

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR FERİBOT İÇİN YAKIT HÜCRESİ BATARYA HİBRİT SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE SİMULASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rukiye GÜLMEZ

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cengiz DENİZ

HAZİRAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR FERİBOT İÇİN YAKIT HÜCRESİ BATARYA HİBRİT SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE SİMULASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Rukiye GÜLMEZ
512181027**

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cengiz DENİZ

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün 512181027 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Adı SOYADI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİR FERİBOT İÇİN YAKIT HÜCRESİ BATARYA HİBRİT SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE SİMULASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Cengiz DENİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Yalçın DURMUŞOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Aykut SAFA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 03 Haziran 2022
Savunma Tarihi : 14 Haziran 2022



Anne ve Babama,



ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince desteklerini benden esirgemeyerek sabırla her daim bilgisini, deneyimlerini ve değerli zamanını benimle paylaşan danışmanım sayın Prof. Dr. Cengiz DENİZ'e saygılarımı ve şükranlarımı sunarım.

Bana hayatım boyunca her türlü fedakarlığı yapan ve bugün bu noktaya gelmiş olmamı sağlayan kıymetlilerim Periza ve Osman GÜLMEZ'e, her zaman yanımda olan kardeşlerime sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım

Haziran 2022

Rukiye GÜLMEZ
(Gemi Makineleri İşletme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Safya

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. YAKIT HÜCRELERİ.....	5
2.1 Yakıt Hücresi Çeşitleri	7
2.1.1 Alkalın yakıt hücresi.....	7
2.1.2 Proton değişim membranlı yakıt hücresi	9
2.1.3 Doğrudan metanol yakıt hücreleri.....	10
2.1.4 Fosforik asit yakıt hücresi	11
2.1.5 Molten karbonat yakıt hücresi.....	13
2.1.6 Katı oksit yakıt hücresi	14
2.2 Gemilerde Yakıt Hücresi Kullanımına Yönelik Projeler.....	15
2.2.1 Fellowship.....	17
2.2.2 Felicitas.....	18
2.2.3 Zemship.....	18
2.3.4 Methapu	19
2.3.5 Nemo H ₂	20
2.3.6 SchIBZ	21
2.3.7 PaXell	21
2.3.8 Sf -Breeze.....	22
2.3.9 Rivercell.....	23
2.3 Yakıt Hücrelerinin Avantaj ve Dezavantajları.....	23
2.4 Yakıt Hücrelerinde Kullanılabilecek Yakıtlar	26
2.4.1 Dizel.....	27
2.4.2 Hidrojen	28
2.4.3 Doğalgaz	29
2.4.4 Metanol.....	30
2.3.3 Amonyak.....	30
2.5 Denizcilikte Yakıt Pilleri Kullanımına Yönelik Standartlar	31
3. BATARYALAR	33
4.YAKIT HÜCRESİ BATARYA HİBRİT SİSTEMİNİN M/V SULTANAHMET FERİBOTU İÇİN MODELLENMESİ VE SİMULASYONU.....	35

4.1 Seçilen Gemiye Ait Bilgiler	35
4.2 Yakıt Hücresi - Batarya Hibrit Sisteminin Tasarlanması.....	41
4.3 Yakıt hücresi ve Batarya Hibrit Sisteminin Simulink Eş Benzetimi	44
4.3.1 Yakıt hücresi sistemi	46
4.3.2 Batarya alt sistemi.....	48
4.3.3 DC/DC çevirici	50
4.3.1 Enerji yönetim sistemi.....	51
4.4 Simulasyon Çıktıları.....	54
5. SONUÇ	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	71



KISALTMALAR

AFC	: Alkaline Fuel Cell (Alkalin Yakıt hücresi)
DNVGL	: Det Norske Veritas Germanischer Lloyd
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
DWT	: Dead Weight Tonnage
DMFC	: Direct methanol fuel cell (Doğrudan metanol yakıt hücresi)
EEDI	: Energy Efficiency Design Index (Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi)
EEOI	: Energy Efficiency Operational Index
FCM	: Fuel Cell Module
GT	: Gross Tonnage
IGF	: International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels
IMO	: International Maritime Organisation (Uluslararası Denizcilik Örgütü)
KOH	: Potasyum Hidroksit
LNG	: Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz)
MARPOL	: Marine Pollution Regulation (Denizlerin Gemiler Tarafından Kirlenmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Sözleşme)
MCFC	: Molten Carbonate Fuel Cell (Molten Karbonat yakıt hücresi)
NO_x	: Azot oksit
PAFC	: Phosphoric Acid Fuel Cell (Fosforik asitli yakıt hücresi)
PEMFC	: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Proton değişim membranlı yakıt hücresi)
RoRo	: Roll on-Roll off Ship
SEEMP	: Ship Energy Efficiency Management Plan (Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı)
SMR	: Steam Reforming
SOFC	: Solid Oxide Fuel Cell (Katı oksit yakıt hücresi)
SO_x	: Kükürt oksit
VOC	: Uçucu organik bileşik



SEMBOLLER

A	: Amper
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
kW	: kilowatt
V	: Volt
m	: metre
mm	: milimetre
kg	: kilogram
sn	: saniye
L	: endüktans
C	: kapasitör
R	: direnç
T	: periyot
f	: frekans
D	: çalışma oranı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : En dikkat çekici araştırma projelerine genel bir bakış (Tronstad ve diğ, 2017; Markowski ve Pielecha, 2019; De-Troya ve diğ, 2016b)	16
Çizelge 3.1: Dört popüler pil tipinin teknik özellikleri (Wu ve diğ, 2020), (Bassam ve diğ, 2016), (Y. N. Wang, 2018).	33
Çizelge 4.1: M/V Sultanahmet gemisinin teknik özellikleri.....	36
Çizelge 4.2: M/V Sutanahmet gemisinin sevk sisteminin teknik özellikleri.....	37
Çizelge 4.3: ES5-YA8AAN yakıt hücresinin teknik bilgileri(Url-6).....	46
Çizelge 4.4: Corvus Dolphin Power batarya modelinin teknik özellikleri(Url-7)	49
Çizelge 4.5: Dizel makine ve hibrit sisteminin 24 saatlik yakıt tüketimleri ve yakıt masrafları (Url-6 ; Ur l-7)	62



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Alkalın yakıt hücresinin çalışma prensibi (Url-1)	8
Şekil 2.2 : Proton geçirgen zarlı yakıt hücresinin çalışma prensibi(Url-1).	10
Şekil 2.3 : Doğrudan metanol yakıt hücresinin çalışma prensibi(Url-2).	11
Şekil 2.4 : Fosforik asit yakıt hücresinin çalışma prensibi (Url-1)	12
Şekil 2.5 : Molten karbonat asit yakıt hücresinin çalışma prensibi (Url-1).....	14
Şekil 2.6 : Katı oksit yakıt hücresinin çalışma prensibi (Url-1).....	15
Şekil 2.7 : Viking Lady gemisi yakıt pilleri montajı (Tronstad ve diğ, 2017).....	17
Şekil 2.8: Zemship projesinin sevk sisteminin çalışma prensibi (De-Troya ve diğ, 2016).....	19
Şekil 2.9 : Yolcu gemisi Nemo H ₂ (Url-3).....	20
Şekil 2.10: Yakıtların gravimetrik enerji yoğunluklarına genel bir bakış (Metkemeijer ve Achard, 1994 ; Van Biert ve diğ, 2016b ; Durbin ve Malardier-Jugroot, 2013)...	27
Şekil 2.11 :Yakıtların hacimsel enerji yoğunluklarına genel bir bakış (Metkemeijer ve Achard, 1994 ; Van Biert ve diğ, 2016b ; Durbin ve Malardier-Jugroot, 2013)	27
Şekil 4.1 : Sultanahmet arabalı feribotu.....	35
Şekil 4.2 : Sultanahmet arabalı feribotunun çalıştığı sabit rota(Url-5).....	36
Şekil 4.3 : Sultanahmet gemisinin sevk sistemi(Mitsunishi,2008).....	38
Şekil 4.4 : Mitsubishi S6R2MPTA makinesinin ölçüleri(cm).....	38
Şekil 4.5 : Makine dairesi yerleşim planı.....	38
Şekil 4.6 : Tank yerleşim planı.....	39
Şekil 4.7 : Kalkış manevrası yük dağılımı.....	40
Şekil 4.8 : Seyir yük dağılımı	40
Şekil 4.9 : Yanaşma manevrası yük dağılımı.....	41
Şekil 4.10 : Tasarlanan elektrik blok diyagramı.....	42
Şekil 4.11 : Yakıt hücresi ve bataryaların çalışma senaryoları	43
Şekil 4.12 : Yakıt hücresi ve batarya hibrit sisteminin Simulink eş benzetimi.....	45
Şekil 4.13 : Simulink/MATLAB ortamındaki yakıt hücresi modeli.....	47
Şekil 4.14 : Simulink/MATLAB ortamındaki batarya modeli.....	49
Şekil 4.15 : Simulink/MATLAB ortamındaki boost tipi tek yönlü DC-DC dönüştürücü modeli.....	50
Şekil 4.16 : Klasik PI kontrol enerji yönetimi stratejisi.....	51
Şekil 4.17 : Tasarlanan hibrit sistemin PI kontrol enerji yönetimi stratejisi.....	52
Şekil 4.18 : Tasarlanan hibrit sistemin PI kontrol enerji yönetimi stratejisi ve değerleri	53
Şekil 4.19 : Kalkış manevrası güç dağılımı	54
Şekil 4.20 : Yanaşma manevrası güç dağılımı	55
Şekil 4.21 : Seyir güç dağılımı.....	55

Şekil 4.22: Kalkış manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin NOx emisyon miktarları.....	56
Şekil 4.23 : Yanaşma manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin NOx emisyon miktarları.....	56
Şekil 4.24 : Seyir için yakıt hücresi ve dizel makinenin NOx emisyon miktarları.....	57
Şekil 4.25 : Kalkış manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin SOx emisyon miktarları.....	57
Şekil 4.26 : Yanaşma manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin SOx emisyon miktarları.....	58
Şekil 4.27 : Seyir için yakıt hücresi ve dizel makinenin SOx emisyon miktarları.....	58
Şekil 4.28 : Kalkış manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin CO ₂ emisyon miktarları.....	59
Şekil 4.29 : Yanaşma manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin CO ₂ emisyon miktarları.....	59
Şekil 4.30: Seyir için yakıt hücresi ve dizel makinenin CO ₂ emisyon miktarları.....	60
Şekil 4.31 : Kalkış manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin uçucu organik bileşik emisyon miktarları.....	60
Şekil 4.32 : Yanaşma manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin uçucu organik bileşik emisyon miktarları.....	61
Şekil 4.33: Seyir için yakıt hücresi ve dizel makinenin uçucu organik bileşik emisyon miktarları.....	61

BİR FERİBOT İÇİN YAKIT HÜCRESİ BATARYA HİBRİT SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE SİMULASYONU

ÖZET

Küresel ticaretin büyük bir bölümü daha ucuz olması, daha büyük tonajlarda yükün tek seferde taşınmasına müsaade etmesi ve dünyanın yaklaşık dörtte üçünün denizler ile kaplı olmasından dolayı denizcilik ile gerçekleştirilmektedir. Denizcilik sektöründe enerji ihtiyacı büyük çoğunlukla dizel oil ve fuel oil gibi fosil yakıtlar ile karşılanmaktadır. Sera gazı ve hava kirliliğine ilişkin sıkılaştırılmış uluslararası düzenlemeler, azalan fosil yakıt rezervleri ve yakıt fiyatlarındaki artış, gemi sahiplerini yenilenebilir çevre dostu enerjiyi tercih etmeye zorlamaktadır. Çeşitli alternatif yakıtların tüketilmesi, enerji verimliliğini temel alan farklı gemi tahrik sistemlerinin geliştirilmesi denizcilik sektörü için geleceğe dönük uzun vadeli çözüm yöntemlerindendir. Gemi kaynaklı emisyonları azaltmak için ; emisyonların en önemli kaynağı olan ana güç ünitesi dizel makinelerini daha temiz enerji üretebilen güçlü alternatiflerden biri olan yakıt hücreleri ile değiştirmek bu yöntemlerden biridir. Feribot tipi gemiler, uzun mesafe seyreden ticari gemilere göre alternatif yakıtların ve sistemlerin denenmesi konusunda daha esnek olur. Bu, özellikle yakıt mevcudiyetinin daha az riskle güvence altına alınabileceği yerel sularda çalışan feribotlar için geçerli olabilir. Yakıt hücresi sistemi, gelecek vaat eden teknolojilerden biri olarak görülüyor. Gemilerin yapısı ve çalışma şekli nedeniyle, gemilere tek bir enerji formu kullanılarak güç verilmesi risklere neden olabilecek bir durumdur ve bu nedenle tek bir enerji kaynağının kullanılması tatmin edici bir çözüm değildir. Tek bir enerji kaynağının eksikliklerini gidermek için çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları (örneğin, hidrojen yakıt hücreleri, güneş enerjisi, piller, süper kapasitörler, vb.) bir arada kullanılabilir.

Yakıt hücreleri, yakıtlardaki kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren, yüksek verim ve düşük çevresel etki ile elektrik üreten elektrokimyasal cihazlardır. Yakıt hücresi teknolojisi, elektrik üretmek için oksijen ve hidrojen moleküllerinin bazik elektrolitik özelliklerini kullanır. Elektronların moleküller arasında transferi, doğru akım (DC) gücü sağlamak için kullanılır. Sağlanan elektrik gücü, hem oksijen hem de hidrojen akışları korunduğu ve sabit olduğu sürece devamlı olacaktır. Bu sistem tarafından üretilen tek atık yan ürün sudur.

Yakıt hücre çeşitleri ve daha önce yapılan yakıt hücrelerinin gemilerdeki uygulamaları incelendiğinde katı oksit yakıt hücresi (SOFC) çeşitinin deniz şartlarına uygun olabilecek seçeneklerden biri olduğu görülmüştür. Yüksek hidrojen üretim maliyeti, hidrojen istasyonlarının kısıtlılığı ve hidrojenin depolanmasındaki zorluklardan dolayı gemilerde kullanım uygunluğu hidrojene göre daha fazla olan sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) çalışmamızda yakıt olarak seçilmiştir. Yakıt pillerinin zayıf dinamik tepki karakteristiği ve yavaş başlama süresine sahip olmalarından dolayı yüke kararlı güç sağlamak için bataryalar ile desteklenmiştir. Bu çalışmada ana güç kaynağı olarak SOFC kullanan ve bataryalarla hibritlenmiş bir güç ünite sistemi tasarlanmıştır. Matlab simulink programı kullanılarak yapılan uygulamada aktif bir gemiden alınan verilerle sistem yük dağılımları, yakıt tüketimi, emisyon miktarları gibi parametreler açısından incelenmiştir ve sayısal sonuçlar elde edilmiştir. M/V Sultanahmet arabalı feribotuna ait rota, yakıt tüketimi ve emisyon bilgileri 10.02.2022 tarihinde Eskihisar-Topçular arasında yaptığı seyir, yanaşma ve kalkış manevralarına eşlik edilerek elde edilmiştir. Kaydedilen veriler yapılan çalışmada kullanılmıştır. Geminin operasyon güç profili incelenerek gerekli güç çıkışını sağlayacak SOFC ve manevralarda gerçekleşen güç dalgalanmalarını tamponlamak için lityum iyon (Li-Ion) bataryalar seçilmiştir.

Geminin seyir sürecinden, yanaşma ve kalkış manevralarından alınan kesit örnekler ile tasarlanan hibrit sistemin durumu analiz edilmiştir. Geminin seyir ve manevralarını içeren üç farklı enerji ihtiyaç durumu belirlenmiş ve yakıt hücresi ile bataryaların çalışma şekilleri koordine edilmiştir. Yanaşma ve kalkış manevralarında meydana gelen güç zirvelerini yakıt pilleri ve bataryalar birlikte karşılamaktadır. Manevra boyunca enerji talebindeki ani düşüşlerde yakıt pilleri tarafından üretilen fazla enerji bataryalar tarafından depolanmaktadır. Seyir sürecinde ise yakıt pilleri optimum çalışma şartlarına ulaşmış olup gerekli enerji talebinin büyük kısmını tek başına karşılamaktadır.

Tasarlanan sistem ile sülfür, azot ve uçucu organik bileşik emisyon miktarlarında dizel makinelerle kıyasla yaklaşık %99'dan ve karbondioksit (CO_2) emisyon miktarında ise %40' den fazla düşüş olacağı hesaplanmıştır. Bataryalar ve yakıt pillerinden oluşan hibrit sistemde hareketli parça bulunmadığı için gürültü kirliliği oluşmamaktadır. Dizel makinelerinin gürültü seviyeleri ile kıyas edildiğinde yüksek performansta sessiz çalıştıkları sonucuna varılır.

Yapılan alışma sonucu dūřuk emisyon miktarı, sessiz çalışma, daha az operasyonel ve periyodik bakım harcamaları, sistemdeki insan faktöründen kaynaklanan riskin azaltılması ve dūřuk iř gücü ihtiyacı ile daha fazla finansal kazanç sağlanması gibi avantajlar sağlayacaktır.Yakıt hücrelerinin gemilerde kullanımı henüz pilot uygulamalar ve deneme aşamalarındadır.





MODELING AND SIMULATION OF FUEL CELL BATTERY HYBRID SYSTEM FOR A FERRY

SUMMARY

Almost all of the global trade is carried out by maritime, since it is cheaper, allows larger tonnages to be transported at once. The energy need in the maritime sector is mostly met by fossil fuels such as diesel oil and fuel oil. Tighter international regulations on greenhouse gas and air pollution, dwindling fossil fuel reserves and rising fuel prices force shipowners to opt for renewable environmentally friendly energy. The use of various alternative fuels and the development of different ship propulsion systems based on energy efficiency are long-term solution methods for the maritime industry.

To reduce ship-sourced emissions; replacing the main power unit diesel engines, which is the most important source of emissions, with fuel cells, which is one of the powerful alternatives that can produce cleaner energy, is one of these methods. Ferry-type vessels are more flexible in testing alternative fuels and systems than long-distance commercial vessels. This may be especially true for ferries operating in local waters where fuel availability can be assured with less risk. The fuel cell system is seen as one of the promising technologies. Due to the nature of ships and the way they work, powering ships using a single form of energy is a risky situation, and therefore using a single energy source is not a satisfactory solution. Various renewable energy sources (eg, hydrogen fuel cells, solar energy, batteries, supercapacitors, etc.) can be used together to address the shortcomings of a single energy source.

Fuel cells are electrochemical devices that convert the chemical energy in fuels directly into electrical energy and produce electricity with high efficiency and low environmental impact. Fuel cell technology uses the basic electrolytic properties of oxygen and hydrogen molecules to generate electricity. The transfer of electrons between molecules is used to provide direct current (DC) power. The electrical power supplied will be continuous as long as both the oxygen and hydrogen flows are maintained and constant. The only waste by-product produced by this system is water.

When the fuel cell types and the applications of the previously made fuel cells in ships are examined, it is seen that the solid oxide fuel cell (SOFC) type is one of the options that can be suitable for sea conditions. Due to the high cost of hydrogen production, the limitations of hydrogen stations and the difficulties in storing hydrogen, liquefied natural gas LNG, which has a higher maturity for use in ships than hydrogen, was chosen as the fuel in our study. Fuel cells are supported by batteries to provide stable power to the load due to poor dynamic response characteristics and slow start-up time. In this study, a power unit system using SOFC as the main power source and hybridized with batteries is designed.

In the application made by using the Matlab simulink program, the system was examined in terms of parameters such as load distributions, fuel consumption, emission amounts with the data taken from an active ship, and numerical results were obtained.

The route, fuel consumption and emission information of the M/V M/V Sultanahmet car ferry were obtained from the Istanbul Sea Buses operator.

By examining the operational power profile of the ship, SOFC to provide the required power output and lithium-ion (Li-Ion) batteries to buffer power fluctuations during maneuvers were selected.

The situation of the designed hybrid system has been analyzed with cross-sectional samples taken from the ship's cruising process, berthing and take-off maneuvers.. Three different energy needs, including the navigation and maneuvers of the ship, were determined, and the operating modes of the fuel cell and batteries were coordinated.

Fuel cells and batteries together meet the power peaks that occur during docking and take-off maneuvers. During the maneuver, the excess energy produced by the fuel cells is stored by the batteries in sudden decreases in energy demand. During the cruising process, fuel cells have reached optimum operating conditions and meet the majority of the required energy demand on their own. With the designed system, it has been calculated that there will be a decrease of approximately 99% in the amount of sulfur, nitrogen and volatile organic compounds compared to diesel engines, and a decrease of more than 40% in the amount of carbon dioxide (CO₂) emissions.

Since there are no moving parts in the hybrid system consisting of batteries and fuel cells, noise pollution does not occur. When compared to the noise levels of diesel engines, it is concluded that they operate silently at high performance.

In order for fuel cells to be used as an energy source on ships, "Gas or Other Fuels with Low Flash Points", which is one of the documents containing criteria and standards such as tank type, fuel safety requirements such as fuel pipes, some new conditions for the training of seafarers working on the ships in question, which are the requirements specific to the fuel to be used. The conditions of the "International Code for the Safety of Ships Using (IGF Code)" code must be met. As a result of the study, it is predicted that it will provide advantages such as low emission amount, quiet operation, less operational and periodic maintenance expenditures, reducing the risk caused by the human factor in the system, and providing more financial gain with low labor requirement.

Fuel cell propulsion technology has a higher investment cost compared to diesel machinery technology. Fuel cells do not have sufficient technological maturity for use in sea conditions. The use of fuel cells on ships is still in the pilot applications and trial stages.

1. GİRİŞ

Dünya enerji ihtiyacı nüfus artışına, sanayileşmeye ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak hızla artmaktadır. Bu ihtiyacın önemli bir bölümü fosil enerji kaynakları (petrol, doğalgaz, kömür) ile karşılanmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan emisyonlar küresel ısınma, iklim değişikliği ve sera etkisi gibi oldukça ciddi problemlere yol açmaktadır. Bu problemlerin önüne geçebilmek için elektrik üretimi, ulaşım, sanayi, denizcilik ve tarım gibi çeşitli enerji sektörlerine sera gazı emisyonu konusunda katı düzenlemeler uygulanmaktadır. Denizcilik sektörü de fosil yakıt tüketiminden kaynaklı çevreye olan etkisini azaltmak için büyük bir baskı altındadır. Deniz taşımacılığı, uluslararası ticaretin %80-90'ını karşılayan küresel ekonominin önemli bir parçasıdır (Nations ve Convention, n.d.). Gemi kaynaklı egzoz emisyonlarını başlıca; karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x), kükürt oksitler (SO_x) ve uçucu organik bileşikler olan hidrokarbonlar (VOC) oluşturmaktadır. Bu emisyonlar 2012 yılında 977 milyon ton iken %9,3 artarak 2018 yılında 1076 milyon tona yükselmiştir. Oransal olarak en fazla paya sahip olan CO₂ emisyonları 2012 yılında 962 milyon tondur ve bu değer 2018'de %9,3 artarak 1056 milyon tona ulaşmıştır. İnsan faaliyetli kaynaklı küresel sera gazı emisyonları içinde denizcilik emisyonlarının payı 2012'de %2,76 iken 2018'de %2,89'a yükseldi (Environment ve diğ, 2020).

Denizcilik sektöründe çevresel duyarlılığa ilişkin en önemli uluslararası sözleşme, Denizlerin Gemiler Tarafından Kirletilmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Sözleşme'dir. İngilizce Marine Pollution teriminden türetilmiştir. Kısaca MARPOL 73/78 olarak ifade edilir. Bu sözleşme gemi kaynaklı çevre kirliliğinin önüne geçilebilmesi adına kirliliği önleme, atıkların depolanması ve nasıl bertaraf edileceği hakkında 6 farklı alt düzenlemeyi içermektedir.

Ek I: Petrolden Oluşan Kirletilmenin Önlenmesi İçin Kurallar

Ek II: Dökme Zehirli Sıvı Maddelerden Oluşan Kirletilmenin Kontrolü İçin Kurallar

Ek III: Paketlenmiş Olarak Taşınan Zehirli Sıvı Maddelerden Oluşan Kirletilmenin Kontrolü İçin Kurallar

Ek IV: Gemi Pis Sularından Oluşan Kirlenmenin Kontrolü İçin Kurallar

Ek V: Gemilerden Atılan Çöplerden Kirlenmenin Önlenmesi İçin Kurallar

Ek VI: Gemi Baca Gazlarından Kirlenmenin Önlenmesi İçin Kurallar

1997 Kyoto Protokolü ile değişikliklere uğrayan MARPOL 73/78 Sözleşmesi'ne "Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesi için Kurallar" isimli Ek VI eklenmiş ve 19 Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir. 1997'de kabul edilen MARPOL Ek VI, gemilerden salınan gemi egzoz gazında bulunan SO_x ve NO_x ide içeren hava kirleticilerine kısıtlamalar getirir. MARPOL Ek VI ayrıca gemide yakma işlemleri sonucu oluşan ve tankerlerde bulunan uçucu organik bileşiklerin emisyonlarını da düzenler. Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization (IMO)), Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)) ve Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi'nin (Energy Efficiency Design Index (EEDI)) yayımlanması da dahil olmak üzere konuyla ilgili uluslararası düzenlemeler geliştirmiştir. Bu düzenlemeler ile gemilerden salınan emisyon miktarlarına büyük ölçüde katı sınırlamalar getirerek denizcilik endüstrisini gelecekte fosil yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltmaya yönlendirmeyi amaçlamaktadır.

Gemi kaynaklı egzoz emisyonlarının azaltılmasına yönelik uluslararası kısıtlamalar denizcilik endüstrisini, gemilerde kullanılan geleneksel petrol bazlı gemi yakıtlarına alternatif çözümler üretmeye ve yeni sistemler geliştirerek emisyonların azaltılması için çalışmalar yapmaya yönlendirmektedir. Kısa vadeli çözüm yöntemlerinden egzoz gazı temizleme sistemleri ve kükürt oranı düşük fosil yakıtların kullanılması amaçlanan emisyon seviyelerine düşürülmesi için kullanılmaya devam edilmektedir. Bu hedeflere ulaşabilmek için çeşitli alternatif yakıtların tüketilmesi, enerji verimliliğini temel alan farklı gemi tahrik sistemlerinin geliştirilmesi denizcilik sektörü için geleceğe dönük uzun vadeli çözüm yöntemlerindendir. Hibrit feribotlar, bataryalar tarafından enerji talebi karşılanan gemiler, biyoyakıtları veya hidrojen yakıt hücrelerini deneyen gemiler, rüzgar destekli tahrik ve diğer birkaç fikir güncel araştırma konularındandır. IMO 2018'de gemilerden kaynaklanan emisyonlarının azaltılmasına ilişkin bir başlangıç stratejisi benimsedi. Bu stratejinin amaçlarından biri olan karbondan arındırma için alternatif sevk sistemlerine ve yakıtlara olan ihtiyaç doğrultusunda yakıt hücresi kullanan gemilerin geliştirilmesi yürütülen önemli çalışmaların bir parçasıdır.

Emisyon azaltma yöntemlerinden biri olarak önerilen hibrit sistemlerin denizcilik sektöründe kullanımı çok yaygın olmamasına rağmen diğer sektörlerde kullanım oranı oldukça fazladır. Hibrit sistemler, birden fazla sistemin bir arada kullanılarak sürekli veya kritik anlarda enerji talebinin karşılanması için kurulan sistemlerdir. Hibridizasyon bir geminin konfor, emisyon, güvenlik, yakıt ekonomisi gibi önemli konularında iyileştirmeler yapılmasını sağlayan birincil güç kaynağına ikincil yada daha fazla güç kaynağının ilave edilmesine verilen addır. Sistemin güç değişimlerini optimize etmesinde ikincil bir güç kaynağının kullanılması oldukça etkilidir ayrıca gemiye alternatif güç kaynakları sunarak yedeklilik de sağlamaktadır. Hibrit sistemlerin gemilere uygulanması konusunda literatürde yapılan çalışmalardan bazıları şunlardır. Güney Kore'nin Geoje Adası'nda tasarlanmış olan yeşil gemi prototipini Lee ve arkadaşları ayrıntılı bir şekilde çevresel ve ekonomik açıdan analiz etmişlerdir (Lee ve diğ, 2013). Yaptıkları araştırmalar ve analizler sonucu dizel, batarya ve güneş enerjisinin bir arada kullanıldığı hibrit sistemin önemli tasarruf oranlarını ortaya çıkarttığını ifade etmişlerdir. Diab ve arkadaşları güneş enerjisi, dizel ve batarya hibrit enerji sistemi ile ilgili çalışmalarını Çin'de çalıştırılan tanker gemilerinde güneş enerjisi uygulaması projesini esas alarak yapmışlardır (Diab ve diğ, 2016). Proje kapsamında 300 kilowatt (Kw) kapasiteli fotovoltatik panel, 2000 kW gücündeki dizel jeneratör ve 10 adet bataryadan oluşan hibrit sistemin gemide 25 yıl kullanılması sonunda toplamda sera gazı emisyonunun 9.735.632,5 kilogram (kg) azaltılacağı ve 2.010.475 litre yakıt tasarrufu sağlanacağını hesaplamışlardır. Wen ve arkadaşları Fourier analizini kullanarak tasarladıkları matematiksel bir model ile jeneratörler, güneş enerjisi ve enerji depolama ünitelerinden oluşan hibrit enerji sistemine sahip bir geminin kötü hava koşullarında güneş enerjisi ve enerji depolama ünitelerinden en yüksek seviyede yarar görebileceğini göstermişlerdir (Wen ve diğ, 2017). Liu ve arkadaşları güneş enerjisi, enerji depolama sistemi ve jeneratör ünitelerinden oluşan hibrit enerjili bir gemi için tasarladıkları matematiksel bir model ile meteorolojik koşulları dikkate alarak güneş enerji ünitesinin elektrik üretimini analiz etmişlerdir. Bu model ile farklı senaryolar belirleyerek güneş enerjisinden elde edilecek elektrik enerjisi parametrelerini incelemişlerdir. Önerdikleri enerji depolama sistemi ile hibrit sistemin çıkış gücü kalitesini artırmayı hedeflemişlerdir (Liu ve diğ, 2017).

A.Buonomano ve arkadaşları, katı oksit yakıt hücreleri (Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)) ve gaz türbini teknolojilerinin entegrasyonuna dayanan hibrit enerji sistemlerini sayısal simülasyonlar, deneysel analizler ve termo-ekonomik optimizasyonlar gibi çok sayıda yaklaşım kullanarak kapsamlı bir incelemesini yapmışlardır (Buonomano, Calise,

Dentice, ve diğ, 2015). V.Giap ve arkadaşları bir ham petrol tankerine katı oksit yakıt hücresi ve gaz motorları ünitelerinden meydana gelen hibrit elektrikli tahrik sisteminin uygulanmasını araştırmış, karbondioksit emisyonunu nicelleştirmiş ve daha fazla azalma elde etme potansiyelini tahmin etmiştir (Giap ve diğ, 2020). L.van Biert SOFC ve dizel jeneratör kombinasyonlu bir hibrit sisteminin mevcut jeneratör sistemlerine kıyasla daha düşük yakıt tüketimi sağlayabileceğini ve daha iyi bir gelişme beklentisine sahip olduğunu öne sürmüştür (Van Biert ve diğ, 2016c). Francesco Baldi sıvılaştırılmış doğal gaz (Liquefied Natural Gas (LNG)) kullanan SOFC gemilerinin, sera gazı emisyonlarını azaltmanın en etkili yollarından biri olduğunu %34'e kadar azaltabileceğini öne sürmüştür (Baldi ve diğ, 2020). Rafiei gemiler için yakıt hücresi ve bataryalardan oluşan bir hibrit sistem tasarlamıştır. Ana güç kaynağı olarak yakıt pillerini kullanmayı ve yakıt pillerinin hızlı yük değişimi sorununu tolere etmek için ikincil güç kaynağı olarak bataryaları kullanmayı önerdi ve sıfır emisyonlu bir feribot yapısı inşa etti (Rafiei ve diğ, 2021).

Gemilerin yapısı ve çalışma şekli nedeniyle, gemilere tek bir enerji formu kullanılarak güç verilmesi risklere neden olabilecek bir durumdur ve bu nedenle tek bir enerji kaynağının kullanılması tatmin edici bir çözüm değildir. Tek bir enerji kaynağının eksikliklerini gidermek için çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları (örneğin, hidrojen yakıt hücreleri, güneş enerjisi, piller, süper kapasitörler, vb.) bir arada kullanılabilir. Çok enerjili bir hibrit güç sistemi, yalnızca ekonomi ve çevre koruma gerekliliklerini karşılamakla kalmaz, aynı zamanda herhangi bir enerji kaynağını tek başına kullanmanın doğasında bulunan sınırlamalarının da üstesinden gelebilir.

Çevresel kısıtlamalar ve ekonomik nedenlerden dolayı gemiler için yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama sistemleri uygulamalarına yönelim artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik enerji, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisi olarak sınıflandırabiliriz. Meteorolojik koşullara, coğrafi şartlara ve diğer dış etmenlere bağımlı olarak enerji kesintisine neden olabilen güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji çeşitleri gemilerin talep ettiği sürekli enerjiyi karşılayamayabilir. Sürdürülebilirliği daha etkin olan hidrojen enerjisini kullanan yakıt hücreleri denizcilik sektörü için umut verici seçeneklerden birisi olmuştur.

Manevralar, görev spesifikasyonları ve diğer çevresel etkiler gibi öngörülemeyen olaylar gemilerde yük profilinin sık sık dalgalanmasına neden olur. Yakıt hücreleri kararlı durum çalışması sırasında güç talebini takip etme konusunda iyi bir yeteneğe

sahipken, hızlı yük değişimleri ve geçici güç taleplerine yanıt aşamasında nispeten zayıftır (Edition ve Virginia, 2004). Yakıt hürelerinin kurulum maliyeti yaygın olarak kullanılan içten yanmalı makinelere göre yüksektir. Bu nedenlerden dolayı toplam güç talebini karşılamak için yakıt hücrelerini bir enerji depolama sistemi ile hibritleştirmek uygundur. Enerji depolama sistemlerinde genellikle kurşun-asit (LA) pil ve Li-ion pil kullanılmaktadır. Li-ion piller, enerji yoğunluğu, enerji verimliliği ve kullanım ömrü açısından LA pillerden daha iyi performansa sahiptir ve bu avantajları sayesinde bugün ulaşım sektöründe en büyük pazar payını kapsıyor (Systems ve Maritime, 2020). Bu yüzden Li-ion pil teknolojisi hibrit bir gemi için daha uygundur.

Bu çalışmada ana güç kaynağı olarak katı oksit hidrojen yakıt hücresi kullanan ve li-ion pillerle desteklenmiş hibrit bir güç sistemi tasarlanmıştır. Matlab simulink programı kullanılarak yapılan uygulamada aktif bir gemiden alınan verilerle sistem yük dağılımları, yakıt tüketimi, emisyon miktarları gibi parametreler açısından incelenmiştir ve sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayısal veriler doğrultusunda önerilen tasarı ile mevcut sistemin karşılaştırmaları yapılmıştır.

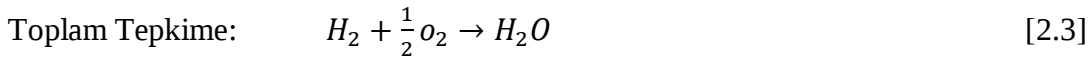
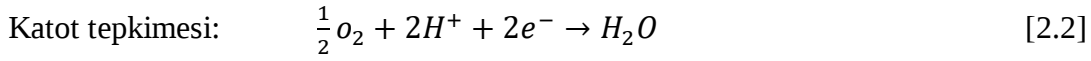
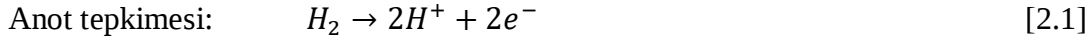


2. YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri, yakıtlardaki kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren, yüksek verim ve düşük çevresel etki ile elektrik üreten elektrokimyasal cihazlardır. Yakıt hücrelerinde yanma ve mekanik iş basamakları bulunmaz. Bu yüzden Carnot verimliliği gibi ısı motorlarının termodinamik sınırlamaları ile sınırlı değildir. Ayrıca, yanma işlemi gerçekleşmediği için minimum miktarda kirlenici ile güç üretir. Yakıt hücreleri ana yapısı itibarıyla klasik piller gibi; anot, katot ve elektrolitten oluşur. İki elektrot arasında elektrolit vardır. Anot elektrodu yakıt elektrodu, katot elektrodu da oksijen elektrodu olarak isimlendirilebilir. Kullanılan elektrolit türüne göre yakıt pillerinin çeşidi ve çalışma sıcaklık aralığı değişiklik gösterir.

Bir elektrokimyasal dönüşüm cihazı olan yakıt hücresinin çalışma prensibi oldukça basittir. Yakıt pillerinde hidrojen hava ile birleşip tepkimeye girer bu reaksiyon sonucunda ise elektrik, ısı ve saf su üretilmiş olur. Yakıt hücresine anottan hidrojen, katottan ise hava yani oksijen girmektedir. Hidrojen, yakıt hücresinin katmanlarından

geçerken proton ve elektronlarına ayrılmaktadır. Elektron geçişini engelleyen elektrolit, yalnızca protonların katot elektrotuna ulaşmasına izin vermektedir. Anot ucunda kalan elektronlar ise pozitif yüklü iyonlarla tekrar birleşme eğiliminde olduğu için bunlarda harici bir devre ile katot tarafına akarlar. Katotta harici devreden gelen elektron ve hidrojen protonları oksijenle birleşerek tek atık olan suyu oluşturmaktadır. Bu işlemin tepkimeleri aşağıdaki gibidir.



Elektrik üretimini, sürekli olarak yakıt beslendiğinde sürdürebilen yakıt pilleri bir güç üretim sistemi olarak düşünülebilir. Yakıt pilleri geleneksel sistemlere göre aşağıdaki üstünlüklere sahiptir.

- Hareketli parçalar içermediği için mekanik kayıplar olmaz. Enerji üretim verimi oldukça yüksektir.
- Çevresel etkileri düşüktür (düşük sera gazı emisyonu , sessiz çalışma).
- Çeşitli yakıtlarla kullanılabilir (doğalgaz, metanol).
- Egzoz (atık) ısısının yeniden kullanım imkanı vardır.
- Modüler yapıdadır. Yakıt pilleri arzu edilen çıkış gücüne ulaşılmıncaya kadar bir yığın hâline getirilebilmeleri nedeniyle çok yönlü bir kullanıma sahiptir.
- Montaj süresi kısadır.
- Çok yüksek miktarda soğutma suyu (deniz suyu gibi) gerektirmez.
- Hareketli parçaları olmaması nedeniyle geleneksel güç kaynaklarından daha güvenilir bir sistemdir.
- İşletim karakteristiği uygulamada kolaylıklar sağlar.
- Geleceğe yönelik olarak gelişme potansiyeli oldukça yüksektir.

Tek bir hücrenin gerilimi 1 volttan daha azdır. İhtiyaç duyulan elektririk enerjisinin üretilebilmesi için birden fazla yakıt hücresinin seri yada paralel bağlanarak kullanılması gerekmektedir. Yakıt hücrelerinde üretilen akım doğru akımdır. İhtiyaç

duyulan elektrik türüne göre güç dönüştürücü aygıtlarla alternatif akıma dönüştürülerek kullanılabilir.

2.1 Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt pilleri elektrolit çeşitlerine, çalışma sıcaklıklarına, yakıt türlerine veya çalışma alanlarına göre sınıflandırılabilir. Yakıt hücrelerinin en yaygın sınıflandırması, hücrelerde kullanılan elektrolit tipine göre ve çalışma sıcaklığına göredir. Kullanılan elektrolit çeşidine göre bu yakıt hücreleri:

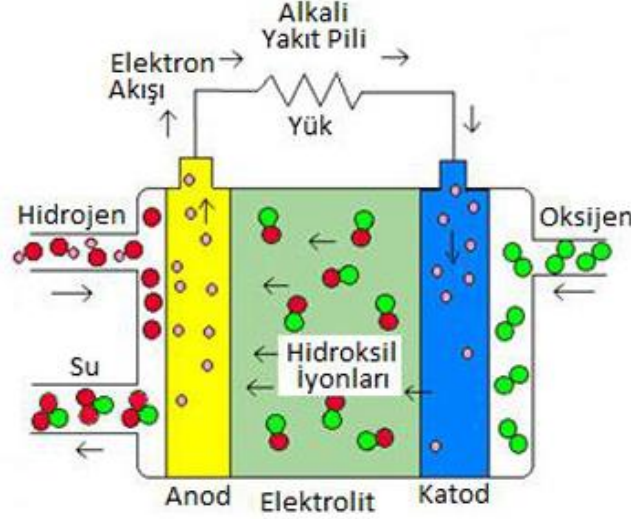
- Alkalın yakıt hücresi (Alkali Fuel Cell (AFC)),
- Proton değişim membranlı yakıt hücresi (Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEFC))
- Doğrudan metanol yakıt hücresi (Direct methanol fuel cell (DMFC))
- Fosforik asitli yakıt hücresi (Phosphoric Acid fuel cells (PAFC))
- Molten karbonat yakıt hücresi (Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC))
- Katı oksit yakıt hücresi (Solid Oxide Fuel Cell (SOFC))

50–250 °C çalışma sıcaklığı aralığına sahip düşük sıcaklıklı yakıt hücreleri PEMFC, AFC'yi içerir. PAFC, MCFC ve SOFC, 650–1000°C gibi yüksek sıcaklık aralığında çalışır.

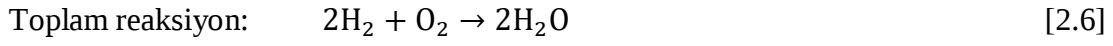
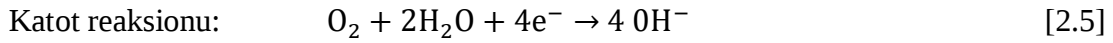
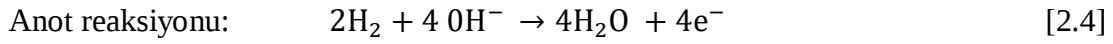
2.1.1 Alkalın yakıt hücresi

Alkalın yakıt hücreleri, 1960 başlarında geliştirilen ilk yakıt hücresi teknolojilerinden biriydi ve Apollo uzay aracında elektrik enerjisi üretmek için kullanılan yakıt hücresi çeşitidir. Uzay araçlarında kullanılmalarının bir diğer nedeni ise elektrik üretiminin yanı sıra içilebilir özellikte su ürettiyor olmasıdır. Ayrıca ilk yakıt hücresi tahrikli yolcu gemisi Hydra, 5 kW'lık bir AFC güçle tahrik edildi (Tronstad ve diğ, 2017) .

AFC'nin elektroliti alkalidir ve elektrot olarak anot için nikel ve katot için gümüş kullanılır. Bu yakıt hücreleri elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanır. İçerdiği KOH miktarına göre çalışma sıcaklığı değişir. %85 KOH içerenleri yüksek sıcaklıklarda (~250°C), %35–50 KOH içerenleri ise daha düşük (<120°C) sıcaklıklarda çalışır (Edition ve Virginia, 2004). Şekil 2.1'de alkalın yakıt hücresinin çalışma prensibi, iyonların ve elektriğin akışı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Alkalın yakıt hücresinin çalışma prensibi. (Url-1)



Yukarıdaki denklemlerde anot ve katotta gerçekleşen kimyasal tepkimeler gösterilmiştir. AFC düşük çalışma sıcaklığı ile güvenlik açısından avantaj sağlamaktadır. Düşük çalışma sıcaklığının diğer bir avantajı ise soğuk başlangıç sonucunda hızlı başlangıç süresidir. Su, tek yan ürünüdür ve başka emisyon oluşmaz. AFC'nin verimliliği, %70 değerlerine kadar yükselebilmektedir (Tronstad ve diğ., 2017).

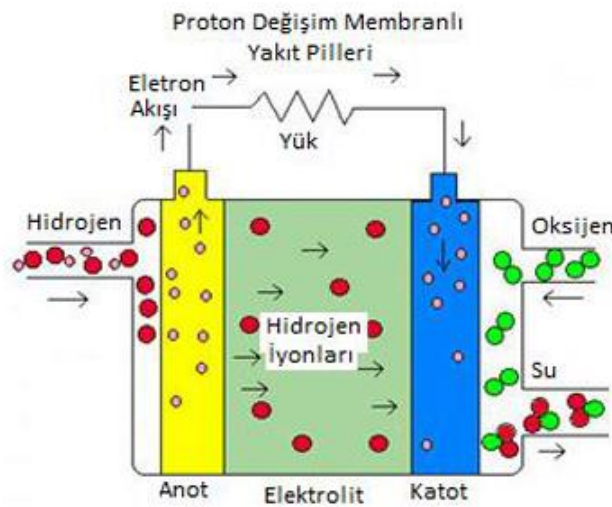
AFC için en büyük endişe CO_2 zehirlenmesidir. Yakıttaki CO_2 alkali elektrolit ile reaksiyona girer ve elektrolitin yapısını bozan potasyum karbonatı (K_2CO_3) oluşturur. Havadaki düşük miktarlardaki CO_2 dahil alkali yakıt pili için potansiyel bir zehirleyicidir.



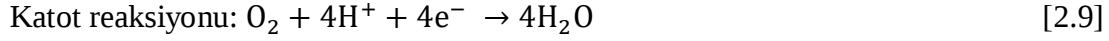
Bu nedenle AFC optimal bir aralıkta uzun bir süre çalışmak için saf oksijen ve saf hidrojen gerektirir. Hava kullanılacaksa CO_2 'nin uzaklaştırılması gereklidir ve hidrojen dışındaki diğer yakıtlarda önemli ölçüde saflaştırma olduğu sürece kullanılması mümkündür (Edition ve Virginia, 2004).

2.1.2 Proton değişim membranlı yakıt hücresi

Proton değişim membranlı yakıt hücresi 1960'ların başında General Electric tarafından icat edilmiştir. Katı polimer elektrolitli yakıt hücresi olarakta adlandırılır. Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde elektrolit olarak sadece protonların geemesine izin veren katı membranlar kullanılmaktadır. Bu yakıt hücresi, platin ile kaplanmış iki elektrotun arasına preslenmiş proton (hidrojen iyonu) geçirebilen bir katı elektrolitten oluşur. Buradaki elektrolit anot ile katot arasında bir gaz sütunu oluşturarak anottan katoda doğru hidrojen iyonlarının taşınmasını sağlar (Wang ve diğ, 2011). Membran, anot ve katotta kimyasal reaksiyonlar için katalizörlerle bağlantılıdır. Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı 50-100°C aralığındadır. Düşük sıcaklıklarda, elektrokimyasal reaksiyonu katalize etmek için platin kullanımı gereklidir (Mukerjee ve Yurtcan, 2015). Gaz difüzyon gözeneklerinin kuru kalması gerekirken ıslak bir membranın gerekliliği, 65–85°C'lik bir çalışma sıcaklığı gerektirir ve su yönetimini karmaşıklaştırır (Dai ve diğ, 2009). Düşük alışma sıcaklığının bir diğer dezavantajı, yakıt kirliliklerine karşı düşük toleranstır. Özellikle karbonmonoksit (CO), düşük sıcaklıklarda güçlü yüzey adsorpsiyonu nedeniyle katalizörü devre dışı bırakır (Franco ve diğ, 2009). Yakıtı neredeyse yalnızca yüksek saflıkta hidrojenle sınırlıdır. Doğal gaz gibi başka bir yakıt kullanılmak isteniyorsa, yakıt hidrojen üretmek için önce bir reform aşamasından geçmelidir (Tronstad ve diğ, 2017). şekil 2.2'de proton değişim membranlı yakıt hücresinin çalışma prensibi, iyonların ve elektriğin akışı gösterilmiştir.



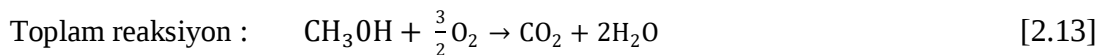
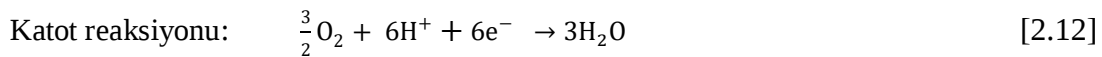
şekil 2.2 : Proton değişim membranlı yakıt hücresinin çalışma prensibi.(Url-1)

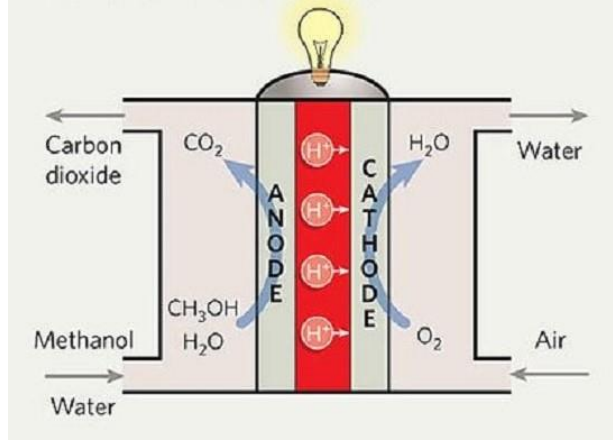


Bu yakıt hücresinin anot ve katodunda gerçekleşen kimyasal tepkimeler ve toplam reaksiyon sonucu tek atık olarak suyun oluştuğunu gösteren denklemler yukarıdadır. Düşük sıcaklıkta çalışma, hızlı başlamalarına (daha az ısınma süresi) olanak tanır ve sistem bileşenlerinde daha az aşınmaya neden olarak daha iyi dayanıklılık sağlar. Düşük çalışma sıcaklığı, yüksek güç yoğunluğu ve kolay ölçeklendirme, PEM yakıt hücrelerini özellikle otomobiller, otobüsler ve ağır hizmet kamyonları gibi araç uygulamalarında ve sabit taşınabilir birçok uygulama için gelecek umut vaat eden bir aday haline getiriyor (Wang ve diğ, 2011).

2.1.3 Doğrudan metanol yakıt hücreleri

Doğrudan metanol yakıt hücreleri, genellikle suyla karıştırılan ve doğrudan yakıt hücresi anotuna beslenen saf metanol ile çalışırlar (Alias ve diğ, 2020). Yapısal olarak proton geçirgen zarlı yakıt hücresi ile benzer şekilde proton geçirgen zar kullanırlar. Yakıt olarak metanolün ıslah edilmeden kullanılabilmesi için elektrotlar platin-rutenyum katalizörü içerir (Ramasamy ve diğ, 2021). Metanol, yüksek enerji yoğunluğuna sahip yakıtlardan biridir. Hidrojen ile karşılaştırıldığında standart sıcaklık ve basınçlarda depolanması, kullanımı daha kolaydır ve güvenlidir (Ong ve diğ, 2017). Metanol kullanımı CO₂ emisyonlarına yol açar (Tronstad ve diğ, 2017). DMFC, taşınabilir ve düşük güçlü elektrikli cihazlarda güç kaynağı olarak kullanılmaya uygun basit bir sistemdir (Soloveichik, 2014). DMFC normalde 50-120°C arasında çalışır. Şekil 2.3’de doğrudan metanol yakıt hücresinin çalışma prensibi, iyonların ve elektriğin akış şekli gösterilmiştir. Yakıt hücresinin anot ve katodunda gerçekleşen kimyasal tepkimeler denklem 2.11 ve denklem 2.12 ile gösterilmiştir.





Şekil 2.3 : Doğrudan metanol yakıt hücresinin çalışma prensibi.(Url-2)

Kolay depolama, düşük maliyet ve yüksek enerji yoğunluğu metanolün yakıt olarak kullanımının sağladığı avantajlardandır. Bu avantajlarının yanı sıra platin içeren katalizör gibi bazı bileşenlerinin yüksek maliyeti, DMFC'in ticarileştirilmesinin önündeki en büyük engeldir. Yüksek maliyetinin yanı sıra metanol geçişinden ve anottaki metanol oksitlenmesinin düşük hızda gerçekleşmesinden dolayı düşük güç yoğunluğu ve elektrik verimi diğer dezavantajlarıdır (Nacef ve Affoune, 2011). DMFC'nin verimliliği diğer yakıt hücresi türlerine kıyasla düşüktür, yaklaşık %20'dir (Tronstad ve diğ, 2017) .

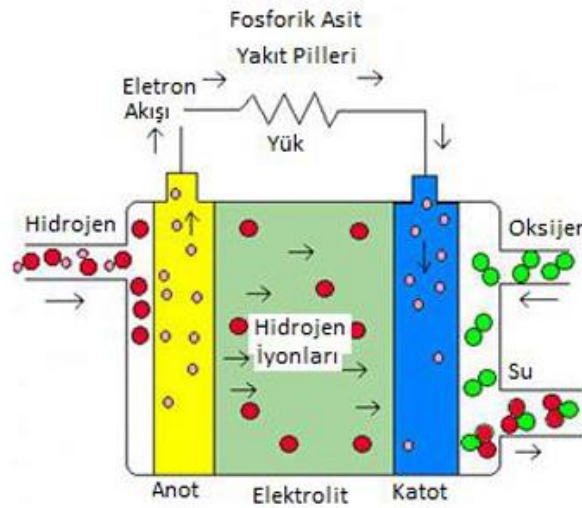
2.1.4 Fosforik asit yakıt hücresi

Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC), modern yakıt hücrelerinin "birinci nesli" olarak kabul edilir. En olgun hücre tiplerinden biridir ve ticari olarak ilk kullanılandır. Birinci nesil yakıt hücresi olan fosforik asitli yakıt hücresinde elektrolit olarak sıvı fosforik asit (Teflon bağlı bir silikon karbür matris içinde bulunur) kullanılır. Anot ve katod elektrotlarında platin kullanılır (Edition ve Virginia, 2004). PAFC çalışma sıcaklığı 200°C nin üzerinde olan yüksek sıcaklık yakıt hücrelerinin ilkidir. Daha yüksek çalışma sıcaklığı yakıt hücresinin %40 olan elektrik verimliliğini kojeneratif uygulamalar ile ısı geri kazanımı sayesinde toplam verimliliği %80'e kadar yükseltebilir (Tronstad ve diğ, 2017). Daha yüksek çalışma sıcaklığı , CO hassasiyetini de azaltır bu sayede hidrojene dönüştürülmüş fosil yakıtlardaki safsızlıklara karşı toleransı arttırır (De-Troya ve diğ, 2016). Bir reformer ve ısı geri kazanım sistemi ile LNG ve metanol gibi hidrokarbonların önce ayrı bir aşamada reforme edilmesi gerekir

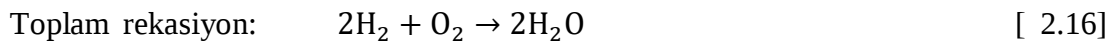
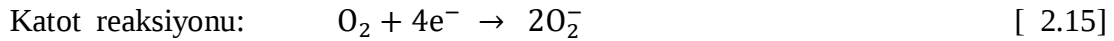
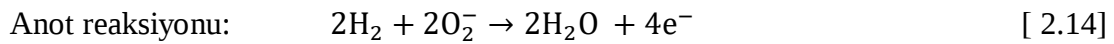
(Tronstad ve diğ, 2017). CO hassasiyetinin azalması gerekli platin yükünü azalmasına ve böylece maliyetin düşmesine sebep olur.

Fosforik asit yakıt hücresinde güç yoğunluğu diğer yakıt hücresi türlerine göre daha azdır. Bu ise daha ağır olmalarından ve daha fazla hacim kaplamalarından dolayıdır. Düşük güç yoğunluğu ve dayanıklılık sorunları PAFC'nin ticari başarısını sınırlamıştır (van Biert ve diğ, 2016a).

Anoda gönderilen hidrojen moleküllerinden elektronların ayrılması ile oluşan hidrojen iyonları fosforik asit elektrolitten ,elektronlar ise dış devreden katoda ulaşır.Burada oksijen ile bir araya gelen hidrojen iyonları ve elektronların reaksiyonu ile devre tamamlanır.Fosforik asit yakıt hücrelerinin çalışma prensibi Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Fosforik asit yakıt hücrelerinin anot ve katodunda gerçekleşen kimyasal tepkimeler denklem 2.14 ve denklem 2.15 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Fosforik asit yakıt hücresinin çalışma prensibi. (Url-1)



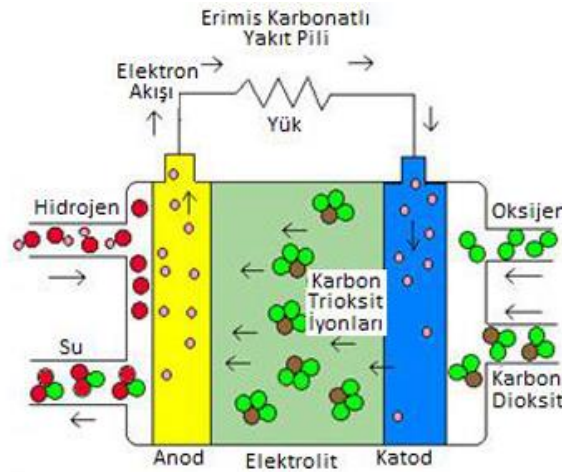
Bu tip yakıt hücresi tipik olarak sabit enerji üretimi için kullanılır, ancak bazı PAFC'ler şehir içi otobüsler gibi büyük araçlara güç sağlamak için kullanılmıştır.

2.1.5 Molten karbonat yakıt hücresi

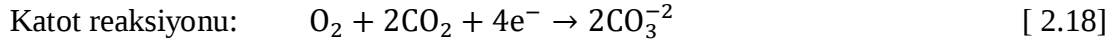
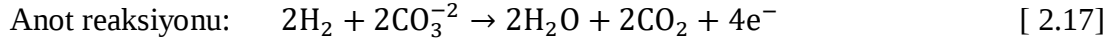
Molten karbonat yakıt hücreleri (MCFC) gözenekli bir yapıya sahip kimyasal olarak inert seramik lityum alüminyum oksit matrisinde süspanse edilmiş erimiş karbonat

tuzu karışımından oluşan bir elektrolit kullanan yüksek sıcaklıklı yakıt hücreleridir (Kulkarni ve Giddey, 2012). Çalışma sıcaklığı yaklaşık olarak 600°C ile 700°C arasındadır. 650°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalıştıkları için, anot ve katotta platin gibi pahalı katalizörler kullanmalarına gerek yoktur. Bu yüksek sıcaklık, etkili bir iyon iletkenliği sağlar (Tronstad ve diğ, 2017) . Yüksek sıcaklığın diğer bir avantajı ise doğal gaz, metan, biyogaz gibi yakıtların kullanımına esneklik sağlamasıdır. MCFC'ler bu yakıtları harici bir dönüştürücüye ihtiyaç duymadan yakıt hücresinin kendi bünyesinde bulunan dahili reform adı verilen bir işlemle hidrojene dönüştürürler (Kulkarni ve Giddey, 2012). Bu yakıt hücrelerinin elektrik verimliliği %50-60 civarındadır ancak yüksek çalışma sıcaklığı sayesinde atık ısının tekrar kullanılabilceği buhar türbinleri, gaz türbinleri gibi kojenerasyon sistemler ile toplam verimlilik %85'e ulaşabilir (Tronstad ve diğ, 2017; Baccioli ve diğ, 2021).

Elektrokimyasal reaksiyon, katotta karbonat (CO_3^{2-}) iyonunun oluşumunu ve erimiş karbonat karışımı yoluyla anoda taşınmasını içerir. Anotta karbonat iyonu, su ve CO_2 oluşturmak üzere hidrojen tarafından indirgenir. Üretilen elektronlar, reaksiyonu tamamlamak için dış devreden akar (Kulkarni ve Giddey, 2012). Molten karbonat yakıt hücrelerinin çalışma prensibi Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Molten karbonat yakıt hücrelerinin anot ve katodunda gerçekleşen kimyasal tepkimeler denklem 2.17 ve denklem 2.18 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Molten karbonat yakıt hücresinin çalışma prensibi.(Url-1)

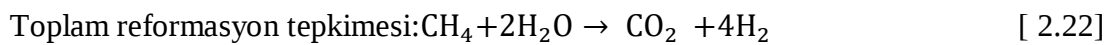
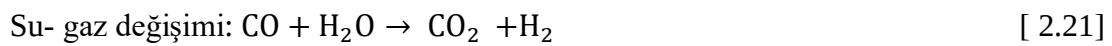
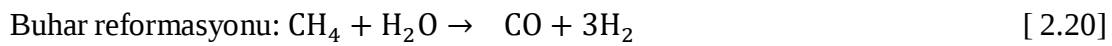


Mevcut MCFC teknolojisinin birincil dezavantajı dayanıklılıktır. Bu hücrelerin çalıştığı yüksek sıcaklıklar ve kullanılan aşındırıcı elektrolit, bileşen bozulmasını ve korozyonu hızlandırarak hücre ömrünü kısaltır. Dezavantajları arasında yavaş başlatma, düşük güç yoğunluğu, yüksek sıcaklığa bağlı yüksek korozyon ve bileşenlerin çatlaması söylenebilir (Tronstad ve diğ, 2017).

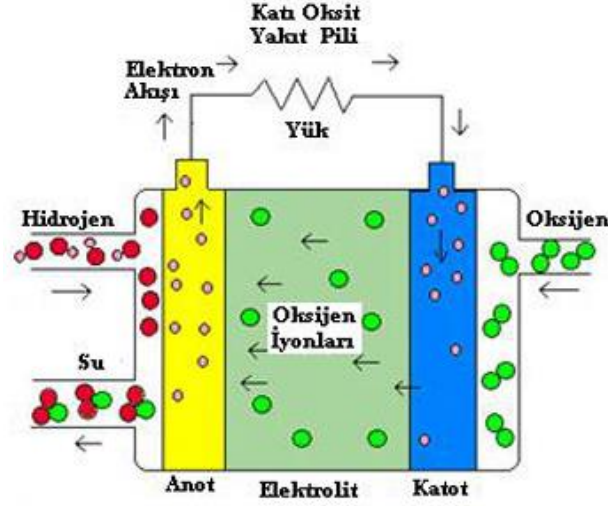
2.1.6 Katı oksit yakıt hücresi

Katı oksit yakıt hücreleri (SOFC) elektrolit olarak sert, gözeneksiz bir seramik bileşik olan itriya dengeli zirkonyayı kullanırlar. SOFC lerin çalışma sıcaklığı 600-1000°C arasındadır. Maliyetin artmasına neden olan platin, rodyum gibi pahalı katalizörlerin kullanımına çalışma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı ihtiyaç duyulmaz. SOFC'lerin yakıtı elektriğe dönüştürme verimliliği yaklaşık %60'tır. Sistemde oluşan yüksek sıcaklıktaki atık ısınnın kojenerasyon sistemlerde kullanılmasıyla yakıt kullanım verimliliği %85'in üzerine çıkabilir. Çalışma sıcaklığının yüksek olması sadece hidrojenin yakıt olarak kullanılma sınırlamasını ortadan kaldırır ve yakıt esnekliği sağlar. Doğalgaz, biyogaz, metan gibi yakıtların dahili bir reformer ile yakıt hücresinde kullanılacak forma gelmesi sağlanır. Yüksek sıcaklıkta çalışmalarını sayesinde karbonmonoksit yakıt hücresini zehirlemez. Bunun nedeni, sıcaklık arttıkça malzeme arasındaki kimyasal bağların daha hızlı kırılmasıdır (Peng ve diğ, 2021).

Doğalgaz ve metan gibi hidrokarbonların hücre içinde reformerdaki proses adımları şu şekildedir.

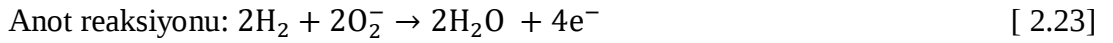


Katı oksit yakıt hücresinin çalışma prensibi, iyonların akışı ve elektrik akışı Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Katı oksit yakıt hücresinin çalışma prensibi.(Url-1)

Molten karbonat yakıt hücrelerinin anot ve katodunda gerçekleşen kimyasal tepkimeler denklem 2.23 ve denklem 2.24 ile gösterilmiştir.



2.2 Gemilerde Yakıt Hücresi Kullanımına Yönelik Projeler

Son yıllarda, denizcilik sektöründe denizlülardan, yolcu feribotlarına kadar farklı tipte ve farklı büyüklüklerde çeşitli araştırma projeleri yürütülmüştür. En dikkat çekici projeler bu bölümde kısaca anlatılmıştır. Bu projelere genel bir bakış Çizelge 2.1 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1: En dikkat çekici araştırma projelerine genel bir bakış (Tronstad ve diğ, 2017 ; Markowski ve Pielecha, 2019 ; De-Troya ve diğ, 2016b).

Program	Periyot	Yakıt hücresi türü	Kullanılan yakıt	Uygulama	Hibrit türü
Fellowship	2003–2013	300 kW PEMFC	LNG	Offshore supply	–
Felicitas	2005–2008	SOFC/GT	Dizel, LPG, CNG	Mega yat	Gaz türbini
Zemship	2006–2010	100 kW PEMFC	Hidrojen	Yolcu gemisi	Batarya
Methapu	2006–2009	20 kW SOFC	Metanol	Ro-ro gemisi	–
Nemo H ₂	2008–2011	60 kW PEMFC	Hidrojen	Yolcu gemisi	Batarya
SchIBZ	2009–2016	100 kW SOFC	Dizel	Yük gemisi	Batarya
PaXell	2009–2016	HT-PEMFC	Metanol	Yolcu gemisi	–
Sf-Breeze	2015–	120 kW PEMFC	Hidrojen	Feribot	–
Rivercell	2015-2022	250 kW HTPMEMFC	Metanol	Yolcu gemisi	Dizel-Batarya

2.2.1. FellowSHIP

Bir araştırma projesi olan FellowSHIP (Düşük Emisyonlu Gemiler için Yakıt Hücreleri), amacı gemilerin ve açık deniz uygulamalarının gereksinimlerini karşılayabilecek yakıt hücrelerinin gemilere entegrasyonunu mümkün kılacak sistem çözümleri geliştirmektir.



Şekil 2.7 : Viking Lady gemisi yakıt pilleri montajı (Tronstad ve diğ, 2017).

Gemi sahibi Eidesvik tarafından proje için seçilen 6100 deadweight büyüklüğünde olan Viking Lady gemisi tamamen elektrik tahriklidir ve makineleri, çift yakıt kullanma sistemine sahip olduğu için LNG ile çalışır. LNG yakıt altyapısı ve elektrik altyapısının uygun oluşu onu çekici bir test platformu haline getirmiştir. FellowSHIP projesinde, Almanya'da hava ve deniz taşımacılığında entegre tahrik sistemleri üzerine çalışmalar yürüten MTU firması tarafından geliştirilen ve deniz ortamında çalışacak şekilde modifiye edilen bir MCFC kullanıldı. Bu projede dahili reformerda yeniden düzenlenerek LNG yi yakıt olarak kullanan 320 kilowatt (kW) 'lık MCFC kullanılmıştır. Yakıt hücreleri tam yükte çalıştırıldığında verimlilik %52,1 olarak ölçülmüştür ve toplam yakıt hücresi verimliliği tüketim kayıpları dikkate alındığında %44,1'dir (Tronstad ve diğ, 2017). İç tüketim kayıpları Ar-Ge yapısından kaynaklanan yedekli sistemler ve ekstra güvenlik nedeniyle yüksektir. Bu kayıplar ticari olarak kullanımlarda daha düşük olacaktır. Isı geri kazanımı etkinleştirildiğinde, genel yakıt verimliliği %55'e yükseltilmiştir. NO_x, ve SO_x emisyonları tespit edilmemiştir.

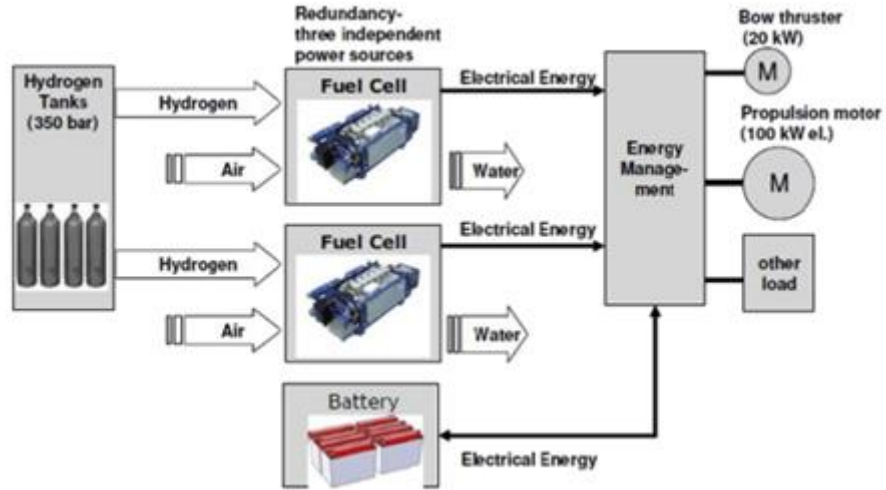
Bu projede, açık deniz tedarik gemisi Viking Lady'nin 18500 saatten daha uzun bir süre boyunca sorunsuz çalışması kanıtlanmıştır (Van Biert ve diğ, 2016b) . Genel olarak proje teknik olarak başarılı olmuştur. Bir ticaret gemisine bir yakıt hücresinin ilk büyük ölçekli kurulumu gerçekleştirilmiştir. Viking Lady aynı zamanda yüksek sıcaklıklı yakıt hücresi teknolojisini kullanan ilk gemiydi.

2.2.2 Felicitas

FELICITAS projesinde bir mega yat için yardımcı güç ünitesi olarak 250 kW kapasiteli SOFC kullanılmıştır. Ayrıca, SOFC sistemlerinin bir gaz türbini ile birleştirilmesi ve yakıt hücresinden gelen fazla ısınn kojenasyon sistemlerde kullanılarak toplam verimdeki artış incelenmiştir (Tse ve diğ, 2011). Rolls-Royce Deniz Elektrik Sistemleri tarafından yönetilen FELICITAS projesinin hedefi minimum emisyon miktarı ve klasik gemi tasarımında minimum değişiklik ile maksimum verimlilik elde etmektir. Proje yakıt hücrelerinin işleyişine ve SOFC malzemelerine ve bileşenlerine tuz, nemli hava gibi deniz koşullarının etkisini araştırmayı başarıyla gerçekleştirdi. Ayrıca yakıt hücrelerinde kullanılabilecek hidrojen dışında LNG gibi yakıt seçeneklerinin uygulanabilirliğini göstermiştir. Hidrojen dışındaki alternatif yakıtları SOFC'de kullanmak için bir ön reformcudan geçmesi gerekiyordu. Değişken gemi güç talepleri için sistemin vermiş olduğu dinamik tepkiler ölçülerek SOFCnin çeşitli hibrit konfigürasyonları ile %60'ın üzerinde yüksek verimlilik gibi sonuçlar elde edildi (Tronstad ve diğ, 2017).

2.2.3 Zemship

Yolcu gemisi Alsterwasser, sıfır emisyonlu gemi (ZEMSHIP) projesinde hidrojen yakıtlı PEMFC sistemi ile donatıldı ve iki sezon boyunca Hamburg Almanya'da başarıyla işletildi. Geminin konsept tasarımı dizel motor yerine bataryalar ve yakıt hücrelerinin hibrit kullanımına dayanıyor. Proje 2006 ve 2010 arasında devam etti.



Şekil 2.8 : Sevk sisteminin çalışma prensibi (De-Troya ve diğ, 2016).

Projede her biri 48 kW'lık iki adet PEMFC ve toplam 560 volt (V) 360 amper-saat (Ah) kapasiteli yedi adet pil paketi vardı (EMSA, 2017). Yakıt hücrelerinden sağlanan güç, pillerde depolandıktan sonra tahrik ve manevra için elektrik motorlarına aktarılır. Prototip gemi Alsterwasser'da, 50 kilogram (kg) kapasiteli 350 bar basınçlı iki tankta sıkıştırılmış olarak hidrojen depo edilmektedir ve bu miktar üç gün süreyle çalışma için yeterlidir. Proje sonucunda bir yolcu gemisinin sıfır emisyonlu ve özellikle sessiz ve titreşimsiz çalışabildiği kanıtlanmıştır (Tronstad ve diğ, 2017).

Karbon ayak izi ile ilgili olarak, bu geminin yerel emisyonları dizel elektrikli gemiye göre yılda 47.000 kg karbondioksit emisyonu daha azdır (ZEMSHIP, 2010). Gemi, bir test çalışması sırasında kurşun-asit akülerin aşırı ısınmasından kaynaklanan bir yangında ağır hasar gördü. Yakıt hücresi sistemi ve hidrojen deposu hasar görmediğinden, olay uygulanan hidrojen güvenlik konseptinin uygunluğunu kanıtladı.

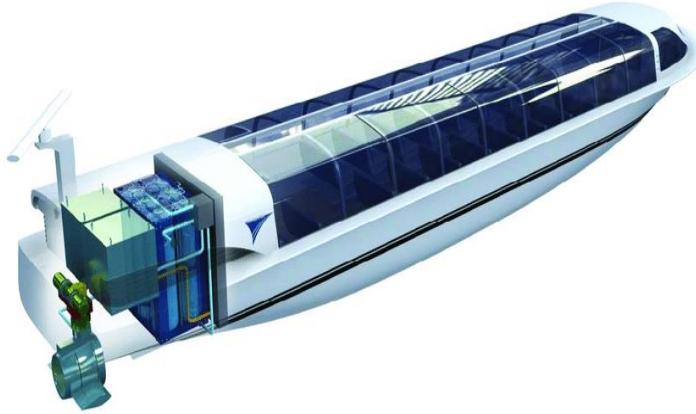
2.2.4 Methapu

Ticari gemilerdeki yakıt hücresi sistemlerine bir örnek, Avrupa Komisyonu tarafından finanse edilen METHAPU (Metanol Yardımcı Güç Ünitesi) projesidir. M/V Undine ro-ro gemisinde elektrik beslemesi sağlamak için metanolla çalışan 20 kW kapasiteli SOFC modülleri kullanıldı. METHAPU projesi ile, bir ro-ro gemisi için yardımcı güç üretim birimi olarak yakıt hücresi teknolojisinin uygunluk fizibilitesini araştırmayı amaçlamıştır. Projenin diğer amacı ise, deniz yakıtı olarak metanol (MeOH) ile ilgili uluslararası düzenlemelerin getirilmesini kolaylaştırmaktır (Strazza ve diğ, 2010). Bu

yeni teknolojinin kısa vadeli ve uzun vadeli çevresel etkilerini değerlendirmek ve denizcilikte yakıt hücresi kullanılabilirliğin geleceğini belirlemek için önemliydi. Proje ilk olarak 250 kW katı oksit yakıt hücresi için tasarlanmış ancak sadece 20 kW bir metanol reformer ile gemide uygulanmıştır. Proje 2006 ile 2010 arasında 700 saatin üzerinde başarıyla yürütülmüştür (Tronstad ve diğ, 2017).

2.2.5 Nemo H₂

2006 yılının başlarında, 5 şirket (Alewijnse Marine Systems, Lovers nakliye şirketi, Linde Gas, Marine Service North ve Integral) Amsterdam'da kanal gezileri için 100 kişilik yolcu gemisi Nemo H₂'yi geliştirdi. Geminin tahrik sistemi 60-70 kW'lık bir PEMFC sistemi ve 55 kW'lık bir kurşun asit pil takımından oluşan hibrit bir sistemdir. Gemideki hibrit sistemin yakıt gereksinimi olan hidrojenin depolanması için 350 bar ve 40 kg kapasiteli 8 adet silindir bulunmaktadır. Ayrıca projenin bir parçası 60 Nm³/h kapasiteli hidrojen dolum istasyonunun kurulumunun gerçekleştirilmesidir. Bu projede yakıt hücresi sistemi dahil olmak üzere hibrit sistemin kurulumu ve hidrojen depolama başarıyla tamamlandı ve gemiye entegre edildi.



Şekil 2.9 : Yolcu gemisi Nemo H₂(Url-3).

Hidrojen yakıtlı yakıt hücresi sistemine sahip yolcu gemisi için gemilerde ve teknelerde yakıt hücresi sistemlerinin kullanımına ilişkin yönergeleri uygulandı. Geliştirilen hibrit sistem tasarımının çalışması için güvenlik prosedürleri hazırlandı ve ilgili ayrıntıları detaylandırmak için risk değerlendirmesi yapıldı. Bu risk değerlendirmesi, yakıt hücrelerinin gemide güvenli bir şekilde çalışabileceğinin mümkün olduğunu gösterdi (Tronstad ve diğ, 2017).

2.2.6 SchIBZ

SchIBZ projesi e4ships deniz feneri projesinin bir parçasıdır. Proje Thyssen Krupp Marine Systems liderliğindeki birkaç şirket tarafından yönetildi (De-Troya ve diğ, 2016). Alman Ulusal İnovasyon Programı ticaret gemileri için hidrojen ve yakıt hücresi teknolojisi modüler tasarıma ve verimli yakıt hücresinin geliştirilmesine odaklandı. Projenin hedefi, 'MS Forester' gemisine 0,5 megawatt (MW) dizel-reformer entegre SOFC sistemi kurmak ve belirlenen süre işletildikten sonra sonuçları değerlendirmektir. Katı oksit yakıt hücresi ve bir pil takımının hibrit yapısına dayalı yardımcı güç sisteminde düşük kükürtlü dizel (10 ppm kükürt) kullanarak en az %50 elektriksel verim ile 50-500 kW arasında güç elde etmek amaçlanmıştır. Tasarım hesaplamaları genel verimliliği artırmak için uygulanan, bir egzoz gazı geri kazanım sistemi ile %55 veriminin elde edilebileceğini göstermiştir (Ma ve diğ, 2021a).

100 kW güç sağlayan bir sistem ilk etapta karada çalıştırılmıştır ve daha sonra sistem MS Forester'a kurularak 12 ay süreyle kullanılmış ve araştırma sonuçları toplanmıştır. MS Forester'daki sistem geminin elektrik talebinin yüzde 25 ile 50 arasındaki kısmını karşılamıştır. Projenin çıktıları olarak, sistemin maliyetinin düşürülmesi ve egzoz gazının iyileştirilmesi durumunda, yakıt pilleri uzun vadeli perspektifte ticari gemiler için iyi bir seçenek olabilir görüşüne ulaşıldı. Ayrıca, iyileşmeler sağlandığında geminin güç talebinin tamamının bir pil sistemi ve yakıt hücresi kombinasyonu ile karşılanabilmesinin mümkün olabileceği görüldü (Tronstad ve diğ, 2017).

2.2.7 Pa-X-ell

Pa-X-ell projesi, SchIBZ projesi ile aynı programın parçasıdır (De-Troya ve diğ, 2016). Pa-X-ell projesi, yolcu gemilerinde MeOH yakıtlı yüksek sıcaklıklı proton değişim membranlı yakıt hücreleri (HT-PEMFC) sistemlerinin entegrasyonu ve güvenlik yönlerine odaklanmıştır (Ma ve diğ, 2021b). Araştırmalar yakıt hücrelerinin farklı yangın bölgelerine yerleştirilmesini, düşük parlama noktalı yakıtların güvenli tedarikini ve yakıt hücrelerinin termal ve elektriksel entegrasyonunu içerir. Pa-X-ell projesi Nisan 2009 ve Aralık 2016'da arasında yürütülmüştür (EMSA, 2017). Projenin amacı yolcu gemileri, yatlar ve RoPax-feribotlarındaki emisyon miktarını yakıt hücresine dayalı merkezi olmayan bir enerji şebekesinin entegrasyonu yoluyla

amaçlanan hedeflere ulaşırmaktır. Projenin bir diğer amacı ise yolcu gemilerinde metanol gibi düşük parlama noktalı yakıtların kullanımı için güvenlik konseptlerinin doğrulanması ve gözden geçirilmesidir (Markowski ve Pielecha, 2019). Tasarlanan prototip sistem farklı güç kapasiteleri ile iki farklı gemide elektrik enerjisi üretimi için kullanılmıştır; ilki bir Alman araştırma gemisi “Sonne” ve ikincisi Viking Lines “MS Mariella” feribotudur. Her biri 8 kW güç çıkışına sahip 5 yakıt hücresinden oluşan HT PEMFC modülleri 60 kW güç çıkışına kadar test edilmiş ve kullanılmıştır. Proje, bir gemide önemli ölçüde daha düşük gürültü ve egzoz emisyonları avantajlarını sağlayan HT PEM yakıt hücresinin başarılı kullanımını gösterdi.

Proje, özellikle yeni düzenlemelerin ve kılavuzların geliştirilmesine katkıda bulunmayı sağladı. Yakıt hücresi ile donatılmış gemilerdeki temel güvenlik tehlikesi, metanol ve hidrojen gibi düşük parlama noktasına sahip yakıtlardır. Yangın olasılığını minimize etmek için gerekli önlemler, risk yönetimi, yeterli havalandırma, alarm sistemleri, gaz kaçağının sonuçları gibi konular üzerinde tespitler yapıldı.

2.2.8 Sf-Breeze

SF-BREEZE (San Francisco Körfezi Yenilenebilir Enerji Elektrik Gemisi Sıfır Emisyonlu elektrikli gemi) projesi Sandia Ulusal Laboratuvarları, Amerikan Denizcilik Bürosu, ABD Sahil Güvenlik ve Elliott Körfezi Tasarım Grubu tarafından 2015 yılında başlatılmıştır (EMSA, 2017). Proje kapsamında 150 yolcu kapasiteli, yüksek hızlı, PEM yakıt hücreli bir feribot tasarlamak, inşa etmek ve işletmek hedeflenmiştir. Projede ayrıca San Francisco Körfezi'nde geliştirilmesi amaçlanan bir hidrojen tedarik istasyonu da yer alıyor (Markowski ve Pielecha, 2019). Her biri 120 kW'lık 41 yakıt hücresi ünitesi tarafından tahrik edilen 2,5 MW'lık iki elektrik motoruna sahip feribot inşa edilmiştir (Pratt ve Klebanoff, 2016). Yakıt hücreleri ve yakıt depolama sistemi güvenlik ve düzenleyici hususlar nedeniyle normalde yolcular için kullanılacak olan güverte üzerindeki bir alana yerleştirilmiştir. Yakıt sıvı hidrojenidir. Tasarlanan feribotun işletim süresi boyunca teknik, düzenleyici ve ekonomik yönlerini inceleyen bir fizibilite çalışması yapılmıştır.

2.2.9 Rivercell

RiverCell projesi merkezi olmayan güce sahip iç sularda çalışan bir yolcu gemisinin fizibilite çalışmasıdır ve “e4ships” deniz feneri projesinin bir parçasıdır. Bu proje kapsamında Pa-X-ell projesine benzer bir şekilde modüler bir güç için farklı yakıtların kullanımı incelenmiştir (Markowski ve Pielecha, 2019). Değiştirilebilir sürüş profilleri ve yüksek çevresel talepler gibi iç sularda çalışma gereksinimlerini karşılayabilecek olan en iyi konsept seçiminin ardından yolcu gemisini detaylı olarak tasarlamak ve uzun vadeli testler uygulanması hedeflenmiştir (Tronstad ve diğ, 2017). Proje için planlanan dönem 2015'ten 2022'ye kadardır. Proje, iç sularda çalışan gemiler için bir yakıt hücresi hibrit sisteminin tasarımına ve geliştirilmesine odaklanmıştır ve hibrit güç aktarma organlarının uygunluğu, pratik kullanımı ve ekonomik verimliliği açısından değerli bilgiler sağlamıştır. Yakıt olarak metanol kullanan 250 kW kapasiteli HT-PEM yakıt hücreleri, üç dizel jeneratör ve iki pil takımından oluşan hibrit sistemin bir parçasıdır (Ma ve diğ, 2021a). Sistemin bir kısmı geminin kıç tarafında ve diğer kısmı ise geminin baş tarafında bulunur. Geminin tahrik sistemi dört pervane ve iki bow thrusterden oluşmaktadır. Geminin yük ihtiyacına bağlı olarak dizel jeneratörler limanda veya manevra yaparken devreye girerler. Bataryalar ise ani güç artışlarına karşı bir tampon görevi yapmaktadırlar. Bu sistem yüksek sistem kararlılığı, verimli çalışma ve azaltılmış emisyon seviyesi gibi avantajlar sağlar. RiverCell projesi ile yakıt hücresi teknolojisinin deniz kullanımında günümüzün dizel jeneratörlerine kıyasla güvenli, temiz ve verimli bir alternatif olabileceği görülmüştür. Ayrıca yakıt hücreleri için metanol formundaki hidrojenin gemilerde nasıl güvenli ve verimli bir şekilde depolanabileceğini gösterilmiştir. Enerji kaynağı olarak hibrit konsept, özellikle kentsel ve hassas çevre bölgelerinde umut verici bir çözüm olarak görülmektedir (Van Biert ve diğ, 2016b). Hacim açısından yakıt olarak metanolün kullanılması avantajlıdır ancak daha fazla düzenleme gereklidir (Tronstad ve diğ, 2017).

2.3 Yakıt Hücresi Çeşitlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Hangi tür yakıt pillerinin gemilerde ana güç ünitesi olarak kullanıma daha uygun olduğunu belirlemek için bazı parametrelere göre değerlendirilmesi gerekir. Bu parametreler maliyet, toplam verimlilik, yakıt esnekliği, emisyon, güvenlik, boyut, güç kapasitesi, kullanım ömrü ve yük geçişlerine karşı dinamik tepki karakteristiktir.

Deniz koşulları karadaki tesislerden farklı olduğu için; yakıt türü, küresel yakıt ikmali, mevcudiyeti ve ulaşılabilirlik problemleri gemiler için kara tabanlı taşımacılıktan daha fazla önem göstermektedir. Ayrıca, gemilerde sınırlı alan ve düzenlemeler nedeniyle, emisyon ve boyut, elektrik santrallerine kıyasla gemiler için önemli görünmektedir.

AFC nin elektroliti, 50°C ila 250°C sıcaklık aralığında çalışan KOH'dir. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt hücresi, hızlı bir başlatma ile karakterize edilir. AFC'nin ana dezavantajlarından biri, KOH çözeltisinin CO₂ toleransının zayıf olmasıdır. Platin ve elektrokatalizör kullanımı onları pahalı bir seçenek yapar. AFC için yakıt olarak saf hidrojen ihtiyacı bir dezavantajdır. Güç kapasitesi 500 kW ya ulaşan modülleri kullanılmaktadır.%50-60 verimle çalışmaktadır. AFC en yaygın uzay programlarında ve daha az ölçüde otomotiv endüstrisinde kullanılır.

PEMFC, hem denizde hem de diğer yüksek enerji uygulamalarında başarıyla kullanılmış olgun bir teknolojidir. Teknolojik olgunluğu, nispeten düşük bir maliyete yol açar (Tronstad ve diğ, 2017). Düşük çalışma sıcaklığı ile PEMFC, hücrelerde aşındırıcı malzemelere başvurmadan hızlı başlatmaya izin verir. PEMFC, sıfır emisyonu, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı başlatması nedeniyle temel olarak ulaşım ve ticari uygulamalarda tercih edilmektedir. PEMFC %60 'a kadar brüt verime sahiptir ve dinamik koşullarda iyi davranır, bu da onları ulaşım için potansiyel olarak çok umut verici bir aday yapar. Arabalar, otobüsler ve gemilerdeki uygulamalar başarıyla test edildikleri yerlerdir. Başlıca sınırlamaları, yakıt esnekliğinin olmamasında yatmaktadır. PEMFC katalizörü zehirlenmeye çok yatkındır ve bu nedenle yüksek saflıkta hidrojen gerektirir yalnızca hidrojen üzerinde çalıştırılabilir ve diğer yakıtlar kullanılıyorsa, öncelikle hidrojene dönüştürülmeleri gerekir. Güvenlik yönleri böylece hidrojenin kullanımı ve depolanması ile ilgilidir. Büyük miktarlarda saf hidrojenin depolanması önemli bir zorluk olduğundan, bu gereksinim özellikle uzun mesafeli operasyonlar için zordur. PEM yakıt hücrelerinin dezavantajları katalizör olarak platine ihtiyaç duyması, hücrede su yönetiminin zorluğu ve yakıt olarak saf hidrojen kullanılmasıdır. PEMFC'ler saf hidrojen ve oksijen üzerinde %60'a varan elektriksel verimlilik gösterse de , dizel dönüştürücülerle donatıldıklarında genel verimlilik %40'ı geçmez.

MCFC 600°C–700°C gibi çok yüksek sıcaklık aralığında çalışır. %50 elektrik verimliliğine sahiptir , atık ısının kullanıldığı kombine çevrimlerle toplam verim %85'lere kadar ulaşabilir. Yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle, MCFC'nin katalizör

olarak pahalı platine ihtiyacı yoktur, ancak anot ve katot için nikel ve nikel oksit gereklidir. Yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle MCFC, hidrokarbon yakıtları hücre içinde hidrojene dönüştürebilir. MCFC üreticilerinin odak noktası kapladığı hacim itibariyle diğer yakıt türlerine göre nispeten büyük olduğu için hacim parametresinin belirleyici faktör olmadığı büyük sabit uygulamalar olmuştur.

DMFC'ler 50°C ile 120°C arasında yüksek verimlilikle (%40'a kadar) çalışır. Bir sıvı olarak metanol, mevcut iletim ve dağıtım sistemlerine daha kolay entegre edilebilir. FC yığını içinde metanolün doğrudan yeniden düzenlenmesinin, elektrotların büyük miktarlarda platin gerektirmesi önemli bir dezavantajdır. Yüksek enerji yoğunluğu ve daha güvenli kullanım sayesinde DMFC, cep telefonları ve diğer tüketici ürünleri gibi çok küçük ve orta ölçekli uygulamalar için mükemmel bir aday olarak görünmektedir. Otomotiv endüstrisi de bu hücreyi kullanır.

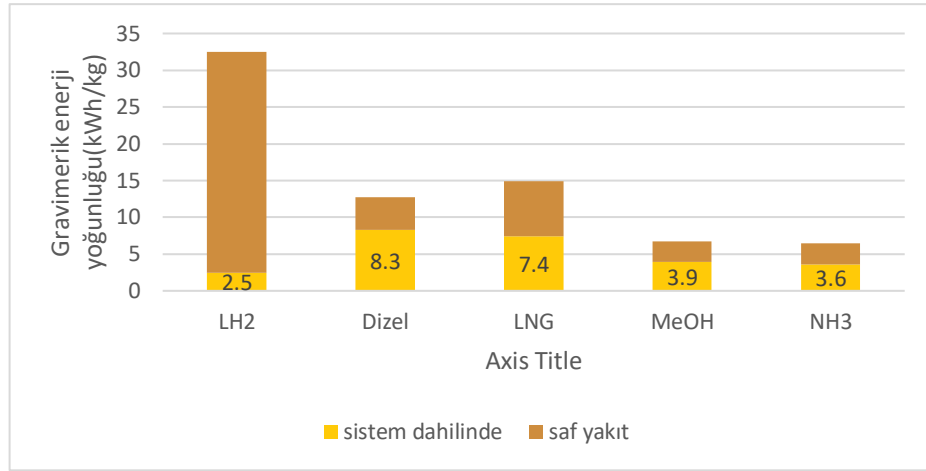
SOFC, 600°C–1000°C gibi çok yüksek sıcaklık aralığında çalışır. Yüksek çalışma sıcaklıkları sayesinde ısı geri kazanımı ile yakıt verimliliğinin ulaşabileceği değerler yaklaşık %85 tir. Yüksek çalışma sıcaklığının diğer bir avantajı ise yakıt kullanım seçeneklerinin esnek olmasıdır. Bazı hidrokarbonlar doğrudan yakıt olarak kullanılabilir ve hidrokarbonlardan hidrojene geçiş reformu hücrenin içinde gerçekleşir. Yüksek çalışma sıcaklığının neden olduğu yavaş başlatma, yüksek maliyet ve metal yığın bileşenlerinin korozyonu, SOFC'deki ana dezavantajlardır. Yüksek sıcaklık ayrıca bir güvenlik endişesidir. Hidrokarbon yakıt kullanıldığı zaman CO₂ ve NO_x emisyonları açığa çıkar. SOFC teknolojisi için umut verici bir seçenek , ısı geri kazanımını birleştiren hibrit sistemler ve pillerdir. Bu, daha esnek bir çalışma olasılığına yol açar ve SOFC'nin kullanımıyla ilgili sorunları azaltır.

SOFC, kararlı bir güç kaynağı çalışmasını garanti etmek için bir elektrik enerjisi depolaması tarafından desteklenir. SOFC sisteminin zayıf tepki karakteristiği nedeniyle, dalgalı yük profilinin gereksinimlerini karşılamak için bir enerji depolama modülü kullanılır. Gemi şebekesi izole olduğundan ve fazla enerjiyi başka bir sisteme besleyemediğinden, depolama yapılan sistemin her zaman güç dengesini yerine getirebilecek durumda olması gerekir. Enerji depolamanın diğer bir faydası, pik yüklerinin birlikte karşılanması sayesinde SOFC sistem boyutunun küçülmesine neden olmasıdır.

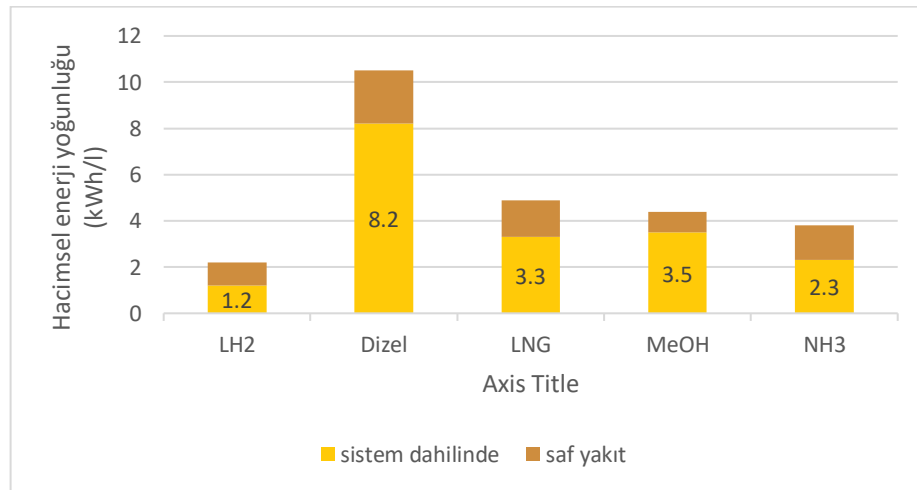
2.4 Yakıt Hücrelerinde Kullanılabilecek Yakıtlar

Dizel yakıtlar şu anda denizcilik sektöründe en yaygın olarak kullanılan enerji kaynağıdır. Konvansiyonel dizel motor-jeneratör setleri bu yakıtlara oldukça alışıktır, ancak bu yakıtlar doğrudan yakıt hücrelerinde kullanılamazlar. Bazı yakıt hücresi türlerinde çeşitli yakıtların doğrudan elektrokimyasal oksidasyonu mümkün olsa da , pratik güç yoğunluklarında nispeten hızlı hidrojen oksidasyon kinetiği hakimdir. Bu, çoğu yakıt hücresinin etkili bir şekilde hidrojenle çalıştığı anlamına gelir (Kee ve diğ, 2005). Özellikle düşük sıcaklıktaki yakıt pilleri sadece saf hidrojeni oksitlerken, metan gibi bazı alternatif yakıtlar yüksek sıcaklıklı yakıt pillerinde dahili olarak hidrojen zengin gazı dönüştürülebilir (Laosiripojana ve Assabumrungrat, 2007a) .

Denizcilik alanında yapılan çoğu yakıt hücresi çalışması, bir dizel altyapısı var olduğundan ve hidrojenin önemli ölçüde daha pahalı ve daha az enerji yoğunluğuna sahip olmasından dolayı, gemide dizelin hidrojene dönüşümünü dikkate alır (Cohen ve diğ, 2012). Ancak dizel yakıt işlemcisi, yakıt hücresi sisteminin karmaşıklığını, maliyetini ve boyutunu artırır. Ayrıca, sera gazı emisyonlarını azaltma ve nihayetinde ortadan kaldırma ihtiyacı alternatif lojistik yakıtların değerlendirilmesini vazgeçilmez kılmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı muhtemelen hala yakın gelecekte gerekli olmasına rağmen, yenilenebilir alternatifler, örneğin biyoyakıtlar uzun vadede daha önemli hale gelecektir. Bu nedenle daha temiz fosil yakıtlara ve yenilenebilir yakıtlara bir yönelim öngörülmektedir, ancak bunların benimsenmesi, bunların mevcudiyetine, altyapısına, çevresel etkisine, güvenliğine, fiyatına, düzenlemelerine, enerji yoğunluklarına ve teknik uygunluğuna bağlı olacaktır. Denizcilik yakıt hücresi sistemlerinin bu seçenekler ile teknik uygunluğu bu incelemenin bir parçasıdır, dolayısıyla bu bölümde bazı seçeneklerden bahsedilecektir. Bu yakıtların gravimetrik yoğunluklarına genel bir bakış Şekil 2.10'da, hacimsel enerji yoğunluklarına genel bir bakış ise Şekil 2.11'de verilmiştir. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11 yakıtların saf halinin gravimetrik ve hacimsel enerji yoğunluğunu ve bir sistemde yakıt olarak kullanıldığında ki enerji yoğunluklarını gösterir.



Şekil 2.10 : Yakıtların gravimetrik enerji yoğunluklarına genel bir bakış
(Metkemeijer ve Achard, 1994 ; Van Biert ve diğ, 2016b ; Durbin ve Malardier-Jugroot, 2013)



Şekil 2.11 : Yakıtların hacimsel enerji yoğunluklarına genel bir bakış
(Metkemeijer ve Achard, 1994 ; Van Biert ve diğ, 2016b ; Durbin ve Malardier-Jugroot, 2013)

2.4.1 Dizel

Dizel yakıtlar, kullanım amacına göre farklı tiplerde petrolün rafinasyon işleminin yan ürünlerinden biridir. Rafineride petrol işlem aşamalarında sona kalan çok yoğun, yüksek viskoziteye sahip koyu renkli fiziksel görünümde olan ve uzun karbon zincirli bir kimyasal yapıya sahip bir yakıt türüdür (Van Biert ve diğ, 2016b). Hem yakıt işleme ekipmanı hem de yakıt hücresi sınırlı kükürt toleranslarına sahip

olduğundan, yüksek kükürt içeriği bir sorundur. Bu nedenle, yakıt hücresi uygulaması için kükürt içeriği önemli ölçüde düşürülmelidir (Xing ve diğ, 2021).

Dizel, yakıt işleme komplikasyonları nedeniyle yakıt hücresi sistemleri için uygun olmayan bir yakıt olarak değerlendirilir. Yine de, ucuz, yüksek enerji yoğunluğu ve altyapısı tam olarak konuşlandırılmış olduğundan denizcilik yakıt hücresi sistemleri için en çok araştırılan yakıttır. Yakıt hücresi sistemine ve dizel yakıtın tipine bağlı olarak, yeterli saflıkta bir besleme gazı elde etmek için çeşitli yakıt işleme adımları gereklidir. Bu işlem adımları, genel sistemin hem genel verimliliğini hem de güç yoğunluğunu düşürecektir (Al-enazi ve diğ, 2021).

2.4.2 Hidrojen

Hidrojen evrende en fazla bulunan elementtir, ancak saf haliyle nadiren bulunur. Hidrojen, fosil yakıtlardan 2,75 kat daha fazla olan 122 kJ/g enerji verimi ile çok ilginç bir enerji taşıyıcısıdır (Hosseinzadeh ve diğ, 2022). Hidrojen, hem fosil hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilir. Şu anda tüm hidrojenin %96'sı fosil yakıtlardan (doğal gaz %48, petrol %30, kömür %18) ve geri kalan %4 elektrolizden üretilmektedir (Capurso ve diğ, 2022a). Hidrojen, elektrokimyasal oksidasyon kinetiği düşük sıcaklıklarda bile hızlı olduğu için yakıt pilleri için uygundur. Bu nedenle kapsamlı bir ön işlem yapılmadan kullanılabilir (Van Biert ve diğ, 2016b). Sonuç olarak, saf hidrojen sistemleri dikkate değer toplam güç yoğunlukları elde edebilir. Yakıt pilleri ile hidrojenin elektriğe dönüştürülmesi genellikle içten yanmalı motorlardan daha verimlidir (Ma ve diğ, 2021a). Düşük depolama yoğunluğu, bir lojistik yakıt olarak hidrojenin en önemli dezavantajıdır. Hidrojen genellikle otomotiv uygulamaları için 350 veya 700 barda basınçlı kaplarda depolanır. Alternatif olarak sıkıştırılmış hidrojen (LH₂) olarak adlandırılan daha düşük sıcaklıklarda ve yüksek basınçlarda kriyojenik olarak depolanabilir. Yakıt hücreli araçlarda en yaygın olarak kullanılan hidrojen depolama yöntemi sıkıştırılmış hidrojen tanklarıdır. Bu yöntem, şu anda en iyi anlaşılan yöntem olduğu için seçilmiştir. Yüksek basınçlı depolama uygun bir seçenek haline gelmeden önce ağırlık, hacim, maliyet ve güvenlik gibi değişkenler dikkate alınmalıdır. Ayrıca şu anda hacimsel enerji yoğunluğu en fazla olan fiziksel depolama yöntemidir. Metal hidritlerde depolama gibi diğer seçenekler ve kimyasal bileşikler, halen araştırılmaktadır (Durbin ve Malardier-Jugroot, 2013). Hidrojenin sıvı olarak fiziksel

tabanlı depolanması ve kriyo-gazlı depolama gibi daha yüksek hacimsel yoğunluk tabanlı çözümler geliştirilmiştir. Malzeme bazında, katıların yüzeyinde (adsorpsiyon) veya katıların içinde (absorpsiyon) depolama sıvı olarak hidrojen stoğu düşük sıcaklıkta, yani -250°C 'de mümkündür, ama oldukça pahalıdır ve çok fazla enerji gerektirir. Bu nedenle, bu çözüm yalnızca büyük depolama uygulamaları için uygundur. Başka bir yol, kriyo-gazlı depolamadır. Gaz, süper kritik kriyo durumunda -233°C 'de depolanır. Bu uygulama, saf sıvı halden daha yüksek miktarda fazladan 10g/l hidrojenin depolanmasına izin verir (Capurso ve diğ, 2022b).

2.4.3 Doğal gaz

Doğal gazın içeriğinin yaklaşık %90' nını metan oluşturur. Bunun dışında etan, propan gibi hidrokarbonlar ve düşük oranlarda nitrojen, oksijen, kükürtlü bileşikler içerir (Ni ve diğ, 2020). Kriyojenik koşullarda, -162°C 'nin altında ve atmosfer basıncında depolandığında sıvılaştırılmış doğal gaz olarak adlandırılır (KUrl-e ve diğ, 2015). Henüz her yerde mevcut olmasa da LNG altyapısı genişliyor. Alternatif olarak sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), doğalgazın atmosferik basınçta tutulan hacminin yaklaşık olarak %1'inden daha azına sıkıştırılmış şeklidir. Hem LNG'nin hem de CNG'nin efektif hacimsel enerji yoğunluğu dizel yakıtlara kıyasla düşüktür. LNG esas olarak metandan oluşur ve diğer fosil yakıtlara göre daha yüksek termal verimlilik ve daha düşük spesifik enerji tüketimi, daha düşük kükürt ve karbon içeriği gibi birçok avantaja sahiptir (Ni ve diğ, 2020). Doğal gaz şu anda hem hidrojen hem de metanolün en önemli üretim kaynağıdır (McKinlay ve diğ, 2021). LNG'den yerleşik hidrojen üretimi , muhtemelen başka yerlerde üretilen hidrojeni kullanmaktan daha ucuz, daha verimli ve daha yoğundur . Yakıt işleme nispeten basittir ve kükürt adsorbanlarla kolayca uzaklaştırılır (Maria Goreti usboko, 2018). Birçok yüksek sıcaklık yakıt hücresi sisteminin halihazırda doğal gaz kullanmak üzere tasarlandığı ve yüksek elektriksel verimlilikler elde edildiği görülmektedir (McKinlay ve diğ, 2021; Buonomano ve diğ, 2015).

LNG fosil yakıtlardan daha düşük kükürt içerdiğinden, SO_x emisyon miktarı oldukça düşüktür. İstatistiksel analizlere göre HFO kullanımının yerine LNG kullanımı yapıldığında NO_x, SO_x, CO₂ ve PM emisyonlarını sırasıyla %86, %98, %16 ve %96 oranında azalma görülebilir.(Vedachalam ve diğ, 2022)

2.4.4 Metanol

Metanol (CH_3OH) karbon, hidrojen ve oksijenden meydana gelen kükürt içermeyen bir yakıttır (McKinlay ve diğ, 2021). Ancak saf yakıtın enerji yoğunluğu dizel yakıtlardan önemli ölçüde düşüktür ve mevcut altyapıda kullanılan bazı metaller için aşındırıcıdır. Metanol sentez gazı üretimi, metanol sentezi ve ham metanolün işlenmesi şeklinde üç farklı yolla üretilir. Metanol üretimi için hammaddenin çoğunluğu doğal gazdır ve diğer hammaddeler arasında kömür, petrol, biyokütle, atıklar ve hatta CO_2 bulunur. 12°C 'lik düşük parlama noktası nedeniyle metanolün gemilerde güvenli bir şekilde depolanması da bir endişe kaynağıdır (Mazloomi ve Gomes, 2012). Bununla birlikte, metanol ile ilgili önemli bir endişe, insanlar için oldukça toksik olmasıdır (Yao ve diğ, 2017). Bu güvenlik hususları, metanolün mali risklerini ve mühendislik zorluklarını artırabilir. Metanol, nakliyeden kaynaklanan emisyonları azaltmak için teknik olarak uygun bir seçenek olarak kabul edilmektedir (Svanberg ve diğ, 2018). Metanol, doğrudan metanol yakıt hücrelerinde kullanılabilir, ancak bu yakıt hücresinin verimliliği düşüktür. Alternatif olarak, ya ayrı bir sistemde ya da yakıt hücresi sistemine entegre olarak orta sıcaklıklarda yeniden yapılandırılabilir. Metanol reformerleri HT-PEMFC sistemlerine başarılı bir şekilde entegre edilmiştir (Andreasen ve diğ, 2013 ; Pan ve diğ, 2005). MeOH 'nin bu yakıt hücrelerinde doğrudan ve dolaylı kullanımı, en azından prensipte mümkün olsa da, bu sistemler tipik olarak NG kullanacak şekilde konfigüre edildiğinden, yüksek sıcaklıklı yakıt hücrelerinde metanol kullanımını araştıran az sayıda çalışma vardır (Hu ve diğ, 2014 ; Laosiripojana ve Assabumrungrat, 2007b ; Strazza ve diğ, 2010).

2.4.5 Amonyak

Amonyak (NH_3) hidrojen ve azot bileşiğidir. Amonyak karbon içeriğine sahip değildir ve bu nedenle kullanım noktasında karbon emisyonu üretmez. Yanma NO_x salınımına yol açabileceğinden, yanma sürecinin tamamen emisyonsuz olacağı anlamına gelmez. Son yıllarda amonyağı deniz yakıtı olarak kullanma kavramı ilgi görmeye başlamıştır (McKinlay ve diğ, 2021).

Düşük basınçlarda veya düşük sıcaklıklarda depolandığında sıvılaştırılma işlemi daha kolaydır, bu özelliği onu hidrojene kıyasla depo edilmesi ve taşınması çok daha kolay bir yakıt haline getirir. Hacimce amonyak ($15,6 \text{ MJ/l}$), sıvı hidrojenden (kriyojenik sıcaklıklarda $9,1 \text{ MJ/l}$) %70 daha fazla ve sıkıştırılmış hidrojen gazından (700 bar

basınçta 5,6 MJ/l) yaklaşık üç kat daha fazla enerji taşır. Amonyak -33°C sıcaklıkta ve atmosferik basınçta gaz halindedir. 10 bar hafif basınçta sıvı haldedir (Little ve diğ, 2015). Enerji yoğunluğu metanolden biraz daha düşüktür ve 300 ile 520°C arasındaki sıcaklıklarda hidrojene ayrışabilir. Karbon içermediği için yakıt hücrelerini zehirleme riski içermez ve azotdan arındırıldıktan sonra doğrudan düşük sıcaklıklı yakıt hücrelerinde de kullanılabilir (Hejze ve diğ, 2008). Amonyakın önemli bir dezavantajı, insanlar ve hayvanlar için şiddetli toksik oluşudur. Amonyakın yüksek toksisitesi bilinç kaybı için nispeten küçük maruziyet seviyelerinde bile görülebilir (Klerke ve diğ, 2008 ; Little ve diğ, 2015).

2.5 Denizcilikte Yakıt Pilleri Kullanımına Yönelik Standartlar ve Düzenlemeler

Yakıt hücrelerinin gemilerde enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için, öncelikle kullanılacak olan yakıtla özgü gereksinimler olan tank tipi, yakıt boruları ve depolarında kullanılacak olan malzemelerin cinsi, yakıtın güvenlik gereksinimleri gibi kriterler belirlenmeli ve uygulanmalıdır (EMSA, 2017). Bu gereksinimleri ve standartları içeren için birincil belgelerden biri “IGF Kodu”dur (Gaz veya düşük parlama noktalı diğer yakıtları kullanan gemilerin güvenliği için uluslararası kod). Haziran 2015'de IMO Deniz Emniyeti Komitesi IGF Kodunun geliştirilmesi ve benimsenmesine karar verdi yani kod resmen onaylandı. IGF Kodu gereksinimini taşıyan gemilerde çalışan denizcilerin eğitiminde bazı değişiklikler yaparak, yeni hedefler ve şartlar da getirerek 1 Ocak 2017'de yürürlüğe girdi. IGF Kodu, SOLAS'ın (Uluslararası Can Güvenliği Sözleşmesi) bir alt başlığıdır. IGF Kod başlangıçta yalnızca doğal gaz için kabul edilmiş olmasına rağmen, düşük parlama noktalı sıvıların kullanımını düzenlediğinden gaz yakıtlar ve hidrojen için de geçerlidir. Ancak, yalnızca doğal gaz için detaylı gereksinimleri içerir.

Uluslararası Güvenlik Kodunun amacı, IGC Kodu (Sıvılaştırılmış Gazları Taşıyan Gemilerin İnşa ve Teçhizatı Hakkında Uluslararası Kod) kapsamındaki gemiler dışında, yakıt olarak gaz veya düşük parlama noktalı sıvılarla çalışan gemiler için uluslararası bir standart sağlamaktır. Kodun temel amacı, gemilerin mürettebatına ve çevreye yönelik riskleri en aza indirmektir. Ana sevk gücü veya yardımcı güç kaynağı olarak LNG veya hidrojen yakıtını kullanabilmek için güvenlik ve güvenilirlik açısından makine, teçhizat ve sistemlerin düzenlenmesi, kurulması, izlenmesi ve kontrolü için zorunlu kriterleri içerir. SOLAS bölüm II-1'de, "F Kısmı: Alternatif tasarım ve düzenlemeler ile yeni eklenen "G Kısmı: Düşük parlama noktalı yakıt

kullanan gemiler olmak üzere iki temel değişiklik yapılmıştır. Bunların dışında, bölüm II-2 ve Ek (Sertifikalar) üzerindeki değişiklikler de yürürlüğe girmiştir.

Ayrıca, "Gemi Adamlarının Eğitim, Belgelendirme ve Vardiya Tutma Standartları Hakkında Uluslararası Sözleşme (STCW)"de de bir takım değişiklikler yapılarak IGF Kodu'nu uygulamakla zorunlu gemilerdeki mürettebatın eğitimi ve nitelikleri için asgari koşullar belirlenmiştir.

IGF Kodu, uygulanabilir iki ana bölüm içerir: Bu bölümler düşük parlama noktalı yakıt tesisatları için genel işleve dayalı gereksinimler ve yakıt olarak doğal gaz kullanan makine kurulumları için işlevsel ve kuralcı gereksinimlerdir.

Bu bölümlerde belirtilen bazı önemli hususlar şunlardır.

- Yakıtle ilgili gaz kaçağı tehlikelerin olasılığı ve tehlikeli sonuçları, havalandırma, algılama ve güvenlik eylemleri gibi düzenleme ve sistem tasarımı aracılığıyla asgari olarak sınırlandırılacaktır.
- Geminin, gemideki kişilerin ve ekipmanın güvenliğini etkileyen tehlikeli alanlar, olası riskleri en aza indirmek için mümkün olduğu kadar sınırlandırılacaktır.
- Depolama ve yakıt ikmali düzenlemeleri yakıtın sızıntı olmadan gerekli durumda alınması ve muhafaza edilmesi için hazırlanacaktır.

3. BATARYALAR

Hidrojen yakıt hücresi, yüksek verimlilik, sessiz çalışma, çevre dostu olması gibi avantajlara sahiptir ancak dinamik performansı zayıftır. Bu nedenle, yakıt hücrelerinin ani yük değişimlerinde onları destekleyecek tampon görevi yapabilecek bir enerji depolama sistemi ile birleştirilmesi faydalı olur. Deniz ortamında kullanım için uygun bir enerji depolama sisteminin seçiminde ağırlık ve operasyonel özellikler önemli bir rol oynar. Önerilen hibrit sistem için piller, güvenilir ve türüne bağlı olarak diğer depolama ortamlarına kıyasla büyük miktarda enerji depolayabilen düşük maliyetli bir çözüm olduğundan enerji depolama ortamı olarak seçilmiştir. Lityum iyon piller, nikel-kadmiyum piller, nikel metal hidrit piller ve kurşun asit piller farklı kullanım alanlarında en yaygın olan dört temel pil tipidir. Gemilerde kullanılabilecek pil çeşidini seçerken ağırlık, kapladığı hacim, enerji kapasitesi, maliyet, kullanım ömrü, hangi sıcaklık aralıklarında çalışabildiği, kendine kendine deşarj oranı, enerji saklama süresi ve deniz şartlarına uygunluk durumu gibi parametreler dikkate alınır.

Çizelge 3.1: Yaygın olarak kullanılan pil tiplerinin teknik özellikleri (Wu ve diğ, 2020 ; Bassam ve diğ, 2016 ; Y. N. Wang, 2018).

Pil Türü	Enerji yoğunluğu [Wh/kg]	Güç yoğunluğu [W/kg]	Hizmet ömrü [saat]	Aylık kendi kendine deşarj oranı	Sermaye maliyeti [\$ / kWh]
Lityum iyon piller	100–160	80–2000	600–2000	%3-10	200–700
Nikel-kadmiyum piller	40-60	200–500	500	%20	300
Nikel metal hidrit piller	60–100	200–1500	750	%28	300–500
Kurşun asit piller	30-50	80–300	300–450	%5	70

Lityum piller dizel motorla hibrit şeklinde kullanımlarda ticari gemi uygulamaları için hali hazırda benimsenmiştir. Enerji depolama sistemlerinde genellikle kurşun-asit (LA) pil ve Lityum-iyon (Li-ion) pil kullanılmaktadır (Chen ve diğ, 2020).

Li-ion piller, şarj/deşarj işlemi sırasında oksidasyon/redüksiyonun meydana geldiği lityum bileşiklerinden yapılmış katot/anot elektrotlarında enerji depolar. Bir pilin

arkasındaki temel teori , termodinamik dengede sırasıyla anot ve katodun redoks potansiyelleridir. Lityum iyon pillerinin birçok avantajı vardır. Bunlar; uzun süreli kullanım ömrü, yüksek enerji yoğunluğu, küçük taşınabilir olmaları, bakım gerektirmemesi, geniş sıcaklık aralığında çalışabilme diye sıralanabilir. Dezavantajları ise yüksek kurulum maliyeti ve kapasiteden fazla şarj olma tehlikesi denilebilir (Choi ve diğ, 2021).

Kurşun asit pilleri en eski ve olgun teknolojiye sahiptir. Temel formda, negatif elektrotta kurşun içerir, pozitif elektrotta kurşun dioksit ve elektrik yalıtım tabakası bulunur. Deşarj için sulandırılmış sülfürik asit sülfat iyonları sağlar. Güç kalitesi için düşük maliyetli depolama uygulamalarında genellikle kurşun asit piller kullanılır. Uygulamaları sınırlıdır çünkü kısa bir kullanım ömrü vardır. Kurşun asit piller ulaşım araçları olan otomobil, motosiklet ve botlarda ve diğer endüstri alanlarında, çalışma, aydınlatma ve ateşleme amacı ile kullanılır. Avantajları ise düşük maliyeti, yüksek güç yoğunluğu, düşük ve yüksek sıcaklıklarda yüksek performans, servis ağının yüksek olması ile bakımının kolay olmasıdır. Dezavantajları ise kısa süreli kullanım ömrü, enerji saklama süresinin az olması (kendi kendine deşarj olması) ve deşarj olurken depolama yapmadaki zayıflığı diye sıralanabilir.

Yakıt hücresi hibrit güç sisteminde, yakıt hücresinin zayıf dinamik performansı nedeniyle sık sık şarj-deşarj işlemi pil ömrünü kısaltabilir. Li-ion piller, enerji yoğunluğu, enerji verimliliği ve kullanım ömrü açısından LA pillerden daha iyi performansa sahiptir (Tankari ve diğ, 2013). Bu nedenlerden dolayı, Li-ion pil teknolojisi bir hibrit gemi için daha uygundur.

4. YAKIT HÜCRESİ BATARYA HİBRİT SİSTEMİNİN M/V SULTAN AHMET FERİBOTU İÇİN MODELLENMESİ VE SİMULASYONU

Bu çalışmanın amacı ana güç kaynağı yakıt hücresi olan ve bataryalarla desteklenmiş hibrit bir tasarım modelinin seçilen enerji yönetim sistemi ile sistem bileşenlerinin dinamik davranışını izlemektir. Model ile gerçek veri girdilerine verilen dinamik yanıtları inceleyerek düşük hata payı ile simule edilmiş sistemin çalışması değerlendirilmiştir. Halihazırda hizmet veren bir arabalı feribotdan alınan verilerle, simule edilen geminin çıktıları arasında kıyaslama yapılarak uygun bir öneri olup olmadığını göstermek amaçlanmıştır.

4.1 Seçilen Gemiye Ait Bilgiler

Yakıt hücreleri sınırlı güç kapasiteleri nedeniyle küçük boyutlu gemiler için ana güç kaynağı olarak tercih edilebilir. Bu nedenle 2380 kW güç talebi olan Şekil 4.1’de gösterilen M/V Sultanahmet feribotu bu çalışma için seçilmiştir. Bu çalışma için incelenen gemi İDO (İstanbul Deniz Otobüsleri) bünyesinde hizmet veren 596 yolcu 80 araç kapasiteli bir arabalı feribotdur.



Şekil 4.1 : M/V Sultanahmet arabalı feribotu (Url-4).

Seçilen gemi Şekil 4.2’de belirtilen Eskihisar Topçular arasında çift uçlu bir güzergahta ortalama 30 dakikalık sefer süresi ve 15 dakikalık sefer aralığı ile 5.25 deniz mili mesafeli bir rotada günde 24 sefer yapmaktadır.



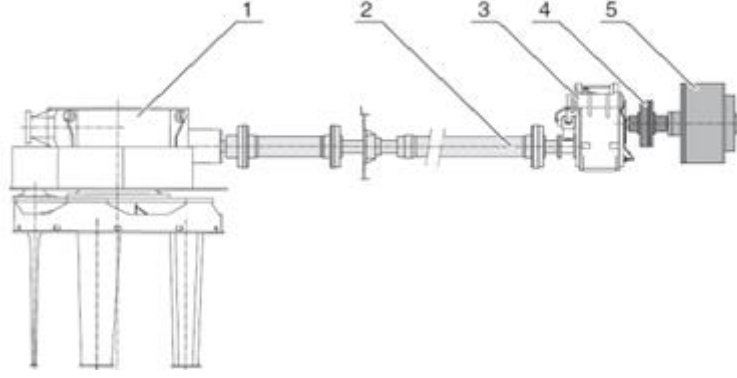
Şekil 4.2: M/V Sultanahmet arabalı feribotunun çalıştığı sabit rota (Url-5)

Çizelge 4.1 M/V Sultanahmet feribotuna ait genel bilgileri içerir.

Çizelge 4.1: M/V Sultanahmet gemisinin teknik özellikleri.

Gemi adı	M/V Sultanahmet
Gemi tipi	Arabalı yolcu feribotu
IMO no	94115521
Bayrağı	Turkey
Çağrı işareti	TCTG8
Baglama limanı	İstanbul
Gemi tam boyu	73,2 m
Gemi genişliği	18 m
Deplasmanı	1500 ton

M/V Sultanahmet gemisinin sevk sisteminin tahrik gücünü 4 adet dizel jeneratör oluşturmaktadır. Dizel jeneratörler ayrıca servis ve otel yükü için de tüm gücü sağlamaktadır. Dizel jeneratörler Mitsubishi üretici firmasının Dizel Elektrik tipli - S6R2MPTA modelidir. Geminin sevk sisteminde 4 adet dizel jeneratör, dizel jeneratörler ile tahrik edilen 2 adet elektrik motoru ve bu elektrik motorlarına bağlı olarak çalışan 2 adet voith tipi iticiler (pervane) bulunmaktadır. Şekil 4.3' de geminin sevk sisteminin temel gösterimi bulunmaktadır.



1 voith pervane 2 pervane tarafının kaplini 3 Dişli kutusu
4 makine tarafının kaplini 5 Siemens elektrik motoru

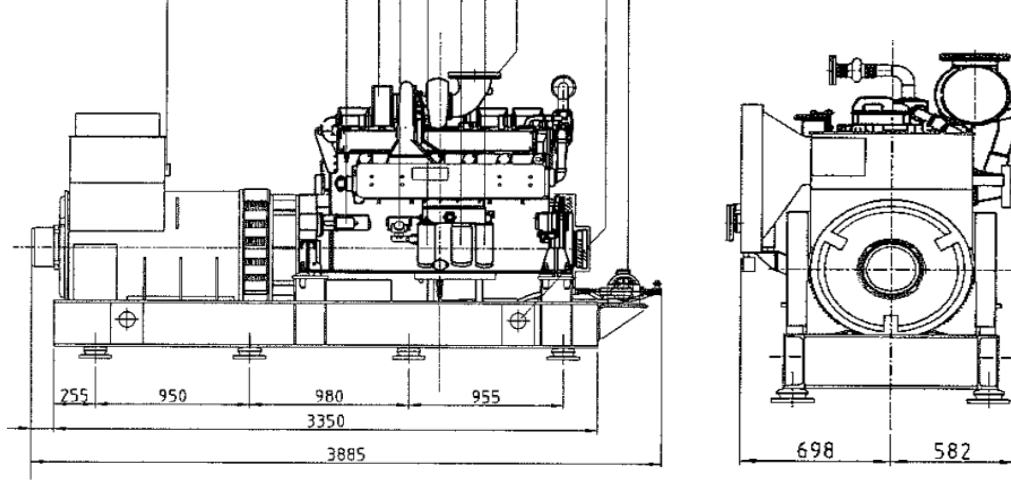
Şekil 4.3: M/V Sultanahmet gemisinin sevk sistemi (Mitsubishi,2008).

Çizelge 4.2 geminin ana güç kaynağı olan dizel jeneratörlerin ve sevk sistemi elemanlarının bilgilerini içermektedir.

Çizelge 4.2: M/V Sultanahmet gemisinin sevk sisteminin teknik özellikleri (Mitsubishi,2008).

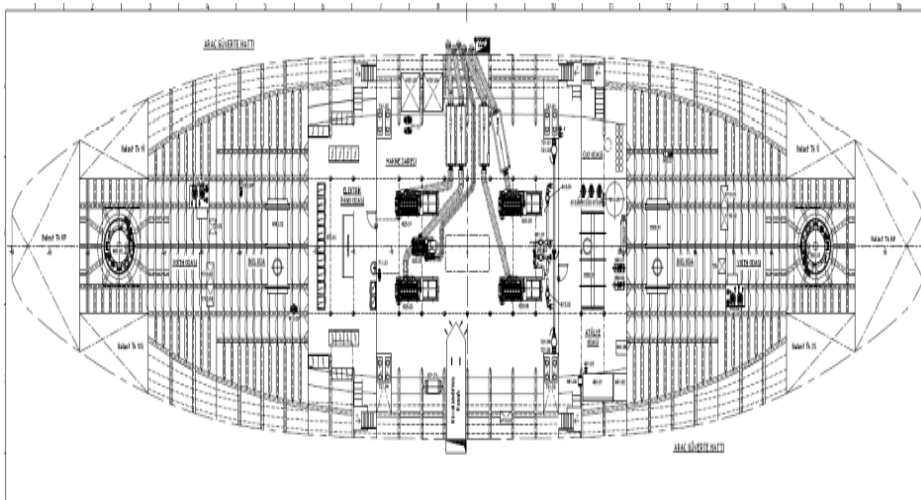
Üretici	Mitsubishi
Tip	Dizel Elektrik - S6R2MPTA
Ünite sayısı	4
Maximum devamlı güç	4 x 595 kW
Devir(rpm)	1500
Pervane tipi	Voith Schneider
Pervane adedi	2
Elektrik motoru	STAMFORD HCM634H

Şekil 4.4’de kesit ölçüleri verilen S6R2MPTA tip dizel makine 4 zamanlı, 6 silindirli, su soğutmalı ve turboşarj sistemi ile donatılmış bir makinedir. Strok uzunluğu 220 milimetre piston çapı 170 milimetredir.



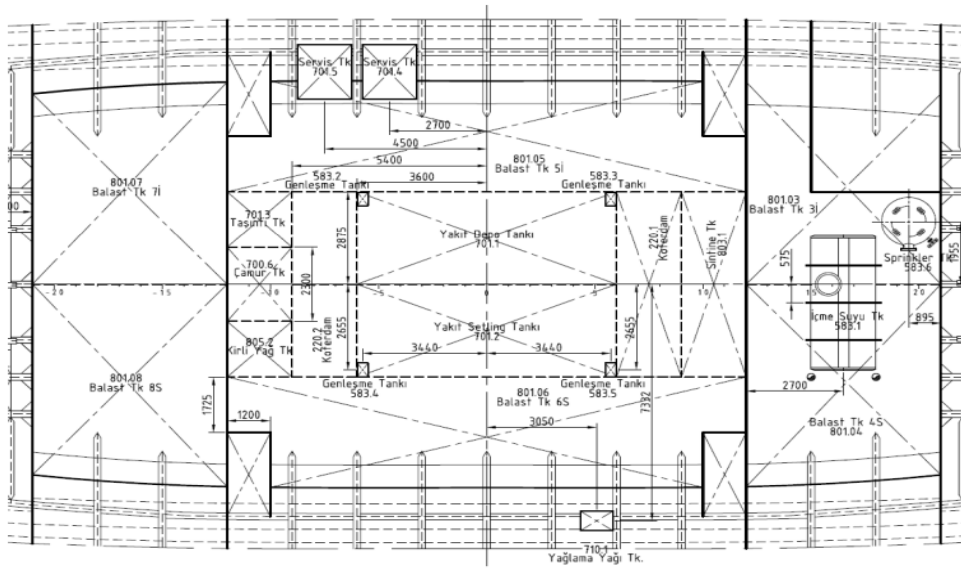
Şekil 4.4: Mitsubishi S6R2MPTA makinesinin ölçüleri (cm) (Mitsubishi,2008).

Şekil 4.5’te görüldüğü üzere geminin makine bölümü 3 farklı alandan oluşmaktadır. Geminin baş ve kıç bölümlerinde bulunan voith odalarında Siemens elektrik motorları ve voith pervane sistemi bulunmaktadır. Gemi makine dairesi, 4 dizel jeneratörün, yağ yakıt transfer pompalarının, yakıt servis tanklarının bulunduğu bölümdür. Elektrik pano odası, dizel jeneratörlerin ve diğer ekipmanların kontrolünü sağlayan elektrik panolarının bulunduğu bölümdür.



Şekil 4.5: Makine dairesi yerleşim planı.

Şekil 4.6’da gemide bulunan yakıt tanklarının konumlandırılması gösterilmiştir. Gemide bir adet 22,310 m³ hacminde yakıt depo tankı, bir adet 22,310 m³ settling tank, iki adet 3,530 m³ hacminde servis tankı ve bir adet 3,330 m³ taşıntı tankı bulunmaktadır. Yakıt tankları için ayrılmış alan 55,01 m³’tür.



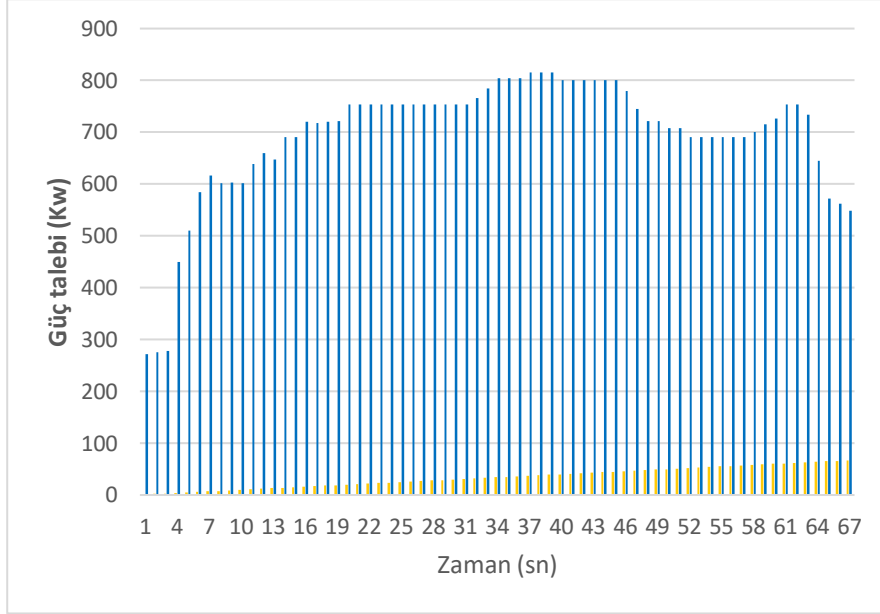
Şekil 4.6: Tank yerleşim planı.

Gemi seyir süresince trafiğin yoğun olduğu bir güzergahdan geçiyor ve genellikle daha büyük ticari gemilere yol vermek zorunda kalıyor. Bu nedenlerden dolayı, feribot en uygun rotadan saptığında geçişler sırasında güç talebinde değişiklikler olmaktadır. Hava ve deniz koşullarındaki değişikliklerde güç talebini etkileyen faktörlerdendir.

10.02.2022 tarihinde M/V Sultanahmet feribotunda Eskişehir-Topçular arasında yaptığı seyir, yanaşma ve kalkış manevralarına eşlik edilmiştir. Bu süreçte seyir ve manevra durumlarında makinaların yük değişimleri, yakıt tüketimleri ve zaman skalaları kaydedilmiştir. Ayrıca gemi üzerinde makina dairesinin konumlanması, mevcut tankların durumları ve kapasiteleri feribota ait yerleşim planı ve diyagramlarla birlikte incelenmiştir. Çalışma için gerekli tüm veriler feribot üzerinde elde edilmiştir. Kaydedilen veriler yapılan çalışmada kullanılmıştır.

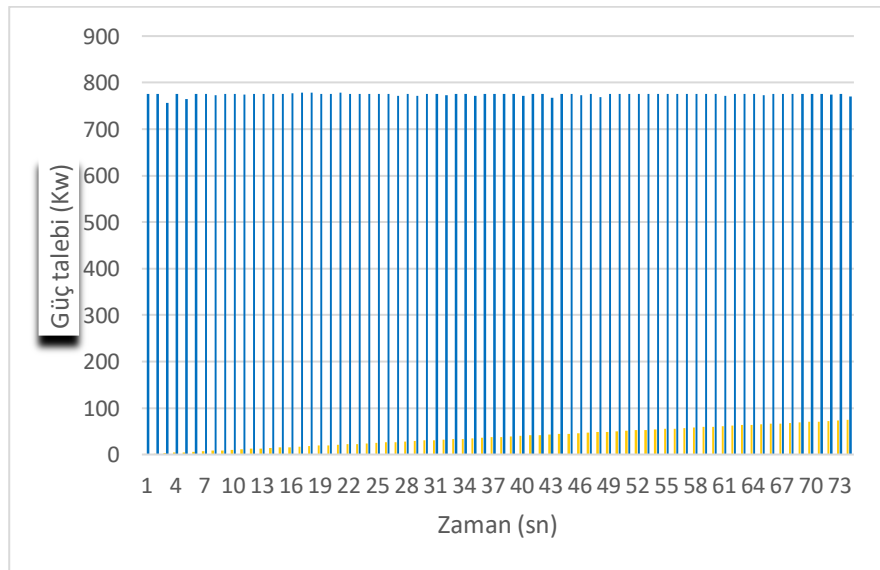
Geminin güç ihtiyacını gösteren kW değerleri, geminin kıyı güç kaynağından bağlantısı kesildiğinde, yükleme ve tahliye operasyonlarının kurulu toplam gücün %9 ile %16’sı kullanılarak gerçekleştirildiğini göstermektedir. Geçişler sırasında toplanan veriler, geçiş için kullanılan gücün toplam gücün yaklaşık %44’ü civarında olduğunu

göstermektedir. Gemi seyir boyunca meteorolojik şartlar ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak 9,5 knot ile 11 knot arasında değişen ortalama 10 knot hız ile seyir yapmaktadır. Kalkış manevrasından alınan kesit bir zamandaki güç talepleri Şekil 4.7’de belirtilen grafikte belirtilmiştir. Grafik incelendiğinde maksimum 815 kW minimum ise 272 kW güç talebi olduğu görülmektedir.



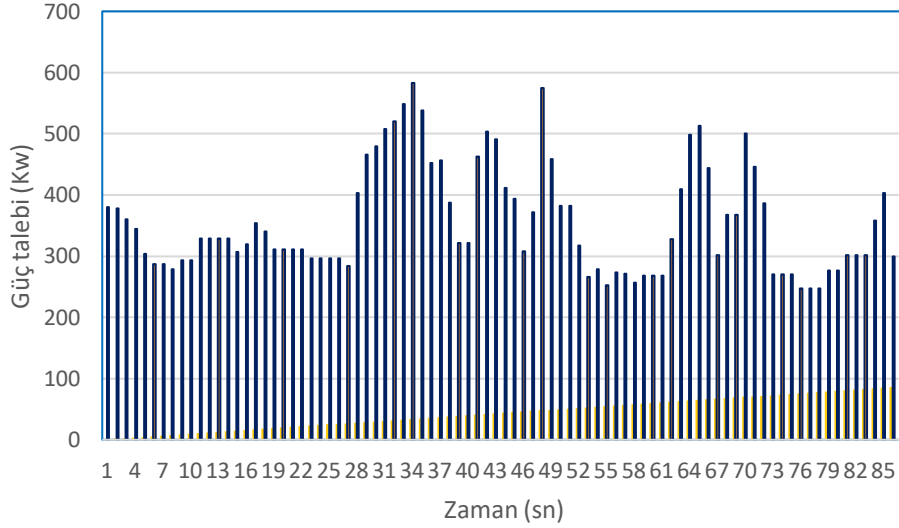
Şekil 4.7: Kalkış manevrası yük dağılımı.

Seyir sürecinden alınan kesit bir zamandaki güç talepleri Şekil 4.8’de belirtilmiştir. Grafik incelendiğinde talebin 760 kW ile 775 kW arasında birbirine çok yakın değerler olduğu gözlemlenmiştir. Seyirde ani güç değişimleri görülmemiştir.



Şekil 4.8: Seyir yük dağılımı.

Yanaşma manevrasından alınan kesit bir zamandaki güç talepleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde geminin güç talebinin maksimum 595 kW minimum ise 245 kW olduğu görülmektedir. Yanaşma manevrasında güç değişimlerinde ani büyük değişimler görülmüştür.



Şekil 4.9: Yanaşma manevrası yük dağılımı.

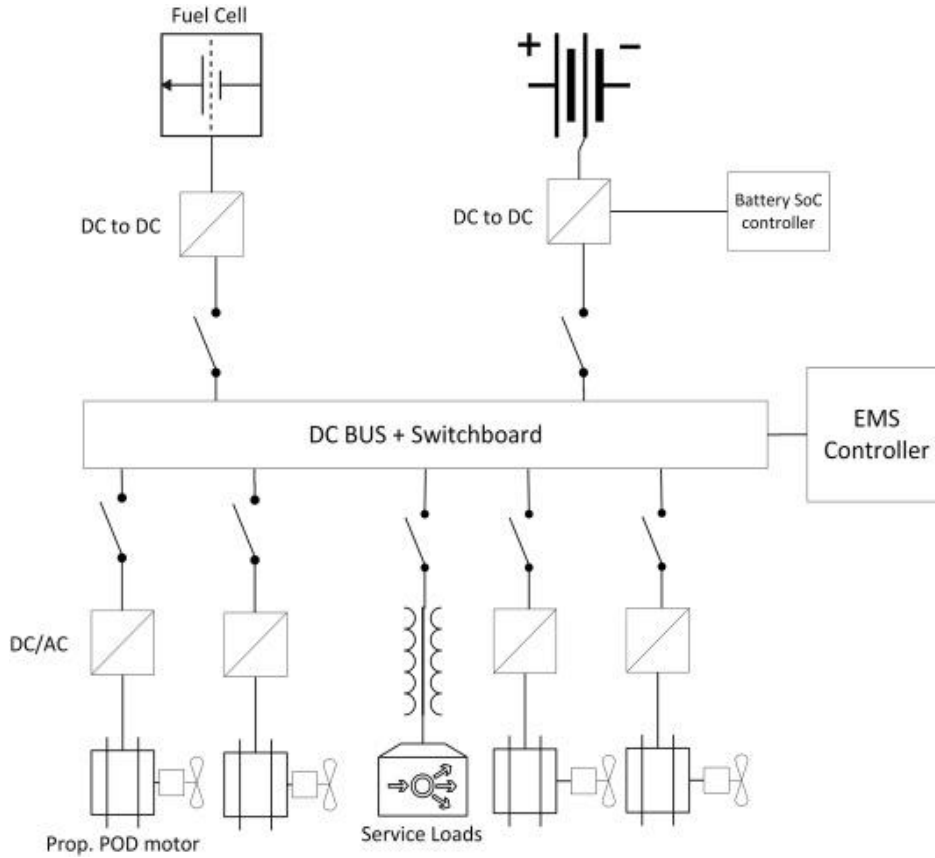
Seyirden gelen geminin liman içerisindeki uygun pozisyona yanaşabilmesi için birden fazla manevra yapması gerekmektedir. Yapılan manevra hareketleri ise makinenin yük durumunda ani değişimlere neden olmaktadır. Köprüüstünde manevranın iki taraftanda yapılabilmesinden dolayı kalkış manevrasında pozisyon değişikliğine gerek olmadan seyir başlanılmaktadır. Bu yüzden kalkış manevrasında yük değişimleri yanaşma manevrasındaki kadar sık değildir.

4.2 Yakıt Hücresi - Batarya Hibrit Sisteminin Tasarlanması

Çalışmada kullanılacak olan geminin çalışma profilleri ve operasyon süreçleri analiz edilmiştir. Geminin yanaşma ve kalkış manevraları, seyir süreci ve liman operasyonlarında ihtiyaç duyduğu güç miktarı ve gemide dizel jeneratörlerin sahip olduğu güç kapasiteleri ve makine dairesi yerleşim planı da dikkate alınarak tasarlanacak olan hibrit sistemi için uygun yakıt hücresi ve batarya paketi seçilmiştir.

Şekil 4.10 ana güç ünitesi yakıt hücresi ve ikincil güç kaynağı bataryalar olan hibrit sistemi ve bileşenlerini içeren temsili diyagramı göstermektedir. Şekil 4.10' da gösterildiği gibi EMS alt sistemi, yük için gerekli gücü akıma dönüştürür ve bunu yakıt hücresi ve pil alt sistemleri arasında böler. Yakıt hücresi ve bataryaların voltajı gerekli

akıma göre değişeceği için, gerekli gücü sağlarken güç kaynağı voltajını stabilize etmek için DC-DC çeviriciler kullanılır. Yakıt hücresi sistemi amaçlanan güç skalasına ulaşabilmek için birden fazla yığından meydana gelir. Sistemde karmaşıya neden olmamak için yakıt hücresi sistemi tek bir blok ile gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : Tasarlanan elektrik blok diyagramı.

Geminin seyir ve manevralarını içeren üç farklı enerji ihtiyaç durumu belirlenmiş ve Şekil 4.11’de gösterildiği gibi yakıt hücresi ile bataryaların çalışma şekilleri koordine edilmiştir. Anlık hızlanma taleplerini bataryalar ile kontrol ederek FC’lerin ömrün uzatılması sağlanır (Zeng ve diğ, 2018).

Durum 1: Anlık hızlanma ve hızlı tepki verme süresi gerektiren enerji taleplerini içeren yanaşma ve kalkış manevralarında, bataryalar ve FC yığınları güç zirvelerini birlikte yönetir.

Durum 2: Kalkış ve yanaşma manevralarında enerji talebindeki ani düşüş durumlarında yakıt hücrelerinde üretilen enerjinin bir kısmı bataryalarda depolanır.

Durum 3: Seyir sırasında, FC yığınları geminin enerji ihtiyacını karşılar ve aynı anda bataryaları şarj eder.

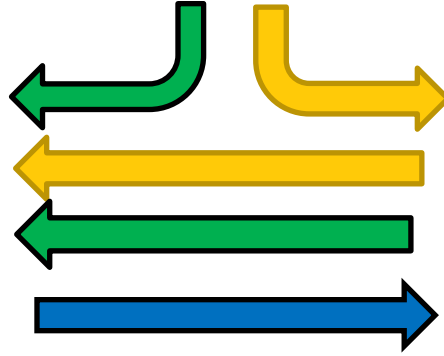
Yakıt hücresi modülü



Elektrik motoru



Batarya paketi



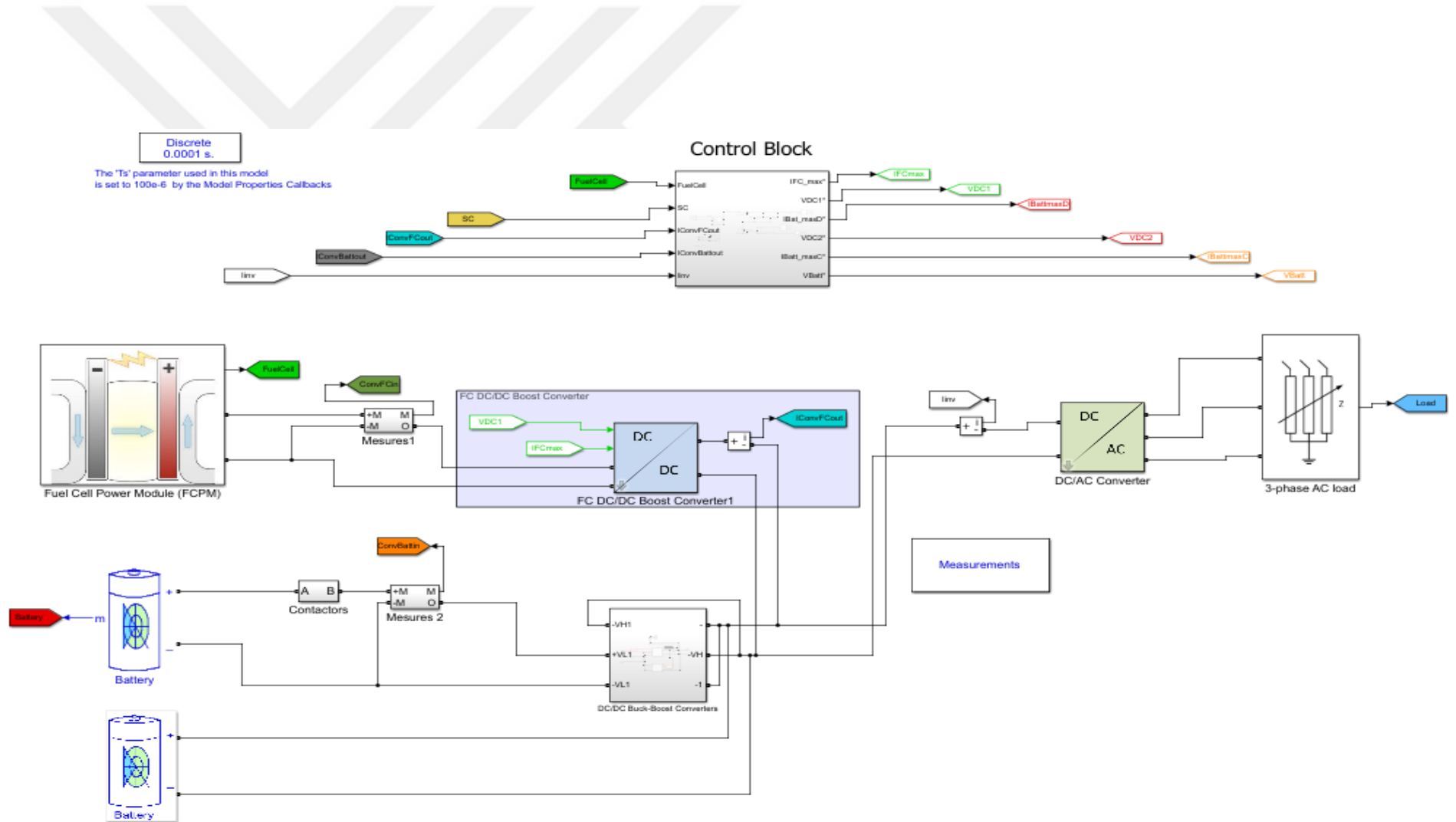
Şekil 4.11 :Yakıt hücresi ve bataryaların çalışma senaryoları.

Yakıt hücresi temelli hibrit bir sistemin gerçek maliyeti oldukça yüksektir. Tasarlanan sistemin geminin operasyon profiline uygunluk durumu , sistemin performansı sayısal simülasyonlar kullanılarak öngörülebilir. Simulasyon sistemin davranışını taklit ederek tasarlanan sistemin performansını analiz edebilir. Farklı çalışma koşulları için ayarlanmış ve kolaylıkla uygulanabilen esnek bir ortam oluşturan simülasyon uygulaması zaman alanlı üç serbestlik derecesi (DOF) ile MATLAB/Simulink'te gerçekleştirilmiştir.Tasarlanan yakıt hücresi/batarya hibrit sistemi , SimPowerSystems (SPS) araç kutusu kullanılarak MATLAB Simulink ortamında matematiksel olarak modellenmiştir.

4.3 Yakıt hücresi ve batarya hibrit sisteminin simulink eş benzetimi

Tasarlanan hibrit sistemin Matlab Simulink programında yapılan eş benzetiminin genel görünümü Şekil 4.12' de gösterilmektedir. Şekil 4.12'de hibrit sistemin temel bileşenleri olan SOFC, batarya ve DC/DC dönüştürücüler arasındaki bağlantı ve bileşenlerden alınan verilerin kontrol bloğunda girdi olarak kullanılışı gösterilmektedir. Hibrit sistemin güç kaynakları olan bataryalar ve yakıt hücresi modülü DC güç çıkışı sağlamaktadır. Hibrit sistem bileşenlerinin voltajı, her bir güç kaynağından talep edilen akıma göre değişir. Bu nedenle, gerekli gücü sağlarken güç kaynağı voltajını stabilize etmek için bir DC/DC dönüştürücü kullanılır. Yakıt hücresinden sonra konulan dönüştürücü tek yönlü olup sadece yakıt hücresinin DC barasını beslemesini sağlar. Diğer güç kaynağı olan bataryadan sonra konulan dönüştürücü ise iki yönlü olup DC barası tarafından bataryayı sarj etmesini ve bataryanın ihtiyaç durumlarında devreyi beslemesini sağlar. Kontrol bloğu olarak simgelenen enerji kontrol sistemi ise, yakıt hücreleri ve batarya arasındaki yük paylaşımının nasıl gerçekleştirileceğini tanımlar. Şekil 4.12'de gösterilen enerji kontrol sisteminin ana girdileri, gerekli yük gücü ve pil SOC'sidir. Gerekli yük gücüne ve pilin kalan kapasitesine göre gibi EMS alt sistemi, yük için gerekli gücü akıma dönüştürür ve bunu yakıt hücresi ve pil alt sistemleri arasında böler. Gerekli yük gücü, yakıt hücresinin sahip olduğu üretim kapasitesi ve bataryaların kalan şarj durumuna bağlı olarak bataryaların şarj yada deşarj olma durumu belirlenir.

Benzetimi yapılan hibrit sistemin temel bileşenleri, SOFC, batarya ve DC/DC dönüştürücülerin modelleme yaklaşımı bu bölümde açıklanmıştır.



Şekil 4.12 :Yakıt hücresi ve batarya hibrit sisteminin Simulink eş benzetimi

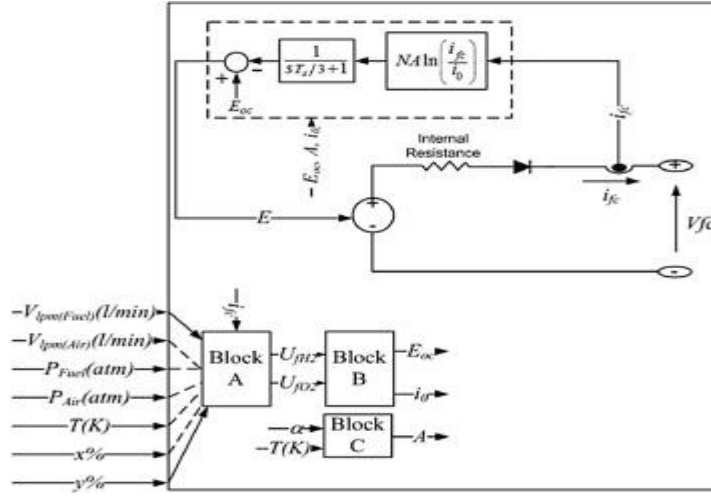
4.3.1 Yakıt hücresi

Bu çalışma için yakıt hücresi seçilirken geminin mevcut güç kapasitesi, dizel makinaların kapladığı alan ve bu makinelerin ağırlığı göz önüne alınarak sistem değişikliğinde geminin emniyetli ve güvenli seyir yapma yeteneğini koruyabilecek özelliklere sahip olması göz önünde bulundurulmuştur. Geminin yük dağılımları analiz edildiğinde hibrit sistem içerisinde 900 kW güç kapasitesine sahip yakıt hücresi modülünün talepleri karşılayacağı öngörülmüştür. Seçilen yakıt hücresi, ticari özelliklere sahip olgunlaşmış teknolojiye sahip firmalardan biri olan Bloom Energy üreticisine ait ES5-YA8AAN model bir katı oksit yakıt hücresidir. SOFC ürünün modelde kullanılan referans değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir .

Çizelge 4.3: Seçilen yakıt hücresinin teknik bilgileri (Url-6).

Güç çıkışı	300kW
Standart frekans	60 Hz
NO _x emisyonu	0,00077 g/kWh
SO _x emisyonu	İhmal edilebilir
CO ₂ emisyonu	307.9899g/kWh
VOC emisyonu	0.00721 g/kWh
Verimlilik	65-53%
Yakıt tüketimi	307.7 m ³ /h
Ağırlık	7.8 ton
Uzunluğu	5.874 m
Yüksekliği	2.6416 m
Genişliği	1.1336 m
Gürültü seviyesi	< 70 dBA @ 1.8m

Şekil 4.13' te gösterilen SOFC modeli Simulink'te uygulanmaktadır ve genel bir hidrojen yakıt hücresi yığın modeli olarak elektrik güç sistemlerinin SPS kitaplığına entegre edilmiştir (Souleman ve diğ, 2009) .



Şekil 4.13 Simulink/MATLAB ortamındaki yakıt hücresi modeli.

Bu modelin ana parametreleri, yakıt hücresi veri sayfasından veya bu modelin kullanımını kolaylaştıran polarizasyon eğrisi testinden elde edilebilir. Bu model, yakıt hücresi tepki süresini dikkate alarak SOFC'nin hem kararlı durum hem de dinamik performansını temsil edebilir. Ayrıca bu model, elektriksel ve kimyasal modellerin özelliklerini de dikkate almaktadır. Bu model, $\pm 0.1\%$ hata ile veri sayfası performans verilerinin yanı sıra deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Tek bir hücrenin modeli şu şekilde ifade edilebilir.

$$V_{Cell} = E_{thermo} - \eta_{activation} - \eta_{ohmic} - \eta_{concentration} \quad (4.1)$$

$$\eta_{ohmic} = a_c b_c + \ln i \quad (4.2)$$

$$\eta_{ohmic} = i R_{ohmic} \quad (4.3)$$

$$\eta_{concentration} = c \ln \frac{i_L}{i_L - i} \quad (4.4)$$

E_{thermo} tek bir hücrenin termodinamik tersinir voltajı, i akım yoğunluğu, a_c ve b_c iki sabit değerdir. R_{ohmic} toplam omik direnç, i_L sınırlayıcı akım yoğunluğu ve c sabit bir değerdir.

Bir yakıt hücresi yığınının çıkış voltajı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$U_{FC} = n_{cell} \cdot V_{Cell} \quad (4.5)$$

SOFC'nin hidrojen tüketimi (H_2 cons) aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Njoya Motapon ve diğ, 2014).

Hidrojen tüketimi:

$$m_{H_2} = M_{H_2} \cdot \int \frac{n_{cell} \cdot I_{FC}}{2F} dt \quad (4.6)$$

M_{H_2} hidrojenin molar kütesidir; F faraday sabitidir.

Daha sonra bu hidrojen tüketimi, hidrojen maliyetini ve SOFC'ye enerji girdisini hesaplamak için kullanılır: (Zeng ve diğ, 2018)

Yakıt hücresinin verimliliği:

$$\eta_{FC} = \frac{U_{FC} I_{FC}}{\Delta \theta_{hydrogen} \cdot \Delta H} \quad (4.7)$$

ΔH hidrojenin entalpi değişimi ; $\Delta \theta_{hydrogen}$ tüketilen hidrojen akışıdır.

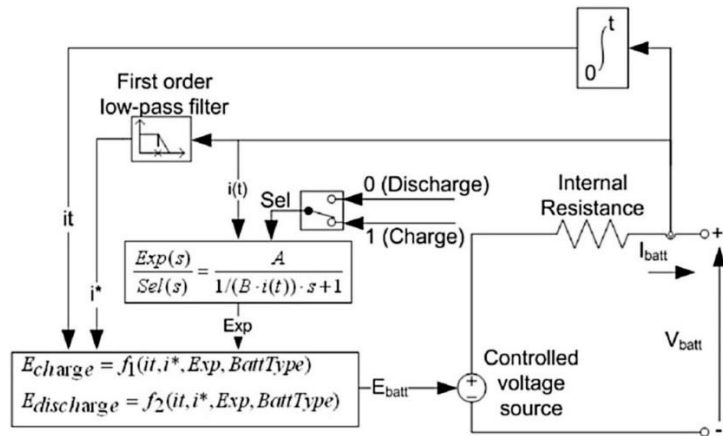
4.3.2 Batarya alt sistemi

Denizcilik sektöründe inşa edilen hibrit ve sıfır emisyonlu gemilerin büyük çoğunluğu Corvus Enerji Depolama Sistemleri ile donatılmıştır. Üretici firmaya ait seçenekler arasında bulunan Dolphin Power batarya modeli yüksek güç yoğunluğunu ve makul bir enerji yoğunluğunu en yüksek güvenlik seviyesiyle birleştirerek özellikle hafif uygulamalar için tasarlanmıştır. Dolphin Power, maksimum hıza ulaşmak için itiş gücünü artırması gereken yüksek hızlı tekneler, pillerini hızlı ve sık şarj etmesi gereken tekneler, hafifliğin önemli olduğu ancak aynı zamanda yüksek şarj veya deşarj gücünün gerekli olduğu gemiler için idealdir. Özellikle turist gemileri, kanal gemileri, yolcu gemileri ve feribotlar için uygun özelliklere sahiptir. Çalışmamızda verilerini kullanmış olduğumuz gemide arabalı feribot olduğu için Corvus Dolphin Power batarya modeli uygun bir seçim olarak görülmüştür. Hibrit system içerisinde 540 kW güç kapasiteli batarya paketinin ihtiyaçları karşılayacağı öngörülmüştür. Bu çalışma için seçilen batarya, Corvus Energy üretici firmasına ait ürünün modelde kullanılan referans değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4: Seçilen batarya modelinin teknik özellikleri (Url-7).

C-Hızı- Tepe (Deşarj / Şarj)	10 saniye için 4,4C / 2,0C
C-Rate - Sürekli (Deşarj / şarj)	2,2C / 1,6C
Modülün boyutu	77 kWh / 805 VDC
Maksimum Gravimetrik Yoğunluk – Paket	125 Wh/kg 8,0 kg/ kWh
Maksimum Hacimsel Yoğunluk - Paket	75 Wh/l
Ağırlık	436 kg
Boyutlar	Yükseklik:2380mm Genişlik: 655 mm Derinlik: 500 mm

SPS kitaplığı, pilin tepki süresini hesaba katarak pilin hem sabit durumunu hem de dinamik davranışını temsil edebilen, kullanımı kolay, geliştirilmiş bir dinamik pil modeli içerir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılmıştır. Genel pil bloğu dört tip pili de simüle edebilir: kurşun asit, lityum iyon, nikel-kadmiyum veya nikel-metal-hidrit . Pil modeli, maksimum %5 hata ile 4 farklı pil tipi için deneysel sonuçlara göre doğrulanmıştır, ancak pil şarj durumu (SOC) %20'nin altına düştüğünde ve pilin tamamen boşaltılması durumunda hata $\pm\%10$ 'a yükselir (Tremblay ve Dessaint, 2009). Şekil 4.14 kullanılan pil modelinin eşdeğer devresini göstermektedir.



Şekil. 4.14: Simulink/MATLAB ortamında batarya modeli.

Bataryanın voltajı (V_{Batt}) açık devre voltajının (E_{batt}), dahili direncin (R_{ohm}) ve akü akımının (I_{Batt}) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V_{Battery} = E_{Battery} - R_{ohm} I_{Battery} \quad (4.8)$$

Bataryadan boşalan güç ve enerji aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$Power_{Battery} = V_{Battery} I_{Battery} \quad (4.9)$$

$$Energy_{Battery} = \int Power_{Battery} dt \quad (4.10)$$

(Tremblay ve Dessaint, 2009). Thimm, C. (2007). Zemships-the first fuel cell passenger ship in Ham-725 burg. In ZERO REGIO Workshop, Montecatini Terme, Italy (Vol. 726, p. 727).

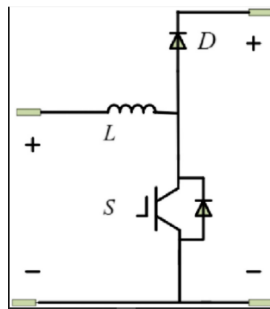
4.3.3 DC / DC çevirici

Hibrit sistem bileşenlerinin voltajı, her bir güç kaynağından talep edilen akıma göre değişir. Bu nedenle, gerekli gücü sağlarken güç kaynağı voltajını stabilize etmek için bir elektronik devreye ihtiyaç vardır. SOFC'nin çıkış voltajını düzenlemek için, yakıt hücresi sistemi ile doğru akım (DC) barası arasında, bir boost tipi tek yönlü DC-DC dönüştürücü kullanılır (Han ve diğ, 2014). Kullanılan dönüştürücü, Şekil 4.15'de gösterildiği gibi bir indüktör (L), bir anahtar (S) ve bir diyot (D)'den oluşur. Bu DC-DC dönüştürücü aracılığıyla DC barasına SOFC tarafından sağlanan net akım, çalışma voltajı oranına (k) göre yeniden ayarlanır (Barelli ve diğ, 2012). Dönüştürücünün sabit veriminin %95 olduğu varsayılmıştır.

(V_{Batt}) akü voltajıdır, (V_{FC}) yakıt hücresi voltajıdır ve (I_{FC}) yakıt hücresi/DC-DC dönüştürücü alt sisteminden gerekli olan akımdır.

$$k = \frac{V_{Battery}}{V_{FC}} \quad (4.11)$$

$$I_{FCnet} = I_{FC} \times k \quad (4.12)$$



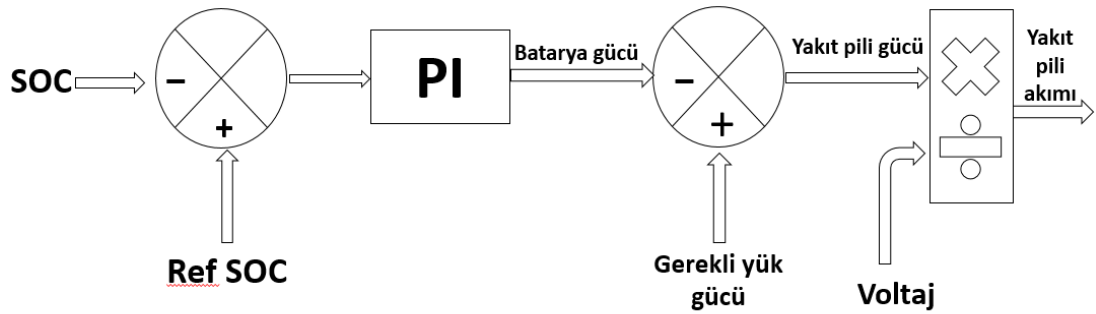
Şekil 4.15: Simulink/MATLAB ortamındaki boost tipi tek yönlü DC-DC dönüştürücü modeli.

4.3.4 Enerji yönetim sistemi

Enerji yönetimi stratejisi, yakıt hücreleri ve batarya arasındaki yük paylaşımının nasıl gerçekleştirileceğini tanımlar. Toplam güç talebi, yakıt hücresi kullanım seviyesi ve batarya şarj durumu gibi bir dizi girdi hangi eylemlerin gerçekleştirileceğini değerlendiren EMS'ye beslenir. Enerji yönetim sistemi, bir veya daha fazla parametrenin optimizasyonunu sağlar. Bu faktörlerden bazıları, örneğin hidrojen tüketiminin en aza indirilmesi veya SOFC zararının bozulmasıdır.

Basitliği ve ayarlama kolaylığı nedeniyle, hibrit tahrik sistemleri için PI (İngilizce: Proportional Integral) oransal integral kontrolörlerine dayalı EMS önerilmiştir (Bassam ve diğ, 2017). PI EMS'nin amaçları, pilin şarj durumunu (SOC) bir referans değerinde tutmak ve yakıt hücresinin sabit durum gücü sağlamasına izin vermektir (Fadel ve Zhou, 2011). Pil SOC'sini nominal bir değerde tutarak performansı ve ömrü iyileştirilebilir (Njoya Motapon ve diğ, 2014).

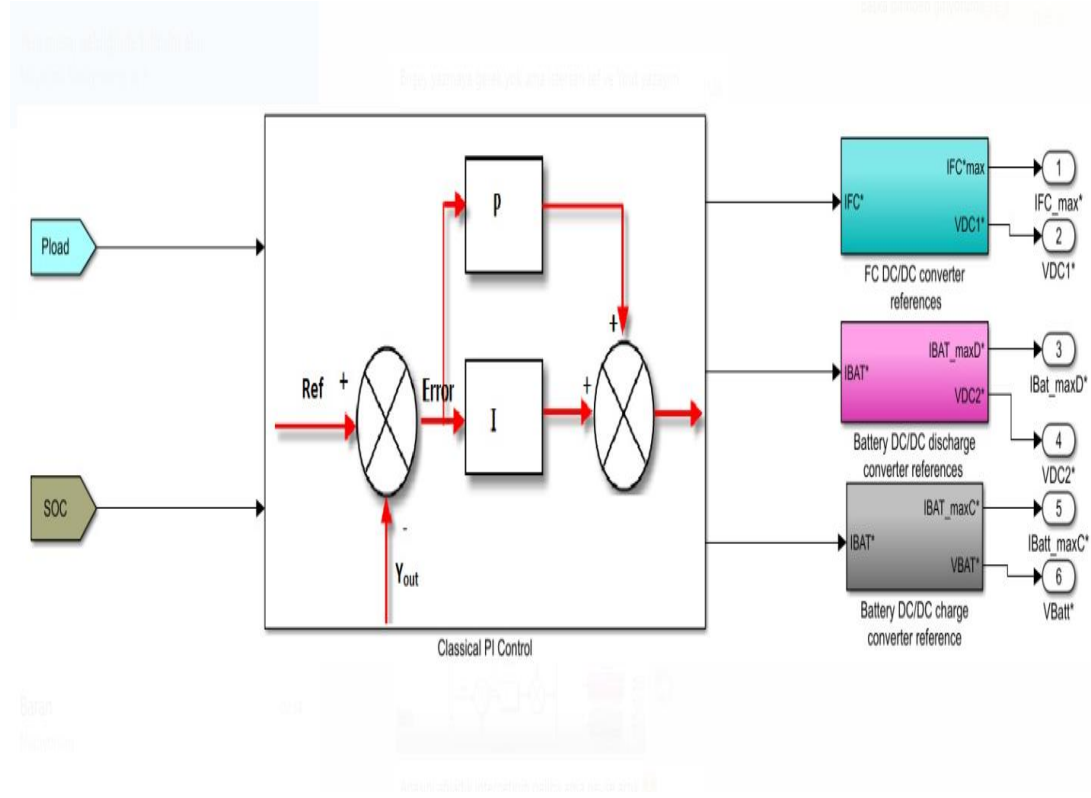
Bu stratejide, pilin referans SOC değeri ile pil SOC si arasındaki farkın bir fonksiyonu olarak pil gücüne karar vermek için bir PI denetleyicisi kullanılır. Pil gücü daha sonra Şekil 4.16'da gösterildiği gibi yakıt hücresi gücünü elde etmek için gerekli yük gücünden çıkarılır .



Şekil 4.16: Klasik PI kontrol enerji yönetimi stratejisi.

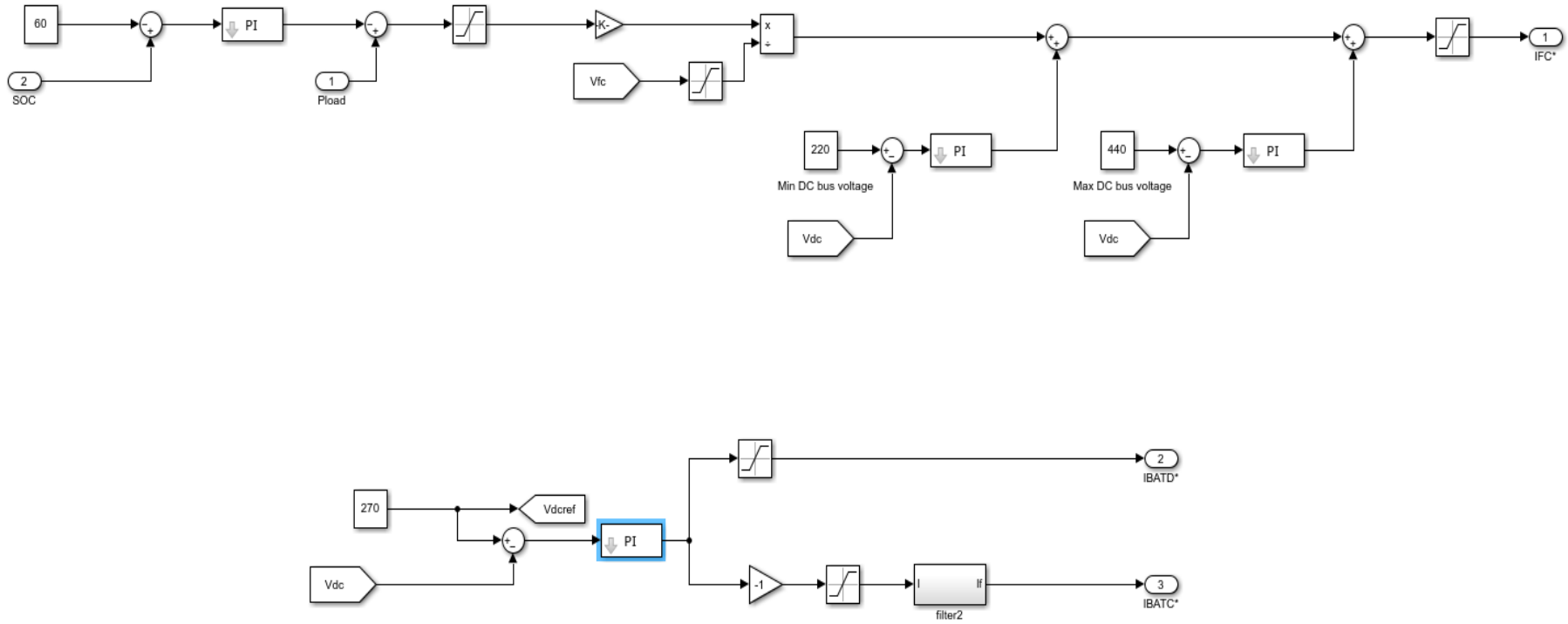
Şekil 4.17'de gösterilen stratejinin ana girdileri, gerekli yük gücü ve pil SOC'sidir. Gerekli yük gücüne ve pilin kalan kapasitesine göre gibi EMS alt sistemi, yük için gerekli gücü akıma dönüştürür ve bunu yakıt hücresi ve pil alt sistemleri arasında böler. Gerekli güç ve yakıt hücresinin sahip olduğu üretim kapasitesine bağlı olarak bataryaların şarj yada deşarj olma durumu belirlenir. Bu strateji, pil SOC'si referans değerinin üzerindeyken pil sisteminden daha fazla güç kullanma

eğilimindedir, bu arada yakıt hücresi düşük güç sağlar. Batarya SOC değeri referans değerinin altına düştüğünde, yük gücünü sağlamak ve bataryayı referans değerine şarj etmek için yakıt hücresi sistemi kullanılır. PI kontrolör tepki süresi ve kararlılık arasında bir dengeye sahip olmak için, kontrolör parametreleri MATLAB kontrol sistemi araç kutusu kullanılarak incelenen sürüş çevrimi için ayarlanır .



Şekil 4.17: Tasarlanan hibrit sistemin PI kontrol sisteminin genel gösterimi.

Matlab Simulinkte eş benzetimi yapılan hibrit sistemin PI kontrol enerji yönetimi stratejisinin ayrıntılı bir şekilde referans değerlerinin de belirtildiği diyagram Şekil 4.18’ de gösterilmiştir. Sistem için seçilen yakıt hücresinin çalışma aralığının minimum gücü 100 kW ve maksimum gücünün 900 kW olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Seçilen batarya için üretici firmanın belirttiği optimum şarj oranı %60 ile %90 arasındadır. Batarya için belirtilen referans değeri %60’dır. Batarya kapasitesi %60 altına düştüğü zaman yakıt hücreleri bataryaları şarj eder. Bataryanın sağlayacağı güç ise 120 ile 400 kW aralığındadır. DC barasına sağlanacak minimum voltaj 220 volt iken maksimum voltaj ise 440 dır.

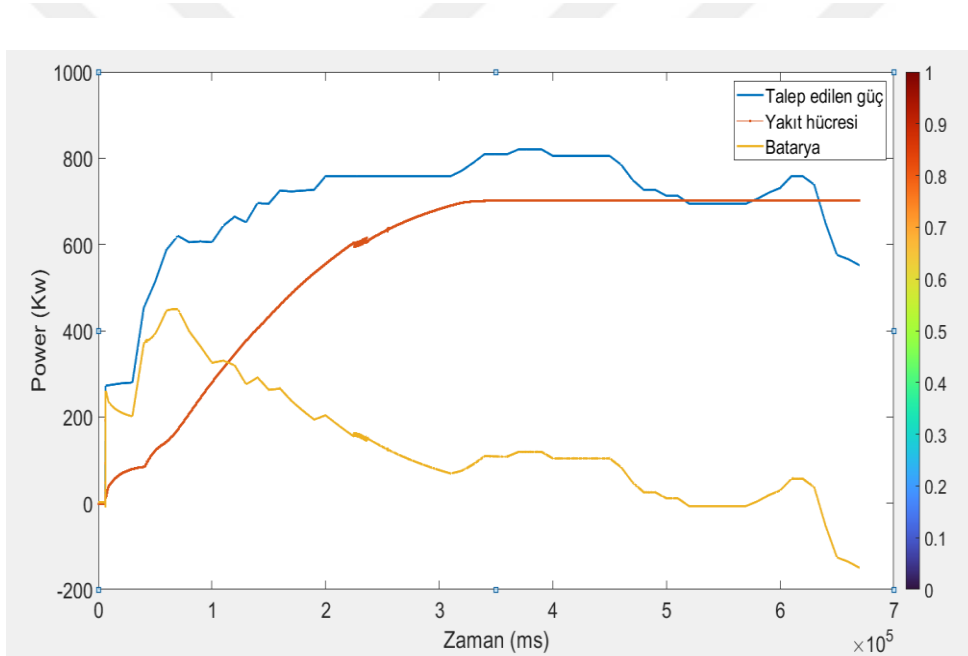


Şekil 4.18: Tasarlanan hibrit sistemin PI kontrol enerji yönetimi stratejisi ve değerleri

4.4 Simulasyon Çıktıları

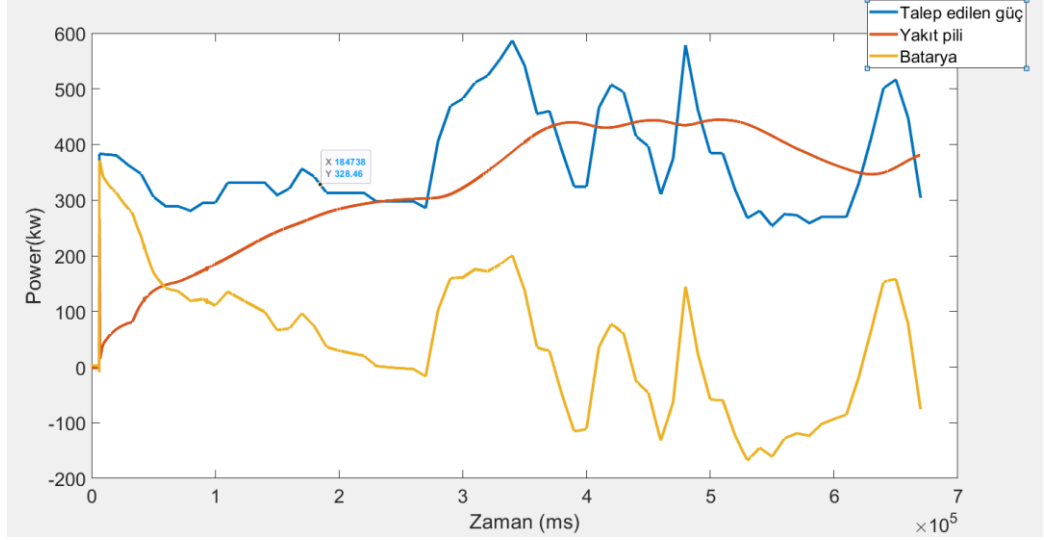
Gemi Eskişehir Topçular arasında 24 saat aralıksız ortalama 30 dakikalık sefer süresi ve 15 dakikalık sefer aralığı ile çalışmaktadır. Geminin seyir sürecinden, yanaşma ve kalkış manevralarından alınan kesit örnekler ile tasarlanan hibrit sistemin durumu analiz edilmiştir.

Şekil 4.19’da kalkış manevrasından alınan örnek kesit bir zamanın güç talebinin hibrit sistem bileşenleri arasında dağılımı gösterilmiştir. Kalkış manevrasında gemiden talep edilen gücün aniden yükselmesi durumunda hibrit sistemin birincil enerji kaynağı olan yakıt pillerinin yüksek sıcaklık çalışma seviyesine hızlı bir şekilde ulaşamamasından dolayı yeterli güç çıkışı sağlayamamıştır. Bu yüzden enerjinin büyük kısmının bataryalar tarafından karşılandığı görülmektedir.



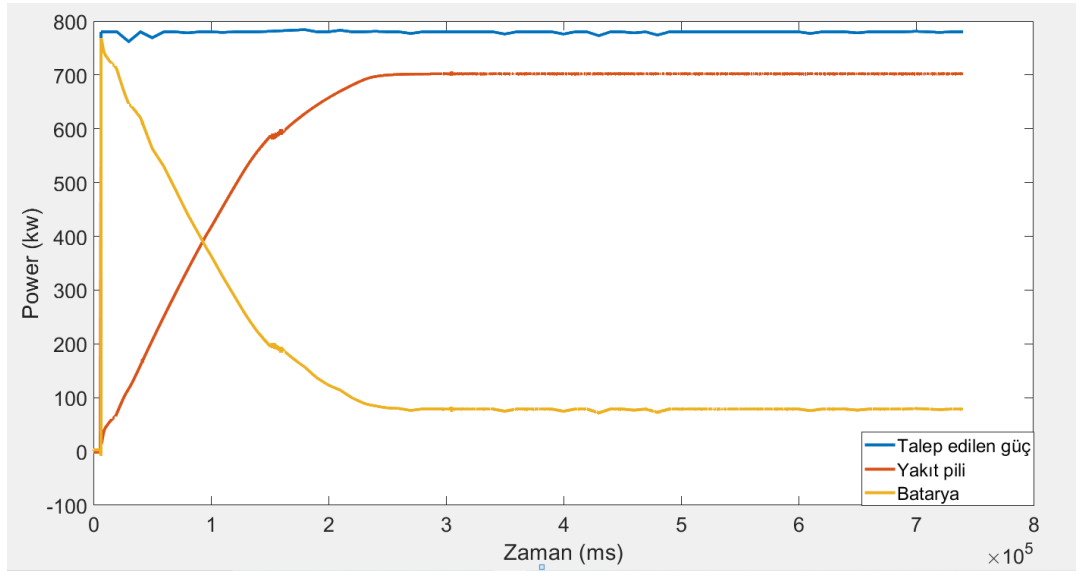
Şekil 4.19 : Kalkış manevrası güç dağılımı.

Yanaşma manevrasında güç talebinde ani düşüş ve yükselmelerin fazlaca olduğu Şekil 4.20’de görülmektedir. Yanaşma manevrasında güç zirvelerini yakıt pilleri ve bataryalar birlikte karşılamaktadır. Manevra boyunca enerji talebindeki ani düşüşlerde yakıt pilleri tarafından üretilen fazla enerji bataryalar tarafından depolanmaktadır.



Şekil 4.20 : Yanaşma manevrası güç dağılımı.

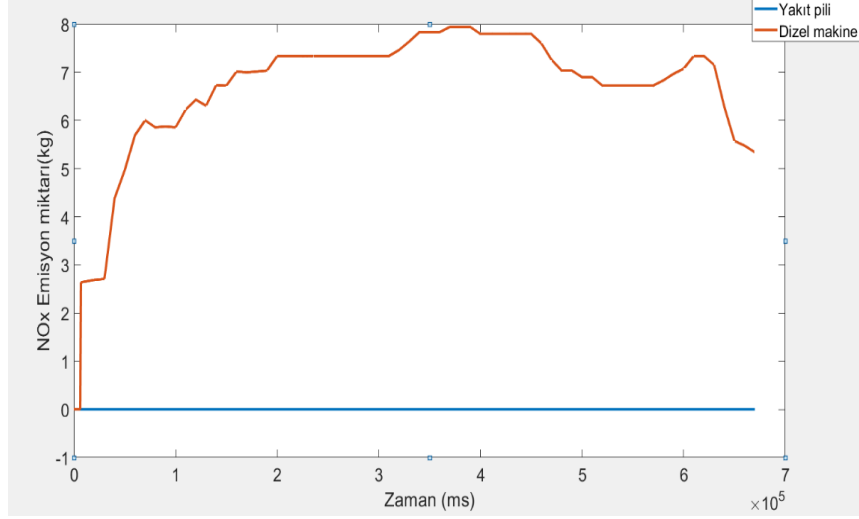
Seyir periyodundan alınan örnek bir kesit sürede geminin güç talebinin büyük değişiklikler göstermediği izlenmiştir. Şekil 4.21’de görüldüğü üzere seyir başlangıcındaki ani yükselmeye güç talebinin büyük bir kısmı yakıt hücresi uygun çalışma sıcaklığına gelene kadar bataryalar tarafından karşılanmıştır. Seyir süresince yakıt pilleri optimum güçte çalışarak güç talebini karşılamış ve bataryaları şarj etmiştir.



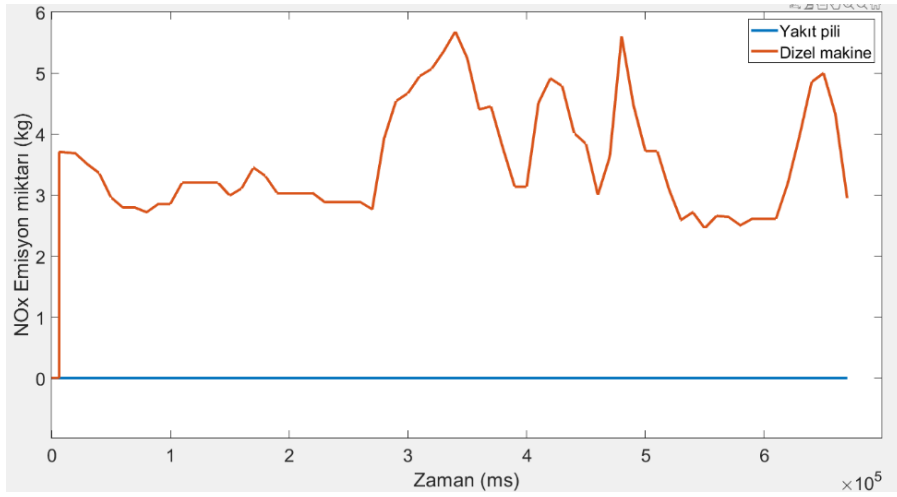
Şekil 4.21 : Seyir güç dağılımı.

Dizel makinelerde yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda havanın içerisindeki azotun oksijen ile birleşmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. Yanma odası sıcaklığı ve hava/yakıt oranı NOx oluşumunu etkileyen iki önemli parametredir. NOx hedeflenen emisyon regülasyonlarında azaltılması mecburi olan gazlardır.

Azot oksit emisyonları yanma sıcaklığına bağlı olduğu için, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de görüldüğü üzere makine yükünün artmasıyla NOx emisyonları artmaktadır. Kalkış ve yavaşma manevralarında düşük yüklerde yetersiz hava yakıt karışımı sonucu meydana gelen verimsiz yanmadan dolayı emisyon miktarları fazladır.

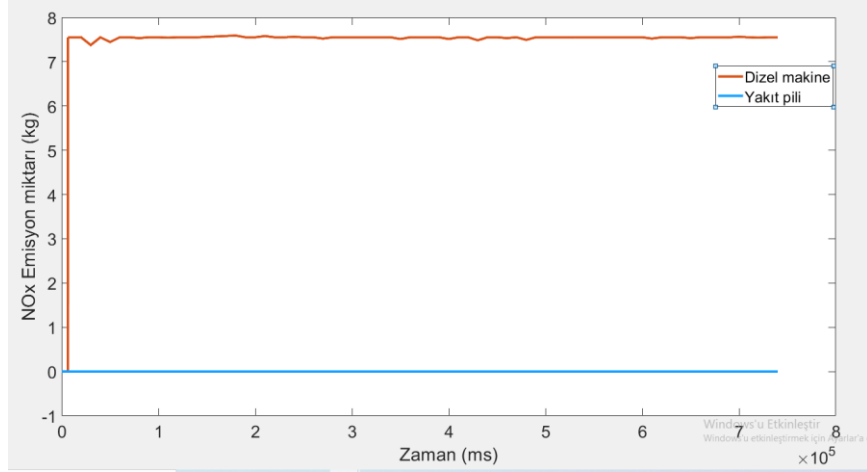


Şekil 4.22 : Kalkış manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin NOx emisyon miktarları.



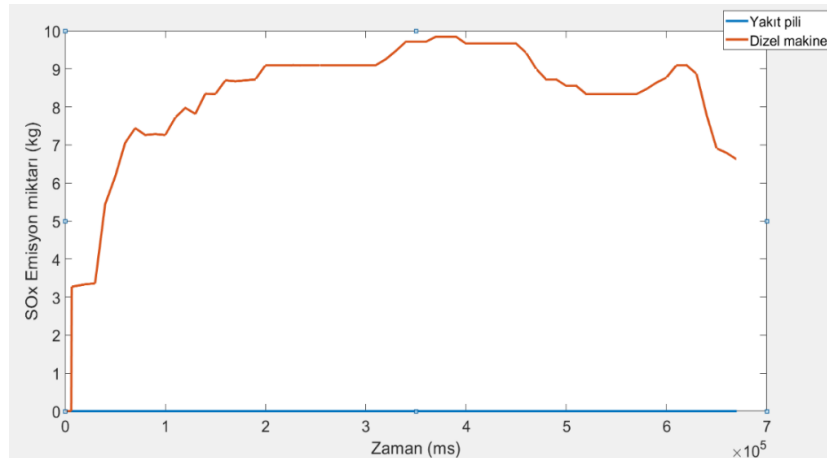
Şekil 4.23 : Yavaşma manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin NOx emisyon miktarları.

Şekil 4.24 de seyirden alınan örnek bir kesit süresince dizel makine ve yakıt hücresindeki NOx emisyonları arasındaki fark görülebilir. NOx'in kaynağı konvansiyonel dizel makinelerde hava ve yanma sıcaklığıdır. NOx emisyon miktarındaki azalma %99'dan fazladır. Yakıt hücresinde kullanılan yakıtın doğalgaz olması ve daha önce reformerlerden geçirilmiş olması emisyon miktarındaki düşüşü etkilemektedir.

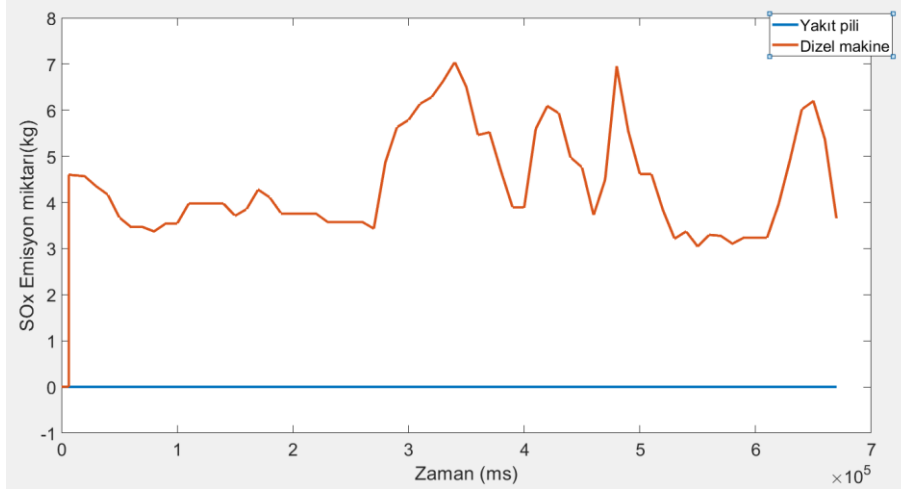


Şekil 4.24 : Seyir için yakıt hücresi ve dizel makinenin NOx emisyon miktarları.

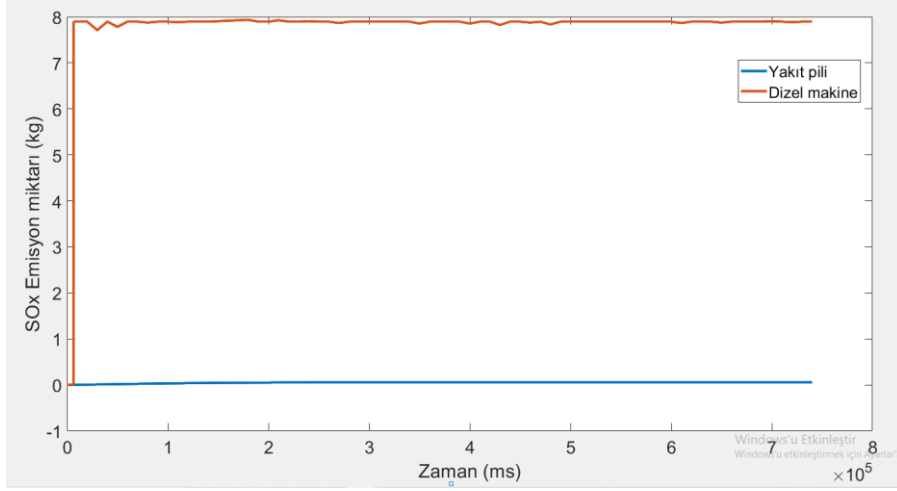
Dizel makinelerinden yayılan emisyonlardan biri de SOx emisyonlarıdır. Yakıt içerisinde bulunan kükürt miktarına bağlı olarak yanma sonucu kükürdün hava ile birleşmesi ile SO_x oluşmaktadır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 da görüldüğü üzere dizel makinede yavaşlama ve kalkış manevralarında yakıt tüketimiyle orantılı olarak emisyon yayılmaktadır. Yakıt hücresinde ise emisyon ihmal edilebilir seviyededir.



Şekil 4.25 : Kalkış manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin SOx emisyon miktarları.



Şekil 4.26 : Yanaşma manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin SOx emisyon miktarları

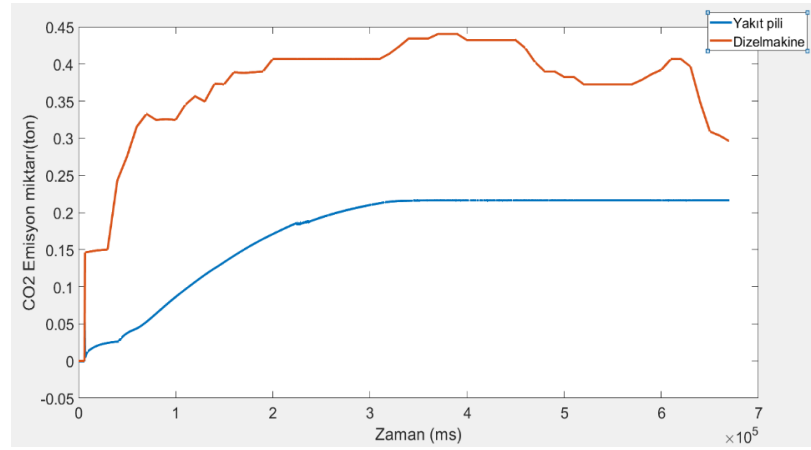


Şekil 4.27 : Seyir için yakıt hücresi ve dizel makinenin SOx emisyon miktarları.

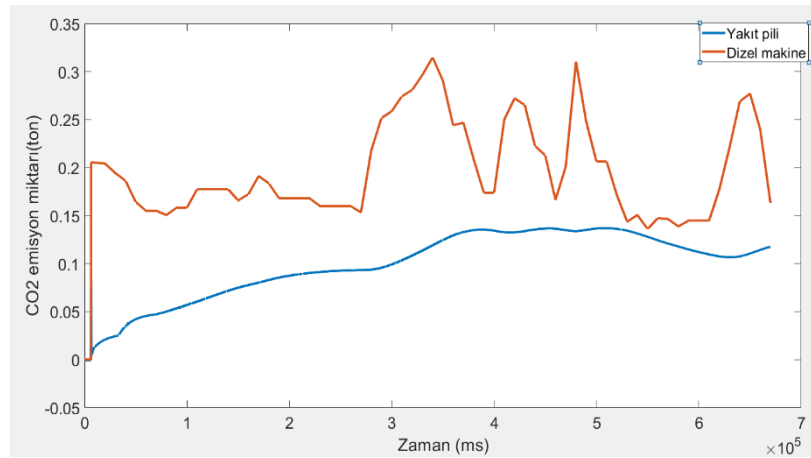
Yakıt hücresinde kullanılan yakıt olan LNG çok küçük seviyelerde kükürt içeren bir yakıt türü olduğu için emisyonu dizel makinenin fosil yakıt kullanımındaki emisyonuna karşı ihmal edilebilir seviyededir. Şekil 4.27'de görüldüğü gibi SOx miktarındaki azalma %99'dan fazladır.

Sera gazları atmosferden yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarını emme ve tutma özelliğine sahiptir. Bu ışınları emilmesi ve yeryüzünde tutulması sonucu yeryüzünün ısınmasına sera etkisi denilmektedir (Özmen, 2009; 42). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin 2005'te yürürlüğe giren Kyoto Protokolü Ek-A kısmında atmosferde ısıyı en fazla tutabilme kabiliyetine sahip olan CO₂ gazı küresel toplam sera gazları içerisindeki %76'lık payı ile ilk sırada yer almaktadır. (Birleşmiş Milletler, 1997). Nisan 2018'de IMO, gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının

azaltılmasına ilişkin bir strateji kabul etti. Bu strateji, toplam yıllık sera gazı emisyonlarını 2050 yılına kadar 2008'e kıyasla en az %50 azaltmayı hedefliyor. Haziran 2021'de IMO, stratejisinde belirtilen hedefler doğrultusunda tüm gemilerin karbon yoğunluğunu 2030 yılına kadar en az %40 oranında azaltmayı amaçlayan kısa vadeli temel önlemleri kabul etti. LNG, düşük karbon içeriği nedeniyle denizcilik endüstrisi için potansiyel olarak çekici bir yakıttır. Teorik olarak, LNG gemilerde geleneksel olarak kullanılan diğer ağır fuel oillere kıyasla %20-25 daha az CO₂ yayar. Yanaşma ve kalkış manevralarında dizel makinelerin düşük yükte çalışması ve verimsiz yanma sonucu CO₂ emisyon salınımı oldukça yüksektir. Şekil 4.28 ve 4.29'da görüldüğü üzere düşük yüklerde CO₂ salınımındaki azalma %40-%50 seviyelerindedir.

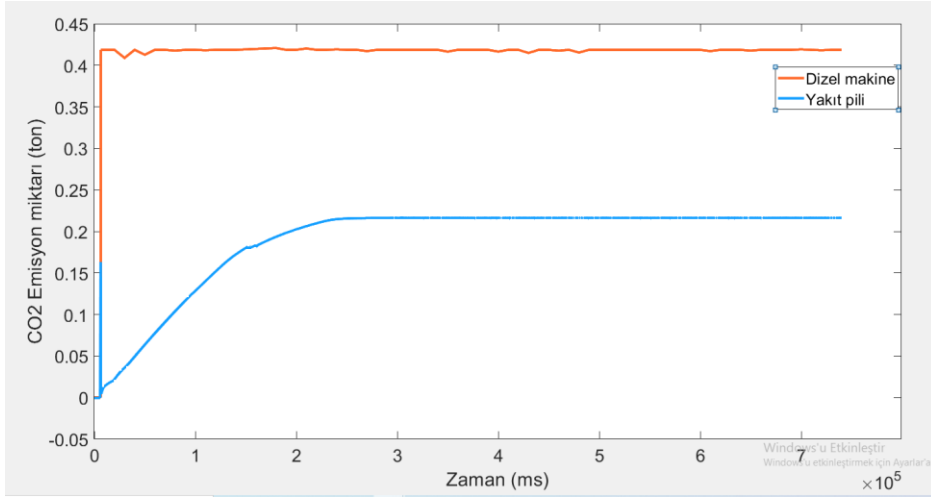


Şekil 4.28 : Kalkış manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin CO₂ emisyon miktarları.



Şekil 4.29 : Yanaşma manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin CO₂ emisyon miktarları.

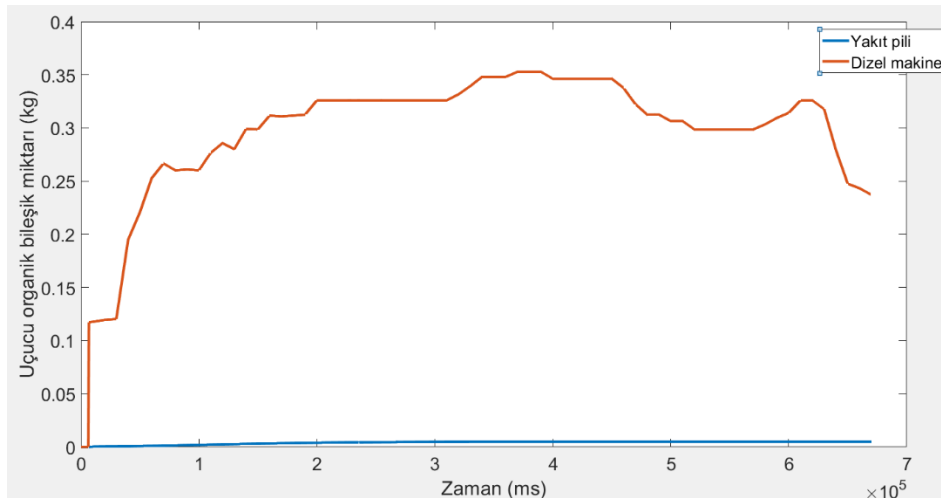
Şekil 4.30’da görüldüğü üzere yakıt hücresi batarya hibrit sistem kullanımında ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarı dizel makine kullanımına kıyasla %40-%45 oranında düşüş sağlamıştır. Yakıt olarak doğal gazın kullanılması ve yakıt hücresinde yanma reaksiyonu gerçekleşmemesi bu azalmayı sağlamıştır.



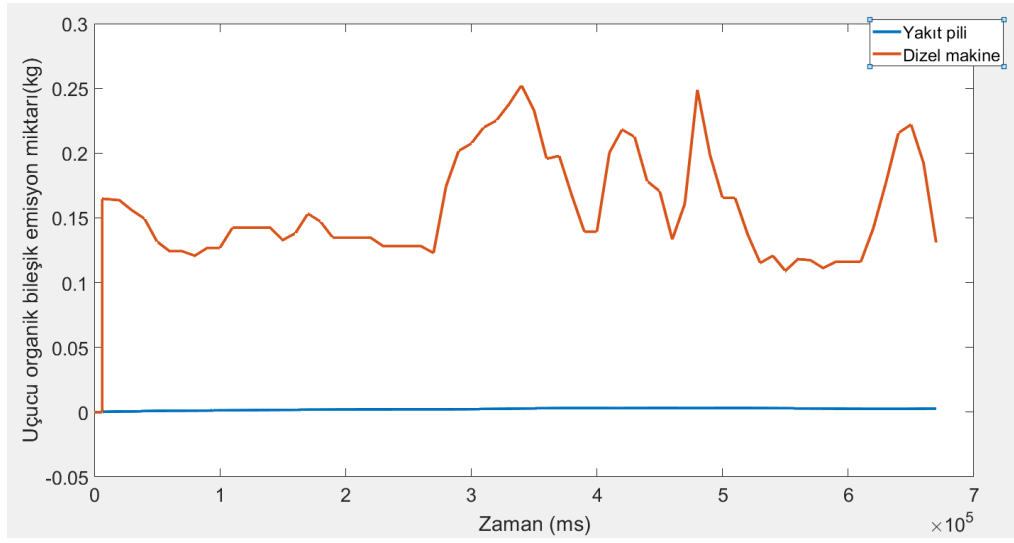
Şekil 4.30 : Seyir için yakıt hücresi ve dizel makinenin CO₂ emisyon miktarları.

Organik bileşikler, içeriğinde en az bir hidrojen ve karbon atomunu içeren kimyasal bileşiklerdir. Uçucu organik bileşikler kaynama sıcaklıkları 50-260°C arasında değişim gösterdiği için iç ortam havasında buhar fazında bulunurlar.

Dizel makine de gerçekleşen art yanma verimsiz yanma olayları sırasında uçucu organik bileşik emisyonlarında artış görülmektedir. Şekil 4.31 ve şekil 4.32’de görüldüğü üzere yakıt hücresinde oluşan emisyon miktarı ihmal edilebilir seviyededir ve azalma %99 dan fazladır.

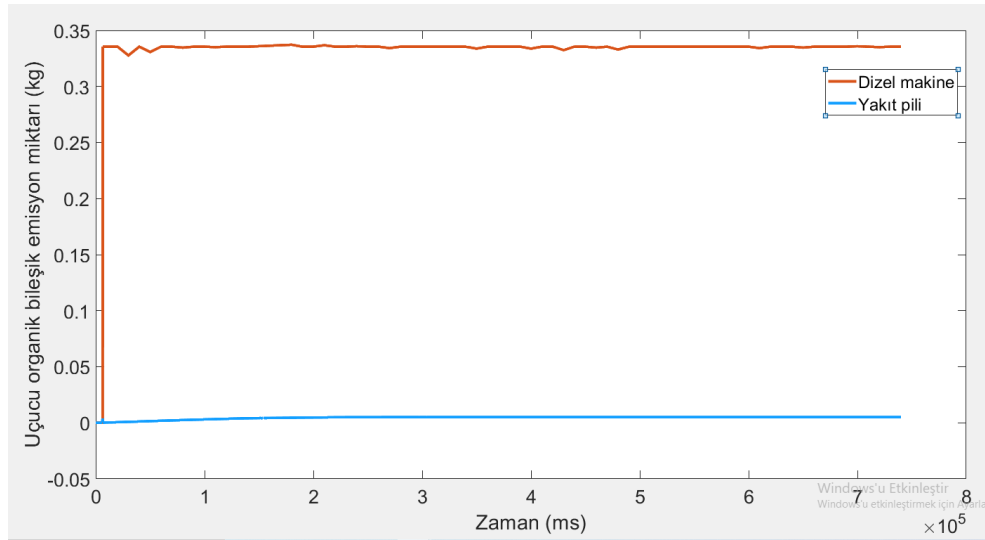


Şekil 4.31 : Kalkış manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin uçucu organik bileşik emisyon miktarları.



Şekil 4.32 : Yanaşma manevrası için yakıt hücresi ve dizel makinenin uçucu organik bileşik emisyon miktarları.

Şekil 4.33’de görüldüğü üzere yakıt hücresinde oluşan emisyon miktarı ihmal edilebilir seviyededir ve azalma %99 dan fazladır.



Şekil 4.33 : Seyir için yakıt hücresi ve dizel makinenin uçucu organik bileşik emisyon miktarları.

Seçilen yakıt hücresinden alınan verilen doğrultusunda 900 kWgüç kapasitesine sahip modülün ağırlığı 23,4 ton, 540 kW batarya paketinin ise ağırlığının 3 ton olacağı görölmüştür. Gemi üzerinde bulunan dizel makinelerin her birinin ağırlığının 4 ton olduğu ve dört dizel makine olmasından dolayı toplamda 16 ton ağırlık makine ağırlığı olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan sistemin toplam ağırlığı 26,4 ton iken ile mevcut sistemin toplam ağırlığı 16 tondur. Tasarlanan sistem 10.4 ton fazladan ağırlık oluşturacaktır.

900 kw yakıt modülünün uzunluğu 5.874 m, yüksekliği 2.6416 m ve genişliği 3.4008 mdir. Batarya paketinin ölçüleri ise yüksekliği 2.1 m , genişlik 0,5 m, uzunluğu ise 0,65 mdir. Yakıt hücresi modülü ve bataryaların toplam kaplamış olduğu hacim 58.225m³tür. Gemi üzerinde bulunan dizel makinelerin uzunluğu 3.885 m, yüksekliği 1.578 m, genişliği ise 1.801 m dir. Dört dizel makinenin kapladığı alan 46.963 m³tür. Dizel makinelerin egzoz devresi ve yardımcı ekipmanları dikkate alındığında aradaki hacim farkı yok denecek kadar azdır.

M/V Sultanahmet gemisi Eskihişar topçulr arasında 15 dakikalık sefer aralıklarıyla 30 dakikalık seyir yapmaktadır. 24 saat kesintisiz çalışmakta ve günde 16 tam sefer yapmaktadır.Yakıt tanklarından alınan ölçümlere göre bir günlük yakıt tüketimi 7,4 tondur. Küresel bazda dört limanın ortalama diesel oil fiyatı 964 USD/t dur (Url-6).

Tasarlanan sistem için seçilen yakıt hücresinin verilerinde yakıt tüketiminin 307,7m³/h olduğu görölmektedir. 24 saatlik yakıt tüketimi ise 7384,8m³tür. Avrupada bulunan yakıt terminallerinde LNG'nin 2021-2022 yılı ortalama fiyatı 0,7542 USD/m³ tür (Url-7). Çizelge 4.5'de görüleceği üzere yakıt maliyetleri %21 lik bir azalma görölmüştür.

Çizelge 4.5: 24 saatlik dizel makine ve hibrit sistemin yakıt tüketimleri ve yakıt maliyetleri (Url-6 ; Url-7).

Yakıt Türü	Tüketilen miktar	Birim başına maliyet	Toplam maliyet
MDO	7,4 t	964 USD/t	7133,6 USD
LNG	7384,8 m ³	0,7542 USD/m ³	5571,02 USD

5. SONUÇ

Deniz trafiğinin yoğun olduğu ve kıyı şeridinde yakın mesafede seyir yapan bir arabalı feribotun sera gazı emisyonlarının ve kirleticilerinin etkisini azaltmayı amaçlayan yakıt hücresi/batarya hibrit güç sisteminin uygulanabilirliği üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada referans olarak dizel-elektrikli bir arabalı feribot kullanılmıştır. Dizel elektrik sistemin güç çıkışı, yakıt hücresi/batarya hibrit sisteminin güç talebi olarak ele alınmıştır. Matlab/Simulink ortamında hibrit sistemin fiziksel bileşenlerini temsil eden bir dizi dinamik modelle birlikte gerçek operasyonlardan alınan veriler kullanılarak, hibrit sistemin davranışını analiz etmeye yardımcı olabilecek çıktılar elde edilmiştir. Güç talebi ile hibrit sistemin bileşenlerinin yük dağılımı arasındaki karşılaştırma, tasarlanan sistem için seçilen bileşenlerin boyutunun ve güç oranının tespit edilmesine yardımcı olmuştur. Yapılan simulasyon çalışmasıyla modele göre tahmini yayılan emisyon miktarları hesaplanılmıştır.

M/V Sultanahmet arabalı feribotuna ait rota, yakıt tüketimi ve emisyon bilgileri İstanbul Deniz Otobüsleri işletmecisinden alınmıştır. Geminin operasyon güç profili incelenerek gerekli güç çıkışını sağlayacak SOFC ve batarya seçilmiştir. Operasyon güç profili incelendiğinde manevralarda gerçekleşen güç dalgalanmalarını tamponlamak için Li-ion bataryalar seçilmiştir. Yüksek hidrojen üretim maliyeti, hidrojen istasyonlarının kısıtlılığı ve hidrojenin depolanmasındaki zorluklardan dolayı, gemilerde kullanım uygunluğu hidrojene göre daha fazla olan LNG yakıt olarak tercih edilmiştir. Geminin güç talepleri incelendiğinde liman operasyonları toplam kurulu gücün %9 ve %16 sı, sevk sürecinde ise toplam kurulu gücün %44'ü kullanıldığı görülmüştür.

IMO, gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ilişkin belirlediği ile stratejisinde belirtilen hedefler doğrultusunda tüm gemilerin karbon yoğunluğunu 2030 yılına kadar en az %40 , 2050 yılına kadar 2008'e kıyasla en az %50 azaltmayı hedefliyor. Tasarlanan sistem ile SO_x, NO_x ve VOC emisyon miktarlarında yaklaşık %99 ve CO₂ emisyon miktarında ise %40 tan fazla düşüş olacağı hesaplanmıştır. Teorik olarak, LNG gemilerde geleneksel olarak kullanılan diğer ağır fuel oillere kıyasla %20-25 daha az karbondioksit yayar. Tasarlanan

sistemde hem LNG'nin yakıt olarak kullanılması hemde yakıt hücresinin düşük emisyon yayılımı hedeflere yakın sonuçlar vermiştir.

Yakıt hücrelerinin gemilerde enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için, öncelikle kullanılacak olan yakıtı özgü gereksinimler olan tank tipi, yakıt boruları gibi yakıtın güvenlik gereksinimleri söz konusu gemilerde çalışan denizcilerin eğitimine yönelik birtakım yeni koşullar gibi kriterler ve standartları içeren belgelerden olan “Gaz veya Düşük Parlama Noktalı Diğer Yakıtları Kullanan Gemilerin Güvenliği için Uluslararası Kod (IGF Kod)” kodunun şartları sağlanmalıdır.

Bataryalar ve yakıt pillerinden oluşan hibrit sistemde hareketli parça bulunmadığı için gürültü kirliliği oluşmamaktadır. Yakıt pillerinin gürültü seviyesi <70 dBA'dır. Dizel makinelerinin gürültü seviyeleri ile kıyas edildiğinde yüksek performansta sessiz çalıştıkları sonucuna varılır.

Sistem değişikliğinin bir sonucu olarak, daha az operasyonel ve periyodik bakım harcamaları gerekir. Kapalı ve modüler sistemler olan yakıt pilleri ve bataryalar sistemdeki insan faktöründen kaynaklanan riski de azaltır ve düşük iş gücü ihtiyacı ile daha fazla finansal kazanç sağlar.

MDO yakıt tanklarının LNG'ye dönüştürülmesi yeni kurulan sistem için önemli bir zorluktur.

Gemilerde yakıt hücresi sisteminin pahalı ve ağır olması bir süre daha içten yanmalı motorların tercih sebebi olmasına neden olacaktır. Ayrıca içten yanmalı motorların yedek parçaların ucuza rahatça bulunabilmesi de yakıt hücresinin önündeki en büyük engellerden biri olarak göze çarpmaktadır. Çevreci, sessiz, titreşimsiz olması yakıt hücrelerinin sevk sistemi olarak tercih sebebi olarak görülmesine yetmemektedir. Sonuç olarak, şu an itibarıyla yakıt hücresi ile sevk teknolojisinin, içten yanmalı motor teknolojisine göre yatırım maliyeti yüksektir. Fakat, gerek yer altı kaynaklarının azalması, gerekse de çevreci bir teknoloji olması, kararlı ve sessiz çalışması, yakıt hücresinin gelecekte içten yanmalı motorlara alternatif olacaktır.

KAYNAKLAR

- Al-enazi, A., Okonkwo, E. C., Bicer, Y., ve Al-ansari, T.** (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. *Energy Reports*, 7, 1962–1985.
- Alias, M. S., Kamarudin, S. K., Zainoodin, A. M., ve Masdar, M. S.** (2020). Active direct methanol fuel cell: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 19620–19641.
- Andreasen, S. J., Kær, S. K., ve Sahlin, S.** (2013). Control and experimental characterization of a methanol reformer for a 350 W high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(3), 1676–1684.
- Baccioli, A., Liponi, A., Milewski, J., Szczeńniak, A., ve Desideri, U.** (2021). Hybridization of an internal combustion engine with a molten carbonate fuel cell for marine applications. *Applied Energy*, 298(January).
- Baldi, F., Moret, S., Tammi, K., ve Mar, F.** (2020). *The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems*. 194.
- Barelli, L., Bidini, G., ve Ottaviano, A.** (2012). Optimization of a PEMFC/battery pack power system for a bus application. *Applied Energy*, 97, 777–784.
- Bassam, A. M., Phillips, A. B., Turnock, S. R., ve Wilson, P. A.** (2016). Design, modelling and Simulation of a hybrid fuel cell propulsion system for a domestic ferry. *PRADS 2016 - Proceedings of the 13th International Symposium on PRactical Design of Ships and Other Floating Structures*, September.
- Bassam, A. M., Phillips, A. B., Turnock, S. R., ve Wilson, P. A.** (2017). Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(1), 623–635.
- Buonomano, A., Calise, F., d’Accadia, M. D., Palombo, A., ve Vicidomini, M.** (2015). Hybrid solid oxide fuel cells-gas turbine systems for combined heat and power: A review. *Applied Energy*, 156, 32–85.
- Capurso, T., Stefanizzi, M., Torresi, M., ve Camporeale, S. M.** (2022a). Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy Conversion and Management*, 251(October 2021), 114898.
- Chen, H., Zhang, Z., Guan, C., ve Gao, H.** (2020). Optimization of sizing and frequency control in battery / supercapacitor hybrid energy storage system for fuel cell ship. *Energy*, 197, 117285.

- Choi, D., Shamim, N., Crawford, A., Huang, Q., Vartanian, C. K., Viswanathan, V. V., Paiss, M. D., Alam, J. E., Reed, D. M., ve Sprenkle, V. L.** (2021). Li-ion battery technology for grid application. *Journal of Power Sources*, 511(July), 230419.
- Cohen, L., Tate, A., ve Weinhold, N.** (2012). *Investigation into the Implications of Fuel Cell Shipboard Integration into the T-agos 19 Class*. 14.
- Dai, W., Wang, H., Yuan, X., Martin, J. J., ve Yang, D.** (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.
- De-Troya, J. J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C., ve Carral, L.** (2016). Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2853–2866.
- Diab, F., Lan, H., ve Ali, S.** (2016). *Novel comparison study between the hybrid renewable energy systems on land and on ship*. 63, 452–463.
- Durbin, D. J., ve Malardier-Jugroot, C.** (2013). Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14595–14617.
- Edition, S., ve Virginia, W.** (2004). *Fuel Cell Handbook*. November.
- Environment, M., Committee, P., Pre-session, E., Of, R., Emissions, G. H. G., Ships, F., Imo, F., ve Study, G. H. G. (2020). *No Title*. 74.
- Fadel, A., ve Zhou, B.** (2011). An experimental and analytical comparison study of power management methodologies of fuel cell-battery hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 196(6), 3271–3279.
- Franco, A. A., Guinard, M., Barthe, B., ve Lemaire, O.** (2009). *Electrochimica Acta Impact of carbon monoxide on PEFC catalyst carbon support degradation under current-cycled operating conditions*. 54, 5267–5279.
- Giap, V., Duk, Y., Sang, Y., Young, K., Hee, D., ve Il, J.** (2020). System simulation and exergetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker : A hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine ☆. *Energy Conversion and Management*, 223(August), 113265.
- Han, J., Charpentier, J. F., ve Tang, T.** (2014). An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat. *Energies*, 7(5), 2799–2820.
- Hejze, T., Besenhard, J. O., Kordesch, K., Cifrain, M., ve Aronsson, R. R.** (2008). Current status of combined systems using alkaline fuel cells and ammonia as a hydrogen carrier. *Journal of Power Sources*, 176(2), 490–493.
- Hosseinzadeh, A., Zhou, J. L., Li, X., Afsari, M., ve Altaee, A.** (2022). Techno-economic and environmental impact assessment of hydrogen production

processes using bio-waste as renewable energy resource. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156(October 2021), 111991.

Hu, B., Keane, M., Patil, K., Mahapatra, M. K., Pasaogullari, U., ve Singh, P. (2014). Direct methanol utilization in intermediate temperature liquid-tin anode solid oxide fuel cells. *Applied Energy*, 134, 342–348.

Kee, R. J., Zhu, H., ve Goodwin, D. G. (2005). Solid-oxide fuel cells with hydrocarbon fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30 II(2), 2379–2404.

Klerke, A., Christensen, C. H., Nørskov, J. K., ve Vegge, T. (2008). Ammonia for hydrogen storage: Challenges and opportunities. *Journal of Materials Chemistry*, 18(20), 2304–2310.

Kulkarni, A., ve Giddey, S. (2012). Materials issues and recent developments in molten carbonate fuel cells. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 16(10), 3123–3146.

Kurle, Y. M., Wang, S., ve Xu, Q. (2015). Simulation study on boil-off gas minimization and recovery strategies at LNG exporting terminals. *Applied Energy*, 156, 628–641.

Laosiripojana, N., ve Assabumrungrat, S. (2007a). Catalytic steam reforming of methane, methanol, and ethanol over Ni/YSZ: The possible use of these fuels in internal reforming SOFC. *Journal of Power Sources*, 163(2), 943–951.

Laosiripojana, N., ve Assabumrungrat, S. (2007b). Catalytic steam reforming of methane, methanol, and ethanol over Ni/YSZ: The possible use of these fuels in internal reforming SOFC. *Journal of Power Sources*, 163(2), 943–951.

Lee, K., Shin, D., Yoo, D., Choi, H., ve Kim, H. (2013). Hybrid photovoltaic / diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode e Experimental investigation. *Energy*, 49, 475–483.

Little, D. J., Smith, M. R., ve Hamann, T. W. (2015). Electrolysis of liquid ammonia for hydrogen generation. *Energy and Environmental Science*, 8(9), 2775–2781.

Liu, H., Zhang, Q., Qi, X., Han, Y., ve Lu, F. (2017). Estimation of PV output power in moving and rocking hybrid energy marine ships q. *Applied Energy*, 204(X), 362–372.

Ma, S., Lin, M., Lin, T. E., Lan, T., Liao, X., Maréchal, F., Van herle, J., Yang, Y., Dong, C., ve Wang, L. (2021a). Fuel cell-battery hybrid systems for mobility and off-grid applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(July 2020).

Ma, S., Lin, M., Lin, T. E., Lan, T., Liao, X., Maréchal, F., Van herle, J., Yang, Y., Dong, C., ve Wang, L. (2021b). Fuel cell-battery hybrid systems for

mobility and off-grid applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(February 2020).

Markowski, J., ve Pielecha, I. (2019). The potential of fuel cells as a drive source of maritime transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214(1).

Mazloomi, K., ve Gomes, C. (2012). Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3024–3033.

McKinlay, C. J., Turnock, S. R., ve Hudson, D. A. (2021). Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28282–28297.

Metkemeijer, R., ve Achard, P. (1994). Comparison of ammonia and methanol applied indirectly in a hydrogen fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19(6), 535–542.

Mukerjee, S., ve Yurtcan, A. B. (2015). *Membrane Electrode Assembly with Ultra Low Platinum Loading for Cathode Electrode of PEM Fuel Cell by Using Sputter Deposition*. 2, 288–297.

Nacef, M., ve Affoune, A. M. (2011). Comparison between direct small molecular weight alcohols fuel cells' and hydrogen fuel cell's parameters at low and high temperature. Thermodynamic study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(6), 4208–4219.

Nations, U., ve Convention, F. (n.d.). *Shipping , World Trade and the Reduction of DO P*.

Ni, P., Wang, X., ve Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel*, 279(June).

Njoya Motapon, S., Dessaint, L. A., ve Al-Haddad, K. (2014). A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(3), 1320–1334.

Ong, B. C., Kamarudin, S. K., ve Basri, S. (2017). Direct liquid fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 10142–10157.

Pan, C., He, R., Li, Q., Jensen, J. O., Bjerrum, N. J., Hjulmand, H. A., ve Jensen, A. B. (2005). Integration of high temperature PEM fuel cells with a methanol reformer. *Journal of Power Sources*, 145(2), 392–398.

Peng, J., Huang, J., Wu, X. long, Xu, Y. wu, Chen, H., ve Li, X. (2021). Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review. *Journal of Power Sources*, 505(May).

Rafiei, M., Boudjadar, J., Khooban, M., ve Member, S. (2021). *Energy*

Management of a Zero-Emission Ferry Boat With a Fuel-Cell-Based Hybrid Energy System : Feasibility Assessment. 68(2), 1739–1748.

Ramasamy, J., Palaniswamy, K., Kumaresan, T., Chandran, M., ve Chen, R. (2021). Study of novel flow channels influence on the performance of direct methanol fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx.

Soloveichik, G. L. (2014). Liquid fuel cells. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 5(1), 1399–1418.

Souleman, N. M., Tremblay, O., ve Dessaint, L. A. (2009). A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell power systems. *2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09*, 1722–1729.

Strazza, C., Del Borghi, A., Costamagna, P., Traverso, A., ve Santin, M. (2010). Comparative LCA of methanol-fuelled SOFCs as auxiliary power systems on-board ships. *Applied Energy*, 87(5), 1670–1678.

Svanberg, M., Ellis, J., Lundgren, J., ve Landälv, I. (2018). Renewable methanol as a fuel for the shipping industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(March), 1217–1228.

Systems, B., ve Maritime, F. O. R. (2020). *STUDY ON ELECTRICAL ENERGY STORAGE FOR SHIPS.* May.

Tankari, M. A., Camara, M. B., Dakyo, B., ve Lefebvre, G. (2013). *Use of Ultracapacitors and Batteries for Efficient Energy Management in Wind – Diesel Hybrid System.* 4(2), 414–424.

Tremblay, O., ve Dessaint, L. A. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2009, EVS 24*, 2, 930–939.

Tronstad, T., Åstrand, H. H., Haugom, G. P., ve Langfeldt, L. (2017). Study on the use of fuel cells in shipping: Result tables. *European Maritime Safety Agency EMSA*. <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/item/2921-emsa-study-on-the-use-of-fuel-cells-in-shipping.html>

Tse, L. K. C., Wilkins, S., McGlashan, N., Urban, B., ve Martinez-Botas, R. (2011). Solid oxide fuel cell/gas turbine trigeneration system for marine applications. *Journal of Power Sources*, 196(6), 3149–3162.

Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., ve Aravind, P. V. (2016a). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327(September), 345–364.

Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., ve Aravind, P. V. (2016b). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327(X), 345–364.

- Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., ve Aravind, P. V.** (2016c). A review of fuel cell systems for maritime applications. In *Journal of Power Sources* (Vol. 327, pp. 345–364). Elsevier B.V.
- Vedachalam, S., Baquerizo, N., ve Dalai, A. K.** (2022). Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options. *Fuel*, 310(PA), 122243.
- Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Chan, S., ve Cordobes, X.** (2011). A review of polymer electrolyte membrane fuel cells : Technology , applications , and needs on fundamental research. *Applied Energy*, 88(4), 981–1007.
- Wen, S., Lan, H., Yu, D. C., Fu, Q., Hong, Y., Yu, L., ve Yang, R.** (2017). Optimal sizing of hybrid energy storage sub-systems in PV / diesel ship power system using frequency analysis. *Energy*, 140, 198–208.
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S., ve Chen, H.** (2021). *Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications : Progress and Perspectives*.
- Yao, C., Pan, W., ve Yao, A.** (2017). Methanol fumigation in compression-ignition engines: A critical review of recent academic and technological developments. *Fuel*, 209(February), 713–732.
- Zeng, T., Zhang, C., Hu, M., Chen, Y., Yuan, C., Chen, J., ve Zhou, A.** (2018). Modelling and predicting energy consumption of a range extender fuel cell hybrid vehicle. *Energy*, 165, 187–197.
- Url-1.** < <https://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm> >. Access date: 12.02.2022.
- Url-2.** <<https://www.thesisat.org/dogrudan-metanollu-yakit-pili-sistemindeki-yogusturucusu.html>>. Erişim tarihi: 13.02.2022.
- Url-3.** < <https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/hydrogen/hydrogen-as-marine-fuel/>>.Erişim tarihi: 20.02.2022.
- Url-4.** < <https://www.vesselfinder.com/tr/vessels/SULTANAHMET-IMO-9415519-MMSI-271002578/>>. Erişim tarihi: 10.03.2021.
- Url-5.** <<https://www.marinetraffic.com/tr/ais/details/ships/shipid:335934/mm si:271002578/imo:9415519/vessel:SULTANAHMET>>. Access date: 12.01.2022.
- Url-6.** <<https://shipandbunker.com/prices#MGO>>. Erişim tarihi: 23.05.2022.
- Url-7.** <https://ycharts.com/indicators/europe_natural_gas_price>. Erişim tarihi: 24.05.2022.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Rukiye GÜLMEZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Araştırma Görevlisi, İstanbul Teknik Üniversitesi – Denizcilik Fakültesi, 10.12.2020 – (Halen çalışıyor) İstanbul
- Makine Enspektörü, BOTAŞ LNG İşletme Müdürlüğü , 01.09.2018 – .08.07.2020 Marmaraereğlisi Tekirdağ
- Uzakyol Vardiya Zabiti, Arkas Denizcilik , 08.04.2016 - 10.08.2018 İstanbul
- Uzakyol Vardiya Zabiti, UN RORO A.Ş , 15.07.2015- 03.02.2016 İstanbul



