

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİLERDE YAKIT PİLİ TEKNOLOJİLERİ:**  
**SİSTEM DİNAMİKLERİ YAKLAŞIMI**

**Süleyman Aykut KORKMAZ**

**Ağustos, 2017**  
**İZMİR**

# **GEMİLERDE YAKIT PİLİ TEKNOLOJİLERİ: SİSTEM DİNAMİKLERİ YAKLAŞIMI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Deniz Ulaştırma Sistemleri Mühendisliği Programı**

**Süleyman Aykut KORKMAZ**

**Ağustos, 2017**

**İZMİR**

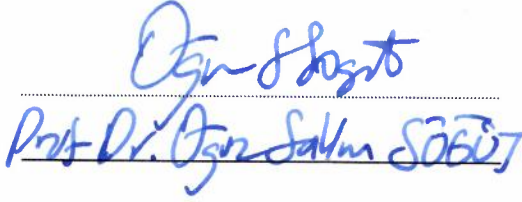
## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SÜLEYMAN AYKUT KORKMAZ, tarafından **PROF. DR. A. GÜLDEM CERİT** yönetiminde hazırlanan “**GEMİLERDE YAKIT PİLİ TEKNOLOJİLERİ: SİSTEM DİNAMİKLERİ YAKLAŞIMI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

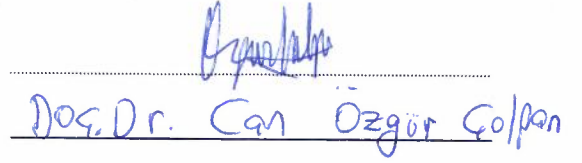


Prof. Dr. A. Güldem CERİT

Yönetici



Jüri Üyesi



Jüri Üyesi



Prof. Dr. Emine İlkur CÖCEN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar her zaman destek olan ve yol gösteren, tecrübelerini ve değerli bilgilerini benimle paylaşan kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. A. Güldem CERİT'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Tezimin gelişmesi için verdiği destek ve gösterdiği hoşgörü için değerli hocam Sayın Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Değerli destekleri şüphesiz ki tezime çok önemli katkılar sağlamıştır.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkı sağlayan ve değerli bilgilerini bizlerle paylaşan İzmir Büyükşehir Belediyesi yetkililerine, İzdeniz A.Ş. yetkililerine teşekkürlerimizi sunarız.

Yüksek lisans eğitimim süresince değerli vakitlerini harcayarak sundukları bilimsel ve yapıcı öneriler ile bana yardımcı olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa NURAN ile çalışma arkadaşlarım Burak GÖKSU, Kerim ZİYLAN, Kerim Deniz KAYA, Kubilay BAYRAMOĞLU, Murat BAYRAKTAR, Murat PAMIK, Olgun KONUR, Onur YÜKSEL, Özlem Cennet BİLİR FİDAN, Semih YILMAZ ve Yiğit GÜLMEZ'e ve tez çalışmam süresince yapıcı görüşleri ve desteğini hiç eksik etmeyen çok değerli eşim Jamal ESENKANNOVA KORKMAZ'a teşekkür ederim.

Son olarak da var olma sebebim olan sevgili aileme teşekkür eder, her zaman benim yanımda oldukları için kendilerine saygı ve sevgilerimi sunarım.

Süleyman Aykut KORKMAZ

# GEMİLERDE YAKIT PİLİ TEKNOLOJİLERİ: SİSTEM DİNAMİKLERİ YAKLAŞIMI

## ÖZ

Gün geçtikçe daha katı hale gelen çevresel kurallar nedeniyle çevreci sevk sistemlerinin önemi artmaktadır. Bunların içinde en önemlilerinden biri ise yakıt pilleridir. Günümüzde yakıt pilleri gemilerde sevk sistemlerinin ihtiyaçlarını karşılamada kullanılabilir hale gelmektedir. Ancak geminin sevk ihtiyacının tamamının yakıt pili ile karşılanması her zaman mümkün olmamaktadır. Ayrıca ani yük değişimleri yakıt pilinin yaşam ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden yakıt pilleri genellikle bataryalar ile birlikte hibrit sistemlerde kullanılmaktadır. Yakıt pillerinin güç yoğunluğu genellikle bataryalardan daha fazladır. Geliştirilen hibrit sistemler sayesinde hem geminin menzili arttırılmış olmakta hem de ağırlık açısından önemli kazançlar sağlanabilmektedir. Bu tez kapsamında geminin hâkim rüzgâr ve deniz koşullarında tam yüklü ve tipik bir seferinin gemiden alınan gerçek veriler ile sistem dinamikleri yaklaşımı kullanılarak Vensim® yazılımında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede sistem üzerine etki eden değişkenler ortaya konmuş ve bu değişkenlere uygun değerler girilerek sistemin güç ihtiyacı değişik senaryolar için belirlenebilir hale getirilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar sistem için uygun batarya tipinin seçilmesinde kullanılacak Matlab/Simulink yazılımında yapılan bir modele girilerek simüle edilmiştir. Bataryaların birim kütle başına içerdikleri enerjiden yola çıkılarak karşılaştırılan batarya çeşitlerinin sağladığı enerji kazanımları ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında hibrit sistemler içinde en fazla verimi veren batarya tipinin lityum iyon bataryalar olduğu saptanmıştır. Ancak nikel metal hidrit bataryaların yakıt pili olmadan geminin sevkinde diğer batarya tiplerine göre daha avantajlı olduğunun göz ardı edilemeyeceği de belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yakıt pili, Vensim®, sistem dinamikleri, Matlab/Simulink, hibrit sevk sistemi

# **FUEL CELL TECHNOLOGIES FOR SHIPS: A SYSTEM DYNAMICS APPROACH**

## **ABSTRACT**

Due to more stringent environmental rules, the importance of green propulsion systems is increasing. One of the most important of these is the fuel cells. Nowadays, fuel cells are becoming more appropriate to meet the needs of ship propulsion systems too. However, it is not always possible to meet all of the power requirements for transportation via fuel cells. In addition, sudden load changes cause the life span of the fuel cell to decrease. Because of this, fuel cells are often used in hybrid systems with batteries. The power density of fuel cells is generally higher than in batteries. Due to the hybrid systems, both the range of the ship is increased and significant gains can be achieved in terms of weight. In this thesis, modeling of the ship in Vensim® software was carried out by applying the system dynamics approach with the real data taken from the ship in full load condition and typical times in prevailing wind and sea conditions. Thus, variables affecting the system are introduced and appropriate values are loaded into these variables so that the power requirement of the system can be determined for different scenarios. The results obtained are simulated by entering a model in Matlab/Simulink software to be used in selecting the appropriate battery type for the system. The energy gains provided by the battery types compared by the energy content of the batteries per unit mass are revealed. The results show that the battery type that provides the greatest efficiency among the hybrid systems is the lithium ion battery. However, it cannot be ruled out that nickel metal hydride batteries are more advantageous than other types of batteries in delivering the ship without fuel cells.

**Keywords:** Fuel cells, Vensim®, system dynamics, Matlab/Simulink, hybrid propulsion system

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                        | Sayfa    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....                                              | ii       |
| TEŞEKKÜR .....                                                                         | iii      |
| ÖZ .....                                                                               | iv       |
| ABSTRACT.....                                                                          | v        |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                                 | x        |
| TABLolar LİSTESİ.....                                                                  | xii      |
| <br>                                                                                   |          |
| <b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>                                                         | <b>1</b> |
| <br>                                                                                   |          |
| <b>BÖLÜM İKİ – GEMİLERDE KULLANILAN SEVK SİSTEMLERİ VE<br/>ENERJİ KAYNAKLARI .....</b> | <b>3</b> |
| <br>                                                                                   |          |
| 2.1 Gemilerde Kullanılan Sevk Sistemlerinin Gelişimi.....                              | 3        |
| 2.1.1 İnsan Gücü ile Sevk .....                                                        | 3        |
| 2.1.2 Rüzgâr Gücü ile Sevk.....                                                        | 5        |
| 2.1.3 Buhar ve Gaz Türbinleri ile Sevk.....                                            | 5        |
| 2.1.4 İçten Yanmalı Motorlar ile Sevk.....                                             | 7        |
| 2.1.5 Elektrikli Sevk Sistemleri .....                                                 | 10       |
| 2.1.5.1 Batarya ile Sevk.....                                                          | 10       |
| 2.1.5.2 Yakıt Pili ile Sevk.....                                                       | 11       |
| 2.1.5.3 Hibrit Sevk Sistemleri .....                                                   | 12       |
| 2.2 Enerji Kaynakları .....                                                            | 14       |
| 2.2.1 Yenilenemeyen Enerji Kaynakları .....                                            | 15       |
| 2.2.1.1 Petrol.....                                                                    | 15       |
| 2.2.1.2 Doğal Gaz.....                                                                 | 18       |
| 2.2.1.3 Kaya Gazı .....                                                                | 20       |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 2.2.1.4 Kömür.....                          | 22 |
| 2.2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ..... | 24 |
| 2.2.2.1 Biyodizel.....                      | 24 |
| 2.2.2.2 Güneş Enerjisi .....                | 26 |
| 2.2.2.3 Rüzgâr Enerjisi .....               | 27 |
| 2.2.2.4 Hidrojen Enerjisi .....             | 30 |

## **BÖLÜM ÜÇ – YAKIT PİLİ TEKNOLOJİLERİ VE DENİZCİLİKTE UYGULAMA ALANLARI ..... 33**

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 3.1 Yakıt Pili Teknolojileri .....                 | 33 |
| 3.1.1 Tarihsel Gelişim .....                       | 33 |
| 3.1.2 Yakıt Pili Çeşitleri.....                    | 36 |
| 3.1.2.1 Alkali Yakıt Pili (AYP) .....              | 37 |
| 3.1.2.2 Polimer Elektrolit Yakıt Pili (PEMYP)..... | 40 |
| 3.1.2.3 Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP).....       | 42 |
| 3.1.2.4 Erimiş Karbonatlı Yakıt Pili (EKYP).....   | 44 |
| 3.1.2.5 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP).....          | 46 |
| 3.2 Denizcilikte Yakıt Pili Uygulama Alanları..... | 48 |
| 3.2.1 Eğlence Amaçlı Tekneler .....                | 48 |
| 3.2.1.1 Hydra .....                                | 49 |
| 3.2.1.2 Hydroxy 3000.....                          | 50 |
| 3.2.1.3 Cobalt 233 ZET .....                       | 51 |
| 3.2.1.4 Frauscher 600 Riviera HP .....             | 51 |
| 3.2.2 Yatlar/Yelkenli Gemiler .....                | 52 |
| 3.2.2.1 No. 1 Yat .....                            | 52 |
| 3.2.2.2 Mamelie.....                               | 53 |

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 3.2.2.3 Haveblue XV1 Yat .....         | 53 |
| 3.2.2.4 Emerald Benetau 411 .....      | 53 |
| 3.2.3 Deniz Taksi/Feribot.....         | 54 |
| 3.2.3.1 FCS Alsterwasser .....         | 54 |
| 3.2.3.2 Accadue .....                  | 56 |
| 3.2.3.3 Duffy Herreshoff DH30 .....    | 57 |
| 3.2.3.4 Nemo H <sub>2</sub> .....      | 58 |
| 3.2.3.5 Gold Green Hygen .....         | 58 |
| 3.2.4 Araştırma Gemisi .....           | 60 |
| 3.2.4.1 Solgenia.....                  | 60 |
| 3.2.4.2 Ross Barlow Kanal Botu .....   | 61 |
| 3.2.4.3 Energy Observer.....           | 63 |
| 3.3 Gemilerde Yakıt Pili Sistemi ..... | 66 |
| 3.3.1 Yakıt Pili Ekipmanları .....     | 66 |
| 3.3.2 Batarya Sistemleri.....          | 68 |
| 3.3.3 Elektrik Sevk Motorları .....    | 71 |
| 3.3.4 Yakıt Dönüştürme Sistemleri..... | 72 |
| 3.4 Literatür Taraması .....           | 73 |

## **BÖLÜM DÖRT – GEMİLERDE YAKIT PİLİ UYGULAMASI**

### **ARAŞTIRMASI: VERİ TOPLAMA VE ANALİZ ..... 81**

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Amaç .....                                        | 81 |
| 4.2 Metodoloji.....                                   | 81 |
| 4.2.1 Veri Toplama Aracının Oluşturulması.....        | 82 |
| 4.2.2 Uygulama Aracının Seçimi ve Özellikleri .....   | 83 |
| 4.2.3 Veri Toplama Süreci .....                       | 87 |
| 4.2.4 Verilerin İşlenmesi: Simülasyon Uygulaması..... | 88 |

|                                                                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.4.1 Sistem Dinamikleri .....                                                                                        | 89         |
| 4.2.4.2 Matlab/Simulink .....                                                                                           | 89         |
| 4.3 Hibrit Sevk Sisteminin Seçiminde Kullanılacak Parametrelerin Sistem<br>Dinamikleri Yaklaşımı ile Modellenmesi ..... | 90         |
| 4.4 Feribot İçin Hibrit Sevk Sisteminin Tasarlanması ve Modellenmesi .....                                              | 97         |
| <b>BÖLÜM BEŞ – BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                                                                           | <b>103</b> |
| 5.1 Giriş.....                                                                                                          | 103        |
| 5.2 Sistem Dinamikleri Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                                                        | 103        |
| 5.3 Hibrit Sevk Sistemi Matlab/Simulink Simülasyonu Sonuçlarının<br>Değerlendirilmesi .....                             | 111        |
| <b>BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR .....</b>                                                                                      | <b>117</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                                  | <b>120</b> |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Asurluların şişirilmiş hayvan postları ve tahta bir iskelet üzerinde duran bir sal ile seyirleri.....                                                                                                                                                                              | 4  |
| Şekil 2.2 Seri hibrit sistem şematiği.....                                                                                                                                                                                                                                                   | 13 |
| Şekil 2.3 Paralel hibrit sistem şematiği.....                                                                                                                                                                                                                                                | 14 |
| Şekil 2.4 2014 yılı dünya ispatlanmış petrol rezervi dağılımı .....                                                                                                                                                                                                                          | 17 |
| Şekil 2.5 Doğal gaz ve kaya gazı katmanı .....                                                                                                                                                                                                                                               | 20 |
| Şekil 2.6 Dünyadaki taranmış kaya gazı oluşumlarını içeren havzaların haritası.....                                                                                                                                                                                                          | 22 |
| Şekil 2.7 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası.....                                                                                                                                                                                                                                     | 27 |
| Şekil 2.8 BBC SkySails gemisinin “Windkite” ile seyir görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                                        | 29 |
| Şekil 2.9 E-SHIP 1 gemisi ve Flettner rotorları .....                                                                                                                                                                                                                                        | 29 |
| Şekil 3.1 Yakıt pili genel çalışma prensibi .....                                                                                                                                                                                                                                            | 34 |
| Şekil 3.2 Alkali yakıt pili çalışma prensibi .....                                                                                                                                                                                                                                           | 38 |
| Şekil 3.3 PEMYP’nin çalışma prensibi.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 41 |
| Şekil 3.4 FAYP’nin genel çalışma prensibi .....                                                                                                                                                                                                                                              | 43 |
| Şekil 3.5 EKYP’nin genel çalışma prensibi.....                                                                                                                                                                                                                                               | 45 |
| Şekil 3.6 KOYP’nin genel çalışma prensibi .....                                                                                                                                                                                                                                              | 47 |
| Şekil 3.7 Değiştirilebilir hidrojen kartuşu.....                                                                                                                                                                                                                                             | 52 |
| Şekil 3.8 Emerald Benetau 411 .....                                                                                                                                                                                                                                                          | 54 |
| Şekil 3.9 PM basic a 50 deniz tipi yakıt pili sistemi .....                                                                                                                                                                                                                                  | 55 |
| Şekil 3.10 FCS Alsterwasser gemisinin hibrit sisteminin yerleşimi.....                                                                                                                                                                                                                       | 56 |
| Şekil 3.11 Hidrojen akış şeması.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 57 |
| Şekil 3.12 Geminin kıyı sularında test operasyonu sırasında fotoğrafı .....                                                                                                                                                                                                                  | 58 |
| Şekil 3.13 Geliştirilen sistem bileşenlerinin montaj düzeni: 1) yakıt pili modülü, 2) DA –DA dönüştürücüler, 3) yakıt pili başlangıç aküsü ve şarj cihazı, 4) batarya şarj cihazı, 5) su ayrıştırıcıları, 6) lityum iyon pil paketleri, 7) Su jeti tahrik sistemi, 8) Hidrojen depolama..... | 59 |
| Şekil 3.14 Constance gölünde Solgenia araştırma botu .....                                                                                                                                                                                                                                   | 60 |
| Şekil 3.15 Sürekli mıknatıslı (NdFeB) elektrik motoru .....                                                                                                                                                                                                                                  | 62 |
| Şekil 3.16 Ross Barlow kanal botu şematiği.....                                                                                                                                                                                                                                              | 62 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.17 Energy Observer gemisinin suya indirilişi.....                                                                            | 63  |
| Şekil 3.18 Energy Observer gemisinin seyir rotası.....                                                                               | 64  |
| Şekil 3.19 Geminin genel görünümü ve yerleşim planı.....                                                                             | 64  |
| Şekil 3.20 Teknenin ekstra çekiş gücünü sağlayan uçartma ile seyri .....                                                             | 65  |
| Şekil 3.21 (a) Yakıt pili sistemi, (b) Yakıt pili otomasyon sistemi, (c) Yakıt pili/batarya hibrit sistemi. ....                     | 67  |
| Şekil 3.22 Ross Barlow kanal botu yakıt pili sistemi .....                                                                           | 68  |
| Şekil 4.1 Arabalı vapur rotası ve seyir mesafesi .....                                                                               | 84  |
| Şekil 4.2 Arabalı vapur profil resmi.....                                                                                            | 86  |
| Şekil 4.3 Ana makine boyutları (A= 3108 mm, B= 1850 mm, C= 2064 mm) .....                                                            | 87  |
| Şekil 4.4 İzmir Körfezi'nde faaliyet gösteren bir feribotun seyir güç ihtiyacına etki eden parametreler ve bunların ilişkileri ..... | 92  |
| Şekil 4.5 İzmir Körfezi'nde faaliyet gösteren bir feribotun seyir güç ihtiyacının sistem dinamikleri modeli .....                    | 96  |
| Şekil 4.6 Batarya ve Yakıt Pili Seri/Hibrit Sevk Sistemi.....                                                                        | 97  |
| Şekil 4.7 Ballard FCvelocity – HD6 PEM tipi yakıt pilinin polarizasyon eğrisi ve denklemi .....                                      | 99  |
| Şekil 4.8 Matlab/Simulink yakıt pili/bataryalar hibrit sevk sistemi blok akış diyagram .....                                         | 100 |
| Şekil 4.9 Lityum iyon batarya doluluk oranı – voltaj eğrisi .....                                                                    | 101 |
| Şekil 4.10 Kurşun-asit batarya doluluk oranı – voltaj eğrisi.....                                                                    | 102 |
| Şekil 4.11 NiMH batarya doluluk oranı – voltaj eğrisi.....                                                                           | 102 |
| Şekil 5.1 Geminin tipik bir seferi için Vensim® yazılımından hesaplanan yük karakteristiği .....                                     | 105 |
| Şekil 5.2 Geminin sefer sırasında sevk sistemindeki enerji kayıpları.....                                                            | 107 |
| Şekil 5.3 Geminin yükleme/boşaltma sırasında sevk sistemindeki enerji kayıpları .....                                                | 108 |
| Şekil 5.4 Gemi sistemlerinin yükleme/boşaltma sırasında güç ihtiyaçları .....                                                        | 109 |
| Şekil 5.5 Gemi sistemlerinin sefer sırasında güç ihtiyaçları .....                                                                   | 110 |
| Şekil 5.6 Hibrit sistemde batarya doluluk oranlarının batarya çeşitlerine ve zamana göre durumu.....                                 | 112 |
| Şekil 5.7 Batarya ile sevk durumunda batarya doluluk oranlarının batarya çeşitlerine ve zamana göre durumu.....                      | 116 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                 | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Tablo 2.1 Dünya, kanıtlanmış petrol rezervleri .....                                            | 17           |
| Tablo 2.2 Tipik bir doğal gazın bileşimi .....                                                  | 19           |
| Tablo 2.3 Kanıtlanmış olarak elde edilebilir kaya gazı rezervleri .....                         | 21           |
| Tablo 2.4 Biyodizel ve dizelin yakıt özelliklerinin karşılaştırılması .....                     | 24           |
| Tablo 2.5 Biyodizelin motor yakıtı olarak avantaj ve dezavantajları .....                       | 25           |
| Tablo 2.6 Hidrojenin özellikleri .....                                                          | 30           |
| Tablo 3.1 Yakıt pili tipleri, kullanılan elektrolitler ve çalışma sıcaklıkları .....            | 37           |
| Tablo 3.2 Tanıtılan yakıt pili projeleri .....                                                  | 49           |
| Tablo 3.3 Solgenia araştırma teknesinin teknik bilgileri .....                                  | 61           |
| Tablo 3.4 Batarya çeşitleri .....                                                               | 70           |
| Tablo 3.5 Uluslararası denizcilikte yakıt pili uygulama projeleri .....                         | 77           |
| Tablo 4.1 Proje feribotu genel özellikleri .....                                                | 85           |
| Tablo 4.2 Ana makine özellikleri .....                                                          | 87           |
| Tablo 4.3 Sistem dinamikleri modeli değişkenleri, verileri ve kaynaklar .....                   | 88           |
| Tablo 4.4 Ballard FCvelocity – HD6 PEM tipi yakıt pilinin genel özellikleri .....               | 98           |
| Tablo 4.5 Matlab/Simulink Advisor yazılımından seçilen lityum iyon bataryanın özellikleri ..... | 100          |
| Tablo 4.6 Matlab/Simulink Advisor yazılımından seçilen kurşun-asit bataryanın özellikleri ..... | 101          |
| Tablo 4.7 Matlab/Simulink Advisor yazılımından seçilen NiMH bataryanın özellikleri .....        | 101          |
| Tablo 5.1 Feribot seferinin sistem dinamikleri modeli sonuçları .....                           | 106          |

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Enerjiye olan ihtiyaç neredeyse insanlık tarihi kadar eskidir. Ateşin bulunmasıyla birlikte odun, kömür gibi fosil yakıtlar enerji kaynağı olarak kullanılırken elektriğin keşfiyle birlikte bu durum daha farklı bir boyut kazanmıştır.

Günümüzde enerji kaynakları yenilenebilir olup olmamasına göre önemli bir ayrıma tabi tutulmaktadır. En yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları ise rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle ve hidrojen enerjisidir.

Fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan karbondioksitin küresel ısınmaya ve çevresel yıkıma neden olması ile petrol ve doğal gaz gibi hidrokarbonların kanıtlanmış rezerv miktarlarının artan enerji ihtiyacını sürdürülebilir bir şekilde karşılamaya yeterli olmaması hidrojen enerjisinin kullanılmasını gerekli kılmıştır.

Hidrojen günümüzde değişik şekillerde enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Hidrojeni enerji kaynağı olarak kullanan ve son zamanlarda üzerinde en fazla çalışılan sistem yakıt pilleridir. Yakıt pilleri sayesinde hidrojenden yüksek verimlilikte ve çevre dostu yöntemler ile elektrik enerjisi üretilmektedir.

Yakıt pilleri verimli, sessiz ve çevreci bir şekilde enerji üretebilen, her geçen gün kullanımının arttığı ve artmaya devam edeceği tahmin edilen enerji üretim yollarından biridir. Yakıt pili, yakıttaki kimyasal enerjiyi, hareketli parçalar olmadan, çevreye zararlı salımları ya hiç üretmeyerek ya da minimum düzeyde üreterek elektrokimyasal tepkimeler ile elektrik enerjisine dönüştürür. Yakıt pilleri konvansiyonel güç üretim sistemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Özellikle yüksek verimliliği, boyutları ve çevresel etkileri bakımından oldukça avantajlı konumdadır.

Bu alanda ilk başarılı uygulama uzay araştırmaları sırasında 1960'lı yıllarda gerçekleştirilmiştir. Denizcilik alanında yapılan ilk uygulamalar ise Amerikan Donanmasında 1960'lı yıllardan itibaren yakıt pilinin savaş gemilerinde

kullanılmasına yönelik olmuştur. Bunun yanı sıra 1970’li yıllarda da Almanya özellikle dizel elektrikle sevk edilen denizaltılarda havadan bağımsız tahrik sisteminin uygulanabilmesi açısından en uygun yöntemin yakıt pili olduğuna karar vermiş, bu alanda çalışmalar yürütmüştür ve bu çalışmalara Kanada hükümeti de 1980’li yıllardan itibaren katılmıştır (Weaver ve Reidy, 2002). Bu süreçte Polimer Elektrolit Yakıt Pili (PEMYP), Alkali Yakıt Pili (AYP), Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP), Erimiş Karbonatlı Yakıt Pili (EKYP) ve Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı gemi sevk sistemlerinde kullanılan yakıt pillerinin ani yük değişimleri nedeniyle azalan yaşam ömürlerini engellemek için bataryalar ile birlikte hibrit bir sevk sistemi tasarlanması ve bu sistem için en uygun olan batarya tipinin belirlenmesidir. Önceki çalışmalarda yakıt pili ve bataryalara etki eden değişkenler dışındaki parametrelere değinilmemiş olması bu çalışmanın ayırt edici yönünü oluşturmaktadır. Vensim® yazılımı ile sistem bir bütün olarak modellenmiş ve bu parametreler dikkate alınarak simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Uygulama alanı olarak seçilen bir gemiden alınan veriler Vensim®’de oluşturulan modelde belirlenen koşullara uygun şekilde işlenerek Matlab/Simulink yazılımında uygun bir model oluşturulmuştur. Bu modelde yakıt pili sisteme menzil arttırıcı olarak eklenmiştir. Modellenen üç farklı batarya tipinin ağırlık ve üretebildikleri enerji miktarı yönünden karşılaştırmalar yapılmıştır. Araştırmada lityum iyon bataryaların incelenen her yönden daha avantajlı olduğu saptanmıştır. Karşılaştırmaların sonuçları Bulgular ve Tartışma bölümünde ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

## **BÖLÜM İKİ**

### **GEMİLERDE KULLANILAN SEVK SİSTEMLERİ VE ENERJİ KAYNAKLARI**

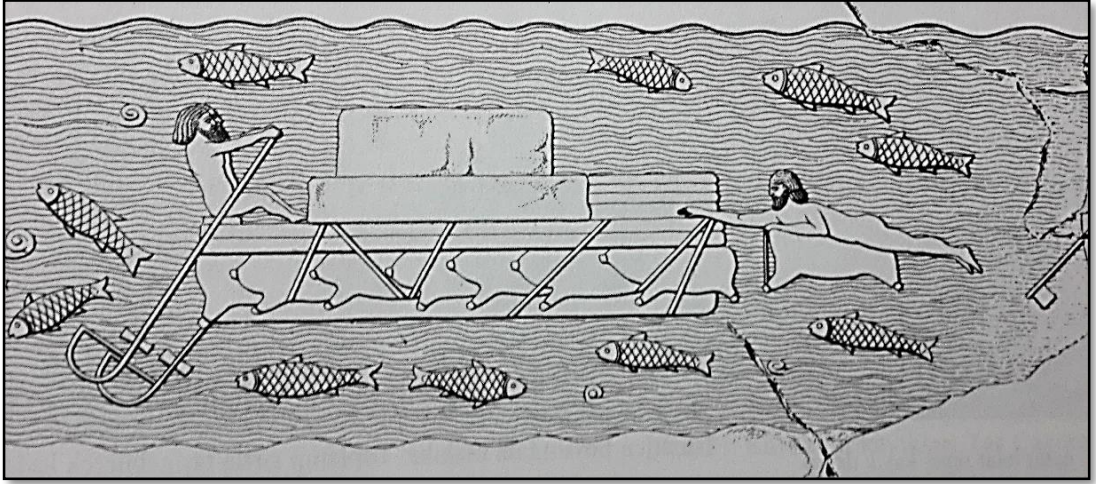
#### **2.1 Gemilerde Kullanılan Sevk Sistemlerinin Gelişimi**

Gemilerin istenilen rotada seyir yapabilmelerini sağlamak için ilk inşa edildikleri günden itibaren çeşitli sevk sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu bölümde de sırası ile insan gücü ile sevk, rüzgâr gücü ile sevk, buhar ve gaz türbinleri ile sevk ve elektrikli sevk sistemleri incelenmiştir. Ardından bu sevk sistemlerinin ihtiyaç duyduğu enerji kaynakları tanıtılmıştır.

##### **2.1.1 İnsan Gücü ile Sevk**

Su üzerinde taşımacılık ve teknelerin bu amaçla kullanımı neredeyse insanlık tarihi kadar eskidir. Fenikelilerin MÖ 3200’lerde (Holst, 2008), Giritlilerin MÖ 3000’lerden sonra (Şahoğlu, 2005) ve Kikladlıların da MÖ 3000’lerden (Earle, 2012) sonra Akdeniz ve Kızıldeniz’de tarihte bilinen ilk deniz ticareti faaliyetlerini gerçekleştirdikleri belirtilmektedir. Yeni Zelanda yerlileri saz demetlerini bir araya toplayıp ata biner gibi üzerine oturarak gölleri geçmişler; Iraklı çobanlar ise keçi postlarını şişirerek üzerlerinde ırmakları aşmışlar; Tamil yerlileri kollarının altına aldıkları bir kütükle kıyı boyunca sürüklenerek balık avlamışlar; Sindliler ise geniş ağızlı küplerin üzerine yatarak kıyı boyunca balık avlamışlardır (Casson, 2002).

İlerleyen zamanlarda insanlar kendilerini yalnızca su üzerinde değil ayrıca su dışında kuru tutacak başka arayışlara girmişlerdir. Ağaçların yetiştiği yerlerde kütüklerin bir araya getirilmesiyle, sazlıkların bol olduğu yerlerde ise - Nil nehri ile Dicle ve Fırat’ın aşağı kısımlarında - sazların yığınlar halinde birbirine bağlanmasıyla salları yapılmıştır. Bu basit salları kullanılamayacağı yerlerde ise - özellikle Fırat ve Dicle’nin Doğu Anadolu’daki üst kısımlarında - hayvan postlarının üzerine yerleştirilen tahta iskelet üzerinde seyir yapıyorlardı (Casson, 2002). Bunun bilinen ilk örneklerinden biri olan Asurluların yaptığı sal Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Asurluların şişirilmiş hayvan postları ve tahta bir iskelet üzerinde duran bir sal ile seyirleri (Casson, 2002)

Şekil 2.1’de de görüldüğü gibi teknenin istenilen yönde ve istenilen hızda ilerleyebilmesi için gerekli olan gücü ilk olarak en kolay yöntem olan insan gücü ile karşılama yoluna gidilmiştir. Bunun için ilk geliştirilen sistem kürek ile sevk olmuştur. Bu sevk sistemi uzun yıllar boyunca geçerliliğini korumuştur. Zamanın savaş gemilerinden, ticaret gemilerine kadar her boyutta tekne için kürek ile sevk sistemi bulunmaktaydı. Hatta günümüzde bile birçok ufak boyutlu teknede kürek ile sevk sistemi bazen birincil bazense acil durum sevk sistemi olarak hâlen kullanılmaktadır (Anderson ve Anderson 2003).

Mekanik alanındaki bilgi birikiminin artması ile birlikte teknelerde kullanılan mekanik sevk sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu mekanik sevk sistemlerinden en eskisi pedallı sevk sistemidir. Tekne içerisinde bulunan pedalların çevrilmesi ile dönen pervane yahut çarklar aracılığıyla tekneye itme kuvveti sağlanacağı belirtilmiştir. Genellikle küçük boyutlu gezi teknelerinde tercih edildiği görülmektedir. Ayrıca bu sevk sisteminin insan gücünün yanı sıra bir buhar sistemi vasıtasıyla çalışan örnekleri bulunmaktadır. 1800’lü yıllarda okyanus aşırı seyir yapabilen yolcu gemilerinde de bu sistemin kullanıldığı bilgisi verilmektedir (Çelik, 2017).

### 2.1.2 Rüzgâr Gücü ile Sevk

Rüzgâr gücünü kullanabilen teknelere yelkenli tekne ismi verilmiştir. Tarihte bilinen ilk tekneler Mısırlılar tarafından ulaşım amaçlı olarak yapılmış ve Nil nehrinde kullanılmıştır. Gemilerde yelken kullanımı da ilk defa bu teknelerde kullanılmak üzere Mısırlılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Yelkenin gelişmesine katkı sağlayan diğer milletlerden bazıları ise Fenikeliler, Romalılar, Çinliler, İspanyollar, Portekizliler, Fransızlar ve İngilizler olmuştur (Casson, 2002).

Yelkenlerin çalışma prensibine açıklayan en önemli teoriden biri 1738 yılında Edmund Bernoulli tarafından ortaya atılmıştır ve belirli koşullar altında akış içerisindeki enerjinin sabit olduğu fikrine dayanır. Yelkenlinin ileri doğru gitmesini sağlayan kuvvetin genellikle uçak kanatlarının profiline benzer şekilde dikilen yelkenlerin iki yüzeyi arasındaki basınç farkı ile sağlandığı fikri ileri sürülmüştür. Bu basınç farkı sonucunda yelkenlinin alçak basınç tarafına doğru ilerleyeceği belirtilmiştir (Kükner ve Candan 2016).

Bunun dışında aerodinamik profil üzerindeki kaldırma olayını açıklayan diğer teori Euler tarafından ortaya atılmıştır ve Denklem 2.1’de gösterilmiştir (Kükner ve Candan 2016).

$$dP_f / dn = \rho V_f^2 / R \quad (2.1)$$

Burada  $P_f$  akışkan basıncını,  $n$  akım hattı eğrisinde normal vektörü,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $V_f$  akışkanın hızını ve  $R$  akım hattının eğrilik yarıçapıdır.

### 2.1.3 Buhar ve Gaz Türbinleri ile Sevk

Buhar türbinleri, buharın içindeki ısı enerjisini, mekanik enerjiye dönüştüren bir dıştan yanmalı makinedir. Buhar türbinlerinde basınçlı buharı üretebilmek için suyun kazanıldığı bir kazana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu basınçlı buharın üretilmesinde

herhangi bir ısı kaynağı kullanılabilir, ancak genellikle kömür veya petrol türevi yakıtların yakılmasından elde edilen ateş kullanılmaktadır (Asimov, 2006).

İlk faydalı uygulaması Fransız fizikçi Denis Papin tarafından 1679 yılında gerçekleştirilmiştir. Suyun kaynatılarak buhara dönüştürüldüğü ve biriken buharın ağız sıkıca kapanan bir kapağı olan düdüklü tencere icat edilmiştir. İngiliz mühendis Thomas Savery ise 1698 yılında maden ocaklarındaki fazla suyu dışarı atmak için kullanılan ve ticari olarak satılan ilk buhar türbinli makineyi yapmıştır. 1712 yılında ise Thomas Newcomen'ın yeni bir tür buhar makinesi geliştirildiği belirtilmektedir (Asimov, 2006).

1764 yılında İskoç mühendis James Watt bozulan bir Newcomen buhar makinesini geliştirmiştir. 1781 yılına gelindiği ise pistonun ileri geri hareketini tekerliğin dönme hareketine çeviren mekanik aletleride geliştirerek günümüzde kullanılmakta olan buhar makinelerini yapmıştır (Britannica, 2017).

1787 yılına kadar buharlı motorlar sadece su pompalarını ve tekstil makinalarını çalıştırmak için kullanılmıştır. Amerikalı mucit John Fitch buhar türbini ile çalışan ilk vapuru Delaware Nehri'ne 1787 yılında indirmiştir. Philadelphia ile Trenton arasında düzenli vapor yolculuğu yapılmasını sağlamıştır. Ancak ticari anlamda başarılı olamamıştır. 1807 yılına Robert Fulton 8 km/h hızla giden adını Clermont koyduğu kırk metre uzunluğundaki vapurları Hudson Nehri'nde işletmeye başlamıştır. Bu sefer Fitch'in tersine ticari başarı kazanıldığından Fulton vapurların mucidi kabul edilmektedir. 1809 yılında ise Moses Rogers komutası altındaki Phoenix okyanusa açılan ilk buharlı vapor olmuştur (Asimov, 2006).

Gaz türbinleri denizcilik alanında ilk olarak 1937'li yıllarda askeri gemilerde kullanılmaya başlanmıştır. Almanlar ikinci dünya savaşı sırasında ürettikleri denizaltılarda kullanmış, İngilizler ise ikinci dünya savaşından sonra denizaltılarında kullanmaya başlamıştır. İngilizlerden sonra Amerikan ve Fransız deniz kuvvetleri gemilerinde gaz türbinlerini kullanmışlardır. Kısmi de olsa gaz türbini ile güç sağlanabilen ilk gemi 1947 yılında İngiliz donanmasına ait bir gemi olmuştur. Birkaç

gemide daha tecrübe kazanıldıktan sonra İngiliz donanması muhrip ve firkateyn sınıfı gemilerde genellikle gaz türbini kullanmaya başlamıştır. Ticaret gemilerinde biraz daha geç kullanılmaya başlanmış ve deneme niteliğinde kalarak yaygınlık gösterememiştir (Çubuğuuzun, 2006).

Dıştan yanmalı motorlar olarak da adlandırılan sistemlerden buhar türbinlerinde ana itki gücü mekanik sistemin dışında gerçekleşen yanma işlemi ile buradaki akışkana termal enerji olarak aktarılır. Daha sonra akışkan buhar fazında türbindeki sabit kanatlara çarpar ve basıncı düşerken hızı artar. Daha sonra ise türbin içerisindeki hareketli kanatlara çarparak türbinin rotorunu döndürerek oluşturulan mekanik enerjiyi çeşitli dişli ve mekanik sistemlerin yardımıyla pervaneye aktarılmasıyla birlikte teknenin ilerlemesini sağlanmaktadır (Pulkrabek, 1997). Yüksek güç gereksinimi olan enerji santralleri, askeri gemiler ve ticari gemilerde kullanılmaktadır (Smil, 2008).

Gaz türbinlerinde ise; atmosferden alınan temiz havanın kompresörle sıkıştırılarak, yüksek sıcaklık ve basınca ulaşması sağlanmaktadır. Yüksek sıcaklık ve basınçtaki bu hava yanma odasına gönderilmekte ve ardından yakıt yanma odasına püskürtülerek yanma işlemi gerçekleşmektedir. Yanma sonucu oluşan yüksek basınç ve sıcaklığa sahip gazlar türbinin kanatlarına çarparak türbinin rotorunu çevirirler. Oluşan bu iş ise gemi pervanesine aktararak geminin hareket etmesini sağlanmaktadır (Pulkrabek, 1997).

#### ***2.1.4 İçten Yanmalı Motorlar ile Sevk***

İçten yanmalı motorların ilk örnekleri 17. ve 18. yüzyıllarda tek silindirli olarak ve daha çok ağırlık kaldırma işleri için tasarlanmıştı. 1859 yılında ham petrolün keşfi benzin, yağlama yağı gibi hidrokarbon ürünlerin de hızla gelişmesini sağlamıştır. Bunun sonucu olarak da içten yanmalı motorların hızlı gelişimi gerçekleşmiştir. 1876 yılında Nicolaus A. Otto arabalar için bir motor tasarlamış ve bu motorun prototipini aynı yıl üretmiştir (Smil, 2010). 1892 yılına gelindiğinde ise Rudolf Diesel tarafından günümüzde bilinen dizel motor tasarlanmıştır. 4 zamanlı benzinli motorlara göre daha

verimli olduğu görölmüştür. 1920’li yıllardan itibaren ise çok silindirli daha küçük dizel motorların arabalarda kullanıldığı görölmektedir (Pulkrabek, 1997).

İçten yanmalı makine, yakıttan gelen kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye çeviren ve genellikle dönen bir çıkış mili üzerinde bulunan bir ısı makinesi olarak tanımlanmaktadır. Yakıtın kimyasal enerjisi, ilk önce makine içindeki yanma veya oksidasyon vasıtasıyla termal enerjiye dönüştürölmektedir. Bu termal enerji makine içindeki gazların ısını ve basıncını yükseltmekte ve daha sonra yüksek basınçlı gaz makinenin mekanik mekanizmasına karşı genişlemektedir. Bu genişleme, makinenin mekanik bağlantıları tarafından motorun çıkışı olan dönen bir krank mili haline dönüştürölmektedir. Krank mili, dönen mekanik enerjiyi istenilen nihai kullanıma iletmek için bir transmisyonu veya güç aktarma organına bağlanmaktadır. Bu sistem gemi makineleri için, genellikle bir pervanenin tahriki olmaktadır (Pulkrabek, 1997).

Gemilerde ana makinelerde kullanılan fosil kaynaklı yakıtlar olarak *Heavy Fuel* (HF), *MDO* (*Marine Diesel Oil*), *MGO* (*Marine Gas Oil*) *LPG* (*Liquefied Petroleum Gas*) ve *LNG* (*Liquefied Natural Gas*) sayılabilir. Bu yakıtların tercih edilmesindeki en büyük nedenler;

- Kolay depolanabilir olmaları,
- Yüksek enerji yoğunlukları, yüksek ısı değerleri,
- Günümüze kadar üzerinde en fazla araştırma-geliştirme faaliyetleri yapılmış olan yakıt türü olmaları,
- Diğer yakıt türlerine göre kullanımlarının daha güvenli olması,
- Seri üretime uygun olmaları,
- Lojistiğinin kolay ve hızlı sağlanabilmesi,

şeklinde sıralanmaktadır (Kjartansson, 2011).

İçten yanmalı makineler de kendi içerisinde ateşleme sistemine göre ikiye ayrılmaktadır. Yakıt olarak benzin kullanan yani buji ile ateşlemeli makineler ve yakıt olarak dizel kullanan yani sıkıştırma ateşlemeli makineler olarak adlandırılır. Bu

makineler de kendi içlerinde çeşitli ayrımlara göre sınıflandırılabilir. Ancak yüksek güç ihtiyacının bulunduğu gemilerde genellikle dizel makineler kullanılmakta ve bunlar kendi içerisinde iki zamanlı dizel makineler ve dört zamanlı dizel makineler olarak tekrar ikiye ayrılmaktadır. Aynı şekilde buji ateşlemeli makinelerde de iki zamanlı ve dört zamanlı makineler ayrımı yapılmaktadır (Pulkrabek, 1997).

Buji ateşlemeli motorlarda yakıt ve hava karışımı karbüratör adı verilen bir düzenek sayesinde silindir dışarısında karıştırılarak hava ile birlikte buhar olarak silindir içerisine emme valfinin açılması ile gönderilir. Ardından piston yukarı doğru hareket eder ve silindir içerisindeki benzin-hava karışımını sıkıştırır. Sıkışma ile birlikte ısınan bu karışım bujiden çıkan bir kıvılcım ile tutuşur. Oluşan bu patlama ile piston aşağı doğru hareket eder. Piston tekrar yukarı doğru hareketine başladığında ise egzoz valfi açılır ve yanma sonucu oluşan gazlar dışarı atılır. Bu işlem sırasında pistonun yukarı aşağı doğrusal hareketini dönel harekete çeviren krankşaft başka bir shaft aracılığıyla bu hareketi pervaneye iletir ve gemiyi sevk için gerekli olan itme kuvveti sağlanmış olur (Stone, 2012).

Sıkıştırımlı motorlar ile ateşlemeli motorlar arasındaki en büyük fark sıkıştırımlı motorlarda ateşleme için herhangi bir parçanın olmamasıdır. İlk olarak piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya ilerlerken dışarıdan temiz hava silindir içerisine doldurulur. Daha sonra alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru hareket eden piston silindir içerisindeki havayı sıkıştırır ve ısınmasını sağlar. Pistonun tekrar üst ölü noktaya ulaşmasından birkaç derece önce silindir içerisine enjektörler yardımıyla pulvarize ve basınçlı yakıt püskürtülür. Püskürtülen yakıt sıcaklıkla tutuşur ve patlama meydana gelir. Silindir içerisinde artan basınç pistonu alt ölü noktaya doğru hareket ettirir. Krankşafta aktarılan güç pervaneye aktarılarak istenilen iş meydana getirilmiş olur (Pulkrabek, 1997). Özgül yakıt harcamalarının düşük olması, verimlerinin yüksek olması, uygun maliyetli yakıtların kullanılabilmesi gibi nedenler dizel motorların tekne ve gemi sevk sistemlerinde yaygın olarak kullanılmalarını sağlamıştır (Larsson ve Eliasson, 2006).

Gelişmiş olan teknolojileri, uygun maliyeti, yüksek güç yoğunluğu, kullanımında güvenlik standartlarının oluşmuş olması gibi birçok nedene rağmen çevresel etkileri düşünüldüğünde içten yanmalı motorlar yerine alternatif ve çevre dostu sistemlerin geliştirilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir (Yılmaz, 2010). Özellikle son yıllarda malzeme ve elektronik mühendisliği alanlarında yaşanan hızlı gelişmeler ile birlikte elektrikli sevk sistemleri hem daha çevreci hem de belirli alanlarda geleneksel sevk sistemleri ile rekabet edebilecek düzeylere ulaşmaya başlamıştır. Özellikle yüksek verimli sistemler olmaları ve tek seferde kat edilebilecek mesafelerin diğer elektrikli sistemlere göre daha fazla olması sayesinde yakıt pilleri ön plana çıkmayı başarmıştır. Ancak seri üretime geçilememiş olması, yüksek maliyetleri ve güvenlik önlemlerinin standartlaşmamış olması gibi nedenlerle günümüzde halen içten yanmalı motorlara olan ihtiyaç devam etmektedir (Nadal ve Barbir, 1996).

#### **2.1.5 Elektrikli Sevk Sistemleri**

Elektrikli sevk sistemleri denizcilik sektöründe sanılanın aksine yeni kullanılmaya başlanan bir teknoloji değildir. Elektrik motoru ile tahriklenen ilk tekne 1839 yılında Moritz Hermann von Jacobi tarafından tasarlanmıştır (Doppelbauer, 1822). Elektrikli sevk sistemlerinden tezin konusuna uygun olarak bataryalar ile sevk, yakıt pili ile sevk ve hibrit sistemler ile sevk bu bölümde incelenmiştir.

##### **2.1.5.1 Batarya ile Sevk**

İtalyan mucit Alessandro Volta tarafından ilk batarya 1799 yılında icat edilmiştir. Bu batarya iki tip metal disk yığınları ve aralarında tuzlu su ile iyice ıslatılmış kıyafet parçalarından oluşmaktaydı. Metaller ve tuzlu su arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar elektrik üretilmesini sağlamaktaydı (Scrosati, 2011).

Bataryalar uzun yıllar sadece laboratuvar çalışmalarında yer almıştır. Çünkü çok ağır, hantal ve yavaş şarj edilebilmekteydi. Telefon ve telgrafın keşfi ile bataryaların geliştirilmesi için gerekli motivasyon sağlanmıştır. Kuru batarya adı verilen bataryalar

geliştirildi ve ticari teknelerde ilk olarak 1882 yılında “*Electricity*” adı verilen 7,6 m uzunluğunda çelik bir teknede kullanılmaya başlandı (Konur, 2016).

Elektrikli teknelerin parladığı dönem olarak 1880 ile 1920 yılları arası gösterilmiştir. 1880 yılında kıçtan takma ilk elektrik motoru tasarlanmıştır ve teknelerde yoğun olarak kullanıldığı bir döneme girilmiştir. 1920’li yıllarda ise kıçtan takma benzinli motorlar üretilmiştir ve elektrik motorları artık sadece sessiz çalışmaları nedeniyle deniz altılarında tercih edilen bir sevk sistemi haline gelmiştir (Konur, 2016). Günümüzde ise artan çevresel duyarlılık ve gelişen teknoloji sayesinde elektrikli motorlar tekrar öne çıkmaya başlamıştır. Özellikle güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve yakıt pilleri ile birlikte hibrit sistemler oluşturularak kullanılmaya başlanmıştır (Choi ve diğer., 2016; Aharon ve Kuperman, 2011; Sciberras ve Norman, 2012).

#### *2.1.5.2 Yakıt Pili ile Sevk*

Yakıt pilleri yakıtın içerisindeki kimyasal enerjiyi bir dizi elektrokimyasal tepkime sonucunda doğrudan elektrik enerjisine çeviren ve bu sayede elektrik enerjisi üretme verimlilikleri üst seviyede olan sistemlerdir (Mench, 2008).

Yakıt pillerinin geçmişi 1838 yılına (Grove, 1843) kadar uzansa da yaygınlaşmaya başlaması çok uzun zaman almıştır. Özellikle gemilerde kullanılması ilk olarak 1960’lı yıllarda görülmektedir (Weaver ve Reidy, 2002).

Yakıt pillerinin yüksek güç gereksinimi olan teknelerde uygulanmaları ilk yıllarda mümkün olmamıştır. Bu nedenle daha az güç gereksinimi olan kanal botları, denizaltılar, gezinti tekneleri, insansız sualtı araçları gibi uygulamalarda ilk olarak uygulanmıştır (Wirtschaft, Energie ve Umwelt, 2008; Affolter, 2000; Choi ve diğer., 2016). Bunların dışında yatlarda ve yelkenli teknelerde yardımcı güç ünitesi ve kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır (Sembler ve Kumar, 2011).

Yakıt pilinin bu alanlarda kullanılmaya başlanmasının bir diğer önemli nedeni ise birçok sevk sistemine göre daha çevreci ve hatta neredeyse sıfır salım değerlerine sahip olmaları gösterilmiştir. Küçük ve orta boyutlu teknelerde kullanılan yakıt pili sistemleri incelendiğinde en fazla tercih edilen Polimer Elektrolit Yakıt Pilleri'dir (PEMYP). Hem daha küçük boyutlu olmaları hem de güç yoğunluğunun ve çalışma sıcaklıklarının daha uygun olması bu yakıt pili üzerine olan çalışmaları arttırmıştır (Barbir, 2012).

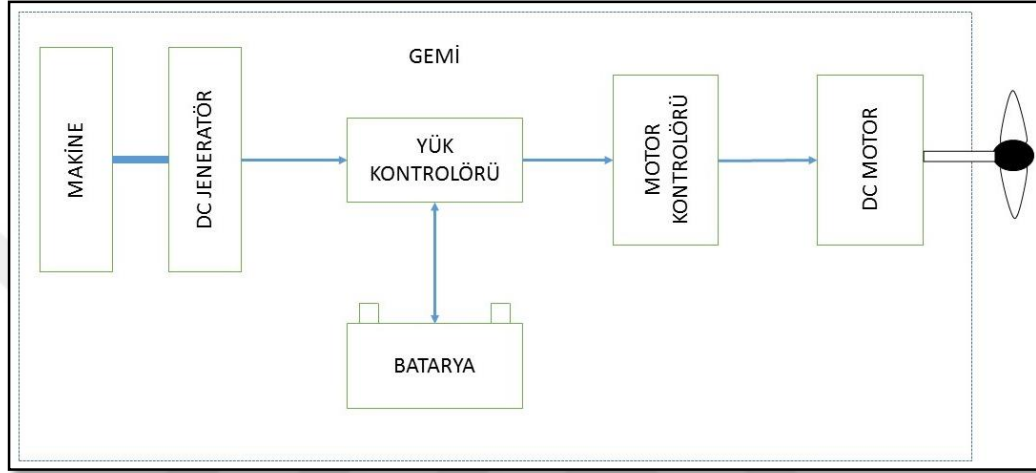
Ancak yakıt pillerinin halen büyük dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar; yüksek ilk yatırım maliyetleri, yeterli gelişimi kaydetmemiş olmaları, düşük güç yoğunluğu, yakıt tedarik problemi, seri üretime geçilmemiş ve yaşam ömürlerinin kısıtlılığı olarak gösterilmiştir. Bu sorunların aşılması için yoğun çaba ve destek hem hükümetlerden hem de Avrupa Birliği gibi kuruluşlardan yasal düzenlemeler ve açtıkları proje çağrılarını ile gelmektedir. Teknelerde yakıt pili kullanımı üzerine 2013 yılı sonuna kadar Avrupa Birliği destekli toplam proje sayısı 115'tir ve bunların 35 tanesi yedinci çerçeve programı kapsamındadır (Rampen ve diğer., 2013).

Günümüzde yakıt pilleri ile çalışan otomobiller, otobüsler, insansız hava araçları, insansız otonom sualtı araçları, tekneler gibi pek çok çalışma yapılmış ve hayata geçirilmiştir. Gittikçe artan çevresel duyarlılık ve yakıt pillerinin hibrit yahut kombine olarak diğer sistemler ile çalışma yeteneklerinin artması düşünüldüğünde halen devam eden dezavantajlarının aşılabileceği ve gelecekteki en önemli güç kaynaklarından biri olacağı vurgulanmıştır (Mench, 2008).

#### *2.1.5.3 Hibrit Sevk Sistemleri*

Hibrit sistemler en az iki ayrı sistemin unsurlarından oluşan bir şeyi çalıştırmak, örgütlemek veya yapmak için bir yol olarak tanımlanmıştır. Ayrıca sürekli sistemler teorisinin ya da ayrık sistemler teorisinin yöntemleri ile yeterli hassaslık gösterilmesine rağmen analiz edilemeyen dinamik bir sistem olarak da belirtilmiştir (Lunze ve Lamnabhi-Lagarigue, 2009).

Eğer araç hareketini dizel makine, batarya ya da yakıt pili gibi bir sistemden birlikte ya da ayrı ayrı sağlayabiliyorsa bu tip sistemler hibrit sevk sistemi olarak tanımlanmıştır (Sembler ve Kumar, 2011). Genel olarak hibrit sistemler 2 şekilde tasarlanmaktadır. Bunlar Şekil 2.2’de gösterilen seri hibrit sistemler ve Şekil 2.3’te gösterilen paralel hibrit sistemlerdir.



Şekil 2.2 Seri hibrit sistem şematiği (Hybrid-Marine, 2016)

Seri hibrit sisteminde makine durdurularak gemi seyri sürdürülebilir ve bu andan itibaren gidebileceği mesafe bataryalarda depolanabilen enerjiye bağlı olarak değişmektedir Daha güçlü bataryalar ile jeneratörü tekrar devreye almadan uzun süre elektrik tahriki ile gidilebilmektedir (McCoy, 2002).

Paralel hibrit sistemlerde makine ile pervane şaftı arasında mekanik bir bağlantı vardır. Elektrik motoru ve makine şaftın döndürülmesi işinde birbirine paralel olarak çalışmaktadır. İstendiği takdirde sadece makine yahut sadece elektrik motoru ile ya da her ikisi ile birlikte sevk sağlanabilmektedir (Sembler ve Kumar, 2011).

Sembler ve Kumar (2011) gerçekleştirdikleri çalışmada yakıt pilleri ile hibrit sistemlerin limanda ya da demirdeki bir geminin elektrik enerjisini sağlamada ne kadar elverişli olduğunu araştırmışlardır. Sonuç olarak önerdikleri *Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)* ile hibrit çalışan sistemlerin dizel makinelere oranla hem daha yüksek toplam



### 2.2.1 Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Dünya nüfusunun hızla artması ve buna paralel olarak gelişen sanayi ve bu sanayinin artan enerji gereksinimleri kısıtlı kaynaklarla karşılanamayacak düzeye doğru hızla ilerlemektedir. Küresel enerji tüketimi 2035 yılında 1998 yılına göre iki kat daha fazla olacağı öngörülmektedir. 2055 yılında ise üç kat daha fazla olacağı tahmin edilmektedir (Uluslararası Enerji Ajansı [IEA], 2012). Artan bu enerji ihtiyacı fosil kaynaklı yakıtlara olan bağımlılığımızın halen devam etmesine neden olmaktadır.

#### 2.2.1.1 Petrol

İngilizcede petrol kelimesi "*petroleum*" şeklinde kökeni Grekçe olan "*petra* (taş)" ile "*olea* (yağ)" anlamına gelen kelimelerden oluşmuştur ve taşıyağı anlamına gelir (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı [TPAO], 2016). Petrol; benzin, motorin, akaryakıt vb. belirli bir yakıtı anlatmak için değil, doğal halde bulunan ve yeraltından çıkarılan ham petrolü ifade etmek için kullanılan bir sözcüktür.

İnsan topluluklarının petrol ile ilk tanışıklığı binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Bu konuda ki ilk kayıtlar milattan önce 3200 yılında Mezopotamya’da inşaatçılıkta harç katkı maddesi, denizcilikte yalıtım ve kalafatlama malzemesi olarak; yine tarihi kayıtlara göre milattan önce 300 yıllarında Mısır’da mumyalama işlerinde, asfaltın kullanıldığı öğrenilmektedir (Gümüş ve Altan, 1995).

1800’lü yılların ortalarında Abraham Gesner’in yeryüzüne doğal olarak sızan petrolden gaz yağını rafine etmesi petrole dayalı sanayinin doğuşunu simgelemektedir. Gaz yağının rafine edilişi aydınlanma alanında gerçekten çok büyük bir devrim olmuş ve çok kısa bir sürede büyük bir patlama yaşanmıştır (Gümüş ve Altan, 1995).

Petrolün sondaj yapılarak çıkarılabileceği ilk defa 1850’li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) ortaya çıkmıştır ve 1900’lü yılların başlarına kadar bu alanda tekel olmayı sürdürmüştür. Bu alanda ilk rakibi ise günümüzdeki Azerbaycan/Bakü’de yaptığı üretim ile Çarlık Rusya’sı olmuştur. Bakü’de petrolün varlığı çok eski

zamanlardan beri bilinmekteydi. Ancak Rusya'nın üretici olarak buraya yatırım yapması ile ABD'ye ilk defa ciddi bir rakip ortaya çıkmıştır. Kısa bir süre sonra Rusya'nın üretimi ABD'nin üretiminin üçte ikisi seviyesine kadar ulaşmıştır (Gümüş ve Altan, 1995).

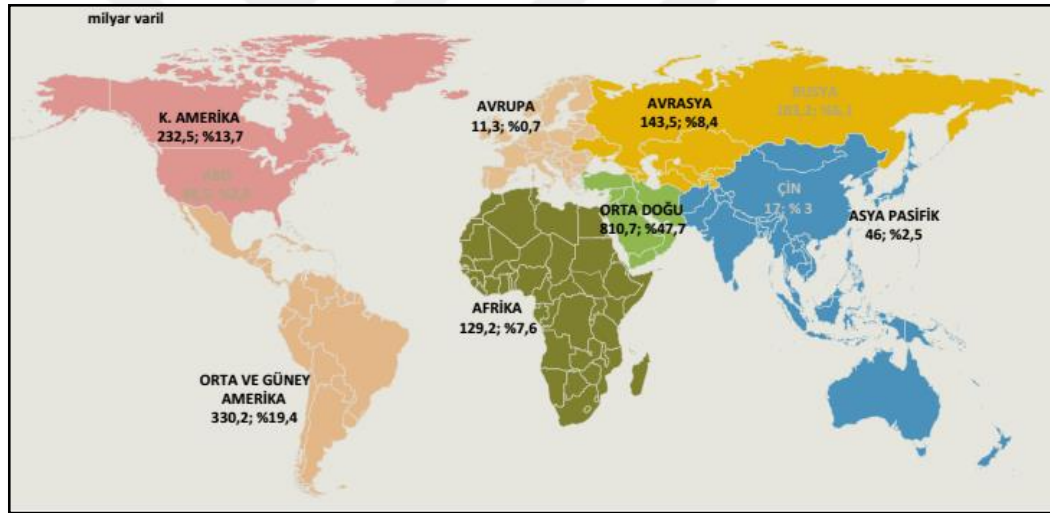
Petrolün değerini ve önemini artıran en önemli buluşlardan biri de içten yanmalı motorlarda kullanılabilir olduğunun anlaşılmasıdır. Böylece değerinde de iki kattan daha fazla bir artış gerçekleşmiştir. Orta Doğu'nun petrol açısından ne kadar zengin olduğu ancak ikinci dünya savaşından sonra fark edildi ve bu tarihten itibaren batılı büyük petrol şirketleri buraları himayeleri altına aldılar ve büyük çaplı üretimler başlattılar. Diğer ülkeler bu büyük firmaların hegemonyasından kurtulmak için büyük bir mücadele vermişlerdir. Ancak 1960 yılına gelindiğinde bu şekilde sonuç alınamayacağını gören bu ülkeler bu hâkimiyete karşı önemli ilk adımı atarak Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü'nü (OPEC) 10-14 Eylül 1960 tarihinde düzenlenen konferansta İran, Irak, Kuveyt, Sudi Arabistan ve Venezüella birlikte kurmuşlardır. Böylece daha iyi şartlar sağlanması konusunda Orta Doğu ülkeleri ve Venezüella bir birlik oluşturmayı başarmıştır (OPEC, 2017).

2015 yılı sonu itibariyle dünya üzerindeki kanıtlanmış petrol rezervlerine sahip ilk on ülke Tablo 2.1'de ve kıtasal bir ayrıma tutulduğundaki kanıtlanmış petrol rezervlerinin dağılımı da Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Denizcilik alanında da petrolün rafine edilmesi ile kullanılan değişik yakıt çeşitleri oluşmuştur. Özellikle iki ve dört zamanlı içten yanmalı makinelerin araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılırken en büyük yatırımların o zamanki en uygun yakıt olarak değerlendirilen petrol ve rafine petrol ürünlerine odaklanmış olması petrolü bu alandaki en önemli yakıt haline getirmiştir. Bu yakıtlar oktan sayısına göre “Marine Gas Oil” (MGO), “Marine Diesel Oil” (MDO veya DO), “Marine Fuel Oil” (MFO veya FO) ve “Heavy Fuel Oil” (HFO) olarak sınıflandırılmıştır (Kjartansson, 2011).

Tablo 2.1. Dünya, kanıtlanmış petrol rezervleri (BP, 2016)

| Sıra | Ülkeler             | 1 Ocak 2015<br>(Milyon varil) | 1 Ocak 2016<br>(Milyar varil) |
|------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1.   | Venezuela           | 300,0                         | 300,9                         |
| 2.   | Suudi Arabistan     | 267,0                         | 266,6                         |
| 3.   | Kanada              | 172,2                         | 172,2                         |
| 4.   | İran                | 157,8                         | 157,8                         |
| 5.   | Irak                | 143,1                         | 143,1                         |
| 6.   | Rusya               | 103,2                         | 102,4                         |
| 7.   | Kuveyt              | 101,5                         | 101,5                         |
| 8.   | B. Arap Emirlikleri | 97,8                          | 97,8                          |
| 9.   | Libya               | 48,4                          | 48,4                          |
| 10.  | Nijerya             | 37,1                          | 37,1                          |
|      | Dünya Toplam        | 1700,0                        | 1697,6                        |



Şekil 2.4 2014 yılı dünya ispatlanmış petrol rezervi dağılımı (BP, 2015)

IMO'nun (Uluslararası Denizcilik Örgütü) kabul ettiği yakıt standardı ise ISO 8217-2012'dur. Bu standartta damıtılmış olmalarına ya da “*residual*” – artık – olmalarına göre denizcilik yakıtları iki gruba ayrılmıştır. Damıtılmış yakıtlar *DMX*, *DMA*, *DMZ* ve *DMB* olarak dört alt kategoriye ayrılmış, gemi atık yakıtı ise *RMA 10*, *RMB 30*, *RMD 80*, *RME 180*, *RMG 180-380-500-700* ve *RMK 380-500-700* olarak alt kategorilere ayrılmıştır (International Standards Organization [ISO] 8217, 2012).

MGO, DMA ve DMX (kerosen) olarak iki şekilde sınıflandırılabilir. DMX yüksek uçuculukta bir damıtma ürünü olup, devir sayısı 1200 d/d ve daha yukarı olan yüksek ve süper yüksek devirli dizel makinelerde ve geminin emercensi sistemlerinde kullanılmaktadır. DMA ise orta uçuculukta, parlak ve temiz bir damıtma ürünü olan bir yakıttır, genel olarak '*Marine Gas Oil*' olarak isimlendirilmektedir. Bu iki sınıflandırma deniz yakıtı olarak kullanılan ve en yüksek kalitede damıtılmış olan ürünlerdir. MDO ise DMB ve DMC olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır. DMB alçak uçuculukta bir damıtma ürünü olup, DMA'ya benzerlik gösteriyor fakat az miktarda artık yakıt içerdiğinden siyah renkli bir görüntü sergilemektedir. DMB'den daha çok oranda artık yakıt içeren DMC, diğerlerine göre daha çok karbon artığı, tortu miktarı, alüminyum, silikon ve vanadyum miktarı kapsayan bir yakıt çeşididir (Nuran, 2015). MFO ise MDO ve HFO karıştırılması ile elde edilen bir yakıt çeşididir. Ağır yakıt (HFO) ise artık anlamına gelen "*Residual*" Marine (RM) olarak sınıflandırılmakta. HFO denizcilik alanında en uygun ve en çok kullanılan yakıt tipi olma özelliğine de sahiptir (Kjartansson, 2011).

#### 2.2.1.2 Doğal Gaz

Doğada saf bir şekilde bulunan doğal gaz hem kokusuz hem de renksizdir. İçerisinde büyük oranda metan gazı ihtiva eder (Larminie ve Dicks, 2003). Metan gazının yanı sıra etan, propan, bütan ve pentan gazlarını da ihtiva eder. Tipik bir doğal gazın içeriği Tablo 2.2'de gösterilmiştir. Doğalgazın yanması sonucu çevreye saldıgı zararlı gazlar diğer fosil yakıtlara oranla oldukça azdır. Bunu ise doğal gazın çoğunluğunu oluşturan metan gazının bir karbon ve dört hidrojen atomundan oluşan basit yapısı sağlamaktadır. Bu basit yapı tam yanmanın kolay bir şekilde gerçekleşmesine olanak sağlamıştır. Böylece doğal gaz ısınma, elektrik enerjisi elde edilmesi gibi birçok alanda enerji hammaddesi olarak kullanılmakta ve hayatımızda önemli bir yere sahip olmaktadır (Bahadori, 2014).

Doğal gaz dünyadaki başlıca enerji kaynakları arasında % 24'lük enerji payı ile üçüncü sırada yer almakta ve bu enerji kaynaklarından güç üretimi için kullanılanlar arasında % 22'lik pay ile ikinci sırada yer alarak önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca

fosil kaynaklı yakıtlar arasında dünya enerji karışımındaki payının artması beklenen tek yakıt tipi olarak görülmektedir (World Energy Council [WEC], 2016). Bunun nedenleri ise fosil yakıtlar arasında en temiz enerji kaynağı olması, güç üretimi için esnek ve verimli bir yakıt olması ve ispatlanmış doğal gaz rezervlerinin artış göstermesi sayılabilir (WEC, 2013).

Tablo 2.2 Tipik bir doğal gazın bileşimi (Guo ve Ghalambor, 2014)

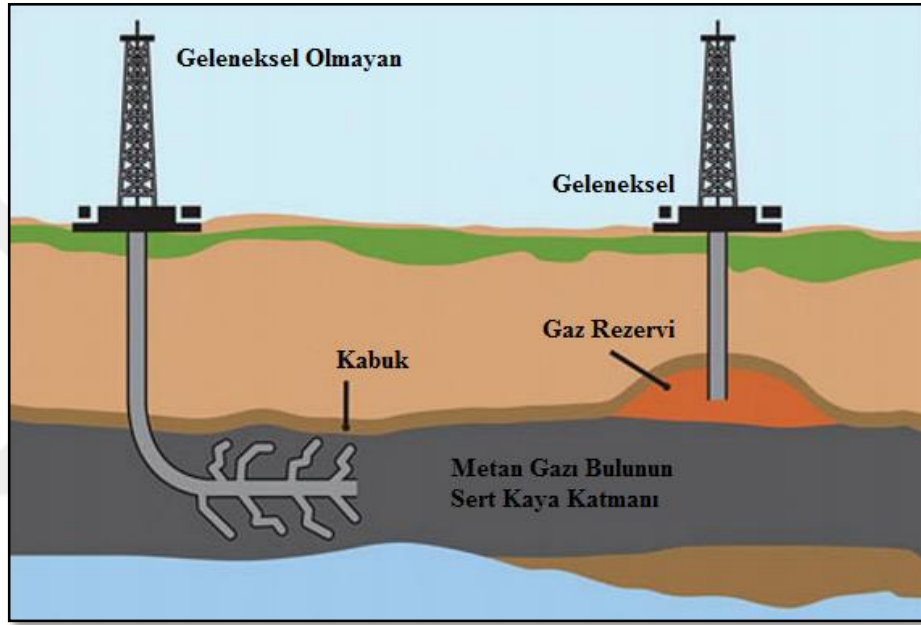
| Gaz Türü        | Formülü                        | Oran (%) |
|-----------------|--------------------------------|----------|
| Metan           | CH <sub>4</sub>                | 70-90    |
| Etan            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 0-20     |
| Propan          | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  |          |
| Bütan           | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> |          |
| Karbon dioksit  | CO <sub>2</sub>                | 0-8      |
| Oksijen         | O <sub>2</sub>                 | 0-0,2    |
| Nitrojen        | N <sub>2</sub>                 | 0-5      |
| Hidrojen sülfür | H <sub>2</sub> S               | 0-5      |
| Ender gazlar    | A, Ne, He, Xe                  | 0-1      |

Bir yakıtın gemi yakıtı olarak kullanılabilmesi için MARPOL Ek VI yönetmelikleri ve ana egzoz salım değerleri ile alakalı uyulması gereken asgari koşulları sağlaması gerekmektedir. Günümüzde doğal gazdan üretilen yakıt tipleri arasında bunu karşılayabilen tek yakıt tipi LNG olmuştur. Denizcilik alanında pazar, enerji taşıyıcı firmalar tarafından kontrol edilmektedir. Ticari gemiler arasında LNG'yi yakıt olarak kullanan yaklaşık 70 adet gemi bulunmaktadır ve bunların 44 tanesi Shell firması tarafından işletilmektedir (WEC, 2016).

Gemilere LNG'yi deniz yakıtı olarak sağlayabilmek için altyapı çalışmalarında en başta Avrupa gelmektedir. 2015 ila 2018 yılları arasında sekiz proje gemilere yakıt ikmali yapabilecek şekilde hayata geçirilecektir (Gas Infrastructure Europe, 2017). LNG'nin; petrol fiyatlarının yükselmesi, armatörlerin yakıt seçeneklerinin uygunluğunu uzun vadeli olarak değerlendirmesine karşılık geniş bir alanda altyapısının olması, kullanıma hazır olması ve makul fiyatlı bir enerji kaynağı olmasından dolayı deniz taşımacılığında kullanılacak en alternatif yakıt türü olarak görülmektedir (WEC, 2016).

### 2.2.1.3 Kaya Gazı

Kaya gazı, geleneksel enerji kaynaklarından farklı olan, yüksek yoğunlukta kil, kuvars ve kalsit gibi organik maddelerden oluşan tortul kayaların küçük gözeneklerinde bulunan ve yatay sondaj ile hidrolik kırma yöntemleri kullanılarak çıkarılan bir gazdır (Bilge, 2014). Geleneksel doğal gaz ile kaya gazı katmanının farklılıkları Şekil 2.5’de daha ayrıntılı gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Doğal gaz ve kaya gazı katmanı (Kavak, 2013)

Kaya gazı tedarik zinciri geleneksel gazların tedarik zincirine kıyasla ek işlemler içermektedir. Sondaj işlemi geleneksel işlemlerden çok daha fazla kuyu içerir, yatay ve dikey kuyu sondajları birlikte uygulanır ve bunun için çoklu kuyu açma donanımına ihtiyaç vardır. Tamamlama sürecinde, hidrolik kırma yoluyla ilave uyarılmayı da gerektirir. Çıkarılma esnasında sahadaki malzeme ve ekipman yönetimi konularında lojistik karmaşıklık diğer gazlara oranla çok daha yüksek düzeylerde (WEC, 2016).

Konvansiyonel olmayan gazların üretimi 2040 yılına kadar artarak 2013 yılında üretilen miktarın iki katına ulaşacağı tahmin edilmektedir. Dünya üzerinde kanıtlanmış elde edilebilir kaya gazı rezervleri Tablo 2.3’te gösterilmiştir (WEC, 2016).

Tablo 2.3 Kanıtlanmış olarak elde edilebilir kaya gazı rezervleri (WEC, 2016)

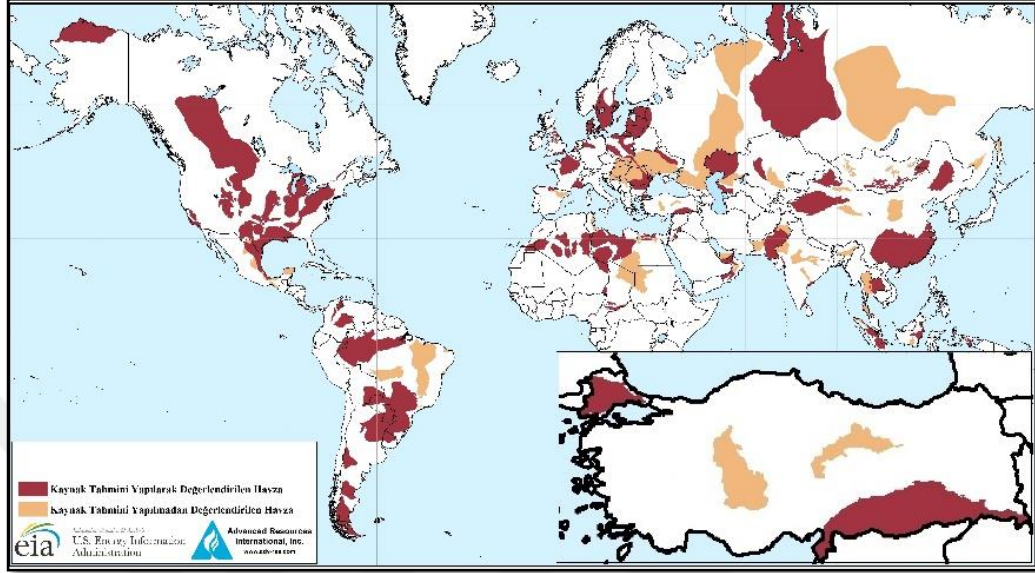
| No | Ülke                        | Trilyon m <sup>3</sup> |
|----|-----------------------------|------------------------|
| 1  | Çin                         | 31,6                   |
| 2  | Arjantin                    | 22,7                   |
| 3  | Cezayir                     | 20,0                   |
| 4  | Amerika Birleşik Devletleri | 17,6                   |
| 5  | Kanada                      | 16,2                   |
| 6  | Meksika                     | 15,4                   |
| 7  | Avusturalya                 | 12,2                   |
| 8  | Güney Afrika                | 11,0                   |
| 9  | Rusya                       | 8,1                    |
| 10 | Brezilya                    | 6,9                    |
| 11 | Birleşik Arap Emirlikleri   | 5,8                    |
| 12 | Venezuela                   | 4,7                    |
|    | Dünya                       | 241,5                  |

Çin en fazla kaya gazı kaynaklarına sahip ülke olsa da ekonomik ve teknik anlamda daha fazla gelişmiş olan devletler Amerika Birleşik Devletleri ile Avustralya'dır. Ancak zamanla Çin'in de konvansiyonel olmayan yakıtlar konusuna ağırlık vereceği düşünülmektedir (WEC, 2016). Şekil 2.6'da şu ana kadar Dünya'daki taranmış kaya gazı oluşumlarını içeren havzaların haritası görülmektedir.

Türkiye'de ise dört adet havza bulunmaktadır. Şekil 2.6'da gösterilen Trakya ve Güneydoğu Anadolu Havzası muhtemel havzalar arasında görülmekte, Tuz Gölü ve Sivas havzaları ise kaynak taraması yapılmadan değerlendirilen havzalardır. Bu havzalarda bulunan kanıtlanmamış rezerv miktarı se 0,7 trilyon m<sup>3</sup> civarındadır (WEC, 2016).

Kaya gazının diğer fosil yakıtlara oranla daha az salıma neden olması gibi olumlu yanlarının yanı sıra, sondajının çevre sorunlarına ve depremlere neden olması gibi dezavantajları da vardır. Fransa, Bulgaristan ve Çek Cumhuriyeti bu nedenlerden dolayı kaya gazı çalışmalarını yasaklamıştır (Sofuoğlu, 2014).

Yapılan araştırmalar sonucunda günümüzde denizcilik alanında yakıt olarak kullanımının gerçekleştirildiği bir uygulamaya rastlanmamıştır.



şekil 2.6 Dünyadaki taranmış kaya gazı oluşumlarını içeren havzaların haritası (EIA, 2017)

#### 2.2.1.4 Kömür

Çevresel açıdan kötü bir algıya sahip olmasına rağmen, halen çoğu ülkede kömür enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir katkı sağlamaktadır. Kömür dünyada en yaygın fosil yakıt olmakla beraber dünyadaki ülkelerin 3/4' nde kömür rezervleri bulunmaktadır (Kadıoğlu ve Telli oğlu, 1996).

Avrupa ülkelerin ve Kuzey Amerika  lkeleri kömür tüketimini azaltmak amacıyla alternatif enerji kaynaklarına yönelmektedir. Diğer gelişmekte olan ülkelerdeki kömür kullanım artışı, Avrupa  lkelerinde ve Kuzey Amerika  lkelerindeki kömür kullanımı azalmasından daha fazladır. Bu da var olan kömür kullanımını küresel boyutta artırmaktadır. Bunlara ek olarak Çin tek başına dünyadaki diğer ülkelerin toplam kullandıkları miktar kadar kömür kullanmaktadır. Yapılan bu tüketim göz önünde bulundurulduğunda halen kömür kullanımında önemli bir yaygınlık bulunmaktadır (WEC, 2013).

1993 – 2011 yılları arasında kömür rezervlerinde % 14 oranında bir azalma gözükmemektedir. Buna karşın kömür üretiminde aynı dönemde % 68 oranında artış yaşanmıştır. 2010 yılında yapılan bir araştırmaya göre kömür rezervlerinde % 1 oranında ve kömür üretiminde % 16 oranında artış görülmüştür (WEC, 2013).

Kömürün gelecekte tercih edilen bir yakıt olması için temiz yanan bir kömür kullanım teknolojisi geliştirilmesi gerekliliği belirtilmektedir. Bu sistemin kullanılması için var olan risk faktörlerinin düşürülmesi ve salımların azaltılması gerekmektedir (Güler ve diğer., 2015).

Kömürün, oldukça yaygın, güvenli ve düşük maliyete sahip olmasından dolayı enerjiye erişme konusunda oldukça önemli bir role sahiptir. Şu anda dünyada var olan yaklaşık 1,2 milyar insan modern enerji hizmetlerinden yoksun bir şekilde büyümektedir (Güler ve diğer., 2015).

Enerjiye erişebilmek modern yaşam için temel önkoşuldur ve dünya genelinde yoksulluğun ortadan kaldırılması için bir anahtardır. Kömür yatakları gelişmekte olan ülkelerde halen var olmakla beraber var olan büyümelerinde enerji ihtiyacını karşılamasını sağlayan bir yakıttır. Genel olarak incelendiğinde kömür ihtiyaç duyulan bölgelerde enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan yakıtlarda önemli bir yere sahiptir (WEC, 2013).

Kömürün lokomotiflerde kullanıldığı gibi gemilerde de yakıt olarak kullanımı için Stirling makineler ile akışkan yataklı kömür odalarının entegre olarak tasarlandığı bir sistemden bahsedilmiştir. Bu sistemin bütün ağır devirli yüksek güç üreten makinelerin yerine kullanılabileceği vurgulanmıştır (Walker, Kentfield, Johnson, Fauvel ve Srinivasan, 1983). Yüksek devirli dizel makinelerde kömürün yakıt olarak kullanılmasının araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmada 1992 yılındaki fiyatlar baz alınarak ekonomik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Kömürün yakıt olarak kullanıldığı yüksek devirli makinelerde yıllık 100.000 Amerikan Doları kar sağlanabileceği ileri sürülmüştür (Kakwani, Wilson ve Winsor, 1991).

### 2.2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Fosil kökenli yakıtların rezervlerindeki azalma ve çevre bilincindeki artış sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar bütün dünyada önemli hale gelmiş ve öncelikli alanlar içerisine yerleştirilmiştir. Bu bölümde yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle gemilerde kullanılan ve kullanılma potansiyeli yüksek olanlar irdelenecektir. Bunlar değinileceği sıra ile biyodizel, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve hidrojen enerjisidir.

#### 2.2.2.1 Biyodizel

Biyodizel, hayvansal veya bitkisel yağlar gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen alternatif bir dizel yakıttır (Alptekin ve Çanakçı, 2006). Bu yağlara evsel atık yağları da dâhil edilebilir. Bu yağların bir katalizör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile reaksiyonu sonucu oluşan yağ asitleri alkil esteri kimyasal yapılı bir üründür. Biyodizel ile dizelin yakıt özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2.4’de verilmiştir (Ölmez, 2016).

Tablo 2.4 Biyodizel ve dizelin yakıt özelliklerinin karşılaştırılması (Ölmez, 2016)

| Yakıt Özellikleri            | Birim              | Sınır Değeri<br>Min. – Maks. | Biyodizel           | Dizel                           |
|------------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Kapalı formülü               |                    |                              | $C_{19}H_{35,2}O_2$ | $C_{12,226}H_{23,29}S_{0,0575}$ |
| Molekül ağırlığı             | g/mol              |                              | 296                 | 120-320                         |
| Alt Isıl değeri              | MJ/kg              |                              | 37,1                | 42,7                            |
| Kütlesel Hacimsel            | MJ/L               |                              | 32,6                | 35,5                            |
| Özgül ağırlığı, 15°C         | kg/L               | 0,875 – 0,90                 | 0,87 – 0,88         | 0,82 – 0,86                     |
| Kinematik viskozitesi (40°C) | mm <sup>2</sup> /s | 2 – 4,5                      | 4,3                 | 2,5 – 3,5                       |
| Alevlenme noktası            | °C                 | 55 - ...                     | >100                | >55                             |
| Kükürt içeriği               | % Kütlesel         | ... - 0,55                   | <0,01               | <0,05                           |
| Tutuşma katsayısı            | Setan Sayısı       | 49 - ...                     | >55                 | 49 – 55                         |
| Kül miktarı                  | % Kütlesel         | ... - 0,01                   | <0,01               | <0,01                           |
| Su miktarı                   | mg/kg              | ... - 200                    | <300                | <200                            |

Biyodizel yakıtın alevlenme noktasının dizel yakıtı göre daha yüksek olması nakliyesinin ve depolanmasının daha güvenli bir yakıt olmasını sağlamaktadır. Ayrıca dizel ile karıştırıldığında yanma sonucu ortaya çıkan sera gazlarının salım oranları düşüktür. Biyodizelin setan sayısının dizel setan sayısına göre daha yüksek olması ise

motorun daha az vuruntu ile çalışmasını sağlar. Biyodizelin saf olarak ya da dizel yakıtlarla karıştırılarak kullanılması için yakıt istasyonlarında ve motorlarda ya ufak tefek modifikasyonlar ya da hiçbir işlem gerekmemektedir (Alptekin ve Çanakçı, 2006). Biyodizelin motor yakıtı olarak kullanılmasının avantaj ve dezavantajları Tablo 2.5’de gösterilmiştir.

Tablo 2.5 Biyodizelin motor yakıtı olarak avantaj ve dezavantajları (WEC, 2010)

| KATEGORİ            | FAYDALAR                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                            | SAKINCALAR                                                                                                                                     |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | Avantaj                                                                                                                                                                            | Sebep                                                                                                                                                      | Dezavantaj                                                                                                                                     |
| Motor performansı   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daha iyi yanma verimliliği</li> </ul>                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Yakıt içerisindeki fazla oksijen</li> </ul>                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daha düşük güç</li> <li>• Kötü püskürtme</li> </ul>                                                   |
| Salımlar            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daha düşük toplam Hidrokarbon ve CO</li> <li>• Dizel yakıtı kıyasla daha düşük sülfür içeriği</li> <li>• Doğada bozulabilirlik</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fazla oksijene bağlı daha iyi yanma</li> <li>• Daha düşük sülfür</li> <li>• Organik maddelerden türeme</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Artan NO<sub>x</sub></li> </ul>                                                                       |
| Motor dayanıklılığı | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Büyük bir modifikasyon yapmadan dizel motorlarda kullanılır</li> <li>• Metal parçalarda daha düşük aşınma</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dizel yakıtı yakın kendi kendine tutuşma aralığı</li> <li>• Yüksek yağlama</li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bozulan sızdırmazlık elemanları</li> <li>• Soğuk havada zayıf çalışma</li> <li>• Püskürtme</li> </ul> |
| Depolama            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Yangın ihmali daha düşük</li> </ul>                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek parlama noktası</li> </ul>                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Yakıtın bozulabilirliği</li> </ul>                                                                    |

Nakliyesinin kolay ve güvenli olması, dünyanın birçok noktasında tedarik imkânının olması, yanması sonucu çevreye yayılan sera gazlarının dizel yakıtlara oranla oldukça düşük olması, hâlihazırda kullanılmakta olan ana makine ve yardımcı makineler ile kullanılması için ya çok küçük yahut hiçbir değişiklik gerektirmemesi, dizel yakıt ile karıştırılarak da kullanılabilir olması, sürdürülebilir bir yakıt kaynağı olması gibi avantajları sayesinde biyodizelin denizcilik alanında kullanımının gün geçtikçe yaygınlaşacağı öngörülmüştür (Nuran, 2015).

### 2.2.2.2 Güneş Enerjisi

Güneş üzerinde gerçekleşen asıl reaksiyon hidrojenin helyuma çevrildiği bir füzyon reaksiyonudur. Bu reaksiyonlar sırasında yaydığı enerji miktarı  $3,8 \times 10^{20}$  MW civarındadır. Güneş'in yüzey alanı ile oranlandığında  $m^2$ 'ye 63 MW'lık bir enerji değeri düşmektedir. Dünya'ya ulaşan kısmı ise  $1,7 \times 10^{14}$  kW civarındadır. Bu ışınımın yarım saatlik enerjisi dünyanın bir yıllık enerji gereksinimi karşılayacak düzeydedir (Anderson, 1977).

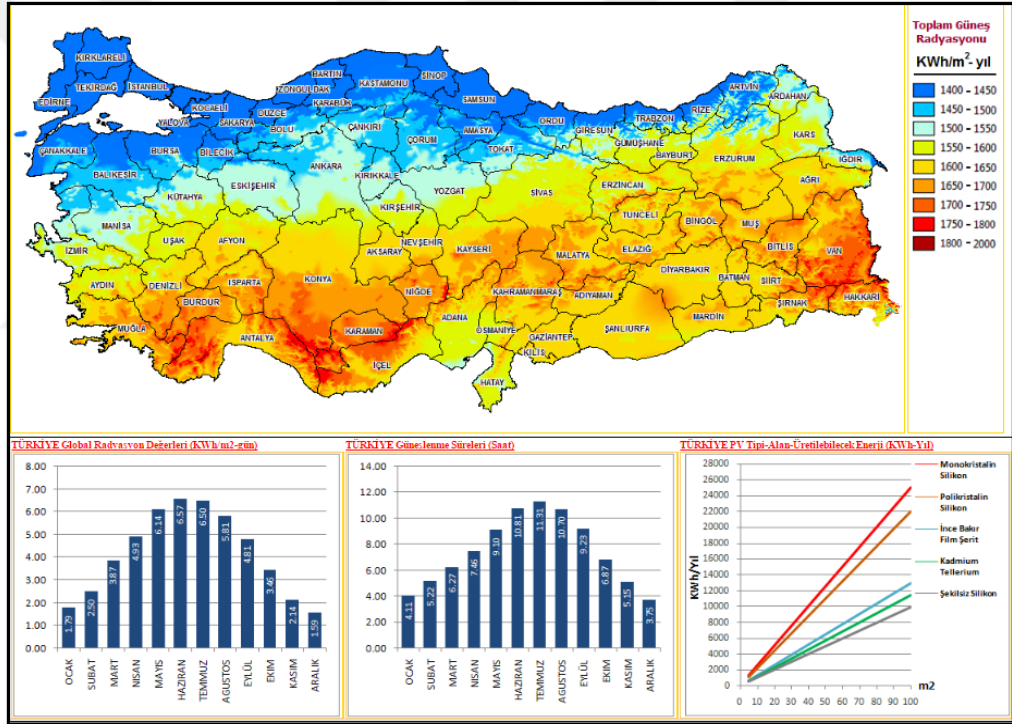
Dünya üzerindeki enerjinin temelini güneşten aldığını görmekteyiz. Petrol, doğal gaz ve kömür temelde fotosentez reaksiyonu ile oluşmuş enerji kaynaklarıdır. Bu enerji türüne bir de yüksek sıcaklık ve basınç gibi faktörler eklenmiştir. Rüzgâr ve dalga enerjilerinin de dünyanın farklı kısımlarındaki sıcaklıkların bir birlerine oranla daha yüksek ve düşük olmasından kaynaklı olarak ortaya çıktığı düşünülürse bu enerjilerinde temelini güneşten aldığı iddia edilmektedir (Anderson, 1977).

Güneş enerjisinden elde edilen enerji en yaygın olan iki ana grup altında sınıflandırılabilir. Bunlar termal sistemler ve fotovoltaik (FV) sistemlerdir. Termal sistemlerde gelen güneş enerjisi ısı yolu ile su gibi bir akışkana aktarılarak sıcak su ihtiyacının karşılanması sağlanırken, fotovoltaik sistemlerde hücre üzerine düşen güneş ışınları, hücrelerdeki yarı iletken malzemelerdeki elektronlara enerjisini aktararak elektronların hareket etmesini sağlar ve bu şekilde elektrik akımı oluşturur (Konur, 2016; ).

Türkiye'nin güneşlenme potansiyeli ile ilgili ayrıntılı çalışma Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyel atlası, Türkiye'nin küresel radyasyon değerleri, güneşlenme süreleri ve FV tip panellerden üretilebilecek enerji miktarları ortaya konmuş ve Şekil 2.7'de bunlar gösterilmiştir (EİE, 2017).

Güneş panelleri günlük yaşamda kullanıldığı gibi denizcilik alanında da kullanım alanı bulmuştur. Özellikle küçük boyutlu teknelerde ve yatlarda yardımcı güç ünitesi

olarak bataryaların şarj edildiği uygulamalar bulunmaktadır (Pagliaro, Konstandopoulos, Ciriminna ve Palmisano, 2010; Wirschaft, ve diğer., 2008; Mahmud, Morsalin, ve Khan 2014). Ancak bu panellerin çalışması sırasında verimliliğine etki eden sıcaklık, reflektör kullanımı, güneş takip sistemleri, gölge etkisi ve albedo etkisi gibi değişkenler vardır. Güneş panellerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle denizcilik alanında yat ve yolcu gemileri gibi daha lüks sınıfta yer alan gemilerde kullanımı daha erken başlamıştır. Ancak gelecekte ilk yatırım maliyetlerinin düşmesi, gelişen teknoloji, gittikçe katılacak çevre düzenlemeleri ile ilgili yönetmelikler ve devlet teşvikleri ile denizcilik sektöründe kullanımının daha da yaygınlaşacağı düşünülmektedir (Konur, 2016).



Şekil 2.7 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (EİE, 2017)

### 2.2.2.3 Rüzgâr Enerjisi

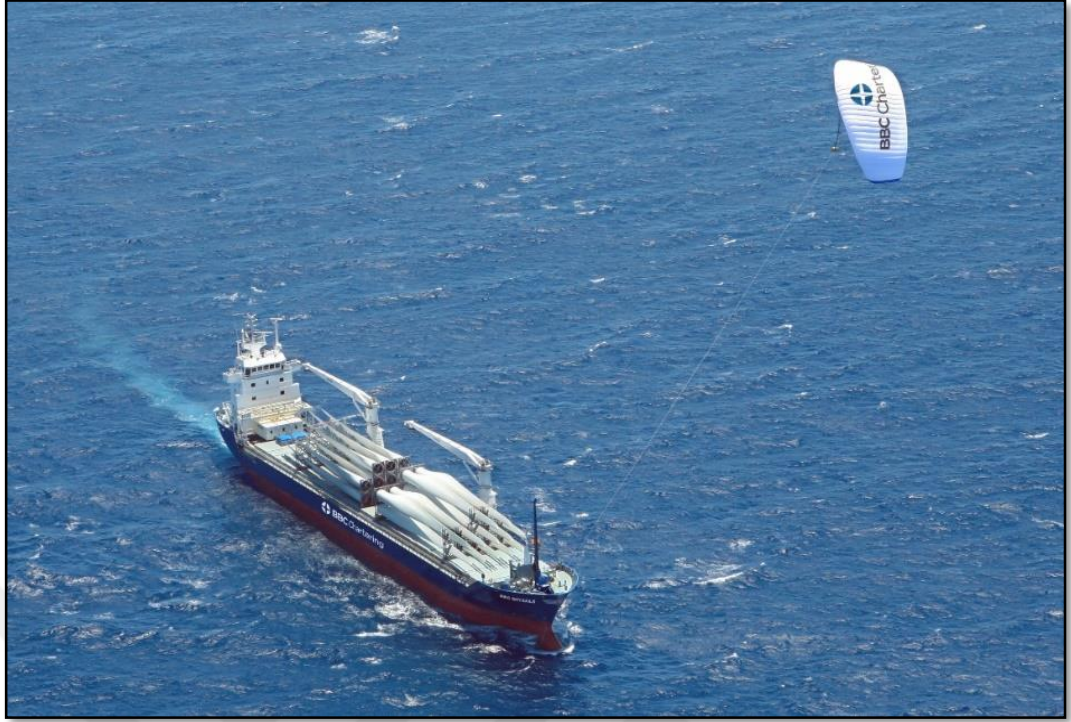
Farklı bölgelerin sıcaklıklarının farklı olması ilgili bölgenin hava basıncını değiştirmektedir. Bu bölgeler arasında basıncı yüksek olan bölgeden düşük olan bölgeye doğru bir hava akımı oluşur. Yatay ya da yataya yakın oluşan bu hava akımına ise rüzgâr denilmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2017). Geçmiş dönemlerde

gemilerin sevk enerjisini karşılayabilecek motorlar ve donanımlar keşfedilmediğinden bunun için yelkenler vasıtasıyla rüzgâr enerjisinden faydalanılmaktaydı (Casson, 2002).

Rüzgârın doğası gereği kuvvet ve akış yönünün ayarlanamaması nedeniyle bir dönem için önemini kaybetmiştir ancak gelişen teknolojiye rağmen “yakıt” ve “salım” kavramlarının ön plana çıkması ile yeniden yeşil bir enerji olarak rüzgâr enerjisinin önem kazanmaya başladığı belirtilmiştir. Rüzgâr enerjisinin en önemli avantajları maliyetinin düşük olması, sürdürülebilir, yenilenebilir bir enerji kaynağı olması ve çevreci bir yapıda olması vurgulanmaktadır (Bayraç, 2011).

Gemilerde rüzgâr enerjisi kullanılarak seyir sırasında yakıt tüketimini düşürecek değişik alternatifler düşünülmüştür. Bunları ana başlıklar olarak incelersek ilki “Windkite” olarak adlandırılan gökyüzünde uçan bir uçurtma sayesinde çekme gücü elde edilen bir sistem bulunmaktadır. Ticari bir gemiye uygulanmış örneği Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Bu konuda çalışmalar 1980’li yıllarda R. Duckworth tarafından başlatılmıştır ve günümüzde hala devam etmektedir (Lele ve Rao, 2016).

İkinci olarak ise 1920’li yıllarda geliştirilmeye başlanan bir sistem olan “Flettner Rotoru” ticari gemilerde seyir sırasında enerji tasarrufu sağlayabilen bir sistem olarak karşımıza çıkıyor ve bir örneği Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Bunun dışında son olarak rüzgâr türbinleri de ticari gemilerde enerji tasarrufu sağlayan tahrik sistemleri arasında değerlendirilmeye ve üzerine çalışmalar yapılmaya başlanan enerji türlerindendir (Lele ve Rao, 2016).



Şekil 2.8 BBC SkySails gemisinin “Windkite” ile seyir görüntüsü (Skysails, 2017)



Şekil 2.9 E-SHIP 1 gemisi ve Flettner rotorları (Prestien, 2010)

#### 2.2.2.4 Hidrojen Enerjisi

Hidrojen evrende en fazla bulunan elementtir. Hidrojen dünyada su, metan, taze ya da fosilleşmiş organik bileşiklerin yapısında yer almaktadır. Doğada bulunduğu moleküler formu  $H_2$  şeklindedir (Sørensen, 2011). Ayrıntılı özellikleri Tablo 2.6’da yer almaktadır.

Hidrojen her ne kadar evrende en çok bulunan element olsa da doğada saf halde neredeyse yok denecek kadar az bulunmaktadır. Bu nedenle ihtiyaç duyulan saf hidrojenin elde edilebilmesi için çeşitli kaynaklardan değişik yöntemler ile ayrıştırılması gerekmektedir. Hidrojen üretiminde kullanılan bu kaynaklar ve teknolojiler şu şekilde sayılabilir; doğal gaz, kömür, benzin, metanol veya biyokütleden ısı yardımıyla; bakteri ve algler aracılığıyla fotosentez ile ya da elektrik veya güneş ışığı kullanılarak suyun parçalanması ile hidrojen üretilebilmektedir (Beşergil, 2014).

Tablo 2.6 Hidrojenin özellikleri (Sørensen, 2011)

|                                                              |       |                                           |
|--------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|
| Atom numarası, H                                             | 1     |                                           |
| 1s temel durumdaki elektron bağlanma enerjisi                | 2,18  | aJ ( $10^{-18}$ )                         |
| Molar ağırlığı, $H_2$                                        | 2,016 | $10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$             |
| Çekirdek parçacıkları arasındaki ortalama uzaklık            | 0,074 | Nm                                        |
| 298 K’de suda seyreltilmiş $H^+$ iyonunun iyonik iletkenliği | 0,035 | $\text{m}^2 \text{ mol}^{-1} \Omega^{-1}$ |
| 101,33 kPa ve 298 K $H_2$ ’nin yoğunluğu                     | 0,084 | $\text{kg m}^{-3}$                        |
| 101,33 kPa’da erime noktası                                  | 13,8  | K                                         |
| 101,33 kPa’da kaynama noktası                                | 20,3  | K                                         |
| 298 K ve sabit basınçta ısı sığası                           | 14,3  | $\text{kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$        |
| 101,33 kPa ve 298 K de sudaki çözünürlüğü                    | 0,019 | $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$               |

Günümüzde üretilen hidrojenin büyük bir kısmı doğal gazdan elde edilmektedir. Bunun yanı sıra rafineri ürünleri ve kömürden de hidrojen elde edilebilmektedir. Gelişmiş ve geliştirilmekte olan yöntemler de değerlendirildiğinde üç ana kaynaktan hidrojen üretim yöntemlerinin olduğu görülmüştür. Bunlar;

- Fosil kaynaklı hammaddelerden: Kömürün gazlaştırılması, buhar reforming, ototermal reforming ve termal disosiyasyon.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarından: Suyun elektrolizi, fotoelektroliz, suyun termal parçalanması ve biyokütle gazlaşması.
- Atık gaz akımlarından hidrojen kazanma: Rafineriler ve kimyasal madde fabrikaları gibi işletmelerde hidrojen zengin atık gazlardaki hidrojeni ayırıştırma.

şeklinde verilmiştir (Beşergil, 2014).

Hidrojenin kullanımın çok olduğu yerlerde depolama da önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Hidrojenin depolanması temelde dört şekilde gerçekleştirilmektedir.

Bunlardan ilki hidrojenin metal hidrür bileşiklerini elde etmek ve bu şekilde depolanarak ihtiyaç halinde kullanılmasıdır. Bu yöntemin diğer yöntemlere oranla daha güvenilir olması ulaştırma alanında kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Fakat bu yöntem çoğunlukla küçük miktarlarda hidrojenin depolanmasına elverişli bir yöntem olduğundan kullanımı sınırlı kalmaktadır (Beşergil, 2014).

İkinci yöntem ise hidrojenin sıvı olarak üretilip depolanmasıdır. Hidrojen yaklaşık 2 bar ve 20 °K sıcaklığında sıvılaşır. Kaynama olayını ve ısı transferini en az düzeye indirmek için yalıtımı yüksek kriyojenik tanklarda depolanmaktadır. Bu şekilde depolama nispeten hafif bir yöntem olsa da tank içerisinde oluşan buhar fazındaki hidrojen iç basıncı arttırmaktadır. Bunun atmosfere verilmesi gerekmektedir (Gayberi, 2015).

Üçüncü depolama yöntemi ise sıkıştırılarak depolamadır. Günümüzdeki malzeme teknolojisi sayesinde yaklaşık 800 bar basınca kadar dayanıklı kaplar üretilmiştir. Bu kaplar çelik, kompozitle kaplanmış alüminyum veya kompozitle kaplanmış plastik malzemelerden üretilmektedir. Çelik malzeme diğerlerine göre daha ekonomik olsa da ağırlık açısından oldukça fazla olduğundan hacim ve ağırlık problemi olan

uygulamalarda tercih edilmemektedir. Kompozit malzemelerden yapılan hafif tankların 350 bar basınca kadar güvenle kullanıldığı uygulamalar bulunmaktadır. Günümüzde 700 bar basınca dayanıklı kompozit malzemeden üretilmiş tankların üretim çalışmaları devam etmektedir (Beşergil, 2014).

Dördüncü depolama yöntemi olarak karbon absorpsiyonu ile depolama yöntemi yer almaktadır. Nanotüpler, nanofiberler ve fulerenler gibi nano yapıları farklı karbonların ve bazı karbon siyahlarının hidrojen depolayan absorblayıcılar olarak kullanılmaktadır. Bunların içerisinde karbon siyahı daha ucuza mal edildiği ve daha fazla üretilbildiği için diğerlerine oranla daha avantajlıdır (Beşergil, 2014).

Hidrojen bu nanotüplerde fiziksel ve kimyasal depolama olarak iki farklı şekilde depolanabilmektedir ve ağırlıkça % 4 ila % 14 arasında hidrojen depolanabildiği görülmüştür. Nanotüplerin depolama kapasiteleri tüpün cinsine, ölçülerine, tüplerin kapalı veya açık olmasına ve tüp yüzeylerinin aktifliğine göre değişmektedir (Beşergil, 2014).

Hidrojen üretiminin halen diğer yakıtlara oranla pahalı olması, yakıt olarak hidrojen kullanan sistemlerin diğer yakıt türlerini kullanan sistemlere oranla çok daha kısa bir süredir geliştiriliyor olması, hidrojeni yakıt olarak kullanan sistemlerin ürettiği birim hacim başına gücün halen diğer sistemlere oranla oldukça düşük seviyelerde olması gibi nedenler dolayısıyla denizcilik alanında hidrojenin yakıt olarak kullanılması ve ticarileşmesinin zaman alacağı düşünülmektedir. Ancak IMO, AB gibi kuruluşların küresel ısınmanın önüne geçmek ve çevresel duyarlılıktan kaynaklı getirdikleri sıkı çevresel kurallar sayesinde diğer yakıtlara oranla genellikle çok daha az salıma sebep olan hidrojenin denizcilik alanında gelecekte önemli bir yerinin olacağı düşünülmektedir (Barbir, 2012).

Yakıt pillerinin gelişimiyle birlikte hidrojenin enerji kaynağı olarak gemilerde kullanımının yaygınlaşacağı öngörülmüştür (Sharaf ve Orhan, 2014). Bir sonraki bölümde uygulamalar hakkında gerekli bilgiler detaylı olarak verilmiştir.

## BÖLÜM ÜÇ

### YAKIT PİLİ TEKNOLOJİLERİ VE DENİZCİLİKTE UYGULAMA ALANLARI

#### 3.1 Yakıt Pili Teknolojileri

Bu bölümde yakıt pillerinin tarihsel gelişimi, çeşitleri ve çalışma prensipleri açıklandıktan sonra denizcilikte alanında yapılmış olan uygulamalar ve çalışmalar incelenecektir.

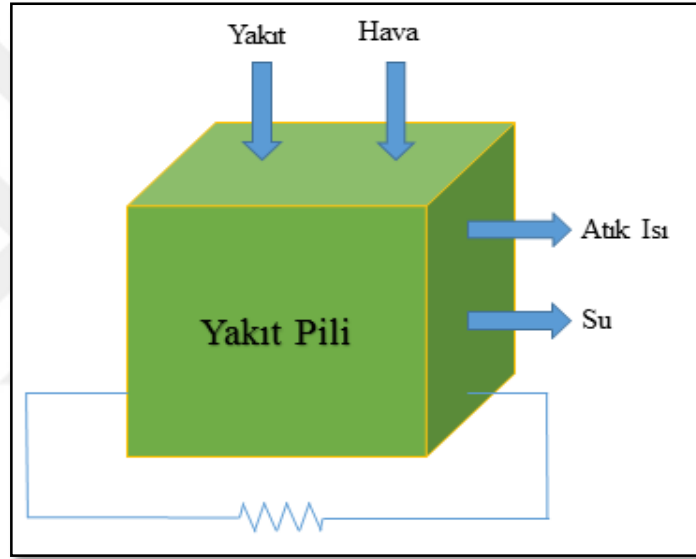
##### 3.1.1 Tarihsel Gelişimi

Yakıt pili, bir dizi elektrokimyasal tepkime sonucunda uygun bir yakıttaki kimyasal enerjinin bir kısmını oksitleyici aracılığıyla doğrudan (doğru akım) elektrik enerjisine ve ısıya dönüştüren sistemdir. Elektroliz reaksiyonunun tersi olarak da tanımlanabilmektedir (Grove, 1839).

Geleneksel olarak ısı makinesi ile elektrik enerjisi üretim yöntemlerinde birçok ara basamak bulunmaktadır. Bunları kısaca; yakıttaki kimyasal enerjiyi ısı enerjisini dönüştürmek, bu ısı enerjisi ile suyu ısıtarak buhar elde etmek, elde edilen buhardaki termal enerji ile bir türbinin kanatlarını döndürerek bu enerjiyi mekanik enerjiye çevirmek ve son olarak da bu mekanik enerji kullanılarak bir jeneratörün çalıştırılması ve elektrik enerjisinin üretilmesi olarak sıralayabiliriz. Yakıt pilleri bu bütün ara basamakları atlayarak daha verimli bir şekilde elektrik üretilmesine olanak sağlayabilmektedir. Herhangi bir hareketli parçasının olmaması da bakım tutum maliyetlerini azaltmaktadır. Yukarıda sayılan nedenler ve diğer alternatiflerine göre daha çevre dostu olması yakıt pili teknolojilerini üzerinde araştırma yapılmasını çekici bir hale getirmektedir (Barbir, 2012).

1838 yılında Christian Friedrich Schönbein yakıt pilinin teorik temellerini ortaya koydu (Andújar ve Segura, 2009). Aynı sıralarda Christian F. Schönbein'den bağımsız olarak çalışan William Robert Grove ise günümüzdeki fosforik asit yakıt piline

(FAYP) benzer malzemeleri kullanarak “*gas voltaic battery*” adını verdiği ilk yakıt pilinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapmış olduğu bir dizi deney sonucunda seyreltik sülfürik asit çözeltisi kullanılarak platin bir katalist tabaka üzerinde hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmış ve serbest kalan elektronları da dış bir devreden geçirerek elektrik akımı üretildiğini açıklamıştır (Grove, 1839). Ayrıca devam ettirdiği çalışmalarında sızdırmazlık sağladığı kaplarda bulunan elektrotlar arasında sürekli bir akımın bulunduğunu ve bu akım devam ettiği sürece de kaptaki su seviyesinin arttığını gözlemlemiştir (Grove, 1843). Hidrojenle çalışan bir yakıt pilinin genel çalışma prensibi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Yakıt pili genel çalışma prensibi

Yakıt pili terimi ilk defa 1889 yılında Ludwig Mond ve Charles Langer tarafından kullanılmıştır. 1932 yılında ise Francis Bacon, Mond ve Langer’in cihazını geliştirerek ilk Alkali Yakıt Pilini (AYP) üretmiştir. Ancak 40 hücre içeren ve % 60 verimlilikte 5 kW’lık güç üreten ilk yakıt pili sistemin Bacon tarafından üretilmesi 1959 yılına kadar sürmüştür (Andújar ve Segura, 2009). Bacon ile yaklaşık aynı zamanlarda Harry K. Ihrig 15 kW bir yakıt pilini tarımsal amaçlı Allis-Chalmers marka bir traktöre entegre etmeyi başarmıştır (Smithsonian, 2017).

NASA, endüstri şirketlerinden birkaçı ile ortak olarak yakıt pili jeneratörleri içeren insanlı uzay araçları projelerini hayata geçirmeye başlamıştır. Bu projelerden bir

tanisinin sonucu olarak General Electric firmasından Thomas Grubb Polimer Elektrolit Yakıt Pili'ni (PEMYP) üretmiştir. Aynı firmadan Leonard Niedrach Grubb yakıt pilindeki membranları platinyum katalistler ile değiştirerek yakıt pilini bir üst seviyeye taşımıştır. Niedrach'ın yakıt pili NASA ile iş birliği yapılarak 1960'ların sonundaki Gemini Uzay Programında kullanılmıştır (Andújar ve Segura, 2009). Şu an ki UTC Power firması ve NASA'nın iş birliği ile uzay mekiklerinde kullanılmak üzere hem güç sağlayan hem de astronotlara içme suyu sağlayan Alkali Yakıt Pilleri (AYP) geliştirilmiştir (Andújar ve Segura, 2009).

1980'lerde yakıt pilleri üzerine yapılan araştırma geliştirme çalışmaları özellikle ulaşım sektöründe yoğunlaşmıştır. Kanada firması olan Ballard yakıt pillerinin araştırılması ve geliştirilmesi konusunda çalışmalara başlamıştır. İlerleyen yıllarda Ballard firması yakıt pili yığınlarının üretilmesi, sabit güç üretim sistemlerinde ve ulaşım uygulamalarında sektörün öncü kuruluşlarından biri haline gelmiştir (Grimes, 2000).

1990'lara gelindiğinde hükümetlerin verdiği destekler ile birim maliyeti daha düşük olan Katı Oksit Yakıt Pilleri (KOYP) ve Polimer Elektrolit Yakıt Pillerinin (PEMYP) geliştirilmesi alanlarına odaklanılmıştır. Başta özel konutlarda uygulanmak üzere mikro bileşik ısı ve güç üretim sistemleri üzerine Almanya, Japonya, ABD ve Birleşik Krallıkta önemli çalışmalar yapılmıştır. 1993 yılına gelindiğinde Ballard firması ilk defa yakıt pili ile çalışan otobüs üretmiştir. Perry Enerji Sistemleri firması ise aynı yıl yakıt pili ile çalışan araba üretmeyi başarmıştır (Nadal ve Barbir, 1996).

2000'li yıllar fosil yakıtlara olan bağlılığın azaltılması, artan çevre kirliliği, enerji güvenliği gibi faktörler yakıt pillerine olan ilginin daha da artmasını sağlamıştır (Barbir, 2012). Özellikle Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Güney Kore ve Kanada'nın yakıt pilinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda büyük destekler verdiği görülmüştür. Yakıt pili malzemelerinin daha dayanıklı ve emniyetli hale getirilmesi, diğer alternatiflere oranla daha basit bir şekilde yakıt ikmalinin sağlanması ve daha verimli çalışması özellikle Avrupa, Çin ve Avustralya da yürütülen "HyFleet/CUTE" projesi ile onlarca otobüsün yakıt pili kullanarak sokaklarda

dolaşmasını sağlamıştır. Bu alanda ilk olarak otobüslerin seçilmesinin nedeni olarak belirli bir güzergâhta ilerlemeleri ve kendi bekleme alanlarına geldiklerinde kolaylıkla yakıt depolarının hidrojen ile tekrar doldurulabilmesi gösterilmiştir (Ally ve Pryor, 2007).

Yakıt pillerinin ilk olarak ticarileşerek son kullanıcıya ulaşmaya başlaması 2007 yılında gerçekleşmiştir. Ticarileşmesinin bu kadar gecikmesinin nedenleri servis imkânının kısıtlı olması, son kullanıcıya yazılı bir garanti belgesi sunabilecek koşulların geç oluşması, marketteki yazılı olan kodların ve standartların henüz yeni oluşuyor olması olarak sayılmıştır. Özellikle PEMYP ve Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP) ile onlarca uygulama askeriyede, karavanlarda ve botlarda kısaca portatif güç gereken birçok yerde hayata geçirilmiştir (Penner ve diğer., 1995).

Yakıt pillerinin ev uygulamalarında yaygın olarak kullanılması ve ticarileşmesi konusunda en etkin beş ülkenin Almanya, Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, İngiltere ve Hollanda olduğu görülmüştür. Özellikle kombine ısı ve güç uygulamalarında Japonya ve Almanya'nın market liderliği konusunda yarıştığı görülmektedir (Ren ve Gao, 2010). Amerika'da ise daha ziyade yedek güç ünitesi olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Burada çok sık yaşanan kasırgaların etkisi sonucu iletişim ağı çökmekte ve acil durumlarda kullanılmak üzere güvenilir bir güç kaynağı gerekmektedir. Bunu sağlayabilecek en uygun sistemin yakıt pili olduğu; özellikle Meksika Körfezinde yaşanan Katrina Kasırgası felaketinde dizel jeneratörlerin yetersizliğinin görülmesi ile daha iyi anlaşılmıştır. Hatta hidrojen ve doğal gaz ile çalışan PEM yakıt pili Hindistan ve Doğu Afrika'da telefon direklerinin enerjilerinin sağlanmasında birincil yahut yedek güç kaynağı olarak kullanılmaktadır (Denhoff, 2017).

### **3.1.2 Yakıt Pili Çeşitleri**

Yakıt pilleri günümüzde sınıflandırılırken birçok farklı özelliği göz önüne alınarak farklı sınıflandırmalar yapılabilmektedir. Özellikle yapılan sınıflandırmalarda kullanılan yakıtın cinsi, yakıt pilinde kullanılan elektrolitin cinsi, çalışma sıcaklıkları,

sabit veya mobil uygulamalar da kullanılması göz önünde bulundurulmuştur. Tablo 3.1’de yakıt pillerinin sınıflandırılmasında en sık tercih edilen ayırım gösterilmiştir. Ayrıca günümüzde en fazla kullanılan yakıt pili çeşitleri şunlardır (Mench, 2008):

- Alkali Yakıt Pili (AYP)
- Polimer Elektrolit Yakıt Pili (PEMYP)
- Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)
- Erimiş Karbonatlı Yakıt Pili (EKYP)
- Katı-oksit Yakıt Pili (KOYP)

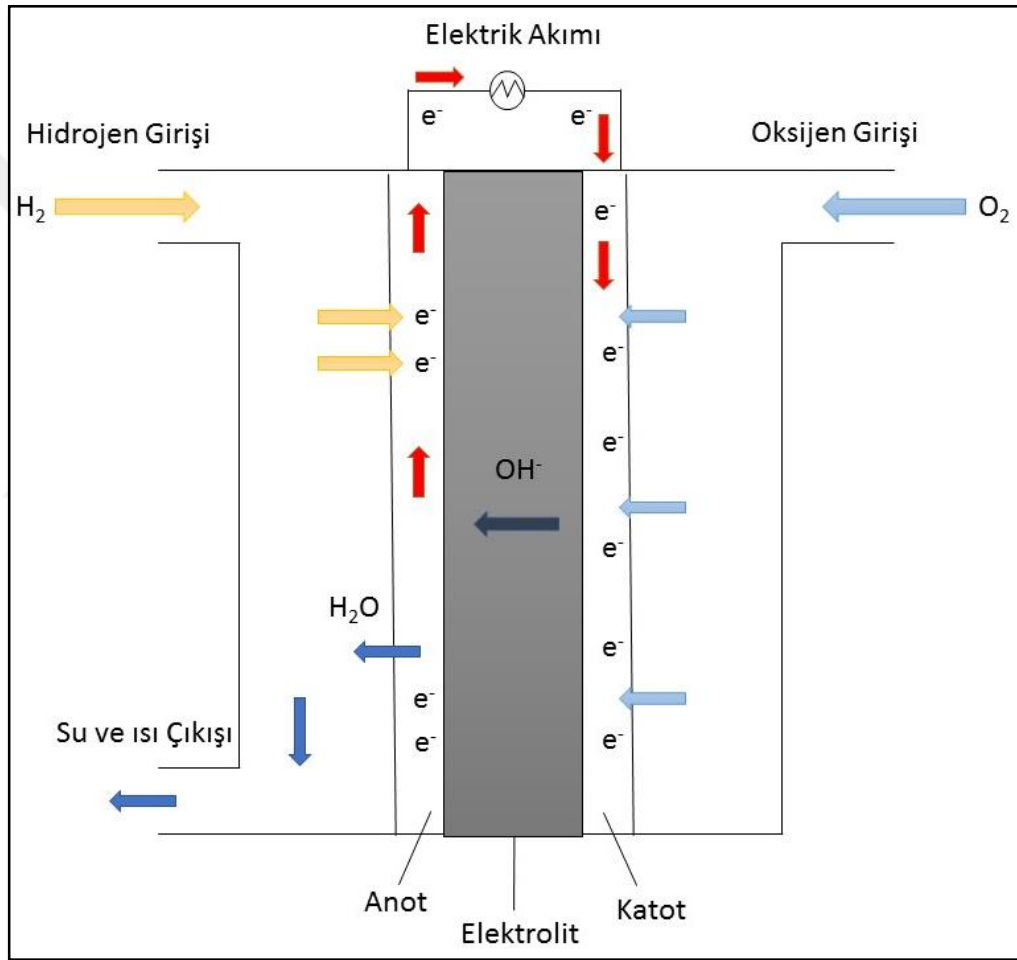
Tablo 3.1 Yakıt pili tipleri, kullanılan elektrolitler ve çalışma sıcaklıkları (Larminie ve Dicks, 2003)

| Yakıt Pili Tipi | Kullanılan Elektrolit       | Mobil İyon           | Çalışma Sıcaklığı |
|-----------------|-----------------------------|----------------------|-------------------|
| PEMYP           | Polimer membran             | $\text{OH}^-$        | 30 – 100° C       |
| DMYP            | Proton geçirgen membran     | $\text{H}^+$         | <100° C           |
| AYP             | Potasyum hidroksit          | $\text{H}^+$         | 50 – 200° C       |
| FAYP            | Fosforik asit               | $\text{H}^+$         | ~220° C           |
| EKYP            | Lityum/Potasyum karbonat    | $(\text{CO}_3)^{2-}$ | ~650° C           |
| KOYP            | Yttria dengelenmiş zirkonya | $\text{O}^{2-}$      | 500 °C – 1000 °C  |

### 3.1.2.1 Alkali Yakıt Pili (AYP)

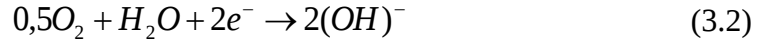
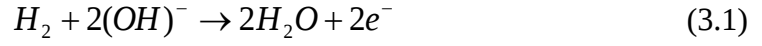
Geliştirilen ilk yakıt pilidir. En büyük gelişimi ise bilim adamı Francis T. Bacon tarafından sağlanmıştır. O güne kadar kullanılan katı elektrotlar yerine gözenekli gaz difüzyon elektrotlar kullanmaya başlanmış ve elektrolit olarak ise asit elektrolit yerine potasyum hidroksil kullanarak elektrotlara zararı olmayan elektrolit ile çalışan yakıt pilinin üretimi gerçekleşmiştir (Grimes, 2000). Günümüzde düşük sıcaklıklarda çalışan AYP’inde nikel ve gümüş gibi daha ucuz elektrolitler de kullanılabilir. Ayrıca elektrolit sızdırmazlığı sağlamak için elektrot gözeneklerine basınçlı gaz göndererek sistemin daha verimli çalışmasını sağlamıştır (Schulze ve Güllow, 2004; Wagner, Schulze ve Güllow, 2004). Elektrik üretiminin yanı sıra içilebilir nitelikte su üretimi de gerçekleştirdiği için NASA tarafından da üzerinde yoğun çalışmalar yapılan ve uzay araçlarında geniş kullanım alanı bulan bir yakıt pili olduğu görülmüştür (Grimes, 2000). Elektrolit olarak genellikle yoğunlaştırılmış potasyum hidroksil

(KOH) kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklığı da bu elektrolitin derişimi ile değişmektedir. Çalışma sıcaklığı ağırlıkça % 35 ile % 50 derişime sahip potasyum hidroksil elektrolitte 120 °C'den daha düşük; ağırlıkça % 85'den yüksek derişime sahip potasyum hidroksil elektrolitte ise 250 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda olmaktadır (Yıldırım, 2011). En verimli çalışma aralığı 75 °C ile 100 °C derecedir. Verimi bu sıcaklıklarda % 60'lara kadar ulaşabilmektedir (Alkaya, Behçet ve İlkılıç, 2008). Bir AYP'nin genel çalışma prensibi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Alkali yakıt pili çalışma prensibi (Department of Energy [DOE], 2017)

Alkali yakıt pillerinin elektrik enerjisi üretirken gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sırasıyla anot reaksiyonu, katot reaksiyonu ve toplam reaksiyon (Mench, 2008) olarak aşağıdaki gibidir:



Alkali yakıt pillerinin birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan önemli bir tanesi yakıt olarak kullanılan hidrojen gazının saflığının %99.9 seviyesinde olmasına ihtiyaç duyulmasıdır. Çünkü hidrojen içerisindeki en ufak safsızlık potasyum hidroksil elektrolitinin tepkimeye girmesine neden olmaktadır. Ayrıca sistemin düzgün çalışabilmesi için gerekli olan oksijen gazının saflığının da çok yüksek seviyelerde olması gerekmektedir. Bazik olan potasyum hidroksil asidik bir karaktere sahip karbondioksit ile reaksiyona girerek katı karbonat parçacıkları oluşturmaktadır. Bu parçacıklar da elektrolit ve elektrotlarda tıkanıklığa yol açarak sistemin düzgün çalışmasını engellemektedir (de-Troya, Álvarez, Fernández-Garrido ve Carral, 2015). Hidrojenin depolanması ve güvenliği problemlerinin yanı sıra reaksiyonların hızlandırılması için katalizör olarak kullanılan platin de oldukça pahalıdır. Platine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmak için birçok çalışma yapılmıştır ve bazılarında başarı sağlanmıştır. Alkali yakıt pillerinde kullanılmak üzere diğer yakıtlardan hidrojen elde edilmesi metotlarının çoğu karbondioksit gazı salımına neden olmaktadır. Bu yakıt pili teknolojisinde kullanılan hidrojen ve oksijen gazlarının saflık seviyesinin yüksekliği bu teknolojinin geliştirilmesini yavaşlattığı görülmüştür (Mench, 2008).

Alkali yakıt pillerinin bazı uygulamalarına bakacak olursak ilk önemli uygulaması Allis-Chalmers firması tarafından 1008 adet yakıt hücresinin bir yığın olarak birleştirilmesi ile 15 000 W güç üreten ve kendisine bağlı yaklaşık 1360 kg'lık bir ağırlığı çekebilen bir traktör olmuştur (Smithsonian, 2017) . Firma ilerleyen yıllarda yakıt pili teknolojileri ile çalışan golf arabası, forklift ve sualtı araçları da üretmiştir. Amerikan ordusu için yakıt pili ile çalışan portatif bir radar da üretmiştir. Bunun dışında Karl Kordesch yakıt pili ile çalışan bir motosiklet yapmayı başarmıştır (Spiegel, 2007). Buna rağmen alkali yakıt pilinin en uygun çalışma alanının uzay uygulamaları olduğu görülmüştür. Hem uzay araçları için elektrik üretimi sağlaması hem de astronotların içme suyu ihtiyacını da karşılaması sebebiyle başarılı bir uygulama alanı olarak görülmektedir (Andújar ve Segura, 2009).

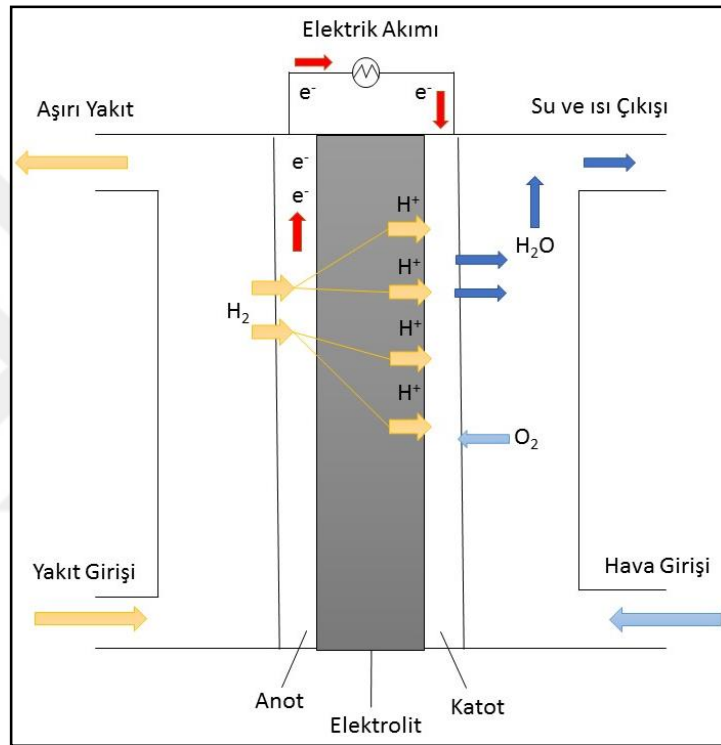
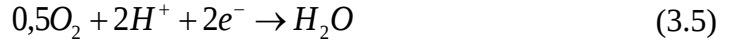
1998 yılına gelindiğinde Londra’da ZEVCO (Zero Emission Vehicle Company) firması tarafından alkali yakıt pili ile çalışan bir taksi prototipi üretilmiştir ve bu araçlarla “*England Police Agency*” doğrudan ilgilenmiştir. Bu araçlardaki yakıt pillerinde platin yerine maliyetleri azaltmak için kobalt katalizörler kullanmışlardır. Firma çalışmalarına havaalanlarında yakıt pili ile çalışan, çekici hizmeti sağlayan araçlar ve yük taşıyan kapalı tip kamyonetlerin üretimiyle devam etmiştir. Ayrıca bu firmaya bağlı bir başka firma yakıt pili ile çalışan botlar üretmiştir (McLean, Niet, Prince-Richard ve Djilali, 2002)

### 3.1.2.2 Polimer Elektrolit Yakıt Pili (PEMYP)

Polimer elektrolit yakıt pilleri ilk olarak 1950’li yıllarda General Elektrik Şirketi tarafından uzay araçlarında yardımcı güç ünitesi olarak kullanılmak üzere geliştirilmiştir (Alkaya ve diğer., 2008). Polimer elektrolit yakıt pili temel olarak iki adet gözenekli ve elektrik iletkenliği olan elektrotlar arasına sıkıştırılmış olan ve membran olarak adlandırılan bir zar içermektedir ve elektrolit görevi görmektedir. Günümüzde halen yoğun olarak DuPont firmasının bulduğu *Nafyon* adı verilen malzemeden üretilen membranlar kullanılmaktadır. Gözenekli yapıdaki bu zar protonları geçirme özelliğine sahipken aynı zamanda ağır gazları da geçirmeme yeteneğine sahiptir. Bu gözenekli elektrotlar ve polimer membran arasında üzerinde katalizörler bulunan bir tabaka daha bulunmaktadır. Katalizör olarak karbon ile desteklenmiş platin kullanılmakta ve elektrokimyasal tepkimelerde bu katalizörlerin yüzeyinde gerçekleşmektedir (Barbir, 2012).

PEMYP’nin çalışma prensibi Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Hücrenin anot tarafından giriş yapan  $H_2$  (yakıt) elektrottan geçerek membranın üzerinde bulunan platin katalizöre gelir ve burada iyonize olur. Protonlar membrandan geçerek katoda doğru yönelmekte, elektronlar ise bir dış devre üzerinden geçerek elektrik enerjisi üreterek katoda ulaşmaktadır. Katotta ise dışarıdan gelen hava ile birlikte hidrojenin protonları ve elektronlar birleşerek suyu oluşturmaktadır (Barbir, 2012).

Polimer elektrolit membranlı yakıt pillerinin elektrik enerjisi üretirken gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sırasıyla anot reaksiyonu, katot reaksiyonu ve toplam reaksiyon olarak aşağıdaki gibidir (Mench, 2008):



Şekil 3.3 PEMYP'nin çalışma prensibi (DOE, 2017)

PEMYP'nin genel çalışma sıcaklığı 20 °C ile 100 °C arasında değişmektedir. Diğer yakıt pili teknolojilerine oranla daha az hacim ve ağırlığa sahip olması, düşük sıcaklıklarda çalışması ve korozyon probleminin olmaması, güç yoğunluğunun fazla olması ve ilk hareketin hızlı ve kolay bir şekilde araca aktarılması gibi özellikleri en önemli avantajları olarak belirtilmiştir. Bu özellikleri sayesinde günümüzde üzerinde en fazla çalışma yapılan yakıt pili tipi olmuştur (Mench, 2008).

PEM yakıt pilinin dezavantajları; pahalı katalizöre ihtiyaç duyması, karbon monoksit ve amonyak zehirlenmesine duyarlı olması, hücre içerisinde biriken suyun yönetilmesi problemi, yakıt olarak saf hidrojene ihtiyaç duyması, malzemelerinin dayanıklılığının rakiplerine oranla daha az olması ve düşük kalitede atık ısı çıkıyor olması gösterilebilir (Aykut, 2005; Barbir, 2012; Mench, 2008).

Uygulama alanı olarak çok çeşitlilik göstermektedir. Ancak özellikle ulaştırma alanında yaygın bir kullanımının olduğu söylenebilir. PEM yakıt pillerinin özellikle otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılıyor olması geleceği hakkında olumlu düşünülmesini sağlamaktadır (Alkaya ve diğer., 2008).

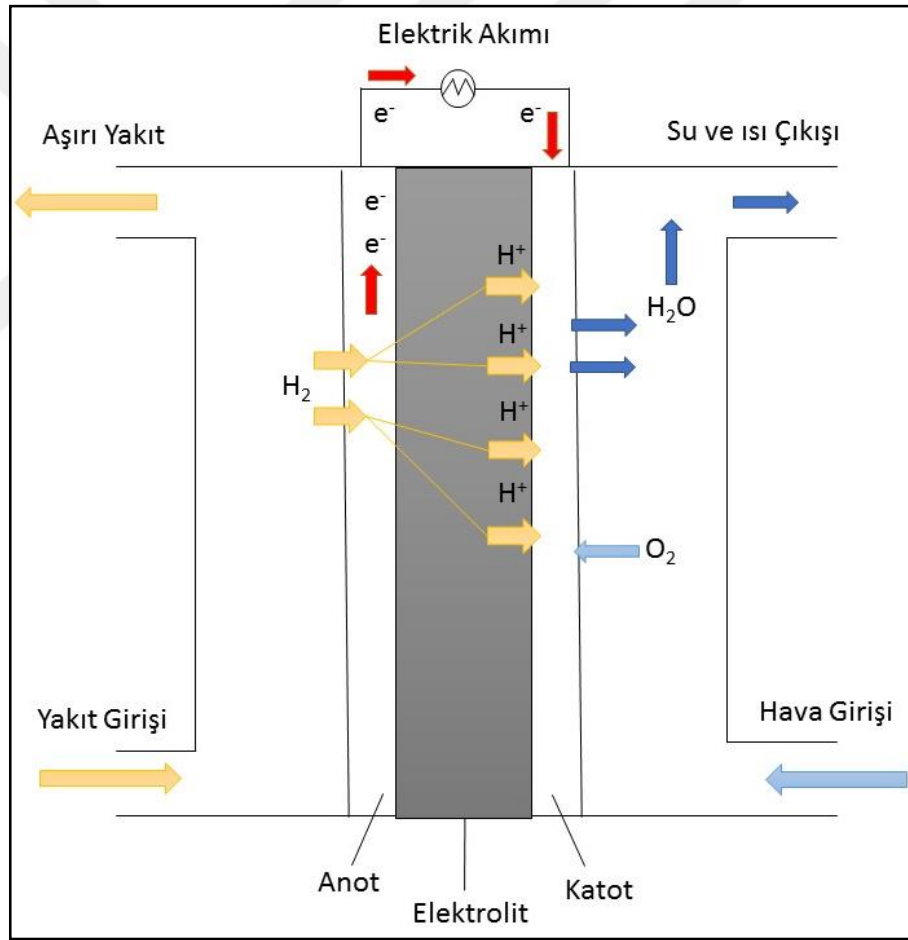
### 3.1.2.3 Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)

FAYP’de elektrolit olarak sıvı fosforik asit çözeltisi kullanılmaktadır. Katalizör olarak ise PEM yakıt pilindeki gibi platin kullanılmaktadır. Ortalama çalışma sıcaklıkları 150 ila 220°C aralığında olduğu görülmektedir (Yıldırım, 2011). Bu yakıt pilinde de anot tarafından giren yakıt elektrotta katalizörler yardımıyla iyonlarına ayrışır. Pozitif yüklü hidrojen iyonları sıvı fosforik asit çözeltisinden ilerleyerek katota ulaşır. Elektronlar ise bir dış devre üzerinden geçerek katota ulaşırlar ve elektrik enerjisi üretirler. Katotta dışarıdan gelen hava ile birlikte elektronlar ve pozitif yüklü hidrojen iyonları birleşerek atık olarak ortaya çıkan suyu oluştururlar (Mench, 2008). Bir FAYP’nin genel çalışma prensibi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

Fosforik asit yakıt pillerinin elektrik enerjisi üretirken gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sırasıyla anot reaksiyonu, katot reaksiyonu ve toplam reaksiyon olarak aşağıdaki gibidir (Mench, 2008):



PEM yakıt pillerinin olduğu gibi FAYP'lerinin de karbondioksit'e karşı toleranslı olduğu görülmektedir. Ayrıca en önemli avantajlarından bir tanesi de doğal gaz veya kömür gazına dayalı yakıtların kullanılmasına imkân verebilmesidir. Tek başına elektrik enerjisi üretmek için kullanıldığında ulaşabilecekleri en fazla verim doğal gaz ile çalışanlarda %47, hidrojen ile çalışanlarda ise %60 dolaylarındadır (Bıyıkoglu, 2003). Kombine ısı ve güç sistemleri ile birleştirildiğinde ise verimleri %85'lere kadar ulaşmaktadır (Yıldırım, 2011). Ayrıca FAYP'leri uzun süredir gelişme aşamasındadırlar ve birçok uygulaması günümüzde faal halde çalışmaktadır. Bu sayede hücrenin dayanıklılığı hakkında gerçek yaşam tecrübeleri kazanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Mench, 2008).



Şekil 3.4 FAYP'nin genel çalışma prensibi (DOE, 2017)

FAYP'nin dezavantajı olarak ise platinin zehirlenmesini önlemek için karbon monoksit'in ortamdan tamamen uzaklaştırılması yahut dönüştürülmesi söylenebilir.

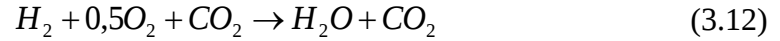
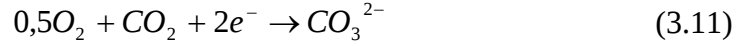
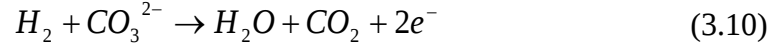
Ancak FAYP 200°C sıcaklıkta %1,5 civarında olan karbon monoksit gazının konsantrasyonunu tolere edebilmektedir. Güç yoğunluğu ise diğer yakıt pillerine oranla daha düşüktür ve bu da daha fazla hacim kaplamalarına ve daha ağır olmalarına yol açmaktadır (Bıyıkoglu, 2003; Yıldırım, 2011). Uzun süren ilk hareket, yüksek maliyetli platin katalizör ihtiyacı ve elektrolitin zamanla azalması gibi diğer dezavantajlarının olduğu da vurgulanmıştır (Mench, 2008).

FAYP'lerinin şehirlerden uzak küçük kapasiteli yerleşik güç üretim tesislerinde kullanılmaları avantajlı hale getirmektedir. Bunun dışında şehir otobüsleri gibi büyük araçların güç ihtiyacını sağlamaya yönelik olarak kullanımı da mevcuttur (Bıyıkoglu, 2003; Yıldırım, 2011).

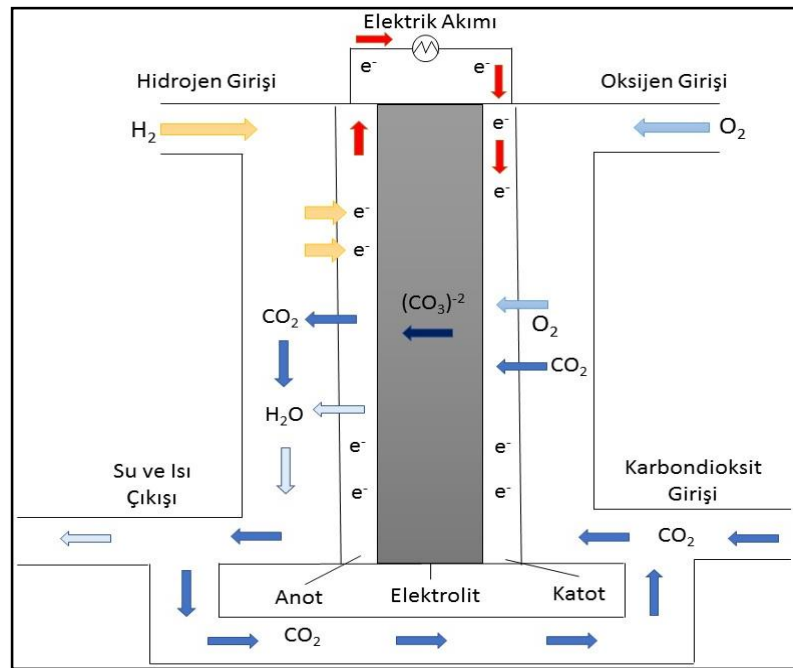
#### *3.1.2.4 Erimiş Karbonatlı Yakıt Pili (EKYP)*

EKYP'inde elektrolit olarak erimiş karbonat kullanılmaktadır. Daha çok lityum, potasyum ve sodyum karbonatlarının varyasyonları kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklıkları ise genellikle 600 °C ile 700 °C arasında değişmektedir (Alkaya ve diğer., 2008). Bu yüksek sıcaklıklar elektrolitin çok iyi bir iletkenlik seviyesinde çalışmasına imkân sağlamakta ve ayrıca katalizör olarak soy metallerde duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca nikelin katalizör olarak kullanılabilmesini de sağlamaktadır. Çalışma sıcaklıklarının yüksek olması dayanıklı malzemelerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yüzden elektrolit olarak anotta nikel, katotta ise nikel oksit kullanılabilir. Verimleri normal koşullarda % 60'lara kadar çıkmaktadır. Kojenerasyon sistemlerinde kullanıldıklarında ise verimleri %85'lere kadar artmaktadır (Yıldırım, 2011). Şekil 3.5'te görüldüğü gibi anot kısmına gelen hidrojen iyonlarına ayrılır ve serbest elektronlar dış devre üzerinden geçerek katota ulaşmakta, katottan CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>'nin oluşturduğu karbonat iyonları anotta gelerek H<sub>2</sub> iyonları ile birlikte CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O oluşturmaktadır. Burada tekrar serbest kalan CO<sub>2</sub> ise tekrar kullanılmak üzere katot tarafına gönderilmektedir (Mench, 2008).

Eriyik karbonatlı yakıt pillerinin elektrik enerjisi üretirken gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sırasıyla anot reaksiyonu, katot reaksiyonu ve toplam reaksiyon olarak aşağıdaki gibidir (Mench, 2008):



Yakıt bir ön işleme ihtiyaç duymadan kullanılabilir. Hücrenin içerisinde yüksek sıcaklık ile birlikte yakıt hidrojenlerine ayrışmakta. Böylece hem maliyetler azalmakta hem de işlemler olumlu yönde etkilenmektedir. Ayrıca bu sayede geniş bir yakıt spektrumu da EKYP’de kullanılabilir. Bu yüksek sıcaklıklar sayesinde karbon monoksit ve karbondioksit olan duyarlılıklarının da olmadığı belirtilmiştir. Yani yakıt içerisinde yahut herhangi bir kimyasal tepkime ile bu gazların oluşması EKYP’nin çalışmasında herhangi olumsuz etkiye sebep olmamaktadır (Bischoff, 2006). EKYP’lerde yüksek kalitede atık ısı çıkmaktadır. Bu sayede kojenerasyon sistemleri için uygun bir aday oldukları vurgulanmıştır. Bir başka avantajı ise katalizör olarak pahalı soy metaller ihtiyacı duymamasıdır (Mench, 2008).



Şekil 3.5 EKYP’nin genel çalışma prensibi (DOE, 2017)

EKYP teknolojisinin başlıca dezavantajları ise uzun süren ilk hareket işlemi, işletildikleri yüksek sıcaklıklar ve korozyona uğrayabilen elektrolitleri sebebiyle sistemin bileşenleri daha hızlı bir şekilde korozyona uğrayarak hücre ömrünü oldukça kısalmıştır (Yıldırım, 2011).

EKYP'ler çoğunlukla yüksek kapasiteli yerleşik güç üretim tesislerinde kullanılmaktadır. Megavat seviyesindeki güç üretim tesislerinde EKYP kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerine entegre edilerek kullanılabilir. EKYP'lerinin elektrik enerjisi üretme verimliliği % 66'ları bulmaktadır (Specchia S., Saracco ve Specchia V., 2008). Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerine entegre edildiğinde ise atık ısının da değerlendirilmesi ile verimliliği % 80'lere kadar çıkmaktadır (Alkaya ve diğer., 2008; Mench, 2008). Yüksek güç gereksinimi olan ticari gemilerde ve askeri gemilerde gerçekleştirilen çeşitli denizcilik uygulamalarının hayata geçirildiği belirtilmiştir (McConnell, 2010; Ovrup ve Dimopoulos, 2012).

#### 3.1.2.5 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

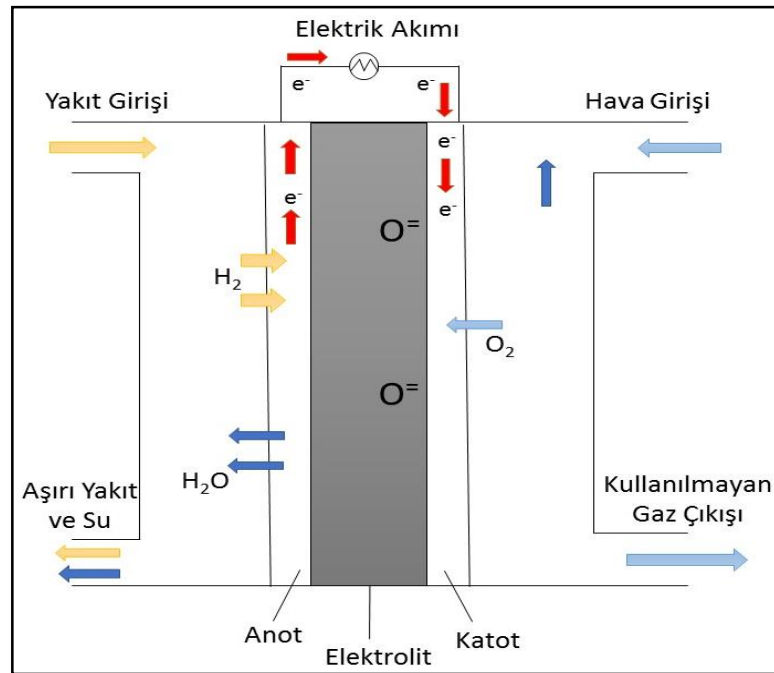
KOYP'nde hem elektrolit hem de elektrotlar seramik malzemedendir (Bıyıkoglu, 2003). Elektrolit olarak  $ZrO_2$  ile birlikte molar olarak % 8 ila 9 civarında  $Y_2O_3$  (yitriyum oksit) metal oksit eklenmekte ve zirkonyuma oksit iyonlarını 600 ila 1000 °C sıcaklıkları arasında iletebilme özelliği kazandırılmaktadır (Singhal ve Kendall, 2003). Buradaki iletim elektrolitteki oksijen iyonları sayesinde gerçekleşmektedir. Sistemin elektrik üretim verimi % 50 – 60 arasında değişmektedir. Kombine ısı ve güç üretim sistemleri ile birlikte verimleri % 80 ila 85 seviyelerine kadar çıkmaktadır ve yaklaşık işletme sıcaklıkları 900-1000 °C aralığında değişmektedir (Yıldırım, 2011). Bu yüksek çalışma sıcaklıkları katalizör olarak kullanılan pahalı soy metallerde duyulan ihtiyacı da ortadan kaldırmaktadır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi gözenekli katot yüzeyinde dışarıdan giren oksijen atomları elektronlar vasıtasıyla indirgenmekte ve oksit iyonları haline gelmektedir. Bu sayede seramik yapıdaki elektrolitten geçerek yakıt bakımından zengin gözenekli anot yüzeyinde hidrojen ile reaksiyona girmekte ve elektronlar serbest kalmaktadır. Serbest kalan elektronlar bir dış devre üzerinden

geçerek katota ulaşır ve bu şekilde KOYP'den elektrik enerjisi üretilmektedir (Singhal ve Kendall, 2003).

Katı oksit yakıt pillerinin yakıt olarak hidrojen kullanıldığında elektrik enerjisi üretirken gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sırasıyla anot reaksiyonu, katot reaksiyonu ve toplam reaksiyon olarak aşağıdaki gibidir (Mench, 2008):



KOYP'lerin en büyük avantajı yakıttaki kimyasal enerjiden yüksek verimlilikle doğrudan elektrik enerjisi üretebilmeleridir ve bu süreç gerçekleşirken hem yüksek kalitede atık ısı elde edilmekte hem de katalizör olarak pahalı soy metallere ihtiyaç duyulmamaktadır. Diğer bir avantajı ise hidrojenin yanı sıra birçok alternatif yakıt KOYP'lerinde kullanılabilir ve bu yakıtların dönüştürülmesi işlemi için harici bir ünitenin kurulmasına da gerek olmamaktadır. Ayrıca CO zehirlenmesine karşı toleransının oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir (Mench, 2008).



Şekil 3.6 KOYP'nin genel çalışma prensibi (DOE, 2017)

İlk hareket süresinin oldukça uzun olması, yüksek çalışma sıcaklıklarının malzemelerin dayanıklılık süresini oldukça kısaltması ve 600 °C'nin altındaki sıcaklıklarda elektrolitin yarı geçirgen özelliği kaybediyor olması en önemli dezavantajları olarak vurgulanmıştır (Mench, 2008).

Katı oksit yakıt pilleri genellikle yüksek kapasiteli yerleşik güç üretim tesislerinde tercih edilmektedir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan ticari uygulamasının ise otomobillerin egzozundaki O<sub>2</sub> miktarını belirlemek üzere tek bir yakıt pili hücresinin oksijen sensörü olarak bu sisteme dâhil edilmesi olduğu belirtilmiştir. Bu sensör egzoz gazındaki oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak küçük bir voltaj oluşturarak çalışmaktadır (Singhal ve Kendall, 2003). KOYP'nin çeşitli uygulamaları yüksek güç gereksinimi olan değişik projelerde yardımcı güç ünitesi olarak uygulama alanı bulmuştur (Kotb, Banwan, El-Gohary, Gaser, 2013; McConnell, 2010).

### **3.2 Denizcilikte Yakıt Pili Uygulama Alanları**

Denizcilik alanında uygulamaya koyulan yakıt pili projeleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Tablo 3.2'de verilen uygulamalardan 100 kW ve üzeri güç üretebilen yakıt pilinin bulunduğu sadece 6 uygulama görülmektedir. Uygulamalardan 31 tanesinde PEMYP'nin kullanıldığı görülmektedir. PEMYP'nin bunu sağlayan en önemli özellikleri kısa sürede ilk hareketi sağlayabilmesi, kompakt bir yapıya sahip olması ve ilk yatırım maliyetlerinin diğer alternatif yakıt pillerine oranla daha uygun olması olduğu belirtilmiştir (Barbir, 2012). Tablo 3.2'de verilen eğlence amaçlı tekneler, yatlar/yelkenli gemiler, deniz taksi/feribot ve araştırma gemisi kısımlarındaki taşıtlardan 16 tanesi bu bölüm içerisinde tanıtılacaktır.

#### **3.2.1 Eğlence Amaçlı Tekneler**

Bu bölümde yakıt pili ile sevk edilen ve genellikle küçük ve orta boyutlardaki enerji gereksinimi çok yüksek olmayan gezinti tekneleri ve motor botlar tanıtılmıştır.

### 3.2.1.1 Hydra

Zevco, ZeTek ve etaing GmbH firmasının ürettiği ve AYP ile çalışan ilk gezinti teknesidir. “Hydra” isimli tekne 22 yolcu taşıma kapasitesine göre tasarlanmıştır. İlk defa 2000 yılında yazın EXPO’da kullanılmak için denize indirilmiştir. Yakıt olarak hidrojen kullanmaktadır. AYP’nin güç çıkışı 6,9 kW, net gücü 5,5 kW olarak bildirilmiştir. Seyir hızı 5 km/h ve maksimum hızı 9 km/h olarak ölçülmüştür. Hidrojen 0,25 m<sup>3</sup>’lük metal hidrür tanklarda depolanmaktadır. AYP’nin üreticisi ZeTek firması olmuştur. Yakıt pilinin ulaşabildiği verimlilik değeri % 42 olarak rapor edilmiştir (Winkler, 2009; Kala ve Hicks, 2004).

Tablo 3.2 Tanıtılan yakıt pili projeleri

|    | Proje/gemi adı           | Tip               | Ülke             | Yıl       | Yakıt pili | Güç (kW) | Proje tipi |
|----|--------------------------|-------------------|------------------|-----------|------------|----------|------------|
| 1  | Hydra                    | Gezinti teknesi   | Almanya          | 2000      | AYP        | 5        | Prototip   |
| 2  | No 1                     | Yelkenli tekne    | Almanya          | 2002      | PEMYP      | 4,8      | Prototip   |
| 3  | Duffy-Herreshoff DH30    | Deniz taksi       | ABD              | 2003      | PEMYP      | 6        | Prototip   |
| 4  | Hydroxy 3000             | Gezinti teknesi   | İsviçre          | 2003      | PEMYP      | 3        | Prototip   |
| 5  | Mamelie                  | Yelkenli tekne    | Almanya          | 2004      | DMYP       | 0,05     | Prototip   |
| 6  | Have Blue XV/1           | Yelkenli tekne    | ABD              | 2005      | PEMYP      | 10       | Prototip   |
| 7  | Accadue                  | Küçük tekne       | İtalya           | 2005-2006 | PEMYP      | 12       | Prototip   |
| 8  | Cobalt 233 ZET           | Gezinti teknesi   | Almanya          | 2007      | PEMYP      | 24       | Prototip   |
| 9  | Solgenia                 | Araştırma teknesi | Almanya          | 2007      | PEMYP      | 3,6      | Prototip   |
| 10 | Emerald Benetau 411      | Yelkenli tekne    | Birleşik Krallık | 2007      | PEMYP      | 1        | Prototip   |
| 11 | Alsterwasser             | Yolcu gemisi      | Almanya          | 2008      | PEMYP      | 48 x 2   | Ticari     |
| 12 | Frauscher 600 Riviera HP | Gezinti teknesi   | Avusturya        | 2009      | PEMYP      | 4        | Ticari     |
| 13 | NemoH <sub>2</sub>       | Kanal teknesi     | Hollanda         | 2009      | PEMYP      | 60-70    | Prototip   |
| 14 | Protium/Ross Barlow      | Kanal teknesi     | Birleşik Krallık | 2010      | PEMYP      | 1        | Prototip   |
| 15 | Gold Green Hygen         | Turist Botu       | Güney Kore       | 2016      | PEMYP      | 25 x 2   | Ticari     |
| 16 | Energy Observer          | Araştırma Gemisi  | Fransa           | 2017      | PEMYP      | -        | Araştırma  |

Tanıtılan projeler değişik kaynaklardan alınarak yazar tarafından derlenmiştir. Projeler aşağıda ayrıntılı olarak açıklandığı için burada kaynaklar ayrı ayrı verilmemiştir.

### 3.2.1.2 *Hydroxy 3000*

“*Hydroxy 3000*” teknesi kanallarda ve göllerde sıfır salım ve gürültüsüz bir şekilde seyir yapabilmek amacıyla tasarlanmıştır. 6 kişi taşıma kapasitesine sahip (Kala ve Hicks, 2004) olan bu tekne düşük enerji tüketimi ve geniş bir güverte alanına sahip olması için katamaran formunda dizayn edilmiştir (McConnell, 2010).

Bağımsız devrelerden beslenen iki adet elektrik motoru bulunmaktadır. Bu elektrik motorları geminin güç ihtiyacına göre sadece yakıt pili ya da bataryalardan yahut aynı anda her ikisinden birden güç alarak beslenebilecek şekilde tasarlanmıştır (Büchi ve diğer., 2004).

Teknede tahrik ünitesi olarak 3 kW’lık PEMYP ile bataryalar bulunmaktadır. Yakıt olarak teknede her biri 200 barda depolanmış 76 litre (1,25 kg) saf hidrojen depolayabilen 2 adet tüp kullanılmaktadır (McConnell, 2010; Büchi ve diğer., 2004).

Maksimum seyir hızı 15 km/h olarak bildirilmiştir. 10 km/h seyir hızı ile gidebileceği mesafenin yaklaşık 120 km olduğu belirtilmiştir. Teknenin uzunluğu 7 m genişliği 2,5 m ve boş gemi ağırlığı ise 1500 kg olarak verilmiştir. Teknenin yapılan seyirler sonucunda tanktan pervaneye aktarılan enerji verimliliği yüzde 33 olarak ölçülmüştür, ancak hidrojen üretimi için hidroelektrik santralinden alınan elektrik enerjisi de sisteme katıldığında verimliliğin yaklaşık % 26 civarlarında olacağı öngörülmüştür. Bu verimlilik değeri dahi benzin ile çalışan bir makinenin yaklaşık % 16’lık veriminden daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Sadece enerji verimliliği değil bunun yanı sıra çevre kirliliğinin, titreşimin, gürültünün azaltılması ve içme sularının korunması da birer kazanım olarak değerlendirilmiştir (Büchi ve diğer., 2004).

### 3.2.1.3 Cobalt 233 ZET

Constance gölünde gittikçe sıkılaşılan salım kuralları “Brunnert-Grimm AG” ile “zebotec GmbH” firmalarını sıfır salımlı bir tekne üretmeleri konusunda teşvik etmiştir. Bu firmalar 50 kW elektrik motoru (Kotb ve diğer., 2013) ile tahriklenen, güç ihtiyacını zebotec GmbH firmasının ürettiği her biri 12 kW güç üretebilen 2 adet PEM tipi yakıt pilinden karşılamaktadır. Maksimum güç ihtiyacında yakıt pilinden karşılanamayan gücün bataryalardan karşılanacağı hibrit bir sevk sistemine sahip olan tekne (Tornstad ve diğer., 2017) “Cobal Boats” tersanesinde Germanischer Lloyd’un yakıt pilli tekneler için hazırladığı standartlara göre üretilmiştir. Kısa bir süre sonra da Germanischer Lloyd sertifikasını almıştır. Teknenin ulaşabildiği en yüksek hız 40 km/h olmuştur (Eichlseder ve Klell, 2012).

### 3.2.1.4 Frauscher 600 Riviera HP

Frauscher 600 Riviera HP Avusturya’daki Avrupa Birliği tarafından finanse edilen “Future Project Hydrogen” projesi kapsamında Bitter GmbH, Fronius International ve Frauscher firmaları tarafından geliştirilen bir motor bottur. Frauscher firmasının inşa ettiği botun uzunluğu 6 m, genişliği 2,2 ve ağırlığı 1400 kg olarak verilmiştir (Pagliaro ve diğer, 2010).

Botta Fronius International firması tarafından üretilen 4 kW’lık PEM tipi bir yakıt pili kullanılmaktadır ve değiştirilebilir hidrojen kartuşlarına sahip olduğu bilgisi verilmiştir. Hidrojenin depolandığı eleman 330 mm çap ve 766 mm yüksekliğe sahip 350 bar basınçta ve 28 kg ağırlığında Şekil 3.7’de gösterildiği gibi silindir şeklinde bir kaptır (Pagliaro ve diğer, 2010).

5 dakika gibi kısa bir sürede kartuşu çıkarıp yerine yenisini koyarak seyir yapmaya devam etme imkânı sağlamaktadır. 4 deniz mili seyir hızı ile yaklaşık olarak 50 deniz mili seyir yapma olanağı tanınmaktadır (Pagliaro ve diğer, 2010).



Şekil 3.7 Değiştirilebilir hidrojen kartuşu (Pagliaro ve diğer., 2010)

### 3.2.2 Yatlar/Yelkenli Gemiler

Bu bölümde yakıt pili ile sevk edilen ve genellikle küçük ve orta boyutlardaki enerji gereksinimi çok yüksek olmayan yelkenli tekneler/yatlar tanıtılmıştır.

#### 3.2.2.1 No. 1 Yat

“No. 1” isimli yat Alman Loyd’unun gemiler ve botlardaki yakıt pilleri yönergesine göre sertifikalandırılan, dünyanın yakıt pili ile tahrik alan ilk yatı olmuştur. Yatın üreticisi Beneteau Yacht firması olurken, güç sistemi MTU Friedrichshafen firması tarafından gerçekleştirilmiştir ve yakıt pili tahrik sistemine “Cool Cell” adı verilmiştir (Sembler ve Kumar, 2011). Yakıt pili motora güç iletmesinin yanı sıra yattaki diğer güç ihtiyacı olan sistemlere de güç sağlayabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Yatın 12,26 m uzunluğa, 3,76 m genişliğe sahip olduğu bildirilmiştir. 300 bar basınçlı 3 hidrojen tankında toplam 6 kg hidrojen gazı depolanmıştır ve Ballard Power Systems firması tarafından üretilen ve her biri 1,2 kW güç üretebilen 4 adet yakıt pili modülü ile toplam 4,8 kW güç üretecek şekilde donatılmıştır. Yakıt pili ve 9 adet jel tipi bataryadan elde edilen elektrik enerjisi kullanarak ulaştığı hız ise 13 km/h olmuştur ve toplam elde edilen güç ise 20 kW olmuştur. 225 km çapında menzile ve ayrıca CE sertifikasına sahip olduğu belirtilmiştir (Riantini, 2010).

### 3.2.2.2 Mamelie

Almanya’da “Max Power” firmasının bir projesi olarak 2004 yılında üretilen 15 m’lik bu yatta 1,2 kW’lık MaxPower firması tarafından geliştirilen “Smart Fuel Cell” isimli doğrudan metanol ile çalışan bir yakıt pili çeşidi olan DMYP konulmuştur. Ayrıca “Daimler Chrysler North Atlantic Challenge” da yarışma imkânı bulmuştur (McConnell, 2010).

### 3.2.2.3 Haveblue XV1 Yat

“HaveBlue” firmasının projesi kapsamında 2005 yılında üretilen bu yatta “Hydrogenics” firması tarafından geliştirilen HyPM isimli 10 kW’lık PEM yakıt pili kullanılmıştır. Boyu 12,8 m olan bu yatta hidrojen metal hidrür tanklarda depolanmıştır (Sembler ve Kumar, 2011). Yatın tahriki için Solomon Technologies of Benedict firmasının ürettiği elektrik motoru kullanılmıştır. Bu elektrik motoru yatı tahrik etmenin yanı sıra seyir sırasında elektrik enerjisi üretebilmekte ve ayrıca su üretilmesini de sağlamaktadır. Yatta hidrojen üretimi için gerekli güç ise en fazla 90 W güç üretebilen rüzgâr türbini ve seyir sırasında 500 W güç üretebilme kapasitesine sahip elektrik motoru tarafından sağlanacak şekilde dizayn edilmiştir (Queeney, 2003). Yat tankları tam dolu iken saatte 15 km hızla seyir yaptığında yaklaşık 300 deniz mili gidebilmektedir (Finn, 2005). Sistemin güç gereksinimini karşılamak için fotovoltaiik güneş panelleri ve bataryalarda sisteme entegre edilmiştir. Yat ayrıca su üretimi için ise ters ozmos su arıtma sistemine sahiptir. Bu sistemden üretilen sudan yüzde 99,99 saflıkta hidrojen elektrolizör aracılığıyla üretilmektedir (Queeney, 2003).

### 3.2.2.4 Emerald Benetau 411

Voller firmasının ürettiği 1 kW’lık PEMYP *Benetau Oceanis Clipper* tipi bir yata 2007 yılında yardımcı güç ünitesi olarak monte edilmiştir. Şekil 3.8’de gösterilen yaklaşık 12 m uzunluğunda olan yat ile deneme seyrine çıkılmış ve Atlantik Okyanusu geçilmiştir (Riantini, 2010).

Geleneksel dizel jeneratörler ve bataryaların yerine yakıt pili sistemi seçilmiştir. Sistemde yakıt olarak bir tankta sıvılaştırılmış petrol gazı kullanılmıştır. Bu gazın bir dönüştürücü sayesinde hidrojeni ayrıştırılarak yakıt piline gönderilmektedir. Sistemin elektrik üretim verimi yaklaşık olarak % 25 olmaktadır. Sistem atık ısıdan ve sıcak sudan faydalanılarak kullanıldığında ise bu verim yaklaşık % 60 civarlarına yükselmektedir (McConnell, 2010).



Şekil 3.8 Emerald Benetau 411 (Maritimejournal, 2007)

### **3.2.3 Deniz Taksi/Feribot**

Bu bölümde yakıt pili ile sevk edilen ve enerji gereksinimi çok yüksek olmayan genellikle küçük ve orta boyutlarda, feribotlar ya da deniz taksileri incelenmiştir.

### 3.2.3.1 FCS Alsterwasser

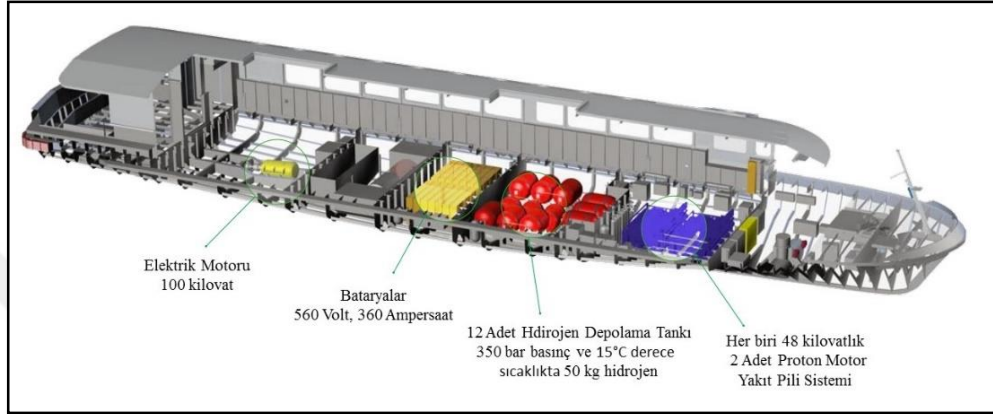
“The ZemShip (Zero Emission Ship)” projesi finansal desteğini “EU Life Program” isimli bir Avrupa Komisyonu çerçeve programından almaktadır. Bu proje kapsamında üretilen “FCS Alsterwasser” gemisi tek seferde hiç salım üretmeden 100 kişi taşıma kapasiteli (Rampen ve diğer., 2013) bir yolcu gemisi olarak tasarlanmıştır. Gücünü “Proton Motors” firmasının ürettiği Şekil 3.9’de gösterilen “PM Basic A 50 Maritime (PEM)” yakıt pilli sistemi – 2 adet 48 kW’lık PEM tipi (PM 600 yakıt pili) – ve bataryalardan – 360 Ah ve 80 V’luk 7 adet batarya bloğunun her birinde 40 batarya bulunmakta– oluşan hibrit bir sistemden alan 100 kW’lık elektrik motorundan almaktadır (Hammou, 2017).



Şekil 3.9 PM basic a 50 deniz tipi yakıt pili sistemi (Hammou, 2017)

Bu geminin tasarımı “Schifftechnik Buchlon” firması tarafından geliştirilmiş olup inşası ise “Spezial Schiffbau Oortkaten” tersanesinde tamamlanmıştır gösterilmiştir (Hammou, 2017).

Proje paydaşlarından olan Alman Loydu (Germanischer Lloyd)’nun kendi yönetmeliklerine göre sertifikasyonunu yaptığı gemi 2008 yazında seferlerine başlamıştır. Geminin boyu 25,56 m, genişliği 5,36 m, tam dolu halde deplasmanı 72 ton, seyir hızı saatte 15 km, draftı ise yolcular ile birlikte yaklaşık 1,33 m’dir (Hammou, 2017). Geminin hibrit sisteminin yerleşimi ise Şekil 3.10’de gösterilmiştir.



Şekil 3.10 FCS Alsterwasser gemisinin hibrit sisteminin yerleşimi (Hammou, 2017)

Geminin yakıtını temin ettiği hidrojen dolum istasyonu “Linde Group” firması tarafından geliştirilmiş ve işletmesi de aynı firma tarafından yapılmaktadır (Hammou, 2017). Geminin işletilmesi ise ATG (Alster Touristik GmbH) tarafından yapılmaktadır (Riantini, 2010).

### 3.2.3.2 Accadue

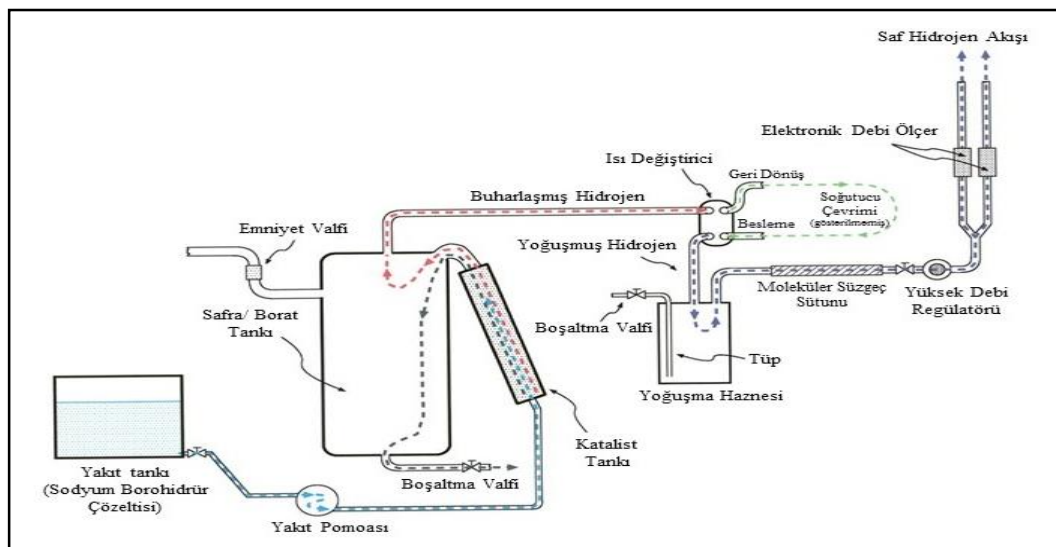
VEGA projesi “Venezia Technologie” firması tarafından 2005 ile 2006 yılları arasında Venedik’te seyir yapabilecek yakıt pili ve bataryalar ile çalışan hibrit bir botun geliştirilmesi projesidir. Botun denize indirilmesi 2009 yılında gerçekleştirilmiştir (Bertaggia ve Moi, 2009).

Bu bot Hydrogenics firması tarafından üretilen ve azami 5 kW güç sağlayabilen PEM tipi yakıt pili ile donatılmıştır. DA/DA çevirici sayesinde yakıt pillerinden üretilen elektrik enerjisi kurşun asit bataryalarda depolanmaktadır. Elde edilen elektrik enerjisi bir Inverter ile teknede bulunan her biri 12 kW güç üretebilen elektrik

motorlarına aktarılarak teknenin sevkı için gerekli itme sağlanmaktadır. Yakıt pili modülünün soğutulması bir ısı değiştirici sayesinde deniz suyu ile yapılmıştır. Sonuç olarak, elektrik motoru ile çalışan botların kısa olan seyir kapasiteleri ve sık şarj olma sorunlarının çözüldüğü gözlemlenmiştir (Bertaggia ve Moi, 2009).

### 3.2.3.3 Duffy Herreshoff DH30

Duffy Herreshoff DH30, “Duffy Electric Boat Company” firmasının 2003 yılında ürettiği, üzerinde “Anuvu Fuel Cell Products” firması tarafından üretilen ve her biri yaklaşık 7 kg olan “Anuvu Power-X” isimli 4 adet 1,5 kW’lık PEM tipi yakıt pili ile donatılmıştır (Sembler ve Kumar, 2011). Yakıt pillerinden üretilen elektrik enerjisi ile tahriklenen 20 beygirlik bir elektrik motoru bulunan dünyanın ilk deniz taksisidir. Teknede kullanılan hidrojen sodyum bor hidrürden elde edilmiştir (Rampen ve diğer., 2013). Suda çözülmüş halde bulunan sodyum bor hidrür daha sonra özel bir katalist tankından geçirilerek sistemin ihtiyaç duyduğu hidrojen akımını sağlayabilmektedir. Sistemden atık olarak ise sadece su ve bir miktar geri dönüştürülebilir boraks çıkmaktadır (Pike, 2016). Sistemin hidrojen akış şeması Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Deniz taksinin uzunluğu 9,1 m, genişliği 2,7 m, yolcu kapasitesi ise 18 yolcu olarak düşünülmüştür. Maksimum hızı ise yaklaşık saatte 15 km olarak tasarlanmıştır (Sembler ve Kumar, 2011).



Şekil 3.11 Hidrojen akış şeması (Pike, 2016)

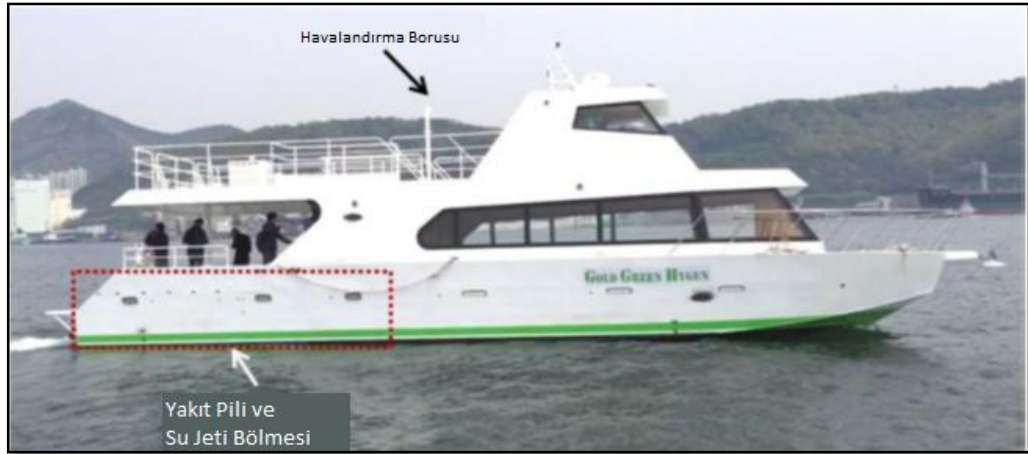
### 3.2.3.4 Nemo H<sub>2</sub>

Dünyada yakıt pili ile çalışabilen ilk kanal botu Alman loydunun kural ve yönetmeliklerine göre 2009 yılında Amsterdam’da denize indirilmiştir. 82 yolcu ve 2 mürettebat taşıyabilmektedir. Tekne 22 m boy, 4,25 m genişlik ve 1,1 m’lik su çekimine sahiptir (McConnell, 2010).

Teknede bir adet 75 kW’lık elektrikli Azimuth marka kış pervanesi ve bir adet 11 kW’lık baş pervanesi bulunmaktadır. Gemide NedStack firmasının ürettiği 2 adet 30 kW’lık PEM tipi yakıt pili ve 70 kWh’lık 55 adet kurşun asit batarya sistemi bulunmaktadır. Hidrojen 350 bar basınçta 24 kg’lık 6 tankta depolanmaktadır. En yüksek seyir hızı 8,6 deniz milidir. 7 deniz mili ile 9 saat boyunca aralıksız seyir yapabildiği ileri sürülmüştür (McConnel, 2010; Choi ve diğer., 2016).

### 3.2.3.5 Gold Green Hygen

PEMYP ve lityum iyon bataryalar ile donatılmış 20 m uzunluğunda, kıyı sularında seyir yapmak için tasarlanmış hibrit “Gold Green Hygen” feribotu Şekil 3.12’de gösterilmiştir (Choi ve diğer., 2016).



Şekil 3.12 Geminin kıyı sularında test operasyonu sırasında fotoğrafı (Choi ve diğer., 2016)



### 3.2.4 Araştırma Gemisi

Bu bölümde yukarıdaki bölümlerde bahsedilen tekneler dışında farklı amaçlar için tasarlanmış düşük ve orta güç gereksinimine ihtiyaç duyan gemiler incelenmiştir.

#### 3.2.4.1 Solgenia

“University of Applied Sciences Konstanz” da hem fotovoltaiik paneller hem de PEM tipi yakıt pili ile çalışabilen hibrit bir tekne geliştirilmiştir. Tekne üzerindeki enerji ihtiyacı 350 bar basınca dayanıklı tanklarda depolanan hidrojen ve bataryalardan sağlanmaktadır. Teknede 3 adet Ballard Nexa marka 1,2 kW’lık PEMYP bulunmaktadır. Asenkron motor ile birlikte teknede bir adet DA/AA dönüştürücü bulunmaktadır ve bunlar bataryalarda depolanan enerjiyi veya yakıt pilinin ürettiği elektrik enerjisini elektrik motoruna aktararak pervanenin dönmesini sağlamaktadır. Bataryalar, yakıt pili modülü ve fotovoltaiik paneller arasındaki voltaj farkları da DA/DA çevirici vasıtasıyla ayarlanmaktadır. Şekil 3.14’de gösterilen araştırma botunun teknik özellikleri Tablo 3.3’de verilmiştir (Leiner, 2014).



Şekil 3.14 Constance gölünde Solgenia araştırma botu (Wirtschaft ve diğer., 2008)

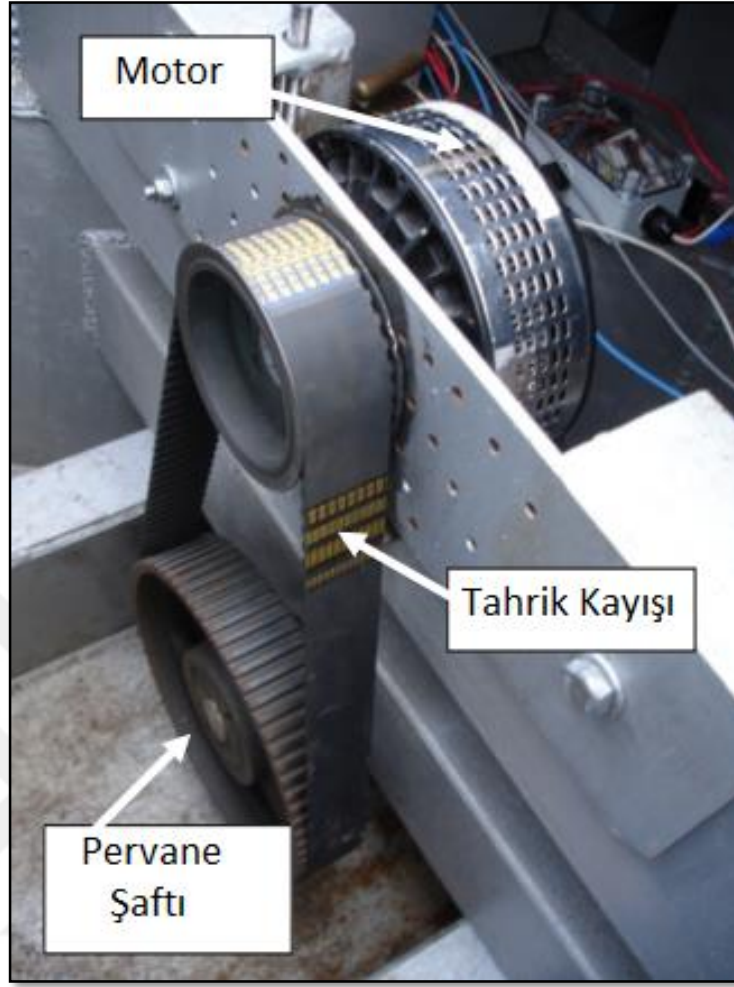
Tablo 3.3 Solgenia araştırma teknesinin teknik bilgileri (Leiner, 2014)

|                                  |                    |                                 |                                         |
|----------------------------------|--------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Boy</b>                       | 8,5 m              | <b>Fotovoltaik panel gücü</b>   | 720 W                                   |
| <b>Genişlik</b>                  | 2,5 m              | <b>Batarya kapasitesi (%80)</b> | 210 Ah                                  |
| <b>Dizayn su hattı genişliği</b> | 0,5 m              | <b>Sistem voltajı</b>           | 48 Volt                                 |
| <b>Deplasman</b>                 | 2,5 m <sup>3</sup> | <b>Yakıt pili</b>               | 3x 1,2 kW                               |
| <b>Pervane kanat sayısı</b>      | 3                  | <b>Hidrojen tankı</b>           | 70 litre, 350 bar                       |
| <b>Pervane çapı</b>              | 406 mm             | <b>Asenkron motor</b>           | 4/8 j-kW, 2300 U x dakika <sup>-1</sup> |
| <b>Pervane hatvesi</b>           | 292 mm             |                                 |                                         |

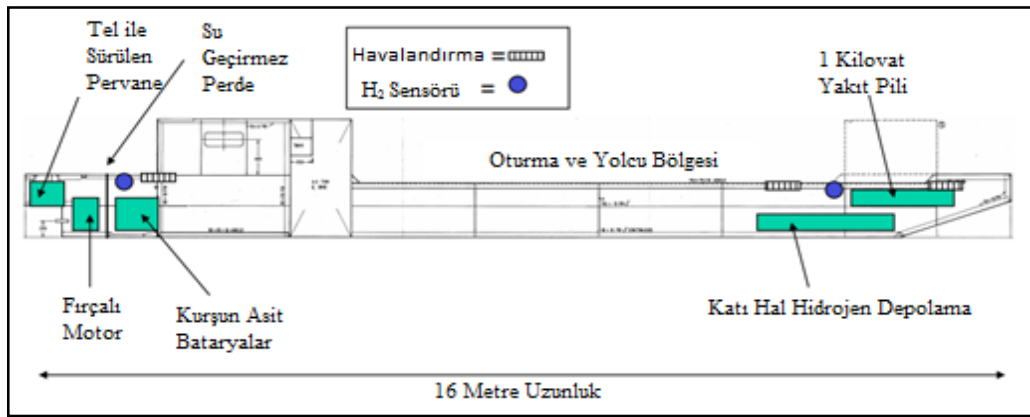
#### 3.2.4.2 Ross Barlow Kanal Botu

“Protium” isimli proje Birmingham Üniversitesinde bir öğrenci projesi olarak hayata geçirilmiştir. Projenin amacı, Birleşik Krallık kanal ağında modern teknolojilerin geleneksel ulaştırma yöntemlerinden olan kanal botlarına uygulanmasıdır. Bot İngiliz suyollarına ait bir bakım gemisinden dönüştürülmüştür. Teknede PEM tipi yakıt pili, katı halde hidrojen depolama tankları, kurşun asit batarya sistemi ve Şekil 3.15’da gösterilen yüksek verimlilikte sürekli mıknatıslı elektrik motoru bulunmaktadır (Bevan, Züttel, Book ve Harris, 2011).

Birleşik Krallık kanallarında hız limitinin saatte 6,4 km olması düşük güçte çalışan PEM tipi yakıt pillerinin test edilmesi için harika bir fırsat sunmaktadır. “Ross Barlow” isimli bu kanal botunun resmi olarak 2007 yılının Eylül ayında suya indirilmesi gerçekleştirilmiştir. Hidrojen ise her biri 30 kg metal hidrür tozu içeren 8 adet modülde depolanmaktadır. Katı hal hidrojen depolama sisteminden yaklaşık olarak 4 kg hidrojen sağlanabilmektedir. Sistemin çalışma basıncı 10 bar civarındadır. 65 °C’de 1 kW’lık güç üreten PEM tipi yakıt pili basınçlı havayla soğutulmaktadır. Ortalama hidrojen tüketim miktarı ise dakikada 15 litre olarak ölçülmüştür. Yakıt pilindeki su yönetimi problemini ortadan kaldırmak için hidrojen tasfiyesi gerçekleştirilmektedir ve bu nedenden dolayı sistemde büyük kayıpların olduğu belirtilmiştir (Bevan ve diğer., 2011; Book, 2013).



Şekil 3.15 Sürekli mıknatıslı (NdFeB) elektrik motoru (Bevan ve diğer., 2011)



Şekil 3.16 Ross Barlow kanal botu şematiği (Bevan ve diğer., 2011)

Teknenin şematiği Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Bu sistem çoğunlukla düşük güç gereksinimine ihtiyaç duyan uygulamalar için uygun olmaktadır. Bu nedenle Birleşik

Krallıktaki kanallarda düşük hız limitinin uygulanması bu sistem için bir avantaj oluşturmaktadır. Yüksek güç ihtiyacı duyulduğu zamanlarda ise sistemdeki bataryalardan ihtiyaç duyulan güç sağlanabilmektedir. Dönüştürülen bot ve dizayn edilen hibrit sistemin geleneksel motorlara göre daha verimli, daha sessiz ve çevreci olduğu vurgulanmıştır (Bevan ve diğer., 2011).

#### 3.2.4.3 Energy Observer

14 Nisan 2017 günü Fransa'nın kuzey batısındaki Saint Malo şehrinde denize indirilen – Şekil 3.17'te gösterilmiştir – “Energy Observer” tamamen yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak 50 ülkede 101 limana uğrayarak toplamda altı yıl sürecek bir dünya turunu gerçekleştirmeyi hedefleyen ilk gemi olma özelliğine sahiptir. Bu seyir sırasında Kaptan olarak Victorien Erussard ve ekip lideri olarak ise Jerome Delafosse yer alması planlanmıştır. Planlanmış olan seyir rotası Şekil 3.18'de gösterilmiştir (Energy-observer, 2017).

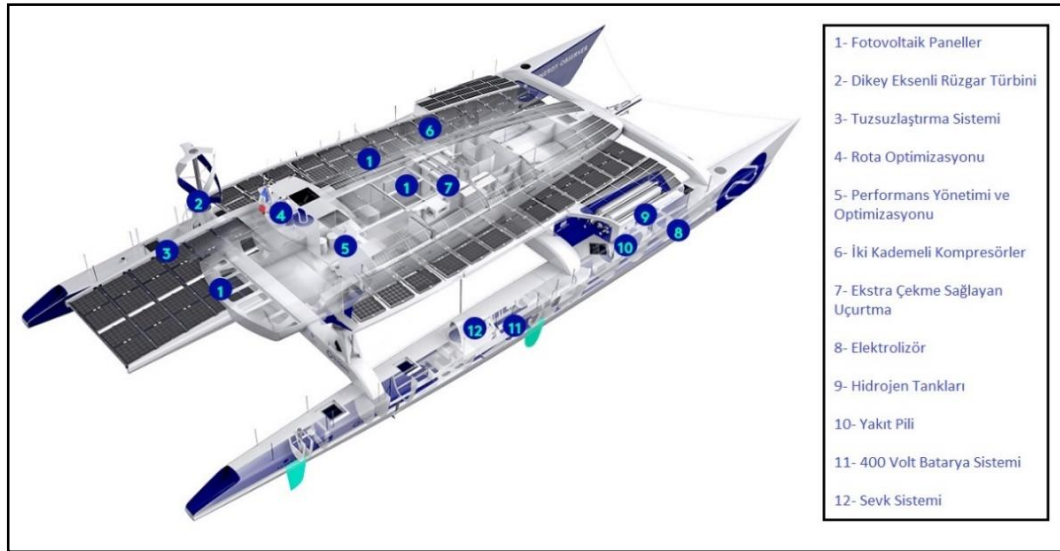


Şekil 3.17 Energy Observer gemisinin suya indirilişi (Energy-observer, 2017)



Şekil 3.18 Energy Observer gemisinin seyir rotası (Energy-observer, 2017)

Fransa’da rekreasyonu gerçekleştirilen gemi ilk olarak 1983 yılında Kanada’da üretilmiştir. Projenin tamamlanması yaklaşık dört yıl sürmüştür. Yüzen bir laboratuvar olarak inşa edilen geminin boyu 30,5 m, genişliği ise yaklaşık 12,8 m’dir. Geminin genel görünümü ve yerleşim planı Şekil 3.19’da gösterilmiştir (Energy-observer, 2017).



Şekil 3.19 Geminin genel görünümü ve yerleşim planı (Energy-observer, 2017)

Gemi, çağının ötesinde birçok özelliği bir arada barındırmaktadır. Teknenin üst yüzeyi kaydırmaz yapıya sahip güneş panelleri ile donatılmıştır. Bu sayede

mürettebatın üzerinde kaymadan yürüyebilmesi sağlanmıştır. İki adet rüzgâr türbini de sancak ve iskeleye yerleştirilerek rüzgâr enerjisinden de faydalanılmıştır. Bunun dışında ayrıca bir adet “smart traction kite” olarak adlandırılan 80 m yükseğe çıkabilen ve 50 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip bir uçurtma ile de rüzgârlı günlerde ek çekiş gücü sağlanabilmektedir. Ayrıca bu uçurtma tersinir elektrik motorları sayesinde kuvvetli rüzgârlarda elektrik üretimine de yardımcı olabilmektedir (Owierkowicz ve Malinowska, 2017). Teknenin bu uçurtma ile olan bir görüntüsü Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Teknenin ekstra çekiş gücünü sağlayan uçurtma ile seyri (Euronews, 2017)

Deniz suyu tuzdan arındırılarak hem içme suyu olarak kullanılabilmekte hem de bu üretilen su hidroliz ile moleküllerine ayrıştırılarak hidrojen ve oksijen eldesinde kullanılmaktadır. Elde edilen hidrojen gemide bulunan 2 adet 4322 litre ya da 350 barda 62 kg hidrojen depolayabilme kapasitesine sahip özel tanklarda depolanmaktadır. Bu elektroliz sistemi ile saatte 360 gram hidrojen elde edilebilmektedir. Teknenin bir saat boyunca ihtiyaç duyduğu gücü sağlayabilmek için gerekli olan hidrojen ise yaklaşık 3,5 kg olarak dizayn sırasında hesaplanmıştır (Energy-observer, 2017).

Elde edilen bu hidrojen daha sonra PEM tipi bir yakıt piline gönderilerek elektrik enerjisi üretilmekte ve gemideki bataryalar şarj edilmektedir. Bu sayede gemide tahrik için bulunan iki adet elektrik motoru çalıştırılmaktadır. Hidrojen enerjisi burada geminin menziline arttırıcı bir özelliğe sahiptir. Asıl enerji kaynağı ise 130 m<sup>2</sup> alana sahip güneş panelleridir. Bu panellerden bazıları iki yüzeyi de elektrik enerjisi üretecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede hem direk güneşten gelen ışınların hem de deniz yüzeyine çarparak yansıyan ışınların yakalanması amaçlanmıştır. Panellerin verimliliği % 30'a kadar çıkarılmış ve elde edilebilecek toplam güç miktarı ise 21 kW olarak hesaplanmıştır. Dikey eksenli olarak yerleştirilen rüzgâr türbinlerinin ise her birinden 1 kW enerji elde edilebilmektedir (Energy-observer, 2017).

Teknenin yaklaşık maliyetinin ise 5 milyon Euro civarında olduğu belirtilmiştir. İlk yapıldığında 10 tonluk bir ağırlığa sahip olan tekne yeni sistemlerin donatılmasıyla yaklaşık 20 tonluk bir ağırlığa ulaşmıştır. Yapacağı seyrin yıllık maliyetinin yaklaşık 4 milyon Euro olması beklenmektedir (Energy-observer, 2017).

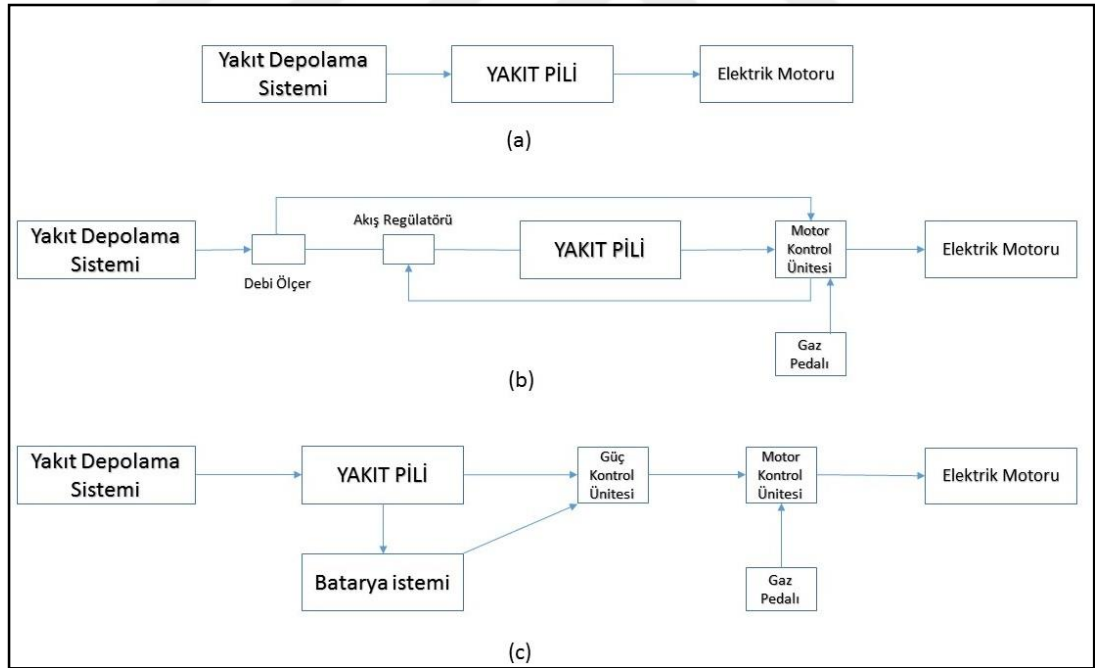
### **3.3 Gemilerde Yakıt Pili Sistemi**

Gemilere yakıt pili sistemlerinin kurulması, katılan çevresel düzenlemeler nedeniyle oldukça önem arz etmeye başlamıştır. Her yakıt pili sistemi kendi içerisinde farklı donanımlar içermektedir. Hatta her bir yakıt pili çeşidi kendi içerisinde de çalıştığı yakıtın cinsine, çalışma koşullarına ve dizaynına göre farklı ekipmanlar barındırabilmektedir (Mench, 2008). Bu bölümde bunlardan önemli olanları tanıtılacaktır. Yakıt pili ve hidrojen depolama yöntemleri daha önceki bölümlerde tanıtıldığı için burada tekrar tanıtılmayacaktır.

#### **3.3.1 Yakıt Pili Ekipmanları**

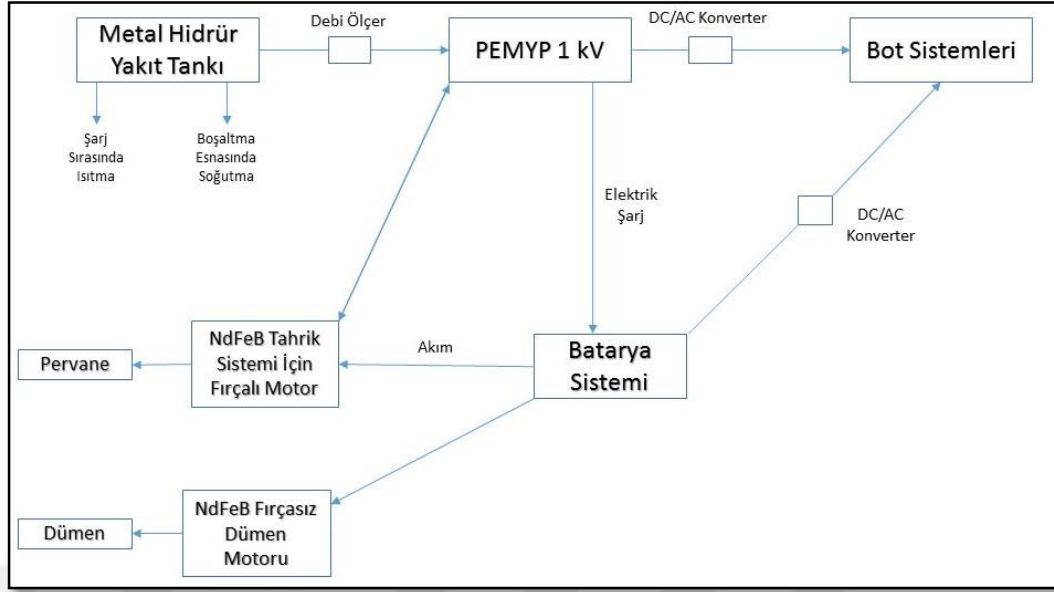
Gemilerde bulunan yakıt pili sisteminin ana elemanları ve gelişim süreci Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Affolter (2000) ve ekibinin Hydroxy 100 teknesi ile gerçekleştirdiği denemelerde bu şekilde bir sistem kurulmuş ve ilk denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde yakıt pilinin el ile kontrolünün çok zor olduğu ortaya

konulmuş ve sonraki çalışmalarda güç yönetim sistemi ve gaz pedalı eklenerek teknenin daha rahat seyir yapabilmesi amaçlanmıştır. Eklenen akış regülatörü ve veri kayıt sistemi sayesinde akış kontrol sisteminin hidrojen ve oksijen debilerini ölçerek buradaki değişimleri kontrol ünitesine gönderip yükün buna göre ayarlanması sağlanmıştır. Bu sayede karmaşık güç elektroniği devrelerine ihtiyaç duyulmamıştır. Ancak karşılaşılan bir başka önemli eksik ise yakıt pilinde bir arıza çıkması halinde ona alternatif bir sistemin gemide bulunmuyor olmasıdır. Bir sonraki çalışma da Hydroxy 300 teknesi batarya sistemleri eklenerek hibrit bir tekne olarak inşa edilmiştir. Bataryaların eklenmesi ile birlikte güç yönetimi problemi ortaya çıkmış ve bunun için elektronik güç kontrol devreleri de sisteme entegre edilmiştir. Eklenen bu sistem yakıt pilinin verimsiz çalıştığı yüklerde gücün bataryalardan sağlanması ile daha verimli bir şekilde kullanımını sağlamıştır. Ayrıca pahalı regülasyon valflerine ihtiyaç duyulmaması sağlanmıştır. Ancak eklenen donanımlar ekstra bir maliyet ve güç tüketimi de getirmiştir (Affolter, 2000).



Şekil 3.21 (a) Yakıt pili sistemi, (b) Yakıt pili otomasyon sistemi, (c) Yakıt pili/batarya hibrit sistemi

Yapılan her uygulamada farklı sistemler tasarlanmış ve bunlardan bir tanesi Şekil 3.22’de gösterilmektedir.



Şekil 3.22 Ross Barlow kanal botu yakıt pili sistemi (Bevan ve diğer., 2011)

### 3.3.2 Batarya Sistemleri

Bataryalar, elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye çevrilerek depolanan aygıtlardan günümüzde en çok kullanılanlarıdır. Değişken güç ihtiyaçlarında, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek miktarda enerjiyi alternatiflerine göre daha ekonomik ve güvenilir bir şekilde depolayabildiği görülmüştür (Divya ve Østergaard, 2009).

Farklı alanlarda değişik çeşitlerde akülerin kullanıldığı görülmektedir. Tablo 3.4'te gösterildiği üzere en iyi karakteristiği lityum iyon bataryalar gösteriyor olsa da yüksek maliyetleri nedeniyle denizcilik alanında daha az tercih edilmektedir (Dedes, Hudson ve Turnock, 2012). Ayrıca lityum iyon bataryaların % 100'e yakın enerji depolama verimliliği ile en yüksek enerji yoğunluğuna sahip aküler olduğu belirtilmiştir (Hall ve Bain, 2008). 2015 yılında Kore'de denize indirilen turistik amaçlı botta pahalı olmasına karşın belirtilen özellikleri nedeniyle lityum iyon piller tercih edilmiştir (Choi ve diğer., 2016).

Düşük maliyetleri, farklı ebatlarda üretilebilmeleri ve uzun yıllardır devam eden araştırma geliştirme faaliyetleri sayesinde performans karakteristiği iyice belirlenmiş olan kurşun/asit bataryalar birçok uygulamada tercih edilmektedir (Poullikkas, 2013).

İngiltere’de bir kanal botuna dönüştürülen Ross Barlow isimli botta ise ucuz ve kolay bulunabilme gibi nedenler ile kurşun/asit bataryalar kullanılmıştır (Bevan ve diğer., 2011).

“Zebra akü” olarak da anılan sodyum/nikel klorür aküler ortalama 270 ila 350 °C sıcaklıklarda çalışmaktadır. Enerji yoğunluklarının da oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Uygulamada karşılaşılabilecek en önemli dezavantajlar, operasyon güvenliği ve uzun süreli depolamada yaşanabilecek sorunlar olarak vurgulanmıştır (Manzetti ve Mariasiu, 2015).

Ucuz malzemeden üretilebilmeleri, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürleri gibi nedenlerden dolayı elektrik şirketlerinin enerji depolama uygulamalarında tercih edilmektedir. 300-350 °C arası çalışma sıcaklıkları ve sodyum polisülfür bileşiklerinin yüksek korozyon özellikleri nedeniyle genelde büyük çaplı şebekeye bağımlı enerji depolama uygulamalarında kullanılmaktadır (Poullikkas, 2013).

Şarj/deşarj döngüsü; bir bataryanın nominal kapasitesine kadar şarj edilip, ardındandeşarj olması işlemidir. Bu işlem bir şarj/deşarj döngüsü olarak tanımlanmıştır. Şarj durumu; bataryada kalan elektrik enerjisinin bir göstergesidir. % 30deşarj olmuş bir bataryanın şarj durumu % 70’dir. Deşarj derinliği; bataryanın bir döngüde, şarj edilmeden önce, ne kadardeşarj olduğunu gösteren değer olarak açıklanmıştır (Bölat, 2013).

Denizcilik alanında elektrik ile sevk edilecek gemilerde ilk yatırım maliyetlerini kullanım şartlarına bağlı olarak zamanla karşılayabilecek ve salımları azaltabilecek iyi bir alternatif olarak en yüksek potansiyele sahip batarya sisteminin “ZEBRA” olarak da adlandırılan sodyum/nikel klorür aküler olduğuna dikkat çekilmiştir (Dedes ve diğer., 2012).

Tablo 3.4 Batarya çeşitleri (Corey, 2010)

| Batarya Tipi                  | Verim   | Spesifik Enerji (Wh/kg)  | Yaşam Döngüsü                        | Maliyet            | Uygulama Alanları                                                     | Özellikleri                                            | Güç Seviyesi  |
|-------------------------------|---------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------|
| Kurşun Asit (sulu)            | % 72-78 | 25 Wh/kg @ -5 - 40°C     | 1000-2000 %70 deşarj derinliği 6 yıl | 3,2\$/kg 1200\$/kW | Acil Durum Gücü                                                       | Yüksek bakım oranı ve ağırlık                          | Megavat 10 MW |
| Kurşun Asit (valf ayarlamalı) | % 72-78 | 30-50 Wh/kg @ -5 - 40°C  | 200-300 %80 deşarj derinliği 3-6 yıl | 1500\$/kW          | Kara, Deniz ve Hava Taşıtları                                         | Taşınabilir, düşük bakım oranı                         | 300 kW        |
| Nikel Kadmiyum                | % 72-78 | 45-80 Wh/kg @ -40 - 50°C | 3000 %100 deşarj derinliği 5-20 yıl  | 2400\$/kW          | Endüstriyel Güç ve Acil Durum Gücü                                    | Ağır, zehirli ve yüksek şarj oranı                     | Megavat 27 MW |
| Sodyum Sülfür                 | 89%     | 100 Wh/kg @325°C         | 2500 %100 deşarj derinliği 15 yıl    | 3200\$/kW          | Sabit ve Yardımcı Servisler                                           | Yüksek sıcaklıkta operasyon                            | 9,6 MW        |
| Lityum İyon                   | 100%    | 90-190 Wh/kg @-30 - 60°C | 3000 %80 deşarj derinliği 5-20 yıl   | 90\$/kg 3800\$/kW  | Taşınabilir Elektronik Cihazlar, Elektrikli Taşıtlar ve Uzay Araçları | Korunması için yüksek maliyet                          | kW            |
| Vanadyum Redoks               | 85%     | 30-50 Wh/kg @0 - 40°C    | 10000 %75 deşarj derinliği           | 15\$/kg 2600\$/kW  |                                                                       | İhmal edilebilir kendiliğinden deşarj                  | 1,5 MW        |
| Çinko Brom                    | 75%     | 70 Wh/kg @0 - 40°C       | 1500                                 | 2500\$/kW          |                                                                       | Hantal, düşük güç, zararlı parçalar                    | Megavat 1 MW  |
| Gümüş Kadmiyum                | 95%     | 71 Wh/kg @-25 - 70°C     | 300-800 3-4 yıl                      |                    | Taşınabilir Hafif Ekipmanlarda, Uzay Uydularında                      | Yüksek maliyet ve enerji yoğunluğu, düşük bakım        |               |
| Sodyum/Nikel Chloride         | 100%    | 115 Wh/kg @270 - 350°C   | 2500                                 | 12,7\$/kg          | Elektrikli Taşıtlarda                                                 | Yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek sıcaklıkta operasyon |               |

### 3.3.3 Elektrik Sevk Motorları

Elektrik sevk motorları, pervanelerin tahriklendirilmesi için bir güç kaynağından aldıkları elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürebilen motorlardır. Denizcilik alanında senkron motorlar, asenkron motorlar ve sürekli mıknatıslı motorlar en çok kullanılan elektrik sevk motoru tipleri olarak öne çıkmaktadır. Bunların yanı sıra son zamanlarda kullanılmaya başlanan yüksek sıcaklık süper iletken motorlar da denizcilik uygulamalarında tercih edilmeye başlanmıştır (Ådnanes, 2003).

Orta ve yüksek güç gereksinimi durumlarında gemilerde en fazla tercih edilen motor türünün asenkron motorlar olduğu belirtilmiştir. Özellikle tahriklenmenin doğrudan elektrikli sevk motoru ile sağlandığı denizcilik uygulamalarında bu tip motorların kullanıldığı görülmektedir (Ådnanes, 2003).

Frekans ve kutup sayısı ile orantılı olarak hareket eden sabit bir hızda dönen alternatif akım makinelerine senkron makine denir. Eğer senkron makineye elektrik enerjisi verilip mekanik enerjisi elde edilirse senkron motor olarak çalışacağı belirtilmiştir. Bu motorlar yüksek ve çok yüksek güç ihtiyacı duyulan özel olarak üretilen gemilerde tercih edilmektedir. Özellikle buz kıran, yolcu gemileri ve platform destek gemileri gibi gemilerde tercih edilmektedir (Bassham, 2003).

Senkron motorlar ile aynı stator yapısını kullanmalarına rağmen çekirdeksiz sabit mıknatıslı rotor kullanılan sabit mıknatıslı senkron motorlar, asenkron motorlara göre daha yüksek verimlilik sağlamanın yanı sıra daha hafif bir konstrüksiyona sahiptir. Bu, gemi elektrik sevk sisteminde kullanılan nispeten yeni bir teknolojidir. Azipod tipi pervanelerle birlikte 4500 kW üzeri güç gerektiren gemilerde kullanılmaktadır (ABB, 2010). Ancak kullanılan manyetik malzemenin oldukça pahalı olması bu motorların farklı gemilerde kullanılmasındaki en büyük engel olarak göze çarpmaktadır.

Yüksek sıcaklık süper iletken motorlarında ise konvansiyonel elektrik motorları ile aynı yapıda stator bulunmaktadır, ancak yüksek sıcaklık süper iletkenleri ile oluşturulan manyetik bir rotora sahiptir. Bu sayede konvansiyonel elektrikli motorlara

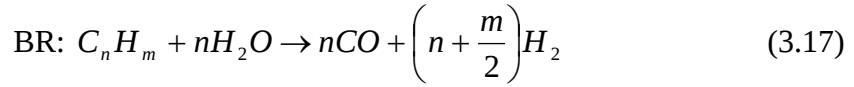
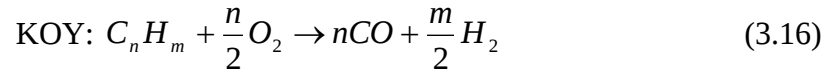
göre daha sessiz çalışan, bütün değişken yük değerlerinde yüksek verim sağlayan ve kompakt yapıya sahip olan bir elektrik motoru tipidir. Dezavantajı olarak ise süper iletken malzemenin süper iletkenlik özelliğini gösterebilmesi için -240 °C altında bir sıcaklığa ihtiyaç duyması ve bunun için ise karmaşık ve pahalı bir izolasyon sistemi gerektirmesidir. Bu nedenle gemilerde uygulaması henüz yaygınlaşmamıştır (Kalsi, Gamble, Snitchler ve Ige, 2006).

### **3.3.4 Yakıt Dönüştürme Sistemleri**

Yakıt pilleri için yakıt dönüştürme sisteminin temel amacı benzin, dizel yakıt ve doğal gaz gibi rahatlıkla bulunabilen enerji kaynaklarını yakıt pilinin ihtiyaç duyduğu bileşenlere çevirerek ona gerekli enerjiyi sağlayabilme olarak tanımlanmıştır (Shekhawat, Spivey ve Berry, 2011). Bu, hidrojenin doğada saf olarak bulunmaması, çok uçucu bir gaz olması, depolanmasının zor oluşu ve güvenliğinin sağlanmasının nispeten diğer yakıtlara göre daha zor olması gibi nedenler ile açıklanmıştır (Kaya, 2015).

Yakıt pilinin çeşidine bakmaksızın yakıt dönüştürücü ile elde edilen gaz akışının hidrojen açısından zengin olması gerekmektedir. Çünkü yukarıda sayılmış olan nedenler dolayısıyla hidrojen altyapısı henüz yaygınlaşmamıştır. Ancak uygulamaya bağlı yakıt dönüştürücüler sayesinde geleneksel yakıtlardan hidrojen oranı yüksek gaz akışları elde edilebilmektedir. Bu yakıtlara örnek olarak doğal gaz (metan), metanol, etanol, dimetil eter, propan, bütan, benzin, kerosen, jet yakıtları, dizel ve biyodizel çeşitli uygulamalarda kullanılmış olanları olarak verilmiştir (Shekhawat ve diğer., 2011).

Katalitik dönüştürme yöntemlerinden üç tanesi diğerlerine göre oldukça baskın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar kısmi oksidasyon yöntemi (KOY), buhar reformasyonu (BR) ve oksidatif buhar reformasyonudur (OBR). Bu dönüştürme yöntemlerinin reaksiyon denklemleri sırasıyla 3.16, 3.17 ve 3.18'de gösterilmiştir (Shekhawat ve diğer., 2011).



Katalitik olmayan dönüştürme yöntemleri de vardır ancak bunlar genellikle daha pahalı soy metallerle ihtiyaç duyması, alçak sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri için uygun olmaması, düşük sistem verimliliğine sahip olmaları gibi nedenlerden dolayı pek tercih edilmemektedir. Bu nedenle tezin kapsamı dışında bırakılmışlardır.

### 3.4 Literatür Taraması

Yakıt pillerinin ilk keşfi 1800’lü yılların sonlarına denk gelse de denizcilik alanında ilk kullanımı 1960’lı yılların başına rastlamaktadır. Literatürde bu konu ile ilgili yapılan başlıca yayınlar da bu tarihlere denk gelmektedir. Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren askeri alanlarda da yakıt pili uygulamaları yaygınlaşmıştır. İlk olarak Amerikan Deniz Donanması 1960’lı yıllardan itibaren yakıt pilinin savaş gemilerinde kullanılmasına ilişkin araştırma ve geliştirme faaliyetlerini sürdürmüştür. Daha sonra 1970’li yıllarda da Almanya özellikle dizel elektrik ile sevk edilen denizaltılarda havadan bağımsız tahrik sisteminin uygulanabilmesi açısından en uygun yöntemin yakıt pili olduğuna karar vermiş ve bu alanda çalışmalar yürütmüştür. Bu çalışmalara Kanada hükümeti de 1980’li yıllardan itibaren katılmıştır (Weaver ve Reidy, 2002).

Avrupa’da özellikle göllerde içten yanmalı motorların kullanımına ilişkin oldukça katı düzenlemelerin getirilmesi ya da yasaklamalardan dolayı daha çevreci ve alternatif sevk sistemlerine yönelme zorunluluğu getirilmiştir. Bu sistemlerden biri İsviçre’de Affolter tarafından küçük pedallı tipte bir tekneyi (pedalsız bir şekilde) 100 W’lık bir yakıt pili ve sıkıştırılmış hidrojen ile sevk etmek suretiyle başarılmıştır. Ancak çalışmada teknenin sürücüsünün aynı anda tekneyi sürmesi ve yakıt pilini kontrol etmesinin güç olduğu görülmüş ve ikinci çalışma için tam otomatik bir yakıt pili ihtiyacının bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. İkinci projeye ise “Energy Department of

Lausanne” destekleyici olmuştur. Operasyonun daha kolay gerçekleştirilmesi için sisteme bir veri kaydedici ve DAU marka regülatör eklenmiştir ve gaz pedalı ile teknenin hızı kolaylıkla ayarlanabilir hale gelmiştir. Üçüncü projede ise bataryalar ve yakıt pili ile çalışan hibrit bir sistem tasarlama fikri ortaya çıkmıştır. Yakıt pili ile seyir esnasında bir sorun olması durumunda ikinci bir güç kaynağı ile hareket edebilmesi amaçlanmıştır. Bunun için 300W’lık bir PEMYP üretilmiş ve bataryalar ile hibrit olarak çalışacak şekilde sisteme entegre edilmiştir. Sisteme bir kontrol paneli eklenmiş ve anlık olarak değerlerin bir ekran üzerinden takip edilebilmesi de sağlanmıştır (Affolter, 2000).

En fazla uygulamaya yelkenli teknelerde ve yatlarda rastlanmaktadır ve bunların bir kısmı Tablo 3.5’de gösterilmiştir. 2002 yılında Malt’s Mermaid III isimli 5,8 m uzunluğunda bir yelkenli tekne Japon Yuasa firması tarafından geliştirilmiştir. Teknede DMYP yardımcı güç ünitesi olarak kullanılmıştır (Cropper, 2004). Haveblue XVI isimli yelkenli teknede 2005 yılında denize indirilmiştir (Finn, 2005). 2007 yılında ise Voller firması Emerald Benetau 411 isimli Atlantik Okyanusu yarışlarında kullanılan bir bota yardımcı güç ünitesi olarak yakıt pili entegre etmiştir (Voller Emerald, 2007). Icelendic New Energy firması ise yardımcı güç ünitesi olarak hibrit bir balina gözlem gemisi geliştirmiş ve bu sayede gözlem sırasında yakıt pili geminin güç ihtiyacını balinaları rahatsız etmeden sessiz bir şekilde karşılayabilmiştir. Gold Green Hygen isimli Busan kıyılarında turistik gezi amaçlı bir gemi inşa edilmiş ve geminin üretiminin tamamı işbirlikçi firmalar tarafından gerçekleştirilmiştir. PEMYP/bataryalar kullanılarak tamamen elektrikli ve hibrit bir gemi geliştirilmiştir (Choi ve diğer., 2016).

Yakıt pillerinin bir diğer uygulama alanı ise deniz taksilerinde görülmüştür. Bu alanda ki ilk örneği Almanya’da Expo 2000 sırasında kullanılan Hydra isimli PEMYP ile sevk edilen bir gezinti teknesidir (Sattler, 2000). Bir başka örneği ise Amerika’da Duffy herreshoff DH30 isimli bir deniz taksidir. İçerisinde 4 adet 1,5 kW’lık PEM tipi yakıt pili bulunmakta ve bu yakıt pillerinden elde edilen enerji ile tahriklenen bir adet 20 beygir gücünde elektrik motoru bulunmaktadır (Sembler ve Kumar, 2011).

Bunların dışında Bölüm 3.2’de detaylı olarak verilen eğlence amaçlı tekneler, yatlar/yelkenli gemiler, deniztaksi/feribotlar, araştırma gemileri ve kanal botu gibi uygulamalar verilmiştir.

Bir başka uygulama da Urashima isimli ticari otonom sualtı aracında yapılmıştır. 4 kW’lık bir PEM tipi yakıt pili Mitsubishi Heavy Industry tarafından üretilmiştir. İlk tasarlandığında lityum iyon bataryalar ile çalışır şekilde 2000 yılında satışa sunulan Urashima, 2003 yılında menzilin artırılması amacıyla metal hidrür tanklarda depolanan hidrojen ve yakıt pili ile çalışacak şekilde yeniden üretilmiştir (Maeda ve diğer., 2006).

Günümüze kadar yapılmış olan önemli uygulamalar ve bu uygulamaların yayınlandığı kaynakların kronolojik olarak sıralandığı bir tablo “Google Akademik”, “ProQuest”, “Science Direct”, “Ulusal Tez Merkezi” ve “Web of Science” gibi üniversitemizin üye olduğu veritabanları taranarak Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5 incelendiğinde 78 projenin 54’ünde PEMYP’nin kullanıldığı göze çarpmakta. PEMYP dışında 6 projede EKYP, 4 projede DMYP, 4 projede KOYP, 3 projede AYP, 1 projede FAYP, 1 projede Al/O<sub>2</sub> yakıt pili ve 1 projede Al/Hidrojen peroksit yakıt pili kullanılmıştır. PEMYP’nin bu denli çok tercih edilmesinin nedenleri; kısa sürede ilk hareketi sağlayabilmesi, kompakt bir yapıya sahip olması ve ilk yatırım maliyetlerinin diğer alternatif yakıt pillerine oranla daha uygun olduğu daha önceki bölümlerde belirtilmişti (Barbir, 2012). Bunlara ek olarak Tablo 3.5’de yer 71. Numaralı SF-Breeze gemisine uygulanan yüksek sıcaklık PEMYP sisteminin yüksek güç ihtiyacı olan uygulamalarda da artık kullanılabildiğini göstermektedir. Daha önceleri sadece düşük ve orta güç gereksinimi olan uygulamalar için uygun olan PEMYP’leri ilerleyen süreçte artık yüksek güç ihtiyacını da karşılayabilecek düzeye ulaşacağı öngörülmüştür.

Tablo 3.5’e göre PEMYPleri’nin 100 W ile 2,5 MW, AYP’nin 5 ile 100 kW, DMYP’nin 30 W ile 2,2 kW, FAYP’nin 30 kW ile 60 kW, EKYP’nin 150 kW ile 3 MW, KOYP’nin 20 kW ile 2 MW güç aralığında kullanılabildiği görülmektedir.

Yüksek sıcaklık PEMYPleri gelişen teknolojiyle birlikte yüksek güç gereksinimi gereken uygulamalarda artık KOYPleri ve EKYPler'ine rakip olabileceğini göstermektedir.

Gezinti ve küçük yolcu gemileri ile yapılan yakıt pili uygulamaları daha önce belirtildiği gibi diğer uygulamalara kıyasla oldukça fazladır. İncelenen 78 uygulamadan 50 adeti bu alana girmektedir. İncelenen yakıt pili projelerinden sadece 5 tanesi askeri uygulama alanına girmekte ve geriye kalan 23 tanesi ise ticari gemiler ile yapılan yakıt pili projeleridir. Tablo 3.5'i gemi tiplerine göre incelersek en fazla proje yapılan gemi tipi 14 gemi ile gezinti tekneleri olmuştur. Bundan sonra en fazla proje yapılan gemi tipleri ise 8'er adet ile feribotlar ve yelkenli tekneler olmuştur. Bunların hemen ardından da 7 proje ile yatlar gelmektedir. Birçok farklı tipte gemi üzerinde proje gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde en fazla çalışmayı yapan ülke 26 proje ile Almanya olmuştur. Almanya'dan sonra ABD 14 ve İsviçre farklı 7 projede yer alarak çalışmaların yoğunlaştığı ülkeler olmuştur.

Önceki çalışmalar dikkate alındığında dizel yakıt ile sevk edilen bir arabalı vapurun aynı seyir süresi boyunca yakıt pili ile sevk edilmesi sonucu çevreye ve seyir performansına olan etkilerinin sistem dinamikleri yaklaşımı ile araştırıldığı ve değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Tablo 3.5 Uluslararası denizcilikte yakıt pili uygulama projeleri

| <b>Gezinti ve küçük yolcu gemileri ile yapılan yakıt pili projeleri</b> |                            |                     |             |            |                      |                 |                   |                          |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------|-------------|------------|----------------------|-----------------|-------------------|--------------------------|
|                                                                         | <b>Proje/gemi adı</b>      | <b>Tip</b>          | <b>Ülke</b> | <b>Yıl</b> | <b>Yakıt pili</b>    | <b>Güç (kW)</b> | <b>Proje tipi</b> | <b>Kaynak</b>            |
| 1                                                                       | ISE Research Ltd.          | Otonom sualtı aracı | Kanada      | 1987       | Al/O <sub>2</sub>    | 100             | Prototip          | McConnell (2010)         |
| 2                                                                       | PC 14                      | Otonom sualtı aracı | ABD/Kanada  | 1989       | PEMYP                | 3               | Prototip          | McConnell (2010)         |
| 3                                                                       | Hydroxy 100                | Gezinti teknesi     | İsviçre     | 1997       | PEMYP                | 0,1             | Prototip          | Affolter (2000)          |
| 4                                                                       | Ansaldo Richerche          | Yolcu teknesi       | İtalya      | 1998       | PEMYP                | 40              | Prototip          | Sattler (2000)           |
| 5                                                                       | Hydroxy 300                | Gezinti teknesi     | İsviçre     | 1998       | PEMYP                | 0,3             | Prototip          | Affolter (2000)          |
| 6                                                                       | MS Welfrieden              | Yolcu teknesi       | Almanya     | 1999       | PEMYP                | 10              | Prototip          | Sattler (2000)           |
| 7                                                                       | HUGIN                      | Otonom sualtı aracı | Norveç      | 2000       | Al/Hidrojen Peroksit | 1,2             | Ticari            | McConnell (2010)         |
| 8                                                                       | Hydra                      | Gezinti teknesi     | Almanya     | 2000       | AYP                  | 5               | Prototip          | Weaver ve Barret (2003)  |
| 9                                                                       | MW-Line Alpha              | Gezinti teknesi     | İsviçre     | 2000       | PEMYP                | 2               | Prototip          | Affolter (2000)          |
| 10                                                                      | Hydrocell Oy               | Gezinti teknesi     | Finlandiya  | 2000       | AYP                  | 30              | Prototip          | McConnell (2010)         |
| 11                                                                      | Sanfrancisco WTA Commuter  | Feribot             | ABD         | 2002-2005  | PEMYP                | 2 x 120         | Prototip          | Sembler ve Kumar (2011)  |
| 12                                                                      | Branec III                 | Yelkenli tekne      | İsviçre     | 2002       | PEMYP                | 0,3             | Prototip          | McConnell (2010)         |
| 13                                                                      | Malt's Mermaid III         | Yelkenli tekne      | Japonya     | 2002       | DMYP                 | 0,03            | Prototip          | Riantini (2010)          |
| 14                                                                      | No. 1 Yat                  | Yelkenli tekne      | Almanya     | 2002       | PEMYP                | 4,8             | Prototip          | Riantini (2010)          |
| 15                                                                      | Duffy Elektrik küçük tekne | Deniz taksi         | ABD         | 2003       | PEMYP                | 41.5            | Prototip          | Vogler ve Sattler (2016) |
| 16                                                                      | Urashima                   | Otonom sualtı aracı | Japonya     | 2003       | PEMYP                | 4               | Prototip          | McConnell (2010)         |
| 17                                                                      | Duffy-Herreshoff DH30      | Deniz taksi         | ABD         | 2003       | PEMYP                | 1,5 x 4         | Prototip          | Pike (2016)              |
| 18                                                                      | Hydroxy 3000               | Gezinti teknesi     | İsviçre     | 2003       | PEMYP                | 3               | Prototip          | Geiger (2003)            |
| 19                                                                      | DeepC                      | Otonom sualtı aracı | Almanya     | 2004       | PEMYP                | -               | Prototip          | McConnell (2010)         |
| 20                                                                      | Mamelie                    | Yelkenli tekne      | Almanya     | 2004       | DMYP                 | 0,05            | Prototip          | McConnell (2010)         |
| 21                                                                      | DCH Deniz taksi            | Deniz taksi         | ABD         | 2005       | PEMYP                | 1               | Prototip          | Sembler ve Kumar (2011)  |

Tablo 3.5 Devam

|    | Proje/gemi adı                | Tip                   | Ülke             | Yıl       | Yakıt pili | Güç (kW)  | Proje tipi | Kaynak                  |
|----|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----------|------------|-----------|------------|-------------------------|
| 22 | Shanghai Maritime University  | Yolcu teknesi         | Çin              | 2005      | PEMYP      | 2         | Tanıtım    | Sembler ve Kumar (2011) |
| 23 | H2 Yat GmbH                   | Yat                   | Almanya          | 2005      | PEMYP      | 1,2       | Tanıtım    | Vogler ve Pelka (2006)  |
| 24 | Hydroxy 2000                  | Gezinti teknesi       | İsviçre          | 2005      | PEMYP      | 2         | Prototip   | Riantini (2010)         |
| 25 | Have Blue XV1                 | Yelkenli tekne        | ABD              | 2005      | PEMYP      | 10        | Prototip   | Sembler ve Kumar (2011) |
| 26 | VEGA/Pilot Vaporetto /Accadue | Küçük tekne           | İtalya           | 2005-2006 | PEMYP      | 12        | Prototip   | Bertaggia ve Moi (2009) |
| 27 | H2 Yat GmbH                   | Yat                   | Almanya          | 2006      | PEMYP      | 1,4 x 2   | Tanıtım    | Vogler ve Pelka (2006)  |
| 28 | Xperiance NX hydrogen         | Gezinti teknesi       | Hollanda         | 2006      | PEMYP      | 1,2       | Prototip   | Sembler ve Kumar (2011) |
| 29 | Trolling boat                 | Küçük balıkçı teknesi | Singapur/ABD     | 2007      | PEMYP      | 0,3       | Prototip   | Sembler ve Kumar (2011) |
| 30 | Cobalt 233 ZET                | Gezinti teknesi       | Almanya          | 2007      | PEMYP      | 24        | Prototip   | Sembler ve Kumar (2011) |
| 31 | Solgenia                      | Araştırma teknesi     | Almanya          | 2007      | PEMYP      | 3,6       | Prototip   | Leiner (2014)           |
| 32 | Emerald Benetau 411           | Yelkenli tekne        | Birleşik Krallık | 2007      | PEMYP      | 1         | Prototip   | McConnell (2010)        |
| 33 | Alsterwasser                  | Yolcu gemisi          | Almanya          | 2008      | PEMYP      | 48 x 2    | Ticari     | Rampen ve diğer. (2013) |
| 34 | Pogo 2                        | Yelkenli tekne        | Almanya          | 2009      | DMYP       | 1,6 - 2,2 | Prototip   | McConnell (2010)        |
| 35 | Tropical Green Technologies   | Küçük tekne           | Yunanistan       | 2009      | PEMYP      | 1         | -          | McConnell (2010)        |
| 36 | Chaloupe                      | Küçük tekne           | Danimarka        | 2009      | DMYP       | 0,5       | Prototip   | McConnell (2010)        |
| 37 | New Clermont                  | Yelkenli tekne        | ABD              | 2009      | PEMYP      | 4,9       | Prototip   | McConnell (2010)        |
| 38 | Frauscher 600 Riviera HP      | Gezinti teknesi       | Avusturya        | 2009      | PEMYP      | 4         | Ticari     | McConnell (2010)        |
| 39 | BELBIM                        | Feribot               | Türkiye          | 2009      | PEMYP      | 48        | Prototip   | McConnell (2010)        |
| 40 | Zero CO2                      | Yat                   | Fransa           | 2009      | PEMYP      | 30        | Prototoip  | McConnell (2010)        |
| 41 | NemoH <sub>2</sub>            | Kanal teknesi         | Hollanda         | 2009      | PEMYP      | 60-70     | Prototip   | McConnell (2010)        |
| 42 | Protium/Ross Barlow           | Kanal teknesi         | Birleşik Krallık | 2010      | PEMYP      | 1         | Prototip   | Bevan ve diğer. (2011)  |

Tablo 3.5 Devam

|                                                        | Proje/gemi adı         | Tip                  | Ülke             | Yıl       | Yakıt pili  | Güç (kW) | Proje tipi | Kaynak                            |
|--------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|------------------|-----------|-------------|----------|------------|-----------------------------------|
| 43                                                     | MF Vagen               | Feribot              | Norveç           | 2010      | HT-PEMYP    | 12       | Prototip   | Tronstad ve diğer. (2017)         |
| 44                                                     | Fodiator               | Electr. drive        | Almanya          | 2010      | PEMYP       | 2,5      | Ticari     | Vogler ve Sattler (2016)          |
| 45                                                     | Hornblower Hybrid      | Feribot              | ABD              | 2012      | PEMYP       | 32       | Prototip   | Tronstad ve diğer. (2017)         |
| 46                                                     | Hydrogenesis           | Feribot              | Birleşik Krallık | 2012      | PEMYP       | 12       | Prototip   | Tronstad ve diğer. (2017)         |
| 47                                                     | Fortuna                | Gezinti teknesi      | Almanya          | 2013      | PEMYP       | 2,4      | Ticari     | Vogler ve Sattler (2016)          |
| 48                                                     | Ming Dao University    | Gezinti teknesi      | Tayvan           | 2013      | PEMYP       | 5,5      | Prototip   | Shih ve diğer. (2014)             |
| 49                                                     | Gold Green Hygen       | Turist botu          | Güney Kore       | 2016      | PEMYP       | 25 x 2   | Ticari     | Choi ve diğer. (2016)             |
| 50                                                     | Energy Observer        | Araştırma gemisi     | Fransa           | 2017      | PEMYP       | -        | Araştırma  | Owierkiewicz ve Malinowska (2017) |
| <b>Ticari gemiler ile yapılan yakıt pili projeleri</b> |                        |                      |                  |           |             |          |            |                                   |
|                                                        | Proje/gemi adı         | Tip                  | Ülke             | Yıl       | Yakıt pili  | Güç (kW) | Proje tipi | Kaynak                            |
| 51                                                     | Arctic Energy Ltd.     | Eğitim gemisi        | ABD              | 1984      | FAYP        | 30 - 60  | Prototip   | Kumm (1990)                       |
| 52                                                     | US MARAD               | Konteynır gemisi     | ABD              | 1998      | EKYP        | 3000     | -          | Allen ve diğer. (1998)            |
| 53                                                     | FCShip case 1          | RoRo                 | Almanya          | 2002-2004 | EKYP/KOYP   | 2000     | Araştırma  | Sembler ve Kumar (2011)           |
| 54                                                     | FCShip case 2          | Feribot              | Almanya          | 2002-2004 | PEMYP       | 400      | Araştırma  | Sembler ve Kumar (2011)           |
| 55                                                     | Wallenius/Orcelle      | Araç taşıyıcı        | İsveç            | 2004      | -           | 10       | Araştırma  | Sembler ve Kumar (2011)           |
| 56                                                     | New-H-Ship             | -                    | İzlanda          | 2004-2005 | -           | -        | Araştırma  | Sembler ve Kumar (2011)           |
| 57                                                     | FELICITAS              | Yat                  | Almanya          | 2005-2008 | PEMYP /KOYP | 200      | Araştırma  | Tse ve diğer. (2010)              |
| 58                                                     | MCWAP                  | RoRo                 | İtalya           | 2005-2011 | EKYP        | 150      | Araştırma  | Tronstad ve diğer. (2017)         |
| 59                                                     | Methapu/Undine         | Otomobil gemisi      | Finlandiya       | 2006-2009 | KOYP        | 20       | Prototip   | de-Troya ve diğer. (2015)         |
| 60                                                     | FellowShip/Viking Lady | İkmal gemisi         | Norveç           | 2007-2010 | EKYP        | 320      | Prototip   | Tronstad ve diğer. (2017)         |
| 61                                                     | SMART H2/Elding        | Balina izleme gemisi | İzlanda          | 2007-2010 | PEMYP       | 10       | Prototip   | McConnell (2010)                  |
| 62                                                     | Green Tug              | Römorkör             | Hollanda         | 2008      | PEMYP       | 2 x 100  | Araştırma  | Sembler ve Kumar (2011)           |

Tablo 3.5 Devam

|                                              | Proje/gemi adı         | Tip                   | Ülke    | Yıl       | Yakıt pili | Güç (kW) | Proje tipi | Kaynak                    |
|----------------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------|-----------|------------|----------|------------|---------------------------|
| 63                                           | PaXell /Mariella       | Yolcu gemisi          | Almanya | 2009-2017 | HT-PEMYP   | 2 x 30   | Araştırma  | Tronstad ve diğer. (2017) |
| 64                                           | SchIBZ                 | Yat                   | Almanya | 2009-2015 | KOYP       | 100      | Araştırma  | Tronstad ve diğer. (2017) |
| 65                                           | e-4 Ship               | -                     | Almanya | 2009-2016 | PEMYP      | -        | Araştırma  | Tronstad ve diğer. (2017) |
| 66                                           | Germanischer Lloyd     | İkmal gemisi          | Almanya | 2012      | -          | 5000     | Araştırma  | Vogler ve Sattler (2016)  |
| 67                                           | Scandlines             | Feribot               | Almanya | 2012      | -          | 8300     | Araştırma  | Vogler ve Sattler (2016)  |
| 68                                           | Fincantieri            | Yat                   | İtalya  | 2013      | PEMYP      | 260      | Ticari     | Vogler ve Sattler (2016)  |
| 69                                           | H2-Yachts              | Yat                   | İsviçre | 2013      | PEMYP      | -        | Araştırma  | Vogler ve Sattler (2016)  |
| 70                                           | CREATING               | Gezinti teknesi       | -       | 2006      | -          | -        | Araştırma  | Vogler ve Sattler (2016)  |
| 71                                           | SF-Breeze              | Feribot               | ABD     | 2015      | PEMYP      | 120 x 20 | Prototip   | Tronstad ve diğer. (2017) |
| 72                                           | Rivercell-Electra      | Römorkör              | Almanya | 2015-2016 | HT-PEMYP   | 250      | Araştırma  | Tronstad ve diğer. (2017) |
| 73                                           | Rivercell              | Nehir gezinti teknesi | Almanya | 2015-2016 | HT-PEMYP   | -        | Araştırma  | Sembler ve Kumar (2011)   |
| <b>Askeri gemilerde yakıt pili projeleri</b> |                        |                       |         |           |            |          |            |                           |
|                                              | Proje/gemi adı         | Tip                   | Ülke    | Yıl       | Yakıt pili | Güç (kW) | Proje tipi | Kaynak                    |
| 74                                           | Class 205 Denizaltı U1 | Denizaltı             | Almanya | 1988-1989 | AYP        | 100      | Prototip   | Sembler ve Kumar (2011)   |
| 75                                           | U212A                  | Denizaltı             | Almanya | 1995      | PEMYP      | 9 x 34   | Ticari     | Sembler ve Kumar (2011)   |
| 76                                           | USCGC Vindicator       | Keşif gemisi          | ABD     | 1999      | EKYP       | 4 x 625  | Araştırma  | Allen ve diğer. (1998)    |
| 77                                           | U 214                  | Denizaltı             | Almanya | 2000      | PEMYP      | 240      | Ticari     | Sembler ve Kumar (2011)   |
| 78                                           | SSFC                   | Askeri                | ABD     | 2000      | EKYP       | 675      | Araştırma  | Sembler ve Kumar (2011)   |

## **BÖLÜM DÖRT**

### **GEMİLERDE YAKIT PİLİ UYGULAMASI ARAŞTIRMASI: VERİ TOPLAMA VE ANALİZ**

#### **4.1 Amaç**

Denizcilik sektöründe uluslararası kuruluşların ortaya koyduğu yeni çevresel düzenlemeler göz önünde bulundurulduğunda akademik ve endüstriyel açıdan farklı uygulamaların yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bu zorunluluk geleneksel olarak kullanılan dizel ana makinelerin yerine yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları ile çalışan sevk sistemlerinin tasarlanmasına yol açmıştır. Bu sevk sistemlerinden üzerinde en fazla araştırma geliştirme çalışmaları hibrit sistemler üzerinde yapılmaktadır. Özellikle yakıt pilleri ile birlikte bataryaların ve fotovoltaiik panellerin bütünleşik bir şekilde kullanıldığı hibrit sistemler araştırmalara konu olmaktadır. Literatürde yakıt pili ve bataryalar kullanılarak oluşturulan hibrit sistemlerden arabalı vapurlar için tasarlanan bir örneğe rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada bir arabalı vapurdan gerçek seyir verileri alınması ve buna etki eden değişkenlerin belirlenmesi açısından keşifsel bir yöntem kullanılarak arabalı vapura uygun hibrit bir sevk sistemi tasarlanması amaçlanmıştır. Simülasyon ortamında bu veriler kullanılarak uygun bir model oluşturulması ve simülasyon ortamında oluşturulan bu modelin, üç farklı batarya tipi için analiz edilmesi planlanmıştır. Bu çalışmanın amacı tasarlanan hibrit sevk sisteminin gemiye uygunluğunun ve arabalı vapurun günlük seyir ihtiyacını karşılayıp karşılamayacağının sistem dinamikleri yaklaşımı ve Matlab/Simulink yazılımı ile modellenerek incelenmesidir. Ayrıca hibrit sevk sistemi için en uygun batarya tipinin seçilmesine etki eden değişkenler belirlenerek oluşturulan dinamik model ile bunların birbirleri ile olan etkileşimlerinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

#### **4.2 Metodoloji**

Bu çalışmada bir arabalı vapurda yakıt pili ve batarya hibrit sevk sisteminin kullanımının araştırılması, bu alandaki değişkenlerin belirlenebilmesi açısından keşifsel bir nitelik taşımaktadır. Keşifsel çalışmalar yeni bir araştırmada yeni bilgiler

araştırmayı, neler olduğunu öğrenmeyi, sorunun detaylı olarak kavranabilmesini, farklı perspektiflerden bakabilmeyi ve bunlara dayalı olarak yeni çözümler oluşturmayı kapsamaktadır (Runeson ve Höst, 2009; Kothari, 2004).

Çalışmada, nicel araştırma yöntemlerinden simülasyon kapsamında sistem dinamikleri yaklaşımı ve Matlab/Simulink yazılımı uygulanmıştır. Gemiden alınan veriler ile oluşturulan dinamik model, Vensim® programı ile gerçekleştirilmiştir. Sistem dinamikleri ile ilgili çalışmalarda Vensim® yazılımı yoğun bir kullanıma sahiptir (Pamık, Nuran ve Cerit, 2015; Coyle ve Gardiner, 1991; Handani, Ishida, Nishimura ve Hariyanto, 2011). Gemiden aldığımız verileri dinamik bir simülasyona çevirmek için bu program tercih edilmiştir. Buradan elde edilen veriler hibrit sevk sisteminin modellendiği Matlab/Simulink yazılımına aktarılmıştır. Matlab/Simulink yazılımı mühendislik çalışmalarında yaygın ve geçerli bir programdır. Aynı zamanda bize hazır paket modeller sunması simülasyonun kalitesini ve doğruluğunu arttırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı Matlab/Simulink yazılımı tezde kullanılmıştır. Matlab/Simulink simülasyonda kullanılacak üç farklı batarya tipinin belirlenmesi için yapılan araştırma sonucunda denizcilik alanında lityum iyon, kurşun asit ve nikel metal hidrit bataryaların kullanıldığı gözlemlenmiştir (Konur, 2016). Yapılan model 2 farklı senaryo için çalıştırılmıştır. Bunlardan ilki geminin sadece bataryalar ile sevk edilmesi durumunda seçilen batarya tiplerinin seyir süresine etkilerini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu bataryaların eşit seyir süreleri sağlamaları durumunda toplam ağırlıklarının karşılaştırılması da yapılmıştır. Diğer senaryo ise bu bataryalar ile seçilen PEM tipi bir yakıt pilinin hibrit olarak gemiyi sevk etmesi durumunda batarya gruplarının ağırlıklarına ve sefer süresine ne gibi bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

#### ***4.2.1 Veri Toplama Aracının Oluşturulması***

Yakıt pili ve batarya hibrit sisteminin, vapurlarda dizel makinelerle alternatif olarak kullanılmasının değerlendirildiği tez çalışmasında veri toplama aracını sefer sırasında kayıt altına alınan verilerin kaydedildiği tablolar oluşturmaktadır. Oluşturulan tablolar 2 sütundan oluşmakta, ilk sütun süreyi ikinci sütun ise o andaki güce ilişkin verileri içermektedir. Bu verilerin güvenilirliğini arttırmak için farklı tarihlerde 3 kere gemiye

çıkılmıştır. Bu üç günde de gerçekleştirilen bütün seferlere eşlik edilmiş ve toplamda 66 seferin verileri alınmıştır. Seçilen veri seti geminin tam dolu olduğu duruma göre belirlenmiştir.

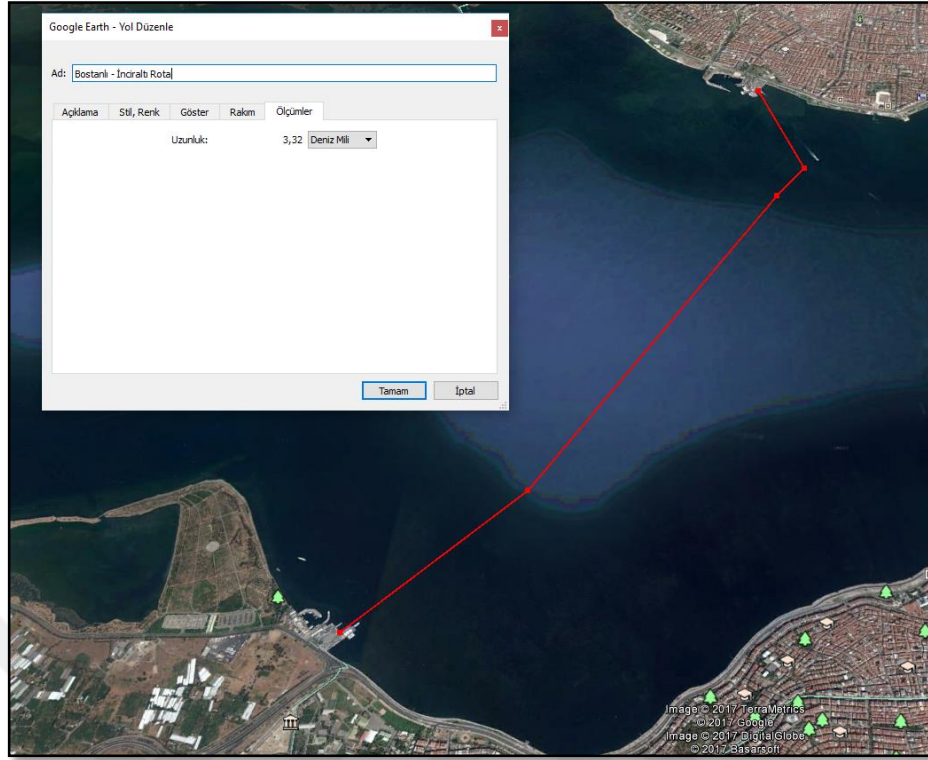
#### **4.2.2 Uygulama Aracının Seçimi ve Özellikleri**

Çalışma Şekil 4.1 de gösterildiği üzere İzmir Körfezinde Bostanlı-Üçkuyular seferini yapan özellikleri aşağıda bahsedilen Ahmet Piriştina isimli arabalı vapurdan alınan veriler ile yapılmıştır. Literatürde, daha önce bu boyutlardaki arabalı vapurların yakıt pili ile sevk edilmesi konusunda çalışmanın yapılmaması motivasyon kaynağı olmuştur.

Yakıt pili sisteminin modellenmesinin gerçekleştirildiği arabalı vapur Şekil 4.1 de gösterilen rotada günde 22 sefer yapacak şekilde hizmet vermektedir. Yaklaşık olarak toplam seyir mesafesi 3,32 deniz milidir.

Geminin ortalama seyir hızı 9,5 knot civarındadır. Körfezde gün içerisinde hâkim rüzgâr hızı saatte 15 deniz mili civarındadır ve bu da geminin seyir hızını rüzgâra karşı iken 9,0 knot civarlarına rüzgârı arkadan aldığı durumlarda ise 10,0 knot civarlarına çıkarmaktadır. Özellikle rüzgârı karşıdan aldığı durumlarda seyir hızının düşmesinin yanı sıra yakıt harcamı da oldukça artmaktadır. Bunun dışında yolcuların konforunu etkileyen titreşimlere ve gürültüye neden olmaktadır.

Örnek feribot, bütün seyir ekipmanlarının ve gemi makinelerinin köprü üstünden kontrolünün sağlandığı ve ihtiyaç duyulan bütün sıcaklık, basınç ve tankların doluluk oranları gibi değerlerin okunabildiği oldukça gelişmiş sistemlerle donatılmıştır. Geminin üzerinde hem ana makinelere hem de jeneratörlere bağlı elektronik akış ölçerler ile hem anlık hem de günlük yakıt sarfiyatı kolaylıkla izlenmekte ve kontrol edilmektedir. Feribotun günlük yakıt sarfiyatı yapılan toplam 22 sefer sonunda ortalama 2200 litre ile 2600 litre arasında, sefer başına yapılan yakıt sarfiyatı ise 100 litre ile 118 litre arasında değişmektedir.



Şekil 4.1 Arabalı vapur rotası ve seyir mesafesi

Feribotun yaptığı toplam seyir, yakıt tüketimine göre 4 farklı kategori altında değerlendirilebilir. İlki feribotun limanda bulunduğu sırada yükleme ve tahliye yaptığı zaman aralığı, ikincisi feribotun limandan ayrıldığı ve otomatik pilota kadar geçene kadar ki süre, üçüncüsü otomatik pilotta sabit hızda yapılan seyir süresi ve son olarak feribotun limana yanaşma manevrası yaptığı kısımdır.

Araştırma, seyirler sırasında alınan veriler ve feribotun Kaptanlarından alınan bilgiler ışığında geminin tam dolu olduğu (71 araç) koşullarda gerçekleştirilmiştir. Körfeze hâkim hava ve deniz koşullarında yapılan tipik seferler sonunda yükleme ve tahliye işlemi havanın koşullarına, yanaşılan iskelenin ve limanın koşullarına, gemiye yüklenen araç sayısına ve nadir de olsa yaşanabilecek olağanüstü durumlara bağlıdır. Ancak olağan koşullarda – açık hava ve tecrübeli personel – yükleme/boşaltma işlemleri ortalama olarak toplam 7 dakika civarında sürdüğü gözlemlenmiştir.

Kalkış manevrası feribotun limandan ayrılarak 9,5 knotlık sabit seyir hızında oto pilota geçirilene kadar ki süre olarak kabul edilmiştir. Geminin limandan ayrılması ve

otomatik pilota geçene kadar ki süre yaklaşık 4 dakika olarak gözlemlenmiştir. Tabii ki bu süreye deniz ve hava koşulları, kaptan ve dümencinin tecrübeleri, geminin kondisyonu gibi faktörler de etki edebilmektedir.

Geminin oto pilot ile yaptığı seyir süresi ortalama olarak 15 dakika civarında sürmektedir. Bu sürede gemi ortalama 9,5 knot hızla gitmektedir. Bu süre özellikle deniz ve hava koşullarından, geminin koordinasyonundan, dümencinin tecrübesi ve deniz trafiğinden etkilenebilmektedir.

Geminin limana yanaşma manevrası ise yaklaşık olarak 4,5 dakika civarında sürdüğü ölçülmüştür. Yanaşma manevrası geminin oto pilottan çıkarılıp kaptan ve dümenci tarafından kontrol edilmeye başlandığı andan geminin limana yanaştığı ana kadar geçen süre olarak ele alınmıştır. Buradaki en önemli faktör ise kaptanın ve dümencinin tecrübesi ile hava ve deniz koşullarıdır.

Yukarıda bahsi geçen seyir süresini etkileyen faktörler doğrudan geminin güç tüketimi yani yakıt sarfiyatı ile de ilişkilidir. Genellikle seyir süresini uzatan faktörler yakıt tüketiminin de artmasına neden olmaktadır.

Geminin tam boyu 78,90 m, genişliği 17,4 m, derinliği 4,7 m ve su çekimi 2,75 m olarak tasarlanmıştır. Arabalı vapurun tasarım servis hızı 14 knot olarak tasarlanmıştır ve 45EC CLASS D tipi arabalı vapur olarak klaslandırılmıştır. Diğer genel özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Proje feribotu genel özellikleri

|                          |                       |
|--------------------------|-----------------------|
| Klas                     | 45EC CLASS D          |
| Tam Boy                  | 78,9 m                |
| Su Hattı Boyu            | 72,72m                |
| Genişlik                 | 17,4 m                |
| Su Çekimi                | 2,75 m                |
| Araç ve Yolcu Kapasitesi | 71 araba ve 450 yolcu |
| Servis Hızı              | 14 knots              |
| Gross Ton                | 1444 ton              |

Gemide toplam 5 adet yakıt tankı bulunmaktadır. Baş tarafta bir adet 22,529 m<sup>3</sup> hacminde MDO yakıt depo tankı ve bir adet 3,425 m<sup>3</sup> hacminde MDO servis tankı bulunmakta. Kıç tarafta ise 22,259 m<sup>3</sup> hacminde MDO depo tankı ve 3,425 m<sup>3</sup> hacminde MDO servis tankı bulunmaktadır. Bunlara ek olarak 1 adet 0,258 m<sup>3</sup> hacminde acil durum jeneratörü yakıt servis tankı bulunmaktadır. Vapur tanklarında toplam 51,62 m<sup>3</sup> yakıt depolayabilmektedir. 71 araba, 450 yolcu ve 6 mürettebat taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Gemi, Şekil 4.2 de gösterildiği üzere tamamen simetrik formda tasarlanmış olup başta ve kıçta birbirine eş dakikada 1800 devirde 1685 kW güç üretebilen iki adet ana makine ile donatılmıştır. Gemide başta ve kıçta yine birbirine eş 2 adet kontrol edilebilir kanatlı azami devri 350 devir/dakika olan pervaneler kullanılmıştır ve pervane çapları 2 m ve 4 adet kanada sahiptir. Pervane malzemesi olarak ise bakır, nikel, alüminyum ve bronz alaşımı kullanılmıştır.

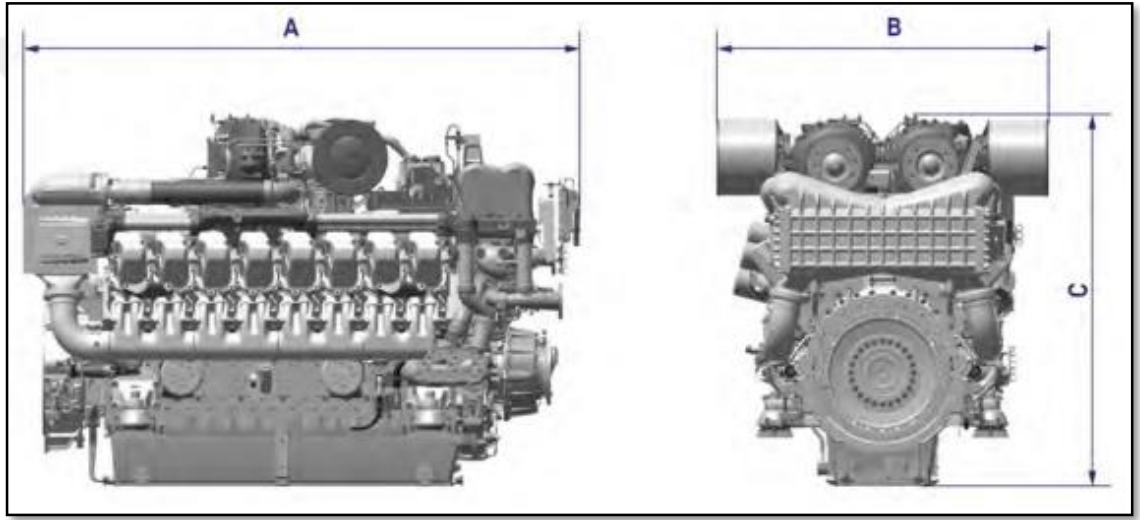


Şekil 4.2 Arabalı vapur profil resmi

Gemide ayrıca aydınlatma, soğutma ve benzeri yükleri karşılamak üzere 2 adet 380 kW güç üretebilen jeneratör yardımcı güç ünitesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca ana makineden üretilen 1800 d/d hızı azaltarak pervaneye aktarabilmek için 5,136:1 oranında devir düşürebilen bir şanzıman kullanılmıştır. Ana makine IMO Tier II ve ISO 9001:2008 tarafından sertifikalandırılmıştır. Ana makine kataloğundan alınan verilere göre maksimum güç üretimi sırasındaki ortalama yakıt tüketimi saatte 416,7 (217 g/kWs) litre civarındadır. Bu da silindir başına 4,77 litreye yakıt tüketimine denk gelmektedir. Kullanılan yakıt tipi DIN EN 590 ve 15 °C'deki özgül yakıt yoğunluğu 826,9 kg/m<sup>3</sup> aralığındadır. Kalorifik değeri ise 42700 KJ/kg'ın üzerindedir. Ana makinenin genel özellikleri Tablo 4.2'de ve boyutları ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Ana makine özellikleri

|                          |              |      |
|--------------------------|--------------|------|
| Silindir Düzeni V açılı  | derece (°)   | 90   |
| Silindir Çapı            | mm           | 170  |
| Stroke                   | mm           | 210  |
| Silindir sayısı          | adet         | 16   |
| Silindir hacmi           | litre        | 4,77 |
| Toplam hacim             | litre        | 76,3 |
| ISO 3046'ya göre Güç     | kW           | 1685 |
| Devir                    | Devir/dakika | 1800 |
| Nominal sıkıştırma oranı |              | 19,8 |



Şekil 4.3 Ana makine boyutları (A= 3108 mm, B= 1850 mm, C= 2064 mm)

#### 4.2.3 Veri Toplama Süreci

Bu çalışmayı gerçekleştirmek için İzdeniz A.Ş. yetkilileri ile görüşülmüştür. Çalışmaya ait ilk veriler, 14.06.2017 tarihinde Bostanlı İskelesinden Ahmet Piriştina arabalı vapurunun seferlerine gün boyunca eşlik edilerek elde edilmiştir. Verilerin doğruluğunu arttırmak için 16.06.2017 ve 19.06.2017 tarihlerinde de gemi seferlerine gün boyunca eşlik edilmiştir. Arabalı vapurun güç verileri her sefer için ayrıntılı olarak kaydedilmiş ve sistem dinamikleri değişkenleri oluşturulmuştur. Zamana ve koşullara bağlı olarak farklılık gösterebilecek değişkenler, veriler ve kaynaklar Tablo 4.3'te belirtilmiştir.

Tablo 4.3 Sistem dinamikleri modeli değişkenleri, verileri ve kaynaklar

| Değişkenler                      | Kabuller-Veriler | Kaynaklar                       |
|----------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Dişli kutusu verimi              | 0,95 – 0,96      | Chakraborty, 2017               |
| şaft verimi                      | 0,95 – 0,98      | Chakraborty, 2017               |
| Tekne yzeyi temizliği faktörü    | 0,97 – 1,0       | Talay, Deniz ve Dumuşoğlu, 2014 |
| Pervane verimi                   | 0,55 – 0,65      | Chakraborty, 2017               |
| Pervane yzeyi temizleme/parlatma | 0,90 – 1,0       | Talay ve diğer., 2014           |
| Hava ve deniz durumu (Hız)       | 15 mph           | MGM, 2017                       |
| Planlı bakım tutum               | 0,95 – 1,0       | Talay ve diğer., 2014           |
| İskelenin manevraya uygunluğu    | 1                | Kabul                           |
| Tercih edilen sefer hızı         | 9,5 mph          | İzdeniz                         |
| Seyir mesafesi                   | 3,32 mil         | Google Haritalar, 2017          |
| Feribotun ykleme durumu          | 1 (71 araç)      | İzdeniz                         |
| Limanın uygunluğu                | 1,1              | Kabul                           |
| Oto pilot ayarları               | 0,96             | Talay ve diğer., 2014           |
| Araçların ykleme boşaltma süresi | 425 saniye       | Vensim®                         |
| Sefer süresi                     | 1435 saniye      | Vensim®                         |
| Harcanan toplam enerji S         | 366,715 kWh      | Vensim®                         |
| Harcanan toplam enerji Y/B       | 35,722 kWh       | Vensim®                         |
| Harcanan toplam enerji           | 402,437 kWh      | Vensim®                         |
| Dişli kutusuna aktarılan güç     | 972 kW (ort.)    | Vensim®                         |
| Pervane şaftına aktarılan güç    | 923,4 kW (ort.)  | Vensim®                         |
| Pervaneye aktarılan güç          | 905 kW (ort.)    | Vensim®                         |
| Gemiye aktarılan güç             | 543 kW (ort.)    | Vensim®                         |

#### 4.2.4 Verilerin İşlenmesi: Simülasyon Uygulaması

Bu veriler Vensim® yazılımında analiz edilmiştir. Yapılan modelde hava koşulları, liman uygunluğu, tekne yzey temizliği, tercih edilen sefer hızı gibi değişkenlerin, vapurun sevk sistemlerinin her bir kademesinde oluşan kayıplara olan etkisi incelenmiştir. Analiz sonucu elde edilen veriler Matlab/Simulink programında oluşturulan modele aktarılmıştır.

Verilerin işlenmesi için bu çalışmada iki farklı simülasyon uygulaması yapılmıştır. Bunlardan ilki Vensim® yazılımı ile gerçekleştirilen sistem dinamikleri yaklaşımıdır. Diğeri ise Matlab/Simulinkte hazırlanmış modeldir. Bu uygulamalar bu bölümde açıklanacaktır.

#### 4.2.4.1 Sistem Dinamikleri

Gemilerin sevk sistemlerinde her bir eleman bir sonraki ve bir önceki ile bağlantılıdır. Bu yüzden çok fazla değişken birbiri ile etkileşim içerisindedir. Sistemin ihtiyaç duyduğu güç ayrıca dış etkenler aracılığıyla da artıp azalabilmektedir. Bu nedenle sistemin iyi bir şekilde değerlendirilebilmesi için tamamının birbirleri ile olan ilişkileri ortaya konmalıdır. Sistem dinamikleri yaklaşımı bu şekildeki karmaşık sistemlerin yapısını ve birbirleri ile olan etkileşimlerini anlamamızı sağlayan kavramsal araçlar kümesi ve modelleme yöntemidir (Sterman, 2000). Bu yaklaşım ile sistem bir bütün olarak ele alınır, bileşenlerine ait değişimler ile gerçekleşecek farklı senaryolar tüm sistem açısından analiz edilir (Sayyadi ve Awasthi, 2017). Değişik senaryoların koşturulması ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi gelecekte uygulanacak olan faaliyetlere yön verebilmekte ve bu şekilde başlangıç noktasını etkileyebilen bir geri bildirim döngüsü oluşturmaktadır (System Dynamics Society, 2017). Sistem dinamiklerinin uygulanabilmesi için çeşitli yazılımlar bulunmaktadır. Bu tezde Vensim® yazılımı kullanılmıştır. “Vensim®, gerçek sistemlerin performansını artırmak için hazırlanmış bir simülasyon yazılımı olmakla birlikte, dinamik geri bildirim modellerinin geliştirilmesi ve analiz edilmesi için kullanılmaktadır” (Ventana Systems Inc, 2017).

#### 4.2.4.2 Matlab/Simulink

Matlab/Simulink yazılımı sistemlerin bloklar halinde tasarlanabildiği ve birbirleri ile etkileşimlerinin grafikler halinde gösterildiği statik bir simülasyon programıdır (Schoder, Hasanovic ve Feliachi, 2003). Simulink, grafiksel bir düzenleyici, özelleştirilebilir blok kütüphaneleri ve dinamik sistemleri modellemek ve simule etmek için çözümler sunmaktadır. MATLAB algoritmalarını modellere dahil etmenizi

ve daha fazla analiz için simülasyon sonuçlarını MATLAB'a aktarmanızı sağlamaktadır (Mathworks, 2017).

#### **4.3 Hibrit Sevk Sisteminin Seçiminde Kullanılacak Parametrelerin Sistem Dinamikleri Yaklaşımı ile Modellenmesi**

Sistem dinamikleri yaklaşımı ile çok sayıda değişken ve parametrenin bir arada bulunduğu sistemler daha anlaşılır hala gelmekte analizi, değerlendirilmesi ve birbirleri ile olan ilişkileri daha kolay bir şekilde ortaya konmaktadır (Sterman, 2000).

Modellemenin amacı, geminin tam yüklü halde ortalama seyir hızında körfeze hâkim olan hava ve deniz durumundaki tipik bir seferinden alınan verilerin Vensim® yazılımı ile yapılan modele girilerek sevk sistemindeki güç ihtiyaçlarının ve kayıplarının dinamik olarak simüle edilmesidir. Burada ortaya çıkan sonuçlara göre de yakıt pili ve bataryalardan oluşturulacak hibrit sevk sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Yapılan modellemede karmaşıklığın önlenmesi ve tez kapsamında ihtiyaç duyulan sonuçların alınabilmesi için en önemli değişkenler göz önünde bulundurulmuştur. İhtiyaç duyulan güce etki edebilecek geminin boyu, uzunluğu, karinanın yapısı gibi sayılabilecek birçok değişken tezin amacı dışında kaldığı için değerlendirmeye alınmamıştır. Çünkü modellenecek olan hibrit sevk sisteminin ihtiyaç duyacağı gücün belirlenmesinde temel alınan dizayn kriteri ana makinenin krankşaftına aktarılan güç miktarıdır. Şekil 4.4'te sistemin nedensellik ilişkisi verilmiştir ve değişkenler aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Aşağıda açıklanan model değişkenlerindeki değerler Tablo 4.3'e göre kabul edilmiştir.

**Dişli kutusu kaybı;** krankşafttan dişli kutusuna aktarım sırasında oluşan kayıplardır. Literatürde bu kayıplar için yaklaşık bir kabul vardır (Chakraborty, 2017). Modelimiz için kabul ettiğimiz değer ise 0,95 olmuştur.

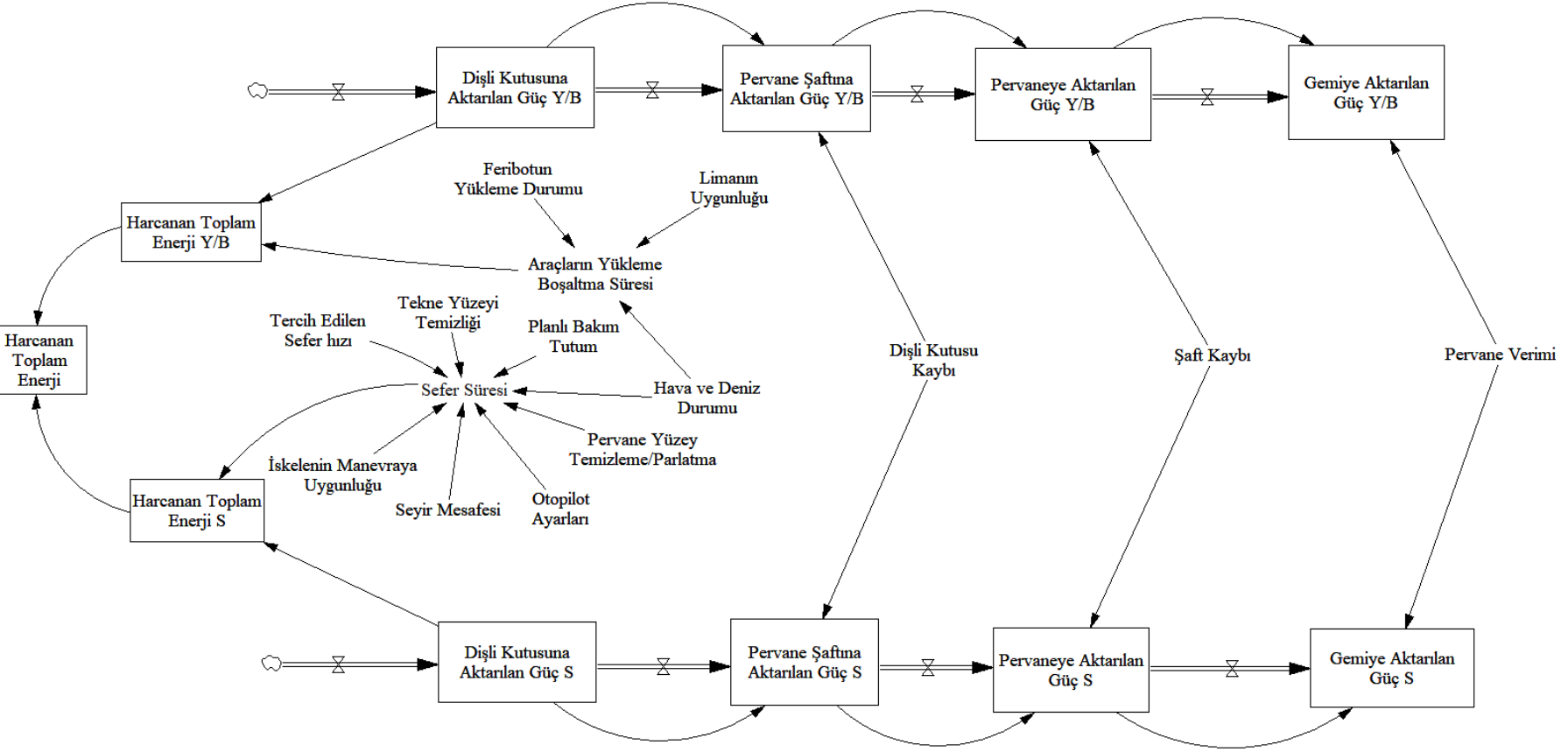
**Tekne yüzeyi temizliği;** geminin kabuğuna deniz canlılarının yapışması yahut yüzey kaplamasının aşınması vasıtasıyla oluşturduğu kirlenmeyi ifade etmektedir. Tekne yüzeyleri özel malzemeler ile kaplanmış feribotların 48 aylık yakıt tüketimleri incelendiğinde, özel uygulama yapılan gemilerde % 3 yakıt tasarrufu sağlandığı gözlemlenmiştir (Talay ve diğer., 2014). Modelimizde bu değer bir olarak kabul edilmiştir.

**Pervane verimi;** değeri pervanenin açık su deneylerinin yapılmasından sonra gemiye aktarabildiği gücün oranını temsil etmektedir. Modelimizde kullandığımız pervane verimi değeri çekme deney raporundan alınmıştır ve % 60'tır.

**Pervane yüzeyi temizleme/parlatma;** pervane yüzeyine uygulanacak olan düzenli parlatma işlemini temsil etmektedir. Pervane yüzeyinin organizmalar tarafından kirletilmesi ve pürüzlülüğünün azaltılması çok önemli bir işlemdir. Bu sayede yaklaşık % 10 enerji verimliliği sağlanabilmektedir (Talay ve diğer., 2014). Modelde pervane yüzeyinin yeni temizlendiği varsayılmıştır.

**Planlı bakım tutum;** gemi makine ve sistemlerinin üretici firmalar tarafından belirlenmiş aralıklarda herhangi bir sorun olmasa dahi sistemlerin ölçümlerinin yapılarak düzenli kontrol edilme işlemidir. Yapılan bu düzenli kontroller ve ölçümlerde toleransları aşan parçalar yenileri ile değiştirilir. Böylece arıza oluşmadan önüne geçilmiş olur. Bu şekilde yapılan bakım-tutum operasyonları ile % 5 oranında enerji tasarrufu sağlanmaktadır (Talay ve diğer., 2014). Modelimizde bu değer 1,0 olarak kabul edilmiştir.

**Tercih edilen sefer hızı;** hizmeti sunan kurum tarafından belirlenmiş ve feribotun hızını temsil etmektedir. Bu hızın belirlenmesi Türk Boğazlar Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü Madde 13'te belirtildiği üzere Gemilerin İstanbul ve Çanakkale Boğazları'ndan geçiş hızı karaya göre saatte 10 deniz milidir (Mevzuat Bilgi Sistemi, 1998). İzmir Körfezi için yerel trafik düzeninde maksimum hız belirtilmemiştir (Gülmez, Aslantaş ve Cerit, 2017). Seyir mesafesinin kısa oluşu nedeniyle ortalama seyir hızı 9,5 knot civarındadır. Modelimizde de bu değer kullanılmıştır.



Şekil 4.4 İzmir Körfezi'nde faaliyet gösteren bir feribotun seyir güç ihtiyacına etki eden parametreler ve bunların ilişkileri

**Şaft kaybı;** dişli kutusundan pervaneye aktarılma sırasında gerçekleşen ısı ve sürtünme kayıplarını temsil etmektedir. Literatürde buradaki kayıpların % 2 ile % 5 arasında değiştiği kabul edilmektedir (Chakraborty, 2017). Modelimizde kullandığımız değer ise % 2 olarak kabul edilmiştir.

**Seyir mesafesi;** feribotun Bostanlı İskelesi ile Üçkuyular İskelesi arasında kat ettiği mesafedir. “Google Haritalar” üzerinden yaklaşık olarak ölçülmüştür ve 3,32 deniz mili olarak belirlenmiştir.

**Feribotun yükleme durumu;** feribotun o sefer esnasında kaç araç bulunduğunu temsil etmektedir. Feribot en fazla 71 araç alabilmektedir ve bu durum 1 olarak kabul edilmiştir ve modelimizde de bu değer kullanılmıştır.

**Oto pilot ayarları;** geminin serdümen olmadan seyir rotasında ilerleyebilmesini temsil etmektedir. Hava ve deniz şartlarına göre ayarları iyi yapılmış kendisini ayarlayabilen oto pilotun kullanılması daha düzgün dümen tutarak rotanın en doğru şekilde en az dümen kullanımı ile takip edilmesini sağlar. Gemide bu koşulları sağlayan bir oto pilot bulunmaktadır. Modelimizde bu değer 1 olarak kabul edilmiştir.

**Araçların yükleme boşaltma süresi;** araçların tamamının gemiye yüklenmesi ve boşaltılması için geçen toplam süreyi ifade etmektedir. Gemi üzerindeki seferler sırasında tutulan süreler sonucunda ortalama yükleme – boşaltma süresi 7 dakika olarak gözlemlenmiş ve modelde de bu değer kullanılmıştır.

**Sefer süresi;** geminin bir iskeleden kalkış manevrası başlangıcından diğer iskeleye yanaşması arasında geçen sürenin toplamını temsil etmektedir. Gemi bulunulan süre zarfındaki seferler sırasında tutulan süreler sonucunda ortalama sefer süresi 23,5 dakika olarak gözlemlenmiş ve modelde bu değer kullanılmıştır.

**Dişli kutusuna aktarılan güç;** geminin ana makinesinin krankşaftından dişli kutusuna aktarılabilen gücü temsil etmektedir. Bu değerler geminin köprü üstündeki dijital göstergelerden alınan gerçek verilerden elde edilmiştir. Verilerin tutarlı olması

için farklı seferlerde körfezde hâkim rüzgâr ve deniz koşullarında tam dolu halde iken alınan verilerin tamamının değerlendirilmesi ile oluşturulmuştur.

**Pervane şaftına aktarılan güç;** dişli kutusundaki kayıplardan sonra pervane şaftına aktarılan gücü temsil etmektedir. Modelde bu değer anlık olarak dişli kutusu kaybı ile çarpılarak elde edilmektedir.

**Pervaneye aktarılan güç;** şafttaki kayıplardan sonra pervaneye aktarılan gücü temsil etmektedir. Modelde bu değer anlık olarak şaft kaybı katsayısı ile çarpılarak bulunmaktadır.

**Gemiye aktarılan güç;** pervanedeki kayıplardan sonra gemiye aktarılabilen gücü temsil etmektedir. Bu değer modelde anlık olarak pervane verimi değeri ile çarpılarak bulunmaktadır.

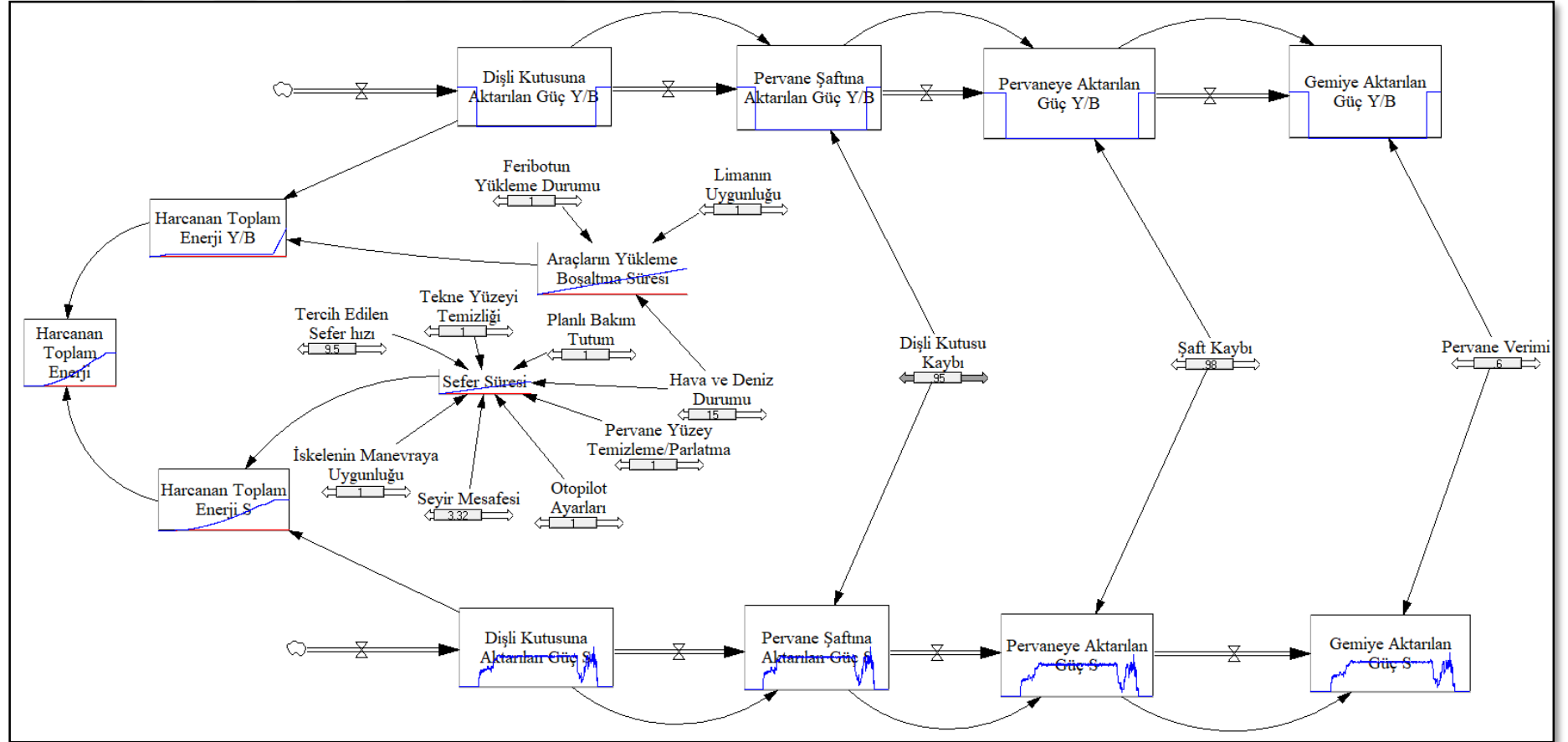
**Harcanan toplam enerji S (sefer);** geminin bir sefer boyunca harcadığı toplam enerjiyi temsil etmektedir. Buradaki değerler ise anlık olarak dişli kutusuna aktarılan güç değerlerinin anlık sefer süresi ile çarpılması ile bulunur. Bu değerlerin toplanması ile de sefer sırasındaki harcanan toplam enerji bulunur.

**Harcanan toplam enerji Y/B (yükleme/boşaltma);** geminin araçların yüklenmesi ve boşaltılması sırasında limanda harcadığı toplam enerjiyi temsil etmektedir. Bu değerler ise anlık olarak dişli kutusuna aktarılan güç değerlerinin anlık olarak araçların yükleme boşaltılma süresi ile çarpılması ile bulunur. Bu değerlerin toplanması ile de harcanan toplam enerji Y/B bulunur.

**Harcanan toplam enerji;** bütün bir seyir boyunca geminin harcadığı “harcanan toplam enerji S” ve “harcanan toplam enerji Y/B” değerlerinin toplamını temsil etmektedir. Feribotun bütün bir seyir boyunca güç ihtiyacını ve buna etki eden değişkenleri ortaya koyan sistem dinamikleri modeli Şekil 4.5’te gösterilmiştir.

Modelde belirtildiği üzere, değişkenlerde meydana gelebilecek herhangi bir değişme harcanan toplam enerjiye ve kayıplara etki etmektedir. Örneğin tekne yüzey temizliğinin ya da planlı bakım tutumun zamanında yapılmaması makinenin yakıt harcamasının artmasına ve dolayısıyla harcanan toplam enerjiye etki edecektir. Modele göre bu durum, sefer süresini arttıracak için harcanan toplam enerjiyi arttıracaktır.

Tercih edilen sefer hızının artırılması ile ortalama sefer süresi kısılacak, günlük yapılabilecek sefer sayısı arttırılabilecektir. Ancak bu kararın verilmesinden önce dikkat edilmesi gereken en önemli nokta geminin hız-güç eğrisindeki optimum noktanın yakalanmasıdır. Bunun nedeni ise hızın güç ile doğru orantılı artmamasıdır. Hıza göre ihtiyaç duyulan güç kübik olarak artmaktadır. Bu durum ise modeldeki harcanan toplam enerjiyi arttıracaktır.



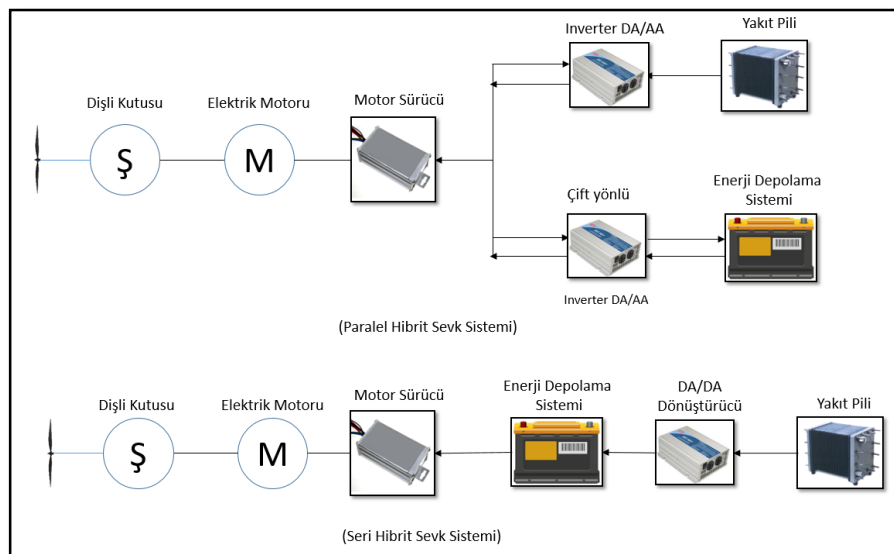
Şekil 4.5 İzmir Körfezi'nde faaliyet gösteren bir feribotun seyir güç ihtiyacının sistem dinamikleri modeli

#### 4.4 Feribot İçin Hibrit Sevk Sisteminin Tasarlanması ve Modellenmesi

Yakıt pili sistemleri diğer enerji üreten sistemler ile birleşik olarak kullanıldığında, ani yük değişimleri olan ve yüksek güç ihtiyacı gereken yerlerde verimli bir şekilde kullanılabilir. Günümüzde kullanılan konvansiyonel yakıtların aksine sıfır salım ile çevre dostu bir enerji çevrimi gerçekleşmiş olur (Dağhan, 2010).

Hibrit sevk sistemleri, birden fazla sistem içerirler. Yakıt pili ile birlikte seçilecek alternatif sisteme göre birçok farklı hibrit sevk sistemi tasarlanabilir. Bölüm 1.1.1.3'te hibrit sevk sistemleri tanıtılmıştır. Hibrit sevk sistemleri daha az bakım tutuma ihtiyaç duymaları, daha iyi manevra kabiliyeti sağlayabilmeleri gibi özellikler sayesinde tercih edilmektedirler (Dağhan, 2010).

Gemilerin bataryalar ve yakıt pili ile hibrit sevk edilmesinde iki durum söz konusudur. Bunlardan ilki yakıt pilinin bataryalara paralel olarak bağlanması ve bu sayede ihtiyaç duyulan gücün hem birlikte karşılanabilmesi hem de gerektiğinde sistemlerden birinin devre dışı kalması halinde yahut devre dışı bırakılmak istenmesi durumunda tek sistem ile geminin sevk ve idaresinin yapılabilirdiği durumdur. İkinci durum ise yakıt pilinin yalnızca bataryaları şarj edeceği yani menzil artırımı işlemi sağlayacağı durumdur. Bu durumlar Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Batarya ve Yakıt Pili Seri/Hibrit Sevk Sistemi

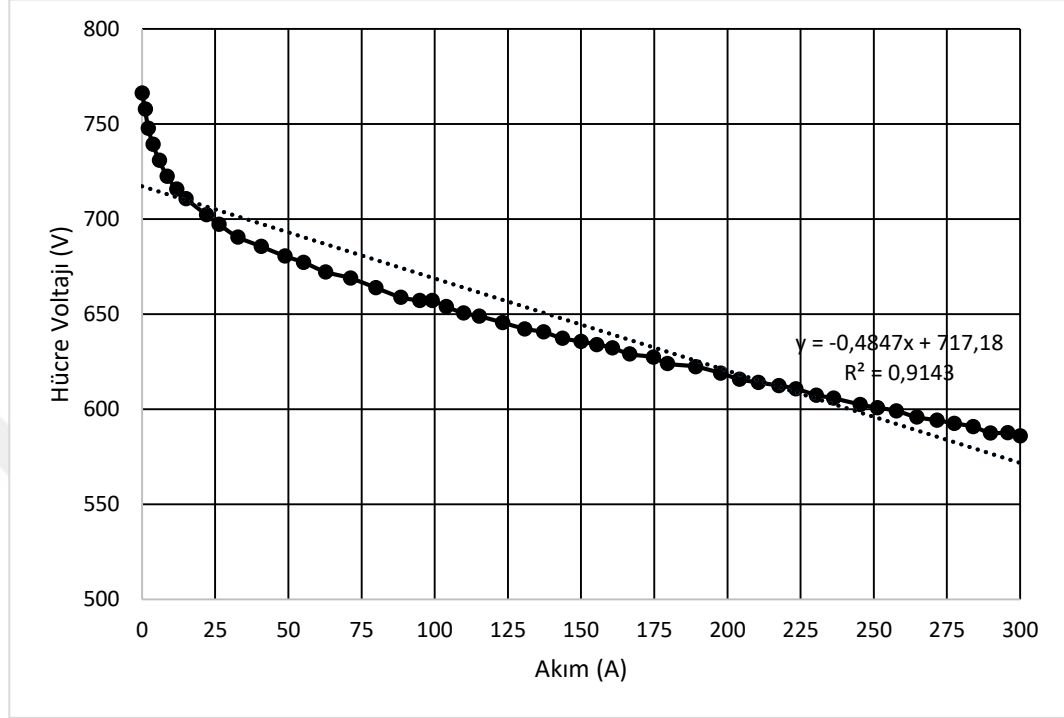
Enerji depolama sistemi olarak üç farklı batarya çeşidi seçilmiştir ve aynı koşullarda yapılan seferlerde güç yoğunluğu ve sefer sürelerine etkileri incelenmiştir. Batarya grubunun tasarımında ilk çıkış noktası geminin tasarımı sırasında hesaplanan maksimum güç ihtiyacı olmuştur. Bu da ana makinenin krankşaftına aktarılan güç miktarıdır. Bu nedenle sistem tasarımı elektrik motoru shaftından 1685 kW güç elde edilebilecek şekilde seçilmiştir. Vensim® yazılımından elde edilen sonuçlara göre geminin bir sefer süresi boyunca ihtiyaç duyduğu enerji miktarı yaklaşık 402 kWh civarında olduğu bulunmuştur. Geminin bir gün içerisinde yaptığı toplam sefer sayısı 22'dir. Bu nedenle ihtiyaç duyulan toplam enerji miktarı 8853,1 kWh olarak bulunmuştur. Seçilen akıt pilinin özellikleri Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Ballard FCvelocity – HD6 PEM tipi yakıt pilinin genel özellikleri

| Yakıt Pili                         | Model                          | Ballard FCvelocity – Model HD6 |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Performans özellikleri             | DA voltajı                     | 465 – 730 V                    |
|                                    | Maksimum akım                  | 300 A                          |
| Fiziksel özellikleri               | Ağırlık (kuru)                 | 404 kg                         |
|                                    | Uzunluk x genişlik x yükseklik | 1530 x 871 x 495 mm            |
| Yakıt                              | Hidrojen gazı                  | Tecimsel niteliği SAE J2719    |
| Oksitleyici                        | Hava                           |                                |
| Soğutucu                           | 50/50 Saf Etilen glikol ve Su  |                                |
| İşletme Şartları                   | Soğutucu sıcaklığı (nominal)   | 63 °C                          |
|                                    | Yakıt basıncı (en düşük)       | 16 barg                        |
|                                    | Hava basıncı (nominal)         | 1,2 barg                       |
| Yakıt Tüketimi                     | 2,5 g/s (maks.)                |                                |
| Sağlamlık/yaşam ömrü hedefi        | 12 000 saate kadar             |                                |
| Hücre verimliliği (Alt Isıl Değer) | % 60 – 71                      |                                |
| Soğutucuda maksimum basınç kaybı   | 1,4 bar                        |                                |
| Soğutucu giriş sıcaklığı           | 50 – 66 °C                     |                                |

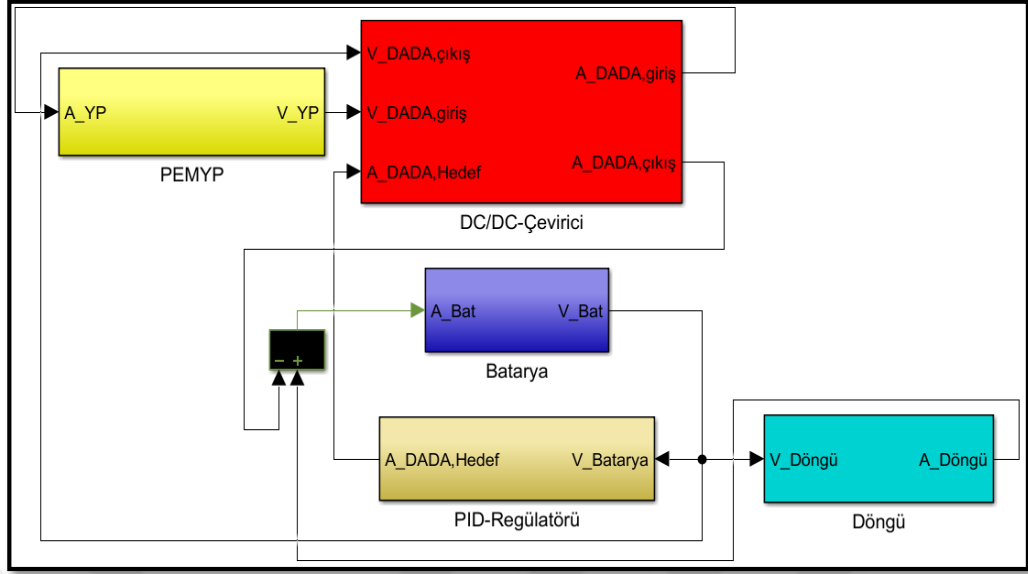
Sistemin simülasyonu literatürdeki yaygın kullanımından dolayı Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelde denizcilik uygulamalarına ve diğer birçok uygulamada kullanım avantajları sunan PEM tipi yakıt pili seçilmiştir. Yakıt pili ile bataryaların şarj edilmesi tasarlandığı için akımın bataryaların şarj edilmesine uygun hale getirilmesi için buraya aktarılmadan önce doğru akım/doğru akım (DA/DA) çevirici eklenmiştir ve bataryaların sabit akım yöntemi ile şarj edilmesi sağlanmıştır. DA/DA çeviricimizin kabul edilen verimlilik değeri 0,96'dır (Todorovic, Palma ve Enjeti, 2008). Batarya gruplarının seçilen PEM tipi yakıt pilinin nominal

voltaj ve akım değerlerinde şarj edilebildiği kabulü ile modelimiz simüle edilmiştir. Seçilen yakıt pilinin polarizasyon eğrisi ise Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Ballard FCvelocity – HD6 PEM tipi yakıt pilinin polarizasyon eğrisi ve denklemi

Modelimizde yakıt pili menzil arttırıcı olarak kullanılmıştır. Bataryalar ise doğrudan motor sürücüye bağlı olarak düşünülmüştür. Bataryadan çıkan voltaj değeri batarya sonrasında gerekli voltaj ve çekilen gücün içinde bulunduğu bir çevrime gönderilmiştir. DA/DA çeviricisine gönderilecek uygun akımın belirlenmesi için bir geri besleme sağlaması amaçlanmıştır. P (orantısal) kontrol döngüsü tasarlanan modelde kullanılmıştır. Bu döngüye gelen batarya voltajındaki hata miktarı tekrar ayarlanarak DA/DA çeviricisine hedef değer olarak gönderilmektedir. Böylece sistemin ihtiyaç duyduğu farklı akım değerlerinde hibrit sistemin en verimli şekilde çalışması hedeflenmiştir. Matlab/Simulink yazılımında tasarlanan modelin blok akış diyagramı da Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Matlab/Simulink yakıt pili/bataryalar hibrit sevk sistemi blok akış diyagramı

Modelimizde kullanılacak olan bataryaların detaylı verilerine ihtiyaç duyulduğu için batarya modellerimiz Matlab/Simulink Advisor programından seçilmiştir. Hibrit sevk sistemine etkileri karşılaştırılacak olan batarya tipleri lityum iyon, kurşun-asit ve nikel metal hidrit (NiMH) olarak seçilmiştir. Bu bataryaların özgül enerji yoğunluklarına göre sefer sürelerine etkileri değerlendirilecektir. Bataryaların daha detaylı özelliklerine Matlab/Simulink Advisor programından ulaşılabilir. Bataryaların genel özellikleri Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.5 Matlab/Simulink Advisor yazılımından seçilen lityum iyon bataryanın özellikleri

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| Batarya Cinsi                  | Lityum İyon  |
| Batarya Modeli                 | ESS_LI7_temp |
| Sıcaklık (°C)                  | 25           |
| Maks. Kapasite (Ah)            | 7,035        |
| Doluluk Oranı (%)              | 100          |
| Deşarj İç Direnci ( $\Omega$ ) | 0,005722     |
| Şarj İç Direnci ( $\Omega$ )   | 0,00583      |
| Açık Devre Voltajı (V)         | 3,898        |

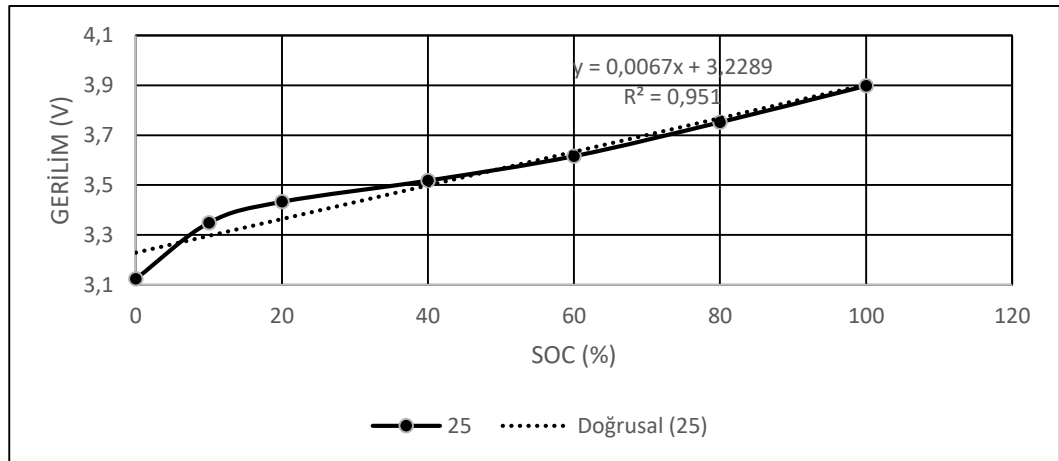
Tablo 4.6 Matlab/Simulink Advisor yazılımından seçilen kurşun-asit bataryanın özellikleri

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| Batarya Cinsi                  | Kurşun Asit  |
| Batarya Modeli                 | ESS_PB91_uct |
| Sıcaklık (°C)                  | 22           |
| Maks. Kapasite (Ah)            | 91           |
| Doluluk Oranı (%)              | 100          |
| Deşarj İç Direnci ( $\Omega$ ) | 0,000625     |
| Şarj İç Direnci ( $\Omega$ )   | 0,000625     |
| Açık Devre Voltajı (V)         | 2,12         |

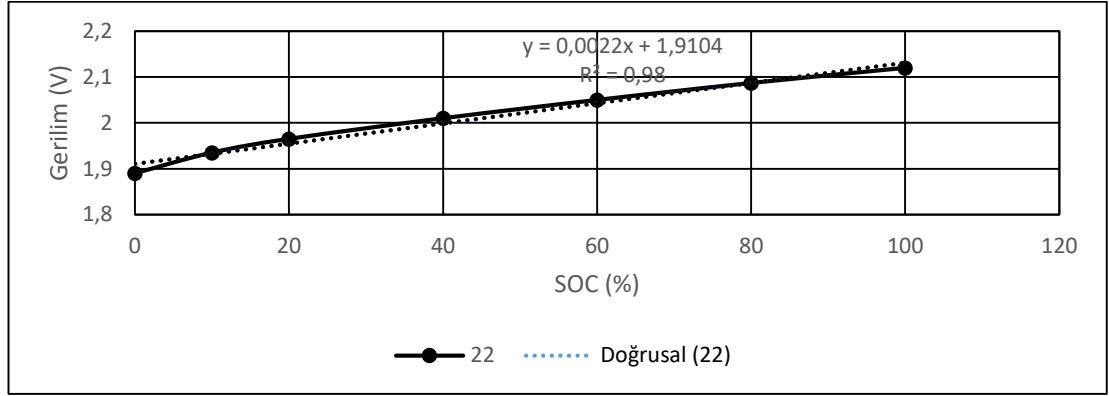
Tablo 4.7 Matlab/Simulink Advisor yazılımından seçilen NiMH bataryanın özellikleri

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| Bataryanın Cinsi               | NiMH             |
| Bataryanın Modeli              | ESS_NiMH850_temp |
| Sıcaklık (°C)                  | 22               |
| Maks. Kapasite (Ah)            | 850              |
| Doluluk Oranı (%)              | 100              |
| Deşarj İç Direnci ( $\Omega$ ) | 0,00017          |
| Şarj İç Direnci ( $\Omega$ )   | 0,00017          |
| Açık Devre Voltajı (V)         | 1,4              |

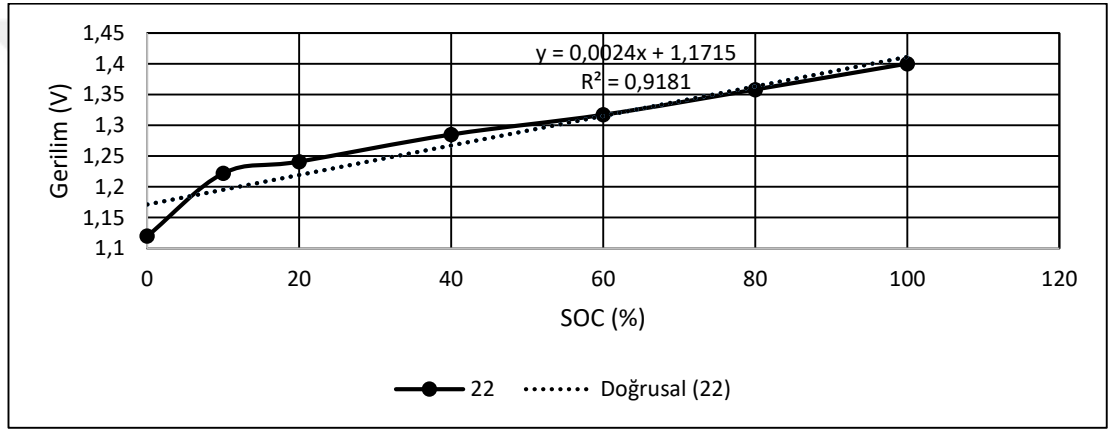
Modelde bataryalardan çıkan voltajın hesaplanmasında en önemli denklem bataryanın doluluk oranına (SOC) göre voltaj değeridir. Bataryaların bir hücresi için doluluk oranlarına göre voltaj değerleri ve denklemleri Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Lityum iyon batarya doluluk oranı – voltaj eğrisi



Şekil 4.10 Kurşun-asit batarya doluluk oranı – voltaj eğrisi



Şekil 4.11 NiMH batarya doluluk oranı – voltaj eğrisi

## **BÖLÜM BEŞ**

### **BULGULAR VE TARTIŞMA**

#### **5.1 Giriş**

Bu bölümde ilk olarak sistem dinamikleri metodu ile Vensim® yazılımında modellenen sistemden elde edilen çıktılar analiz edilmiştir. Ardından yakıt pili/batarya hibrit sisteminin Matlab/Simulink modeli sonuçları değerlendirilecektir.

#### **5.2 Sistem Dinamikleri Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

İzmir Körfezi'nde seyir yapan bir feribottan alınan gerçek güç değerleri daha önce tanıtılan Vensim® yazılımında yapılmış olan modele girildikten sonra etkin hâkim rüzgâr ve deniz koşullarında tam dolu halde iken tipik bir seferinin güç ihtiyacı Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Geminin bu seferinde ihtiyaç duyduğu maksimum güç 1381,7 kW olmuştur. Toplam enerji ihtiyacı ise Vensim® yazılımı ile yapılan simülasyon sonucunda 402,437 kWh olarak çıkmıştır. Ortalama güç ihtiyacı ise 792 kW olmuştur. Feribot gün içerisinde toplam 22 sefer yapmaktadır ve bu seferlerin tamamındaki enerji ihtiyacı ise 8853,61 kWh olarak bulunmuştur.

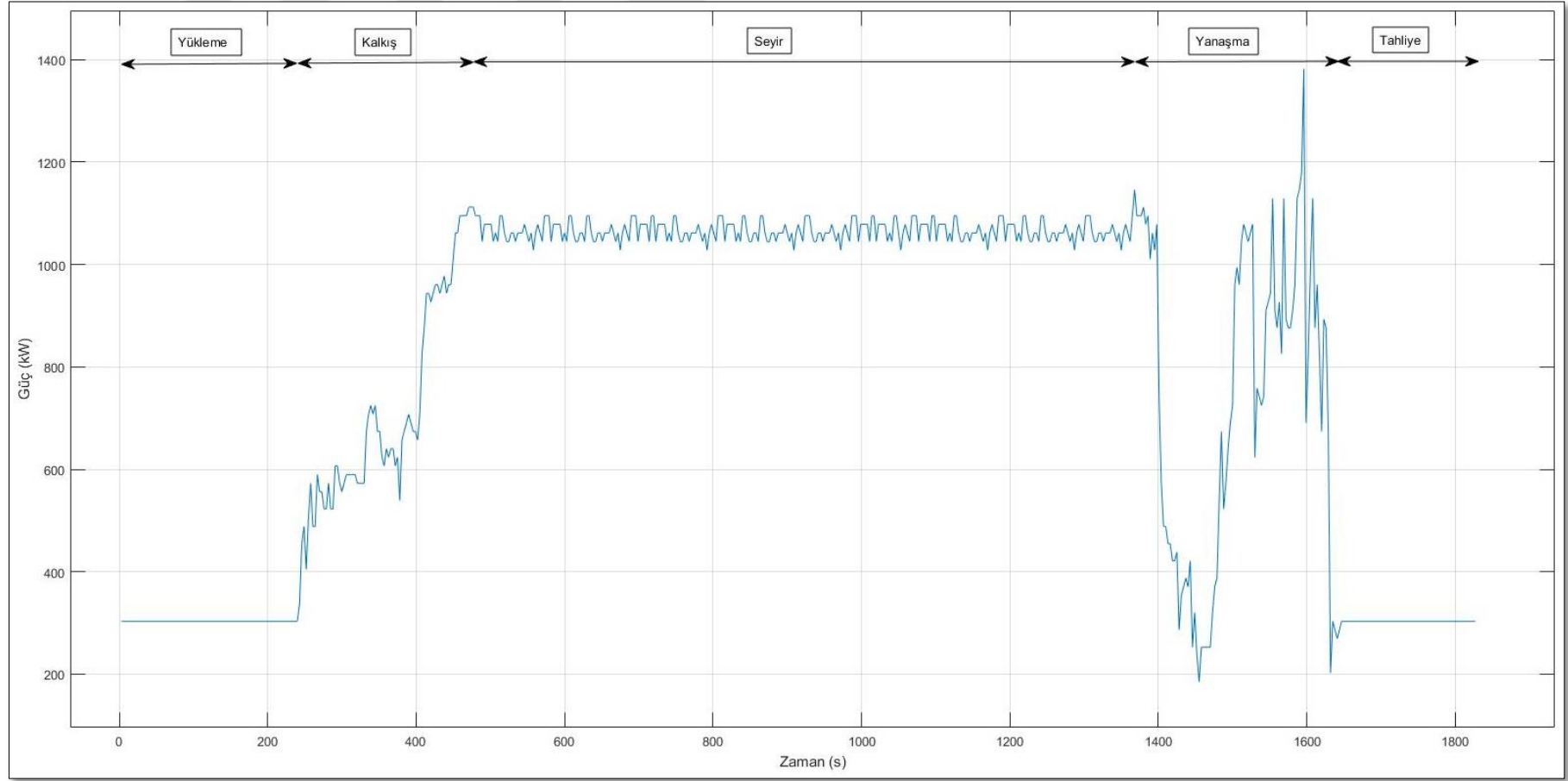
Geminin güç ihtiyacının sevk sistemine aktarılmasından sonra gemiye tahrik kuvveti olarak aktarılan kadar geçen sistemlerde sürtünme ve ısınma nedeniyle enerji kayıpları oluşmaktadır. Bu enerji kayıpları değerlerinin Şekil 4.4'te gösterilen sistem dinamikleri modeli ile simüle edilmesi ile bulunan sonuçlar Tablo 5.1'de ortaya konmuştur.

Ayrıca geminin sefer esnasında sevk sistemindeki kayıplar Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Dişli kutusu ve pervane şaftındaki kayıpların pervanedeki toplam kayıplara oranla beklendiği gibi oldukça düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Aynı şekilde yükleme ve boşaltma sırasında gerçekleşen güç kayıplarında da pervaneden

kaynaklı kayıpların diğer mekanik kayıplara oranla oldukça fazla olduğu Şekil 5.3'te görülmektedir.

Geminin yükleme ve boşaltma ile sefer sırasındaki güç ihtiyaçları Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te verilmiştir. Bu veriler ışığında geminin yükleme ve boşaltma sırasındaki toplam enerji ihtiyacı 35,67 kWh olarak ortaya çıkmaktadır. Geminin gün içerisinde 22 sefer yaptığı göz önüne alındığında günlük 784,74 kWh enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Geminin sefer sırasındaki enerji ihtiyacı ise 366,77 kWh olarak bulunmuştur. Buradan yola çıkarak geminin sefer sırasında bir günlük toplam enerji ihtiyacı 8068,94 kWh olarak bulunmuştur.

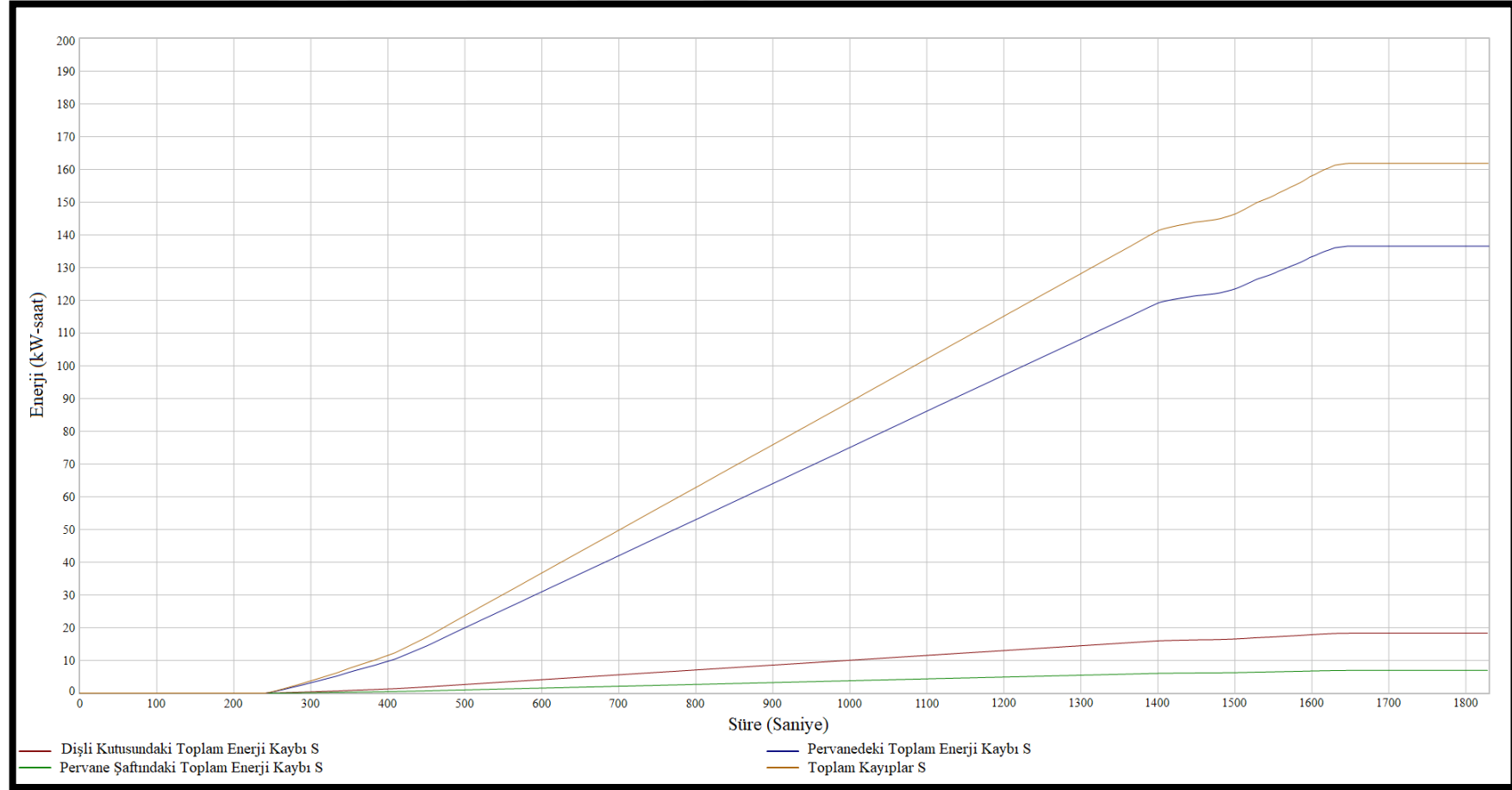
Geminin gerçek güç ihtiyacının sefer sırasında olduğu görülmektedir. Ancak limanda yükleme ve boşaltma sırasında harcanan enerjinin sefer sırasındaki enerjinin % 9,8'i civarlarında olduğu da göz ardı edilmemelidir.



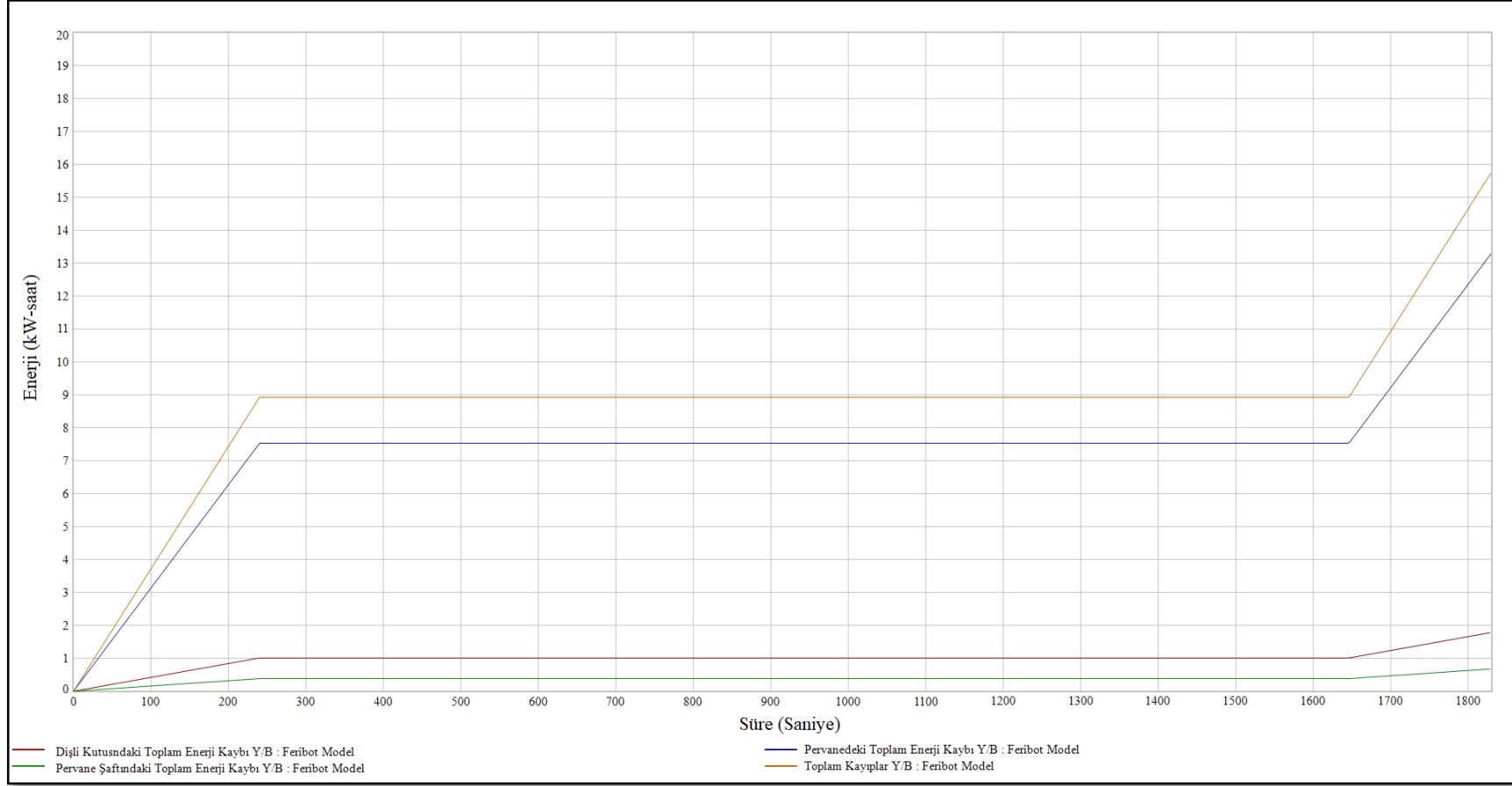
Şekil 5.1 Geminin tipik bir seferi için Vensim® yazılımından hesaplanan yük karakteristiği

Tablo 5.1 Feribot seferinin sistem dinamikleri modeli sonuçları

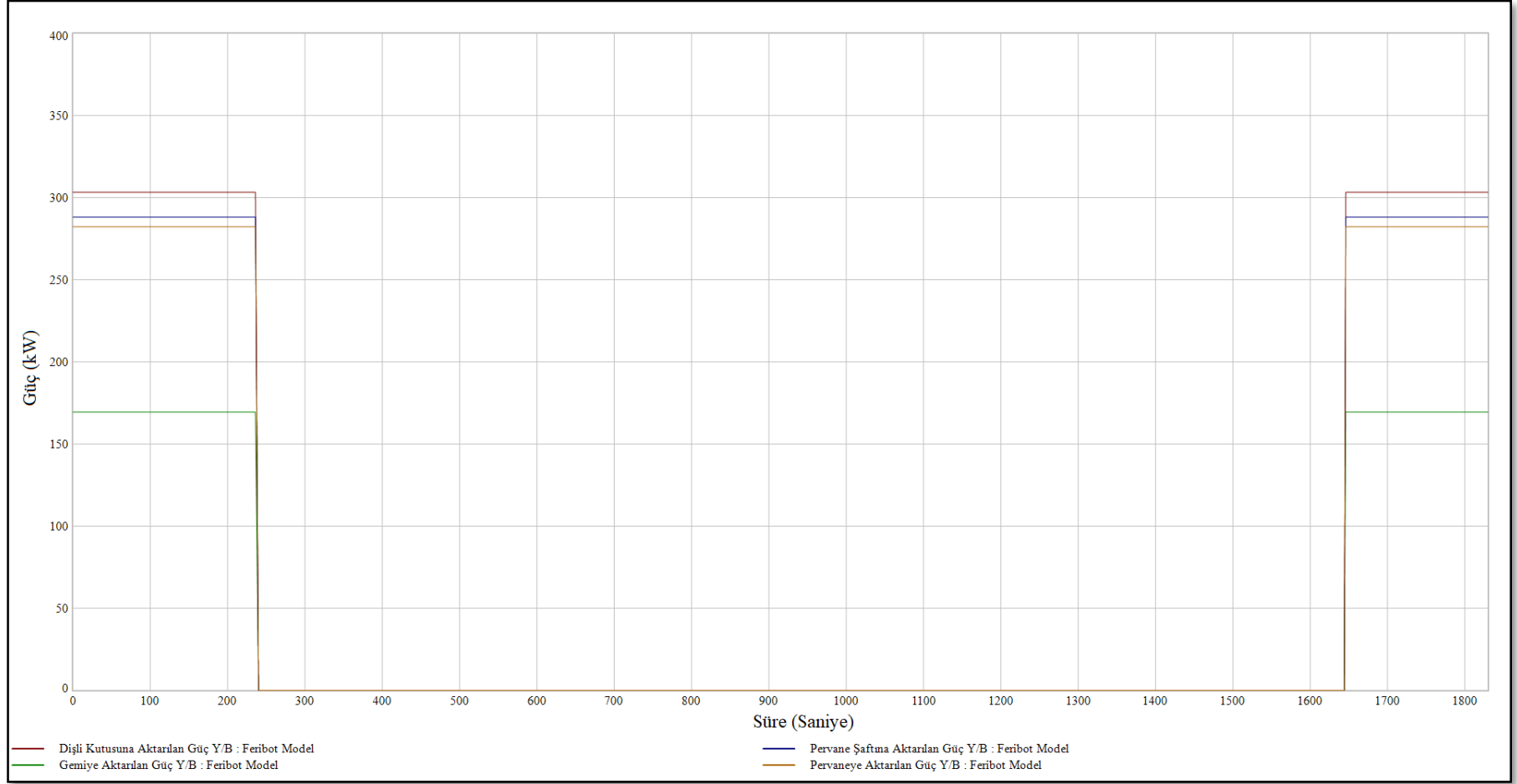
| Zaman (s) | Harcanan Toplam Enerji Y/B (kWh) | Harcanan Toplam Enerji S (kWh) | Harcanan Toplam Enerji (kWh) | Dişli Kutusundaki Toplam Enerji Kaybı Y/B (kWh) | Pervane Şaftındaki Toplam Enerji Kaybı Y/B (kWh) | Pervanedeki Toplam Enerji Kaybı Y/B (kWh) | Toplam Enerji kaybı Y/B (kWh) | Dişli Kutusundaki Toplam Enerji Kaybı S (kWh) | Pervane Şaftındaki Toplam Enerji Kaybı S (kWh) | Pervanedeki Toplam Enerji Kaybı S (kWh) | Toplam Enerji kaybı S (kWh) | Toplam Enerji Kaybı Y/B+S (kWh) |
|-----------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1         | 0,08425                          | 0                              | 0,08425                      | 0,00421                                         | 0,0016                                           | 0,03137                                   | 0,03719                       | 0                                             | 0                                              | 0                                       | 0                           | 0,03719                         |
| 60        | 5,055                            | 0                              | 5,055                        | 0,25275                                         | 0,09604                                          | 1,88248                                   | 2,23128                       | 0                                             | 0                                              | 0                                       | 0                           | 2,23128                         |
| 120       | 10,11001                         | 0                              | 10,11001                     | 0,5055                                          | 0,19209                                          | 3,76496                                   | 4,46255                       | 0                                             | 0                                              | 0                                       | 0                           | 4,46255                         |
| 180       | 15,16504                         | 0                              | 15,16504                     | 0,75825                                         | 0,28813                                          | 5,64746                                   | 6,69384                       | 0                                             | 0                                              | 0                                       | 0                           | 6,69384                         |
| 240       | 20,22001                         | 0                              | 20,22001                     | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 0                                             | 0                                              | 0                                       | 0                           | 8,92513                         |
| 300       | 20,22001                         | 8,6169                         | 28,83692                     | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 0,43085                                       | 0,16372                                        | 3,20893                                 | 3,8035                      | 12,72863                        |
| 360       | 20,22001                         | 19,04518                       | 39,26519                     | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 0,95226                                       | 0,36186                                        | 7,09243                                 | 8,40654                     | 17,33167                        |
| 420       | 20,22001                         | 30,79337                       | 51,01338                     | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 1,53967                                       | 0,58507                                        | 11,46745                                | 13,59219                    | 22,51732                        |
| 480       | 20,22001                         | 47,75107                       | 67,97108                     | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 2,38755                                       | 0,90727                                        | 17,78248                                | 21,0773                     | 30,00243                        |
| 540       | 20,22001                         | 65,51852                       | 85,73853                     | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 3,27592                                       | 1,24485                                        | 24,39908                                | 28,91985                    | 37,84498                        |
| 600       | 20,22001                         | 83,28586                       | 103,50587                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 4,16429                                       | 1,58242                                        | 31,01568                                | 36,7624                     | 45,68753                        |
| 660       | 20,22001                         | 101,0298                       | 121,24986                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 5,05149                                       | 1,91956                                        | 37,62347                                | 44,59451                    | 53,51964                        |
| 720       | 20,22001                         | 118,8253                       | 139,04527                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 5,94127                                       | 2,25767                                        | 44,25042                                | 52,44936                    | 61,37449                        |
| 780       | 20,22001                         | 136,5552                       | 156,77519                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 6,82777                                       | 2,59454                                        | 50,85296                                | 60,27527                    | 69,2004                         |
| 840       | 20,22001                         | 154,3132                       | 174,53323                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 7,71568                                       | 2,93194                                        | 57,46597                                | 68,11358                    | 77,03871                        |
| 900       | 20,22001                         | 172,0244                       | 192,24443                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 8,60125                                       | 3,26845                                        | 64,06153                                | 75,93123                    | 84,85636                        |
| 960       | 20,22001                         | 189,7543                       | 209,97435                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 9,48775                                       | 3,60532                                        | 70,66415                                | 83,75723                    | 92,68236                        |
| 1020      | 20,22001                         | 207,6106                       | 227,83066                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 10,38057                                      | 3,94459                                        | 77,31386                                | 91,63902                    | 100,5641                        |
| 1080      | 20,22001                         | 225,4529                       | 245,6729                     | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 11,27269                                      | 4,2836                                         | 83,95835                                | 99,51463                    | 108,4397                        |
| 1200      | 20,22001                         | 260,9829                       | 281,20294                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 13,0492                                       | 4,95868                                        | 97,18983                                | 115,1977                    | 124,1228                        |
| 1260      | 20,22001                         | 278,6986                       | 298,91855                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 13,935                                        | 5,29528                                        | 103,78726                               | 123,0175                    | 131,9426                        |
| 1320      | 20,22001                         | 296,3626                       | 316,58258                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 14,81823                                      | 5,63091                                        | 110,3655                                | 130,8146                    | 139,7397                        |
| 1380      | 20,22001                         | 314,1671                       | 334,38712                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 15,70848                                      | 5,96921                                        | 116,99604                               | 138,6737                    | 147,5988                        |
| 1440      | 20,22001                         | 325,1382                       | 345,35825                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 16,25704                                      | 6,17767                                        | 121,08176                               | 143,5164                    | 152,4415                        |
| 1500      | 20,22001                         | 331,6631                       | 351,88309                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 16,58326                                      | 6,30165                                        | 123,51157                               | 146,3964                    | 155,3216                        |
| 1560      | 20,22001                         | 347,0386                       | 367,25861                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 17,35204                                      | 6,59379                                        | 129,23743                               | 153,1832                    | 162,1083                        |
| 1620      | 20,22001                         | 363,1817                       | 383,40167                    | 1,011                                           | 0,38418                                          | 7,52995                                   | 8,92513                       | 18,15919                                      | 6,90052                                        | 135,24918                               | 160,3088                    | 169,2340                        |
| 1680      | 23,0845                          | 366,7155                       | 389,79996                    | 1,15422                                         | 0,4386                                           | 8,5967                                    | 10,18953                      | 18,33589                                      | 6,96766                                        | 136,56517                               | 161,8687                    | 172,0582                        |
| 1740      | 28,13947                         | 366,7155                       | 394,85492                    | 1,40697                                         | 0,53465                                          | 10,4792                                   | 12,42082                      | 18,33589                                      | 6,96766                                        | 136,56517                               | 161,8687                    | 174,2895                        |
| 1800      | 33,19447                         | 366,7155                       | 399,90991                    | 1,65972                                         | 0,63069                                          | 12,36169                                  | 14,65211                      | 18,33589                                      | 6,96766                                        | 136,56517                               | 161,8687                    | 176,5208                        |
| 1830      | 35,72201                         | 366,7155                       | 402,43747                    | 1,7861                                          | 0,67872                                          | 13,394                                    | 15,76776                      | 18,33589                                      | 6,96766                                        | 136,56517                               | 161,8687                    | 177,6364                        |



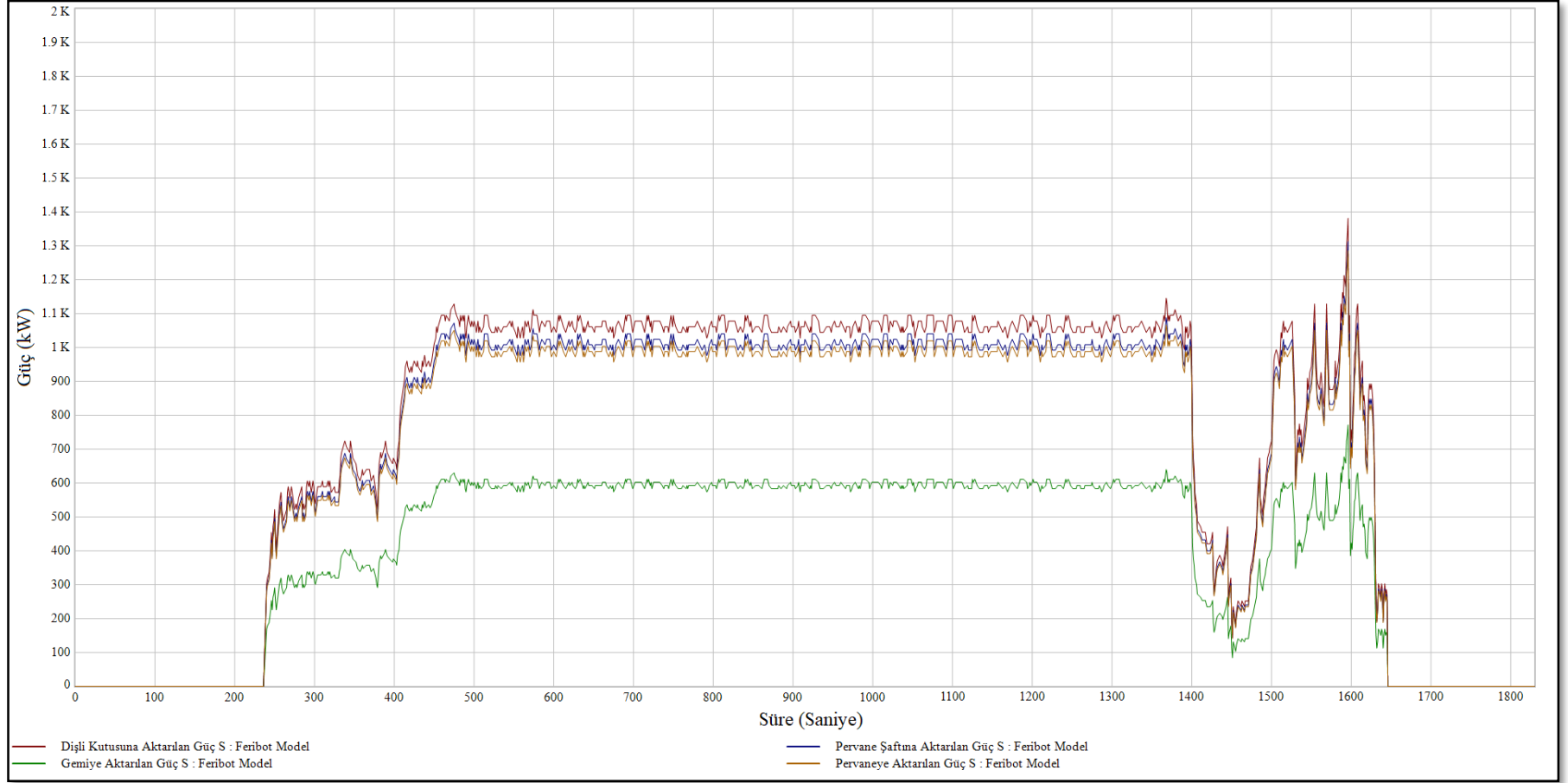
Şekil 5.2 Geminin sefer sırasında sevk sistemindeki enerji kayıpları



Şekil 5.3 Geminin yükleme/boşaltma sırasında sevk sistemindeki enerji kayıpları



Şekil 5.4 Gemi sistemlerinin yükleme/boşaltma sırasında güç ihtiyaçları



Şekil 5.5 Gemi sistemlerinin sefer sırasında güç ihtiyaçları

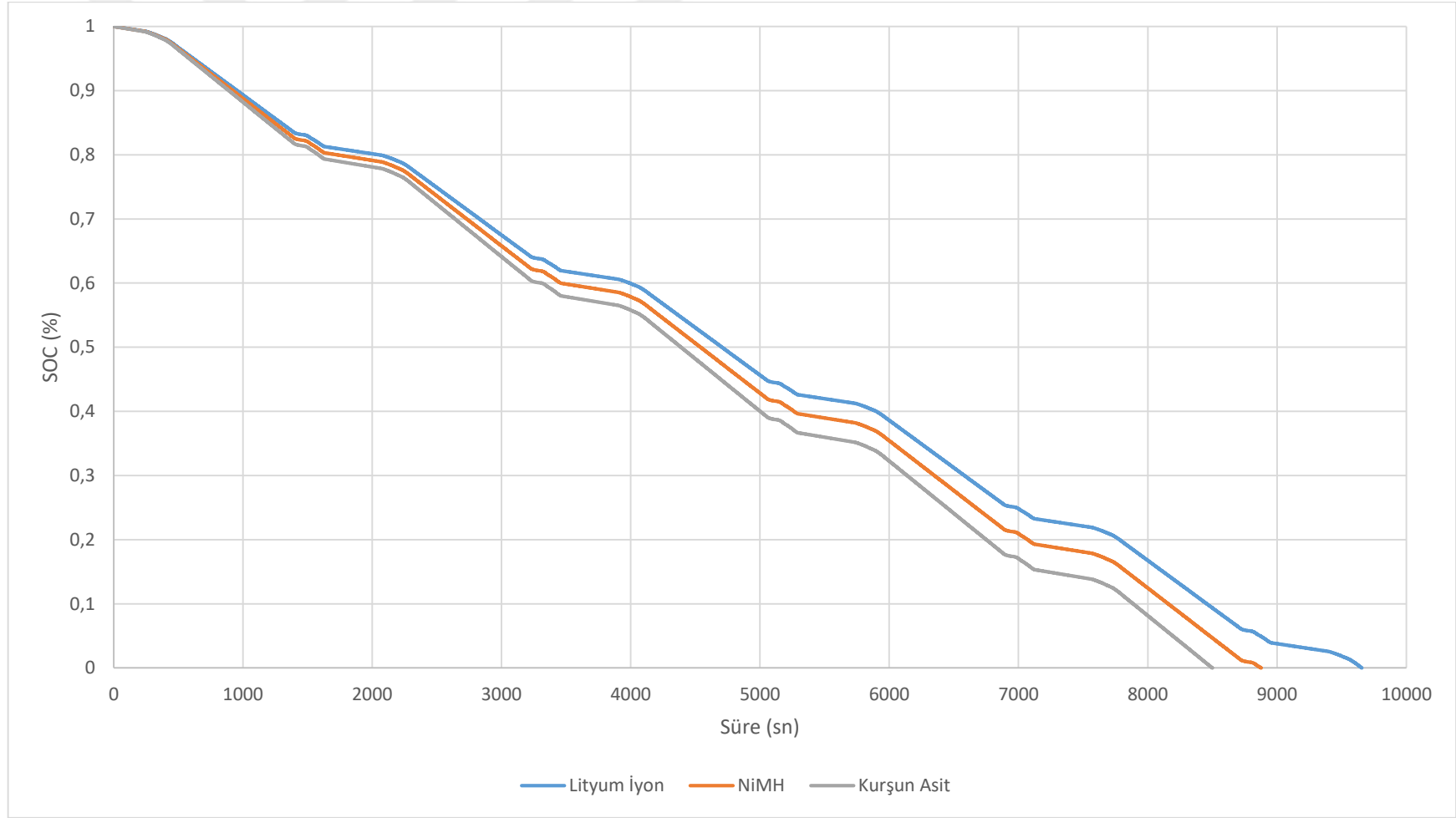
### 5.3 Hibrit Sevk Sistemi Matlab/Simulink Simülasyonu Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Simüle edilen modelde bir grup bataryanın yakıt pili aracılığıyla oransal (P) enerji kontrol stratejisi yardımıyla uygun şekilde şarj edildiği kabul edilmiştir. Seçilen yüksek gerilim ve voltaj değerlerine uygun dönüştürücü ve çeviricilerin olduğu kabulü de yapılmıştır.

Seçilen batarya grupları, modüller ve modüllerdeki hücre sayıları *Advisor* programından seçilen batarya hücrelerinin voltaj ve akım değerlerine göre sistemin ihtiyaç duyduğu gücü karşılayabilecek şekilde seri ve paralel bağlanarak sağlandığı kabul edilmiştir. İç direnç değerleri Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'deki değerler kullanılarak modele girilmiştir. Ayrıca bataryaların doluluk oranlarına göre voltaj değerini veren denklemde batarya alt sistemine girilmiştir. Yakıt pili için ise polarizasyon eğrisinin denklemi modele girilmiştir. Buradan yakıt pili için gerekli akım değeri yakıt pili alt sistemine verilerek yakıt pilinin bu akımı üretebilmek için ihtiyaç duyacağı voltaj değeri çekilmektedir.

Döngü alt sisteminde ise Vensim® yazılımından alınan güç ihtiyacı değerleri girilerek sistemin anlık olarak ne kadarlık bir akıma ihtiyaç duyduğu hesaplanmıştır. Bu döngü sonunda bulunan akım daha sonra DA/DA çeviriciden gelen akım değerinden çıkarılarak batarya akımı değerinin kararı verilmektedir. Bataryaya giren akım değeri iç direnç ile çarpılarak voltaj düşüşündeki miktarın belirlenmesinde rol oynamıştır.

Seçilen birinci senaryoda 130 kW net güce sahip olan ve nominal çalışma gücü 110 kW olan PEM tipi bir yakıt pili seçilmiştir. Polarizasyon eğrisinin denklemi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Lityum iyon batarya sistemi ise bir modülde 257 hücrenin birbirine seri bağlanması ile yaklaşık 1002 voltluk bir gerilim değeri ve birbirine paralel bağlı 257 modül ile de 1808 Ah'lik enerji sağlanmaktadır. İç dirençleri ve ihtiyaç duyulan diğer özelliklere Tablo 4.5'ten ulaşılabilir.



Şekil 5.6 Hibrit sistemde batarya doluluk oranlarının batarya çeşitlerine ve zamana göre durumu

Modelde kullanılan yakıt pili özellikleri Tablo 4.4'te belirtilmiş olup anlık olarak maksimum yakıt tüketimi 2,5 gram/s hidrojen olarak belirlenmiştir. Bir gün boyunca sürekli olarak bu oranda yakıt tüketimi olduğunun kabulü yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 22 seferi gerçekleştirebilmek için yaklaşık 101 kg hidrojene ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.

Tankın ağırlığının belirlenmesinde ise hidrojen depolama yöntemlerinden soğuk (kriyojenik) sıkıştırma yönteminin kullanıldığı kabul edilmiştir. Bu sıkıştırma yönteminde ortalama olarak ağırlıkça hidrojen depolama oranı % 5,5 civarında olduğu kabul edilmiştir (Kaya, 2015). Soğuk (kriyojenik) sıkıştırma yöntemi ile depolanan hidrojen ve hidrojen tankının toplam ağırlığı modellenen sistem için yukarıdaki kabuller dâhilinde hesaplandığında 1,836 ton bulunmuştur. Yakıt pili sisteminin ağırlığı ise katalog değeri olan 404 kg olarak kabul edilmiştir. Toplam sistemin ağırlığı (yakıt pili + hidrojen + tank) 2,24 ton olarak bulunmuştur ve hesaplamalarda bu değer kullanılmıştır.

Modelde kullanılan bataryaların karşılaştırmaları yapılırken tasarım kıstası olarak ana makinedeki 1685 kW'lık maksimum güç ihtiyacı dikkate alınarak yola çıkılmıştır. 3 batarya tipi ile oluşturulabilecek ve ihtiyaç duyduğumuz güç ve enerji değerlerini elde etmemizi sağlayacak gerilim miktarı için en uygun değer 1000 V olduğu bulunmuştur. Lityum iyon bataryaların hücre başına üretebildiği voltaj değeri 3,898 V'tur ve bu yüksek bir değerdir. Bu sebeple ortalama 1000 V civarında çalışma gerilimine sahip batarya grupları oluşturmak için bir modülde 257 seri hücre ve bir batarya grubunda paralel bağlı 257 modül olması gerekmektedir. Bir hücre ağırlığı 0,37824 kg olan lityum iyon bataryaların bir grup ağırlığı 24,982 ton bulunmuştur. Yakıt pilimiz tüm güç ihtiyacını karşılayamayacağı için bu modellemelerde menzil arttırıcı olarak kullanılmıştır. Matlab/Simulink simülasyonu sonucunda Şekil 5.6'dan ortaya çıkan değere göre bir grup lityum iyon batarya ve yakıt pili ile tipik bir seferdeki yük ihtiyaçları göz önüne alınarak yapılabilecek sefer süresi 9657 saniye olarak bulunmuştur. Bir sefer için gerekli sürenin ortalama 1830 saniye olduğu göz önüne alındığında 5,277 sefer için gerekli enerjinin 1 batarya grubunda bulunduğu anlaşılmaktadır. Toplam 22 sefer yapılabilmesi için 4,169 adet batarya grubuna ihtiyaç

duyulduğu görülmektedir. Bir batarya grubunun ağırlığı 24,982 tondur. Toplamda ihtiyaç duyulan batarya gruplarının ağırlığı 104,150 ton olarak bulunmuştur.

Kurşun asit batarya modeli için yapılan simülasyonda da maksimum güç ihtiyacı 1685 kW olarak kabul edilmiş ve bu yükü karşılayabilecek bir batarya grubu tasarlanmıştır. Seçilen kurşun asit bataryanın hücre başına üretebildiği gerilim değeri 2,12 V'tur. Ortalama olarak 1000V'luk bir çalışma gerilimine sahip batarya grupları oluşturabilmek için bir modülde 475 adet seri hücre ve bir batarya grubunda paralel bağlı 19 modül olması gerekmektedir. Bir hücre ağırlığı 4,433 kg olan kurşun asit bataryaların bir grup ağırlığı 40,008 ton olarak bulunmuştur. Matlab/Simulink simülasyonu sonucunda Şekil 5.6'dan ortaya çıkan değere göre 1 grup kurşun asit batarya ve yakıt pili hibrit sistemi ile tipik bir seferdeki yük ihtiyaçları göz önüne alınarak yapılabilecek hesaplanan sefer süresi 8500 saniye olarak bulunmuştur. Bir sefer için gerekli sürenin 1830 saniye olduğu göz önüne alındığında 4,65 sefer için gerekli enerjinin 1 batarya grubundan karşılanabildiği anlaşılmaktadır. Toplam 22 sefer yapılabilmesi için 4,73 adet batarya grubuna ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu da 189,24 ton gibi oldukça fazla bir ek ağırlık oluşturmaktadır.

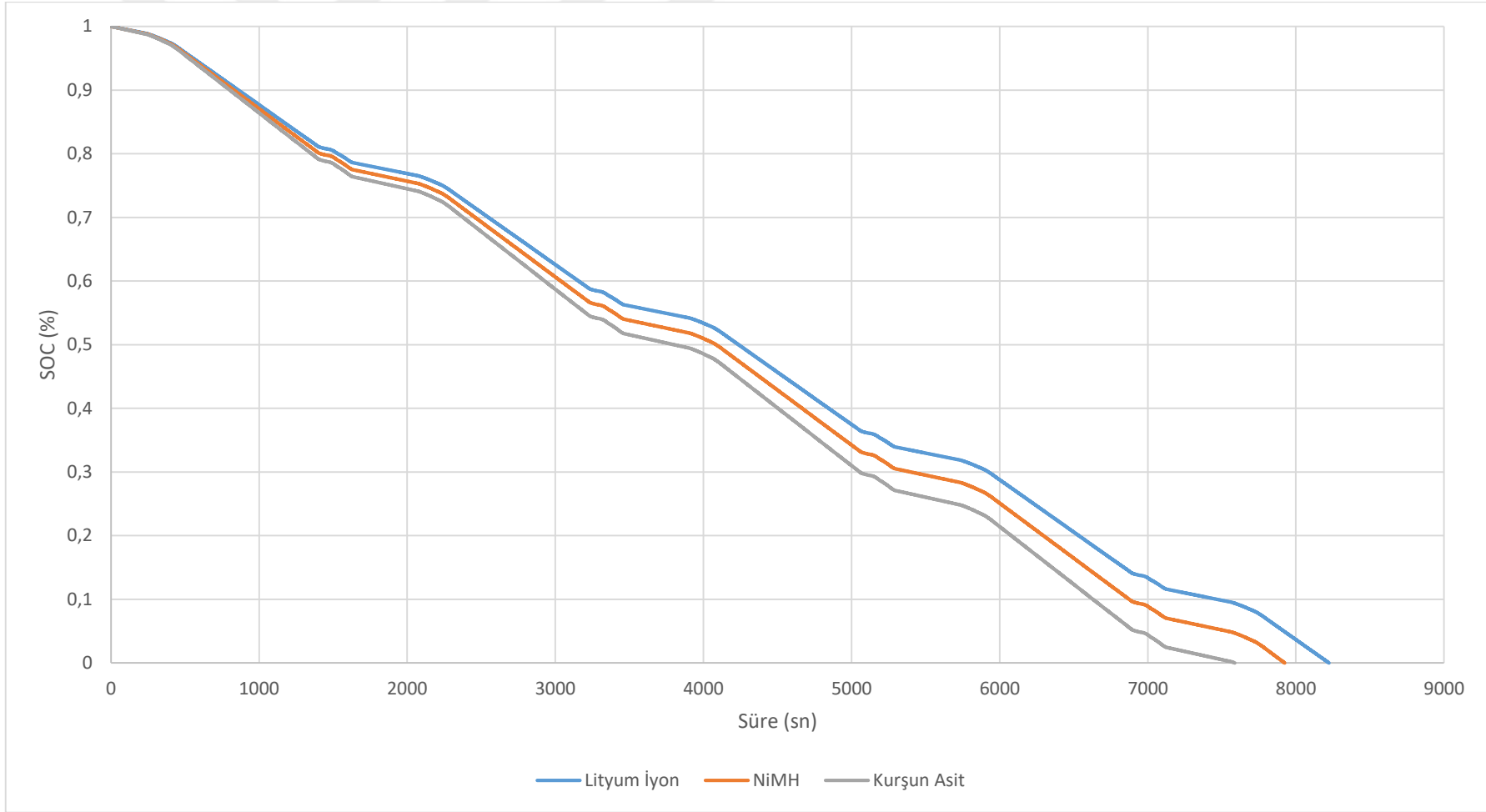
Son olarak NiMH batarya modeli için yapılan simülasyonda da maksimum güç ihtiyacı olarak tasarım aşamasında kullanılan ana makinenin güç değeri olan 1685 kW seçilmiştir ve bu yükü karşılayabilecek bir batarya grubu tasarlanmıştır. Seçilen NiMH bataryanın hücre başına üretebildiği gerilim değeri 1,4 V'tur. 720 adet seri hücrenin birbirine bağlanarak oluşturduğu bir modülün gerilim değeri 1008 V olmuştur. 1685 kW'lık güç ihtiyacını karşılamak için 20 adet modül paralel olarak bağlanarak bu değer sağlanabilmiştir. Bir hücre ağırlığı 1,62 kg olan NiMH bataryaların grup ağırlığı 23,328 ton olmaktadır. Matlab/Simulink simülasyonu sonucunda bulunan ve Şekil 5.6'dan anlaşıldığı üzere 1 grup NiMH batarya ve yakıt pilinin tipik bir seferde sağladığı güç sayesinde feribot 8879 saniye boyunca başka bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan ilerleyebilmektedir. Bir seferin 1830 saniye olduğu göz önüne alındığında 4,85 sefer için gerekli enerjinin tek 1 batarya grubundan sağlanabileceği görülmektedir. 22 seferin gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan batarya grubu

sayısı 4,54 batarya grubuna ihtiyaç duyulduğu bulunur. Bu da toplam 105,909 ton gibi bir ek ağırlık anlamına gelmektedir.

Matlab/Simulink simülasyonunda geminin sadece bataryalar ile sevk edilmesi durumu incelendiğinde bir grup lityum iyon bataryanın 8224 saniye sonra tükeneceği bulunmuştur ve Şekil 5.7’da verilmiştir. Bu da 122,134 ton ağırlık anlamına gelmektedir. Yani yakıt pili ile entegre sistemdeki ağırlıktan 17,984 ton civarında fazla bir ağırlık kullanılması gerekmektedir. Yakıt pili sisteminin hidrojen tankı ve yardımcı sistemler dahil ağırlığının 2,24 ton olduğu göz önüne alındığında yük taşıma kapasitesinde 15,744 ton kazanç sağlanacaktır.

Kurşun asit batarya grupları ile geminin sevk edilmesi durumunda 7588 saniye sonra 1 grup bataryanın tükeneceği simülasyon sonuçlarına göre bulunmuştur ve Şekil 5.7’da verilmiştir. Bu da 212,042 ton ağırlık anlamına gelmektedir. Yani yakıt pili ile entegre sistemdeki ağırlıktan 22,802 ton civarında fazla bir ağırlık kullanılması gerekmektedir. Yakıt pili sisteminin hidrojen tankı ve yardımcı sistemler dâhil ağırlığının 2,24 ton olduğu göz önüne alındığında yük taşıma kapasitesinde 20,562 ton kazanç sağlanacaktır.

Nikel metal hidrit batarya grupları ile geminin sevk edilmesi durumunda 7924 saniye sonra 1 grup bataryanın tükeneceği simülasyon sonuçlarına göre bulunmuştur ve Şekil 5.7’da verilmiştir. Bu da 118,506 ton ağırlık anlamına gelmektedir. Yani yakıt pili ile entegre sistemdeki ağırlıktan 12,597 ton civarında fazla bir ağırlık kullanılması gerekmektedir. Yakıt pili sisteminin hidrojen tankı ve yardımcı sistemler dâhil ağırlığının 2,24 ton olduğu göz önüne alındığında yük taşıma kapasitesinde 10,357 ton kazanç sağlanacaktır.



Şekil 5.7 Batarya ile sevk durumunda batarya doluluk oranlarının batarya çeşitlerine ve zamana göre durumu

## BÖLÜM ALTI

### SONUÇLAR

Gelişmiş ve gelişmekte olan toplumların enerji ihtiyacı her geçen gün daha da artmaktadır. Enerji ihtiyacının birkaç gün sağlanamadığı bir dünya artık hayal bile edilemeyecek düzeye ulaşmıştır. Ancak enerjinin doğaya zarar vermeden ve sürekli olarak üretilebilmesi önem arz etmektedir. Bu anlamda konvansiyonel enerji üretimine karşı, polimer elektrolit yakıt pilinin önemli avantajları vardır.

Bu çalışmada yüksek güçlü bir geminin sevk ihtiyacını karşılayacak yakıt pili ve batarya hibrit sistemi tasarlanmıştır. Ana makinenin ihtiyaç duyduğu 1685 kW'lık güç hibrit sistemimizin tasarımında seçilen dizayn kriteri olmuştur. Çalışma ayrıca üç farklı batarya tipi ile ayrı ayrı simüle edilmiştir.

Çalışmada, geminin körfeze hâkim rüzgâr ve deniz koşullarında, tam yüklü halde tipik bir seferi temel alınmıştır. Bu şekilde sefer süresince gemi tarafından ihtiyaç duyulan güce etki eden değişkenler belirlenmiştir ve sistem dinamikleri modeli oluşturulmuştur. Veriler gemiye çıkılarak bizzat alınmıştır ve Vensim® yazılımı ile hazırlanan sistem dinamikleri modeline girilmiştir. İhtiyaç duyulan güç değerleri diğer değişkenlerin değerleri de girilerek bulunmuştur. Elde edilen bu veriler daha sonra hibrit sistemin tasarımında kullanılmıştır.

Üç farklı batarya tipi için Matlab/Simulink yazılımında modellenen hibrit sevk sistemi modeli simülasyonu çalıştırılmıştır. Bu durumda yakıt pili ile birlikte kullanılması gereken bataryaların grup miktarına karar verilmiştir. Modelden yakıt pili çıkarılarak sadece bataryalar ile geminin sevk edilmesi durumu da ayrıca incelenmiştir.

Lityum iyon bataryanın tek başına geminin sevkini sağladığı duruma kıyasla yakıt pili ile birlikte kullanıldığı durumda 15,744 ton ağırlıktan kazanç sağlanacağı, kurşun asit bataryalar için aynı durumda 20,562 ton ağırlıktan kazanç sağlanacağı ve nikel metal hidrit bataryalar için aynı durumda 10,357 ton ağırlıktan kazanç sağlanacağı

bulunmuştur. Ağırlıkça en fazla kazanç kurşun asit bataryalardan sağlandığı görülmektedir. Ancak seçilen kurşun asit bataryaların enerji yoğunluğu 41,75 Wh/kg, nikel metal hidrit bataryaların enerji yoğunluğu ise 74,71 Wh/kg ve lityum iyon bataryaların enerji yoğunluğu ise 72,49 Wh/kg olarak bulunmuştur. Bu değerlerden yola çıkarak sağlanan enerji tasarrufu nikel metal hidrit bataryalarda 773,8 kWh, kurşun asit bataryalarda 858,5 kW ve lityum iyon bataryalarda 1141,3 kWh enerji olarak belirlenmiştir.

Lityum iyon bataryalar ile nikel metal hidrit bataryaların enerji yoğunlukları birbirine yakın olmasına rağmen hibrit sevk siteminde lityum iyon bataryaların sağladığı enerji tasarrufu nikel metal hidrit bataryalara kıyasla yaklaşık % 32 daha fazladır. Ayrıca sadece bataryalar ile sevk sırasında ihtiyaç duyulan lityum iyon bataryaların ağırlığı nikel metal hidrit bataryaların ağırlığından daha fazla olmasına rağmen lityum iyon bataryalar ile kurulan hibrit sistem nikel metal hidrit bataryalar ile kurulan sistemden daha hafif olduğu da bulunmuştur.

Bu genel değerlendirmeler sonucunda lityum iyon bataryaların tasarlanan hibrit sistemde kullanılması diğer alternatiflerine göre oldukça avantajlı iken, nikel metal hidrit bataryaların daha fazla olan güç yoğunluğu sayesinde sadece bataryalar ile sevk edilmesi durumunda daha fazla avantajlı olduğu görülmüştür. Yakıt pilleri ve bataryaları ile oluşturulan hibrit sevk sistemleri farklı yöntemlerle incelenmiştir. Ancak sistem dinamikleri yaklaşımı ile sisteme etki eden değişkenler bütünsel olarak ele alınıp incelenmemiştir. Bu çalışma ile literatüre bu yönde bir katkı getirilmiştir.

Çalışmada bir takım kısıtlar bulunmaktadır. Bu kısıtlar; Sistem dinamikleri modelinde, tekne yüzeyi temiz olarak kabul edilmiştir. Pervane yüzeyi yeni temizlenmiş olduğu kabulü yapılmıştır. Modellenen gemide planlı bakım tutumun uygun bir şekilde yapıldığı varsayımı yapılmıştır. Geminin oto pilot sisteminin verimli çalıştığı kabulü yapılmıştır. Ayrıca hesaplar feribotun tam yüklü olduğu durumlara göre yapılmıştır. Simulink modelinde ise bataryaların % 100 doluluk oranından derin deşarj noktasına kadar kullanıldığı kabulü yapılmıştır.

Gelecek çalışmalarda, sistem dinamikleri modeline dahil edilmemiş olan değişkenler eklenebilir. Örneğin, pervane yüzeyinin ve tekne yüzeyinin kirlilik yüzdelerinin değişimlerinin etkileri gözlemlenerek gelecek çalışmalarda incelenebilir. Ayrıca gemide planlı bakım tutum için bir ölçek oluşturularak, bu ölçeğin etkilerini inceleyen bir çalışma yapılabilir. Feribotun yük durumundaki değişimlerin etkilerini analiz eden başka bir çalışma da gelecekte yapılabilir. Sistemin sadece ağırlık yönünden değil hacimsel olarak da değerlendirmesi yapılabilir. Bunun yanı sıra ekonomik ve çevresel açıdan da karşılaştırmalar yaşam döngü analizi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Değişik yakıt pilleri ile sistem modellenerek yakıt pillerinin sistem üzerindeki etkisi de değerlendirilebilir. Bu çalışmada seçilen geminin gün içerisinde belirli bir rotada kısa seferler yapması sistemin karşılaştırılmasının sefer süresi üzerinden yapılmasını gerektirmiştir. Ancak daha uzun mesafelerde seyir yapan ticari gemiler içinde benzer çalışmalar yapılabilir. Yakıt pili, bataryalar ve fotovoltaik sistemlerin bir arada bulunduğu hibrit sistemlerin değerlendirildiği çalışmalar yapılabilir. Gemilerde kombine ısı ve güç sağlayacak yüksek sıcaklıkta çalışan EKYP ve KOYP için ayrıca bir sistem modeli yapılarak bu yakıt pillerinin uygunluğu karşılaştırılabilir. Matlab/Simulink modelinde yapılan bazı kabuller ve eksiklikler giderilerek sistemin gerçeğe daha yakın değerler verilmesi sağlanabilir. Gerçek bir sistemden alınan veriler ile bu modelin gerçeğe ne kadar yakın sonuç verdiği araştırılabilir ve eksiklikleri belirlenebilir (yakıt pili iç direncinin hesaba katılmaması gibi). Gemi yardımcı makinelerinin ihtiyaç duyduğu güç de ayrıca değerlendirilebilir.

Yakıt pilleri bataryalar ile birlikte gemilerin sevk edilmesinde ana tahrik ünitesi olarak kullanılabilir düzeye ulaşmıştır. Bu sistemlerin yaygınlaşması ile birlikte daha konforlu, sessiz, olabildiğince az düzeyde kirlilik üreterek ve doğaya saygılı bir şekilde seyir gerçekleştirilebilmesi olasılığı kuvvetlidir.

## KAYNAKLAR

- ABB (2010). *Azipod® CO product introduction*. 10 Haziran 2017, [https://library.e.abb.com/public/85d7a5e53e6a8e6ec12577e7002d2359/Azipod\\_CO\\_Product\\_Introduction\\_rev\\_C\\_LowRes.pdf](https://library.e.abb.com/public/85d7a5e53e6a8e6ec12577e7002d2359/Azipod_CO_Product_Introduction_rev_C_LowRes.pdf).
- Ådnanes, A. K. (2003). Maritime electrical installations and diesel electric propulsion. *ABB AS Marine and Turbocharging Tutorial Report*. 10 Haziran 2017, <http://img1.eworldship.com/2012/0913/20120913041849123.pdf>.
- Affolter, J. F. (2000). Swiss fuel cell passenger and pleasure boats. In *Proceedings European Fuel Cell Forum-Fuel Cells 2000* (pp. 10-14).
- Aharon, I., ve Kuperman, A. (2011). Topological overview of powertrains for battery-powered vehicles with range extenders. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 868-876.
- Alkaya, L., Behçet, R. ve İlkılıç, C. (2008). *Yakıt pilleri ve uygulama alanları*. 25 Temmuz 2017, <http://web.firat.edu.tr/daum/docs/63/11%20Yak%C4%B1t%20Pili-Rasim%20BEH%C3%87ET-%C3%B6dendi-5%20syf-67-71.doc>.
- Allen, S., Ashe, E., Gore, D., Woerner, J., ve Cervi, M. (1998). Marine applications of fuel cells: a multi-agency research program. *Naval Engineers Journal*, 110(1), 93-106.
- Ally, J., ve Pryor, T. (2007). Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems. *Journal of Power Sources*, 170(2), 401-411.
- Alptekin, E., ve Çanakçı, M. (2006). Biyodizel ve Türkiye'deki durumu. *Mühendis ve Makine*, 47(561), 57-64.
- Anderson, B. (1977). *Solar energy: fundamentals in building design*. New York:

McGraw-Hill.

Anderson, R., ve Anderson, R. C. (2003). *A short history of the sailing ship*. Courier Corporation.

Andújar, J. M., ve Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2309-2322.

Asimov, I. (2006). *Bilimler ve buluşlar tarihi*. İstanbul: İmge Kitabevi.

Aykut, A. Ş., (2016). *Yakıt pillerinin termo-ekonomik analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Barbir, F. (2012). *PEM fuel cells: theory and practice*. Jacobpura: Academic Press.

Bassham, B. A. (2003). *An evaluation of electric motors for ship propulsion*. <http://fourwinds10.com/resources/uploads/files/motors.pdf> adresinden erişildi.

Bayraç, N. H. (2011). Küresel rüzgar enerjisi politikaları ve uygulamaları. *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi Uludağ Journal of Economy and Society Cilt*, XXX(1), 37–57.

Bertaggia, R., ve Moi, E. (2009). The Veneto hydrogen cluster in Porto Marghera. 28 Temmuz 2017, <http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/documents/ga2009/Enzo-Moi-Veneto%20Hydrogen%20Cluster.pdf>.

Beşergil, B. (2014). *Yakıtlar yağlar*. Ankara: Gazi Kitabevi.

Bevan, A. I., Züttel, A., Book, D. ve Harris, I. R. (2011). Performance of a metal hydride store on the Ross Barlow'' hydrogen powered canal boat. *Faraday Discussions*.

- Bıyıkoglu, A. (2003). Yakıt hücrelerinin tarihsel gelişimi, çalışma prensipleri ve bugünkü durumu. *Gazi University Journal of Science*, 16(3), 523–542.
- Bilge, B. (2014). *Kaya gazı üretim tekniklerinin, taşınımlarının ve maliyetlerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce: Düzce Üniversitesi.
- Bischoff, M. (2006). Molten carbonate fuel cells: a high temperature fuel cell on the edge to commercialization. *Journal of Power Sources*, 160(2), 842-845.
- Book, D. (2013). Ross barlow hydrogen-powered canal boat. *FCH-JU: Fuel Cells & Hydrogen for maritime & harbour applications*.
- Bölat, V. (2013). *Aküler, temel kavramlar ve dikkat edilecek hususlar*. 7 Haziran 2017, <https://thgtr.com/akuler-temel-kavramlar-ve-dikkat-edilecek-hususlar>.
- BP (2015). *BP statistical review of world energy 2015*. 5 Mart 2017, [http://biomasspower.gov.in/document/Reports/BP statistical review-2015.pdf](http://biomasspower.gov.in/document/Reports/BP%20statistical%20review-2015.pdf).
- BP (2016). *BP statistical review of world energy June 2016*. 5 Mart 2017, <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>.
- Britannica (2017). *History of steam turbine technology*. 2 Ağustos 2017, <https://www.britannica.com/technology/turbine/History-of-steam-turbine-technology>.
- Büchi, F. N., Affolter, J. F., Camenzind, S., Chmielewski, N., Dietrich, P., Höckel, M. ve Santis, M. (2004). PEFC: Stacks, systems, and applications. *CHIMIA International Journal for Chemistry*, 58(12), 869–878.
- Casson, L. (2002). *Antik çağda denizcilik ve gemiler*. İstanbul: Homer Kitabevi.

- Chakraborty, S. (2017). *How the power requirement of a ship is estimated?* 20 Temmuz 2017, <http://www.marineinsight.com/naval-architecture/power-requirement-ship-estimated/>.
- Choi, C. H., Yu, S., Han, I.-S., Kho, B.-K., Kang, D.-G., Lee, H. Y., ... Kim, M. (2016). Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 3591–3599.
- Corey, G. P. (2010). *Introduction background to this report*. 7 Haziran 2017, <http://redflow.com/wp-content/uploads/2014/10/Garth-Corey-Assessment-I-State-of-ZBM-Development-for-RedFlow.pdf>.
- Coyle, R. G., ve Gardiner, P. A. (1991). A system dynamics model of submarine operations and maintenance schedules. *Journal of the Operational Research Society*, 453-462.
- Cropper, M. (2004). Fuel cells for people. *Fuel Cells*, 4(3), 236–240.
- Çelik, F. (2017). Gemi sevkine giriş, sevk şekilleri, pervane geometrisi, pervane çizimi, 26 Temmuz 2017, <http://www.yildiz.edu.tr/~fcelik/dersler/gemidirenci/PDF/7.%20Gemi%20Sevkine%20Giris.pdf>.
- Çubuğuuzun, T. (2006). *Gaz türbinli gemilerde ekserji ve termodinamik analiz*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dağhan, İ. H. (2010). *Bir yakıt pili-güneş pili sisteminin modellenmesi ve simülasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- de-Troya, J. J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C. ve Carral, L. (2015). Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1–14.

- Dedes, E. K., Hudson, D. A. ve Turnock, S. R. (2012). Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. *Energy Policy*, 40(1), 204–218.
- Denhoff, E. (2017). *Hydrogen & fuel cell applications: a canadian perspective*. 16 Nisan 2017, <https://www.iea.org/media/workshops/2014/hydrogenroadmap/5CHFCAEricDenhoff.pdf>.
- Department of Energy. (2017). *Types of fuel cells*. 31 Temmuz 2016, <http://energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>.
- Doppelbauer, M. (1822). The invention of the electric motor 1800-1854. *Philosophical Magazine*, 59.
- Divya, K. C. ve Østergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), 511–520.
- Earle, J. W. (2012). A Cycladic perspective on mycenaean long-distance exchanges. *Journal of Mediterranean Archaeology*, 25(1), 3-25.
- EIA. (2017). *EIA ari world shale gas oil basins logos map*. 29 Mart 2017, [https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/images/EIA\\_ARI\\_World\\_Shale\\_Gas\\_Oil\\_Basins\\_Logos\\_Map\\_092215\\_HighRes.jpg](https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/images/EIA_ARI_World_Shale_Gas_Oil_Basins_Logos_Map_092215_HighRes.jpg).
- Eichlseder, H., ve Klell, M. (2012). Brennstoffzellen wasserstoff in der fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung, 219-254.
- EİE (2017). *Güneş enerjisi potansiyel atlası*. 31 Mart 2017, <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>.
- Energy-observer. (2017). *Energy observer*. 24 Mayıs 2017, <http://www.energy-observer.org>.

observer.org/en/#home.

Euronews (2017). *100'de yüz yenilenebilir enerji kullanan Energy Observer teknesi Dünya'yı turlayacak*. 24 Mayıs 2017, <http://tr.euronews.com/2017/01/16/100-de-yuz-yenilenebilir-enerji-kullanan-energy-observer-teknesi-dunya-yi>.

Finn, E. (2005). *Hydrogen-powered sailboats set sail*. 24 Temmuz 2016, <http://www.popsci.com/military-aviation-space/article/2005-01/hydrogen-powered-sailboats-set-sail>.

Gas Infrastructure Europe (2017). *Small-scale LNG map*. 14 Mart 2017, <http://www.gie.eu/index.php/maps-data/gle-sslng-map> adresinden erişildi.

Gayberi, M. (2015). *Farklı koşullarda üretilen aktif karbonun hidrojen gazı depolama kapasitesinin gravimetrik yöntemle incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.

Google Haritalar (2017). 20 Temmuz 2017, <https://www.google.com.tr/maps/search/bostanlı+üçkuyular+vapur+/@38.4358935,27.0939152,14z/data=!3m1!4b1>.

Grimes, P. (2000, January). Historical pathways for fuel cells. The new electric century. *Battery Conference on Applications and Advances, 2000. The Fifteenth Annual* (pp. 41-45). IEEE.

Grove, W. R. (1839). Voltaic series and the combination of gases by platinum. *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science*, 14, 127–130.

Grove, W. R. (1843). On the gas voltaic battery. *Philosophical Transactions*, 133(1843), 91–112.

Guo, B., ve Ghalambor, A. (2014). *Natural gas engineering handbook* (2. Baskı). Houston: Elsevier.

- Güler, M., Tütünlü, F., Hancı, A., Demir, E., Torun Bilgiç, E., Bilgiç, M. ve Durak, S. (2015). *Enerji ve kömür raporu*. Ankara. [http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/22ed738b2c7ba36\\_ek.pdf](http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/22ed738b2c7ba36_ek.pdf).
- Gülmez, S., Aslantaş, R. ve Cerit, A. G. (2017). İzmir Körfezi'nde faaliyet gösteren vapurlarda kapasite kullanımının sistem dinamikleri yaklaşımı ile incelenmesi. 12. *Ulaştırma Kongresi*. Adana: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Gümüş, Ö. ve Altan, Y. (1995). *Petrolün tarihçesi ve Türkiye'de açılan petrol kuyuları*. T.C. Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. <http://www.pigm.gov.tr/images/dergilerimiz/Petrolun-Tarihcesi-ve-Turkiyede-Acilan-Petrol-Kuyulari.pdf>.
- Hall, P. J. ve Bain, E. J. (2008). Energy-storage technologies and electricity generation. *Energy Policy*, 36(12), 4352–4355.
- Hammou, K. T., (2017). One hundred passengers and zero emissions. 28 Temmuz 2017. [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Zemships\\_Brochure\\_EN.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Zemships_Brochure_EN.pdf)
- Handani, D. W., Ishida, K., Nishimura, S., ve Hariyanto, S. (2011). System dynamics simulation for constructing maintenance management of ship machinery. *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), IEEE International Conference on* (pp. 1549-1553).
- Holst, S. (2008). Origin of the Phoenicians: Interactions in the early Mediterranean region. *Proceedings of the Seventeenth Annual World History Association Conference*. Queen Mary College. london. June 29, 2008.
- Hybrid-Marine (2016). What is a hybrid? - hybrid electric marine propulsion. 3 Ağustos 2016, <http://www.hybrid-marine.co.uk/10.html>.

IEA (2012). *2012 Annual report*. 18 Nisan 2017, [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA\\_Annual\\_Report\\_publicversion.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA_Annual_Report_publicversion.pdf).

ISO 8217:2012 (2012). *Petroleum products — fuels (class F) — Specifications of marine fuels*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8217:ed-5:v1:en>.

Kadıoğlu, S. ve Tellioglu, Z. (1996). *Enerji kaynaklarının kullanımı ve çevreye etkileri*. 17 Haziran 2017, [http://www.emo.org.tr/ekler/63ea51eeb9eb4b9\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/63ea51eeb9eb4b9_ek.pdf).

Kakwani, R. M., Wilson Jr, R. P., ve Winsor, R. E. (1991). *Coal-fueled high-speed diesel engine development: Task 2, Market assessment and economic analysis*. Detroit: Detroit Diesel Corp.,

Kala, P. ve Hicks, M. (2004). Proposal for fuel cell and other clean-fuel powered ferries for Pearl Harbor (Uss Arizona Memorial). *30th Environmental and Energy Symposium & Exhibition*, 5 - 8 April 2004, San Diego, CA.

Kalsi, S. S., Gamble, B. B., Snitchler, G. ve Ige, S. O. (2006). The status of HTS ship propulsion motor developments. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*.

Kavak, K. (2013). *Dünyadaki enerji oyununu değiştiren yeni faktör: konvansiyonel olmayan petrol ve doğal gaz*. 27 Mart 2017, [http://www.turkakademisi.org.tr/usr\\_img/yayinlar/makaleler/makale\\_14\\_ena\\_1\\_kayagazi\\_kavak\\_son.pdf](http://www.turkakademisi.org.tr/usr_img/yayinlar/makaleler/makale_14_ena_1_kayagazi_kavak_son.pdf).

Kaya, N. (2015). *Hidrojen kullanan turbofanlı bir insansız hava aracının ekserjetik sürdürülebilirlik analizi*. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Kjartansson, S. (2011). *A feasibility study on lpg as marine fuel*. 24 Mart 2017, <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/158299.pdf>.

Konur, O. (2016). *Güneş enerjili teknelerde enerji verimliliğini artırma teknikleri*.

Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Kotb, M., Banwan, A., El-Gohary, M. M., ve Gaser, M. H. (2013). Marine applications of fuel cell as alternative power plant: case study. In *International Marine and Offshore Engineering Conference (IMOC 2013)*.

Kothari, C.R. (2004). Research methodology: methods and techniques, New Delhi: New Age International Limited.

Kumm, W. H. (1990). Marine and naval applications of fuel cells for propulsion: the process selection. *Journal of power sources*, 29(1-2), 169-179.

Kükner, A., ve Kaplan, C. (2016). Yenilenebilir enerji kaynakları ve alternatif sevk sistemlerinin yatlarda uygulanması. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 204-205, 73-88.

Larminie, J. ve Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained* (2. Baskı). West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.

Larsson, L. ve Eliasson, R. (2006). Yat tasarımı genel ilkeler. (Y. Yılmaz, Çev.). İstanbul: Birsan Yayınevi (Orjinal çalışma basım tarihi 2000).

Leiner, R. (2014). Solar radiation and water for emission-free marine mobility. *ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference*, 1425–1428.

Lele, A. ve Rao, K. V. S. (2016). Ship propulsion strategies by using wind energy. *2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT)* içinde (ss. 1–6). IEEE.

Lunze, J., ve Lamnabhi-Lagarigue, F. (Eds.). (2009). *Handbook of hybrid systems control: theory, tools, applications*. Cambridge University Press.

- Maeda, T., Yokoyama, K., Hisatome, N., Ishiguro, S., Hirokawa, K. ve Tani, T. (2006). *Fuel cell AUV "URASHIMA"*; Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. *Technical Review* (C. 43). 10 Ocak 2017, <https://www.mhi.com/company/technology/review/pdf/e431/e431024.pdf>.
- Mahmud, K., Morsalin, S., ve Khan, M. I. (2014). Design and fabrication of an automated solar boat. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 64(6), 31-42.
- Manzetti, S. ve Mariasiu, F. (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1004–1012.
- Maritimejournal (2007). “Emerald” green power at seaway. 27 Temmuz 2017, [http://www.maritimejournal.com/news101/power-and-propulsion/emerald\\_green\\_power\\_at\\_seaway](http://www.maritimejournal.com/news101/power-and-propulsion/emerald_green_power_at_seaway).
- Mathworks (2017). *Simulation and model-based design*. 31 Temmuz 2017, <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.
- McLean, G. F., Niet, T., Prince-Richard, S., ve Djilali, N. (2002). An assessment of alkaline fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(5), 507-526.
- McConnell, V. P. (2010). Now, voyager? The increasing marine use of fuel cells. *Fuel cells bulletin*, 2010(5), 12-17.
- Mench, M. M. (2008). *Fuel Cell Engines*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2017). *İllerimize ait genel istatistik verileri*. 20 Temmuz 2017, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=IZMIR>.

- Mevzuat Bilgi Sistemi (1998). *Türk boğazları deniz trafik düzeni tüzüğü*. 20 Temmuz 2017, <http://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/2.5.9811860.pdf>.
- Nadal, M., ve Barbir, F. (1996). Development of a hybrid fuel cell/battery powered electric vehicle. *International journal of hydrogen energy*, 21(6), 497-505.
- Nuran, M. (2015). *Gemi makineleri işletme mühendisliği ekonomisi: alternatif enerji kaynakları için karşılaştırmalı maliyet analizi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları.
- OPEC. (2017). *OPEC : brief history*. 4 Mart 2017, [http://www.opec.org/opec\\_web/en/about\\_us/24.htm](http://www.opec.org/opec_web/en/about_us/24.htm).
- Ovrum, E., ve Dimopoulos, G. (2012). A validated dynamic model of the first marine molten carbonate fuel cell. *Applied thermal engineering*, 35, 15-28.
- Owierkowicz, D., ve Malinowska, M. (2017). The future of the fuel in the marine industry. *World Scientific News*, 76, 136-148.
- Ölmez, H. (2016). *Alternatif bir enerji kaynağı: biyodizel*. 4 Ağustos 2016, <http://www.anorganik.org/wp-content/uploads/2014/11/biyodizel.pdf>.
- Pagliaro, M., Konstandopoulos, A. G., Ciriminna, R., ve Palmisano, G. (2010). Solar hydrogen: fuel of the near future. *Energy & Environmental Science*, 3(3), 279-287.
- Pamık, M., Nuran, M., ve Cerit, A. G. (2015). Gemi dizel makineleri için salım indirgeme teknolojileri: sistem dinamikleri yaklaşımı. *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, 7 (1), 55-74.
- Penner, S. S., Appleby, A. J., Baker, B. S., Bates, J. L., Buss, L. B., Dollard, W. J., ve Tarman, P. (1995). Commercialization of fuel cells. *Progress in Energy and Combustion Science*, 21(2), 145-151.

- Pike, B. (2016). *Duffy fuel cell boat*. 20 Temmuz 2016, <http://www.powerandmotoryacht.com/boat-tests/duffy-fuel-cell-boat>.
- Pindyck, R. S. (1979). *The structure of world energy demand* (No. 22, pp. 309-317). Cambridge, MA: Massachusetts: MIT press.
- Poullikkas, A. (2013). A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 778–788.
- Prestien, J. (2010). *Sshowphoto.aspx (800×552)*. 31 Mart 2017, <http://photos.marinetraffic.com/ais/showphoto.aspx?mmsi=218108000&size=>.
- Pulkrabek, W. W. (1997). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Platteville: Perason Prentice Hill.
- Queeney, T. (2003). *Are fuel cells poised to become a serious option for voyagers?* 16 Nisan 2017, <http://www.landfallnavigation.com/fuelcells.html>.
- Rampen, P., Meijer, C., Gunput, S., Pelaez-Carus, M., Bradley, T., Vugt, H. Van ve Higginbottom, A. (2013). *Energy Characteristics Modelling*. 27 Temmuz 2016, [http://www.narecde.co.uk/wp-content/uploads/2014/11/D3-1\\_INOMANS<sup>2</sup>HIP\\_M30\\_v2.pdf](http://www.narecde.co.uk/wp-content/uploads/2014/11/D3-1_INOMANS<sup>2</sup>HIP_M30_v2.pdf).
- Ren, H., ve Gao, W. (2010). Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan. *Energy and Buildings*, 42(6), 853-861.
- Riantini, R. (2010). *The maritime commons : challenges towards fuel cell adoption on board merchant ships*, MSc. Thesis, World Maritime University, Malmö.
- Runeson, P., ve Höst, M. (2009). Guidelines for conducting and reporting case study

- research in software engineering. *Empirical software engineering*, 14(2), 131.
- Sattler, G. (2000). Fuel cells going on-board. *Journal of Power Sources*, 86(1), 61–67.
- Sayyadi, R. ve Awasthi, A. (2017). A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. *International Journal of Modelling and Simulation*, 37(1), 25–35.
- Schulze, M. ve Gülzow, E. (2004). Degradation of nickel anodes in alkaline fuel cells. *Journal of Power Sources*, 127, 252–263.
- Sciberras, E. A., ve Norman, R. A. (2012). Multi-objective design of a hybrid propulsion system for marine vessels. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2(3), 148-157.
- Schoder, K., Hasanovic, A., ve Feliachi, A. (2003). PAT: a power analysis toolbox for MATLAB/Simulink. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1), 42-47.
- Scrosati, B. (2011). History of lithium batteries. *Journal of solid state electrochemistry*, 15(7-8), 1623-1630.
- Sembler, W. J., ve Kumar, S. (2011). *Fuel-cell hybrid systems to generate shipboard electrical power*. 25 Temmuz 2017, <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1139768>.
- Sharaf, O. Z., ve Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810-853.
- Shekhawat, D., Spivey, J. J. ve Berry, D. A. (2011). *Fuel cells: technologies for fuel processing*. Amsterdam: Elsevier.
- Singhal, S. C., ve Kendall, K. (2003). *High-temperature solid oxide fuel cells*:

*fundamentals, design and applications*. Amsterdam: Elsevier.

Skysails (2017). BBC chartering. 31 Mart 2017, [http://www.skysails.info/fileadmin/user\\_upload/Presselounge/BBC\\_SkySails/024\\_BBC\\_SkySails\\_300dpi\\_rgb.jpg](http://www.skysails.info/fileadmin/user_upload/Presselounge/BBC_SkySails/024_BBC_SkySails_300dpi_rgb.jpg).

Smil, V. (2008). *Energy in nature and society : general energetics of complex systems*. Massachusetts: MIT Press.

Smil, V. (2010). *Prime movers of globalization: The history and impact of diesel engines and gas turbines*. Massachusetts: MIT press.

Smithsonian Institute (2017), Allis-Chalmers fuel cell tractor. 27 Temmuz 2017, [https://www.si.edu/sisearch?edan\\_q=fuel%2Bcell%2Bhistory](https://www.si.edu/sisearch?edan_q=fuel%2Bcell%2Bhistory)

Sofuoğlu, E. (2014). *Kaya gazı devrimi ve olası ekonomik etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın.

Sørensen, B. (2011). *Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications* (2. Baskı). Jacobpura: Academic Press.

Specchia, S., Saracco, G., ve Specchia, V. (2008). Modeling of an APU system based on MCFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(13), 3393-3401.

Spiegel, C. (2007). *Designing and building fuel cells*. vol (87). New York: Mcgraw-hill.

Sterman, J. (2000). *Business dynamics : Systems thinking and modeling for a complex world*. USA: The McGraw-Hill Companies Inc.

Stone, R. (2012). *Introduction to internal combustion engines* (4. Baskı). Basingstoke: Palgrave Macmillan.

System Dynamics Society (2017). What is System Dynamics. 20 Temmuz 2017, <http://www.systemdynamics.org/what-is-s/>.

Şahoğlu, V. (2005). The Anatolian trade network and the Izmir region during the Early Bronze Age. *Oxford Journal of Archaeology*, 24(4), 339-361.

Talay, A. A., Deniz, C. ve Durmuşoğlu, Y. (2014). Gemilerde verimi arttırmak için uygulanan yöntemlerin CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmaya yönelik etkilerinin analizi. *Journal of ETA Maritime Science*, 2(23), 61–74.

Todorovic, M. H., Palma, L., ve Enjeti, P. N. (2008). Design of a wide input range DC–DC converter with a robust power control scheme suitable for fuel cell power conversion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(3), 1247-1255.

TPAO (2016). *Petrole dair merak edilenler*. 29 Kasım 2016, <http://www.tpao.gov.tr/tpfiles/userfiles/files/petrolmerak.pdf>.

Tronstad, T., Åstrand, H. H., Haugom, G. P., ve Langfeldt, L. (2017). Study on the use of fuel cells in shipping. *European Maritime Safety Agency*.

Ventana Systems Inc., 06 Nisan 2017. <http://vensim.com/vensim-software/#ple>

Vogler, F. ve Pelka, W. (2006). FC-systems on board of watercrafts an early market? (part 2). 31 Temmuz 2017, *International Conference and Trade Fair on Hydrogen and Fuel Cell Technologies, H2Expo 25-26 October 2006*. Hamburg: CCH Congress Centre. [http://h2yacht.com/2006-10-25%20FC-Systems%20on%20Board%20o%20f%20Watercrafts%20\(2\).pdf](http://h2yacht.com/2006-10-25%20FC-Systems%20on%20Board%20o%20f%20Watercrafts%20(2).pdf)

Vogler, F. ve Sattler, G. (2016). Hydrogen-fueled marine transportation. M. Ball, A. Basile ve T. N. Veziroğlu, (Ed.), *Compendium of Hydrogen Energy* içinde (35-65). Amsterdam: Elsevier.

- Wagner, N., Schulze, M. ve Gültow, E. (2004). Long term investigations of silver cathodes for alkaline fuel cells. *Journal of Power Sources*, 127(1), 264–272.
- Walker, G., Kentfield, J. A. C., Johnson, E. W., Fauvel, R., ve Srinivasan, V. (1983). Coal-fired Stirling engines for railway locomotive and stationary power applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Process Engineering*, 197(4), 233-246.
- Weaver, G., ve Barrett, S. (2003). Marine applications of fuel cell technology. *Fuel Cells Bulletin*, 2003(1), 11-12.
- Weaver, G. ve Reidy, R. (2002). *World fuel cells : an industry profile with market prospects to 2010*. Amsterdam: Elsevier.
- WEC (2010). *Biofuels: policies, standards and technologies*. 12 Mart 2016, [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/10/PUB\\_Biofuels\\_Policies\\_Standards\\_and\\_Technologies\\_2010\\_WEC.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/10/PUB_Biofuels_Policies_Standards_and_Technologies_2010_WEC.pdf).
- WEC (2013). *World energy resources 2013 survey*. 17 Mart 2016, [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete\\_WER\\_2013\\_Survey.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf).
- WEC (2016). *World energy resources natural gas*. 07 Nisan 2016, [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources\\_Natural\\_Gas\\_2016.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Natural_Gas_2016.pdf).
- Winkler, W. (2009). Ships: fuel cells. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 1, 338-358.
- Wirtschaft, Energie ve Umwelt. (2008). *Smart energy strategies: meeting the climate change challenge*. Zurich: vdf, Hochschulverlag AG an der ETH.

Yıldırım, Y. (2011). *Yakıt pilleri ders notları*. 25 Temmuz 2017, <http://cevre.beun.edu.tr/dersnotu/yakitpilleri/cev346-yakit-pilleri.pdf>.

Yılmaz, S. (2010). *Yakıt dönüştürücüde dönüştürülmüş doğalgaz yakıtlı katı oksitli yakıt pili dizini modellemesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.

