilir. Bu, süreç sürecini hızlandırır ve maliyetleri azaltır.
- **Hata İzolasyonu:** Modüler yapı, sistemdeki hataların daha kolay monte edilmesini sağlar. Her bir modül bağımsız olarak test edilebilir ve optimize edilebilir.
- **Kolay Entegrasyon:** Farklı disiplinlerden gelen mühendislik birimleri, kendi bünyesinde yoğunlaşarak modüller geliştirilebilir ve bu modüller daha sonra entegre edilebilir.

AVL Cruise M'nin modüler yapısı, kullanıcıların sistem dinamiklerini daha iyi anlamalarına ve optimize etmelerine olanak tanır. Örneğin, bir gemi hibrit motivasyon sistemi, enerji yönetim sisteminin katılım oranları için batarya, elektrik motoru ve içten yanmalı motor modülleri bir araya getirilebilir. Bu modüller, sistemin enerji üretimi, emisyonlarını ve genel olarak analiz etmek için birlikte çalışır (Tandekar, 2019).

Sonuç olarak, AVL Cruise M'nin modüler yapısı, hibrit elde edilen sonuçların modellenmesi ve iyileştirilmesi için güçlü bir temel sağlar. Bu yapı, kullanıcıların karmaşık sistemlerini daha iyi anlamalarına, optimize etmelerine ve çözüm odaklı geliştirmelerine olanak sağlar.

3.1.2. Gerçek Zamanlı Simülasyon

Gerçek zamanlı simülasyon, karmaşık sistemlerin dinamik gecikmeleri olarak analiz etme ve değerlendirme imkanı sunan bir teknolojidir. AVL Cruise M gibi ileri düzey sistem yazılımları, gerçek zamanlı programlama kapasitesi ile donatılmış olup, özellikle hibrit testlerin modellenmesi ve analizlerinde önemli avantajlar sağlar. Bu özellik, sistemin farklı çalışma koşullarında nasıl performans gösterdiğini, hızlı bir şekilde analiz etme olanağı tanımasını ve tasarım sürecini, zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Gerçek zamanlı hesaplamanın temel saatleri (Tandekar, 2019):

- **Hızlı Karar Alma:** Gerçek zamanlı simülasyon, sistemde anlık reaksiyonlarını analiz ederek tasarım sürecini hızlı kararların hazırlanmasını sağlar. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi enerji yönetimi değiştirmenin performansı, gerçek zamanlı olarak test sonuçları optimize edilebilir.
- **Donanım-İçerikli Simülasyon (Hardware-in-the-Loop - HIL):** Gerçek zamanlı simülasyon, fiziksel donanımın (örnek, bir elektrik motoru kontrol ünitesi) sanal bir modelle entegre çalıştırma olanaklarını sunar. Bu, sistemin gerçek çalışma koşullarını nasıl göstereceğini test etmek için kritik bir araçtır. HIL simülasyonları, özellikle kontrol büyümelerinin doğrulanması ve değerlendirilmesi için kullanılır.
- **Sistem Entegrasyonu ve Test:** Gerçek zamanlı simülasyon, farklı alt sistemlerin (örneğin, batarya, elektrik motoru, içten yanmalı motor) entegrasyonunu ve bu sistemlerin birlikte nasıl çalıştırıldığını test etmek için kullanılır. Bu, sistemin genel bakış açısı ve olası sorunların erken aşamada tespit edilmesi için önemlidir.
- **Eğitim ve Operasyonel Destek:** Gerçek zamanlı çalıştırma, operatörlerin karmaşık sistemleri anlamalarına ve bu sistemlerin daha etkili bir şekilde kullanılmasına yardımcı olmak için eğitim amaçlı kullanılabilir. Örneğin, bir

gemi kaptanı veya mühendis, hibrit destekli sistem farklı çalışma modlarını gerçek zamanlı olarak deneyimleyebilir.

AVL Cruise M'nin gerçek zamanlı kalibrasyon kapasitesi, hibrit test sonuçlarının modellenmesi ve analizi için güçlü bir araçtır. Bu özellik, kullanıcıların sistemin dinamik sürelerini anlık olarak gözlemlemelerine ve optimize etmelerine olanak tanır. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, enerji tüketimi, emisyonlar ve performans gibi kritik etki gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve analiz edilebilir. Bu, tasarım sürecinin daha hızlı ve etkili ilerlemelerin kaydedilmesini sağlar.

Gerçek zamanlı simülasyon, aynı zamanda sistemin verimliliğini artırmak için kullanılır. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, farklı çalışma senaryoları gerçek zamanlı olarak test edilerek sistemlerin olası arızalara karşı analizleri değerlendirilebilir. Bu, sistemin verimliliğini artırmak ve risklerini azaltmak için kritik bir adımdır (Tang, 2019).

Sonuç olarak, gerçek zamanlı kalibrasyon, hibrit sonuçların modellenmesi ve analizi için vazgeçilmez bir araçtır. AVL Cruise M'nin bu özelliği, kullanıcıların karmaşık sistemlerini daha iyi anlamalarına, optimize etmelerine ve gelişmiş çözümler geliştirmelerine olanak tanır.

3.1.3. Gelişmiş Modelleme Araçları

AVL Cruise M, hibrit test sonuçlarının modellenmesi ve simülasyonu için özet ve gelişmiş yazılım araçları sunmaktadır. Bu araçların, karmaşık sistemlerin ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi ve optimize edilmesi olanaklarını tanır. Özellikle gemi hibrit tahrikli sistemler gibi çok disiplinli ve entegre sistemlerin modellenmesinde, bu araçların sistemlerinin her bir parçasını ayrıntılı bir şekilde incelemesine ve değerlendirmesine olanak sağlar. Gelişmiş programların temel özellikleri şunlardır (Tarelko ve Rudzki, 2020):

- **Kapsamlı Bileşen Kütüphanesi:** AVL Cruise M, içten yanmalı motorlar, elektrik motorları, bataryalar, jeneratörler, güç elektroniği bileşenleri ve kontrol sistemleri gibi geniş bir üretici kütüphanesi sunar. Bu sistem, kullanıcıların hibrit sonuçlarının bir alt sistemi ayrıntılı bir şekilde bölümlerine olanak tanır. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik işlemleri, elektrik motorunun verim eğrileri, batarya şarj-deşarj dinamikleri ve içten yanmalı motor yakıt tüketimi haritaları gibi detaylı bir şekilde modellenenebilir.
- **Parametrik Modelleme:** AVL Cruise M, kullanıcıların sistemlerini parametrik olarak tanımlamalarına olanak tanır. Bu, farklı tasarım senaryolarının hızlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Örneğin bir gemi hibrit tahrik sistemi, farklı batarya kapasiteleri veya motor güçleri için performans analizleri yapılabilir.
- **Çok Disiplinli Entegrasyon:** AVL Cruise M, mekanik, elektrik, termal ve kontrol sistemlerini bir arada modelleme yoluyla çok disiplinli bir yaklaşım sunar. Bu, hibrit test sonuçlarının tüm çalışma modlarının (örneğin, yalnızca elektrikli sürüş, hibrit mod, jeneratör modu) ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi olanaklarını tanır.
- **Dinamik Simülasyon:** Gelişmiş yazılım programları, sistemin dinamik performanslarını analiz etmek için kullanılabilir. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, hızlanma, yavaşlama veya yük değişikliği gibi dinamik koşullar altında sistem performansı değerlendirilebilir.
- **Enerji Yönetim Stratejilerinin Modellenmesi:** AVL Cruise M, hibrit sistemlerde enerji yönetiminin modellenmesi ve bölünmesi için özel araçlar sunar. Bu, sistemin enerji tüketimini artırmak ve emisyonları azaltmak için kritik bir adımdır. Örneğin, bir gemi hibrit motivasyon sistemi, batarya kullanımını optimize eden bir enerji yönetim stratejisi geliştirilebilir ve bu stratejinin performansı simülasyonlarla test edilebilir.

- **Kullanıcı Dostu Arayüz:** AVL Cruise M, kullanıcıların karmaşık sistemlerini kolayca çeşitliliğine olanak sağlayan kapsamlı bir katalog sunar. Bu, özellikle farklı disiplinlerden gelen mühendislerin iş birliği içinde olabirler.

Gelişmiş program araçları, hibrit test sonuçları tasarımı ve analiz süreçlerini hızlandırır ve optimize eder. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, motor, jeneratör, batarya ve güç elektroniği bileşenlerinin birlikte nasıl çalışılabileceği için bu araçlar kullanılabilir. Ayrıca sistemin enerji verimliliği, emisyonları ve genel performans gibi kritik etki ayrıntılı bir şekilde analiz edilebilir.

Sonuç olarak, AVL Cruise M'nin sunduğu gelişmiş ürün araçları, hibrit elde edilen sonuçların modellenmesi ve simülasyonu için güçlü bir temel sağlar. Bu araçları, kullanıcıların karmaşık sistemlerini daha iyi anlamalarına, optimize etmelerine ve çözüm odaklı geliştirmelerine olanak sağlar. Özellikle gemi hibrit tahrik sistemleri gibi büyük farklılıklar ve karmaşık uygulamalarda, bu araçların tasarım sürecinde önemli bir rol oynar.

3.1.4. Enerji Tüketimi ve Emisyon Analizi

Enerji tüketimi ve emisyon analizi, hibrit güç verimi tasarımı ve genişlemelerde kritik bir rol oynamaktadır. AVL Cruise M, bu alanda kapsamlı analiz araçları sunarak, kullanıcıların enerji miktarını artırmasına ve zenginlik etkilerini en az indirmesine olanak tanır. Özellikle gemi hibrit destekli sistemler gibi büyük değişim ve enerji yoğun uygulamalarda, enerji tüketimi ve emisyonların doğru bir şekilde ortaya çıkması, hem ekonomik hem de sürdürülebilirlik açısından büyük bir toplayıcıya sahiptir (Tarelko ve Rudzki, 2020).

Günümüzde denizcilik sektöründe enerji tüketimi ve emisyonlar, uluslararası örgütler ve odaklanma kaygıları nedeniyle daha fazla dikkat çekiliyor. Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) 2020'de kişisel olarak belirlediği kükürt emisyon çevreleri ve 2050 yılına kadar karbon emisyonlarını %50 oranında azaltma hedefi, gemi tasarımcılarını ve işletmecilerini daha çevre dostu teknolojilere yönlendirmiştir. AVL Cruise M, bu

hedefe ulaşmak için enerji tüketimi ve emisyon analizlerini destekleyen güçlü bir platform sunmaktadır. Enerji tüketimi ve emisyon analizinin temel özellikleri ortaya çıkar (Tarelko ve Rudzki, 2020):

- **Detaylı Enerji Akışı Analizi:** AVL Cruise M, hibrit sistemlerdeki enerji ölçümlerini ayrıntılı bir şekilde analiz eder. Bu, sistemin farklı bileşenleri (içten yanmalı motor, elektrik motoru, batarya) arasındaki enerji aktarımını ve kayıplarını anlamak için kritik bir araçtır. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, enerji tüketimi farklı çalışma modları (yalnızca elektrikli sürüş, hibrit mod, jeneratör modülü) için analiz edilebilir.
- **Emisyon Hesaplamaları:** AVL Cruise M, içten yanmalı motorların emisyonlarını (CO_2 , NO_x , SO_x ve sağlıklı madde gibi) programlamak için gelişmiş modeller sunar. Bu, gemi hibrit ürün veriminin artışı ve emisyonları azaltmak için stratejiler yaygınlaşmak için kullanılır. Örneğin, düşük yük koşullarında motorun verimini artırmak veya elektrikli sürüş modunu optimize etmek gibi çözümlerle simülasyonlarla test edilebilir.
- **Farklı Çalışma Senaryolarının Analizi:** AVL Cruise M, gemi hibrit test sonuçları farklı senaryolar altında enerji tüketimi ve emisyon birimleri analiz etme yeteneğine sahiptir. Örneğin, bir geminin liman manevraları sırasında yalnızca elektrikli sürüş modu çalışması veya açık denizde hibrit mod çalışması gibi senaryolar değerlendirilebilir.
- **Optimizasyon Araçları:** AVL Cruise M, enerji tüketimi ve emisyonları optimize etmek için kullanıcıların farklı tasarımlara izin vermesini sağlar. Örneğin, batarya kapasitesinin değişebileceği, motor birimlerinin değişebileceği veya enerji yönetim sistemlerinin optimize edilmesi gibi sistemin sistem üzerindeki etkileri analiz edilebilir.
- **Uluslararası Düzenlemelere Uyum:** AVL Cruise M, IMO'nun EEDI (Energy Efficiency Design Index) ve EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index)

gibi düzenlemelerine uygun analizler yapabilir. Bu, gemi tasarımcılarının ve işletmecilerinin uluslararası düzeyde bölünmesine uyum sağlanmasına yardımcı olur.

Enerji tüketimi ve emisyon analizinin önemi, özellikle denizcilik sektöründe artan kaygılar ve süreçlerin göz önünde gösterilmesi daha da belirgin hale geldi. AVL Cruise M'nin bu alandaki kapasitesi, kullanıcıların enerji miktarını artırmasına, emisyonlarının azalmasına ve sürdürülebilirliğin sürdürülebilir olmasına yardımcı olur.

Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, enerji tüketimi ve emisyon analizleri, sistemin farklı çalışma modları için optimize edilmesi mümkündür. Elektrikli sürüş modunun liman operasyonlarında kullanılması, emisyonları önemli ölçüde genişlerken, hibrit modun açık deniz operasyonlarında enerji aralığını artırabileceği gösterilebilir. Bu tür analizler, hem ekonomik hem de flaş faydalar sağlayarak, gemi tasarımcılarının ve işletmelerinin daha sürdürülebilir çözümler geliştirmesine olanak sağladığını biliyor. Sonuç olarak, AVL Cruise M'nin enerji tüketimi ve emisyon analizi araçları, hibrit ürün testleri ve ekonomik yapıyı optimize etmek için güçlü bir temel sağlar. Bu özellik, kullanıcıların enerji verimliliğinin artırılmasına, emisyonların azaltılmasına ve uluslararası düzenlemelere uyum sağlanmasına yardımcı olarak, denizcilik sektöründe sürdürülebilir bir iyileşmeye katkıda bulunmaktadır.

3.2. Uygulama Alanları

AVL Cruise M, hibrit test sonuçlarının modellenmesi ve değişimi için geniş bir uygulama yelpazesi sunan güçlü bir yazılımdır. Bu yazılım, denizcilik sektöründe hibrit performans tasarımı, analiz ve sıralı kullanımın kullanımının yanı sıra, kara araçları ve diğer taşıma sistemleri için kapsamlı çözümler sunmaktadır. AVL Cruise M'nin uygulama alanları, enerji verimliliği, performans analizi, emisyon azaltma ve güç dağıtım organlarının tasarımı gibi çok çeşitli elektrik problemlerini içermektedir. Aşağıda yazılımın temel uygulama alanları detaylı bir şekilde açıklanmıştır:

Araç Performans Analizi

AVL Cruise M, genel olarak genel analizleri yapmak için kapsamlı araçlar sunar. Bu analizler, gemilerde hibrit sonuç sonuçları farklı çalışma modlarındaki değerlendirmeleri için kullanılabilir. Örneğin, bir geminin hızlanması, yavaşlama ve manevra kabiliyeti gibi dinamik performans performansı, yazılımın sunduğu araçlarla ayrıntılı bir şekilde analiz edilebilir. Bu, gemi tasarımcılarının ve mühendislerinin sistemlerini optimize etme olanaklarını tanıır (Tarelko ve Rudzki, 2020).

Araçların hızlanma, frenleme, yol tutuşu gibi performans değerlendirilmesi

AVL Cruise M, araçların hızlanması, frenleme ve yol tutuşu gibi dinamik değerleri analiz etmek için kullanılabilir. Denizcilik sektöründe, bu özelliklerin gemilerin manevra kabiliyetine ve kapsama alanı açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin, bir geminin liman manevraları sırasında hızlanma ve yavaşlama performansı, hibrit tahrikli sistemin farklı modları altında analiz edilebilir (Thomson, 2015).

Güç Güç Aktarma Organları Tasarımı

AVL Cruise M, hibrit test sonuçları güç alternatif organlarının tasarımı ve çeşitliliği için güçlü bir platform sunar. Bu, içten yanmalı motorlar, elektrik motorları, jeneratörler, bataryalar ve güç elektroniği bileşenlerinin tasarımını ve entegrasyonunu içerir. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, motor ve jeneratör arasındaki enerji dağılımının optimize edilmesi sistemi genel verimliliği artırılabilir (Thomson, 2015).

Motor ve Verim Analizleri ile Performans Değerlendirmesi

AVL Cruise M, motorların verim analizleri ve performans değerlendirmeleri için kapsamlı araçlar sunar. Bu, içten yanmalı motorların yakıt tüketimini, emisyonlarını ve verimlilik haritalarının analizlerini içerir. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, motorun farklı yük ve hız koşullarındaki performansı analiz edilerek enerji verimliliği ve emisyon azaltılması için optimize edilebilir.

Hibrit ve Elektrikli Araç Geliştirme

AVL Cruise M, hibrit ve elektrikli araçların başlatılması için özel olarak tasarlanmış araçlar sunar. Bu, hibrit enerji yönetiminin değiştirilmesini ve optimize edilmesini içerir. Örneğin, bir gemi hibrit motivasyon sistemi, batarya kullanımını optimize eden bir enerji yönetim stratejisi geliştirilebilir ve bu stratejinin performansı simülasyonlarla test edilebilir (Thomson, 2015).

Elektrikli ve Hibrit Araçların Enerji Yönetimi ve Performans Optimizasyonları

AVL Cruise M, elektrikli ve hibrit araçlar enerji yönetimi ve performans analizi için kapsamlı araçlar sunar. Bu, enerji depolama verimi (örnek, bataryalar) ve enerji dönüşüm sonuçları (örnek, jeneratörler ve elektrik motorları) içeriğini optimize etmeyi içerir. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik performansı, batarya şarj-deşarj döngüleri optimize edilerek sistemin enerji verimliliği artırılabilir.

Emisyon ve Enerji Tüketimi Analizleri

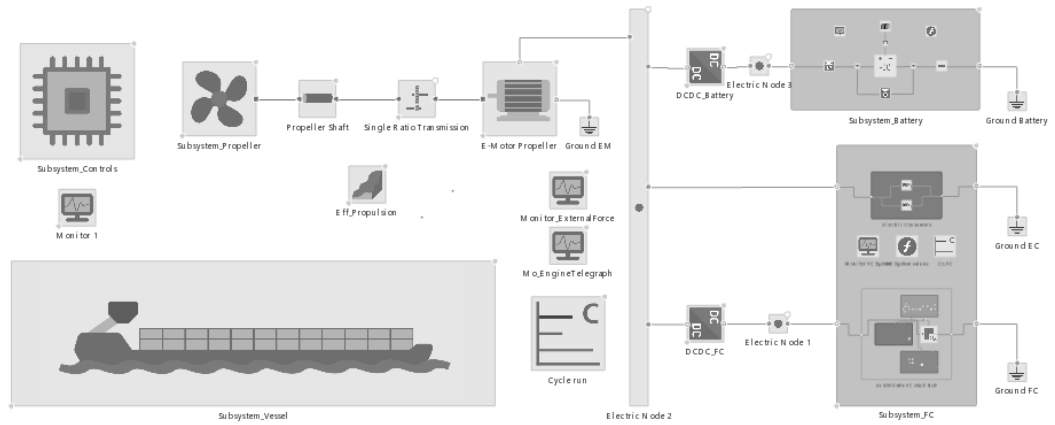
AVL Cruise M, emisyon ve enerji tüketimi analizleri için gelişmiş araçlar sunar. Bu, hibrit performans değerlerinin göstergeleri ve optimize etmek için kritik bir araçtır. Örneğin, bir gemi hibrit motivasyon sistemi, farklı çalışma modları için enerji tüketimi ve emisyonlar analiz edilebilir, sistemin performansı optimize edilebilir (Thomson, 2015).

Araçların patlama etkilerinin değerlendirilmesi ve emisyon salınımına uyum sıcaklığı

AVL Cruise M, araçların patlama sonuçlarının değerlendirilmesi ve emisyon salınımına uyum sıcaklığı gibi özel analizler için de kullanılabilir. Bu, özellikle içten yanmalı motorların yanmalarının analiz edilmesi ve optimize edilmesi için önemlidir. Örneğin, bir gemi hibrit tahrik sistemi, motorun yanma süreci optimize edilerek üretilen emisyonlar azaltılabilir ve sistemin performansı artırılabilir.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Aşağıdaki şekilde, bir gemide hibrit tahrik sisteminin AVL CRUISE M yazılımı kullanılarak modellenmiş hali gösterilmektedir. Bu model, elektrikli ve geleneksel tahrik bileşenlerinin birlikte çalıştığı bir hibrit sevk sistemini temsil etmektedir. Modelde ana sistem bileşenleri alt sistemler hâlinde gruplanmış olup, sistemin işleyişi enerji akışı ve kontrol sinyalleri ile gösterilmiştir.



Şekil 6: AVL CRUISE M Gemi Modeli

4.1. Alt Sistemler

Model, aşağıdaki alt sistem bileşenlerinden oluşmaktadır:

- **Subsystem_Controls:** Gemi sevk sisteminin çalışmasını yöneten kontrol algoritmalarını ve mantığını içermektedir. Bu blok, hız, yük ve güç taleplerine göre sistem bileşenlerini koordine eder.

- **Subsystem_Propeller ve Propeller Shaft:** Pervane ve tahrik milini temsil eder. Elektrik motorundan gelen mekanik gücü suya ileterek itki sağlar.
- **Single Ratio Transmission:** Elektrik motoru ile pervane arasında sabit oranlı bir aktarma organıdır. Motor çıkış torkunu pervaneye iletir.
- **E-Motor Propeller:** Pervaneyi doğrudan tahrik eden elektrik motorudur. Bu motor, batarya veya yakıt hücresinden gelen elektrik enerjisini mekanik güce dönüştürür.
- **Subsystem_Battery:** Yüksek gerilimli elektrik enerjisi sağlar ve DCDC dönüştürücü ile sisteme bağlanır.
- **Subsystem_FC:** Yakıt hücresi alt sistemi, hidrojen yakıtını kullanarak elektrik üretir. DCDC dönüştürücü ile sisteme bağlanır. Böylece batarya desteğiyle birlikte elektrik motorunu besleyebilir.
- **Electric Node 1 & 2:** Elektrik düğüm noktaları, sistemdeki enerji dağıtımını kontrol eder. Elektriksel bağlantıların birleştiği ve yönlendirildiği noktaları temsil eder.
- **Cycle Run & Monitorlar:** Sistemin çalışmasını izleyen ve verileri kaydeden birimlerdir. Hız, tork, güç ve dış kuvvet gibi parametreleri gözlemlemeye yarar.

4.2. Enerji Akışı

Enerji üretimi ve tüketimi şu şekilde gerçekleşmektedir:

- Yakıt hücresi ve batarya, DCDC dönüştürücüler üzerinden sistemin elektrik ağına bağlanmaktadır.

- Kontrol sistemi, yük talebine göre yakıt hücresi ve batarya kullanım oranlarını belirler.
- Elektrik motoru, bu enerji ile pervaneyi döndürerek itki üretir.
- Bu süreç boyunca enerji verimliliği kontrol edilerek optimum çalışma sağlanır.

4.3. Modelin Amacı ve Önemi

Bu model, gemilerde emisyonların azaltılması, yakıt verimliliğinin artırılması ve alternatif enerji kaynaklarının entegrasyonu amacıyla geliştirilmiştir. Hibrit sistemler sayesinde, özellikle liman manevraları sırasında sıfır emisyonla seyir mümkün hale gelirken, seyir sırasında ise yakıt hücresi ve batarya destekli sistem sayesinde düşük karbon ayak izi sağlanmaktadır.

4.4. Geminin Temel Fiziksel ve Hidrodinamik Parametreleri

Modelde kullanılan gemi parametreleri aşağıda verilmiştir. Bu değerler, gemi dinamiğinin doğru şekilde simüle edilmesi ve sistemin gerçek dünya koşullarına uygun davranış göstermesi açısından temel teşkil etmektedir.

Tablo 23 : Geminin Temel Fiziksel ve Hidrodinamik Parametreleri

Parametre	Açıklama
C_T (Tahrik Katsayısı)	Gemi üzerindeki toplam direnç ile tahrik kuvveti arasındaki orantıyı temsil eder. Değer: 5.758523e-05. Bu katsayı, sistemde gerekli tahrik gücünün belirlenmesinde kullanılır.
S (Islak Alan, m ²)	Gemi gövdesinin suyla temas eden yüzey alanıdır. Modelde 4097.02 m ² olarak tanımlanmıştır. Bu alan, sürtünme direncinin hesaplanmasında kritik rol oynar.
rho_water (Su Yoğunluğu, kg/m ³)	Simülasyonda kullanılan suyun yoğunluğunu belirtir. Varsayılan olarak rho_water parametresine eşitlenmiştir (yaklaşık 1025 kg/m ³ olarak alınır). Bu değer hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılır.
t_d (Zaman Gecikme Katsayısı)	Gemi dinamiklerinde gecikme veya ataleti temsil eden boyutsuz bir katsayıdır. Bu çalışma kapsamında 0.2 olarak tanımlanmıştır. Kontrol sistemlerinin tepkisini etkiler.
MassShip (Gemi Kütlesi, kg)	Geminin toplam kütlesi 1.358e+06 kg olarak belirlenmiştir. Kütle değeri, geminin ivmelenme ve yavaşlama tepkilerinde doğrudan rol oynar.
InitialVelocityShip (Başlangıç Hızı, knot)	Simülasyona başlangıçta geminin sahip olduğu hızdır. Değer InitialVelocityShip_knot parametresine eşitlenmiştir. Bu parametre, senaryolara bağlı olarak farklı başlangıç koşulları tanımlanmasına olanak sağlar.
MaxShipVelocity (Maksimum Gemi Hızı, knot)	Geminin ulaşabileceği maksimum hız 12 knot olarak sınırlandırılmıştır. Bu değer, sistem performans analizlerinde ve kontrol sınırlarında referans alınmaktadır.

4.5. Yardımcı Sistem ve Çevresel Parametrelerin Tanımlanması

Gemi operasyonları yalnızca ana tahrik sistemi ile sınırlı değildir. Gerçekçi bir simülasyon oluşturabilmek adına, AVL CRUISE M platformu üzerinde yardımcı sistemler (auxiliary systems) ve çevresel etkiler de modele dahil edilmiştir. Bu sistemler, enerji tüketimini etkileyen ikincil yükler ile operasyonel performansı etkileyen dış parametreleri kapsamaktadır. Hibrit tahrikli gemi modelinin doğru bir şekilde çalışabilmesi için yalnızca tahrik sistemi değil, aynı zamanda termal yönetim, yakıt hücresi sıcaklık kontrolü, soğutma akışkan devresi boyutları ve batarya başlangıç durumu gibi parametrelerin de doğru şekilde tanımlanması gereklidir. Aşağıda,

modelde kullanılan bazı önemli sistem parametreleri ve bunların işlevleri açıklanmıştır:

Tablo 24 : Yardımcı Sistem ve Çevresel Parametreleri ve Açıklamaları

Parametre Adı	Değeri	Açıklama
cathode_inertia_multiplier	3 [-]	Katot tarafındaki akışkan ataletini ifade eden çarpan katsayı. Yakıt hücresi içi hava akışı dinamiğini etkiler.
ext_water_temperature	25 °C	Yakıt hücresi ve motor sistemleri için soğutma amaçlı kullanılan dış ortam (deniz suyu) sıcaklığı. Termal denge için temel referans alınır.
FC_stack_desired_temperature	65 °C	Yakıt hücresi yığımı için hedeflenen ideal çalışma sıcaklığı. Performans ve verimliliği doğrudan etkiler.
TM_main_branch_pipe_diameter	100 mm	Termal yönetim sisteminin ana hattındaki boru çapı. Soğutma sıvısının debisini ve basıncını belirler.
TM_bypass_pipe_diameter	75 mm	Baypas devresindeki boru çapı. Aşırı sıcaklık koşullarında sistemin korunmasını sağlar.
TM_anode_cathode_pipe_diameter	25 mm	Anot-katot arasındaki soğutma borularının çapı. Yakıt hücresinin iç bölümlerinde etkili soğutma sağlar.
cathode_pipe_diameter	120 mm	Katot tarafındaki hava/oksijen hattının çapı. Hava debisinin verimli dağılımını destekler.
rho_water	999 kg/m ³	Modelde kullanılan sıvı (soğutma suyu veya deniz suyu) yoğunluğu. Isıl hesaplamalarda baz alınır.
End_time	5 dakika	Simülasyonun toplam süresi. Modelin hangi zaman diliminde değerlendirileceğini gösterir.

Parametre Adı	Değeri	Açıklama
Battery_initial_charge	%70	Batarya sisteminin simülasyon başlangıcındaki doluluk oranı. Enerji yönetim senaryoları bu veriye bağlıdır.
InitialVelocityShip_knot	0 Knot	Geminin simülasyon başlangıcındaki hızı Durgub durumda başlatılarak hızlanma senaryosu uygulanabilir.

4.6. Yakıt Hücresi 1

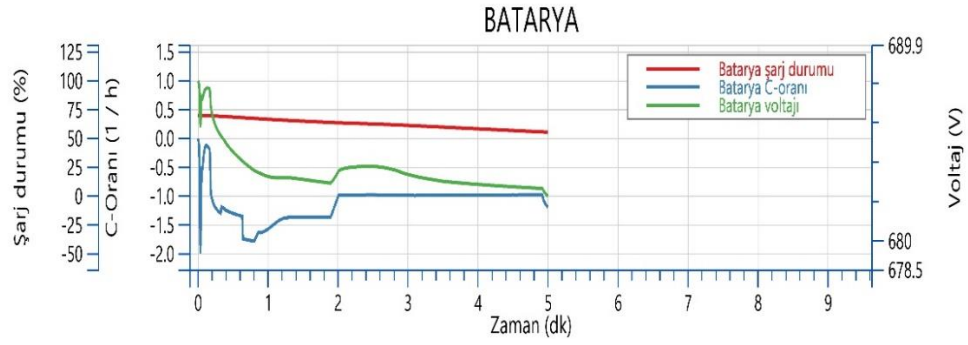
Bu çalışma kapsamında simüle edilen ilk yakıt PowerCell MS-100 Yakıt Hücresi modülü, ticari olarak kullanılabilecek ölçeklerde, yüksek güç çıkışı sağlayabilecek bir yapıdadır. Söz konusu yakıt hücresi sistemi yaklaşık 370 ila 400 adet hücre elemanından oluşabilmektedir. AVL CRUISE M platformu, bu tür elektro-kimyasal enerji kaynaklarının dinamik davranışlarını ve kontrol mantığını detaylı şekilde modellemeye imkân tanımaktadır. Simülasyonda kullandığımız yakıt hücresinin hücre elemanı 385'ten oluşmaktadır ve aşağıda verilen fiziksel boyutlara sahiptir:

- **Genişlik (W):** 500 mm
- **Uzunluk (L):** 700 mm
- **Yükseklik (H):** 950 mm

Hücre sayısının yüksek olması, sistemin yüksek gerilim seviyelerinde çalışmasını sağlar; bu da özellikle gemi gibi büyük ölçekli ve sürekli güç talebi olan uygulamalarda verimlilik açısından önemlidir.

4.6.1. Batarya Davranışı

Aşağıdaki grafikte bataryanın şarj durumu (State of Charge - SoC), C oranı ve voltaj değişimi zamana bağlı olarak analiz edilmiştir.

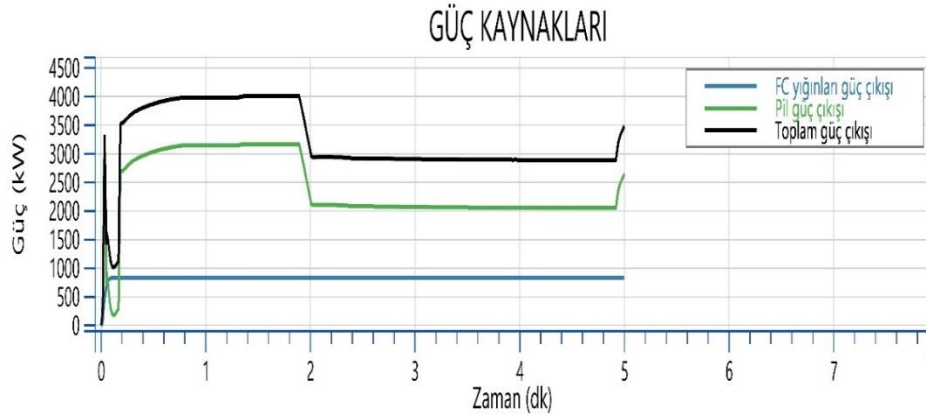


Şekil 7 : Batarya Davranışı

- **Şarj Durumu (SoC):** Bataryanın başlangıçtaki şarj seviyesi %70 olarak belirlenmiştir. Simülasyon boyunca batarya, sisteme enerji sağlamaya devam etmiş ve bu nedenle SoC değeri zamanla kademeli olarak azalmıştır.
- **C-Oranı:** C oranı, bataryanın boşalma/şarj oranını gösterir. Bu grafikte negatif C oranı bataryanın deşarj (boşalma) sürecinde olduğunu göstermektedir. Zaman ilerledikçe batarya deşarj eğilimi azalmakta ve sistem daha dengeli bir enerji talebine ulaşmaktadır.
- **Voltaj (V):** Batarya voltajı simülasyon boyunca küçük dalgalanmalar göstermiştir. Başlangıçta voltaj değeri yaklaşık 689 V civarındayken, simülasyon sonunda 679 V civarına düşmüştür. Bu azalma, batarya üzerindeki yükün ve deşarj sürecinin bir sonucudur.

4.6.2. Güç Kaynakları

Bu grafik, sistemde yer alan enerji kaynaklarının (yakıt hücresi yığınları ve batarya) güç çıkışlarını göstermektedir.

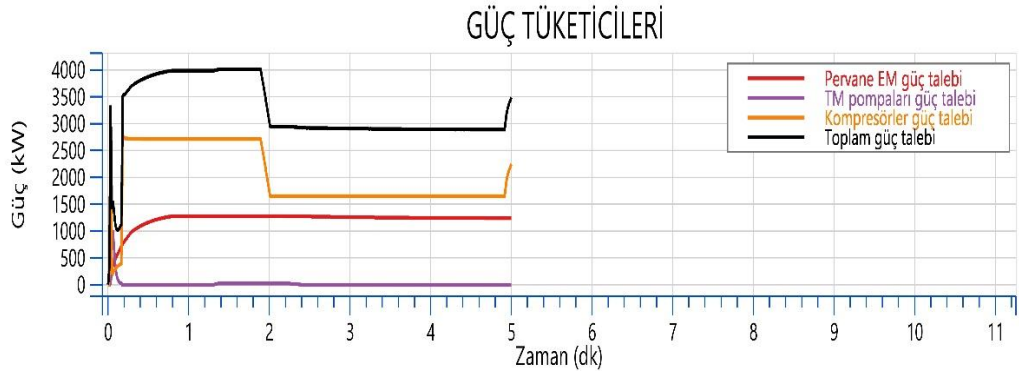


Şekil 8 : Güç Kaynakları

- **Yakıt Hücresi Güç Çıkışı (FC):** Yakıt hücreleri sabit bir güç çıkışı sağlamaktadır (yaklaşık 900 kW). Bu durum, yakıt hücrelerinin sabit yük altında çalıştırıldığını ve güç ihtiyacının geri kalanının batarya tarafından karşılandığını göstermektedir.
- **Batarya Güç Çıkışı:** Batarya, özellikle sistemin ilk dakikalarında yüksek güç talebini karşılamak amacıyla yüksek bir çıkış vermektedir. Sistem dengelendikçe bataryanın çıkışı azalmaktadır.
- **Toplam Güç Çıkışı:** Tüm kaynakların toplam çıkışı başlangıçta ani bir artış göstermekte, ardından stabilize bir güç çıkışı sağlanmaktadır (yaklaşık 4000 kW civarı).

4.6.3. Güç Tüketicileri

Bu grafik, gemideki farklı tüketici sistemlerin güç taleplerini göstermektedir.

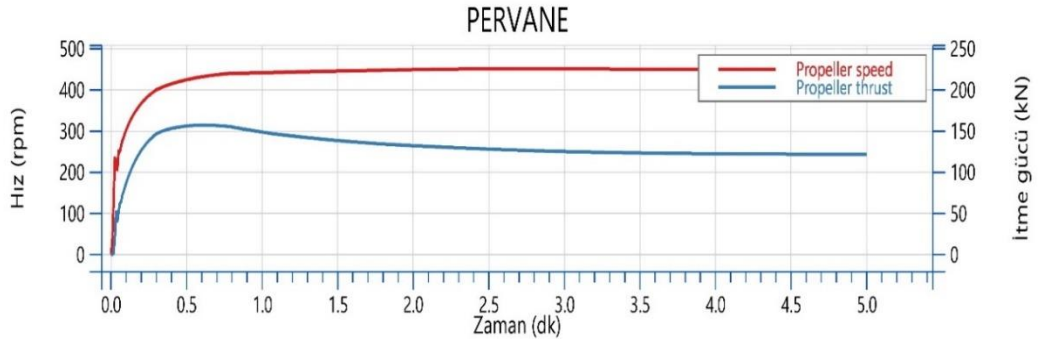


Şekil 9 : Güç Tüketicileri

- **Pervane Elektrik Motoru (EM):** Tahrik sistemi olan elektrik motoru, güç ihtiyacının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. İlk anda ani bir artışla güç talebi yükselmiş, daha sonra sabit bir seviyeye ulaşmıştır.
- **Isı Yönetim Sistemi (TM):** Pompa sistemleri, sabit ve yüksek bir güç talebine sahiptir. Bu durum, sistemin soğutma gereksinimlerinin sürekliliğini göstermektedir.
- **Kompresörler:** Yakıt hücresi sisteminin hava beslemesini sağlayan kompresörler, belirli periyotlarda değişen bir güç talebine sahiptir.
- **Toplam Güç Tüketimi:** Tüm tüketicilerin toplam talepleri zamanla dengelenmiş ve sistem belirli bir çalışma rejimine ulaşmıştır.

4.6.4. Pervane Karakteristikleri

Pervane grafiği, sistemin deniz tahrik performansını göstermektedir.



Şekil 10 : Pervane Karakteristikleri

- **Pervane Hızı (rpm):** Pervane hızı başlangıçta hızlı bir şekilde artarak yaklaşık 430 rpm seviyesine ulaşmış ve bu değerde sabit kalmıştır.
- **İtme Gücü (Thrust):** İtme gücü zamanla artarak maksimum yaklaşık 150 kN civarında sabitlenmiştir. Bu, geminin seyir haline geçişiyle uyumlu bir davranıştır.

4.7. Yakıt Hücresi 2

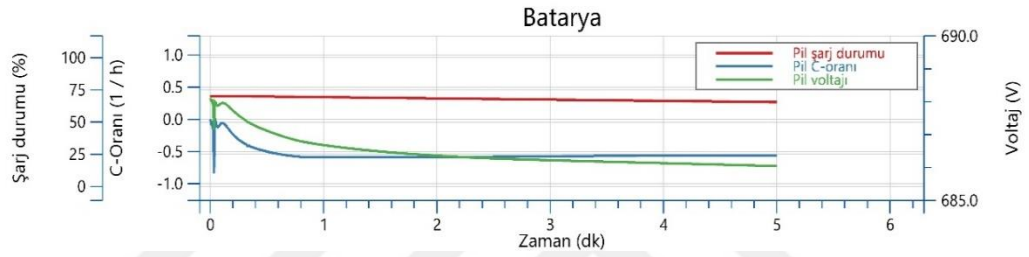
Simülasyonda kullanılan ikinci yakıt hücresi sistemi Ballard FCwave™ Yakıt Hücresidir. 900 adet hücreden oluşmakta olup, bu hücreler seri bağlantı konfigürasyonu ile birleştirilmiştir. Bu yapılandırma sayesinde sistemden elde edilen toplam gerilim değeri artırılarak, yüksek güçlü denizcilik uygulamalarında kullanılabilecek seviyeye çıkarılmıştır. Yakıt hücresi bloğunun fiziksel boyutları aşağıdaki gibidir:

- **Genişlik (W):** 864 mm
- **Yükseklik (H):** 1279 mm
- **Uzunluk (L):** 612 mm

Yüksek hücre sayısı, sistemin hem güç yoğunluğunu hem de gerilim seviyesini artırarak, batarya destekli hibrit sistemin enerji üretim kapasitesini optimize etmiştir. Aynı zamanda hücre başına düşen yükün dengelenmesi sayesinde, daha uzun ömürlü ve stabil bir çalışma sağlanması hedeflenmiştir.

4.7.1. Batarya Davranışı

Grafikte bataryanın şarj durumu (SOC), C-oranı ve voltajı zamana bağlı olarak incelenmiştir:



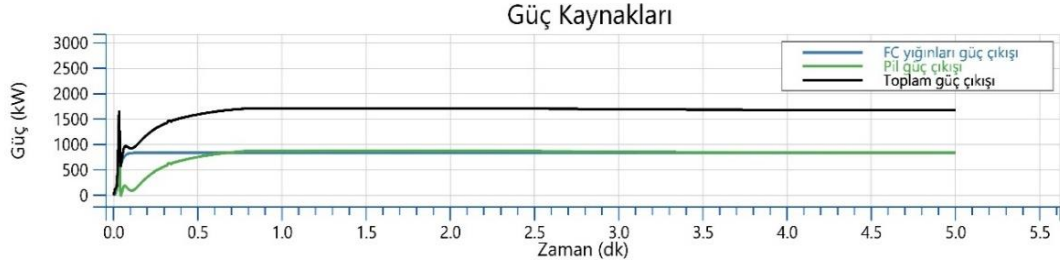
Şekil 11 : Batarya Davranışı

- **Şarj durumu (SOC)** yaklaşık sabit kalmaktadır (%98 civarında). Bu durum, bataryanın sistemde esas olarak tampon görevinde kullanıldığını ve aşırı deşarja/şarja maruz kalmadığını göstermektedir.
- **C-oranı**, başlangıçta negatif bir pik yapmakta ve ardından -0.5 civarına düşerek sabitlenmektedir. Bu, bataryanın kısa bir süreliğine yüksek akım çektiğini ve ardından düşük deşarj oranıyla çalıştığını gösterir.
- **Voltaj**, simülasyon boyunca 685-688 V arasında küçük bir düşüş göstererek oldukça kararlı kalmıştır. Bu, bataryanın sağlıklı ve kararlı bir şekilde çalıştığını ortaya koyar.

Batarya, yakıt hücresine destek sağlayan bir tampon enerji kaynağı gibi çalışmakta, sistemin ani yük taleplerini karşılamakta ve gerilim stabilitesine katkıda bulunmaktadır.

4.7.2. Güç Kaynakları

Grafikte yakıt hücreleri ve batarya tarafından üretilen güç değerleri gösterilmektedir:



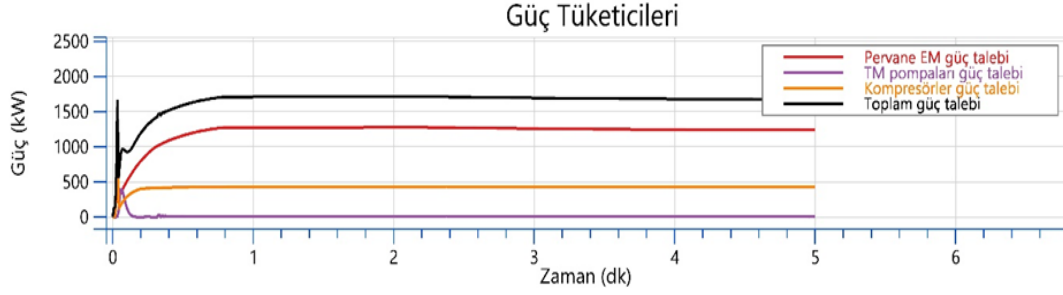
Şekil 12 : Güç Kaynakları

- **FC (Fuel Cell) çıkış gücü** yaklaşık 1000 kW seviyesine ulaşmakta ve sabit kalmaktadır. Bu, sistemin baz yükünü yakıt hücresinin karşıladığını gösterir.
- **Batarya çıkışı** başlangıçta 0'dan yaklaşık 800 kW'a kadar çıkmakta, ardından kademeli olarak düşerek 600 kW civarında sabitlenmektedir.
- **Toplam güç çıkışı**, sistemde yaklaşık 1600 kW civarında stabilize olmaktadır.

Yakıt hücresi sistemin ana güç kaynağı olarak sürekli çalışırken, batarya ani güç ihtiyaçlarında destek sağlamakta ve bu sayede toplam güç ihtiyacı dengeli şekilde karşılanmaktadır. Yakıt hücresinin istikrarlı güç çıkışı, bataryanın görevini kolaylaştırmaktadır.

4.7.3. Güç Tüketicileri

Grafikte tüketicilerin güç talepleri verilmiştir:



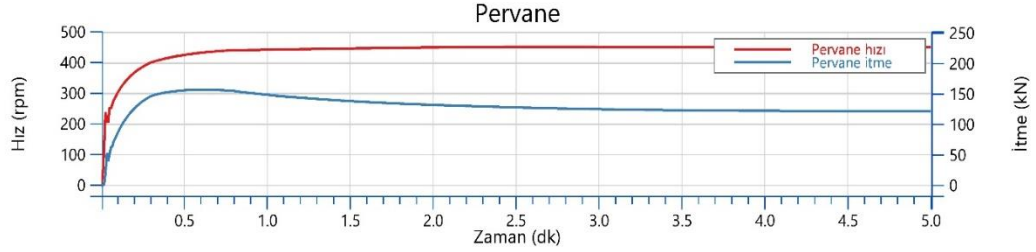
Şekil 13 : Güç Tüketicileri

- **Pervane elektrik motoru (EM)** ~1200 kW ile en yüksek güç tüketicisi olarak öne çıkmaktadır.
- **TM pompaları** oldukça düşük güç tüketmektedir (yaklaşık 50 kW altında).
- **Kompresörler**, 400 kW seviyelerinde sürekli güç talep etmektedir.
- **Toplam güç talebi**, 1600-1700 kW aralığında sabit kalmaktadır.

Ana güç tüketimi pervane motorundan kaynaklanmakta olup, sistem tasarımı bu yüksek talebe göre şekillendirilmiştir. Kompresörler de önemli bir paya sahiptir. Güç üretimi ve tüketimi dengelenmiş görünmektedir.

4.7.4. Pervane Karakteristikleri

Grafikte pervane hızı ve itme kuvveti verilmiştir:



Şekil 14 : Pervane Karakteristikleri

- **Pervane hızı**, 0.5 dakikada 400 rpm'yi geçmekte ve ardından 450 rpm civarında sabitlenmektedir.
- **İtme kuvveti**, aynı şekilde hızla artarak yaklaşık 300 kN'ye ulaşmakta, ardından 150 kN'ye düşerek stabilize olmaktadır.

Sistem başlatıldığında pervane hızla hızlanmakta ve itme kuvveti de benzer şekilde yükselmektedir. Ancak ardından istikrarlı bir seyir izlenmektedir. Bu da sistemin kontrollü bir şekilde kararlı duruma ulaştığını gösterir.

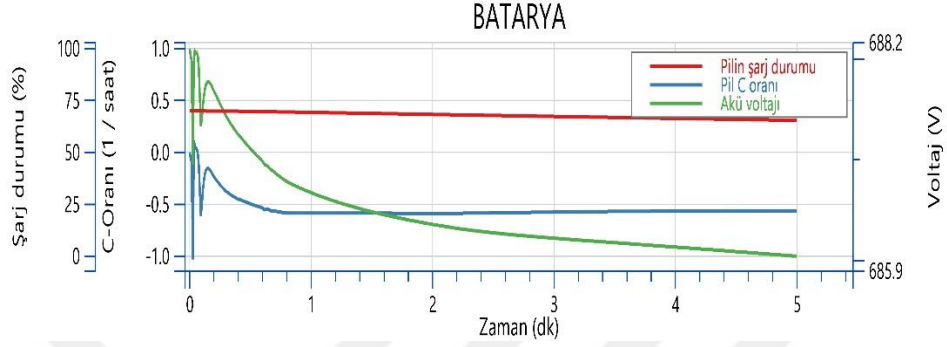
4.8. Yakıt Hücresi 3

Simülasyonda kullanılan üçüncü yakıt hücresi sistemi Ballard FCveloCity®-MD 100 yakıt hücresidir. 500 adet hücreden oluşmaktadır. Yakıt hücresi bloğunun fiziksel boyutları aşağıdaki gibidir:

- **Genişlik (W):** 800 mm
- **Yükseklik (H):** 950 mm
- **Uzunluk (L):** 1300 mm

4.8.1. Batarya Davranışları

Grafikte bataryanın şarj durumu, C-oranı ve voltaj değişimi verilmiştir:



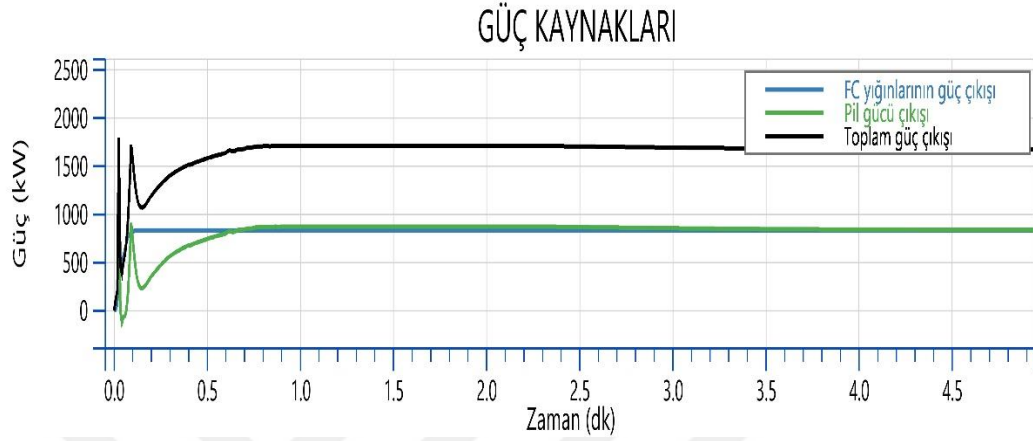
Şekil 65 : Batarya Davranışları

- **Şarj durumu**, %48 seviyelerinde sabit kalmakta ve bu da bataryanın sürekli şarj/deşarj döngüsünde olmadığını, sistemde denge unsuru olarak görev aldığını göstermektedir.
- **C-Oranı**, ilk anda negatif değerlere düşmekte ve bu da bataryadan güç çekildiğini işaret etmektedir. Zamanla 0'a yaklaşarak dengeli hale gelir.
- **Akü voltajı**, 688 V'tan başlamakta ve 686 V civarına kadar düşerek sabitlenmektedir.

Sistem bataryayı destekleyici kaynak olarak kullanmakta ve voltaj/şarj dengesini koruyarak enerji yönetimini kararlı biçimde sürdürmektedir.

4.8.2. Güç Kaynakları

Grafikte yakıt hücresi yığınları ve batarya güç çıkışları ile toplam çıkış verilmiştir:



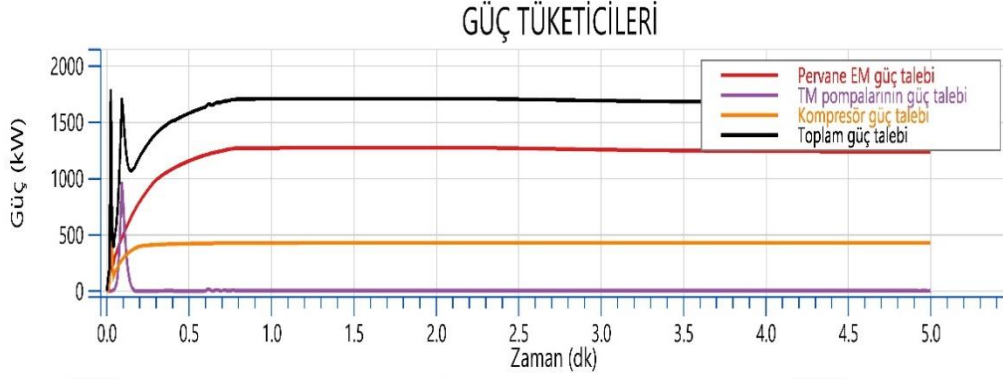
Şekil 16 : Güç Kaynakları

- **Yakıt hücresi çıkışı**, 900 kW seviyesinde sabitlenmiştir.
- **Pil güç çıkışı**, başlangıçta 700–800 kW civarına kadar çıkarak ilk yüklenmeyi desteklemekte, ardından azalarak dengeye ulaşmaktadır.
- **Toplam güç çıkışı**, 2000 kW'a kadar anlık çıkışlara ulaşarak sistemin yüksek talebi karşılayabildiğini göstermektedir.

Bu veriler hibrit sistemin yük paylaşımında batarya ve yakıt hücresi uyumunun başarılı şekilde yürütüldüğünü ortaya koyar.

4.8.3. Güç Tüketicileri

Grafikte güç tüketici alt sistemlerin talepleri görülmektedir:



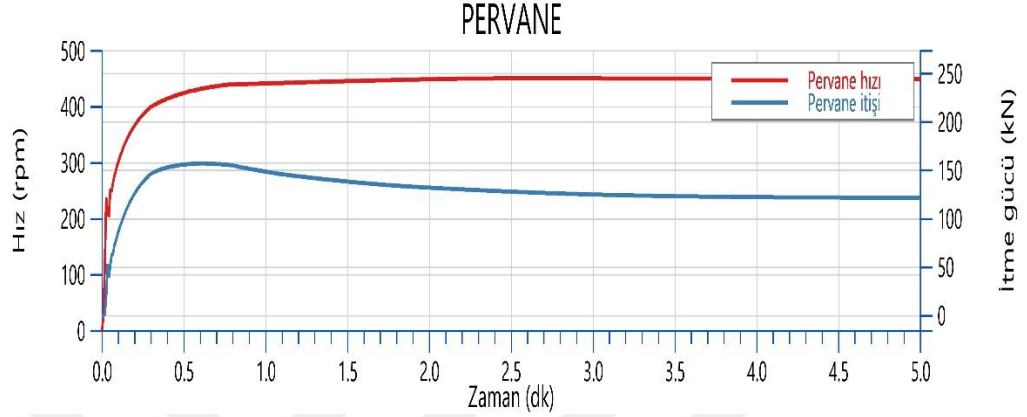
Şekil 17 : Güç Tüketicileri

- **Pervane güç talebi**, yaklaşık 1200 kW düzeyinde olup sistemin en yüksek tüketim kalemidir.
- **TM pompalar**, yaklaşık 400 kW güç çekmekte ve sabit çalışmaktadır.
- **Kompresör**, kısa süreli çalışmakta ve ardından neredeyse sıfır güç tüketmektedir.

Enerji tüketiminin büyük bölümü pervane sistemine ait olup, TM pompalar da sabit yük oluşturmaktadır. Kompresör sistemi geçici bir başlangıç gereksinimi taşımaktadır.

4.8.4. Pervane Karakteristikleri

Grafikte pervane hızı ve itme kuvveti verilmiştir:



Şekil 18: Pervane Karakteristikleri

- **Pervane hızı**, hızlı bir şekilde 450 rpm değerine ulaşmakta ve bu değerde sabitlenmektedir.
- **İtme kuvveti**, yaklaşık 300 kN seviyesinde bir zirve yaptıktan sonra 200 kN civarına düşmekte ve burada sabit kalmaktadır.

Sistem çalıştırıldığında pervane hızı kısa sürede maksimum değere ulaşarak dengelenmekte, bu sırada pervanenin oluşturduğu itme kuvveti de önce yükselip ardından kararlı bir seviyeye inmektedir. Bu durum, geminin ivmelenme evresini tamamlayıp sabit hız rejimine geçtiğini ve enerji ihtiyacının dengeye ulaştığını göstermektedir. Sistem kontrolünün başarılı olduğu ve tahrik sisteminin kararlı çalıştığı görülmektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada incelenen üç farklı yakıt hücresi konfigürasyonu, batarya destekli hibrit tahrik sistemlerine entegrasyon açısından önemli teknik ve operasyonel farklar sunmaktadır. Analiz edilen üç sistemin hücre sayısı, boyutları, hacmi, vb. kriterler açısından karşılaştırılması, aşağıda sunulan Tablo 25'te gösterilmiştir.

Tablo 25. Analiz Edilen Üç Sistemin Karşılaştırılması

Özellikler	Sistem 1(PowerCell MS-100)	Sistem 2(Ballard FCwave™)	Sistem 3(Ballard FCveloCity®-MD 100)
Hücre Sayısı	385	900	500
Fiziksel Boyutlar (mm)	500 × 700 × 950	864 × 1279 × 612	800 × 1300 × 950
Yaklaşık Hacim (m ³)	0.33	0.675	0.988
Güç Üretim Karakteri	Orta düzey, hızlı tepki	Yüksek, kararlı çıkış	Orta-yüksek, sabit çıkış
Batarya ile Etkileşim	Yüksek bağımlılık, ani tepki verir	Düşük bağımlılık, yavaş başlatma	Orta bağımlılık, kısa sürede dengelenir
Kullanım Alanları	Liman servis tekneleri, pilot botlar, iç su taşıtları	Konteyner gemileri, yolcu gemileri, askeri gemiler	Şehir içi feribotlar, deniz taksileri, araştırma gemileri
Entegrasyon Avantajı	Kompakt yapı, yer tasarrufu	Yüksek güç üretimi	Dengeli yapı, geniş kullanım alanı
Entegrasyon Zorluğu	Düşük	Yüksek (büyük hacim)	Orta düzey

Kompakt yapısıyla Sistem 1 düşük tonajlı ve dar hacimli gemiler için ideal bir çözüm sunarken, Sistem 2 yüksek güç kapasitesiyle büyük ölçekli ve enerji yoğun uygulamalara uygundur. Sistem 3 ise güç-hacim dengesi açısından farklı gemi türlerine uyum sağlayabilen esnek bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Yakıt hücresi seçimi, sadece güç çıktısına değil; gemi tipi, görev profili, batarya stratejisi ve liman

altyapısı gibi çok boyutlu kriterlere göre yapılmalıdır. Ayrıca, IMO'nun 2050 yılına kadar denizcilikte sera gazı emisyonlarını sıfıra indirme hedefi doğrultusunda, yakıt hücreleri sürdürülebilir ve çevreci deniz taşımacılığı için stratejik bir çözüm sunmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Al-Falahi, M. D., Nimma, K. S., Jayasinghe, S. D., Enshaei, H., & Guerrero, J. M. (2018). Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries. *Energy conversion and management*, 172, 50-66.
- [2] Altosole, M., Dubbioso, G., Figari, M., Viviani, M., Michetti, S., & Millerani Trapani, A. (2010, Haziran). Bir CODLAG tahrik tesisinin dinamik davranışının simülasyonu. *WARSHIP 2010 Konferansı Bildirilerinde: Deniz Tasarım ve İnşasında İleri Teknolojiler* (s. 9-10).
- [3] Andújar, J. M., & Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2309-2322.
- [4] Aneke, M. ve Wang, M. (2016). Enerji depolama teknolojileri ve gerçek yaşam uygulamaları - Son teknoloji incelemesi. *Uygulamalı Enerji* , 179 , 350-377.
- [5] Ash, N., & Scarbrough, T. (2019). Sailing on solar: Could green ammonia decarbonise international shipping. *Environmental Defense Fund: London, UK*.
- [6] Asif, M. (2022). *Enerji geçişleri el kitabı* . CRC Press.
- [7] Attah, E. E., & Bucknall, R. (2015). An analysis of the energy efficiency of LNG ships powering options using the EEDI. *Ocean Engineering*, 110, 62-74.
- [8] Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy conversion and management*, 182, 72-88.
- [9] Barbir, F. (2012). *PEM yakıt hücreleri: teori ve uygulama* . Akademik basın.
- [10] Baschuk, J. J., & Li, X. (2001). Carbon monoxide poisoning of proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Energy Research*, 25(8), 695-713.

- [11] Bassam, A. (2017). *Use of voyage simulation to investigate hybrid fuel cell systems for marine propulsion* (Doctoral dissertation, University of Southampton).
- [12] Bayindir, K. Ç., Gözükcük, M. A., & Teke, A. (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy conversion and Management*, 52(2), 1305-1313.
- [13] Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4583-4596.
- [14] Bicer, Y., Dincer, I., Vezina, G., & Raso, F. (2017). Impact assessment and environmental evaluation of various ammonia production processes. *Environmental management*, 59, 842-855.
- [15] Bolund, B., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2007). Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(2), 235-258.
- [16] Choudhury, A., Chandra, H., & Arora, A. (2013). Application of solid oxide fuel cell technology for power generation—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 430-442.
- [17] Chuah, L. F., Klemeš, J. J., Yusup, S., Bokhari, A., & Akbar, M. M. (2017). A review of cleaner intensification technologies in biodiesel production. *Journal of cleaner production*, 146, 181-193.
- [18] Da Rù, D., Morandin, M., Bolognani, S., & Castiello, M. (2016, April). A threshold logic control strategy for parallel light hybrid electric vehicle implementation. In *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*. Stevenage UK: IET.
- [19] Dai, W., Wang, H., Yuan, X. Z., Martin, J. J., Yang, D., Qiao, J., & Ma, J. (2009). A review on water balance in the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of hydrogen energy*, 34(23), 9461-9478.
- [20] De Marco, A., Mancini, S., Pensa, C., Calise, G., & De Luca, F. (2016). Flettner rotor concept for marine applications: A systematic study. *International Journal of Rotating Machinery*, 2016(1), 3458750.
- [21] Dedes, E. K., Hudson, D. A., & Turnock, S. R. (2016). Investigation of Diesel Hybrid systems for fuel oil reduction in slow speed ocean going ships. *Energy*, 114, 444-456.

- [22] Demirel, M. Önleyici Bir Çevre Politikası Olarak Sıfır Atık Düşüncesi Ve Türkiye Uygulaması. *Kent ve çevre çalışmaları*, 157.
- [23] De-Troya, J. J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C., & Carral, L. (2016). Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *International journal of hydrogen energy*, 41(4), 2853-2866.
- [24] Dimitriou, P., & Javaid, R. (2020). A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), 7098-7118.
- [25] Dodds, P. E., Staffell, I., Hawkes, A. D., Li, F., Grünewald, P., McDowall, W., & Ekins, P. (2015). Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *International journal of hydrogen energy*, 40(5), 2065-2083.
- [26] Elgohary, M. M., Seddiek, I. S., & Salem, A. M. (2015). Overview of alternative fuels with emphasis on the potential of liquefied natural gas as future marine fuel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 229(4), 365-375.
- [27] Ellamla, H. R., Staffell, I., Bujlo, P., Pollet, B. G., & Pasupathi, S. (2015). Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector. *Journal of Power Sources*, 293, 312-328.
- [28] Farhadi, M. ve Mohammed, O. (2015). Yüksek güç uygulamaları için enerji depolama teknolojileri. *IEEE Endüstri Uygulamaları İşlemleri*, 52 (3), 1953-1961.
- [29] Garche, J. ve Jürissen, L. (2015). Yakıt hücresi teknolojisinin uygulamaları: Durum ve perspektifler. *Elektrokimyasal Toplum Arayüzü*, 24 (2), 39.
- [30] Geertsma, RD, Negenborn, RR, Visser, K. ve Hopman, JJ (2017). Akıllı gemiler için hibrit güç ve tahrik sistemlerinin tasarımı ve kontrolü: Gelişmelerin bir incelemesi. *Uygulamalı Enerji*, 194, 30-54.
- [31] Haliloğlu, H. (2021). *Askeri Gemilerde kullanılan Üç farklı Ana Tahrik Dizel Motorunun Performans Parametrelerinin İncelenmesi* (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [32] Han, J., Charpentier, J. F., & Tang, T. (2012, May). State of the art of fuel cells for ship applications. In *2012 IEEE international symposium on industrial electronics* (pp. 1456-1461). IEEE.

- [33] Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S., & Grahn, M. (2019). Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass and Bioenergy*, 126, 159-173.
- [34] Hebner, RE, Davey, K., Herbst, J., Hall, D., Hahne, J., Surls, DD, & Ouroua, A. (2015). Dinamik yük ve depolama entegrasyonu. *IEEE Bildirileri*, 103 (12), 2344-2354.
- [35] Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(5), 1221-1250.
- [36] Inal, O. B., & Deniz, C. (2018, April). Fuel cell availability for merchant ships. In *Proceedings of the 3rd International Naval Architecture and Maritime Symposium* (pp. 907-916).
- [37] Kanellos, F. D., Tsekouras, G. J., & Hatziaargyriou, N. D. (2014). Optimal demand-side management and power generation scheduling in an all-electric ship. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1166-1175.
- [38] Karatuğ, Ç., & Durmuşoğlu, Y. (2020). Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: A case study. *Solar Energy*, 207, 1259-1268.
- [39] Karimi, S., Zadeh, M. ve Suul, JA (2020). Tak-çalıştır pille çalışan gemiler için kıyı şarjı: Güç sistemi mimarisi, altyapı ve kontrol. *IEEE Elektrifikasyon Dergisi*, 8 (3), 47-61.
- [40] Khan, M. M. S., Faruque, M. O., & Newaz, A. (2017). Fuzzy logic based energy storage management system for MVDC power system of all electric ship. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(2), 798-809.
- [41] Kim, K., Roh, G., Kim, W., & Chun, K. (2020). A preliminary study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: Environmental and economic assessments. *Journal of marine science and engineering*, 8(3), 183.
- [42] Klüssmann, J. N., Ekknud, L. R., Ivarsson, A., & Schramm, J. (2020). Ammonia application in IC engines. *Special report, a report from the advanced motor fuels technology collaboration programme*, 45, 7098-7118.
- [43] Kumar, R. ve Fozdar, M. (2017, Ekim). Parçacık sürüş optimizasyonunun varyantlarını kullanarak hibrit gemi güç sisteminin optimum boyutlandırılması. *2017'de kontrol, otomasyon ve güç mühendisliğindeki (RDCAPE) son gelişmeler* (s. 527-532). IEEE.

- [44] Leloup, R., Roncin, K., Behrel, M., Bles, G., Leroux, J. B., Jochum, C., & Parlier, Y. (2016). A continuous and analytical modeling for kites as auxiliary propulsion devoted to merchant ships, including fuel saving estimation. *Renewable Energy*, 86, 483-496.
- [45] Lu, R., & Ringsberg, J. W. (2020). Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology. *Ships and Offshore Structures*, 15(3), 249-258.
- [46] Marefati, M., & Mehrpooya, M. (2019). Introducing and investigation of a combined molten carbonate fuel cell, thermoelectric generator, linear fresnel solar reflector and power turbine combined heating and power process. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118247.
- [47] Mench, M. M. (2008). *Fuel cell engines*. John Wiley & Sons.
- [48] Meng, J., Guo, H., Niu, C., Zhao, Y., Xu, L., Li, Q., & Mai, L. (2017). Advances in structure and property optimizations of battery electrode materials. *Joule*, 1(3), 522-547.
- [49] Menteş, A., & Akyıldız, H. (2019). Hibrit Tahrik Sistemli Gemilerde Risk Değerlendirmesi. *GİDB Dergi*, (17), 33-42.
- [50] Misyris, G. S., Marinopoulos, A., Doukas, D. I., Tegnér, T., & Labridis, D. P. (2017). On battery state estimation algorithms for electric ship applications. *Electric Power Systems Research*, 151, 115-124.
- [51] Mohammed, H., Al-Othman, A., Nancarrow, P., Tawalbeh, M., & Assad, M. E. H. (2019). Direct hydrocarbon fuel cells: A promising technology for improving energy efficiency. *Energy*, 172, 207-219.
- [52] Morlanés, N., Katikaneni, S. P., Paglieri, S. N., Harale, A., Solami, B., Sarathy, S. M., & Gascon, J. (2021). A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies. *Chemical Engineering Journal*, 408, 127310.
- [53] Mutarraf, M. U., Terriche, Y., Niazi, K. A. K., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2018). Energy storage systems for shipboard microgrids—A review. *Energies*, 11(12), 3492.
- [54] Nebb, O. C., Zahedi, B., Lindtjorn, J. O., & Norum, L. (2012, October). Increased fuel efficiency in ship LVDC power distribution systems. In *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 564-568). IEEE.

- [55] Nguyen, H. P., Hoang, A. T., Nizetic, S., Nguyen, X. P., Le, A. T., Luong, C. N., ... & Pham, V. V. (2021). The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO₂ emission in ocean shipping: A comprehensive review. *International Transactions on electrical energy systems*, 31(11), e12580.
- [56] Ogar, O. B., Nitonye, S., & John-Hope, I. (2018). Design analysis and optimal matching of a controllable pitch propeller to the hull and diesel engine of a CODOG system. *Journal of Power and Energy Engineering*, 6(03), 53.
- [57] Park, J. D., Kalev, C., & Hofmann, H. F. (2008). Control of high-speed solid-rotor synchronous reluctance motor/generator for flywheel-based uninterruptible power supplies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8), 3038-3046.
- [58] Pratt, J. W., & Klebanoff, L. E. (2016). Feasibility of the SF-BREEZE: a zero-emission, hydrogen fuel cell, high-speed passenger ferry.
- [59] Pratt, J. W., & Klebanoff, L. E. (2016). Feasibility of the SF-BREEZE: a zero-emission, hydrogen fuel cell, high-speed passenger ferry.
- [60] Remick, R. J., Wheeler, D., & Singh, P. (2010). MCFC and PAFC R&D workshop summary report.
- [61] Ren, J., & Sovacool, B. K. (2015). Prioritizing low-carbon energy sources to enhance China's energy security. *Energy conversion and management*, 92, 129-136.
- [62] Rosli, R. E., Sulong, A. B., Daud, W. R. W., Zulkifley, M. A., Husaini, T., Rosli, M. I., ... & Haque, M. A. (2017). A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9293-9314.
- [63] Sasank, B. V., Rajalakshmi, N., & Dhathathreyan, K. S. (2016). Performance analysis of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stack operated under marine environmental conditions. *Journal of Marine Science and Technology*, 21, 471-478.
- [64] Saxena, S., & Verma, A. (2015). Introduction to fuel cell technology: A review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 205-209.
- [65] Schinas, O., & Butler, M. (2016). Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships. *Ocean Engineering*, 122, 84-96.
- [66] Schlapbach, L., & Züttel, A. (2001). Hydrogen-storage materials for mobile applications. *nature*, 414(6861), 353-358.

- [67] Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 32, 810-853.
- [68] Steward, D., Saur, G., Penev, M., & Ramsden, T. (2009). *Lifecycle cost analysis of hydrogen versus other technologies for electrical energy storage* (No. NREL/TP-560-46719). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [69] Strušnik, D., Brandl, D., Schober, H., Ferčec, J., & Avsec, J. (2020). A simulation model of the application of the solar STAF panel heat transfer and noise reduction with and without a transparent plate: A renewable energy review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110149.
- [70] Taheri, P., Yazdanpour, M., & Bahrami, M. (2014). Analytical assessment of the thermal behavior of nickel–metal hydride batteries during fast charging. *Journal of Power Sources*, 245, 712-720.
- [71] Talluri, L., Nalianda, D. K., Kyprianidis, K. G., Nikolaidis, T., & Pilidis, P. (2016). Techno economic and environmental assessment of wind assisted marine propulsion systems. *Ocean Engineering*, 121, 301-311.
- [72] Tandekar, J. K., Ojha, A., Das, S., Swarnkar, P., & Jain, S. (2019). SEIG-based renewable power generation and compensation in MVDC ship power system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(4), e2785.
- [73] Tang, R., Wu, Z., & Li, X. (2018). Optimal operation of photovoltaic/battery/diesel/cold-ironing hybrid energy system for maritime application. *Energy*, 162, 697-714.
- [74] Tarelko, W., & Rudzki, K. (2020). Applying artificial neural networks for modelling ship speed and fuel consumption. *Neural computing and applications*, 32(23), 17379-17395.
- [75] Thomson, H., Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2015). Natural gas as a marine fuel. *Energy Policy*, 87, 153-167.
- [76] Torreglosa, J. P., García, P., Fernández, L. M., & Jurado, F. (2014). Hierarchical energy management system for stand-alone hybrid system based on generation costs and cascade control. *Energy Conversion and Management*, 77, 514-526.
- [77] Trieste, S., Hmam, S., Olivier, J. C., Bourguet, S., & Loron, L. (2015). Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry. *Applied Energy*, 153, 3-14.

- [78] Tronstad, T., Åstrand, H. H., Haugom, G. P., & Langfeldt, L. (2017). Study on the use of fuel cells in shipping.
- [79] Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327, 345-364.
- [80] Vayenas, C. G., & Farr, R. D. (1980). Cogeneration of electric energy and nitric oxide. *Science*, 208(4444), 593-594.
- [81] Vieira, G. T., Peralta, C. O., Salles, M. B. D. C., & Carmo, B. S. (2017, June). Reduction of CO₂ emissions in ships with advanced Energy Storage Systems. In *2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (pp. 564-571). IEEE.
- [82] Vogler, F., & Würsig, G. (2011). Fuel cell in maritime applications challenges, chances and experiences.
- [83] Völker, T. (2013). Hybrid propulsion concepts on ships. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 79, 66-76.
- [84] Wen, S., Lan, H., Hong, Y. Y., Yu, D. C., Zhang, L., & Cheng, P. (2016). Allocation of ESS by interval optimization method considering impact of ship swinging on hybrid PV/diesel ship power system. *Applied energy*, 175, 158-167.
- [85] Wijnja, J., & Nijkamp, J. E. (2022, June). The value of FM for a healthy urban environment: application of the FM Value Map to Urban FM. In *Research Papers for The 21st EuroFM Research Symposium* (pp. 47-54). EuroFM: European Facility Management Network.
- [86] Witthohn, R. (2022). Ferry Traffic. In *International Shipping: The Role of Sea Transport in the Global Economy* (pp. 437-487). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [87] Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives. *Sustainability*, 13(3), 1213.
- [88] Zhou, Z., Benbouzid, M., Charpentier, J. F., Scuiller, F., & Tang, T. (2013). A review of energy storage technologies for marine current energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 390-400.
- [89] Zincir, B. (2022). Karbonsuzlaştırılmış deniz taşımacılığı için amonyak. *Hareketlilik için Temiz Yakıtlar*, 171-199

ÖZGEÇMİŞ

Şükrü Onur Başoda, İlk ve ortaöğretimini Fatsa'da tamamladıktan sonra, 2014 yılında Giresun'un Piraziz ilçesinde bulunan Piraziz Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimi süresince başta enerji sistemleri, termodinamik, akışkanlar mekaniği ve taşıt teknolojileri olmak üzere temel mühendislik alanlarında kendini geliştirmiş, 2018 yılında mezun olmuştur.

2019 yılında Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Yüksek lisans sürecinde özellikle denizcilik sektöründe sürdürülebilir ve çevre dostu enerji çözümleri üzerine yoğunlaşmıştır. Tez çalışmasını, gemilerde hibrit tahrik sistemlerinin modellenmesi ve sistem analizleri üzerine gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda AVL CRUISE M yazılımı kullanılarak hibrit deniz taşıtlarında batarya ve yakıt hücresi entegrasyonlarıyla sistem performansı ve verimlilik analizi yapılmıştır.

Tez çalışması Prof. Dr. Hakan Adatepe ve Doç. Dr. Egemen Sulukan danışmanlığında yürütülmüştür.

Akademik çalışmalarının yanı sıra, Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı bünyesinde subay olarak görev yapmaktadır. Denizcilik alanındaki mesleki deneyimi ve mühendislik bilgisi sayesinde kuramsal bilgiyi uygulamaya aktarmaya hedeflemektedir.

İyi derecede İngilizce bilmektedir.